

Estabilização de blocos de terra com ligantes recuperados a partir da fração cimentícia de resíduos de betão – Caracterização mecânica e retração

Diogo Serrano Gonçalves

Dissertação para obtenção do Grau de Mestre em

Engenharia Civil

Orientador: Professor José Alexandre De Brito Aleixo Bogas

Júri

Presidente: Professora Maria da Glória de Almeida Gomes

Orientador: Professor José Alexandre De Brito Aleixo Bogas

Vogal: Professora Maria Paulina Santos Forte de Faria Rodrigues

Junho de 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.

**Estabilização de blocos de terra com ligantes
recuperados a partir da fração cimentícia de resíduos
de betão – Caracterização mecânica e retração**

Diogo Serrano Gonçalves

Dissertação para obtenção do Grau de Mestre em
Engenharia Civil

**Dissertação elaborada no âmbito do Projecto FCT
Eco⁺RCEB**

Eco-efficient recycled cement compressed earth blocks

Task 3 – Physical, mechanical and microstructural
characterisation of CSEB

Projeto PTDC/ECI-CON/0704/2021



Fundação
para a Ciência
e a Tecnologia

Agradecimentos

É com imensa felicidade que vejo chegar ao fim o meu percurso académico no Instituto Superior Técnico. Esta dissertação é o corolário de uma extraordinária caminhada nesta fabulosa Instituição de ensino, marcando o fim da etapa mais importante da minha vida. Agradeço, por isso, à instituição e a todos os professores que fizeram parte deste percurso e que tornaram a minha passagem pelo I.S.T. uma caminhada de formação e aprendizagem, tanto ao nível académico como humano.

Agradeço também ao meu orientador, o Professor Doutor José Alexandre de Brito Aleixo Bogas, por todo o auxílio, disponibilidade e acessibilidade demonstradas ao longo de todo o projecto, mas principalmente pela excelência de coordenação e orientação dos trabalhos.

Aos meus colegas de projecto, Martim Nabais e Ricardo Cruz, que participaram comigo neste estudo e sem os quais teria sido impossível concluir todo este trabalho com a qualidade apresentada.

Ao Professor Manuel Francisco, pelo apoio prestado durante a fase de produção do cimento reciclado e pela realização dos ensaios de DRX.

Ao Arquitecto Nuno Grenha, da Associação Cultural de Arte e Comunicação das Oficinas do Convento (ACOC) de Montemor-o-Novo, que cedeu o espaço para a produção dos blocos e pela orientação dada durante a produção dos mesmos.

Às investigadoras, Ana Chambel, pelo apoio prestado na fase inicial deste trabalho, e Sofia Real, fundamental na recta final da dissertação, nomeadamente pela disponibilidade demonstrada em oferecer apoio técnico em alguns dos procedimentos laboratoriais.

Aos técnicos do laboratório, Pedro Costa, Francisco Almeida e Jorge Pontes, por todo o auxílio prestado durante a realização dos vários ensaios laboratoriais.

E por fim, agradecer à minha família, pai, mãe e irmã, por todo o vosso apoio e paciência, mas acima de tudo por me manterem sempre focado e motivado naquilo que era realmente importante.

À minha avó, Maria, que sei que teria gostado muito de me ver com o canudo. Também foi por ti.

E aos meus amigos, sem os quais esta caminhada no técnico teria sido muito mais difícil.

Resumo

Atualmente, as preocupações ambientais assumem um papel de destaque nas sociedades contemporâneas. A construção em terra, mais concretamente as alvenarias de bloco de terra comprimida (BTC), é uma das técnicas construtivas capaz de dar resposta às crescentes preocupações ambientais. Com o objectivo de melhorar as propriedades dos BTC, tem sido estudada a incorporação de cimento neste tipo de blocos, e especialmente cimento reciclado, visando a sua estabilização química. O Instituto Superior Técnico tem sido pioneiro nesta área, e a presente dissertação tem como objectivo dar continuidade a esta linha de investigação.

Nesse sentido, foi realizada uma longa e complexa campanha experimental, que se iniciou com os ensaios de caracterização e a seleção da terra, seguiu-se todo o processo de produção de cimento reciclado, terminando com a produção e caracterização dos BTC, tanto no estado fresco, logo após a compactação das misturas, como no estado endurecido. Resumidamente, foram produzidos 3 grandes grupos de composições: uma estabilizada com cimento normal (CN), outra com cimento reciclado proveniente de pastas de cimento hidratado (CRP), e uma última composição de controlo, de blocos não estabilizados. As formulações consideradas variaram em diversos parâmetros, tais como: teor de ligante (0%, 5% ou 8%), taxa de substituição de CN por CRP (20%, 50% ou 100%), granulometria do cimento reciclado (CRP ou CRP fino – CRPF), ambiente de cura (ambiente laboratorial, saturado, cura húmida e seco em estufa) e teor de humidade. A caracterização dos BTC envolveu a realização dos seguintes ensaios laboratoriais: resistência à compressão, determinação da massa volúmica nos estados fresco e endurecido, resistência à tração, por compressão diametral e por flexão, medição da condutibilidade térmica, resistência superficial por esclerómetro pendular, módulo de elasticidade, retração por secagem, abrasão superficial e o ensaio de velocidade de propagação de ultrassons. Por fim, os resultados obtidos foram discutidos à luz de diferentes tipos de influência, como: teor de CRP, teor de humidade, incorporação de CRPF, teor de ligante, ambiente de cura, e interpretados tendo por referência estudos anteriores.

Em geral, verificou-se que os BTC estabilizados com cimento reciclado apresentaram bons resultados, destacando-se a maior resistência à compressão face aos BTC não estabilizados, menor retração face aos BTC estabilizados com CN e aos NE e maior módulo de elasticidade. Embora os BTC de referência (estabilizados com CN) tenham apresentado melhores resultados em grande parte dos ensaios realizados, constata-se que a adição de CRP é eficaz na estabilização química dos BTC. Assim, a incorporação de CRP resulta na produção de blocos de terra comprimida mais resistentes, constituindo-se como uma primeira abordagem ao desenvolvimento de uma técnica construtiva mais sustentável, sem prejuízo relevante do desempenho técnico destes materiais.

Palavras-Chave:

Blocos de Terra Comprimida; Cimento Reciclado; Caracterização Mecânica; Estabilização Química; Sustentabilidade.

Abstract

Nowadays, environmental sustainability have been on top of the list of modern day societies' concernings and Earth construction, more specifically the compressed earth blocks technique (CEB), can be one of the ways to invert the current situation in the construction sector which is known to be one of the most polluting economic activities. However, simple earth construction techniques lack of characteristics that could make them suitable to any type of exposure conditions. Thus, recently some studies have been delivered with the objective of evaluating the benefits of incorporating recycled cement in CEB mixtures, also known as Compressed Stabilized Earth Blocks (CSEB), at both environmental and technical performance levels. Instituto Superior Técnico have been one of the leading institutions on this field of study and the present dissertation aims to continue where previous works left off.

The present work started with an extensive and complex experimental programme which included the laboratory characterization and selection of the main raw material, earth samples, production of recycled cement (RC) and last the production and laboratory characterization of CSEB both at fresh and hardened states. Three main compositions of CEB were produced: blocks stabilised with ordinary Portland cement (OPC), blocks stabilized with RC and non stabilized blocks. It was considered some variations on the compositions such as binder content (0%, 5% or 8%), curing environment (air curing, oven dried, saturated and wet curing), incorporation of fine-grained RC, RC's content (20%, 50% or 100%) and water content. To better define and characterize the CEB produced the following laboratory tests were performed: compressive strength, evaluation of density in both fresh and hardened states, tensile strength whether by diametral compression or flexure, measurement of thermal conductivity, pendular sclerometer, modulus of elasticity, monitoring of shrinkage by drying, calculation of surface resistance through the surface abrasion test and the ultrasound propagation velocity test. The obtained results were discussed according to the influences considered at the CEB's composition level.

In general, the blocks stabilized with recycled cement showed good results specially on the compressive strength, shrinkage and modulus of elasticity tests. Although the blocks stabilized with OPC have shown better results in most of the tests carried out, it appears that the addition of recycled cement obtained from cement pastes (RCP) is effective at stabilizing the CEB. Thus, the incorporation of RCP results in the production of more resistant blocks, posing as a first approach to the development of a more sustainable construction technique without significant damage to the technical performance of these materials.

Keywords

Compressed Earth Blocks; Recycled Cement; Mechanical Characterization; Chemical Stabilization; Sustainability

Índice Geral

1	INTRODUÇÃO	1
1.1	CONSIDERAÇÕES GERAIS	1
1.2	OBJECTIVOS E METODOLOGIA	2
1.3	ORGANIZAÇÃO DA DISSERTAÇÃO	2
2	ESTADO DA ARTE	3
2.1	CONSTRUÇÃO EM TERRA: UMA PERSPECTIVA HISTÓRICA.....	3
2.2	A CONSTRUÇÃO E O DESAFIO AMBIENTAL	5
2.3	BLOCOS DE TERRA COMPRIMIDA (BTC)	6
2.4	SELEÇÃO DO SOLO	7
2.5	ESTABILIZAÇÃO DOS BTC.....	10
2.5.1	<i>Estabilização física</i>	11
2.5.2	<i>Estabilização mecânica</i>	13
2.5.3	<i>Estabilização química</i>	14
2.6	CIMENTO RECICLADO	15
2.6.1	<i>O cimento reciclado como alternativa ao cimento Portland</i>	16
2.6.2	<i>Produção e principais características do cimento reciclado</i>	16
2.7	BTC ESTABILIZADOS COM CIMENTO RECICLADO	19
2.8	SÚMULA DOS PRINCIPAIS DOCUMENTOS NORMATIVOS EXISTENTES.....	20
3	CAMPANHA EXPERIMENTAL	21
3.1	DESCRIÇÃO DA CAMPANHA EXPERIMENTAL.....	21
3.2	CARACTERIZAÇÃO DA TERRA	22
3.2.1	<i>Análise granulométrica</i>	23
3.2.2	<i>Estimativa do teor de argila e silte dos solos</i>	24
3.2.3	<i>Determinação da massa volúmica</i>	25
3.2.4	<i>Limites de consistência</i>	26
3.2.5	<i>Ensaio de compactação (Proctor)</i>	28
3.2.6	<i>Determinação da fração de matéria orgânica</i>	29
3.2.7	<i>Composição mineralógica dos solos</i>	30
3.3	SELEÇÃO DO SOLO	30
3.4	CARACTERIZAÇÃO DOS AGREGADOS RECICLADOS	32
3.4.1	<i>Análise granulométrica dos RCD</i>	32
3.4.2	<i>Composição do RCD1</i>	33
3.4.3	<i>Massa volúmica e absorção de água dos RCD</i>	34

3.4.4	<i>Seleção do RCD</i>	34
3.5	CARACTERIZAÇÃO DOS ESTABILIZANTES.....	35
3.5.1	<i>Cimento normal</i>	35
3.5.2	<i>Cimento reciclado</i>	36
3.5.2.1	Produção de CR	36
3.5.2.2	Caracterização do cimento reciclado	38
3.6	ESTUDO PRÉVIO - OPTIMIZAÇÃO DA QUALIDADE DOS BTC.....	41
3.6.1	<i>Trabalho experimental – Estudo prévio</i>	41
3.6.2	<i>Discussão de resultados do estudo prévio</i>	42
3.7	PRODUÇÃO DOS BTC.....	44
3.7.1	<i>Composição dos BTC</i>	44
3.7.2	<i>Preparação do solo para a produção dos BTC</i>	46
3.7.3	<i>Mistura, moldagem e cura dos BTC</i>	46
3.8	CARACTERIZAÇÃO DOS BTC	47
3.8.1	<i>Resistência à compressão</i>	48
3.8.2	<i>Resistência à tração por flexão</i>	49
3.8.3	<i>Resistência à tração por compressão diametral</i>	49
3.8.4	<i>Retração</i>	50
3.8.5	<i>Resistência por esclerómetro pendular</i>	50
3.8.6	<i>Velocidade de propagação de ultrassons (UPV)</i>	51
3.8.7	<i>Resistência à abrasão superficial</i>	51
3.8.8	<i>Módulo de elasticidade</i>	51
3.8.9	<i>Massa volúmica</i>	52
3.8.10	<i>Condutibilidade térmica</i>	52
4	ANÁLISE DE RESULTADOS	53
4.1	MASSA VOLÚMICA	53
4.2	RESISTÊNCIA À COMPRESSÃO	55
4.3	RESISTÊNCIA À TRAÇÃO	62
4.4	MÓDULO DE ELASTICIDADE	65
4.5	VELOCIDADE DE PROPAGAÇÃO DE ULTRASSONS	67
4.6	RETRAÇÃO	69
4.7	ESCLERÓMETRO PENDULAR	72
4.8	ABRASÃO SUPERFICIAL	73
4.9	CONDUTIBILIDADE TÉRMICA	74
5	CONCLUSÕES	77
5.1	CONCLUSÕES FINAIS	77
5.2	DESENVOLVIMENTOS FUTUROS	80

REFERÊNCIAS	82
ANEXO.....	A

Índice de Figuras

Figura 1: (a) Pirâmide do Sol de Teotihuacan; (b) Grande Muralha da China; (Pacheco Torgal et al., 2009) (c) Edifício de habitação, Lyon, França	3
Figura 2: Fuso granulométrico para produção de BTC estabilizados (ARS 670:1996) (Uzoegbo, 2019)	8
Figura 3: Classificação textural do solo (Serviço para a Conservação dos Recursos Naturais do Departamento de Estado da Agricultura dos E.U.A. (USDA)	8
Figura 4: Exemplo de curva de termoativação no fabrico de cimento reciclado. Adaptado de (Xuan & Shui, 2011)	18
Figura 5: Análise granulométrica - a) Preparação da amostra - almofariz e pilão com cabeça de borracha; b) série de peneiros (75mm-2mm); c) Série de peneiros (2mm-0,075mm)	23
Figura 6: Curvas granulométricas de cada amostra de terra	24
Figura 7: Resultado do método da jarra para cada amostra de terra; a) Amendonça; b) Baldios; c) Maja; d) Pinheiro	25
Figura 8: Determinação da massa volúmica - a) Calibração do picnómetro; b) picnómetros com água destilada e solo	26
Figura 9: Sequência de procedimento experimental – Limites de consistência. a) homogeneização da mistura; b) distribuição da mistura pela concha de Casagrande; c) execução do sulco	27
Figura 10: a) amostra – Limite de liquidez; b) amostra – Limite de plasticidade	27
Figura 11: Sequência procedimento experimental – Ensaio de compactação; a) amostra dividida em 3 partes iguais; b) molde cheio sem alonga; c) molde cheio com superfície alisada	29
Figura 12: Curva de compactação da terra “Amendonça”	29
Figura 13: Análise granulométrica – comparação com fuso granulométrico (XP 13-901, 2001)	31
Figura 14: Curvas granulométricas dos AR	33
Figura 15: Divisão do RCD nos seus diferentes constituintes – a) material cerâmico (Rb); b) betão e argamassa (Rc); c) material betuminoso (Ra); d) pedra natural (Ru);	33
Figura 16: Análise termogravimétrica dos cimentos CEM I 42.5 e CEM II/B-L 32.5	36
Figura 17: Produção de pasta de cimento hidratado – a) execução da mistura; b) preparação dos moldes cúbicos; c) colocação da mistura nos moldes	37
Figura 18: Produção de CR – a) moinho de maxilas; b) forno rotativo; c) moinho de bolas	37
Figura 19: Curvas Termogravimétricas	38
Figura 20: Ensaio de caracterização do CR – a) determinação da massa volúmica; b) avaliação da consistência; c) determinação de consistência de pasta normal e tempo de presa;	40
Figura 21: Influência do teor de água na produção de BTC com Baldios	43
Figura 22: Humidímetro de alta precisão	45
Figura 23: Produção dos BTC – a) peneiração do solo (malha de 8mm); b) colocação da mistura nos moldes; c) desmoldagem dos blocos;	46
Figura 24: Resistência compressão - A) esquema de ensaio; B) bloco após ensaio;	48
Figura 25: Resistência à tração por flexão- A) esquema de ensaio; B) bloco fracturado; C) Esquema ilustrativo do ensaio	49
Figura 26: Ensaio à tração por compressão diametral - A) esquema de ensaio; B) bloco fracturado; C) Esquema representativo do ensaio – alçado lateral	50
Figura 27: Ensaio de retração - A) bloco com pastilhas metálicas; B) equipamento utilizado	50
Figura 28: Esquema de ensaio – Módulo de Elasticidade	52

Figura 29 - Massa volúmica após cura ao ar (MV_{AC}) e após secagem (MV_{OD}) aos 28 dias em função do teor de estabilizante	54
Figura 30 – Relação entre a porosidade total, P_T , e a: a) massa volúmica fresca (MV_f); b) massa volúmica após secagem aos 28 dias ($MV_{28d,OD}$)	55
Figura 31 – Resistência à compressão aos 28 dias dos BTC, tendo em consideração diferentes condições de ensaio (Sat - saturado, OD – seco em estufa, AC – cura ao ar).	57
Figura 32 – Resistência à compressão aos 28 dias após cura ao ar ($f_{c,28d,AC}$) versus porosidade total, P_T	58
Figura 33 – Variação da resistência à compressão aos 28 dias após cura ao ar ($f_{c,28d,AC}$) e da porosidade total, P_T , com a percentagem de substituição de CN por CRP	59
Figura 34 – Evolução da resistência à compressão aos 28 dias após cura ao ar ($f_{c,28d,AC}$) de BTC com 8% de estabilizante (CRP ou CN) e BTC não estabilizados (NE).	60
Figura 35 – Resistência à compressão não confinada, $f_{cun,28d}$ aos 28 dias para diferentes condições de humidade (ao ar – AC; saturado – Sat; seco em estufa - OD)	61
Figura 36 – Comparação dos resultados obtidos no presente estudo em BTC com CN e CRP com o de outros autores produzidos com CN, tendo em consideração resistências não confinadas, $f_{c,un}$, ensaiadas no estado seco.	62
Figura 37 – Relação entre a resistência à compressão, f_{cm} , e a resistência à tração por flexão e compressão diametral, $f_{ct,sp}$, para condições de cura ao ar e aos 28 dias de idade.	63
Figura 38 – Resistência à tração por flexão, $f_{ct,r}$, e por compressão diametral, $f_{ct,sp}$, aos 28 dias de BTC curados ao ar	64
Figura 39 – Resistência à tração aos 28 dias após cura ao ar versus porosidade total, P_T : a) por compressão diametral ($f_{ct,sp}$); b) resistência à flexão ($f_{ct,r}$)	64
Figura 40 – Variação da resistência à compressão aos 28 dias após cura ao ar ($f_{c,28d,AC}$) e da porosidade total, P_T , com a percentagem de substituição de CN por CRP	65
Figura 41 – Módulo de elasticidade aos 28 dias após cura ao ar (E_{28d}) versus porosidade total, P_T	66
Figura 42 – Módulo de elasticidade (E_{28d}) versus resistência à compressão ($f_{c,28d}$), aos 28 dias e após cura ao ar	67
Figura 43 – Velocidade de propagação de ultra-sons aos 28 (UPV_{28d}), tendo em consideração diferentes condições de ensaio (Sat - saturado, OD – seco em estufa, AC – cura ao ar).	68
Figura 44 (a) – Velocidade de propagação de ultra-sons aos 28 (UPV_{28d}) versus resistência à compressão ($f_{c,28d}$), em condições de cura ao ar. (b) – Velocidade de propagação de ultra-sons aos 28 (UPV_{28d}) versus porosidade total (P_T), em condições de cura ao ar.	68
Figura 45 - Evolução da retração ao longo do tempo dos BTC	70
Figura 46 - Evolução da perda de massa (Δm) ao longo do tempo dos BTC, durante o ensaio de retração	71
Figura 47 – Evolução da perda de massa (Δm) versus a retração ao longo do tempo dos BTC	72
Figura 48: Índice esclerométrico (IE) dos BTC após cura ao ar	72
Figura 49: Índice esclerométrico versus resistência à compressão aos 28 dias ($f_{c,28d}$) dos BTC, após cura ao ar.	73
Figura 50: Coeficiente de abrasão (Ca) dos BTC após cura ao ar	73
Figura 51: Coeficiente de abrasão (Ca) versus Índice esclerométrico (IE_28d), após cura ao ar.	74
Figura 52: Coeficiente de abrasão (Ca) versus resistência à compressão aos 28 dias ($f_{c,28d}$) dos BTC, após cura ao ar.	74
Figura 53: Condutibilidade térmica medida para cada BTC ensaiado, em função das condições de cura	75
Figura 54 – Relação entre a condutibilidade térmica, λ , e a massa volúmica seca de diferentes materiais (BTC, betões, blocos), tendo em consideração diferentes autores	76

Figura 55 – Relação entre a condutibilidade térmica, λ_{oD} , e a porosidade total (P_T) de BTC, após secagem em estufa

76

Índice de Tabelas

Tabela 1: Construção com BTC - Vantagens e Desvantagens face à técnica de adobe (Silva, 2015)	7
Tabela 2: Limites recomendados de granulometria - vários autores. Adaptado de Silva (2015).	9
Tabela 3: Limites recomendados de consistência - Vários autores	9
Tabela 4: Síntese de critérios para produção de BTC	9
Tabela 5: Classificação dos níveis de pressão para produção de BTC (adaptado Uzoegbo (2019))	13
Tabela 6: Normas existentes para a construção em BTC (adaptado de (Neves, 2019))	20
Tabela 7: Normas utilizadas nos ensaios de caracterização das terras	23
Tabela 8: Constituição, em termos macroscópicos, das terras analisadas	24
Tabela 9: Frações granulométricas e classificação textural de cada amostra de terra pelo método da jarra	25
Tabela 10: Massa volúmica das partículas de cada amostra de terra	26
Tabela 11: Limites de consistência de cada amostra de terra	28
Tabela 12: Valores do TOA de cada amostra de terra	29
Tabela 13: Teor de matéria orgânica de cada amostra de terra	30
Tabela 14: Fases mineralógicas identificadas por difracção de Raio-X	30
Tabela 15: Resumo dos principais resultados obtidos para cada terra	31
Tabela 16: Fração de cada constituinte do RCD1	34
Tabela 17: Massa volúmica e valor de absorção de água dos AR	34
Tabela 18: Características CEM I/42,5R	36
Tabela 19: Propriedades físicas e mecânicas dos CRP	38
Tabela 20: Resultados do ensaio de termogravimetria	39
Tabela 21: Propriedades no estado fresco e resistência mecânica de argamassas com a/l de 0,67, produzidas com CRP ou CN	40
Tabela 22: Composições consideradas no estudo preliminar de produção de BTC	41
Tabela 23: Soma do quadrado do desvio da curva das misturas face à curva de referência de Fuller	42
Tabela 24: Principais resultados obtidos no seguimento do estudo prévio	42
Tabela 25: Composição dos BTC, para 25% de incorporação de RCD e porosidade total estimada, P_T	45
Tabela 26: Normas - Caracterização dos BTC	47
Tabela 27: Resumo do esquema de ensaios	48
Tabela 28: Resultados do ensaio de massa volúmica	53
Tabela 29: Resistência à compressão a diferentes idades e condições de ensaio (Sat - saturado, OD – seco em estufa, AC – cura ao ar)	56
Tabela 30: Resistência média à tração por flexão, $f_{ctm,r}$, e por compressão diametral, $f_{ctm,sp}$, aos 28 dias, após cura ao ar	62
Tabela 31: Módulo de elasticidade aos 28 dias (E_{28d}) de BTC curados ao ar	66
Tabela 32: Velocidade de propagação de ultra-sons (UPV) para diferentes condições de ensaio (Sat - saturado, OD – seco em estufa, AC – cura ao ar)	67
Tabela 33: Retração após 7 e 55 dias de BTC com diferentes teores e tipos de estabilizante	69

Símbolos e Abreviaturas

BTC – Blocos de Terra Comprimida

CN – Cimento Normal

CR – Cimento Reciclado

RCD – Resíduos da Construção e Demolição

IST – Instituto Superior Técnico

NE – Não Estabilizados

GEE – Gases com Efeito Estufa

CP – Cimento Portland

TOA – Teor Ótimo de Água (%)

LR – Limite de Retração

LP – Limite de plasticidade

LL – Limite de Liquidez

IP – Índice de Plasticidade

USDA – Departamento de Estado da Agricultura dos E.U.A.

a/l – Relação água/ligante

CEMBUREAU – Associação Europeia do Cimento

GCCA – Global Cement and Concrete Association

C₃S – Silicato Tricálcico

C₂S – Silicato Bicálcico

MEV – Microscópio de Varrimento Electrónico

PIM – Porosimetria por Intrusão de Mercúrio

IC – Calorimetria Isométrica

TG – Termogravimetria

DRX – Difração de Raio-X

AR – Agregados Reciclados

ACOC – Associação Cultural de Arte e Comunicação das Oficinas do Convento de Montemor-o-Novo

GeoLab-IST – Laboratório de Geociências e Geotecnologias do IST

LC-IST – Laboratório de Construção de Engenharia Civil do IST

CRP – Cimento Reciclado de Pasta

CRPF – Cimento Reciclado de Pasta Fino

WA₂₁ – Absorção de água após 24h (%)

DTG – Derivada da Termogravimetria

W_B – Teor de água Combinada não evaporada (%)

TW – Teor de água (%)

Δ^2 – Quadrado do Desvio

AC – do inglês “Air Curing” – Cura ao Ar

WC – do inglês “Wet Curing” – Cura Húmida
OD – do inglês “Oven-Dried” – Seco em Estufa
SAT – do inglês “Saturated” – Cura em Água (Saturado)
SEC – Cura Semi-seca
HR – Humidade Relativa (%)
 P_T – Porosidade Total (%)
 C_a – Coeficiente de Abrasão (cm^2/m)
 λ – Condutibilidade Térmica ($\text{W}/\text{m}\cdot^\circ\text{C}$)
a/c – Relação água/cimento
H/L – Rácio altura/largura
UPV – Velocidade de Propagação de Ultrassons (m/s)
IE – Índice Esclerométrico (mm)

1 Introdução

1.1 Considerações Gerais

A construção em terra é uma técnica construtiva com milhares de anos de utilização, e da qual encontramos exemplares espalhados um pouco por todo o mundo (Pacheco Torgal et al., 2009). Fruto das várias adaptações e evoluções tecnológicas, a construção em terra pode assumir diversas formas, como são exemplo a taipa, o adobe ou mais recentemente os blocos de terra comprimida. Este processo construtivo é uma das mais antigas técnicas vernaculares (Gomes et al., 2019), uma matéria-prima abundante, de fácil acesso, de origem natural e extraída de um local próximo do local de construção (Paula Junior et al., 2022). Para além da facilidade de execução da construção em terra, pelo menos em comparação com técnicas construtivas mais modernas, tem também grandes vantagens ao nível da eco-eficiência e sustentabilidade, contribuindo para a mitigação do impacto ambiental negativo originado pelo sector da construção (Paula Junior et al., 2022).

No entanto, a construção em terra carece de melhores propriedades físicas e mecânicas e elevada susceptibilidade à água, tornando-a mais adequada para diversos ambientes de exposição e condições de aplicação mais exigentes. Para tal, é necessário promover a estabilização da terra, quer pela via física (por adição de fibras vegetais ou sintéticas) e mecânica (por compactação), quer pela via química, recorrendo a materiais que reajam quimicamente com a terra e promovam a melhor ligação e aumento de coesão entre partículas. Os blocos de terra comprimida (BTC) tiram partido da estabilização mecânica para garantir produtos em terra de melhor qualidade e menor variabilidade (Cid-Falceto et al., 2012; Rigassi, 1985). Por sua vez, a estabilização química destes elementos permite um aumento significativo da sua resistência à água (Reddy BVV, 2012), sendo o cimento normal (CN) o material mais eficiente e usualmente considerado na estabilização dos BTC (Bogas, Silva e Gomes, 2019; Rigassi, 1985). Porém, a produção do cimento está associada a uma elevada pegada ecológica, sendo responsável por até cerca de 8% das emissões globais de CO₂ (Boden et al., 2020). Desse modo, a estabilização dos BTC pela via da adição de cimento altera a sua natureza ecológica, fazendo aumentar de forma preocupante a sua energia primária, aproximando-a de outros materiais como os blocos de betão ou cerâmicos, cujo desempenho mecânico e de durabilidade tende a ser superior (Schroeder, 2012). Assim, torna-se essencial encontrar alternativas à estabilização dos BTC com cimento, tendo-se ainda a preocupação de garantir que o seu desempenho não é significativamente afectado.

O cimento reciclado (CR) é um ligante que tem sido recentemente explorado no sentido de reduzir as necessidades de utilização de clínquer primário, directamente produzido a partir de matérias-primas naturais carbonatadas (Bogas et al., 2022). A ideia consiste na reidratação de pasta hidratada existente nos resíduos de construção e demolição (RCD), através de um processo controlado de termoactivação, fechando o ciclo de produção e utilização do cimento. Potencialmente, este procedimento permite reduzir em mais de 60% as emissões de CO₂ (Real et al., 2022), e ao mesmo tempo reutilizar RCD, evitando a sua deposição em aterro, e diminuir o consumo de matérias-primas, que excede 1.5 toneladas por tonelada de clínquer (F. W. Taylor, 1996). Desde 2018, a produção e caracterização de CR, bem como o estudo da sua incorporação em betão, tem sido alvo de intensa

investigação no IST, demonstrando-se que este ligante tem grande capacidade de reidratação e de funcionar como uma adição activa ao CN (Bogas, Carriço, et al., 2022; Carriço, Bogas, et al., 2020a; Real et al., 2021). A utilização de CR na estabilização de terra, mais concretamente na produção de BTC, foi iniciada num trabalho exploratório de Azevedo (2021), envolvendo soluções não optimizadas com 5 e 10% de CR. Nesse trabalho foi possível concluir que é viável a estabilização de BTC com CR, embora sejam necessários estudos adicionais de caracterização e de análise do comportamento e eficiência do CR nos BTC. No presente trabalho pretende-se dar continuidade aos estudos iniciados no domínio da estabilização de terra com CR, no âmbito do projecto de investigação *Eco+RCEB* – “*Eco-efficient recycled cement compressed earth blocks*”, ref. PTDC/ECI-CON/0704/2021. A vertente da resistência à água foi iniciada no decorrer da presente dissertação.

1.2 Objectivos e metodologia

O principal objectivo deste trabalho consiste em avaliar o desempenho mecânico e de retracção de blocos de terra comprimida (BTC) produzidos com diferentes tipos de incorporação parcial ou total de cimento reciclado.

Tendo por base uma extensa campanha experimental, BTC produzidos com diferentes teores de CR (5%, 8%), obtido a partir de resíduos de pasta termoactivado a 650°C, foram caracterizados em termos das suas principais propriedades no estado fresco e endurecido, nomeadamente massa volúmica, velocidade de ultrassons, resistência mecânica (resistência à compressão e resistência à tracção por flexão e compressão diametral), módulo de elasticidade, retracção por secagem, resistência à abrasão, ultrassons, dureza superficial (esclerómetro pendular) e condutibilidade térmica. Numa fase inicial, o trabalho envolveu a produção de resíduos de pasta e CR, a caracterização e seleção de diferentes solos, e a caracterização e seleção de RCD a utilizar em substituição parcial de solo. Esta fase foi culminada com o desenvolvimento de um estudo de formulação, com vista à produção optimizada de BTC. Finalmente, procedeu-se à produção e caracterização dos blocos. No mesmo trabalho foi ainda analisado a influência da substituição parcial de CN por diferentes percentagens de CR (20, 50, 100%), de distintas condições de cura (ao ar, humida) e de ensaio (ao ar, saturado, seco), da finura do CR e do teor em água dos BTC. Para efeitos de comparação foram caracterizados BTC de referência com cimento normal (CN) e não estabilizados (NE). Com a realização deste trabalho espera-se contribuir para o desenvolvimento de uma nova geração de materiais de base cimentícia de maior sustentabilidade, visando atingir soluções economicamente e ecologicamente mais eficientes. Como referido, o trabalho foi realizado no âmbito do projecto *Eco+RCEB*, contando com a colaboração de outros dois colegas, um aluno de mestrado e outro de doutoramento, a desenvolverem igualmente trabalho neste domínio.

1.3 Organização da dissertação

O presente trabalho está organizado em 5 capítulos. Os primeiros e últimos capítulos referem-se, respectivamente, à introdução e conclusão. O segundo capítulo faz uma breve síntese do estado da arte relacionado com o tema da presente dissertação. Os capítulos 3 e 4 constituem-se como os capítulos principais desta dissertação, sendo o capítulo 3 o de descrição da campanha experimental e o capítulo 4 relacionado com a análise e discussão dos resultados.

2 Estado da Arte

No presente capítulo apresenta-se um breve resumo de estado da arte relativo à construção com blocos de terra comprimida, visando o desenvolvimento de soluções de maior sustentabilidade para a indústria da construção. Inicialmente, aborda-se a construção em terra, em geral, e o ressurgimento do seu interesse na indústria da construção. Posteriormente, focam-se alguns dos aspectos mais relevantes da técnica de construção por blocos de terra comprimida e da importância e função da estabilização. Finalmente, com vista a garantir a natureza ecológica da construção em terra, abordam-se algumas das soluções que têm sido propostas para a sua estabilização mais sustentável, e introduz-se o objectivo principal do presente trabalho, que foca a utilização do cimento e agregado reciclado na sua concepção.

2.1 Construção em terra: uma perspectiva histórica

A construção em terra remonta desde há muitos milénios, tendo desempenhado um papel importante no desenvolvimento das nossas sociedades. Naturalmente, a terra, sendo uma matéria-prima universal, de elevada abundância e acessibilidade, levou a que este tipo de construção assumisse um papel preponderante em muitas regiões do globo face a outras técnicas construtivas. O início da utilização da terra enquanto material de construção não é unânime entre os diversos autores. No entanto, a descoberta de construções em alvenaria de terra, técnica conhecida como adobe, datadas de 8 000 a 6 000 a.C., na região do atual Turquemenistão, sustenta a hipótese apresentada por (Minke, 2009) de que a construção em terra se tenha iniciado há cerca de 9 000 anos, coincidindo com o início do neolítico e a sedentarização. Outros autores, como (Berge et al., 2009), afirmam que os exemplares mais antigos de adobe datam de há 7 500 a.C, o que significa que a construção em terra ter-se-á iniciado há cerca de 10 000 anos.

Uma das principais vantagens deste sistema construtivo é o facto de se tratar de uma técnica vernacular, isto é, que recorre a materiais construtivos disponíveis no próprio local de construção (Gomes et al., 2019). Como tal, fruto das diferenças culturais entre povos, existem, portanto, vários tipos de construção em terra, tais como templos religiosos, estruturas de defesa ou, simplesmente, edifícios de habitação civil, de que são exemplos a Pirâmide do Sol de Teotihuacan (Figura 1(a)), no México, a grande muralha da China (Figura 1(b)), ou um exemplo mais recente como é um dos edifícios de habitação (Figura 1(c)), na cidade francesa de Lyon, região reconhecida pelo seu vasto património de construção em terra.



Figura 1: (a) Pirâmide do Sol de Teotihuacan; (b) Grande Muralha da China; (Pacheco Torgal et al., 2009) (c) Edifício de habitação, Lyon, França

Devido às características intrínsecas da terra, esta é afectada pela pluviosidade e temperatura, tanto a nível mecânico como de durabilidade. Nesse sentido, existe uma maior predominância da

construção em terra nas regiões mais secas do globo e com uma temperatura mais elevada, como são os casos do Norte de África, Médio Oriente e América Central (Pacheco Torgal et al., 2009).

Existem vários tipos de técnicas construtivas em terra que podem ser agrupadas em três grandes grupos: construção monolítica, que consiste em executar *in-situ* um elemento contínuo de terra, como é exemplo a taipa; construção em alvenaria, onde se utilizam blocos de terra pré-fabricados, como são exemplos o adobe e, mais recentemente, os blocos de terra comprimida (BTC); construção por enchimento e revestimento, que consiste em revestir um suporte engradado de madeira com terra, como é o caso do Tabique (Gomes et al., 2019).

Relativamente ao panorama português, pensa-se que a construção em terra tenha sido introduzida com maior importância pelos romanos e depois pelos povos muçulmanos, aquando da invasão da Península Ibérica (Pacheco Torgal et al., 2009). Atualmente, a construção em terra existe, principalmente, nas zonas Centro e Sul do país, como no Alentejo e no Algarve. Existem também registos de edificações em terra na região Norte, mais concretamente na Beira Litoral, Baixo-Douro e em Trás-os-Montes. De acordo com Gomes et al. (2019), em Portugal, as técnicas mais utilizadas são a taipa, o adobe e o tabique, sendo a taipa mais predominante nas regiões Centro e Sul do país e o adobe na região Litoral Centro.

Apesar de a terra apresentar vários benefícios ambientais, esta foi sendo progressivamente substituída por materiais construtivos tecnologicamente mais avançados, de fabrico industrial e de características padronizadas, e associados a maior desempenho mecânico e de durabilidade, como o betão armado ou o tijolo cozido (Gonçalves, 2016). Isso resulta também numa perda de mão-de-obra especializada. Contudo, com a crescente procura por materiais e técnicas construtivas mais sustentáveis e ecológicas, a construção em terra tem vindo a ganhar novamente relevância na indústria da construção. Por oposição aos materiais mais modernos e tecnologicamente mais avançados, a construção em terra apresenta várias vantagens em termos de sustentabilidade, tais como: baixa energia incorporada, elevado potencial de reciclabilidade e matéria-prima super-abundante e acessível (Paula Junior et al., 2022). Adicionalmente, as edificações em terra apresentam, também, um elevado conforto higrotérmico e uma boa qualidade do ambiente interior (Hall et al., 2012a). Tais características fazem deste sistema construtivo uma solução sustentável e de reduzido impacto ambiental, tornando-se competitivo face às restantes alternativas.

Nos dias de hoje, a implementação de diversos métodos de estabilização do solo, como são exemplo a adição de fibras ou de ligantes cimentícios, permitiu melhorar as características de durabilidade e resistência mecânica das construções em terra, aproximando-a, em termos técnicos, a técnicas construtivas mais modernas. O tema da estabilização, que é o principal foco deste trabalho, será abordado em 2.5. Perspetiva-se que, dada a crescente problemática das alterações climáticas nos países desenvolvidos se comece a observar uma melhor aceitação da construção em terra, nomeadamente em moradias familiares ou outras construções de pequeno porte (Hall, Lindsay, et al., 2012). Para tal, é fundamental que se consiga industrializar este processo construtivo, através da sua mecanização e da redução dos tempos de processamento, não esquecendo a vertente ecológica deste material (Hall, Lindsay, et al., 2012).

2.2 A construção e o desafio ambiental

Atualmente, o setor da construção enfrenta vários desafios, sendo um dos mais urgentes a redução do seu impacto ambiental. A crescente preocupação das sociedades civis em relação às alterações climáticas tem forçado os agentes económicos deste sector, empresas e investigadores, a procurarem novas soluções construtivas e materiais cada vez mais sustentáveis. Nas próximas décadas, a indústria da construção terá de procurar formas de mitigar as consequências ambientais da sua actividade, atuando em várias frentes, nomeadamente: explorar os recursos naturais da terra de forma sustentável, por oposição à atual exploração intensiva; diminuir a emissão para a atmosfera de gases poluentes, provenientes, na sua maioria, das fábricas de produção de materiais de construção, como é o caso das cimenteiras; implementar o conceito de economia circular através da incorporação de resíduos da construção e demolição em novas construções ou materiais (Paula Junior et al., 2022; Vieira et al., 2016). No entanto, do ponto de vista técnico, estas novas soluções devem ser viáveis, sem prejudicar de forma significativa a resistência mecânica e a durabilidade das novas construções.

Conforme mencionado, a construção civil é das atividades económicas com maior responsabilidade na escassez de recursos naturais e na emissão para a atmosfera de gases com efeito estufa (GEE). Segundo Kamali et al. (2019), a indústria da construção contribui com cerca de 39% das emissões de CO₂ emitidos para a atmosfera, a nível global, e é responsável por 40%-60% do esgotamento de recursos naturais. Neste contexto, a indústria cimentícia e do betão é a que mais contribui para o impacto atual, registando-se um consumo anual de 13 mil milhões de toneladas de betão, dos quais cerca de 70%-80% desse volume corresponde a agregados minerais (inertes) (Alexander e Mindess, 2005). Outro dos problemas da construção prende-se com a gestão dos resíduos resultantes da sua operação. Reporta-se que estes resíduos correspondam a cerca de 30%-35% dos resíduos totais produzidos anualmente, contabilizando todas as atividades económicas (Xia et al., 2020). Assim, tendo em conta este cenário, é imperativo explorar novos materiais e técnicas construtivas que permitam caminhar para práticas mais sustentáveis na construção.

Vários estudos têm sido desenvolvidos no sentido de recuperar e aprimorar as técnicas construtivas em terra, visto que se trata de um material natural, muito abundante, de fácil acesso, com reduzida energia incorporada e excelente desempenho térmico, resultante da sua elevada inércia térmica (Paula Junior et al., 2022). O conceito de energia incorporada corresponde ao somatório de todos os consumos energéticos necessários para produzir um determinado bem ou serviço. No caso da terra, este somatório é bastante reduzido, uma vez que se trata de um material natural em que, na maioria dos casos, não necessita de gastos energéticos afectos ao transporte, pois o local de extração é próximo do local de consumo.

Entre as técnicas de construção em terra, os BTC, que são abordados em 2.3 e são o alvo do presente trabalho, novas abordagens à estabilização da terra passa pela utilização inovadora de ligantes desenvolvidos destacando-se pelo seu melhor controlo de produção, menor variabilidade das suas propriedades, e pelas características mecânicas e de durabilidade melhoradas, que beneficiam da estabilização mecânica a que são sujeitos (Silva, 2015). Contudo, o desempenho dos BTC, quando constituídos apenas por terra, sem serem sujeitos a estabilização química, pode ser significativamente reduzido, quer em termos de resistência mecânica quer de durabilidade. Uma das formas de melhorar

o desempenho da construção em terra passa por estabilizá-la através da incorporação, na sua composição, de novos materiais, de que se destaca o cimento Portland (CP) corrente, conforme abordado em 2.5.3.1. Porém, este procedimento contraria a natureza ecológica e a filosofia sustentável da construção em terra. Para ultrapassar esta barreira, uma das abordagens passa pela incorporação de cimento reciclado, conforme será explorado no presente trabalho. Isso resulta de uma nova linha de investigação desenvolvida no departamento de engenharia civil do IST, que visa a produção de produtos de base cimentícia mais verdes a partir do desenvolvimento e incorporação de ligantes reciclados (<https://cdwvalue.eu>). Como referido, o presente trabalho faz parte de um projecto de investigação da FCT (PTDC/ECI-CON/0704/2021 - Eco+RCEB), que tem por objectivo a produção de BTC com incorporação de cimento reciclado (CR). O carácter sustentável dos BTC pode ainda ser melhorado com a incorporação de RCD na sua fase de agregado, tal como é igualmente explorado neste trabalho, e também faz parte dos objectivos do respectivo projecto de investigação.

A conciliação de uma matéria-prima natural, como é a terra, com a incorporação de CR e de RCD permite caminhar para o ambicioso objectivo de se atingirem soluções construtivas próximas da neutralidade carbónica.

2.3 Blocos de terra comprimida (BTC)

A técnica dos BTC é a evolução moderna dos blocos de adobe (Mansour et al., 2016), dado que a compactação mecânica da mistura de solo permite obter blocos com maior resistência mecânica e durabilidade.

Tal como abordado em 2.5.2, a compactação da mistura de solo é uma etapa fundamental do processo de produção dos BTC. A força de compressão exercida sobre o solo conduz a um rearranjo mais eficaz das partículas sólidas da mistura, obrigando-as a ocuparem os espaços vazios no interior dos blocos. Como resultado, diminui o volume de vazios e aumenta a massa volúmica dos BTC. Assim, a superfície de contacto entre as partículas sólidas é maior e, em sentido inverso, a porosidade é menor. Na prática, observa-se um aumento da compacidade e conseqüentemente da rigidez e da resistência mecânica (Silva, 2015). Ao nível da durabilidade, a diminuição da porosidade e do volume de vazios conduz a uma diminuição da percolação e ao aumento da resistência à erosão superficial provocada pela água (Santos, 2012). Portanto, a massa volúmica é um dos parâmetros que melhor permite avaliar, ainda que indiretamente, a durabilidade dos BTC. Contudo, apesar dos claros benefícios da estabilização mecânica do solo, apenas a estabilização química garante condições razoáveis de durabilidade e resistência à água (Bogas et al., 2018).

Outro aspeto que deverá ser tido em conta é o conforto térmico e acústico no interior das edificações. Face aos blocos de adobe, a diminuição do volume de vazios nos BTC, que implica um aumento da sua massa volúmica, leva à diminuição das características de isolamento térmico, mas pode aumentar a sua inércia térmica e a sua capacidade de isolamento a sons aéreos.

Para além de um acabamento liso, que dispensa a aplicação de revestimento, os blocos de terra comprimida apresentam regularidade dimensional e versatilidade no modo de aplicação em obra, podendo ter função estrutural ou de enchimento (Silva, 2015). Outro aspeto relevante é o facto de ser possível standardizar este método de construção por blocos, o que reforça o controlo de qualidade na

produção e nas edificações. Na Tabela 1 encontram-se resumidas algumas das vantagens e desvantagens da construção com BTC face à técnica de construção em adobe.

Tabela 1: Construção com BTC - Vantagens e Desvantagens face à técnica de adobe (Silva, 2015)

Vantagens	Desvantagens
Armazenamento mais eficiente. Os BTC podem ser empilhados e transportados logo após a sua produção, não necessitando de qualquer período de secagem ao sol;	O processo de produção dos BTC é mais exigente que o dos blocos de adobe, uma vez que exige a utilização de equipamento especializado, como a prensa (manual ou hidráulica). A produção de blocos de adobe é, essencialmente, um processo manual;
Facilidade de aplicação em obra. A execução de paredes em BTC é em tudo semelhante ao processo de execução de paredes com tijolo corrente. Por comparação com os restantes sistemas construtivos em terra, a aplicação dos BTC em obra é mais simples e mais expedita;	Os BTC são mais pesados que os blocos de adobe, o que pode dificultar o transporte dos mesmos;
Estabilidade dimensional. Contrariamente aos blocos de adobe que durante o processo de secagem podem reduzir de dimensões devido à evaporação da água, os BTC mantêm as dimensões originais;	As dimensões dos BTC estão limitadas às dimensões dos moldes disponíveis para cada prensa;
Menor exigência de água, face a outras técnicas. A determinação do teor ótimo de água é fundamental para assegurar a maximização da compacidade dos blocos;	Inexistente normalização e uniformização dos processos de caracterização física e mecânica dos BTC, bem como do seu processo de produção
Maior durabilidade e maior resistência mecânica. Novamente, a compactação da mistura de solo é um processo de estabilização mecânica dos blocos, conferindo-lhes melhor desempenho técnico, por comparação com as restantes técnicas construtivas em terra;	

2.4 Seleção do solo

De forma resumida, pode-se descrever o processo de formação dos solos como sendo o resultado da alteração física e/ou química das rochas por ação de agentes atmosféricos, chuva e vento, principalmente, ação de agentes biológicos (animais e plantas) e por alteração mecânica (fracturação sucessiva), que conduz à desagregação e decomposição das rochas superficiais. Após o processo de erosão, as partículas rochosas tanto podem depositar-se num meio próximo da rocha que lhes deu origem, formando os chamados solos residuais, como podem ser transportadas pelo vento, pela água, ou por ação da gravidade, até se depositarem em meio natural, formando os chamados solos transportados (Reddi et al., 2012). Nestas zonas de depósito, e durante o processo de formação e desenvolvimento do solo, podem ocorrer os seguintes fenómenos: perdas de material, alteração de propriedades químicas ou de características morfológicas, e, também, adição de novos materiais, sejam eles minerais ou biológicos. Estes processos contribuem para que os solos apresentem uma elevada heterogeneidade, o que se pode traduzir numa grande variabilidade na sua constituição, diferentes colorações, variedade granulométrica, propriedades mecânicas variáveis, entre outros (Lima e Lima, 2007). Portanto, a heterogeneidade é a característica mais marcante dos solos, e, assim, a que mais pode condicionar o desempenho dos materiais de construção daí resultantes, como é o caso dos Blocos de Terra Comprimida (BTC), objeto de estudo desta dissertação.

Todas as características e propriedades que tornam os BTC um bom material de construção são fortemente condicionadas pela qualidade de seleção da principal matéria-prima: o solo. A seleção do solo é, então, um dos passos mais importantes na produção dos BTC, pois permite controlar a montante as características que se espera que os blocos apresentem.

Nesta fase, é fundamental avaliar os parâmetros que podem influenciar a produção, o comportamento mecânico e a durabilidade dos blocos, escolhendo, para tal, o solo que melhor se adequa aos requisitos exigidos, tendo em consideração ou não a sua eventual estabilização com outros materiais. A granulometria, o teor de matéria orgânica, o teor e tipo de argila e silte, avaliado pelos limites de consistência (ou Limites de Attenberg) e o teor óptimo de água (TOA) são parâmetros condicionantes do solo que afectam o comportamento dos BTC. Assim, os principais documentos guia neste domínio definem limites para estes parâmetros, permitindo classificar um solo como adequado para a produção de BTC (Uzoegbo, 2019). Esses limites são definidos em função de se proceder ou não à estabilização do solo, conforme discutido em 2.5.

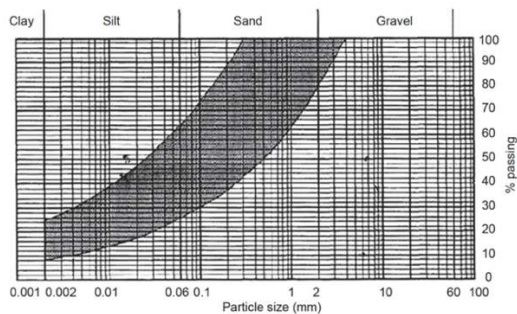


Figura 2: Fuso granulométrico para produção de BTC estabilizados (ARS 670:1996) (Uzoegbo, 2019)

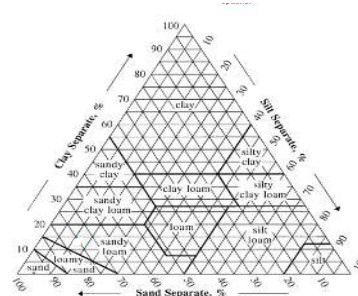


Figura 3: Classificação textural do solo (Serviço para a Conservação dos Recursos Naturais do Departamento de Estado da Agricultura dos E.U.A. (USDA))

O teor de matéria orgânica deve ser controlado logo no momento de recolha do solo, se se remover a camada superficial de espessura aproximadamente igual a 0,5m (Uzoegbo, 2019), antes da extração da terra destinada à produção dos BTC. Para a produção de BTC é indesejável que o solo utilizado contenha elevados teores de matéria orgânica, pois esta vai decompondo-se ao longo do tempo deixando espaços vazios no interior dos blocos. Para além disso, a matéria orgânica está associada a elevada exigência de água e fraca capacidade resistente, dificultando ainda a ligação do ligante. Assim, a presença de matéria orgânica contribui para a produção de blocos de menor resistência mecânica e durabilidade. Assim, não se dispensa a determinação do teor de matéria orgânica, pois é fundamental garantir que não é muito elevado.

Relativamente à granulometria, é importante garantir que a curva granulométrica do solo seja tão extensa quanto possível, de maneira a maximizar a compacidade dos blocos, visto que a sua resistência mecânica depende fortemente deste parâmetro (Malkantheni et al., 2021). Uma curva granulométrica mais extensa garante que existe uma boa complementaridade entre as partículas mais grossas e as partículas mais finas, pois as segundas vão ocupar os espaços vazios entre as primeiras, diminuindo o volume de vazios e aumentando a compacidade dos blocos. Vários autores e organizações sugerem diferentes abordagens. Por exemplo, a *African Standards Organisation* (ARS 670:1996) (Uzoegbo, 2019) recomenda que a curva granulométrica do solo se situe dentro do fuso

granulométrico apresentado na Figura 2. Por outro lado, vários autores têm sugerido outras abordagens, conforme apresentado na Tabela 2.

Tabela 2: Limites recomendados de granulometria - vários autores. Adaptado de Silva (2015).

Autor	Granulometria			
	%Seixo	%Areia	%Argila+%silte	Obs.
(Rigassi, 1985)	0-40	25-80	18-55	Terra não estabilizada
(Barbosa, 1996)	-	50-70	20-40	Terra não estabilizada
(Delgado e Cañas, 2007)	-	-	20-47	Terra não estabilizada
(Burroughs, 2008)	-	<64	20-35	Terra estabilizada
(Silva, 2015)	0-30	25-70	20-35	Terra estabilizada
			22-45	Terra não estabilizada
(Malkanthy et al., 2021)	-	-	5-20 (Argila)	Terra estabilizada
(Houben e Guillaud, 2008)	-	-	10-35	Terra estabilizada

Os limites de consistência, ou de Attenberg, são outro dos parâmetros relevantes que permitem avaliar o comportamento do solo na presença de água. Com a realização deste ensaio determina-se o Limite de Retração (LR), o Limite de Plasticidade (LP) e o Limite de Liquidez (LL), sendo ainda possível calcular o índice de plasticidade (IP), que traduz o grau de plasticidade do solo. Ou seja, quanto maior for o índice de plasticidade, mais plástico será o solo. Na prática, os limites de consistência correspondem a valores de teor em água que determinam o comportamento dos solos em termos da sua consistência, sendo apenas aplicáveis a materiais plásticos, característica conferida pelas partículas de argila (Azevedo, 2021). Neste domínio são também vários os autores que sugerem diferentes valores, tal como se pode observar na Tabela 3.

Tabela 3: Limites recomendados de consistência - Vários autores

Autor	Limites de consistência		
	LL (%)	IP (%)	Obs.
(Burroughs, 2008)	30-40	15-20	Terra estabilizada
(Delgado e Cañas, 2007)	25-50	2-30	Terra não estabilizada
(Silva, 2015)	25-40	2-20	Terra estabilizada
	25-50	2-30	Terra não estabilizada
(Doat et al., 1979)	25-50	7-29	Terra estabilizada

De maneira a unificar os critérios aqui apresentados, pois é necessário orientar a seleção do solo segundo um único conjunto de requisitos, pode-se resumir os valores presentes nas Tabelas 2 e 3 conforme apresentado na Tabela 4, para o caso da terra estabilizada, conforme é objectivo do presente trabalho.

Tabela 4: Síntese de critérios para produção de BTC

	% Argila	% Argila + % Silte	LL (%)	IP (%)
Para terra estabilizada	5-20	10-35	25-40	2-20
Autores	(Malkanthy et al., 2021)	Houben & Guillaud, 2008)	(Silva, 2015)	

No que diz respeito à fração argilosa, para ambos os casos, isto é, BTC estabilizados e BTC não estabilizados, é necessário escolher um solo com teor mínimo de argila. No caso dos blocos não estabilizados a coesão é garantida exclusivamente pela argila. Para os blocos estabilizados com cimento, parte da fração argilosa é substituída com o objetivo de reduzir a retração e, com isso, reduzir a fissuração superficial, sendo desejável, após a correção granulométrica, manter um teor de argila

compreendido entre 5 e 20% (Uzoegbo, 2019). Ainda assim, Uzoegbo (2019) reporta que, desejavelmente, o teor de argila e silte não deverá ser inferior a 10%, uma vez que a mistura de solo não apresentará a trabalhabilidade desejada, e, de preferência, deverá ser inferior a 40% para garantir uma estabilização eficaz com cimento. Na sequência destes parâmetros, a terra pode também ser classificada quanto à sua textura por aplicação do ábaco (Figura 3) disponibilizado pelo Serviço para a Conservação dos Recursos Naturais do Departamento de Estado da Agricultura dos E.U.A. (USDA).

Na engenharia civil, a compactação do solo é um procedimento de extrema importância, uma vez que tem como objetivo maximizar as suas propriedades mecânicas. Para além da força aplicada, a compactação do solo depende, também, do respetivo teor de humidade, da massa volúmica seca e do tipo de solo em análise (Proctor, 1933). De acordo com os estudos desenvolvidos por Ralph Proctor (1933), engenheiro civil dedicado ao estudo da mecânica dos solos, constatou-se que durante o processo de compactação do solo se se aumentar o teor de humidade e manter a força aplicada constante, a massa volúmica aumenta. Isto acontece porque o aumento do teor de humidade leva à redução das forças de atração entre as partículas de solo, beneficiando o movimento relativo entre elas (Reddi et al., 2012). Por outras palavras, a água adicionada à terra tem, então, a função de lubrificar as partículas sólidas diminuindo o atrito entre elas e contribuindo, assim, para um rearranjo mais eficiente. Assim, verifica-se uma diminuição do volume de vazios e o aumento da massa volúmica do solo (Reddi et al., 2012). No entanto, tal como Ralph Proctor concluiu, este efeito só é possível até se atingir o teor ótimo de água (TOA). Este parâmetro pode ser definido como sendo o teor de humidade que conduz à máxima compactação e que permite obter a máxima massa volúmica do solo (Silva, 2015). Tendo presente que este parâmetro depende do tipo de solo em análise, Rigassi (1985) sugere 9 a 17% para o TOA, enquanto Riza et al. (2010), recorrendo a técnicas mais modernas, aponta para um TOA entre 10 e 13%.

2.5 Estabilização dos BTC

Desde o início da utilização da terra na construção que se percebeu que a incorporação de certos materiais ajuda a mitigar o impacto negativo de algumas propriedades intrínsecas do solo. Um bom exemplo disso é a incorporação de fibras vegetais nas misturas de terra, conferindo-lhes melhores características mecânicas e reduzindo a fendilhação superficial durante a secagem dos BTC. Assim, os métodos de estabilização da terra visam alterar as propriedades físicas e/ou químicas do solo de forma a melhorar o desempenho técnico dos elementos construtivos em terra, nomeadamente aumentando a sua resistência mecânica e a durabilidade (Hall et al., 2012b).

Os vários métodos de estabilização do solo podem ser agrupados em três grandes grupos: estabilização física, química ou mecânica, conforme será abordado nos próximos pontos. No presente trabalho, a estabilização dos BTC envolve uma vertente mecânica (compactação) e química, por incorporação de CP ou, de forma mais eco-eficiente, CR. Como referido, a implementação do conceito de economia circular no setor da construção, neste caso através da incorporação de CR em novos materiais de construção, tem benefícios do ponto de vista ambiental.

2.5.1 Estabilização física

A estabilização física do solo consiste na adição ou remoção de algum material na composição da mistura de terra com vista a melhorar a sua coesão ou compacidade granular.

Este método de estabilização pode ser posto em prática através de duas técnicas: adição de fibras à mistura de solo ou remoção de partículas com uma dada granulometria, substituindo-as por outras cuja dimensão maximiza a compacidade dos BTC. A incorporação de fibras na mistura de solo promove a criação de uma rede de interligações solo-fibra cada vez mais complexa, densa e flexível, pois as fibras adquirem orientação aleatória, o que conduz ao aumento da coesão entre as partículas sólidas e ao reforço da integridade estrutural do solo (Hall et al., 2012b). Deste modo, verifica-se o aumento da estabilidade do solo e da respetiva resistência às tensões de corte (Hall et al., 2012b). Relativamente à segunda técnica, tal como abordado em 2.4, a compacidade é um dos parâmetros com maior influência na resistência mecânica dos blocos, podendo ser indiretamente caracterizada através da curva granulométrica da mistura do solo. Uma curva granulométrica suficientemente extensa é favorável ao aumento da compacidade por diminuição do volume de vazios. Significa, então, que a tensão de atrito entre as partículas sólidas é maior, o que conduz ao aumento da resistência mecânica e também da durabilidade, por diminuição da permeabilidade e aumento da resistência à erosão superficial provocada pela água.

No seguimento de alguns estudos realizados no passado, no âmbito da tecnologia de produção de betões, determinou-se uma curva granulométrica de referência que otimiza o preenchimento dos espaços vazios dos elementos betonados (curva de Fuller). Apesar de ainda não existirem estudos nesta área, especificamente direcionados para a construção em terra, convencionou-se que a curva de Fuller constitui uma boa aproximação para a otimização da granulometria da mistura de solo dos BTC (Uzoegbo, 2019).

Para além do tamanho das partículas sólidas que compõem a mistura de solo, também o índice de achatamento e a forma dessas mesmas partículas são fatores importantes e que influenciam a compacidade dos blocos.

Um dos estudos mais recentes, desenvolvido por Malkanthi et al. (2021), visou a modificação granulométrica da mistura de solo através da incorporação de resíduos da construção moídos, juntamente com uma certa proporção de areia. Esta abordagem teve como objetivo melhorar a compacidade granular e sobretudo dar resposta a um dos maiores problemas do setor da construção, a gestão de resíduos. Esta modificação granulométrica visa aproximar a curva granulométrica da mistura a uma curva granulométrica de referência, garantindo-se que a primeira é suficientemente extensa para assegurar o máximo preenchimento dos vazios existentes entre as partículas mais grossas (Malkanthi et al., 2021).

A outra vantagem da adição de resíduos da construção é a possibilidade de reduzir o teor de material fino, dado que vários estudos apontam para uma diminuição da resistência mecânica quando o teor de argila e silte é muito elevado (Malkanthi et al., 2021). Assim, sugere-se que o teor de material fino não deve exceder os 15% (Malkanthi et al., 2021).

No estudo de (Malkanthi et al., 2021), a mistura de solo foi composta por resíduos de construção, dois tipos de solos, I e II, constituídos, respetivamente, por 38% e 14% de partículas finas

(siltes e argila), areia, cimento, que atua como estabilizante químico, e água. Foram considerados 12 tipos de composições diferentes, com quantidades variáveis de argila e silte, e de cimento. Assim sendo, a granulometria do solo I foi corrigida para um teor de finos de 20%, 15% e 10%, e no solo II para um teor de finos igual a 5%. As conclusões deste estudo apontam para que, seguindo esta metodologia de otimização da curva granulométrica, se observem claras melhorias de algumas propriedades importantes dos blocos, nomeadamente (Malkanthi et al., 2021):

- melhoria significativa no parâmetro de absorção de água. Para maiores percentagens de material fino, igual ou superior a 10%, maior foi a taxa de absorção, o que é indesejável;
- aumento da resistência à compressão, tanto no estado seco como no estado saturado. De acordo com os resultados obtidos, verificou-se que os blocos com 5% a 10% de material fino, independentemente da percentagem de cimento, apresentaram valores de resistência à compressão considerados aceitáveis. No entanto, destacou-se a mistura com 5% de finos e 8% de cimento, que conduziu a uma maior resistência mecânica;

Em suma, (Malkanthi et al., 2021) concluiu que, numa análise custo-benefício, os solos modificados com até 10% de material fino e estabilizados com 8% de cimento são a solução ótima para a produção de blocos a nível industrial.

Num estudo recente, (Kasinikota e Tripura, 2021) procederam à correção granulométrica da terra destinada à fabricação de BTC através da incorporação de resíduos de tijolo moído, por substituição de parte da fracção de areia. Esta investigação demonstrou resultados interessantes na durabilidade e no comportamento mecânico dos BTC. As conclusões deste estudo apontam para uma influência significativa da taxa de substituição de areia por resíduos de tijolo no teor ótimo de água e na massa volúmica do solo. Como o tijolo é um material muito poroso, o que significa que tem uma grande capacidade de absorção de água e reduzida densidade, por comparação com a areia, quanto maior for a quantidade de resíduos de tijolo, menor será a massa volúmica seca e, inversamente, maior será o teor ótimo de água da terra. Segundo (Kasinikota e Tripura, 2021), no que se refere à resistência mecânica, tanto à compressão como à flexão, observa-se que a incorporação deste tipo de resíduos é benéfica até um máximo de 24% de taxa de substituição da areia. Inclusivamente, os BTC com 24% de resíduos de tijolo foram os que apresentaram maior resistência mecânica e maior durabilidade. Concluiu-se, ainda, que se a quantidade de resíduos for superior a este limite a tendência inverte-se. A substituição total da areia por resíduos de tijolo reduziu em mais de 50% a resistência à compressão e à flexão dos BTC.

Num outro estudo, desenvolvido por Mostafa e Uddin (2016), foi analisada a resistência à compressão e à flexão de blocos de terra comprimida reforçados com fibras de banana. Este é um dos resíduos da agricultura mais comuns em algumas regiões do globo, como é o caso do Egipto. Desse modo, a incorporação deste tipo de fibras naturais de origem vegetal apresenta-se como uma das possíveis soluções para melhorar o comportamento mecânico dos BTC. Segundo os autores, verificou-se que a adição de fibras de banana tem um impacto positivo nas propriedades mecânicas dos BTC, aumentando tanto a resistência à compressão como a resistência à flexão. De uma forma geral, a resistência à compressão é melhorada em cerca de 70%, por comparação com os BTC não reforçados.

Estas fibras vegetais vão ser incorporadas na matriz do solo que se forma após a secagem, fomentando a interligação entre as partículas sólidas e as fibras. Deste modo, restringe-se o movimento relativo das partículas e contribui-se para a estabilização dos blocos.

Esta é apenas uma das abordagens possíveis à estabilização física dos solos por adição de fibras, mas que ilustra bem o impacto positivo que estas podem ter na construção com BTC. Outras soluções, como as fibras sintéticas, têm igualmente vantagens na sua utilização, no entanto, em termos de impacto ambiental são uma solução menos interessante.

2.5.2 Estabilização mecânica

A estabilização mecânica é uma técnica que consiste em compactar a terra por aplicação duma força de compressão, utilizando para tal uma prensa manual ou hidráulica. Este procedimento é o que permite distinguir os BTC dos blocos de adobe, apresentando os primeiros menor volume de vazios e maior resistência mecânica.

Mansour et al. (2016), que avaliaram a influência da compactação do solo no comportamento térmico e mecânico dos BTC, afirmam, como seria de esperar, que a força de compactação aplicada à terra tem uma elevada influência na massa volúmica dos blocos. Quanto maior a pressão exercida sobre o solo, menor será o respetivo volume de vazios, verificando-se, logicamente, o aumento da massa volúmica. Pode-se ainda concluir que o aumento da massa volúmica resulta, também, na diminuição da permeabilidade, conferindo aos blocos melhores características de durabilidade. Assim, a massa volúmica dos BTC é um parâmetro importante e que deve ser controlado durante a produção dos blocos, uma vez que condiciona a resistência mecânica, a condutividade térmica e a durabilidade destes materiais (Mansour et al., 2016).

Segundo (Uzoegbo, 2019), as prensas hidráulicas são capazes de produzir blocos aplicando-lhes uma tensão de compactação próxima dos 10MPa, e as prensas manuais, altamente dependentes da força braçal do operador, são capazes de produzir blocos com uma tensão de até cerca de 4 a 6MPa. Facilmente se percebe que as prensas hidráulicas são capazes de produzir blocos de melhores propriedades mecânicas, pois a estabilização mecânica por compactação é mais eficaz. Na Tabela 5 apresenta-se uma classificação dos diferentes níveis de pressão das prensas.

Tabela 5: Classificação dos níveis de pressão para produção de BTC (adaptado Uzoegbo (2019))

Muito Baixa Pressão	Baixa Pressão	Média Pressão	Alta Pressão	Hiper-pressão	Mega-pressão
1-2 N/mm ²	2-4 N/mm ²	4-6 N/mm ²	6-10 N/mm ²	10-20 N/mm ²	≥ 20 N/mm ²

As conclusões apresentadas por (Mansour et al., 2016), num estudo que consistiu em avaliar a influência da pressão de compactação dos BTC no seu comportamento mecânico e térmico, apontam para que os blocos com maior massa volúmica, ou seja, aos quais foi aplicada maior força de compactação, apresentem maior resistência à compressão, em cerca de 4 MPa. Contudo, este não é um resultado totalmente satisfatório. Se, por um lado, maior força de compactação do solo beneficia as propriedades mecânicas dos BTC, por outro, interfere negativamente nas suas propriedades de isolamento térmico. Em sentido inverso, uma diminuição da força de compactação conduz ao resultado oposto: diminuição da resistência à compressão (em cerca de 0,35 MPa) e da condutividade térmica. (Mansour et al., 2016) demonstrou ainda que os blocos cuja massa volúmica era igual a 1750 kg/m³

conduziram a soluções aceitáveis, apresentando uma baixa condutividade térmica ($0,75 \text{ W m}^{-1} \text{ K}^{-1}$) e resistência à compressão satisfatória, de valor igual ou superior a 1 MPa. Note-se que se trata de BTC não estabilizados quimicamente.

2.5.3 Estabilização química

O processo de estabilização química do solo visa a alteração das suas propriedades físico-químicas, por adição de uma nova substância, que, através de reações químicas, forma novos compostos capazes de aumentar a coesão interna entre as partículas sólidas (Silva, 2015). O solo, no seu estado natural, isto é, sem aplicação de qualquer técnica de estabilização, possui características intrínsecas que, do ponto de vista da construção, podem ser desadequadas para vários tipos de construção e condições climáticas (Venkatarama Reddy, 2012). Os principais problemas apontados aos materiais de construção à base de terra são a elevada retração, fraca coesão interna entre as partículas sólidas, que se traduz em baixa resistência mecânica, nomeadamente à tração e à compressão, e a elevada sensibilidade à ação da água (Uzoegbo, 2019; Venkatarama Reddy, 2012). Nesse sentido, a estabilização química apresenta diversas vantagens, uma vez que permite mitigar as consequências dos problemas enunciados anteriormente. Por exemplo, a incorporação de um ligante como o cimento possibilita a utilização de um solo menos argiloso, pois a coesão interna da terra passa a ser assegurada, principalmente, pela ação do cimento (ligante hidráulico). Deste modo, para além do surgimento de ligações químicas mais robustas entre as partículas, que leva ao aumento das forças de coesão, o baixo teor de argila do solo diminui a ocorrência de fendilhação superficial dos blocos durante o processo de secagem, provocada pela presença de minerais argilosos expansivos.

Para além do cimento, existem também estabilizantes naturais ou resultantes de sub-produtos industriais, que, do ponto de vista ambiental, vão de encontro à filosofia sustentável da construção em terra. São exemplos a adição de sílica fumo (Abdulsalam et al., 2018) ou cinzas volantes (Elavarasan et al., 2020). A utilização destes materiais para estabilização de BTC não se tem revelado muito atractiva, tanto em termos técnicos como económicos (Azevedo, 2021). Por um lado, estas adições não garantem só por si propriedades ligantes, exigindo um teor mínimo de cimento. Por outro lado, estas adições tornaram-se cada vez mais escassas, não sendo uma solução de futuro para os BTC. De seguida, serão apresentados alguns estudos recentes onde se analisa a influência da incorporação de diferentes tipos de estabilizantes em blocos de terra comprimida, ou em outros tipos de construção em terra.

O cimento é um material inorgânico finamente moído de propriedades hidráulicas. Quando misturado com água endurece através de reações de hidratação, desenvolvendo resistência mecânica que se mantém estável, inclusivamente em condições submersas (Hall et al., 2012b). Quando adicionado ao solo (estabilização química), para produção de BTC, confere-lhes maior resistência mecânica, especialmente à compressão, e maior durabilidade, nomeadamente em termos de resistência à água.

Do ponto de vista microscópico, a estabilização dos solos é garantida pela pasta de cimento endurecida que envolve os agregados, formando uma matriz solo-cimento mais estável e mais resistente. Nas misturas cimento-argila, ocorrem os seguintes mecanismos: 1) durante o processo de hidratação do cimento forma-se um gel insolúvel (gel cimentício) que se dispersa pelas zonas porosas

dos BTC; 2) Desfazem-se os aglomerados de argila e promove-se a ligação entre as partículas sólidas e o gel cimentício (Hall et al., 2012b). É a ligação solo-cimento que confere aos BTC maior resistência mecânica e menor permeabilidade, por diminuição do volume de vazios. Em resultado do processo de hidratação, forma-se também hidróxido de cálcio que, mediante determinadas condições, pode reagir com a fração argilosa do solo por intermédio de reações pozolânicas, formando novas ligações que igualmente contribuem para o aumento da resistência mecânica dos BTC (Silva, 2015). A presença de minerais argilosos expansivos na composição do solo resulta na diminuição da taxa de desenvolvimento de resistência mecânica em solos estabilizados com cimento (Hall et al., 2012b).

Segundo Hall et al. (2012b), verifica-se um aumento da resistência à compressão dos BTC com o aumento do teor de cimento, embora não exista uma relação de proporcionalidade directa.

A metodologia seguida por Silva (2015) no desenvolvimento da sua investigação, compreendeu a avaliação de três composições de blocos: uma mistura não estabilizada; uma mistura com 4%, em massa, de cal; e uma última mistura estabilizada com 8% de cimento.

Os autores observaram que a incorporação de cimento nos BTC teve benefícios claros na melhoria da resistência mecânica, independentemente do teor de humidade e condições de cura dos blocos, demonstrando que estes BTC podem ser aplicados em regiões com condições climáticas mais adversas. Os autores verificaram ainda que a resistência à compressão no estado saturado (2,24 MPa), foi perto de metade da obtida no estado seco (5,37 MPa), salientando a importância do teor de humidade no comportamento mecânico dos BTC. De facto, este parâmetro influencia o desenvolvimento de forças de coesão na estrutura interna dos blocos. Sugerem, então, a consideração de uma relação a/l inferior a 0,55. A estabilização com cimento foi ainda essencial na redução da absorção de água e no aumento da resistência à erosão superficial por ação da água. Os autores concluíram que mediante o contacto frequente com água, é fundamental a estabilização dos BTC.

No entanto, apesar do cimento ser considerado um excelente estabilizante, tem associado a si um elevado impacto ambiental, reduzindo de forma significativa a natureza ecológica da construção em terra. Nesse sentido, urge explorar estabilizantes alternativos mais eco-eficientes, como é o caso do CR abordado em 2.6.

2.6 Cimento reciclado

Como referido em capítulos anteriores, a estabilização de BTC com CP acarreta elevados prejuízos em termos ambientais e contraria a filosofia de construção sustentável associada à construção em terra. Nesse sentido, a incorporação de CR na composição dos BTC configura-se como uma solução de elevado potencial em termos ambientais, devendo ainda avaliar-se as suas vantagens em termos técnicos, objecto de estudo desta dissertação. Assim, no presente capítulo, será dado o devido destaque a este material, CR, nomeadamente analisando, em maior detalhe, os benefícios ambientais da sua utilização e como isso pode ser um veículo para mitigar o impacto ambiental negativo do sector da construção, quais as propriedades mecânicas e como estas diferem das do CP, como se obtém CR e, ainda, apresentar-se-ão alguns trabalhos preliminares de estabilização de BTC com CR.

2.6.1 O cimento reciclado como alternativa ao cimento Portland

Como referido em 2.2, a indústria do betão representa um elevado impacto para o meio ambiente, pois está associada a um elevado consumo de matérias-primas naturais, a elevadas emissões de CO₂ para a atmosfera, e a uma abundante geração de resíduos da construção e demolição (RCD) no final do ciclo de vida das construções (Stafford et al., 2016). De acordo com (Xia et al., 2020) cerca de 30% a 35% dos resíduos totais anuais produzidos por todos os setores de atividade correspondem a RCD, dos quais estima-se que mais de 1/3 sejam resíduos de betão (B. Wang et al., 2021). A pegada de carbono do betão está essencialmente associada à produção de clínquer. Estima-se que o CP seja responsável por cerca de 80% a 90% das emissões de CO₂ decorrentes da produção de betão (Letelier et al., 2017), libertando-se cerca de 750 a 800 kg de CO₂ por tonelada de clínquer produzido (Bogas, Carriço, et al., 2019).

De acordo com o relatório anual de 2020, da Associação Europeia do Cimento (CEMBUREAU), em 2019 foram produzidos cerca de 4,1Bt de cimento a nível mundial, sendo que o maior produtor, de forma destacada, foi a China, com uma fatia de cerca 56,2%. Para além da China, também os E.U.A, a Índia e os países da U.E. registaram produções acentuadas de cimento, contabilizando um total de 590,7Mt. Estes dados comprovam que, apesar dos esforços de algumas autoridades internacionais em sensibilizar o setor da construção para a necessidade de redução de algumas práticas pouco sustentáveis, o cimento continua a ser indispensável para a economia mundial, e particularmente para a economia europeia (CEMBUREAU, 2020). Apesar do nível de emissões de CO₂ ter diminuído face a 1990, ainda se encontra longe do objectivo ambicioso definido pela Global Cement and Concrete Association (GCCA, n.d.), cuja meta é atingir a neutralidade carbónica em 2050. Para tal, foram estabelecidas várias alavancas para a redução da pegada de carbono, entre as quais se inclui o desenvolvimento de ligantes alternativos de baixo carbono. Nesse sentido, nos últimos anos tem sido investigado o desenvolvimento de CR, que tem por base a recuperação das propriedades hidráulicas do CP em fim de vida, reconduzindo a sua reutilização no sentido de uma economia verdadeiramente circular da indústria do betão. A filosofia de produção do cimento reciclado, que envolve a termoactivação de resíduos de cimento a baixa temperatura, até cerca de 600-800°C, conduz a uma redução importante da energia térmica e do nível de emissões de CO₂, visto que a fase de descarbonatação é evitada (Carriço, Bogas, et al., 2020b). Assim, a utilização de CR contribui para a reutilização de RCD, redução do nível de exploração de matérias-primas naturais e diminuição dos níveis de CO₂ associados à produção de cimento.

O departamento de engenharia civil do IST tem-se posicionado na linha da frente da investigação internacional realizada neste domínio, tendo tido um papel relevante nos últimos avanços atingidos ao nível da produção, caracterização e aplicação do CR (Bogas et al., 2020).

2.6.2 Produção e principais características do cimento reciclado

Crook e Murray, (1970) foram pioneiros na identificação do potencial de recuperação das propriedades hidráulicas dos cimentos hidratados após o seu tratamento térmico. Esta descoberta resultou de estudos realizados em elementos de betão sujeitos a elevadas temperaturas, com vista à análise das suas propriedades residuais após sujeitos à acção do fogo.

Desde então, outros estudos foram sendo desenvolvidos, em que se destacam os primeiros trabalhos de Splittgerber e Mueller (2003) e Alonso e Fernandez (2004), directamente visando a produção de CR a partir de detritos de betão. Os últimos autores terão sido dos primeiros a verificar que a termoactivação de resíduos de materiais cimentícios permitia produzir um material semelhante ao CP corrente, recuperando as suas propriedades físicas, químicas e mecânicas. Mais tarde, essencialmente nos últimos 10 anos, outros estudos têm-se desenvolvido no sentido de otimizar a produção de CR, e evoluir no conhecimento das suas características e do seu comportamento quando incorporado em pastas e argamassas (Serpell e Lopez, 2013).

Uma das principais dificuldades no desenvolvimento do CR, reside na separação prévia do resíduo de pasta dos agregados existentes nas argamassas e betões. De facto, ao contrário da maioria das investigações realizadas por vários autores, que desenvolvem CR a partir de detritos de pasta produzida artificialmente em laboratório, na realidade o cimento hidratado encontra-se misturado com agregados. Neste sentido, o grupo de investigação em que se insere o presente trabalho, desenvolveu um método de separação recentemente patenteado que permite obter fracções de pasta de pureza superior a 75%, em massa, e areias pouco contaminadas, com menos de 5%, em massa, de pasta aderida (Carriço et al., 2021). Mais difícil, e que exige desenvolvimentos futuros, é a recolha e separação dos detritos de betão/argamassa dos restantes constituintes dos RCD.

Genericamente, a produção de cimento reciclado compreende 4 fases: recolha dos resíduos da construção e demolição, e britagem; separação da fracção cimentícia dos restantes constituintes dos RCD; moagem, que tem como objetivo aumentar o grau de finura do material e potenciar as reacções de hidratação do cimento; e por último, termoactivação (Carriço et al., 2021).

Em relação à recolha e britagem dos RCD, o principal problema está relacionado com a falta de conhecimento acerca da constituição dos resíduos (Mota et al., 2020). Apesar de ser possível saber que tipos de resíduos se está a utilizar, por exemplo, é possível adquirir resíduos constituídos apenas por betão, não é possível conhecer as condições em que estes betões foram produzidos, nem qual a sua composição, nomeadamente ao nível da relação água/ligante (a/l) e do tipo de cimento utilizado. De facto, as características do betão de origem podem influenciar a capacidade de reidratação e o comportamento mecânico do cimento reciclado. Segundo Xuan e Shui (2011), a relação a/l do material de origem afecta a resistência mecânica do cimento reciclado, uma vez que esta depende tanto da reidratação do cimento hidratado como da hidratação do cimento inicialmente não hidratado (superior em betões de menor a/l).

A britagem dos RCD é essencial, pois promove a libertação dos diferentes constituintes do betão, associados a distintas propriedades de fractura (Bogas, Carriço, et al., 2019). Esta fase é necessária para depois se aplicar o método de separação (Carriço, Bogas, et al., 2020b). Após a separação da fracção cimentícia, este resíduo deve ser moído (usualmente em moinhos de bolas horizontal) de modo a atingir um grau de finura semelhante à dos cimentos correntes (Carriço, Bogas, et al., 2020b). Isso promove um aumento da superfície específica, melhorando a sua reatividade e capacidade de hidratação (Kurdowski, 2014; Marchon & Flatt, 2016). Finalmente, segue-se a etapa da termoactivação da fracção cimentícia, que é o passo fundamental para garantir que o cimento reciclado readquire as suas capacidades ligantes (Shui et al., 2007). A ideia é submeter o material a temperaturas

suficientemente altas que conduzam à desidratação dos compostos previamente hidratados, mas que não promovam a sua recristalização acentuada ou a geração de CO_2 , por mecanismos de descarbonatação (Alonso e Fernandez, 2004). Num estudo recente realizado por (Real et al., 2020), verificou-se que a temperatura óptima de termoactivação situa-se entre 600-800°C. Gamas semelhantes são sugeridas por outros autores (Shui et al., 2007; Yu & Shui, 2013; Zhang et al., 2018a). No entanto, (J. Wang et al., 2018) reportam que o máximo da resistência foi atingido para apenas 450°C. Em geral, o tratamento térmico da fração cimentícia compreende três passos: rampa de aquecimento; tempo de residência no forno a máxima temperatura; taxa de arrefecimento (Serpell & Zunino, 2017; J. Wang et al., 2018) (exemplo, Figura 4). Segundo (Bogas, Carriço, et al., 2019), a taxa de aquecimento deverá situar-se entre 5 e 15°C/min.

Para garantir o correcto arrefecimento do cimento, deve-se deixar o material arrefecer até atingir a temperatura ambiente. Embora não se tenha verificado grande influência da velocidade de arrefecimento nas propriedades do CR, Serpell e Lopez (2015) reportaram um ligeiro aumento da resistência mecânica para condições de arrefecimento lento, dentro do forno.

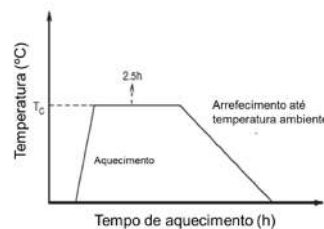


Figura 4: Exemplo de curva de termoactivação no fabrico de cimento reciclado. Adaptado de (Xuan & Shui, 2011)

Em geral o cimento reciclado obtido é caracterizado por apresentar natureza porosa e elevada área superficial, o que aumenta a sua exigência de água (Balducco et al., 2019). Em termos mineralógicos, ao contrário dos cimentos correntes, não possui C_3S na sua constituição e é composto por um polimorfo do C_2S , α_{H} (Bogas, Real, et al., 2022; Serpell & Zunino, 2017).

Poucos estudos têm sido dedicados à análise da hidratação e desenvolvimento da microestrutura dos cimentos reciclados. As maiores contribuições são apontadas a Bogas et al. (2020, 2022). Bogas et al. (2020) estudou o desenvolvimento da microestrutura de pastas de cimento reciclado desde as 8 horas até 28 dias de idade, recorrendo às técnicas analíticas de microscópio de varrimento electrónico (MEV) e porosimetria por intrusão de mercúrio (PIM). Os autores demonstraram que ao contrário dos cimentos correntes, nas pastas com CR desenvolve-se uma microestrutura bifásica, composta pela porosidade interpartícula e porosidade intrapartícula. Desse modo, parte da água de mistura é consumida no interior das partículas porosas de CR, diminuindo a distância entre partículas (espaço interpartícula). Isso faz com que para a mesma porosidade global, as pastas de CR apresentem microestrutura mais refinada, associada a maior número de poros de menor dimensão.

Em termos de comportamento durante a hidratação, Bogas et al. (2022) recorreu a análises de calorimetria isotérmica (IC), termogravimetria (TG) e de difracção de raio-X (DRX) para verificar que apesar de em geral serem produzidos compostos hidratados semelhantes aos observados nos cimentos correntes (C-S-H, CH, fases aluminatadas - Afm e Aft), a cinética de hidratação é

ligeiramente diferente. O α -C₂S tende a apresentar o seu período de hidratação mais activa entre 1 e 3 dias, o que faz com que face aos cimentos correntes, exista um atraso no desenvolvimento da microestrutura até 24h, e um desenvolvimento mais rápido até aos 3 dias de idade. Verificou-se igualmente que o volume de compostos hidratados a longo prazo (>28 dias) tende a ser maior nos cimentos correntes do que nos CR, visto que a quantidade de produtos desidratados no CR tende a ser menor em virtude da carbonatação ocorrida durante a vida útil dos RCD (Bogas et al., 2020; Bogas, Real, et al., 2022).

A análise da incorporação de CR em materiais de base cimentícia tem-se cingido essencialmente à caracterização mecânica de pastas e argamassas. Dependendo de vários factores, como a finura, RCD de origem, temperatura de tratamento e relação a/l (Bogas, Carriço, et al., 2019; J. Wang et al., 2018), a resistência à compressão de pastas de CR varia entre 8 a 32 MPa, cerca de 20 a 80% de pastas de cimento corrente de igual composição (Bogas et al., 2021). De destacar o facto de no grupo de investigação em que se insere o presente trabalho ter sido possível produzir ligantes reciclados compostos por cimento e 20, 50 e 100% de CR, comparáveis com cimentos da classe 52.5, 42.5 e 32.5, de acordo com a (EN 197-1:2011), respectivamente (Carriço et al., 2022a).

2.7 BTC estabilizados com cimento reciclado

No seguimento do estudo realizado por (Azevedo, 2021), em que se observaram claras melhorias ao nível da resistência mecânica e da durabilidade dos BTC após a sua estabilização com cimento Portland (CP), no departamento de engenharia civil do IST foi desenvolvido um estudo preliminar com vista a avaliar a incorporação de CR em BTC (Azevedo, 2021). Para tal, foram produzidos BTC com 5 e 10% de incorporação de CR, bem como de igual teor de CP, para efeitos de comparação. Neste estudo apenas foram analisados blocos produzidos com um tipo de solo, tendo-se procedido à sua caracterização mecânica e de resistência à água (absorção, permeabilidade e erosão acelerada). Para além dos blocos estabilizados com cimento reciclado, também foram avaliados BTC não estabilizados.

Segundo (Azevedo, 2021), por comparação com os blocos de referência com CP, os BTC estabilizados com cimento reciclado apresentaram uma resistência mecânica aos 28 dias cerca de 35% inferior. Ainda assim, os blocos estabilizados com 10% CR apresentaram valores de resistência à compressão cerca de duas vezes superior ao dos BTC não estabilizados, comprovando a capacidade hidráulica deste ligante. A diferença de valores observada entre os BTC com CP e com CR foi atribuída essencialmente à menor compacidade atingida nestes últimos, em resultado da sua maior exigência de água. Os BTC estabilizados com CR, para além de terem sido produzidos com maior relação a/l, conduziram a soluções com maior volume de vazios e, como tal, menor compacidade.

No entanto, nos ensaios de tração por compressão diametral e de flexão, a diferença de resistências entre os dois tipos de misturas não foi tão acentuada. A excepção ocorreu nos provetes ensaiados no estado saturado, sugerindo uma maior sensibilidade à água dos BTC com CR.

Em termos de durabilidade, conclui-se que a estabilização dos BTC com cimento reciclado foi eficaz, conduzindo a soluções com adequada resistência à absorção e à erosão acelerada. Verificou-se uma dureza superficial cerca de 57% superior à dos BTC não estabilizados, embora tenham

apresentado comportamento inferior aos BTC com igual teor de CP. Ainda assim, nos ensaios no estado seco não se verificaram diferenças significativas entre os blocos estabilizados com CR e com CP.

Em suma, no trabalho realizado por (Azevedo, 2021), único publicado até à presente data neste domínio, foi possível demonstrar que é viável a utilização de CR na produção de BTC, com vantagens evidentes do ponto de vista ambiental, embora conduzindo a uma redução não desprezável do seu desempenho face aos BTC com CP. O autor sugere que uma melhor optimização das misturas deverá melhorar o comportamento relativo dos BTC com CR face aos BTC com CP. Em relação aos BTC não estabilizados, ocorreu uma melhoria significativa de desempenho, atingindo-se soluções de maior resistência mecânica e, sobretudo, maior durabilidade face à acção da água. Do ponto de vista do impacto ambiental, estima-se que a utilização de cimento reciclado em substituição de cimento corrente possa reduzir o nível de emissões de CO₂ em pelo menos cerca de 60% (Azevedo, 2021; Carriço, Bogas, et al., 2020b).

2.8 Súmula dos principais documentos normativos existentes

Dado o interesse renovado em técnicas construtivas de terra, mais especificamente construção com BTC, principalmente motivadas por questões ambientais, começaram a surgir estudos mais aprofundados sobre o comportamento deste tipo de construções o que levou ao surgimento de tentativas de normalização da construção em alvenaria com BTC. Ainda assim, tem sido um desenvolvimento algo lento, como comprova a falta de uniformização deste método construtivo.

Na Tabela 6, apresenta-se uma súmula de algumas normas de aplicação em alvenarias de BTC, publicadas até à realização deste trabalho e que serviram de base à análise dos resultados obtidos.

Tabela 6: Normas existentes para a construção em BTC (adaptado de (Neves, 2019))

País/Região	Organismo	Documento Normativo
África-Regional	ARSO	(ARS 670-1, 2014)
		(ARS 670-2, 2014)
		(ARS 670-3, 2014)
		(ARS 670-4, 2014)
Quênia (Cid-Falceto et al., 2011)	KEBS	(KS02-1070:1993 (1999))
Tunísia (Cid-Falceto et al., 2011)	INNORPI	(NT 21.33:1996)
		(NT 21.35:1996)
Brasil	ABTN	(NBR 8492, 2012)
		(NBR 10833, 2012)
Colômbia	ICONTEC	(NTC 5324, 2004)
Alemanha	NABau	(DIN 18945, 2013)
Espanha	AENOR	(UNE 41410, 2008)
França	AFNOR	(NF XP P13-901, 2001)
Austrália	SAI	(CSIRO 5, 1987)
		(HB 195, 2002)
Nova Zelândia	SNZ	(NZS 4297, 1998)
		(NZS 4298, 1998)
		(NZS 4299, 1998)

3 Campanha Experimental

No presente capítulo descreve-se a campanha experimental realizada de modo a cumprir os principais objectivos definidos para esta dissertação, conforme indicado no capítulo 1. Após uma breve descrição da campanha experimental, procede-se à caracterização física e mecânica de todos os materiais utilizados (solo, agregados reciclados (AR) e estabilizantes), de acordo com os documentos normativos correspondentes, sempre que aplicável. Esta etapa inclui a descrição do processo de fabrico do cimento reciclado (CR), bem como a sua caracterização. Numa segunda fase, apresenta-se o procedimento utilizado na seleção do solo, bem como a formulação e produção dos BTC. Finalmente, descrevem-se os ensaios considerados na caracterização física e mecânica dos BTC. Este trabalho foi desenvolvido no âmbito do projecto de investigação Eco+RCEB – “Eco-efficient recycled cement compressed earth blocks”, ref. PTDC/ECI-COM/0704/2021. A campanha experimental foi desenvolvida em três locais, nomeadamente no laboratório de geociências e geotecnologias do Instituto Superior Técnico (GeoLAB-IST), onde se realizaram as tarefas de britagem e moagem para produção do CR, nas Oficinas do Convento de Montemor-o-Novo (ACOC), onde se procedeu à produção dos blocos, e no laboratório de construção de engenharia civil do IST (LC-IST), onde se efectuou o trabalho de caracterização dos mesmos.

3.1 Descrição da campanha experimental

De forma geral, a campanha experimental foi dividida em cinco etapas. A primeira etapa envolveu a caracterização física de cinco tipos de solo recolhidos em diferentes zonas do município de Montemor-o-Novo, Concelho de Évora, visando seleccionar aquele que se considerava mais adequado para a produção dos BTC. No total, foram realizados seis ensaios laboratoriais, que permitiram avaliar os seguintes parâmetros: granulometria, massa volúmica, limites de consistência, teor óptimo de água, fração de matéria orgânica e fração argilosa. Estes ensaios foram realizados no laboratório de construção (LC-IST) e no laboratório de geotecnia do IST (GeoLab-IST). Na segunda fase, que correspondeu à primeira missão de campo deste projecto, foi realizada uma produção preliminar de BTC, envolvendo os diferentes tipos de solo e a incorporação de agregados reciclados (AR) e cujo objectivo foi apoiar de forma complementar a seleção da terra, definir as composições base a utilizar na campanha experimental, e estabelecer um procedimento optimizado para a preparação das terras e produção dos BTC. Nesta fase, foram apenas consideradas misturas de referência produzidas com cimento normal (CN). Em 3.6 apresenta-se uma descrição mais detalhada deste trabalho preliminar.

A terceira fase foi dedicada ao processo, demorado, de produção e caracterização do CR. A caracterização do CR envolveu ensaios físicos (exigência de água, tempo de presa, teor de cal livre), de termogravimetria e de caracterização mecânica em provetes de argamassa (resistência à flexão, resistência à compressão). No âmbito desta dissertação, o CR foi obtido directamente a partir de resíduos de pastas de cimento hidratado previamente produzidas em laboratório (CRP), de modo a controlar a sua composição e optimizar o volume de CR produzido. Com o objectivo de analisar a influência da dimensão das partículas na estabilização dos BTC, foi também testado a incorporação de CRP de maior finura, com partículas de dimensão inferior a 0,125 mm (CRPF).

Numa fase subsequente do trabalho, produziram-se blocos de diferentes composições, onde se variou o tipo de ligante (CN, CRP, CRPF), teor de ligante (0%, 5%, 8%), percentagem de substituição de CN por CRP (20%, 50%) e as condições de cura (cura ao ar, cura húmida). As misturas de referência foram produzidas com dois tipos de CN, CEM II/B-L 32,5 e CEM I 42,5, de modo a permitir uma análise mais abrangente face ao CRP. O primeiro trata-se de um cimento correntemente utilizado na construção, de menor teor de clínquer (65-79%) e o segundo um cimento de elevado teor de clínquer (>95%) para soluções em que se pretenda uma maior resistência inicial e final. Em seguida, resumem-se as várias composições consideradas no presente trabalho, que serão mais detalhadamente apresentadas em 3.7.

- **8CN42,5** – BTC estabilizados com 8% CN tipo I 42,5;
- **5CN42,5** - BTC estabilizados com 5% CN tipo I 42,5;
- **8CN32,5** – BTC estabilizados com 8% CN tipo II/B-L 32,5;
- **8CRP** - BTC estabilizados com 8% de CRP;
- **5CRP** - BTC estabilizados com 5% de CRP;
- **20CRP80CN** – BTC estabilizados com 8% ligante, composto por 20% CRP e 80% CN tipo I 42,5;
- **50CRP50CN** – BTC estabilizados com 8% ligante, composto por 50% CRP e 50% CN tipo I 42,5;
- **8CRPF** - BTC estabilizados com 8% de CRPF;
- **NE** - BTC não estabilizados quimicamente, sem incorporação de ligante

Finalmente, a última fase envolveu a caracterização física e mecânica dos BTC, conforme os ensaios laboratoriais descritos nos capítulos de 3.8.1 a 3.8.10.

3.2 Caracterização da terra

Para o presente trabalho foram inicialmente considerados 5 tipos de terras provenientes de diferentes solos da região de Montemor-o-Novo, assumindo as designações de *Cortiçadas de Lavre*, *Amendonça*, *Baldios*, *Maja* e *Pinheiro*. As terras foram extraídas a uma profundidade do solo superior a 1 m, de modo a evitar a contaminação excessiva por matéria orgânica. Para cada um dos solos recolheram-se inicialmente cerca de 100 litros de terra para análise e caracterização. Posteriormente, para o solo selecionado, foram recolhidos cerca de 10 m³ de terra, que foram transportados de camião para o estaleiro de produção dos blocos, localizado na Associação Cultural de Arte e Comunicação das Oficinas do Convento de Montemor-o-Novo (ACOC).

Neste sub-capítulo descrevem-se os ensaios laboratoriais realizados na caracterização de cada uma das terras, que tiveram em consideração os documentos normativos ou os procedimentos expeditos indicados na Tabela 7. O objectivo desta fase foi conhecer as principais propriedades físicas das terras, de modo a seleccionar a que melhor se adequava à produção de BTC, tendo em consideração os requisitos apresentados em 2.4.

A preparação das amostras a utilizar em cada ensaio seguiu o disposto na especificação (LNEC E-195:1966). Assim, retirou-se uma certa quantidade de amostra (em função do ensaio a realizar) e colocou-se a secar em estufa ventilada a 105°C até temperatura constante. Uma vez seco, o solo foi pulverizado/destorrado utilizando um pilão com cabeça de borracha, para evitar diminuir o tamanho natural das partículas (Figura 5.a).

Tabela 7: Normas utilizadas nos ensaios de caracterização das terras

Nome do Ensaio	Norma/Metodologia
Análise Granulométrica	LNEC E 239:1970
Massa Volúmica	NP-83:1965
Limites de Consistência (ou Limites de Attenberg)	NP-143:1969
Ensaio de Compactação (Proctor)	ASTM D 698:2000; LNEC E-197:1966
Matéria Orgânica	Método expedito (Silva, 2015)
Determinação da fração argilosa	HB 195-2002

3.2.1 Análise granulométrica

A realização deste ensaio teve como objectivo caracterizar a distribuição da dimensão das partículas do solo acima de 0,075 mm. A curva granulométrica é estabelecida, considerando a abertura dos peneiros em milímetros no eixo das abcissas e a percentagem de massa de material passado acumulado em cada peneiro no eixo das ordenadas. Antes de se realizar a análise, as amostras foram preparadas em almofariz de modo a desagregar os aglomerados de argila (Figura 5.a). Na produção dos BTC, esta acção ocorre durante a etapa de pulverização do solo (conforme 3.7.2).

A análise granulométrica foi realizada de acordo com a norma LNEC E 239:1970. Foram consideradas duas frações do solo: fração grossa (superior a 2,0 mm) e fração fina (inferior a 2,0mm). Em relação à fração grossa, fez-se passar uma amostra de 1kg de solo pela série de peneiros de malha quadrada normalizada e abertura decrescente, entre 75 mm e 2 mm de abertura (Figura 5.b) e registou-se a massa retida em cada uma das frações. De seguida, lavou-se o material passado no peneiro de 2 mm (refugo) sobre o peneiro de abertura de 0,075 mm, e colocou-se a secar em estufa ventilada, a 110°C, durante 24h. Após a secagem da amostra, prosseguiu-se com a análise granulométrica da fração fina fazendo passar a amostra lavada pela série de peneiros entre 2 mm e 0,075 mm de abertura (Figura 5.c), e registou-se a massa de solo retida em cada uma das frações. Finalmente, quantificou-se a massa das partículas de dimensão inferior a 0,075 mm, somando também o que resultou de subtrair a massa inicial da amostra que passou na série de peneiros da fração fina à massa do refugo da fração grossa.



Figura 5: Análise granulométrica - a) Preparação da amostra - almofariz e pilão com cabeça de borracha; b) série de peneiros (75mm-2mm); c) Série de peneiros (2mm-0,075mm)

Nestas condições, foi possível traçar a curva granulométrica do solo em análise dada pela percentagem de massa retida acumulada em cada peneiro, em relação à massa inicial da amostra, em função da abertura dos peneiros. As curvas granulométricas referentes a cada um dos solos encontram-se apresentadas no gráfico da Figura 6.

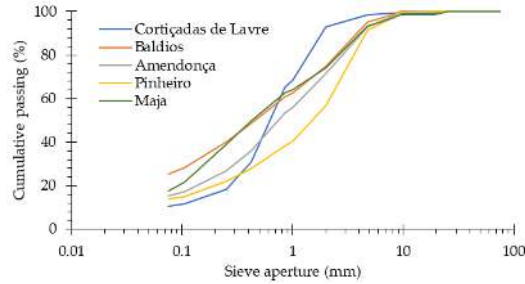


Figura 6: Curvas granulométricas de cada amostra de terra

Na Tabela 8 resume-se a composição de cada solo, considerando-se a fracção de areia a partir de 75 μm , embora esta seja usualmente considerada abaixo de 60 μm (LNEC E-293 1970). Os solos cortiçadas, Amendonça e Pinheiro apresentaram valores muito baixos de teor de finos, abaixo ou próximo do valor inferior sugerido para a produção de BTC (Tabela 4 em 2.4)

Tabela 8: Constituição, em termos macroscópicos, das terras analisadas

	Argila +Silte (<0,075 mm)	Areia (0,075- 2,0mm)	Seixo (2,0- 60,0mm)
Cortiçadas	10,50	88,20	1,30
Amendonça	15,50	77,50	7,00
Baldios	15,20	69,80	5,00
Maja	17,70	75,60	6,70
Pinheiro	13,80	77,60	8,60

3.2.2 Estimativa do teor de argila e silte dos solos

Inicialmente, a determinação da fracção argilosa do solo teve por base o método da jarra, que se trata de um ensaio expedito, facilmente realizável in-situ. Este ensaio é descrito em HB 195-2002, e para além de possibilitar uma estimativa da fracção argilosa, também permite determinar as restantes fracções de partículas sólidas, como são a areia e o silte.

O primeiro passo consistiu em peneirar uma amostra de solo sobre o peneiro de abertura 2,0 mm. De seguida, colocou-se a terra num recipiente de vidro até um terço da sua capacidade, e preencheu-se o restante com água, deixando apenas cerca de 10% de ar. Agitou-se a proveta durante alguns segundos e deixou-se em repouso, até que não se observasse material em suspensão. Após cerca de 48 horas, a terra assentou de forma diferenciada em função da dimensão das suas partículas. Em geral é possível distinguir 3 camadas, correspondentes à fracção de argila, de silte e de areia, conforme ilustrado na Figura 7. A camada de areia é a que assenta de forma mais rápida no fundo, seguindo-se a de silte e a de argila, que tende a ficar em suspensão por um período de tempo mais longo. No final, a medição da altura de cada camada permite estimar o teor de cada uma destas fracções no solo. Numa primeira abordagem a este procedimento experimental, foi adicionado um desfloculante (como é exemplo o calgon utilizado nas máquinas de lavar), para promover a desaglomeração e dispersão das partículas sólidas. Porém, este procedimento não foi adequado, visto que ao auxiliar na separação e dispersão das partículas de silte e argila, conduziu a longos tempos de sedimentação, tornando inviável o ensaio.

Os resultados referentes a cada um dos solos analisados encontram-se resumidos na Tabela 9. Na Figura 7 ilustram-se os ensaios realizados a cada uma das terras. Devido ao seu reduzido teor

de finos, não se procedeu à realização do ensaio para o solo *Cortiçadas de Lavre*. A estimativa do teor de argila é menos preciso, visto que é difícil atingir uma sedimentação estável e completa destas partículas. Isso leva a que ocorra a tendência de se sobrestimar o teor em finos e o teor em argila. Isso foi particularmente evidente nos solos *Amendonça* e *Pinheiro*, tendo em consideração os valores obtidos em 3.2.1, e conforme se pode constatar na Figura 7. Por outro lado, na análise granulométrica é mais difícil garantir a desaglomeração das partículas de reduzida dimensão do que no método da jarra, subestimando o teor de materiais finos.

Tabela 9: Frações granulométricas e classificação textural de cada amostra de terra pelo método da jarra

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

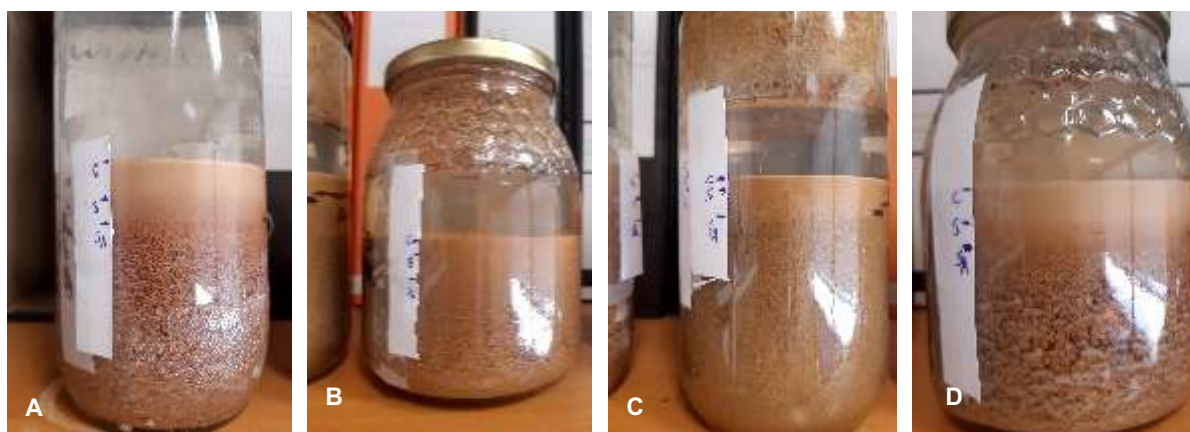


Figura 7: Resultado do método da jarra para cada amostra de terra; a) Amendonça; b) Baldios; c) Maja; d) Pinheiro

A partir dos resultados obtidos, foi possível classificar a textura de cada uma das terras por aplicação do ábaco disponibilizado pelo Serviço para a Conservação dos Recursos Naturais do Departamento de Estado da Agricultura dos E.U.A. (USDA) – Figura 3. A classificação é indicada na Tabela 9.

3.2.3 Determinação da massa volúmica

A massa volúmica das partículas sólidas foi determinada de acordo com a NP-83:1965, recorrendo aos seguintes utensílios: 3 picnómetros de 250 cm³, 2 picnómetros de 100cm³, balança e termómetro. Neste ensaio utilizou-se uma amostra de 25 g de solo seco constituído por partículas de dimensão inferior a 4,76 mm.

Após a calibração do picnómetro (Figura 8a), colocou-se a amostra dentro do picnómetro e encheu-se com água até cerca de $\frac{3}{4}$ da sua capacidade, deixando em repouso por, pelo menos, 12h até que o provete atingisse o estado saturado. Depois, utilizando um agitador magnético, aqueceu-se o provete durante 10 minutos, deixou-se arrefecer até à temperatura ambiente, corrigiu-se o nível da água até à marca de referência (Figura 8b) e registou-se a massa correspondente.



Figura 8: Determinação da massa volúmica - a) Calibração do picnómetro; b) picnómetros com água destilada e solo

Por aplicação da Equação (1), determinou-se a massa volúmica das partículas, onde m_1 corresponde à massa do picnómetro cheio de água (g) à temperatura T ($^{\circ}\text{C}$); m_2 é a massa da amostra (25g); m_3 é a massa do picnómetro cheio de água e com solo (g); e K é um parâmetro que contribui para a precisão dos resultados, relacionando a massa volúmica da água destilada à temperatura a que foi realizado o ensaio com a sua massa volúmica à temperatura de 20°C . Os valores do parâmetro K encontram-se tabelados na NP-83.

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

Os resultados referentes a cada uma das terras encontram-se resumidos na Tabela 10.

Tabela 10: Massa volúmica das partículas de cada amostra de terra

	Cortiçadas de Lavre	Amendonha	Baldios	Maja	Pinheiro
ρ (g/cm ³)	2,53	2,4	2,59	2,54	2,51

3.2.4 Limites de consistência

Os limites de consistência traduzem o comportamento de um solo na presença de água, assim como a maior ou menor facilidade em se deformar. O grau de plasticidade do solo pode ser classificado como: macio, firme ou rígido (Reddi et al., 2012). De uma forma indirecta, este ensaio permite avaliar a presença de argila no solo, uma vez que os minerais argilosos são os principais responsáveis pelas propriedades plásticas do mesmo.

O ensaio foi realizado de acordo com a NP-143:1969, utilizando-se os seguintes utensílios: riscador, concha de Casagrande, cápsulas numeradas, espátula, papel milimétrico e placa de vidro. No final do ensaio foi possível calcular os seguintes parâmetros: limite de liquidez (LL) limite de plasticidade (LP) e índice de plasticidade (IP). O limite de liquidez corresponde ao teor em água do solo para o qual, após 25 pancadas na concha de Casagrande, os bordos inferiores de um sulco aberto numa amostra se unem numa extensão de 1cm. Na prática, como esta situação é muito difícil de se obter, é necessário fazer uma interpolação a partir de 4 amostras com teor em água variável. Conforme se pretenda aumentar ou diminuir o número de pancadas, adiciona-se água destilada ou terra seca à amostra, respectivamente. Para o primeiro provete realizaram-se 10 (± 2) pancadas, para o segundo 20 (± 2), para o terceiro 30 (± 2) e para o quarto 40 (± 2).

Inicialmente, peneirou-se uma amostra de cerca de 500 g sobre o peneiro de abertura de 0,420 mm. Em seguida, o material passado foi colocado na concha de Casagrande até um nível ligeiramente acima de metade da sua capacidade. Após adicionar água misturou-se bem a amostra até se obter uma mistura homogénea (Figura 9.a). A pasta foi distribuída uniformemente pela concha e a

superfície alisada (Figura 9.b). Em seguida, com recurso ao riscador, efetuou-se um sulco no provete e colocou-se a concha no engenho para aplicação das pancadas (Figura 9.c).



Figura 9: Sequência de procedimento experimental–Limites de consistência. a)homogeneização da mistura; b)distribuição da mistura pela concha de Casagrande; c)execução do sulco

O ensaio foi realizado a um ritmo de 2 pancadas por segundo, tendo-se registado o número de golpes necessários para os bordos inferiores do sulco se unirem na extensão de 1cm. Na zona de união entre os dois bordos retirou-se uma pequena amostra, para a qual se registou a massa e em seguida colocou-se a secar em estufa ventilada, a 110°C, durante 24h (Figura 10.a). Após a secagem, a amostra foi novamente pesada e calculou-se o teor de água correspondente ao número de pancadas registado.



Figura 10: a) amostra – Limite de liquidez; b) amostra-Limite de plasticidade

O limite de plasticidade determinou-se a partir de uma pequena porção da amostra anterior, dividida em 4 partes iguais. Sobre uma placa de vidro, moldaram-se pequenos filamentos, com cerca de 3 mm de espessura até se formarem fissuras transversais ao longo de todo o seu comprimento, sem que o rolo se partisse completamente. De seguida, estes filamentos foram colocados em cápsulas numeradas, pesados e secos em estufa ventilada, a 110°C, durante 24h (Figura 10.b). Após este período, os filamentos foram novamente pesados, permitindo calcular a quantidade de água na amostra. O limite de plasticidade do solo corresponde à média do teor em água nos 4 provetes.

Finalmente, determinou-se o índice de plasticidade, I_p , corresponde à diferença entre o limite de liquidez e o limite de plasticidade (Equação (2)).

$$I_p = LL - LP \quad (2)$$

Os resultados referentes a cada uma das terras, nomeadamente os valores dos limites de liquidez e de plasticidade e do índice de plasticidade, encontram-se apresentados na Tabela 11. Excepto para o caso de Pinheiro, os restantes solos apresentaram valores reduzidos de I_p , indicativo de solos de reduzida plasticidade. Ainda assim, os valores estão de acordo com os limites recomendados na Tabela 4 em 2.4.

Tabela 11: Limites de consistência de cada amostra de terra

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

3.2.5 Ensaio de compactação (Proctor)

A realização do ensaio de Proctor teve como objectivo determinar o teor óptimo de água (TOA) de um dado solo. De acordo com as conclusões apresentadas por Proctor (1933), mais tarde corroboradas por Bahar et al. (2004), a partir das conclusões extraídas de um estudo especificamente dedicado à avaliação do desempenho de solos compactados e estabilizados com cimento, a consideração do TOA na produção dos BTC permite maximizar a sua compacidade, caso estes sejam compactados para pressões idênticas à utilizada no ensaio. Assim, e visto que a massa volúmica condiciona o desempenho mecânico e de durabilidade dos blocos (2.5.2), a determinação do TOA do solo é importante para a produção de blocos de qualidade superior. O ensaio de compactação foi realizado de acordo com a norma ASTM D 698:2000. Contudo, deve-se salientar que este ensaio foi realizado exclusivamente para cada amostra de solo e não para as misturas finais utilizadas nos BTC. Acrescente-se que a energia de compactação utilizada no ensaio de Proctor é diferente da utilizada na produção dos blocos. Como tal, os resultados obtidos permitem apenas auxiliar na definição do teor em água a utilizar nas misturas, bem como no estudo comparativo entre os diferentes solos, apresentado em 3.6.

Resumidamente, o TOA foi determinado por interpolação, conhecendo, pelo menos, 4 pontos da curva de compactação do solo. Esses 4 pontos foram determinados variando de forma progressiva o teor de água de uma amostra de 2 kg. No entanto, por limitações relacionadas com a quantidade de solo disponível, para alguns casos apenas foi possível determinar 3 pontos da curva de compactação. Para a realização deste ensaio utilizaram-se os seguintes acessórios: molde pequeno ($V=940\text{cm}^3$), pilão de altura de queda normalizada, espátula e tabuleiros.

O ensaio iniciou-se com a peneiração de uma amostra de solo sobre o peneiro de abertura 4,76 mm, sendo posteriormente dividida em porções de 2kg. Para cada uma destas porções adicionou-se um certo teor de água, garantindo que a diferença de teor de água de ponto para ponto da curva de compactação fosse, no mínimo, de 2%. Misturou-se bem até se obter uma mistura homogénea e dividiu-se em 3 partes iguais (Figura 11.a). Posteriormente, colocou-se cada porção no molde, compactando com 25 pancadas igualmente distribuídas. Após o enchimento do molde, retirou-se a alonga (Figura 11.b), removeu-se o excesso de material e alisou-se a superfície (Figura 11.c). De seguida, pesou-se o molde cheio de terra e retirou-se uma pequena amostra, de área quadrada, com cerca de 2 cm de lado, a cerca de 1cm de profundidade, tanto do topo como da base do molde, registando-se as respectivas massas. Por fim, as amostras foram colocadas a secar na estufa, a 110°C, durante 24h. Findo este período, registou-se a massa das amostras.



Figura 11: Sequência procedimento experimental – Ensaio de compactação; a) amostra dividida em 3 partes iguais; b) molde cheio sem alonga; c) molde cheio com superfície alisada

No final do ensaio, obteve-se a curva de compactação do solo, cujos pontos são constituídos por duas coordenadas: teor de água e massa volúmica seca, sendo que o TOA corresponde ao teor de água para a máxima massa volúmica da curva de compactação, conforme exemplificado no gráfico da Figura 12. As curvas de compactação obtidas para Pinheiro, Baldios e Maja apresentam-se no anexo J.3. Os valores de TOA são indicados na Tabela 12, correspondentes a valores máximos de massa volúmica seca de 1840, 1730, 1910 e 1950 kg/m³ para *Amendonça*, *Pinheiro*, *Baldios* e *Maja*, respectivamente. O menor TOA, e como tal, a menor exigência de água, foi atingido no solo Baldios, tendo igualmente conduzido a um dos maiores valores de massa volúmica.

Tabela 12: Valores do TOA de cada amostra de terra

	Cortiçadas de Lavre	Amendonça	Pinheiro	Baldios	Maja
TOA (%)	14,7	13,9	15,3	10,9	13,4

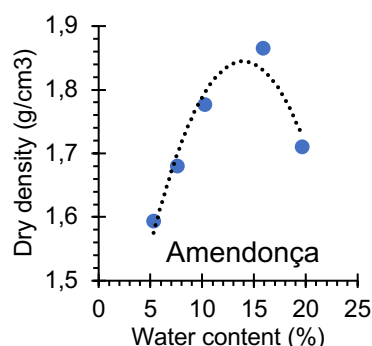


Figura 12: Curva de compactação da terra “Amendonça”

3.2.6 Determinação da fração de matéria orgânica

O procedimento experimental utilizado baseia-se num método expedito, igualmente adoptado por Silva (2015). Emergiu-se uma amostra de 1 kg de solo, previamente seco, em 0,5 L de água oxigenada, envolvendo-se bem a mistura e deixando-a reagir durante alguns minutos. Posteriormente, colocou-se a mistura a secar numa estufa ventilada, a 110 °C, até atingir massa constante. Após a secagem pesou-se a amostra. Uma vez que a matéria orgânica reage com a água oxigenada, a fração de matéria orgânica foi estimada por determinação da variação de massa após secagem em estufa. Na realidade, não é possível eliminar toda a matéria orgânica por este procedimento, mas permite uma comparação relativa entre os vários tipos de solo.

Os resultados referentes a cada uma das terras encontram-se resumidos na Tabela 13.

Tabela 13: Teor de matéria orgânica de cada amostra de terra

	Cortiçadas de Lavre	Amendonça	Baldios	Maja	Pinheiro
Mat. Orgânica (%)	0,30%	1,02%	1,48%	0,43%	0,34%

3.2.7 Composição mineralógica dos solos

Para análise da composição mineralógica dos solos foram realizados ensaios de difracção de raios-X (DRX). O DRX foi efectuado com recurso ao difractómetro *XPERT-PRO* (40 kV, 35 mA). A aquisição foi efectuada entre 5.0437° e 69.9547° 2 θ , para um passo de 0.033°. As amostras foram analisadas em duas etapas, primeiro sem pré-tratamento e depois após aquecimento a 450 °C. Este procedimento tem por objectivo permitir uma melhor identificação dos minerais argilosos presentes, visto que os picos associados alguns destes minerais mudam de posição após aquecimento (Poppe et al., 2001). Os difractogramas obtidos para cada um dos solos, antes e após aquecimento, apresentam-se em anexo. Na Tabela 14 resumem-se as principais fases identificadas para cada um dos solos analisados.

Tabela 14: Fases mineralógicas identificadas por de difracção de Raio-X

Maja	Amendonça	Baldios	Pinheiro
Quartzo	Quartzo	Quartzo	Quartzo
Clinocloro	Albita	Albita	Albita
Ilite	Caulinite	Caulinite	Caulinite
Albita	Microclina	Microclina	Microclina
Microclina	Montmorilonite	Montmorilonite	Montmorilonite
		Ilite	Clorite

Desse modo foi possível verificar que os vários solos analisados contêm argilas expansivas do grupo da Smectite (Montmorilonite), excepto a terra identificada como Maja, desfavoráveis à sua aplicação em BTC (Reddi et al., 2012). Este tipo de argilas é menos estável em ciclos de secagem e molhagem, contribuindo para uma menor durabilidade dos BTC (Ouedraogo et al., 2020). Isto é uma característica comum aos solos da região de Montemor-O-Novo, sendo menos adequados para a aplicação em BTC. No entanto, são os solos locais, e conforme a filosofia subjacente à construção em terra, deve-se procurar optar pela sua utilização na produção dos BTC. Neste caso, é possível analisar o efeito da estabilização com cimento reciclado em condições mais desfavoráveis de utilização. Por outro lado, importa referir que a presença de minerais argilosos expansivos não é muito significativa, especialmente nos solos de Baldios e Maja, associados a reduzido teor de argila (3.2.1).

3.3 Seleção do solo

Na Tabela 15 resumem-se os principais resultados obtidos em cada um dos solos após pulverização, tendo em consideração os ensaios de caracterização definidos em 3.2.1-3.2.7. Na mesma Tabela apresenta-se a gama de valores recomendado para cada ensaio, tendo em consideração o sugerido na literatura e apresentado em 2.4. Para melhor visualização, na Figura 13 apresenta-se a curva granulométrica de cada um dos solos, após pulverização, bem como o fuso de granulometria recomendado na norma XP 13-901 (2001) para a produção de BTC estabilizados.

Tabela 15: Resumo dos principais resultados obtidos para cada terra

		Cortiçadas de Lavre	Amendonça	Baldios	Maja	Pinheiro
Análise Granulométrica	%Argila	10,50	15,50	15,20	17,70	13,80
	%Silte					
	%Areia	88,20	77,50	69,80	75,60	77,60
	%Seixo	1,30	7,00	5,00	6,70	8,60
Massa Volúmica	ρ (g/cm ³)	2,53	2,40	2,59	2,54	2,51
Limites de Atterberg	LL	19,60%	26,40%	23,70%	27,00%	41,80%
	Limite recomendado	25-50%				
	IP	4,30%	6,40%	4,70%	5,20%	16,50%
	Limite recomendado	2-20%				
Ensaio de Compactação	TOA (%)	14,70	13,90	10,90	13,40	15,30
	Intervalo indicado	10-13%				
	%Matéria Orgânica (%)	0,30	1,02	1,48	0,43	0,34
Método da Jarra	%Areia	-	76,70	80,00	85,00	79,40
	%Silte	-	11,10	13,30	11,30	6,30
	%Argila	-	12,20	6,70	3,80	14,30
	Limite	5-20%				
	%Argila+%Silte	-	23,30	20,00	15,10	20,60
	Limite	10-35%				

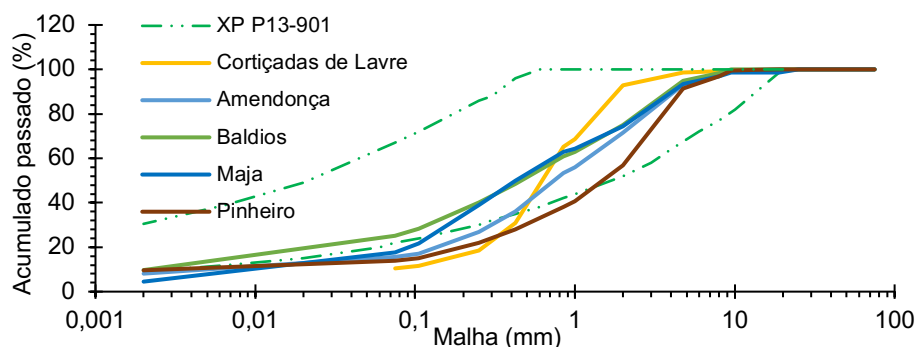


Figura 13: Análise granulométrica – comparação com fuso granulométrico (XP 13-901, 2001)

Conforme se pode observar no gráfico da Figura 13, o solo *Baldios* (TA2), associado a uma curva granulométrica extensa (solo bem graduado), é o que melhor se insere no fuso granulométrico recomendado na norma (XP 13-901, 2001), seguido de *Amendonça* (TA1) e *Maja* (TA3). Face aos restantes solos selecionados *Baldios* apresenta também o menor valor de desperdício após pulverização e crivagem na malha de 8 mm (3.7.2). Adicionalmente, considerou-se um outro parâmetro, designado por “dificuldade de pulverização”, que resulta de uma avaliação qualitativa da facilidade em tratar a terra. Esta avaliação teve por base uma classificação numa escala de 0 a 5, sendo que 0 é um solo de muito fácil pulverização, e 5 um solo de elevada dificuldade de pulverização. Os solos foram ordenados pela seguinte ordem decrescente de facilidade de pulverização: Cortiçadas de lavre; Maja, Baldios; Amendonça; Pinheiro. Destacam-se os solos de Baldios e Maja como sendo os mais fáceis de tratar, contribuindo para tal, o seu mais baixo teor de argila (Tabela 15). Refira-se ainda, que *Baldios* e *Maja*, são os solos que exigem menor dificuldade de preparação, contribuindo para tal o seu mais baixo teor de argila (Tabela 15).

De acordo com o recomendado na Tabela 2 em 2.4, nomeadamente com o indicado por Houben e Guillaud (2008) e Burroughs (2008) ,os BTC estabilizados deverão apresentar cerca de 10-35% de silte+argila. Neste caso, todos os solos analisados respeitam este limite. Esta gama é

igualmente cumprida pelas restantes terras, embora Maja e Pinheiro apresentem características mais arenosas. Excepto para a *Maja*, foram determinados teores de argila superiores a 5%, tornando-os adequados para BTC estabilizados (Tabela 4 em 2.4).

Em relação aos limites de consistência, determinados conforme descrito em 3.2.4, o limite de liquidez (LL) de Baldios foi ligeiramente inferior ao sugerido por outros autores (Tabela 3 em 2.4), nomeadamente por Delgado e Cañas (2007) e (WD-ARS 1333) (LL=25%). Porém, o índice de plasticidade enquadra-se no intervalo recomendado de 2-20%. Note-se que as restantes terras também cumpriram os valores recomendados, verificando-se inclusivamente um ligeiro aumento do LL e do IP na Amendoça, no sentido mais favorável para a produção de BTC. Como referido, o solo designado de Cortiçadas de Lavre foi eliminado do estudo prévio, visto que apresentava apenas cerca de 11% de silte+argila, para um LL de apenas 19%, abaixo do recomendado para a produção de BTC.

Em termos de TOA, os vários solos apresentaram valores dentro dos indicados na literatura (2.4), sendo que *Baldios* foi o que apresentou menor exigência de água (10,90%), face aos restantes (entre 13% e 16%, 3.2.5), o que favorece a produção de BTC. Todas as terras apresentaram um teor de matéria orgânica reduzido (inferior a 2%) de acordo com o ensaio descrito em 3.2.6, pelo que este critério não influenciou na seleção do solo.

Em suma, tendo em consideração os vários critérios analisados foi pré-selecionada a Baldios para a produção de BTC. No entanto, visto que a Amendoça e a Maja apresentaram também características aceitáveis, foi ainda realizado o estudo complementar apresentado em 3.6, que permitiu auxiliar na seleção e validação do solo a considerar na restante campanha experimental.

3.4 Caracterização dos Agregados reciclados

No presente trabalho foram utilizados dois tipos de agregados reciclados provenientes de resíduos de construção e demolição (RCD). Os agregados em questão foram directamente obtidos de duas empresas de gestão de resíduos, sendo um deles resultante de resíduos de construção de natureza variada (RCD1) e o outro resultante da britagem de diversos elementos de betão de composição desconhecida (RCD2). O RCD1 e o RCD2 são provenientes das empresas Vimajas e ZIRCOM, respectivamente. Ambos os agregados foram fornecidos com dimensão máxima inferior a cerca de 4,75 mm, o que os torna especialmente adequados para a incorporação em misturas de terra a utilizar na produção de BTC.

No presente ponto procede-se à caracterização dos RCD utilizados, apresentando-se os ensaios realizados e os resultados obtidos, nomeadamente de massa volúmica e granulometria. No caso do RCD1, procedeu-se ainda à análise expedita da sua composição aproximada, tendo por base a norma EN 933-11:2009.

3.4.1 Análise granulométrica dos RCD

A análise granulométrica foi realizada segundo a EN 12620:2013, seleccionando-se uma amostra representativa do agregado em análise, de aproximadamente 1kg (máxima dimensão das partículas de cerca de 4,75 mm). As curvas granulométricas apresentam-se na Figura 14.

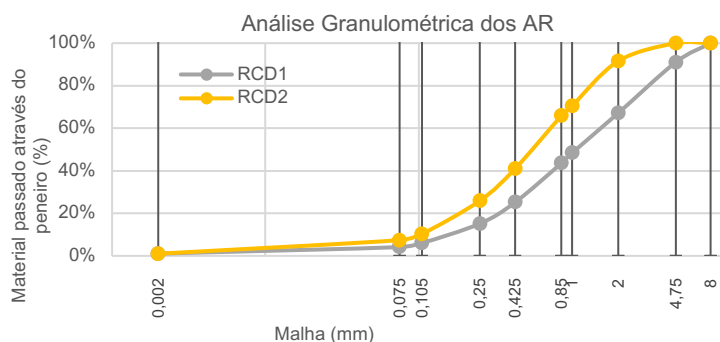


Figura 14: Curvas granulométricas dos AR

3.4.2 Composição do RCD1

No caso do RCD proveniente de Vimajas (RCD1), composto por constituintes resultantes de diversos materiais de construção, procedeu-se à análise da sua composição aproximada, de acordo com a EN 933-11:2009. Inicialmente selecionou-se uma amostra representativa do agregado (cerca de 1810g), a qual foi colocada a secar numa estufa a 40°C até massa constante, registando-se em seguida a massa do material seco. Posteriormente, considerou-se para ensaio apenas a parte da amostra passada no peneiro de abertura 63mm e retida no peneiro de 4,0 mm.

A primeira fase do ensaio consistiu em separar alguma terra presente no RCD1 dos restantes constituintes do agregado, lavando o material sobre o peneiro de 0,063mm. Posteriormente, estes constituintes foram submersos num recipiente com água, agitando-se bem o mesmo de modo a remover as partículas mais finas aderidas na superfície das partículas mais grossas. Após repousar por algum tempo, removeram-se as partículas flutuantes e secou-se a sua superfície. Depois, estas partículas flutuantes foram imersas em água numa proveta graduada e determinou-se o volume de água deslocado. As partículas não flutuantes foram transferidas para um tabuleiro metálico e colocadas a secar em estufa, a 110°C, durante 24h. Em seguida estas partículas foram separadas manualmente de acordo com as categorias definidas na EN 933-11:2009 e registado o seu peso. Foram consideradas 4 categorias, respeitantes a materiais de base cimentícia, essencialmente betão e argamassa (Rc) (Figura 15.b), pedra natural e agregados não ligados (Ru) (Figura 15.d), material cerâmico (Rb) (Figura 15.a) e material betuminoso (Ra) (Figura 15.c). A quantidade de outros constituintes, como vidro, madeiras, plásticos e metais, não foi relevante.

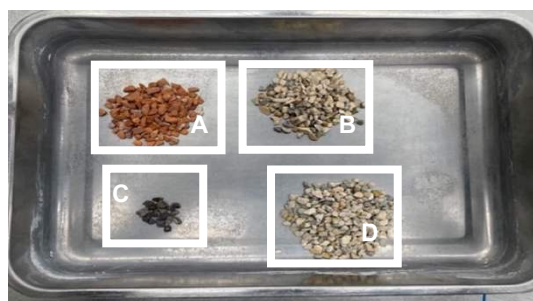


Figura 15: Divisão do RCD nos seus diferentes constituintes – a) material cerâmico (Rb); b) betão e argamassa (Rc); c) material betuminoso (Ra); d) pedra natural (Ru);

Os resultados referentes ao RCD1 encontram-se resumidos na Tabela 16.

Tabela 16: Fração de cada constituinte do RCD1

Constituinte	Massa	Proporção (%)
X (outros)	7,1	7,46%
Rc	38,4	40,34%
Ru	30,6	32,14%
Rb	15,7	16,49%
Ra	3,1	3,26%
Rg	-	<0,5%

3.4.3 Massa volúmica e absorção de água dos RCD

A massa volúmica das partículas foi determinada de acordo com a norma NP EN 1097-6:2016, tendo-se recorrido aos seguintes utensílios: picnómetro de 1L, molde troncocónico metálico, pilão metálico, pistola de ar quente e dois peneiros, um de abertura 4,0mm e outro de abertura 0,063mm.

Antes de se iniciar o ensaio foi necessário preparar o provete de acordo com o indicado na NP EN 1097-6:2016. Após a preparação da amostra, esta foi colocada no picnómetro, submergida em água e agitada de modo a libertar o ar aprisionado. Posteriormente, encheu-se o picnómetro com água até à marca de referência, deixando o material absorver água por, pelo menos, 24h até atingir o estado saturado. No fim deste período corrigiu-se o nível da água até à marca de referência e registou-se a respectiva massa (M_2). Depois, decantou-se o máximo de água possível e colocou-se a amostra num tabuleiro metálico. Com recurso a uma pistola de ar quente, secou-se a superfície da amostra e registou-se a massa correspondente à amostra saturada com superfície seca (M_1). Para confirmar se a superfície do agregado estava completamente seca, compactou-se, com 25 pancadas, uma porção do agregado dentro de um molde troncocónico. A amostra, após ser desmoldada, apresenta-se com a superfície húmida enquanto mantiver a forma do molde. Uma vez registada a massa do agregado saturado com superfície seca, colocou-se a amostra novamente na estufa ventilada durante 24h, e registou-se a massa do provete seco (M_4). Por último, registou-se também a massa do picnómetro apenas cheio de água (M_3).

Finalmente, determinou-se a massa volúmica das partículas secas em estufa, ρ_s , e a absorção de água após 24 horas, WA_{24} , de acordo com as expressões Equação (3) e Equação (4), respectivamente.

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

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

Os resultados apresentam-se na Tabela 17.

Tabela 17: Massa volúmica e valor de absorção de água dos AR

	ρ_s (kg/cm ³)	WA ₂₄ (%)
RCD1	2307	4,8%
RCD2	1961	10,5%

3.4.4 Seleção do RCD

No seguimento dos resultados obtidos nos ensaios descritos em 3.4.1-3.4.3, optou-se por seleccionar o RCD1 como o agregado reciclado a utilizar na restante campanha experimental. Por um

lado, por análise do gráfico da Figura 14, observa-se que a curva granulométrica do RCD1 é mais ligeiramente extensa e mais grosseira, permitindo complementar melhor as curvas granulométricas dos solos, que conforme observado na Figura 13 apresentam um maior défice de partículas superiores a 1 mm. Por outro lado, o RCD1 está associado a valores bastante mais baixos de absorção, cerca de metade do RCD2, reduzindo a exigência de água da mistura e facilitando o controlo de produção da mesma. Acrescente-se ainda que o RCD1 é um resíduo comercial de natureza variada, resultante de actividades de demolição correntes, sendo mais representativo da maioria dos RCD disponíveis nas gestoras de resíduos. No entanto, tal como para a seleção dos solos, foi efectuado o estudo preliminar apresentado em 3.6, tendo por objectivo confirmar e validar a utilização preferencial do RCD1 para a produção dos BTC.

3.5 Caracterização dos estabilizantes

Nos próximos pontos apresentam-se as principais propriedades dos ligantes utilizados no presente trabalho como estabilizantes dos BTC, nomeadamente o cimento normal (CN) e o cimento reciclado de pasta (CRP).

3.5.1 Cimento normal

Neste projecto foram utilizados dois tipos de cimento normal, um cimento tipo I (CEM I 42,5 R) e um cimento composto comercial, do tipo II, com incorporação de 21 a 35% de filler calcário (CEM II/B-L 32.5). O CEM I 42,5 foi utilizado tanto na estabilização química dos BTC como na produção das pastas de origem que serviram de base à produção do cimento reciclado. O CEM II/B-L 32,5 foi apenas utilizado na estabilização química de uma das misturas de BTC. A sua utilização visou atingir uma solução mais económica e de menor impacto ambiental, mais adequado às exigências da construção em terra. O CEM I 42,5 foi adoptado como principal cimento de referência, visto que é melhor conhecida a sua composição e é menos sujeito a variabilidade entre diferentes lotes de fabrico. As principais características de ambos os ligantes podem ser consultadas na Tabela 18. No caso do CEM I/42,5 R, principal cimento de referência, foi realizada a caracterização física, química e mecânica, gentilmente realizada pela empresa Secil. Para o CEM II/B-L 32,5 N foram disponibilizados os valores da ficha técnica apresentada em anexo (J.2 – Anexos).

De modo a ter-se uma estimativa do teor de filler incorporado nos cimentos utilizados, realizou-se uma análise termogravimétrica deste material. A análise termogravimétrica foi realizada com recurso ao equipamento *Hitachi Nexta STA*, considerando-se amostras de cerca de 10 mg. Os ensaios foram realizados em atmosfera de azoto, a uma taxa de temperatura de 15°C, entre 20 e 950°C. Na Figura 16 resumem-se as curvas térmicas obtidas. A perda de massa na região acima de 600°C permite dar uma ideia do teor de material carbonatado na amostra, na forma de calcário ou dolomite. Assim, estima-se que o teor de filler calcário nos cimentos CEM II B/L 32.5 e CEM I 42.5 foi de 31.0% e 3.0%, respectivamente.

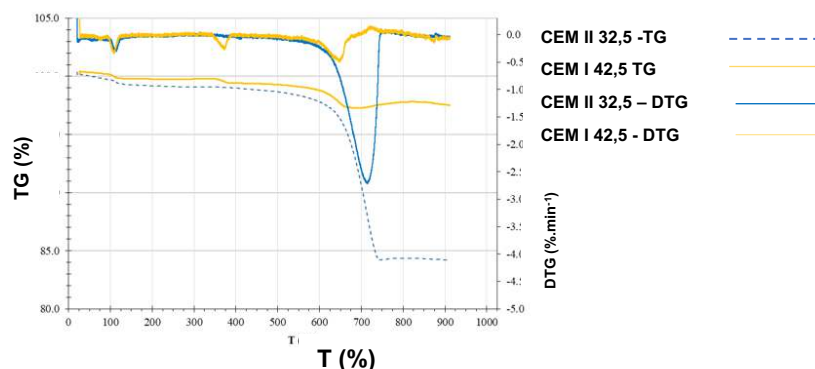


Figura 16: Análise termogravimétrica dos cimentos CEM I 42,5 e CEM II/B-L 32,5

Tabela 18: Características CEM I/42,5R

Parâmetros	CEM I/42,5 R	CEM II/B-L 32,5 N
Massa Volúmica (g/cm ³)	3,02	≅ 3,0
Resistência à compressão aos 28 dias (MPa)	53,3	52,5 ≥ f _{ck} ≥ 32,5
Exigência de água (a/l)	0,295	-
Expansibilidade (mm)	≤ 10	≤ 10
SiO ₂ +Al ₂ O ₃ +Fe ₂ O ₃ (%)	38,79+5,09+2,87	-
CaO + MgO (%)	60,48+1,77	-
CaO livre (%)	1,02	-
Pasta de consistência normal (a/l)	0,30	-
Tempo de presa (min)	Inicial	190
	Final	310
		≥ 75
		-

3.5.2 Cimento reciclado

3.5.2.1 Produção de CR

O cimento reciclado utilizado no presente trabalho foi termoativado a partir de pastas de cimento previamente produzidas em laboratório de acordo com a metodologia definida em trabalhos anteriores realizados no IST (Carvalho, 2020; Leal, 2021; Real et al., 2020). De forma simplificada pode-se dividir o processo de produção do CR em 3 etapas distintas: produção das pastas de origem; britagem e moagem do resíduo de pasta; e termoativação do resíduo de pasta para obtenção do cimento reciclado. Nos parágrafos seguintes descreve-se cada uma destas etapas.

As pastas de origem foram produzidas com CEM I 42,5 R e relação água/ligante (a/l) de 0,55, sendo representativo de matrizes cimentícias presentes em betões existentes. Num trabalho recente realizado no IST, Carriço et al. (2022) verificou que as características do cimento reciclado não são significativamente afectadas pela relação a/l das pastas de origem, pelo menos na gama 0.35-0.55 a/l. As misturas de pasta foram produzidas com auxílio de um berbequim misturador, em sucessivos lotes de cerca de 25 litros. As pastas foram moldadas em provetes cúbicos de 15 cm de aresta, sem necessidade de compactação mecânica, uma vez que apresentavam consistência fluída (Figura 17). Após 24 horas, os provetes foram desmoldados e colocados em câmara húmida por um período superior a 90 dias de idade, de modo a garantir elevados níveis de hidratação e ser representativo de betões antigos, suficientemente hidratados.



Figura 17: Produção de pasta de cimento hidratado – a) execução da mistura; b) preparação dos moldes cúbicos; c) colocação da mistura nos moldes

Após pelo menos 90 dias de cura, os blocos de pasta foram sujeitos a britagem e moagem. Inicialmente, os blocos foram britados na britadeira de maxilas do laboratório de construção do IST, tendo-se obtido detritos com dimensão máxima inferior a 70 mm, e posteriormente britados nas britadeiras pequenas de maxilas do laboratório de mineralogia e geologia (GeoLAB) do IST, atingindo-se granulometrias inferiores a cerca de 8 mm (Figura 18.a). Posteriormente, as partículas seguiram para o moinho de rolos, reduzindo a sua dimensão máxima para cerca de 2 mm. Após esta fase, o resíduo resultante foi seco a cerca de 100 °C durante 24 horas num forno horizontal, de modo a facilitar a etapa seguinte de moagem e reduzir as perdas de água iniciais durante a termoativação. A moagem foi realizada num moinho horizontal com auxílio de esferas metálicas, instalado no GeoLAB (Figura 18.c). Esta moagem complementar permitiu trazer os detritos de pasta para dimensões mais próximas do observado no cimento normal, garantindo-se menos de 5% de material retido no peneiro de 250 μm . Neste processo foram utilizadas 625 esferas com dimensões compreendidas entre 20 e 200 mm, para uma carga média de material a moer de cerca de 13-15 kg. A moagem foi realizada em ciclos de 2h, para uma velocidade de rotação de cerca de 40 rpm. No caso do CRP fino procedeu-se a uma crivagem extra dos detritos de cimento através do peneiro de 150 μm .



Figura 18: Produção de CR – a) moinho de maxilas; b) forno rotativo; c) moinho de bolas

Finalmente, a última etapa do processo correspondeu à termoativação dos resíduos de pasta, que permitiu recuperar as suas propriedades ligantes (Shui et al., 2007). O tratamento térmico foi realizado num forno rotativo (Figura 18.b), onde o material foi aquecido de acordo com o seguinte programa: rampa de aquecimento com uma taxa de 10°C/min até aos 150°C, onde permaneceu durante 1h, rampa de aquecimento com uma taxa de 10°C/min até ao patamar de 650°C, onde permaneceu durante 3h. Após este patamar, iniciou-se o processo de arrefecimento lento, no interior do forno, durante cerca de 12h. Após a termoativação, o material foi armazenado em sacos de plástico selados que foram conservados em barricas fechadas.

3.5.2.2 Caracterização do cimento reciclado

O cimento reciclado foi inicialmente caracterizado em termos de massa volúmica, exigência de água e teor de cal livre. O teor de cal livre foi determinado de acordo com um procedimento interno, tendo por base as normas EN 1015-6:1998 e EN 196-3:2016. Na Tabela 19 apresentam-se os resultados obtidos, destacando-se a elevada exigência de água e teor de cal livre do CRP, quando comparado com o CN (Tabela 18 versus Tabela 19). A elevada exigência de água do CRP foi igualmente observada por outros autores, sendo essencialmente atribuída à natureza porosa do CRP e à sua elevada área superficial, cerca de 9 vezes superior à do CN (Carriço et al. 2020, 2022, Bogas et al., 2022). O início de presa do CRP (Figura 20.c) foi cerca de 76% superior ao do CN (Tabela 18), relacionado com o maior atraso no desenvolvimento do $\alpha'_H\text{-C}_2\text{S}$ do CR até 1 dia de idade (Bogas et al., 2022).

Tabela 19: Propriedades físicas e mecânicas dos CRP

Parâmetro	CRP
Pasta de consistência normal (a/l)	0,67
Tempo de presa (min)	Início 335
	Fim 465
Massa volúmica (g/cm ³)	3,00
Cal livre (%)	17,89

O cimento reciclado foi também caracterizado com recurso a termogravimetria, permitindo estimar o nível de hidratação da pasta antes da sua termoactivação, e o nível de pré-hidratação e pré-carbonatação do cimento reciclado na altura da sua utilização. Para tal, utilizou-se a termobalança referida em 3.5.1, *Hitachi Nexta STA*, em que as amostras foram ensaiadas em atmosfera de azoto, para uma taxa de temperatura de 15°C, entre 20 e 950°C

Na Figura 19 apresentam-se as curvas de termogravimetria (TG) e a derivada da TG (DTG) para o resíduo de pasta de cimento antes (resíduo de cimento CW) e após a termoactivação (CRP).

A análise termogravimétrica permite distinguir 3 grandes regiões de perda de massa associadas à (Lothenbach et al., 2018; Real et al., 2020; Sérgio C. Angulo et al., 2015): 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 cerca de 400 a 550°C (Ldx) e a fase de decarbonatação, essencialmente acima de 600°C (Ldc). As perdas de massa correspondentes a estas regiões indicam-se na Tabela 20.

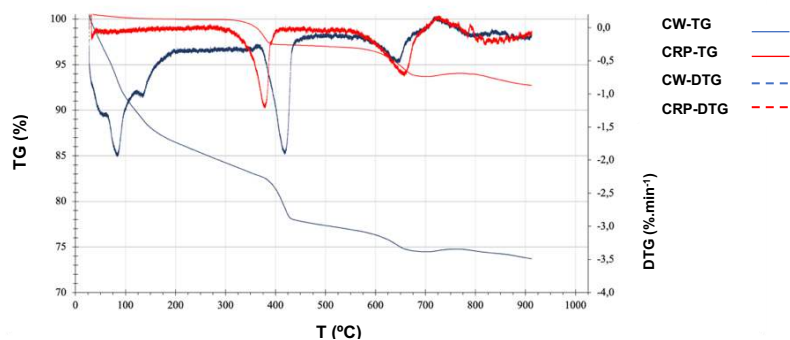


Figura 19: Curvas Termogravimétricas

Do ensaio de TG avaliaram-se os seguintes parâmetros: W_B – teor de água combinada não evaporada; α – grau de hidratação da amostra; CH – quantidade de hidróxido de cálcio livre; $CaCO_3$ – teor de material carbonatado na amostra (calcite). O grau de hidratação inicial da amostra, α , foi determinado de acordo com a equação apresentada por Monteagudo et al. (2014), em que se relaciona W_B com W_N , que representa a proporção de água que é necessária para hidratar por completo o cimento em análise. Pode-se assumir que W_N é cerca de 0,23, de acordo com Neville (1995). Por sua vez, W_B resulta da soma de Ldh com Ldx. Relativamente aos teores de calcite ($CaCO_3$) e de hidróxido de cálcio livre (CH), estes foram determinados por aplicação das Equações 5 e 6, respectivamente.

$$C_{aO} = (L_{dx_{NT}} - L_{dx_{RC}}) * \frac{M_{CaO}}{M_{H_2O}} + (L_{dc_{NT}} - L_{dc_{RC}}) * \frac{M_{CaO}}{M_{CO_2}} \quad (5)$$

$$CH = L_{dx} * \frac{M_{CH}}{M_{H_2O}} + (L_{dc} - L_{dc_{NT}}) * \frac{M_{CH}}{M_{CO_2}} \quad (6)$$

Na Tabela 20 resumem-se os principais resultados extraídos deste ensaio.

Tabela 20: Resultados do ensaio de termogravimetria

Mistura	Ldh (105C)	Ldx	Ldc	Considerando Ldh (after 105 C)			
	Ldh (%)	Ldx (%)	Ldc(%)	W_B	α	CH (%)	$CaCO_3$ (%)
CW	12,7	3,60	3,19	0,17	72,9	14,8	7,3
CRP	0,48	2,70	4,18	0,04	17,6	11,1	9,5

O CW apresentou um valor de α de 73%, confirmando-se o elevado nível de hidratação dos detritos de pasta antes de se proceder à sua reciclagem. Seria esperado que o grau de hidratação do CRP após a termoactivação fosse pouco significativo. No entanto, verificou-se um valor α de 17,6%. Um fenómeno semelhante foi observado por Real et al. (2020), tendo-se atribuído à rápida reidratação da cal livre durante o arrefecimento e armazenamento do CR. Isso é confirmado pelo elevado teor de CH (11,1%) no CRP. Por outro lado, o valor de Ldh foi bastante reduzido (0,48%), o que significa que não ocorreu reidratação dos silicatos e aluminatos de cálcio. Constata-se ainda que durante as etapas de britagem, moagem, termoactivação e armazenamento do CW ocorreu um ligeiro aumento do teor de material carbonatado (em cerca de 2,2%).

Finalmente, procedeu-se ainda à caracterização do cimento reciclado quando inserido em argamassas, permitindo avaliar o seu comportamento no estado fresco (massa volúmica, espalhamento) e a sua resistência mecânica à flexão e à compressão. O desempenho destas argamassas foi comparado com o de argamassas de referência de igual a/l, mas produzidas com CN. Desse modo, é possível confrontar a qualidade relativa de ambos os ligantes, antes de incorporados nos BTC. Porém, devido à elevada exigência de água do CRP, foi necessário adicionar cerca de 2% de superplastificante (em % de massa de cimento) à argamassa com este ligante. Após a realização de testes prévios, definiu-se uma relação a/l de 0,67 e um traço ponderal de 1:3 para as argamassas, o que permitiu atingir uma consistência normal, com um valor mínimo de espalhamento alvo de 160 mm, tal como apresentado na Tabela 21. O ensaio de espalhamento foi realizado de acordo com a norma EN 1015-3:1999 (Figura 20.b). Para a mesma relação a/l, as argamassas de referência com apenas CN atingiram consistência fluida, confirmando-se a elevada exigência de água do CRP.

Tabela 21: Propriedades no estado fresco e resistência mecânica de argamassas com a/l de 0,67, produzidas com CRP ou CN

Parâmetro	Norma	CRP	CN
Espalhamento (mm)	EN 1015-3	160	201
Massa volúmica fresca (kg/m ³)	EN 1015-6	2029	2127
Teor teórico de vazios (%)	EN 1015-6	7,2	2,8
Resistência à compressão* (MPa)	3 dias	16,8	22,4
	28 dias	19,9	37,0
Resistência à flexão* (MPa)	3 dias	3,8	4,6
	28 dias	5,6	8,3

* Resistências obtidas em argamassas com traço 1:3 e a/l de 0.67

Antes de se realizar o ensaio de espalhamento, procedeu-se à determinação da massa volúmica fresca, conforme o procedimento descrito na norma EN 1015-6:1998, utilizando um recipiente de 1 litro (Figura 20.a). A massa volúmica foi ligeiramente inferior na argamassa com CRP, o que estará essencialmente relacionado com o aumento do teor de vazios na argamassa com CRP, devido à sua menor trabalhabilidade (Tabela 21).



Figura 20: Ensaio de caracterização do CR – a) determinação da massa volúmica; b) avaliação da consistência; c) determinação de consistência de pasta normal e tempo de presa;

Após a produção das argamassas e caracterização das mesmas no estado fresco, foram produzidos 6 moldes de 160x40x40 mm, por composição. A argamassa com CRP foi moldada e compactada de acordo com o procedimento corrente descrito na EN 196-1:2016, recorrendo a uma mesa de compactação onde a argamassa foi colocada em duas camadas, sujeitas a 60 pancadas cada. A argamassa de referência com CN, visto apresentar consistência fluída, foi moldada sem compactação. No final, removeu-se o excesso de argamassa, alisou-se a superfície dos provetes e cobriu-se o molde com película aderente, deixando em ambiente de laboratório durante 24h. Após desmoldagem, ao fim de 24 horas, os provetes foram curados em câmara húmida até à idade de ensaio, que ocorreu aos 3 e 28 dias. Os ensaios de caracterização mecânica foram realizados na prensa *Form+ Test Seidner 505/200/10 DM1*. Em primeiro lugar, ensaiaram-se os provetes à flexão de onde resultaram duas metades que foram posteriormente ensaiadas à compressão. Os ensaios foram realizados de acordo a EN 1015-11:2019, para uma taxa de carga de cerca de 0,2-0,4 MPa/s.

Na Tabela 21 resumem-se os resultados de resistência mecânica obtidos em ambas as argamassas. Em relação à argamassa de referência com CN, a resistência à compressão foi 25% e 46% inferior na argamassa com CR, aos 3 e 28 dias de idade, respectivamente. Esta redução foi mais elevada do que a observada por outros autores, também em argamassas com CR e CN (Carriço et al., 2020; Real et al., 2020). Resistências iguais aos 3 dias e 23% inferior na argamassa com CR foi reportado por Carriço et al. (2020). Isso sugere que o CRP produzido no presente trabalho foi menos

efectivo. A pré-hidratação observada no CRP, o elevado teor de ar com que foi produzida a argamassa de CR, e a granulometria grosseira deste ligante, são algumas das razões possíveis para os resultados observados. A maior eficiência aproximação entre as resistências do CRP e do CN, aos 3 dias de idade, face aos 28 dias, resulta da maior reactividade do $\alpha'_H\text{-C}_2\text{S}$ no CRP, entre 1 e 3 dias de idade (Bogas et al., 2022).

3.6 Estudo Prévio - Optimização da Qualidade dos BTC

Conforme referido em 3.1, foi efectuado um estudo experimental preliminar com o objectivo de apoiar o processo de seleção do solo e de otimizar o processo de produção e a qualidade dos BTC. Este estudo teve em consideração a influência de diferentes factores, como o tipo de solo, o tipo de RCD (RCD1, RCD2) e o teor de água do solo (TW). Nesta fase apenas foram considerados BTC produzidos com CN, visando atingir soluções optimizadas em termos de compacidade e resistência mecânica. Nos próximos pontos apresenta-se a campanha experimental e os resultados obtidos neste estudo prévio.

3.6.1 Trabalho experimental – Estudo prévio

Na Tabela 22 resumem-se as misturas de BTC consideradas neste estudo preliminar. A produção dos BTC seguiu o procedimento descrito em 3.7. Na Tabela 22, os tipos de solo pré-seleccionados, Amendonça, Baldios, Maja e Pinheiro, apresentam as designações TA1, TA2, TA3 e TA4, respectivamente. Em relação aos RCD, os resíduos provenientes de Vimajas e da ZIRCOM assumem as designações RCD1 e RCD2, respectivamente, tal como referido em 3.4. Pelos motivos referidos em 3.3, o solo *Cortiçadas de Lavre* foi eliminado deste estudo, não apresentando as características adequadas para a produção de BTC.

Tabela 22: Composições consideradas no estudo preliminar de produção de BTC

Designação	Estudo	Tipo de solo	% CN ^a	Tipo de RCD	% RCD ^a	TW ^b (%)	
TA2RCD1	Tipo de solo e de RCD	Baldios	TA2	8	RCD1	25	14
TA3RCD1		Maja	TA3	8	RCD1	25	15
TA3RCD2		Maja	TA3	8	RCD2	25	16
TA1RCD1		Amendonça	TA1	8	RCD1	25	15
TA4RCD1		Pinheiro	TA4	8	RCD1	25	15
TA2/15RCD1	Teor de RCD	Baldios	TA2	8	RCD1	15	13
TA2/35RCD1		Baldios	TA2	8	RCD1	35	14
TA2/12W	Teor de água	Baldios	TA2	8	RCD1	25	12
TA2/13W		Baldios	TA2	8	RCD1	25	13
TA2/15W		Baldios	TA2	8	RCD1	25	15
TA3/12W	Teor de água	Maja	TA3	8	RCD1	25	12
TA3/13W		Maja	TA3	8	RCD1	25	13
TA3/14W		Maja	TA3	8	RCD1	25	14

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

De modo a atingir BTC de maior compacidade, optou-se por otimizar a curva granulométrica da mistura à curva de referência de Fuller modificada, traduzida pela Equação 7, assumindo para q o valor de 0.33 (Malkanthi et al., 2021) e para a dimensão máxima do agregado (D_{max}) 4.76 mm. O parâmetro $P(x)$ designa a percentagem de material passado acumulado no peneiro de diâmetro d_i .

$$P(x) = \left(\frac{d_i}{D_{max}} \right)^q \quad (7)$$

Em BTC com 8% de cimento e o solo Baldios foi analisado a incorporação de 3 teores de RCD1 (15%, 25% e 35%). A definição destes teores teve por base um estudo teórico em que se determinou a soma dos desvios quadrados da curva das misturas, incorporando 15 a 50% de RCD1, face à curva de referência de Fuller (Tabela 23). Por análise da tabela, verifica-se que dependendo do tipo de solo, a incorporação ideal de RCD1 com vista à maior aproximação à curva de Fuller variou entre 0 e 35%.

Tabela 23: Soma do quadrado do desvio da curva das misturas face à curva de referência de Fuller

% RCD1	0%	15%	25%	35%	40%	50%
	Δ^2	Δ^2	Δ^2	Δ^2	Δ^2	Δ^2
Amendonça	92	158	221	300	345	447
Baldios	328	128	59	42	52	112
Maja	393	213	152	137	148	203
Pinheiro	837	836	846	864	876	906

O teor de água (TW) de cada mistura foi definido tendo por base o método expedito de *drop test*. Neste ensaio parte-se de uma mistura com um teor de água inferior ao óptimo (TOA calculado de acordo com 3.2.5), e vai-se incrementando a quantidade de água até que esta atinja uma consistência compatível com a formação de uma pequena bola de terra, da dimensão da palma da mão, que após ser libertada da altura da cintura, e embater no solo, não se desfaz em mais do que 4 fracções. Se o provete de terra se desfizer em mais de 4 fracções, significa que o teor de água é muito reduzido. A vantagem do *drop test* é que permite ajustar o teor de água a adicionar à mistura de forma expedita e sem necessidade de conhecer, à partida, o teor de água dos vários constituintes.

Após a produção dos blocos, determinou-se a massa volúmica e a resistência à compressão aos 7 dias de idade, servindo estes valores como fatores de comparação entre os 4 solos em análise. Os blocos foram curados em ambiente de laboratório, após 3 dias de cura húmida inicial. Os ensaios foram realizados de acordo com 3.8.1.

3.6.2 Discussão de resultados do estudo prévio

Na Tabela 24 resumem-se os vários resultados de resistência mecânica e massa volúmica obtidos em cada uma das misturas.

Tabela 24: Principais resultados obtidos no seguimento do estudo prévio

Mistura	Tipo de solo	Massa Volúmica aos 7 dias		Resistência Compressão 7 dias	
		Média (kg/m ³)	Coef. Var. (%)	Média (kg/m ³)	Coef. Var. (%)
TA2RCD1	Baldios	2389	5,04	10,53	8,52
TA3RCD1	Maja	2347	0,72	6,56	1,49
TA3RCD2	Maja	2356	0,56	5,83	13,4
TA1RCD1	Amendonça	2299	1,92	5,27	13,29
TA4RCD1	Pinheiro	2191	3,27	5,44	0,69
TA2/15RCD1	Baldios	2217	1,67	5,99	10,22
TA2/35RCD1	Baldios	2210	0,89	6,64	9,68
TA2/12W	Baldios	2206	1,71	5,47	6,83
TA2/13W	Baldios	2333	3,91	10,18	27,6
TA2/15W	Baldios	2284	2,55	6,24	0,74
TA3/12W	Maja	2256	0,41	4,52	4,61
TA3/13W	Maja	2161	0,33	3,75	3,59
TA3/14W	Maja	2311	0,57	5,43	9,81

Para diferentes teores de RCD1 (15-35%) nos BTC com *Baldios*, verificou-se que a maior resistência mecânica foi atingida para 25% de RCD (10.5 MPa). Esta resistência foi cerca de 60-80% superior à das restantes misturas com 15 e 35% de RCD (Tabela 24, TA2/35RCD1 e TA2/15RCD1) e

corroborar com o facto de nos BTC com 25% RCD se ter atingido uma massa volúmica 8% mais elevada. Neste caso, foi possível atingir uma maior compactidade nesta mistura. De acordo com a análise teórica indicada na Tabela 24, seria esperado uma maior compactidade granular na mistura com 35% RCD, embora a diferença fosse pequena face a 25% RCD. Para além da compactidade granular, o teor em água livre na mistura (descontando a água de absorção dos agregados) afecta a compactidade dos BTC. Com base neste estudo, considerou-se 25% como o teor de referência de RCD.

Em relação ao tipo de RCD, foram analisadas 2 misturas com RCD1 e RCD2, nos BTC com *Maja*. Devido à maior absorção de água de RCD2, os BTC com este agregado foram produzidos com teor de água ligeiramente superior. Verifica-se que a resistência diminuiu ligeiramente com a utilização de RCD2, apesar de a massa volúmica ter sido semelhante nos dois tipos de BTC. Em geral, pode-se concluir que o RCD1 teve um desempenho pelo menos equivalente ao RCD2, justificando-se a sua seleção para a restante campanha experimental.

Relativamente ao tipo de solo a utilizar nos BTC, foram consideradas misturas de 25% RCD1 e os 4 tipos de solo selecionados. Os BTC com Baldios foram produzidos com menor teor em água (14%, Tabela 22) e maior massa volúmica (Tabela 22) do que os BTC com os restantes solos. A resistência variou entre 5.3 e 6.6 MPa nos BTC com Amendonça, *Maja* e Pinheiro, ficando longe dos 10.5 MPa atingidos em Baldios. Optou-se assim por considerar o solo Baldios para a produção futura de BTC. Estes resultados corroboram a análise realizada em 3.3, onde se verificou que *Maja* (TA3) e *Baldios* (TA2) são os solos que melhor respeitam o fuso granulométrico recomendado. Para a análise da influência do teor em água, foram consideradas 3 misturas com *Baldios* e 3 com *Maja*, visto que, como referido, são os solos mais adequados para BTC. Os BTC foram produzidos com o mesmo teor de RCD (25%) e de CN (8%), variando apenas o teor de água da mistura, considerando variações perto do TOA determinado em 3.2.5. Nos BTC com *Baldios*, tendo em consideração a variação do TW entre 12 e 15%, conclui-se que as maiores resistências foram atingidas para 13 e 14% de TW, ocorrendo uma redução significativa (40-45%) para valores de TW inferiores ou superiores (Figura 21). As diferenças obtidas estão de acordo com a tendência de evolução das massas volúmicas e, como tal, da compactidade dos blocos. Isso salienta a importância do TW no desempenho dos BTC no estado fresco e endurecido, tal como já tinha sido observado no estudo de compactidade e TOA dos solos, em 3.2.5.

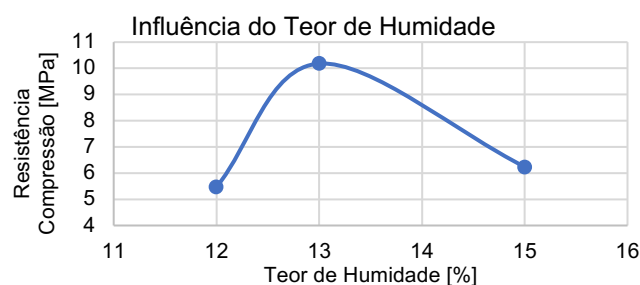


Figura 21: Influência do teor de água na produção de BTC com *Baldios*

Por sua vez, a resistência dos BTC com *Maja*, cujo TW também variou entre 12 e 15%, foi mais elevada para o maior valor de TW, correspondente a 15% (Tabela 24). Mais uma vez, os resultados

estão de acordo com a tendência observada na massa volúmica, reforçando a importância da compactação na resistência mecânica. Neste caso, tal como observado em 3.2.5, *Maja* está associada a uma maior exigência de água do que *Baldios*. Note-se que o TW ótimo das misturas foi superior ao TOA determinado em 3.2.5, quer para *Baldios* quer para a *Maja*. Isso resulta da introdução de RCD (4.8% de absorção, 3.4.3) e de cimento na mistura promover um aumento da quantidade de água total dos BTC, trasladando o ponto de TOA face à análise de compactação, tendo em conta apenas a utilização do solo de forma isolada. Também terá influência a maior energia de compactação utilizada na prensagem dos BTC face ao ensaio de Proctor.

3.7 Produção dos BTC

No presente capítulo, descreve-se todo o processo de produção dos BTC, incluindo a sua formulação e composição, bem como o processo de mistura, moldagem e cura dos blocos. A produção dos blocos contou com o apoio da Associação Cultural de Arte e Comunicação das Oficinas do Convento (ACOC) de Montemor-o-Novo, que cedeu o espaço, parte do equipamento necessário para a produção dos BTC e apoio logístico. No total, foram produzidos 323 blocos, de dimensões 220x105x70 (*mm*³), para os quais se utilizou cerca de 1 *m*³ de solo, 70 kg de CRP, dos quais 5 kg correspondem a CRP fino, 61 kg de CEM I/42,5 R e 5 kg de CEM II/B-L 32,5.

3.7.1 Composição dos BTC

Na Tabela 25 apresenta-se a composição das várias misturas produzidas neste trabalho. Na designação das misturas seguiu-se o seguinte critério: o primeiro algarismo que precede a designação indica o teor de ligante utilizado (5%, 8%), seguido do tipo de ligante (CRP, CN, CRPF); “CN” e “CN32.5” refere-se aos BTC de referência estabilizados com CEM I/42,5 R e CEM II/B-L 32,5, respectivamente; quando não se indica o tipo de cura, assume-se cura ao ar em ambiente de laboratório (AC – do inglês *air curing*), nos restantes casos adoptou-se a designação WC para cura húmida (WC – do inglês *wet curing*); “NE” refere-se a BTC não estabilizados. Note-se que apenas o solo Baldios e o RCD1 foram selecionados para este trabalho (ver capítulo 3.6).

O teor de ligante adoptado nas misturas foi definido em percentagem de massa de terra seca. O teor de RCD de referência de 25% foi adoptado com base no estudo prévio apresentado em 3.6, sendo também definido em percentagem de massa de terra seca (solo+RCD). No que se refere à quantidade de água a adicionar a cada mistura, esta foi inicialmente definida com base no estudo prévio apresentado em 3.6 e nos resultados do ensaio de *drop test*. Contudo, este método acabou por se revelar pouco apropriado, percebendo-se que se atingiam BTC de melhor qualidade, e adequadas condições de aplicabilidade, caso se adoptassem teores de água mais baixos, mais perto do TOA estimado em 3.6. O teor de água das misturas foi definido em percentagem da massa de sólidos (terra mais ligante). De referir que a quantidade de água a adicionar à mistura teve em conta a humidade inicialmente existente no solo, que foi medida através do humidímetro indicado na Figura 22, bem como a água de absorção dos RCD, determinada em 3.4.3.



Figura 22: Humidímetro de alta precisão

Devido à importância do teor de água nas propriedades finais dos BTC, pois afecta as condições de compactação e a sua compacidade final, e visto que o CRP apresenta elevada exigência de água face ao CN, optou-se por considerar misturas de idêntico teor em água ou idêntica aplicabilidade, conforme o seguinte: 1) BTC com CN de idênticas condições de aplicabilidade (TW=14%) face aos BTC com CRP de igual teor de ligante e de RCD (TW=20%); 2) BTC com CN produzidos com a mesma quantidade de água dos BTC com CRP de igual teor de ligante e RCD (TW=14% ou 20%). Esta distinção é realizada através da indicação da percentagem do teor em água dos BTC no final da sua designação, sempre que for distinta de 14%, seguido da sigla “W” (Tabela 25). Os BTC não estabilizados (NE) foram produzidos para idêntica aplicabilidade, com menor TW (12%), mais próximo do TOA calculado para *Baldios* (11%). Note-se que o TOA foi determinado a partir de ensaios de compactação de amostras compostas apenas por solo, excluindo o RCD (3.2.5).

Na Tabela 25, foi estimado a composição das misturas por m³ de solo, tendo em conta os valores determinados de massa volúmica fresca dos blocos (ver 4.1), imediatamente após a sua prensagem. Apresenta-se a massa total de água da mistura ($M_{\text{água,T}}$), bem como a massa de água efectiva da mistura ($M_{\text{água,ef}}$), que exclui a água de absorção do agregado (solo+RCD). Na última coluna da tabela apresenta-se ainda uma estimativa da porosidade total dos BTC, P_T , tendo em consideração as respectivas composições, o valor de cálculo da sua massa volúmica fresca e a redução de vazios devido à hidratação do estabilizante. A porosidade total corresponde ao teor de vazios dos blocos após compactação adicionado dos vazios resultantes da água de evaporação total, incluindo a de absorção. Assim, a água de evaporação corresponde à massa de água total descontada da água de hidratação do ligante. Para a água de hidratação assume-se que o ligante nos BTC está hidratado a 80%, para uma quantidade máxima de água combinada de 0.23 da massa de CN (Neville, 1995) ou 0.22 da massa de CRP (Bogas et al. 2022). Os valores indicados de P_T serão discutidos em maior detalhe no capítulo 4, salientando-se desde já a maior dificuldade de compactação das misturas com CRP.

Tabela 25: Composição dos BTC, para 25% de incorporação de RCD e porosidade total estimada, P_T

Mistura		Estab. (%)	TW (%)	M_{solo} (kg/m ³)	M_{RCD} (kg/m ³)	M_{CN} (kg/m ³)	M_{CRP} (kg/m ³)	$M_{\text{água,T}}$ (kg/m ³)	$M_{\text{água,ef}}$ (kg/m ³)	P_T (%)
CN	8CN20W	8	20	1213	408	133	0	404	363	33,4
	8CN	8	14	1317	443	145	0	322	276	27,7
	8CNWC	8	14	1307	440	144	0	319	274	28,3
	5CN	5	14	1336	450	92	0	319	273	29,2
	8CN32,5	8	14	1265	426	139	0	309	265	30,6
CR	8CRP20W	8	20	1146	386	0	126	382	342	37,1
	8CRP	8	14	1225	412	0	135	299	257	32,8
	8CRPWC	8	20	1138	383	0	125	379	340	37,5
	5CRP20W	5	20	1181	398	0	81	375	335	37,5
	8CRPF	8	14	1212	408	0	133	296	254	33,5
	20CRP80CN	8	14	1311	441	115	29	291	246	28,1
	50CRP50CN	8	14	1271	428	70	70	282	238	30,3
NE	0	12	1398	471	0	0	282	234	30,4	

3.7.2 Preparação do solo para a produção dos BTC

A preparação do solo para a produção dos BTC compreendeu uma fase de pulverização, seguida de peneiração, onde se utilizou um peneiro rotativo de malha quadrada com abertura de 8 mm (Figura 23.a). A pulverização é uma etapa importante do processo, pois permite desagregar os torrões de terra, libertando as partículas de argila oclusas e aumentando a área superficial do solo em contacto com o estabilizante. Por outro lado, a peneiração permite limitar a dimensão máxima das partículas a 8 mm, o que é importante no sentido de aumentar a coesão e qualidade de acabamento dos blocos. De referir que a curva granulométrica do solo que serve de base à formulação dos BTC foi definida para a situação do solo pulverizado e passado através da malha de 8 mm.

Uma vantagem dos RCD seleccionados é a não necessidade de se proceder a tratamento prévio adicional, utilizando-se os mesmos na forma como foram fornecidos. Isso foi possível, devido ao facto de se ter utilizado o areão de dimensão inferior a 8 mm produzido e fornecido pela Vimajas. No caso dos RCD foi apenas necessário corrigir a quantidade de água de modo a ter em conta a sua absorção durante a mistura (3.4.3).

3.7.3 Mistura, moldagem e cura dos BTC

Após a preparação do solo, seguiu-se a pesagem e a mistura de todos os constituintes, usualmente recorrendo a uma misturadora de eixo vertical com descarga de fundo. No entanto, a utilização da misturadora exige que a quantidade de material sólido seja de pelo menos cerca de 50 kg. Assim, em alguns casos em que a quantidade de mistura foi pequena, houve necessidade de realizar a mesma manualmente, directamente em carrinho-de-mão. Em ambas as situações, começou-se por homogeneizar os RCD e a terra, e após cerca de 3 minutos de mistura, juntou-se, de forma faseada, o ligante e em seguida a água da mistura. Deixou-se misturar mais 3-4 minutos e transferiu-se o material já homogeneizado para um carrinho-de-mão.



Figura 23: Produção dos BTC – a) peneiração do solo (malha de 8mm); b) colocação da mistura nos moldes; c) desmoldagem dos blocos;

Após a mistura, procedeu-se à moldagem e compactação dos blocos, com recurso a uma prensa manual Terstaram da Appro Techno (Appro Techno, 2021), também cedida pela Associação das Oficinas do Convento. Esta prensa requer, idealmente, duas pessoas para operá-la. Após a limpeza dos moldes, fundamental para garantir que a desmoldagem não danificasse a integridade dos blocos, a mistura foi colocada sobre os pratos da prensa sem qualquer compactação manual (Figura 23.b). Em seguida, rasou-se a superfície do molde, retirando o excesso, e calcaram-se os 4 cantos de modo a garantir uma maior integridade destas regiões de maior fragilidade. Posteriormente, os blocos foram

prensados, desmoldados (Figura 23.c) e transportados para uma paleta de forma cuidadosa, com as palmas da mão a pressionarem as faces de maior dimensão. Os vários blocos foram cobertos por uma película de plástico humedecida, sendo periodicamente pulverizados com água, de forma a evitar a secagem rápida dos mesmos. Antes da cura, foram pesados 3 blocos por composição de modo a estimar a sua massa volúmica fresca. Finalmente, após 3 dias de cura, os blocos foram transportados para o Laboratório de Engenharia Civil do IST onde se realizaram os vários ensaios de caracterização referidos em 3.8.

Dependendo do tipo de ensaio e composição analisada, os BTC foram sujeitos às diferentes condições de cura referidas em seguida:

- AC – cura em ambiente de laboratório – temperatura variável entre de 19- 26°C e humidade relativa de 55-75%;
- SAT – cura em água – imersão dos blocos em água até à realização do ensaio
- OD - secos em estufa até massa constante (OD – do inglês *oven dried*)
- WC – cura húmida - colocação dos blocos em câmara húmida com humidade relativa superior a 90% e temperatura média de cerca de 20°C
- SEC – cura semi-seca em câmara condicionada com humidade relativa de 65±5% e temperatura média de cerca de 21°C.

Na Tabela 27 resume-se o procedimento de cura realizado em cada ensaio, incluindo o período de cura húmida a que os BTC foram inicialmente sujeitos na ACOC.

3.8 Caracterização dos BTC

Como referido, os BTC foram caracterizados em termos das suas principais propriedades físicas e mecânicas, de acordo com os ensaios normativos indicados na Tabela 26.

Tabela 26: Normas - Caracaterização dos BTC

Nome do Ensaio	Norma
Resistência à compressão	EN 772-1:2000
Resistência à tração por flexão	EN 772-6:2001
Resistência à tração por compressão diametral	EN 12390-6:2009
Retração	LNEC E 398:1998
Esclerómetro pendular	ASTM C805 e NP EN 12504-2:2003
Velocidade de propagação de ultrassons	NP EN 12504-4:2007
Abrasão	XP P13-901:2001
Módulo de elasticidade	LNEC E 397:1993
Porosidade total	EN 772-4:1998
Condutibilidade Térmica	Método transiente modificado (Isomet 2114)

Na Tabela 27 resume-se idade em que se procedeu à realização dos respectivos ensaios e o número de provetes considerados. Os provetes foram ensaiados em blocos de 220x105x70 mm³.

Tabela 27: Resumo do esquema de ensaios

Ensaio	Nr. Provetes	Idade de ensaio	Ambiente de cura
Resistência à compressão*	72	28	AC, OD, SAT
	29	3	AC
	17	7	
	24	28	
		12	28
Resistência à tração por flexão*	48	28	AC
Resistência à tração por compressão diametral*	32	28	AC
Retração	3/mistura	1-55	SEC
Esclerómetro Pendular	2/mistura	28	AC
Velocidade de propagação de ultrassons*	72	28	AC, OD, SAT
	20	3	AC
	8	7	
	24	28	
		12	28
Abrasão	3/mistura	28	AC
Massa Volúmica*	72	28	AC, OD, SAT
	29	3	AC
	17	7	
	24	28	
		12	28

* O número de provetes ensaiados por mistura variou consoante a idade e o ambiente de cura de ensaio

3.8.1 Resistência à compressão

O ensaio de resistência à compressão foi realizado na prensa hidráulica Toni Pact, presente no LC do IST, de acordo com a norma EN 772-1:2000. Uma vez que este equipamento possui baixa sensibilidade para forças inferiores a cerca de 200 kN, foi necessário utilizar uma célula de carga com capacidade até 400kN, ligada ao *data logger* Spider 8. A força máxima suportada pelo bloco foi obtida directamente da análise do gráfico força-tempo, registado pelo software Catman Express.

Antes da realização do ensaio, foi determinado o peso e a geometria de cada bloco. De forma resumida, colocou-se a célula de carga sobre o prato inferior da prensa, seguida de uma chapa metálica que desempenhou uma função tripla: servir de base para o provete, assegurar a distribuição uniforme da carga pela área de ensaio e reduzir o atrito entre o bloco e os pratos da prensa (Figura 24). Os blocos foram ensaiados segundo a maior área transversal, ou seja, 220x105 (mm²). Note-se que, para evitar a distorção dos resultados, a taxa de carregamento foi definida para 4kN/s.



Figura 24: Resistência compressão - A) esquema de ensaio; B) bloco após ensaio;

Por aplicação da Equação (8), determinou-se a tensão máxima suportada pelo bloco, dada em MPa, onde F_c representa a força máxima (N) aplicada sobre a área de ensaio, A (mm²).

$$\tau_{max} = \frac{F_c}{A} \quad (8)$$

Os resultados referentes a cada uma das composições encontram-se indicados em 4.2.

3.8.2 Resistência à tração por flexão

À semelhança do ensaio descrito em 3.8.1, também este ensaio foi realizado na prensa hidráulica Toni pact, e contou com a utilização de uma célula de carga até 400kN de força máxima e com o *data logger* Spider 8. A norma seguida foi a EN 772-6:2001.

Tal como no ensaio de resistência à compressão, todos os blocos foram pesados e mediu-se a sua altura antes de se iniciar o ensaio. Para além da célula de carga e da chapa metálica utilizadas no ensaio anterior, utilizou-se também uma base metálica composta por dois apoios fixos distanciados de 108 mm, que se colocou sobre a chapa metálica, e um pequeno varão metálico colocado sobre a face superior do bloco e que teve a função de transformar a carga distribuída aplicada ao bloco numa carga pontual aplicada a meio do bloco (Figura 25). Neste ensaio a taxa de carregamento foi fixada em 0,1kN/s, dado que o valor esperado correspondia a menos de 10% da resistência à compressão.



Figura 25: Resistência à tração por flexão- A) esquema de ensaio; B) bloco fracturado; C) Esquema ilustrativo do ensaio

Por aplicação da Equação (9), determinou-se a resistência à tração por flexão, onde τ_{ctr} é a tensão máxima dada em MPa, F (N) é a força máxima suportada pelo bloco, b é a largura do bloco, igual a 105mm, h (mm) a altura e l (mm) a distância entre apoios.

$$\tau_{ctr} = \frac{3 * F * l}{2 * b * h^2} \quad (9)$$

3.8.3 Resistência à tração por compressão diametral

Este ensaio contou com a utilização da mesma prensa hidráulica, da mesma célula de carga e do mesmo software de aquisição de dados indicados nos capítulos 3.8.1 e 3.8.2, e norma seguida foi a EN 12390-6:2009

Todos os blocos foram pesados e mediu-se a sua altura antes de se iniciar o ensaio propriamente dito. Sobre a célula de carga colocou-se o cangalho metálico, seguido de uma chapa metálica para ajustar a altura dos blocos e duas ripas de madeira, uma colocada entre a face inferior do bloco e a chapa metálica, e outra colocada sobre a face superior, ambas alinhadas com o eixo longitudinal do bloco (Figura 26). A taxa de carregamento foi definida para 0,1kN/s. Por aplicação da Equação (10), determinou-se a resistência à tração por compressão diametral, onde $\tau_{ct, spl}$ (MPa) é a tensão máxima, F (N) é a força máxima aplicada, l é o comprimento do bloco, igual a 220 mm, e d (mm) é a altura do bloco.



Figura 26: Ensaio à tração por compressão diametral - A) esquema de ensaio; B) bloco fracturado; C) Esquema representativo do ensaio – alçado lateral

$$\tau_{ctr} = \frac{2 * F}{\pi * l * d} \quad (10)$$

3.8.4 Retração

O ensaio de retracção foi realizado com base na norma LNEC E 398:1998, tendo-se considerado 3 provetes por composição. Após 3 dias de cura húmida, os blocos destinados a este ensaio foram colocados na câmara meio-seca do laboratório de construção, no IST, a cerca de $21 \pm 2^\circ\text{C}$ e $65 \pm 5\%$ HR. O ensaio decorreu durante cerca de 55 dias (Figura 27). Nos primeiros quinze dias, a retracção foi medida diariamente e nos restantes dias a cada dois dias até se atingir a estabilização. Para manter a fiabilidade dos resultados, todas as medições foram realizadas à mesma hora do dia.

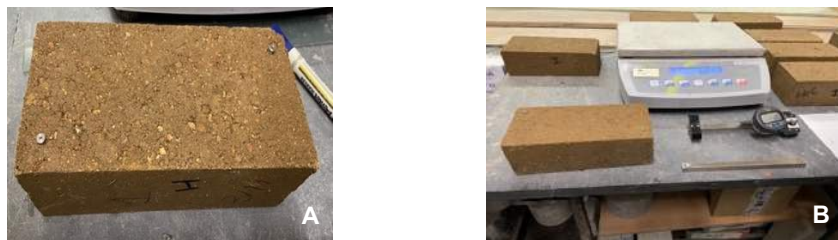


Figura 27: Ensaio de retracção - A) bloco com pastilhas metálicas; B) equipamento utilizado

A preparação dos provetes ocorreu 24h após a sua produção e consistiu em colar com supercola duas pastilhas metálicas, uma em cada canto do bloco, distanciadas 200mm entre si. As medições são feitas através de um comparador com distância padrão de 200mm, utilizando um equipamento DEMEC Mitutoyo Absolute com $1\mu\text{m}$ de precisão. No dia seguinte reforçou-se a colagem das pastilhas, por aplicação de prego líquido. A aplicação da Equação (11), permitiu calcular a extensão da retracção dada pela relação entre a diferença de medições (Δ_i) registadas em dois dias consecutivos e a distância padrão.

$$\varepsilon_i = \frac{\Delta_i - \Delta_{i-1}}{d_0} \quad (11)$$

3.8.5 Resistência por esclerómetro pendular

O ensaio do esclerómetro pendular é um procedimento experimental não destrutivo, de execução rápida e simples. O procedimento experimental seguiu a norma NP EN 12504-2:2003. Neste caso utilizou-se o esclerómetro do tipo PT, cuja massa tem um diâmetro igual a 40 mm e está presa a um eixo horizontal, descrevendo uma trajectória semi-circular quando é libertada. Este equipamento, face a outros tipos de esclerómetro, é mais apropriado para ensaiar materiais de baixa resistência

mecânica, e permite avaliar a dureza superficial dos blocos relacionando-a directamente com a resistência à compressão. Por cada mistura, foram ensaiados dois blocos. Sucintamente, encostou-se o bloco a uma superfície lisa e rígida, para não afectar as medições aquando do impacto, colocou-se o esclerómetro na vertical em contacto com a face do provete e ativou-se o mecanismo, provocando a queda do pêndulo a partir de uma altura normalizada. O ressalto (índice esclerométrico do provete) representa a quantidade de energia recuperada pelo pêndulo, e pôde ser lido directamente na escala presente no próprio equipamento, foi realizado um ensaio em cada face de cada bloco.

3.8.6 Velocidade de propagação de ultrassons (UPV)

À semelhança do ensaio descrito em 3.8.5, a determinação da velocidade de propagação de ultrassons é também um ensaio não destrutivo. A norma considerada foi a NP EN 12504-4:2007. Para realizar este ensaio utilizou-se o equipamento Pundit Lab+ (Proceq) e vaselina para promover o contacto entre os transdutores e o provete. A propagação de ultrassons está directamente relacionada com o volume de vazios do material, que podem ser zonas porosas ou descontinuidades. Dado que as ondas se propagam mais rapidamente em meio sólido do que em meio gasoso, quanto maior a compacidade dos blocos, e, por conseguinte, menor o volume de vazios, maior será a velocidade de propagação de ultrassons. A velocidade de propagação é dada pela distância entre os dois transdutores dividida pelo tempo de propagação das ondas.

3.8.7 Resistência à abrasão superficial

Este ensaio permitiu avaliar a resistência superficial do bloco face a acções abrasivas de erosão. Segundo a norma XP P13-901:2001, recorreu-se aos seguintes materiais: escova de aço à qual se fixou uma chapa metálica de 3kg. Durante um minuto, executaram-se movimentos circulares sobre a superfície do bloco, sem se exercer força vertical adicional. No final, removeram-se as partículas que se soltaram do bloco e pesou-se o provete. Segundo a norma XP N13-901 (2001), o coeficiente de abrasão é calculado pela relação entre a área da escova de aço e a massa abradada (Equação 12). Este parâmetro foi, depois, devidamente enquadrado nos valores constantes na norma considerada, tendo sido ensaiados 3 provetes por composição.

$$C_a = \frac{\text{Área}_{\text{superfície}}}{\text{Massa}_{\text{abradado}}} \quad (12)$$

3.8.8 Módulo de elasticidade

O módulo de elasticidade é uma propriedade dos materiais sólidos, definido pela relação entre a tensão aplicada a um dado material e a respectiva deformação imposta, sem sair do regime elástico. Como este ensaio não está normalizado para BTC, tentou-se adaptar a especificação LNEC E-397 (1993), recorrendo à aplicação de extensómetros. Porém, devido à natureza rugosa e friabilidade da superfície dos blocos, nem sempre foi possível garantir a sua colagem adequada, principalmente nos blocos de menor resistência mecânica (menos estabilizados). Em alternativa, optou-se por recorrer à técnica de vídeo-extensometria, utilizando uma câmara de vídeo de alta precisão que mediu a variação da distância entre dois pontos marcados nos provetes, de afastamento inicial conhecido. Neste caso, uma das faces dos blocos foi pintada com uma tinta branca, de forma a garantir o óptimo contraste dos

pontos de referência. Em cada metade da face pintada foram marcados 6 pontos a preto, de modo a formar uma grelha com distâncias conhecidas entre eles.

Os ensaios foram realizados com recurso à prensa INSTRON (Figura 28), com capacidade até 250kN, existente no laboratório de resistência de materiais do IST. O bloco foi colocado na vertical, entre os pratos da prensa, tendo-se preparado o vídeo-extensómetro, de modo a apontar directamente para o bloco. Após ligar um holofote, no computador definiu-se a captação de dados e os dois pontos de controlo. Ligou-se, ainda, um *data logger* SPIDER 8 para aquisição de dados. Em termos do procedimento experimental foram realizados pelo menos 3 ciclos de carga-descarga, incrementando a tensão aplicada em 0,5MPa até 1/3 da resistência à compressão, determinada previamente em provetes de misturas com a mesma composição. Por aplicação da Equação 13 determinou-se o módulo de elasticidade.

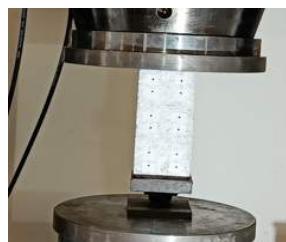


Figura 28: Esquema de ensaio – Módulo de Elasticidade

$$E = \frac{\Delta\sigma}{\Delta\varepsilon} = \frac{\sigma_f - \sigma_i}{\varepsilon_f - \varepsilon_i} * 10^{-3} \quad (13)$$

3.8.9 Massa volúmica

A massa volúmica dos blocos foi determinada de forma semelhante para três estados diferentes: no estado fresco, imediatamente após a produção dos blocos; no estado endurecido, antes dos ensaios de resistência à compressão e tração; no estado seco, após secagem em estufa ventilada a 100°C. A massa volúmica foi calculada pela relação entre a massa e o volume do bloco, que foi determinado pela medição da geometria dos blocos. A massa volúmica no estado fresco foi determinada para três blocos por mistura.

3.8.10 Condutibilidade térmica

Como é sabido, a condutividade térmica é uma propriedade intrínseca de cada material, influenciada por características como a estrutura interna ou a fase em que se encontra.

Para este ensaio utilizou-se o equipamento ISOMET 2114, da Applied Precision Enterprise, e a respectiva sonda de superfície. Este ensaio foi realizado em blocos para três tipos de estados: ambiente de laboratório, blocos secos em estufa e blocos saturados. De forma a não interferir com os resultados, colocou-se sobre a bancada uma placa de poliestireno que funcionou como isolante térmico. Depois, colocou-se a sonda em contacto com a superfície do bloco e deu-se início ao ensaio. No final, determinou-se a condutibilidade térmica (λ), dada em W/mK, e a capacidade calorífica volumétrica ($c\rho$), dada em J/m³.K. Segundo o fabricante, este equipamento tem 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.

4 Análise de Resultados

No capítulo 4 apresentam-se e discutem-se os resultados obtidos durante a campanha experimental descrita nas seções 3.7 e 3.8. Para tal, foram caracterizados diferentes tipos de BTC, associados a diferentes condições de cura (AC, WC, SAT e OD), teor de ligante (5%, 8%), tipo de ligante (CN ou CRP), teor de humidade, teor de CRP (20%, 50%) e grau de finura do cimento reciclado (CRP, CRPF). Como destacado no capítulo 1, o principal objectivo deste trabalho visou analisar a influência da incorporação de cimento reciclado na estabilização de BTC, comparando o seu desempenho com o de blocos de referência correntes estabilizados com cimento normal (CN) e com o de blocos não estabilizados (NE).

4.1 Massa volúmica

Na Tabela 28 resumem-se os resultados de massa volúmica no estado fresco após a produção dos blocos, bem como a estimativa de porosidade das misturas. Para algumas composições apresenta-se também a massa volúmica aos 28 dias após diferentes condições de cura (em laboratório - AC, saturado - SAT, seco - OD). A massa volúmica no estado endurecido, em condições saturadas, foi apenas determinada para os blocos estabilizados, pois os não estabilizados desagregaram-se por completo ao fim de algumas horas submersos em água. Esta é uma evidência que atesta a eficiência da estabilização química dos BTC com CRP.

Tabela 28: Resultados do ensaio de massa volúmica

	Mistura	TW (%)	Massa volúmica (kg/m ³)			P _T (%)	
			D _f	ρ _{28d,AC}	ρ _{28d,SAT}		ρ _{28d,OD}
CN	8CN20W	20	2159			33,4	
	8CN	14	2227	2048	2160	27,7	
	8CNWC	14	2210	2074*		28,3	
	5CN	14	2197	2010	2171	29,2	
	8CN32,5	14	2138	1960		30,6	
CR	8CRP20W	20	2039	1879	2061	1767	37,1
	8CRP	14	2071	1966	2092	1802	32,8
	8CRPWC	20	2026	1880*			37,5
	5CRP20W	20	2035	1870	2036	1737	37,5
	8CRPF	14	2050	1906			33,5
	20CRP80CN	14	2187	2025			28,1
	50CRP50CN	14	2120	2011			30,3
NE	12	2150	1938			30,4	

*Massa volúmica aos 28 dias após cura húmida

A massa volúmica fresca é um parâmetro que permite avaliar, ainda que indirectamente, o grau de compactação dos blocos, que, para além de depender do teor de humidade e da composição, é influenciado pela força de compressão exercida na prensagem (estabilização mecânica) e pela quantidade de material colocado nos moldes da prensa. Uma vez que se utilizou uma prensa manual, foi difícil garantir condições idênticas de composição e de espessura dos blocos. Isso pode ser observado na Tabela 28 e na Tabela 25 em 3.7.1, por comparação com as misturas de igual composição 8CN e 8CNWC, e 8CRP20W e 8CRPWC. Para a prensa utilizada, Apro Techno 2021, a força de compressão variou entre 2 e 4 MPa, conforme indicado na ficha técnica do equipamento. De acordo com Rigassi (1985) valores usuais de massa volúmica fresca para os BTC variam entre 1800 e 2200 kg/m³, o que vai de encontro à maioria dos valores obtidos neste trabalho, cuja massa volúmica variou entre 2026 e 2227 kg/m³. Os valores obtidos no presente trabalho são superiores aos reportados

por Azevedo (2021) e Silva (2015), que variaram entre 1950 e 2090 kg/m³, apesar de se ter utilizado a mesma prensa na execução dos blocos e teores de estabilização idênticos. Uma razão está relacionada com a utilização da mistura de terra otimizada em 3.6, cuja curva granulométrica está bem definida dentro do fuso recomendado para BTC. Como seria de esperar, a massa volúmica aos 28 dias aumentou com o teor em água dos blocos, sendo mais elevada após saturação e menor após secagem. Em média, a massa volúmica em condições saturadas foi 16% superior à massa volúmica seca. Os blocos curados em ambiente de laboratório (AC), após 7 dias de cura húmida, atingiram condições intermédias de secagem e massa volúmica.

As misturas sujeitas a cura húmida apresentaram massas volúmicas frescas semelhantes às das misturas de igual composição curadas ao ar (8CN e 8CNWC; 8CRP20W e 8CRPWC). Por sua vez, a massa volúmica aos 28 dias foi apenas ligeiramente superior à da massa volúmica das misturas curadas ao ar, indiciando que o grau de humidade e de hidratação atingido não foi muito diferente entre misturas, especialmente nos BTC com CR. Note-se que a cura húmida diferenciou da cura ao ar, apenas na extensão do período de aspersão dos blocos após 7 dias de idade.

Em relação à influência do teor de estabilizante, constata-se que para o mesmo teor em água da mistura, a massa volúmica fresca e a porosidade total não variaram de forma significativa com o teor de ligante (5%, 8%), independentemente do tipo de cimento (Tabela 28). Isso significa que a compactação da mistura granular foi pouco afectada para os teores de estabilizante considerados no trabalho. No entanto, em relação à massa volúmica seca e aos 28 dias de idade a massa volúmica tende a aumentar com o aumento do teor de ligante (CRP ou CN, Figura 29). Tal seria de esperar, uma vez que parte da água adicionada aos BTC estabilizados é consumida nas reações de hidratação, resultando no aumento da MV, sendo mais elevado quanto maior o teor de ligante. Isso mostra que o CRP tem capacidade de reidratação.

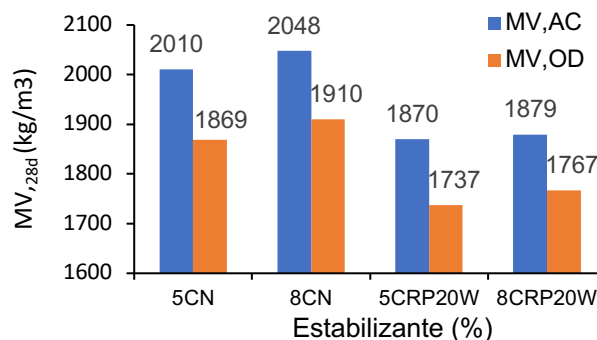


Figura 29 - Massa volúmica após cura ao ar (MV_{AC}) e após secagem (MV_{OD}) aos 28 dias em função do teor de estabilizante

Relativamente à influência do tipo de ligante, que é o principal objectivo do trabalho, os BTC estabilizados com CRP desenvolveram menor massa volúmica fresca e aos 28 dias do que os BTC com CN de igual teor de ligante. A redução de massa volúmica fresca foi de 7% nos BTC com 8% de estabilizante e foi acompanhada por um aumento da porosidade total, indicando que nos BTC com CRP foram atingidas menores compacidades, mesmo tendo em conta idênticos teores de humidade (Tabela 25). Isso justifica-se pela maior exigência de água do CRP, que dificulta a sua aplicabilidade e

compactação. A diferença de massa volúmica entre os BTC com 8% CN e 8% CRP tende a diminuir ligeiramente após 28 dias, em condições de AC (6%) ou OD (4%). De facto, constata-se que a perda de massa volúmica entre o estado fresco e o endurecido após secagem em estufa foi de 14,2% e 13% nos BTC com CN e CR, respectivamente. Isso sugere que o nível de hidratação dos BTC com CRP foi pelo menos semelhante ao dos BTC com CN.

Conforme esperado, a massa volúmica das misturas com substituição parcial de CN por CR foi intermédia do obtido nas misturas com 100% destes ligantes. Na Figura 30.a constata-se uma tendência clara de aumento da porosidade total com a diminuição da massa volúmica fresca, demonstrando-se a elevada inter-relação entre estas propriedades. Porém, a correlação é apenas elevada quando se considera de forma separada os BTC de igual TW, independentemente do tipo e teor de ligante. Isso resulta do facto do TW ter um menor impacto na porosidade do que na massa volúmica fresca. A correlação aumenta quando se considera a massa volúmica seca, visto que toda a água de evaporação é eliminada, ficando apenas a de hidratação (Figura 30.b).

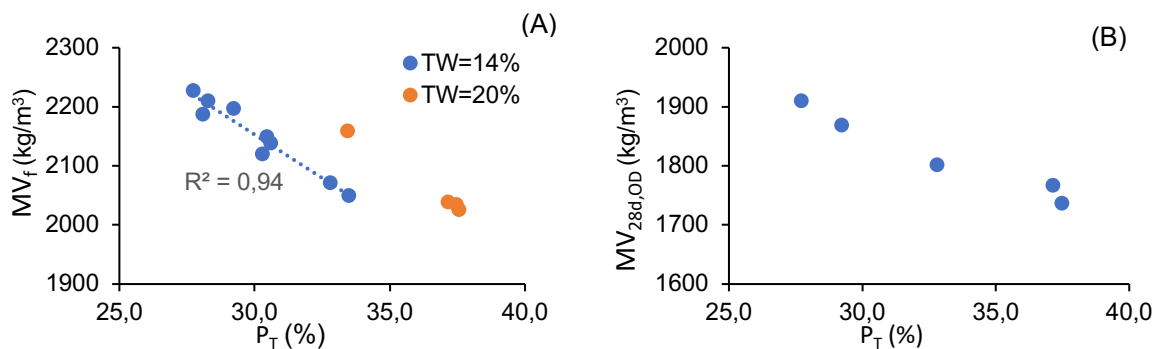


Figura 30 – Relação entre a porosidade total, P_T , e a: a) massa volúmica fresca (MV_f); b) massa volúmica após secagem aos 28 dias ($MV_{28d,OD}$)

Os BTC não estabilizados (NE) apresentaram valores de massa volúmica e porosidade próximos das misturas com CN. Isso justifica-se pelo reduzido TW (12%) e elevada compacidade com que foram produzidos os NE.

4.2 Resistência à compressão

A resistência à compressão dos BTC estabilizados quimicamente depende de vários factores, destacando-se: o teor de água da mistura, o grau de compactação do bloco após a sua produção, as condições de cura (Kerali, 2001) e o teor e tipo de ligante incorporado. O principal objectivo deste trabalho é analisar a eficiência do CRP como estabilizante, tendo de se procurar individualizar este factor, mantendo os restantes constantes.

Na Tabela 29 resumem-se os resultados de resistência à compressão obtidos no presente estudo, tendo em consideração diferentes idades (3 a 28 dias) e condições de ensaio (Sat - saturado, OD – seco em estufa, AC – cura ao ar). Apresentam-se também os valores de porosidade total e da relação água/ligante efectiva (a/l_{efec}), descontando da água total a água estimada de absorção do solo e do RCD.

Tabela 29: Resistência à compressão a diferentes idades e condições de ensaio (Sat - saturado, OD – seco em estufa, AC – cura ao ar)

Mistura	a/l _{efe}	P _T (%)	f _{c,3d,AC} (MPa)	f _{c,7d,AC} (MPa)	f _{c,28d,AC} (MPa)	CV _{f_{c,28d}} (%)	f _{c,28d,Sat} (MPa)	CV _{f_{c,28d}} (%)	f _{c,28d,OD} (MPa)	CV _{f_{c,28d}} (%)
CN	8CN20W	2,72	33,4	2,4	4,1	-	-	-	-	-
	8CN	1,91	27,7	4,5	5,9	9,0	8,2	6,2	7,5	12,2
	8CNWC	1,91	28,3	-	-	7,7*	6,6	-	-	-
	5CN	2,97	29,2	3,3	-	6,5	8,7	3,9	9,2	8,7
	8CN32,5	1,91	30,6	-	-	6,8	7,3	-	-	-
CR	8CRP20W	2,72	37,1	0,7	1,0	3,0	12,0	1,6	7,5	4,9
	8CRP	1,91	32,8	2,2	2,7	5,5	12,2	2,5	14,8	7,9
	8CRPWC	2,72	37,5	-	-	3,0*	12,0	-	-	-
	5CRP20W	4,13	37,5	0,6	-	1,8	8,9	0,7	6,8	2,6
	8CRPF	1,91	33,5	-	-	5,3	-	-	-	-
	20CRP80CN	1,91	28,1	-	-	10,4	-	-	-	-
	50CRP50CN	1,91	30,3	2,2	-	8,4	5,9	-	-	-
NE	-	30,4	0,4	0,7	2,1	8,1	-	-	-	-

*Resistência à compressão aos 28 dias após cura húmida

Comparando os resultados deste estudo com os de Azevedo (2021), o primeiro trabalho a incorporar cimento reciclado em BTC, verifica-se que o desempenho mecânico dos BTC foi, em geral, superior. Apesar deste autor ter considerado blocos com relação altura/largura inferior à do presente estudo, para BTC com 10% CRP obteve uma resistência após cura ao ar de 4,4 MPa, cerca de 80% da resistência obtida no presente trabalho para 8% de CRP. Este aumento corrobora o incremento também observado nas misturas com CN, obtendo-se no presente estudo 9 MPa para 8% CN e no de Azevedo (2021) apenas 5,9 MPa com 10% CN. Note-se que este autor utilizou a mesma prensa e o mesmo tipo de cimento deste trabalho, variando apenas o tipo de solo e o teor de água da mistura. Assim, conclui-se que neste trabalho foi atingida uma mistura mais otimizada, associada a condições de compactação superiores. Isso é confirmado pelo facto de Azevedo (2021) reportar massas volúmicas frescas entre 1800 e 2000, cerca de 9% inferiores e porosidades totais cerca de 20% superiores.

A resistência à compressão dos blocos estabilizados com cimento tem como origem a matriz cimentícia que interliga as diferentes frações do solo e os produtos resultantes das reações de hidratação do cimento (Houben e Guillaud, 2008). Esta ligação deverá ser tanto mais forte e, por conseguinte, maior a resistência mecânica, quanto maior for a porosidade das partículas do solo (Kerali, 2001; Young et al., 1998), pois desta forma reforça-se o nível de interligação com os produtos hidratados do cimento. Isso é válido se a resistência for condicionada pela matriz e pela interligação da matriz com a terra. Neste caso poderá ter sido vantajoso a incorporação de agregado reciclado poroso em substituição de terra, conforme se procedeu no presente trabalho.

Como seria de esperar, a resistência à compressão aumentou com a percentagem de incorporação de ligante, tanto no caso do CN como do CRP (Tabela 29, Figura 31). Isso demonstra a eficiência dos dois tipos de ligante analisados na estabilização dos BTC. No entanto, a incorporação de apenas 5% CRP conduziu a menores resistências do que nos BTC não estabilizados. Neste caso, a estabilização por CRP não foi suficientemente eficiente para compensar o ganho de compactação atingido nos NE, associado a menor porosidade total (Tabela 29). Note-se que a mistura com 5% CRP foi produzida com 20% de TW, conduzindo a elevada porosidade. É ainda referido por Namango (2006), que a menor eficiência de um ligante pode estar relacionada com uma fraca homogeneização da mistura, resultando num défice de hidratação do ligante e numa fraca distribuição pela massa de terra,

principalmente nos casos em que a mistura é homogênea manualmente sem recurso a misturadora mecânica. Porém, ao contrário de NE, os BTC com 5% CRP mantiveram a sua integridade após saturação.

Ao menor teor de ligante, corresponde uma maior relação a/l efectiva, aumentando a porosidade da matriz de pasta envolvente do solo (Tabela 29). A variação de resistência com a relação a/c tende a seguir a lei de Abrams, podendo ocorrer reduções superiores a 60% por cada aumento de 0,5 na relação a/c, em cimentos tipo CEM I 42,5 (Bogas e Gomes, 2013). Neste caso, a redução do teor de ligante, de 8 para 5%, e o aumento do TW da mistura, de 14% para 20%, promoveu um aumento em cerca de 0,8-1,0 na relação a/l (Tabela 29). Estes resultados vão de encontro às conclusões de estudos passados, nomeadamente Kerali (2001), onde se afirma que uma menor relação água/ligante aliada a um elevado grau de hidratação do cimento, conduz a menor volume de vazios dos BTC.

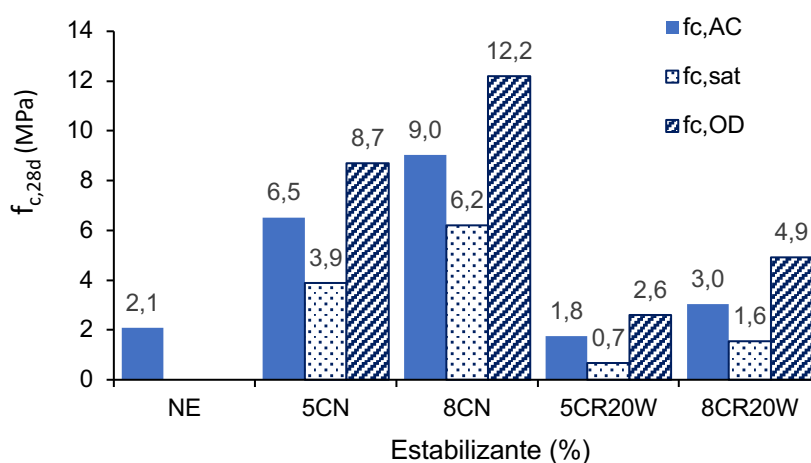


Figura 31 – Resistência à compressão aos 28 dias dos BTC, tendo em consideração diferentes condições de ensaio (Sat - saturado, OD – seco em estufa, AC – cura ao ar).

A resistência à compressão aos 28 dias dos BTC com 8% CRP curados ao ar (AC) foi 39% inferior à dos BTC com igual teor de CN. Conforme discutido em 3.5.2.2 a resistência de argamassas com o CR utilizado neste trabalho foi 46% inferior à de argamassas de igual a/l com CN. A principal razão atribuída foi o elevado teor de ar da argamassa de CRP, de menor trabalhabilidade. Deverá também ocorrer um menor desenvolvimento de produtos de hidratação a longo prazo no CRP, devido à menor quantidade de compostos anidros não carbonatados, disponíveis para hidratar (Bogas et al., 2022). Tal como discutido em 4.1, a maior exigência de água do CR conduziu à produção de BTC de menor compactidade, associados a maior porosidade total (Tabela 29).

Na Figura 32 confirma-se que existe uma boa correlação entre a resistência à compressão e a porosidade total, especialmente quando se separa por diferente teor de estabilizante. De facto, a resistência não depende apenas da compactidade mas também da capacidade de ligação promovida pelo ligante, que reduz com a diminuição do seu teor no BTC. Importa destacar que a relação apresentada é independente do tipo de ligante, sugerindo-se que para iguais condições de compactação (idêntico P_r), os BTC com CRP poderão atingir resistência similar aos BTC com CN. Assim, os principais factores que afectaram a resistência foram a porosidade total e o teor de estabilizante.

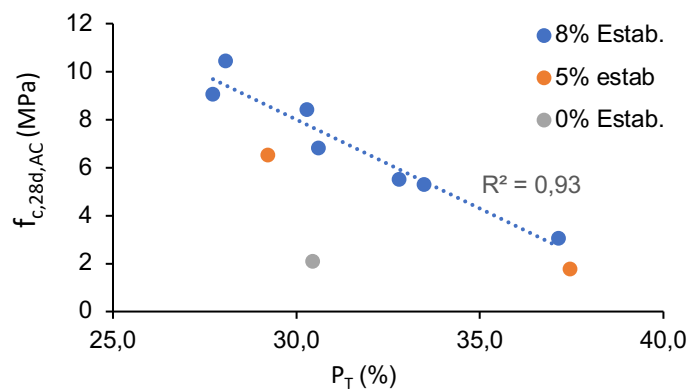


Figura 32 – Resistência à compressão aos 28 dias após cura ao ar ($f_{c,28d,AC}$) versus porosidade total, P_T

Verifica-se que a resistência à compressão tende a diminuir com a substituição progressiva de CN por CRP, ocorrendo o oposto com a porosidade total (Figura 33), o que corrobora o observado na Figura 32. Porém, até 20% de substituição verificou-se um aumento ligeiro da resistência à compressão. Neste caso, visto que a porosidade total não foi significativamente alterada, a incorporação de CRP foi benéfica, corroborando os resultados obtidos por (Real et al., 2020), para betões com até 40% de substituição de CN por CRP. Este é um resultado muito promissor, na medida em que confirma a hipótese avançada anteriormente de se obterem resistências pelo menos semelhantes nos BTC com CRP, caso se atinjam misturas de igual compacidade. Acrescente-se ainda que para 50% de incorporação de CRP, a redução de resistência foi de apenas 7%. Por sua vez, a resistência da mistura composta por 4% de CN e 4% de CRP foi 29% superior à da mistura com 5% de CN, o que permite também comprovar a eficiência do CRP no desenvolvimento da resistência mecânica.

Apesar dos BTC com 8%CRP terem desenvolvido menor resistência do que os BTC com CN, apresentaram 2,7 vezes maior resistência do que os BTC não estabilizados. Isso demonstra o elevado poder ligante e estabilizante do CRP, promovendo um aumento significativo da resistência, mesmo tendo em conta que a compacidade atingida nos blocos foi 8% inferior à de NE (P_T na Tabela 29). Por sua vez, comparando o desempenho dos blocos produzidos com cimento corrente CEM II/B-L32.5 e CRP, verifica-se uma maior proximidade das resistências. Neste caso, a redução de resistência nos BTC com CRP foi de 19%. Mais uma vez, isso resultou do aumento de 23% da porosidade total face ao BTC com CEM II/B-L 32.5. Conforme estiado em 3.5.1, o cimento composto contém cerca de 31% de filler, conduzindo a uma redução de 25% na resistência face ao BTC com CEM I 42,5.

Ao contrário do que poderia ser esperado, a utilização de CRP mais fino (CRPF) não conduziu a maior resistência à compressão dos BTC (Tabela 29). Apesar do maior nível de finura aumentar a área superficial do ligante e contribuir para o maior desenvolvimento de resistência, promove também o aumento de exigência de água e dificulta a dispersão das partículas (Carriço et al., 2022b). Neste caso, a ligeira redução na resistência (4%) foi acompanhada por um ligeiro aumento na porosidade (2%) (Tabela 29). A variação pouco significativa de resistência justifica-se também pelo facto do CRPF ter correspondido apenas à crivagem do CRP no peneiro de 125 μm , o que afecta pouco a distribuição granulométrica deste ligante.

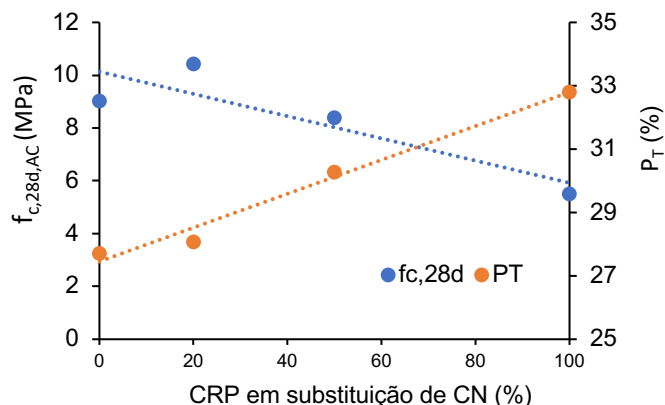


Figura 33 – Variação da resistência à compressão aos 28 dias após cura ao ar ($f_{c,28d,AC}$) e da porosidade total, P_T , com a percentagem de substituição de CN por CRP

Na Figura 34, apresenta-se a evolução da resistência à compressão das misturas NE, 8CN, 8CRP e 8CRP20W ao longo do tempo, até aos 28 dias de idade. Ao contrário do observado em trabalhos anteriores sobre argamassas e betões, a evolução da resistência foi mais rápida nos BTC com CN. Carriço et al. (2022a) e Real et al. (2021) reportam resistências iniciais, aos 3 dias de idade, em betões e argamassas, pelo menos semelhantes nas com CRP e CN, para igual relação a/l. Isso justifica-se pela presença de α'_H-C_2S no cimento reciclado, cuja reactividade ocorre predominantemente entre 1 e 3 dias, contribuindo para o desenvolvimento de resistência similar ao C_3S no CN (Bogas et al., 2022). Adicionalmente, devido à natureza porosa do CRP, este desenvolve uma microestrutura bifásica, composta por poros interpartícula e intrapartícula. Desse modo, parte da água da mistura é absorvida no CRP, ficando menos água livre disponível, o que reduz a distância entre partículas. Desse modo, a matriz tende a desenvolver uma microestrutura mais refinada desde as idades iniciais (Bogas et al., 2020).

Porém, no presente estudo, os BTC com CRP apresentaram menor resistência do que os BTC com CN desde os 3 dias de idade, verificando-se ainda que a perda de resistência relativa foi inferior aos 28 dias (39%) do que até aos 7 dias (54%). Isso justifica-se pelo facto dos BTC terem sido sujeitos a cura húmida durante os primeiros 7 dias, mantendo-se mais próximos da saturação até essa idade. Isso fez com que os ensaios fossem realizados para condições de humidade mais elevadas do que aos 28 dias, que conforme discutido mais à frente conduz a uma diminuição da resistência mecânica. Esta é a principal razão de se observar um incremento de resistência de 50% e 100% entre os 7 e 28 dias de idade no 8CN e 8CRP, respectivamente. Pela mesma razão, verifica-se um aumento de resistência superior a 3 vezes entre os 7 e os 28 dias no NE (Figura 34).

Para condições semelhantes de aplicabilidade, comparou-se a mistura 8CRP20W com a 8CN. Esta aplicabilidade, avaliada de forma qualitativa e subjetiva, equivaleu-se à de uma mistura de CN com teor de humidade igual a cerca de 14%. Devido ao aumento significativo de TW, e consequentemente da porosidade total, a resistência a várias idades foi 45% a 68% inferior à dos BTC produzidos com igual teor de CRP, mas 14% de TW. Tal como para NE, a evolução da resistência entre 7 e 28 dias foi mais significativa do que até aos 7 dias, visto que a resistência destas misturas é mais sensível ao teor em água dos BTC.

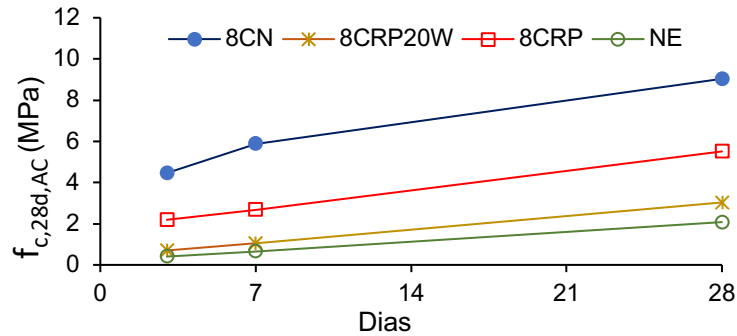


Figura 34 – Evolução da resistência à compressão aos 28 dias após cura ao ar ($f_{c,28d,AC}$) de BTC com 8% de estabilizante (CRP ou CN) e BTC não estabilizados (NE).

Conforme esperado, a resistência à compressão aumentou com a redução do teor em água dos blocos, atingindo o seu máximo após secagem em estufa (Figura 35). Isso resulta da pressão exercida pela água nos poros e liquefação da porção de argila não estabilizada do solo (F. Riza & Abdul Rahman, 2015). Em termos microscópicos, quando um bloco saturado está sujeito a forças de compressão a água que ocupa os espaços vazios pode provocar a ruptura das ligações químicas entre partículas, devido à acumulação de tensões de tração nas paredes das zonas porosas, como resultado da incompressibilidade da água (Lea, 1970; Newman, 1986). Assim, se a perda de resistência, em termos relativos, entre os estados seco e saturado for muito elevada, significa, portanto, que estas ligações são de natureza débil (Kerali, 2001).

A presença de minerais argilosos expansivos, conforme sucede no solo utilizado no presente trabalho, vai favorecer a actividade e variação dimensional do solo após secagem ou molhagem (Reddi et al., 2012). Assim, verificou-se que a resistência seca dos BTC aumentou cerca de 2 e 3 vezes face à condição saturada, para as soluções com 8% CN e 8% CRP, respectivamente. Em particular, a redução de resistência dos BTC com CRP face aos de referência com CN aumentou em função do teor de água dos blocos na altura dos ensaios, sendo de 59% em condições saturadas e apenas 35% após secagem em estufa. A mesma tendência foi reportada por Azevedo (2021), traduzindo uma menor eficiência do CRP do que do CN na estabilização do solo. Ou seja, nos BTC com CRP a ligação entre a matriz cimentícia e a terra, que faz a interligação entre os produtos hidratados do cimento reciclado e as partículas de terra, é mais débil.

Dependendo do tipo e dosagem de estabilizante, o rácio entre a resistência saturada e a resistência em seco, $f_{c,sat}/f_{c,OD}$, variou entre 0,26 e 0,51 (Figura 35), sabendo-se que quanto maior é este valor maior deverá ser o grau de estabilização e a durabilidade potencial do BTC (Heathcote, 1995). Valores superiores a 0,33 são recomendados na literatura (Bogas et al., 2019). No presente trabalho, apenas os BTC com pelo menos 5% CN apresentaram rácio superior a este limite ($f_{c,sat}/f_{c,OD} > 0.45$), sendo de 0,26 e 0,32 para os BTC com 5% e 8% CRP, respectivamente. Naturalmente, os BTC com menor teor de estabilizante foram menos efectivos na estabilização dos BTC.

Em relação à influência das condições de cura, verifica-se que os BTC curados continuamente por aspersão de água apresentaram menor resistência aos 28 dias de idade do que os betões curados ao ar de igual composição (Tabela 29). Isso resulta do facto dos blocos sujeitos a cura húmida terem sido ensaiados com maior teor em água, que conforme discutido promove a redução da resistência

mecânica. Assim, não é possível concluir sobre o benefício de estender a cura húmida para lá dos 7 dias de idade.

A resistência à compressão dos BTC é significativamente afectada pela geometria dos blocos, variando inversamente com o rácio altura/largura (H/L) (Rodrigues, 2019, Neves, 2019, Morel et al. 2007). De facto, variando H/L entre 0,5 e 5, verifica-se que a resistência à compressão pode variar em mais do dobro (Krosnowski, 2011). Isso resulta do efeito de atrito dos pratos da prensa promoverem um efeito de confinamento do bloco, aumentando a sua tensão de rotura. Esse efeito só tende a ser menos relevante para rácios H/L superiores a 2 ((Neves, 2019, Krosnowski, 2011), sendo que a maioria dos blocos de terra comuns apresentam rácios inferiores a 0,7. Por esse motivo, e de forma a uniformizar os critérios de avaliação dos BTC, alguns documentos normativos sugerem factores correctivos a aplicar aos valores de resistência à compressão, dependentes do rácio H/L (HB 195-2002, NZS 4298-1998). Por exemplo, a norma HB-195-2002 propõe os seguintes factores de correcção: 1, 0,8, 0,7 e 0,5 para H/L de 5, 2, 1 e 0,4, respectivamente. A resistência corrigida após aplicação deste factor é designada de resistência não confinada, $f_{c,un}$. No presente trabalho, os blocos foram produzidos com H/L igual a 0,67, a que corresponde um factor de 0,6. Na Figura 35 resumem-se os valores corrigidos de $f_{c,un}$ aos 28 dias, para as várias condições de cura ensaiadas. De acordo com a norma HB-195 (2002) a resistência não confinada de blocos não estabilizados deve ser superior a 2,0 MPa em condições secas e a 1,0 MPa em condições saturadas. Neste caso, verifica-se que os BTC estabilizados apresentaram resistências não confinadas superiores aos limites referidos, excepto a mistura 5CRP20W, cuja resistência saturada e seca foi de apenas 0,4 MPa e 1,6 MPa) e a mistura 8CRP20W, cuja resistência saturada foi de 0,9 MPa. Isso resulta destas misturas terem sido produzidas com grande teor em água, a que corresponderam valores de porosidade superiores a 37%.

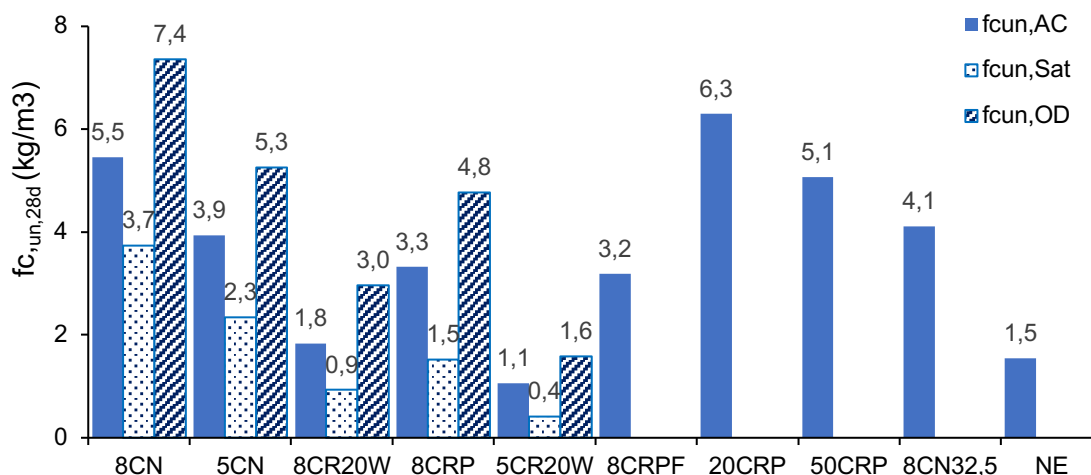


Figura 35 – Resistência à compressão não confinada, $f_{cun,28d}$, aos 28 dias para diferentes condições de humidade (ao ar – AC; saturado – Sat; seco em estufa - OD)

Na Figura 36 comparam-se os resultados obtidos neste trabalho com os de outros autores, após conversão para resistências não confinadas, $f_{c,un}$, considerando BTC ensaiados no estado seco. Verifica-se que no presente estudo obtiveram-se resistências mais elevadas nos BTC com CN, face à tendência reportada pelos restantes autores. Factores como o tipo de cimento, pressão de

compactação, condições de ensaio, composição da mistura e características do solo justificam as diferenças observadas entre autores. Ainda assim, não se pode deixar de destacar o facto de se terem atingido resistências superiores a 80% face à média dos restantes resultados. Note-se que Bruno Azevedo (2011) e Silva (2015), apesar de terem utilizado a mesma prensa e um tipo de cimento semelhante, obtiveram resistências inferiores. Salienta-se ainda o facto dos BTC com CRP produzidos neste estudo terem atingido resistências da mesma ordem de grandeza da reportada por outros autores em BTC com CN, validando a sua aplicação na estabilização de terra.

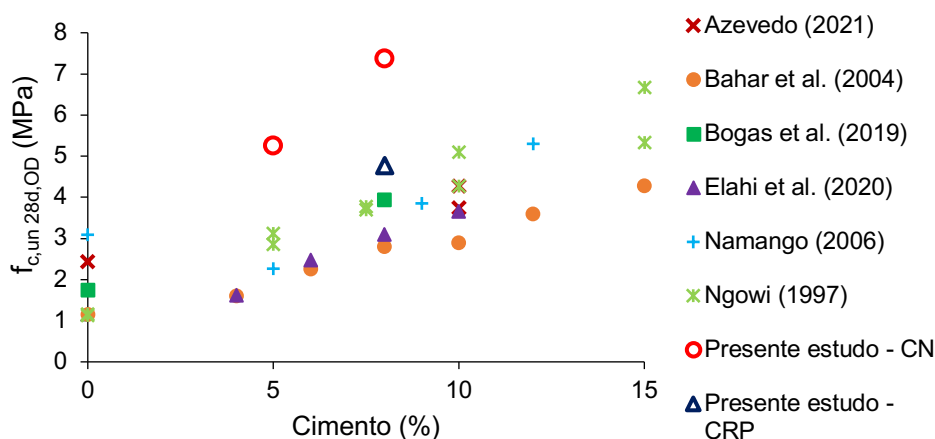


Figura 36 – Comparação dos resultados obtidos no presente estudo em BTC com CN e CRP com o de outros autores produzidos com CN, tendo em consideração resistências não confinadas, $f_{c,un}$, ensaiadas no estado seco.

4.3 Resistência à tração

No presente sub-capítulo discutem-se os resultados obtidos nos ensaios de tração por flexão e por compressão diametral dos BTC, realizados de acordo com 3.8.2 e 3.8.3, respectivamente. Na Tabela 30 apresentam-se os resultados médios aos 28 dias, bem como os respectivos coeficientes de variação.

Tabela 30: Resistência média à tração por flexão, $f_{ctm,r}$, e por compressão diametral, $f_{ctm,sp}$, aos 28 dias, após cura ao ar

Mistura	TW (%)	a/l_{efe}	P_T (%)	$f_{ctsp,28d}$ (MPa)	CV_{fctsp} (%)	$f_{ctr,28d}$ (MPa)	CV_{fctr} (%)
CN 8CN	14	1,91	27,7	0,49	7,89	1,16	5,63
CN 8CNWC*	14	1,91	28,3	0,62	12,6	1,53	8,0
CN 5CN	14	2,97	29,2	0,37	7,7	0,88	10,6
CR 8CRP20W	20	2,72	37,1	0,19	2,7	0,46	7,7
CR 8CRP	14	1,91	32,8	0,23	15,8	0,63	20,3
CR 8CRPWC*	20	2,72	37,5	0,13	8,5	0,62	18,6
CR 5CRP20W	20	4,13	37,5	0,07	4,1	0,28	25,0
CR 8CRPF	14	1,91	33,5	0,21	10,7	-	-
CR 20CRP80CN	14	1,91	28,1	0,42	13,3	1,25	10,3
CR 50CRP50CN	14	1,91	30,3	0,34	14,7	0,96	8,7
CR NE	12	-	30,4	0,07	3,7	0,29	32,0

*Resistência à tração aos 28 dias após cura húmida

Visto que a resistência à compressão e à tração dependem ambas da porosidade e características da matriz ligante, verifica-se uma boa correlação entre estas propriedades (Figura 37).

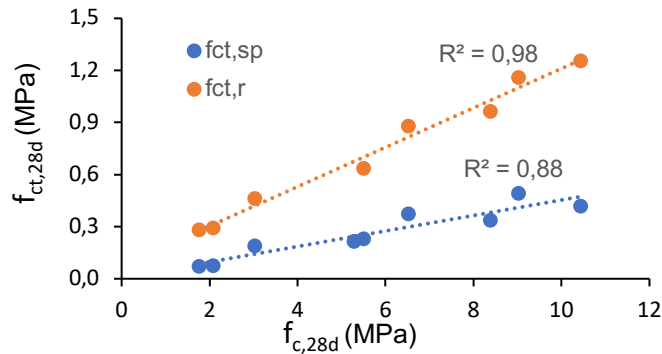


Figura 37 – Relação entre a resistência à compressão, f_{cm} , e a resistência à tração por flexão e compressão diametral, $f_{ct,sp}$, para condições de cura ao ar e aos 28 dias de idade.

Em média, a resistência à tração por compressão diametral e a resistência à flexão nos BTC foram cerca de 4-6% e 12-15% da resistência à compressão, respectivamente. Estes valores foram mais baixos do que o reportado por outros autores. Bruno Azevedo (2021) apontou valores de resistência à tração de 8-10% e 16-23% da resistência à compressão, em ensaios de compressão diametral e flexão, respectivamente. Por outro lado, Silva (2015) indicou uma relação entre a resistência à flexão e a resistência à compressão bastante superior: 28% para BTC estabilizados com 8% de CN, 29% para BTC com 4% CN e 4% de cal, e 18% para BTC não estabilizados. A variação deste rácio é fortemente condicionada pela geometria dos blocos, teor de humidade e esquema de ensaio preconizado. Uma comparação mais correcta deve ter em consideração a resistência não confinada, $f_{c,un}$, em condições secas ou saturadas. Uma relação próxima da obtida no presente trabalho para a resistência à flexão foi obtida por Namango (2006) e Mostafa e Uddin (2016), que referem um rácio de 15%.

A variabilidade destes ensaios foi elevada, em especial nos BTC de menor resistência mecânica (Tabela 30). Isso resulta da baixa energia de rotura e natureza frágil dos BTC, sendo mais condicionado pela presença de defeitos ou heterogeneidades.

Em relação à influência do tipo e teor de ligante, os resultados seguem a tendência observada nos ensaios de resistência à compressão. Tal como referido, ambas as propriedades são essencialmente afectadas pelos mesmos factores. Independentemente do tipo de ligante, confirma-se um incremento da resistência com o aumento do teor de ligante (Figura 38). Nos BTC com CN, o aumento de 5% para 8% na dosagem de ligante, conduziu a um aumento de 32% na resistência à tração por flexão e compressão diametral. Nos BTC com CRP esse aumento foi de 64% e 171% respectivamente. Neste caso, a mistura com 5% CRP, à semelhança do que sucedeu com NE, apresentou baixa coesão, conduzindo a resistências à tração muito baixas, afectando a sensibilidade do ensaio.

De acordo com a norma HB-195 (2002) são recomendados valores mínimos de 0,35 MPa para a resistência à flexão, sendo que a norma WD-ARS1333 especifica um valor mínimo de 0,5 MPa para BTC previamente secos. No presente trabalho, apenas nos BTC não estabilizados ou com apenas 5% CRP não foram cumpridas estas exigências (Figura 38).

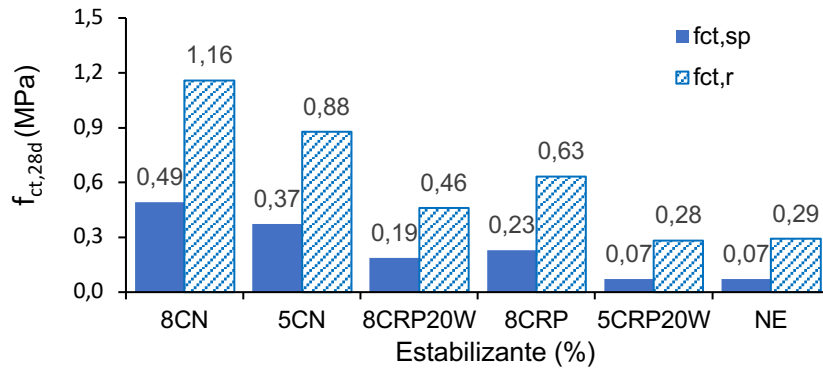


Figura 38 – Resistência à tração por flexão, $f_{ct,r}$, e por compressão diametral, $f_{ct,sp}$, aos 28 dias de BTC curados ao ar

Novamente, os BTC com CRP apresentaram pior desempenho mecânico do que os BTC com CN, obtendo-se resistências à tração por compressão diametral e por flexão 53% e 45% inferiores, respectivamente (Figura 38). As mesmas razões referidas em 4.2 são apontadas para esta tendência, tendo especial importância a redução de compacidade atingida nos BTC com CRP. De facto, como seria de esperar, na Figura 39 verifica-se uma boa correlação entre a resistência à tração e a porosidade total, tanto para a resistência à flexão (Figura 39.a) como para a compressão diametral (Figura 39.b). Tal como para a resistência à compressão, a correlação aumenta quando se consideram diferentes teores de ligante de forma isolada

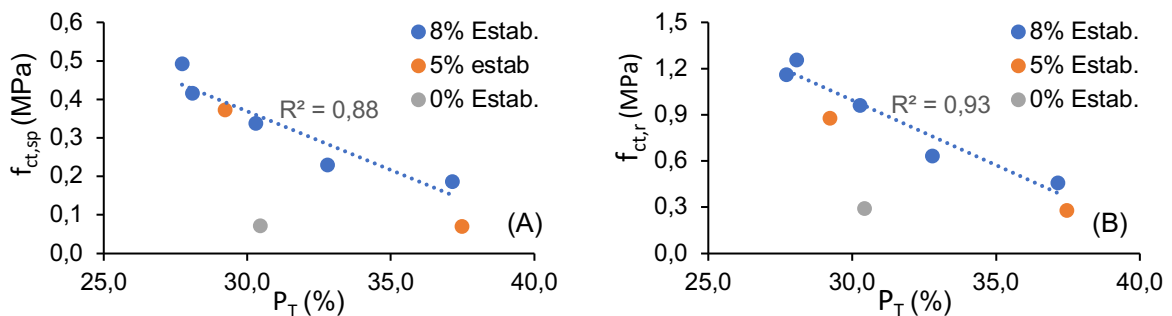


Figura 39 – Resistência à tração aos 28 dias após cura ao ar versus porosidade total, P_T : a) por compressão diametral ($f_{ct,sp}$); b) resistência à flexão ($f_{ct,r}$)

Tal como para a resistência à compressão a resistência por compressão diametral tende a diminuir com a substituição progressiva de CN por CRP (Figura 40). Porém, ao contrário do observado para a resistência à compressão e para a resistência à tração por flexão, a incorporação de até 20% de CRP não conduziu a um aumento de resistência à compressão diametral. Até 50% de substituição a redução de resistência à tração por compressão diametral e por flexão foi de 32% e 17%, respectivamente. Importa referir que a resistência à tração é medida em diferentes direcções dos blocos. A compressão diametral envolve tensões de tração perpendiculares à direcção do leito do bloco, ao passo que a resistência à flexão envolve tensões de tração perpendiculares ao leito do bloco, conforme o que sucede na resistência à compressão. Assim, no caso da resistência à compressão diametral, a compactação atingida no bloco e a porosidade total deverá assumir maior importância nos resultados.

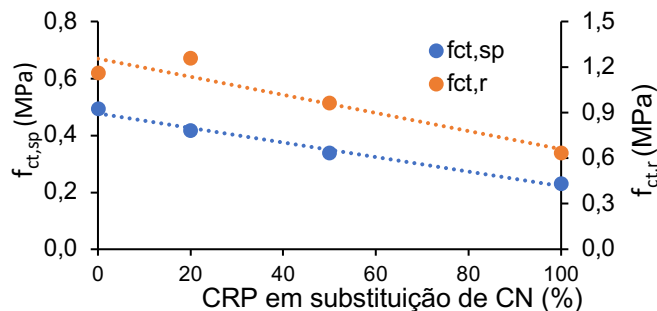


Figura 40 – Variação da resistência à compressão aos 28 dias após cura ao ar ($f_{c,28d,AC}$) e da porosidade total, P_T , com a percentagem de substituição de CN por CRP

Os BTC com CRPF apresentaram novamente resistência semelhante à dos BTC com CRP, não se verificando vantagens na redução da granulometria do CRP para valores abaixo de 125 μm .

Em relação aos betões curados ao ar a partir dos 7 dias de idade, ou sujeitos a cura húmida contínua, verificaram-se resultados contraditórios consoante o tipo de ligante. Os BTC com CN sujeitos a cura húmida apresentaram valores de resistência à tração por compressão diametral e por flexão 27% e 32% superiores, respectivamente. Por sua vez, nos BTC com CRP e maior TW, a resistência à flexão também foi 34% superior nos BTC sujeitos a cura húmida, mas na resistência à tração por compressão diametral a tendência foi oposta (45% inferior nos BTC sujeitos a cura húmida).

Não foi encontrada uma razão clara para as tendências observadas. Por um lado, o aumento de teor de humidade dos BTC tende a reduzir a resistência dos blocos. Por outro lado, a resistência tende a aumentar com o grau de hidratação da mistura, sendo favorável a cura húmida. Acrescente-se ainda que ao contrário da resistência à compressão, os ensaios de tração são afectados pela distribuição de humidade no interior dos provetes, principalmente a resistência à flexão. Em situações intermédias de cura, em que ocorre maior secagem junto à superfície dos blocos, desenvolvem-se tensões de tração por retracção diferencial nas regiões extremas, o que reduz a resistência à flexão dos mesmos. Por sua vez, os BTC em cura húmida deverão estar menos sujeitos a este fenómeno. Na resistência à compressão diametral é esperado uma menor influência do teor de humidade diferencial. Note-se que os BTC com CRP são sujeitos a condições diferentes de secagem e retracção dos BTC com CN, conforme abordado em 4.6.

4.4 Módulo de elasticidade

A determinação do módulo de elasticidade incidiu sobre um número limitado de composições estudadas. Ao todo, foram ensaiadas 6 composições diferentes, reflectindo a utilização de diferentes teores e tipos de estabilizantes. O módulo de elasticidade médio variou entre 0,78 GPa e 4,6 GPa, consoante o tipo de composição, enquadrando-se na ordem de grandeza de valores reportados por outros autores. Bahar et al. (2004) reportou um valor médio de 2,5 GPa para BTC estabilizados com 10% de CN, semelhante ao obtido por Azevedo (2021) também considerando o mesmo teor de cimento (2,8 GPa). No presente trabalho, para apenas 8% CN, foi obtido um módulo de elasticidade de 3,6 GPa (cerca de 30% superior), o que está de acordo com o aumento de resistência mecânica e a redução de porosidade discutida em 4.2.

Tabela 31: Módulo de elasticidade aos 28 dias (E_{28d}) de BTC curados ao ar

	Mistura	$\rho_{28d,AC}$ (kg/m ³)	P_T (%)	$f_{c,28d,AC}$ (MPa)	E_{28d} (GPa)
CN	8CN	2048	27,7	9,0	3,60
	5CN	2010	29,2	6,5	2,79
CR	8CRP	1966	32,8	5,5	2,50
	5CRP20W	1870	37,5	1,8	1,38
	20CRP80CN	2025	28,1	10,4	4,55
	NE	1938	30,4	2,1	0,78

Na Figura 41 confirma-se uma adequada relação entre o módulo de elasticidade e a porosidade total, caso se considere em separado os BTC estabilizados e não estabilizados. De facto, a rigidez não depende apenas da porosidade do material, mas também da forma como se ligam as partículas no seu interior.

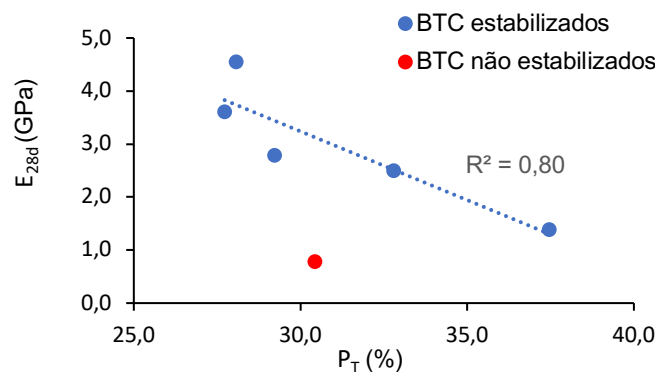


Figura 41 – Módulo de elasticidade aos 28 dias após cura ao ar (E_{28d}) versus porosidade total, P_T

Face aos BTC com 8% CN, o módulo de elasticidade dos BTC com 8% CR foi 31% inferior, o que também está em linha com a redução de resistência e porosidade verificada em 4.2. Para idêntica composição é ainda referido que a matriz cimentícia tende a apresentar menor rigidez no caso de se utilizar CRP, devido à natureza porosa e menor dureza deste ligante (Real et al., 2021). Porém destaca-se o facto dos BTC com CRP terem atingido um módulo de elasticidade (2,5 GPa) da ordem de grandeza do reportado por outros autores em BTC com 10% CN. Azevedo (2021) refere a obtenção de 2,1 GPa em BTC com CRP, cerca de 84% do obtido no presente trabalho. Por sua vez, o módulo de elasticidade de 8CRP foi 3,2 vezes superior ao da mistura não estabilizada, confirmando-se a importância deste novo ligante na estabilização dos BTC.

Tal como observado para outras propriedades, o módulo de elasticidade aumentou com o teor de ligante e com a redução do teor em água dos BTC (Tabela 31). Neste caso os BTC com 8% CRP apresentaram idêntico desempenho aos dos BTC com apenas 5% CN. Também à semelhança do observado em outras propriedades (4.2 e 4.3), os BTC com até 20% CRP foram capazes de evidenciar melhor desempenho do que os BTC com apenas CN (26% superior). Isso contraria a tendência observada na evolução da porosidade total, reflectindo-se na redução do coeficiente de correlação da regressão apresentada na Figura 41.

Finalmente, tal como observado por Azevedo (2021), o módulo de elasticidade acompanha a evolução da resistência à compressão (Figura 42), observando-se uma relação praticamente linear entre ambas as propriedades.

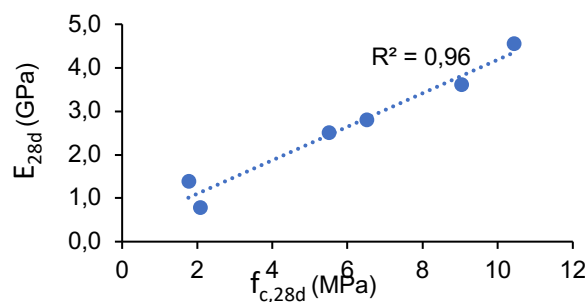


Figura 42 – Módulo de elasticidade (E_{28d}) versus resistência à compressão ($f_{c,28d}$), aos 28 dias e após cura ao ar

4.5 Velocidade de propagação de ultrassons

A velocidade de ultrassons depende essencialmente da rigidez e massa volúmica dos materiais, sendo ainda afectada pelo teor em água, visto que as ondas se propagam mais rapidamente em meio líquido do que em meio gasoso. Na prática, a velocidade de propagação de ultrassons é tanto maior quanto mais sólido e contínuo for o meio de propagação. Na Tabela 32 resumem-se os resultados obtidos no presente trabalho, para diferentes condições de ensaio (AC, Sat, OD).

Tabela 32: Velocidade de propagação de ultra-sons (UPV) para diferentes condições de ensaio (Sat - saturado, OD - seco em estufa, AC - cura ao ar)

	Mistura	TW (%)	Massa Volúmica (kg/m^3)			P_T (%)	$f_{c,28d,AC}$ (MPa)	$f_{c,28d,Sat}$ (MPa)	$f_{c,28d,OD}$ (MPa)	UPV _{28d} (m/s)		
			$\rho_{28d,AC}$	$\rho_{28d,Sat}$	$\rho_{28d,OD}$					AC	SAT	OD
CN	8CN	14	2048	2160	1910	27,7	9,0	6,2	12,2	2304	2494	1776
	8CNWC*	14	2074	-	-	28,3	7,7	-	-	2327	-	-
	5CN	14	2010	2171	1869	29,2	6,5	3,9	8,7	1852	1950	1429
	8CN32,5	14	1960	-	-	30,6	6,8	-	-	2084	-	-
CR	8CRP20W	20	1879	2061	1767	37,1	3,0	1,6	4,9	1509	1516	949
	8CRP	14	1966	2092	1802	32,8	5,5	2,5	7,9	1668	1767	1358
	8CRPWC*	20	1880	0	0	37,5	3,0	-	-	1442	-	-
	5CRP20W	20	1870	2036	1737	37,5	1,8	0,7	2,6	1200	1319	878
	8CRPF	14	1906	-	-	33,5	5,3	-	-	1576	-	-
	20CRP80CN	14	2025	-	-	28,1	10,4	-	-	2185	-	-
	50CRP50CN	14	2011	-	-	30,3	8,4	-	-	2041	-	-
NE	12	1938	-	-	30,4	2,1	-	-	1385	-	-	

*BTC após cura húmida

No presente estudo foram obtidas velocidades de ultrassons (UPV) muito distintas, que variaram numa larga gama, desde 878 a 2494 m/s, dependendo da composição e do teor em água das misturas (Figura 43). Naturalmente, a UPV aumentou com o teor de humidade e diminuiu significativamente nas misturas secas, onde os vazios existentes dificultaram a propagação das ondas. Em termos médios, a velocidade de ultrassons foi cerca de 38% superior no estado saturado face ao estado seco, e somente 5% superior por comparação com a cura em ambiente laboratorial (AC). Isso demonstra que a secagem foi reduzida nos BTC expostos ao ar após a cura por 7 dias.

Para cura ao ar, a UPV variou entre 1200 e 2324 m/s. Estes valores são da mesma ordem dos reportados por Lopes (2015), entre 1100 e 2300 m/s, considerando BTC não estabilizados a estabilizados com 10% de CN. Valores mais baixos, entre 1100 e 1700 m/s, foram reportados por Azevedo (2011), tendo em conta BTC com até 10% de estabilizante. Como discutido, no presente trabalho foi possível atingir soluções de maior compacidade e, como tal, associadas a maior UPV.

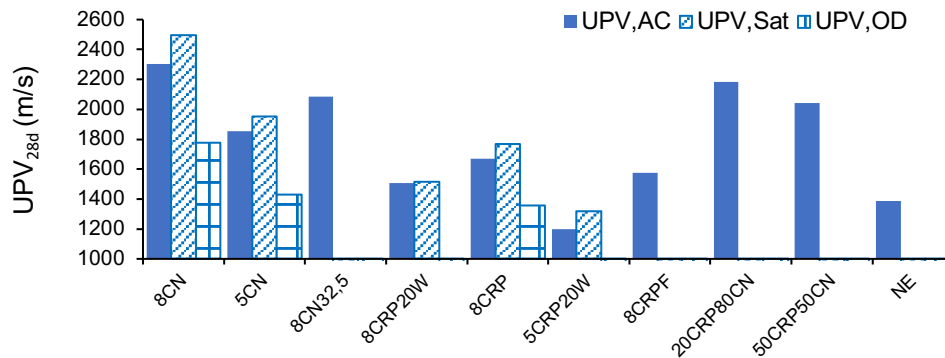


Figura 43 – Velocidade de propagação de ultra-sons aos 28 (UPV_{28d}), tendo em consideração diferentes condições de ensaio (Sat - saturado, OD – seco em estufa, AC – cura ao ar).

Tal como nas restantes propriedades analisadas, os BTC com CRP ou menor teor de estabilizante, apresentaram pior desempenho, isto é menor UPV. Isso significa, que este ensaio não destrutivo foi capaz de distinguir BTC de diferente qualidade. Como o UPV depende essencialmente da rigidez e massa volúmica do material, e estas propriedades relacionam-se bem com a porosidade e resistência mecânica (4.2 e 4.4), verificam-se correlações elevadas entre UPV e estas últimas propriedades (Figuras 44.b e 44.a, respectivamente). Dado que UPV depende da rigidez do material, condicionada também pela ligação entre partículas para além da porosidade, atinge-se uma melhor correlação com a resistência à compressão do que com a porosidade. Neste último caso, confirma-se à semelhança das restantes propriedades analisadas, que a correlação é apenas elevada quando se considera diferentes teores de estabilizante. Mas mais uma vez, a tendência não é afectada pelo tipo de ligante, confirmando-se que a influência de se substituir CN por CRP ocorre mais ao nível da compacidade atingida nos blocos do que em termos de capacidade de hidratação e ligação do ligante. No entanto, a relação da Figura 44.a só é verdadeiramente válida para BTC de idêntico teor em água, pois UPV e f_c variam de forma inversa com este parâmetro. Assim, em condições secas, o UPV é mais capaz de distinguir BTC de diferente qualidade, pois deixa de depender do TW.

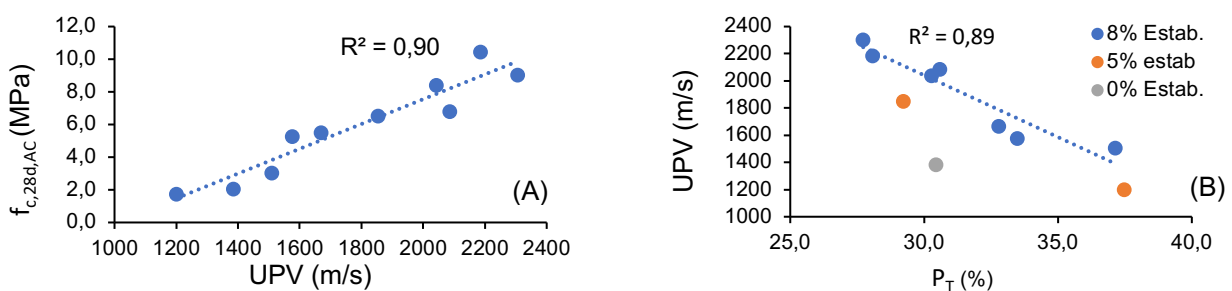


Figura 44 (a) – Velocidade de propagação de ultra-sons aos 28 (UPV_{28d}) versus resistência à compressão ($f_{c,28d}$), em condições de cura ao ar. (b) – Velocidade de propagação de ultra-sons aos 28 (UPV_{28d}) versus porosidade total (P_T), em condições de cura ao ar.

Verifica-se que face aos BTC com 8%CN, a incorporação de igual teor de CRP, em condições secas, conduziu a reduções de 23,6% em UPV, para uma redução de 35,2% na resistência à compressão (Tabela 32). Esta menor redução de UPV face a f_c seria esperada, pois UPV relaciona-se com a raiz quadrada do módulo de elasticidade (Bogas et al., 2013). Salienta-se o facto da mistura com CRP e elevado TW, associada a maior porosidade, ter revelado pior desempenho do que NE. Confirma-

se também a redução de desempenho de 8CN32,5 face a 8CN e de CRPF face a 8CRP, conforme observado nas restantes propriedades.

Finalmente, a incorporação parcial de CRP conduziu a valores intermédios de UPV face às soluções extremas de 100% CN e 100% CRP. Neste caso, ocorreu uma má correlação com a resistência, assumindo maior importância a variação de porosidade.

4.6 Retração

Para o ensaio de retração foram estudadas sete composições distintas, duas estabilizadas com CR (5%, 8%), duas com CN (5%, 8%), duas com substituição parcial de CN por CRP (20%, 50%), e uma não estabilizada. Assim, foi possível analisar a influência do tipo e teor de ligante incorporado. A monitorização da retração por secagem ocorreu após 3 dias de idade, durante 55 dias em câmara condicionada com temperatura média de 21,5°C e cerca de 65±5% de humidade relativa. Na Tabela 33 resumem-se os valores de retracção inicial, após 3 dias, e final, após cerca de 55 dias de ensaio. Na Figura 45 apresentam-se as curvas de evolução da retração ao longo do tempo.

Tabela 33: Retração após 7 e 55 dias de BTC com diferentes teores e tipos de estabilizante

	Mistura	a/l_{efe}	$\rho_{28d,AC}$ (kg/m ³)	P_T (%)	$f_{c,28d,AC}$ (MPa)	E_{28d} (GPa)	$\epsilon_{cst,3d}$ (x10 ⁻⁶ m/m)	$\epsilon_{cst,50d}$ (x10 ⁻⁶ m/m)
CN	8CN	1,91	2048	27,7	9,0	3,60	426	1705
	5CN	2,97	2010	29,2	6,5	2,79	579	1916
CR	8CRP	1,91	1966	32,8	5,5	2,50	553	1373
	5CRP20W	4,13	1870	37,5	1,8	1,38	600	2093
	20CRP80CN	1,91	2025	28,1	10,4	4,55	463	1817
	50CRP50CN	1,91	2011	30,3	8,4		443	1598
	NE		1938	30,4	2,1	0,78	1911	3045

Conforme observado na Figura 45, a retracção dos BTC estabilizou a partir de cerca dos 20º-25º dias, atingindo-se condições de equilíbrio com o ambiente de exposição. Mais de 25% da retracção ocorreu durante os primeiros 3 dias (Tabela 33). Dependendo do tipo de mistura, a retracção máxima variou de entre 1,4 e 2,1 mm/m nos BTC estabilizados e atingiu 3 mm/m nos não estabilizados. Estes valores foram bastante elevados, sendo superiores ao recomendado e usualmente referido na literatura.

Walker (1995) utilizando uma prensa manual de características similares à considerada no presente trabalho, analisou a retracção de BTC estabilizados e produzidos com solos de diferente índice de plasticidade, entre 10 e 35, e diferentes teores de CN (5, 7 e 10%). A retracção foi medida superficialmente, numa das faces de maior dimensão dos blocos, após a sua saturação prévia e colocação dos mesmos em estufa a 50 °C durante 14 dias. O autor verificou que a retracção dependeu primeiramente do índice de plasticidade do solo, e em segundo plano do teor de cimento. Para solos com IP menor do que 20 a retracção foi inferior a 0,04% independentemente do teor de ligante, aumentando de forma exponencial para valores de IP mais elevados, até cerca de 0,2% para IP de 30 e mais de 0,5% para IP de 35. Abaixo de IP de 20, onde se situa o solo utilizado no presente trabalho, a retracção aumentou ligeiramente com o teor de cimento. Para IP de 10, a retracção foi de 0,02% e <0,01% para 10% CN e 5-7%CN, respectivamente.

Na norma NTC 5324 (2004) recomenda-se que a retracção dos BTC seja inferior a 0,45 mm/m após estabilizados a temperatura de 33-45 °C e a 50% de humidade relativa, num ambiente mais agressivo do que o considerado no presente trabalho. Por sua vez, a NZS 4298 (1998) recomenda até

0,5 mm/m para construção em taipa. No presente trabalho, estes limites foram excedidos em todos os blocos, podendo estar relacionado com o solo utilizado. Apesar do solo apresentar um índice de plasticidade reduzido, de cerca de 5 (3.2.4), é constituído por minerais argilosos expansivos do grupo da smectite, o que promove um aumento das variações dimensionais. Num estudo envolvendo BTC produzidos com diferente tipo de solos, Lavie Arsène et al. (2020) verificaram que, tendo em conta composições semelhantes, os BTC com solos contendo argilas expansivas apresentaram expansões volumétricas superiores a 10%, enquanto solos com argilas cauliniticas ou ilíticas apresentaram retracções inferiores a 0,1%. No presente estudo a retracção linear foi inferior a 0,2% nos BTC estabilizados. Como observado em 3.2.7, apesar do solo apresentar minerais argilosos de natureza expansiva, este apresenta baixo teor de argila. A maior instabilidade do solo utilizado neste trabalho permite também explicar o baixo rácio $f_{c,sat}/f_{c,OD}$ identificados e discutidos em 4.2.

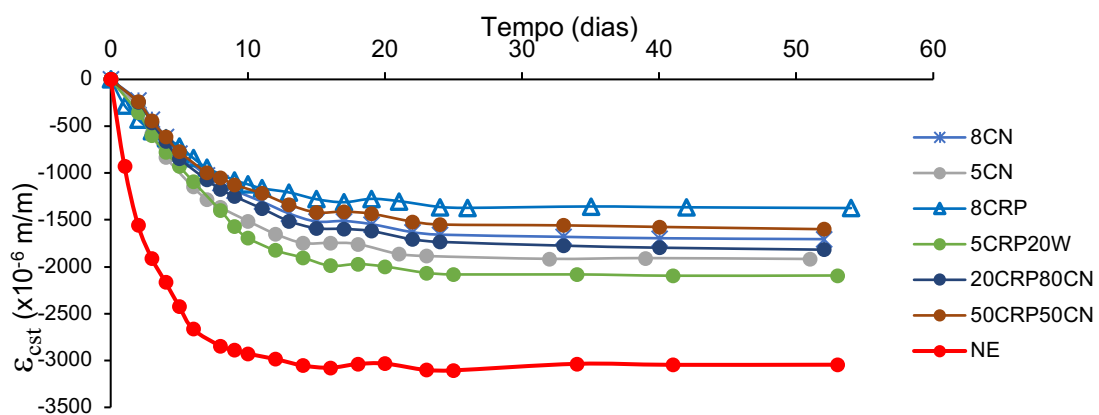


Figura 45 - Evolução da retracção ao longo do tempo dos BTC

A elevada retracção observada nos BTC não estabilizados (NE), face aos restantes BTC, resultou essencialmente da variação dimensional ocorrida nas idades iniciais, atribuída à contracção da fracção argilosa do solo. Em seguida, a maior retracção foi registada nos BTC com 5% CRP e elevado TW (20%), resultante de uma estabilização menos eficiente do solo e da baixa rigidez e elevado a/l da mistura (Tabela 33). Verificou-se também que a retracção aumentou com a redução da percentagem de ligante, ao contrário do observado por Walker(1995). Isso justifica-se pelo facto de se ter atingido uma mistura com menor rigidez e elevado a/l (55% maior no 5CN do que no 8CN, Tabela 33).

Para idênticos teores de água inicial, a retracção final dos BTC com 8% CRP foi 19% inferior à dos BTC com 8% CN, tendo sido a retracção mais baixa de todos os BTC analisados. Face às restantes misturas, a retracção foi inferior desde os 5 dias de idade e a estabilização ocorreu mais cedo. Estes resultados foram contrários aos reportados por Azevedo (2021), que verificou retracções a longo prazo 30% superiores em BTC com 10% CN do que com 10% CRP, embora estes últimos tenham sido produzidos com maior teor em água. Esta tendência foi justificada pelo maior volume de pasta e menor rigidez dos BTC com CRP.

No presente trabalho, a mistura 8CRP também apresentou menor rigidez do que o 8CN (Tabela 33), o que deveria promover uma menor restrição da retracção. No entanto, este ligante desenvolve maior rigidez mais cedo do que o CN, pois, como discutido, para idêntica relação a/l , as

pastas com CRP tendem a desenvolver matrizes mais refinadas. De facto, devido à natureza porosa do CRP, cria-se uma maior proximidade entre partículas (Bogas et al., 2020). Neste caso, também as forças capilares dos pequenos poros, que governam a retracção, aumentam. Tal pode ocorrer essencialmente nas primeiras idades (Carriço et al., 2022b; Real et al., 2021), enquanto o grau de hidratação é inferior ou semelhante ao das matrizes com CN. Isso pode explicar a maior retracção observada no 8CRP, até aos 3 dias de medição (Tabela 33, Figura 45). Ainda assim, era esperado uma maior retracção a longo prazo do 8CRP face ao 8CN, conforme constatado em outros trabalhos com BTC (Azevedo, 2021) ou com argamassa e betões (Carriço et al., 2022b; Real et al., 2021). Não se encontra grande explicação para estes resultados, verificando-se inclusivamente uma tendência oposta nos BTC com 5% CRP, embora este tenha sido produzido com maior TW. A partir de uma determinada idade a taxa de retracção diminuiu, conforme é discutido mais adiante, o que pode estar relacionado com o desenvolvimento a longo prazo de uma microestrutura mais grosseira. Isso é atestado pelos valores mais elevados de porosidade total (Tabela 33).

Na Figura 46 apresenta-se a perda de massa dos provetes a partir da idade de medição. Neste caso, tal como seria esperado, constata-se que a perda de água foi superior nos blocos com CRP e com menor teor de estabilizante, associados a maior porosidade total. Os blocos com maior P_T e maior TW (5CRP20W) apresentaram a maior perda de água ao longo do tempo, inclusivamente face aos NE, visto que foram produzidos com mais 33% de água do que os blocos não estabilizados (ver 3.7.1). Destaca-se o facto de a taxa de perda de água inicial ter sido superior nos BTC de maior porosidade e menor teor de ligante, onde esta se apresentava num estado mais livre.

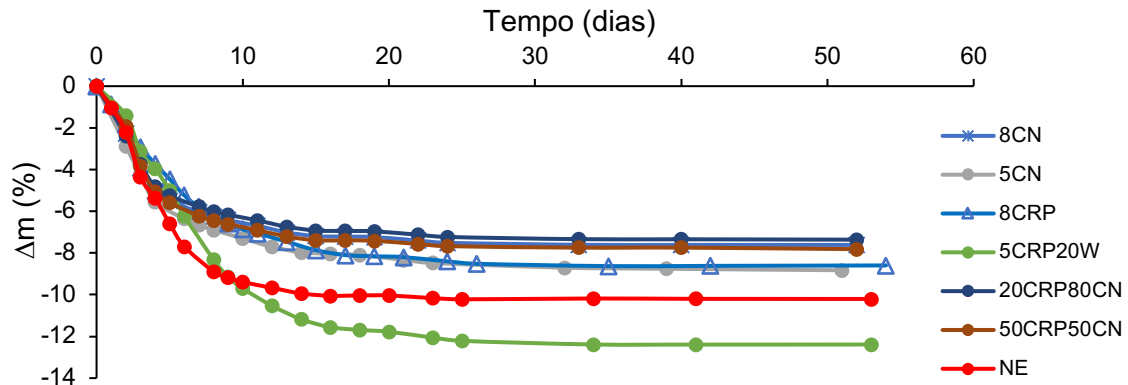


Figura 46 - Evolução da perda de massa (Δm) ao longo do tempo dos BTC, durante o ensaio de retracção

Por análise da Figura 46, verifica-se que após um período inicial, a taxa de retracção por variação de perda de massa aumentou nas misturas mais densas (menor declive das curvas $\Delta m - \epsilon_{cst}$). Neste caso, apesar da rigidez destas misturas ser superior, a fonte de retracção também terá sido maior (microestrutura mais refinada, que conduz a maiores forças capilares por eliminação de água). Os resultados sugerem que num período inicial a retracção foi comandada pela contracção da fracção não estabilizada do solo, sendo mais importante nas misturas menos estabilizadas, e depois pelo ligante, sendo mais efectiva nas misturas que desenvolveram microestrutura mais densa ao longo do tempo. Os resultados confirmam que os BTC com 8%CRP foram eficazes na estabilização do solo, embora tenham atingido porosidades mais grosseiras.

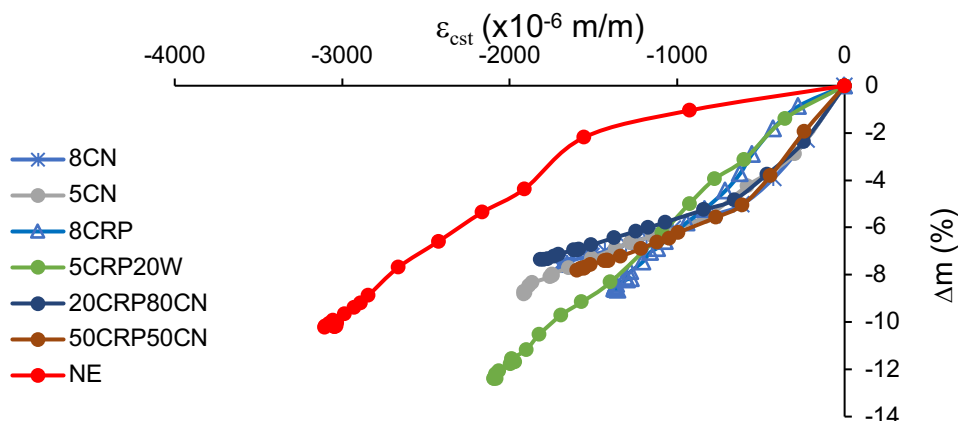


Figura 47 – Evolução da perda de massa (Δm) versus a retração ao longo do tempo dos BTC

A incorporação parcial de CRP teve um efeito diferente para 20% e 50% de substituição. Até 20% CRP, a retração foi ligeiramente superior à de 8CN, apesar da maior porosidade total desta mistura (Tabela 33). Isso está de acordo com o aumento de resistência observado em 4.2, devendo-se ter atingido uma microestrutura mais refinada (tal como observado no menor declive da curva Δm - ϵ_{cst} , Figura 47). Por sua vez, a mistura com 50% CRP apresentou uma retração ligeiramente inferior, caminhando no sentido do observado para 100% CRP. Em suma, do presente estudo, apenas se pode concluir que a incorporação de 8% CRP é efectiva na estabilização dos BTC, e a variação dimensional pode ser menos relevante do que nos BTC com CN.

4.7 Esclerómetro pendular

O ensaio de impacto com massa pendular é um ensaio não destrutivo que permite dar uma ideia da dureza superficial de um material. Na Figura 48 resumem-se os valores do índice esclerométrico (IE), sendo a média de 4 ensaios (2/bloco), conforme o procedimento referido em 3.8.5.

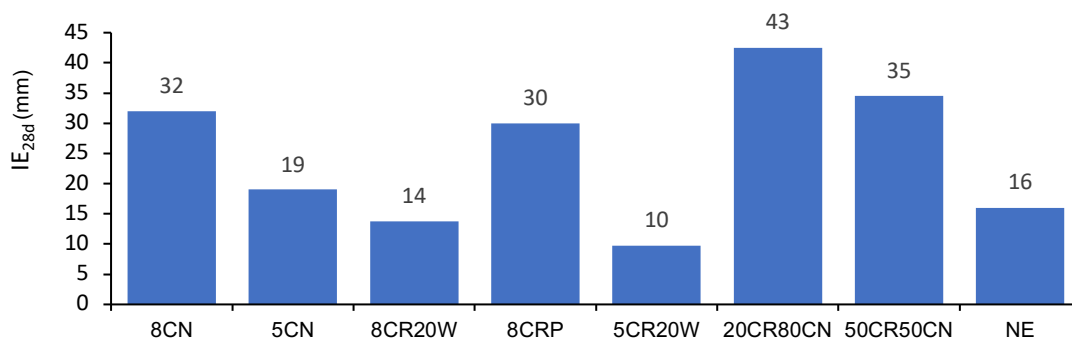


Figura 48: Índice esclerométrico (IE) dos BTC após cura ao ar

Como seria de esperar, em geral, os blocos estabilizados apresentaram maior IE do que os blocos não estabilizados, o que está de acordo com a maior coesão e rigidez destas misturas. O valor de IE também aumentou com o teor de ligante, reforçando a importância da estabilização nesta propriedade. A excepção ocorreu para os BTC com CRP de elevado TW, associados a maior porosidade. Ainda assim, tendo em consideração a sua maior resistência à compressão (4.2) e módulo

de elasticidade (4.4), seria esperado que estas misturas apresentassem maior IE. Da mesma forma, esperava-se uma maior diferença entre os BTC com 8CN e 8CRP, até porque as misturas com incorporação de até 50% de CRP apresentaram maior IE do que 8 CN.

Na Figura 49 verifica-se uma tendência clara de evolução do IE com a resistência à compressão, embora como referido alguns valores fujam desta correlação. De facto, a dureza superficial é influenciada por outros factores como a dureza dos agregados em que ocorre o impacto, bem como o teor de humidade da superfície na altura do ensaio.

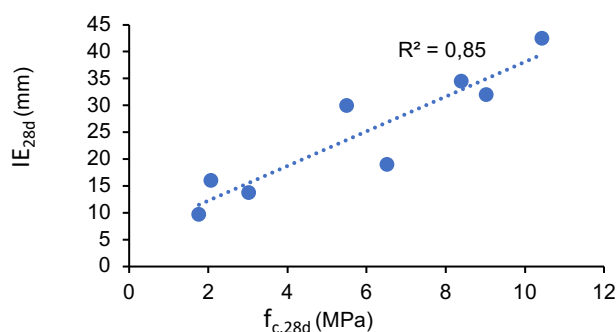


Figura 49: Índice esclerométrico versus resistência à compressão aos 28 dias ($f_{c,28d}$) dos BTC, após cura ao ar.

Tal como para a velocidade de ultrassons, o ensaio de esclerómetro pendular foi capaz de distinguir BTC de qualidade muito diferente, associados a resistência e porosidades muito distintas. Porém, devido à sua variabilidade e à dependência da resistência superficial de outros factores, não é um ensaio adequado para distinguir BTC com pequenas diferenças de qualidade.

4.8 Abrasão superficial

O ensaio de abrasão superficial foi realizado de acordo com a norma XP13-901 (2001), determinando-se o coeficiente de abrasão (Ca) de acordo com a Equação 12 em 3.8.7. Este coeficiente traduz o quociente entre a área da superfície sujeita a abrasão e a massa de material desagregado, indicando uma maior resistência ao desgaste dos BTC quanto maior este parâmetro (menor quantidade de material desagregado). Na Figura 50 resumem-se os resultados obtidos neste trabalho.

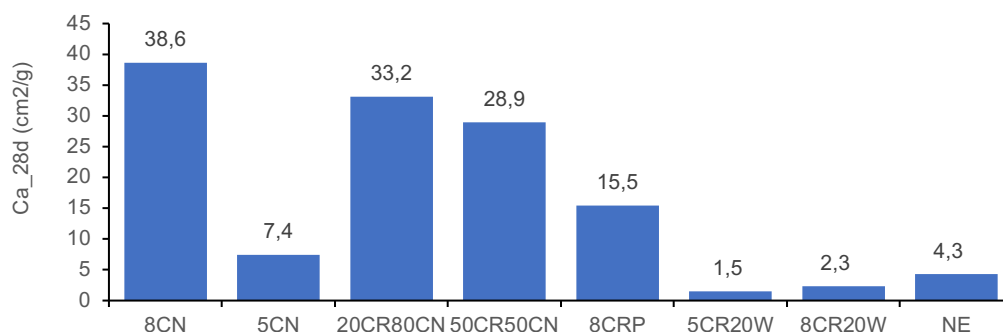


Figura 50: Coeficiente de abrasão (Ca) dos BTC após cura ao ar

De uma forma geral, os BTC estabilizados apresentaram menor quantidade de material desagregado do que os BTC não estabilizados, com excepção para os BTC com CRP e alto TW,

corroborando o observado em 4.7. De facto, excepto para a mistura 8CN, cujo resultado de IE foi mais baixo do que o esperado (ver 4.7), verificou-se uma elevada correlação entre IE e Ca (Figura 51), pois ambos os ensaios estão relacionados com a dureza superficial dos BTC.

Desse modo, em geral são verificadas as mesmas tendências identificadas em 4.7. Porém, neste caso verificou-se uma melhor distinção entre as misturas com CN e com CRP, existindo uma redução clara de Ca com o aumento da substituição de CN por CRP. De facto, para além da maior porosidade dos BTC com CRP, as partículas de CRP, de natureza porosa, possuem menor dureza do que o CN, contribuindo para uma menor resistência à abrasão. Zhang et al. (2018a) mediu a dureza de partículas de CRP, tendo constatado que esta era 11 vezes menor do que as de CN corrente. Ainda assim, apesar dos BTC com 8% CRP terem sido produzidos com uma porosidade total 8% maior do que os BTC não estabilizados, demonstra-se que a incorporação de CRP nos BTC foi muito eficiente no aumento da resistência à abrasão, atingindo-se 3,6 vezes maior Ca do que no NE.

Mais uma vez, os BTC produzidos com menor teor de ligante ou elevado TW revelaram pior desempenho, salientando-se a importância da estabilização e da compacidade dos BTC na sua resistência à abrasão. Note-se que uma redução de apenas 3% no teor de CN resultou numa redução significativa do coeficiente de abrasão, superior a 80%.

Finalmente, tal como verificado para IE, observa-se uma tendência clara de evolução de Ca com a resistência à compressão.

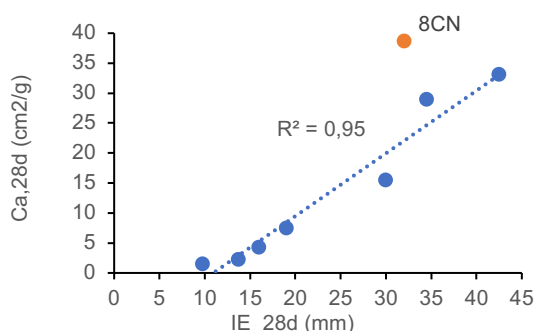


Figura 51: Coeficiente de abrasão (Ca) versus Índice esclerométrico (IE_{28d}), após cura ao ar.

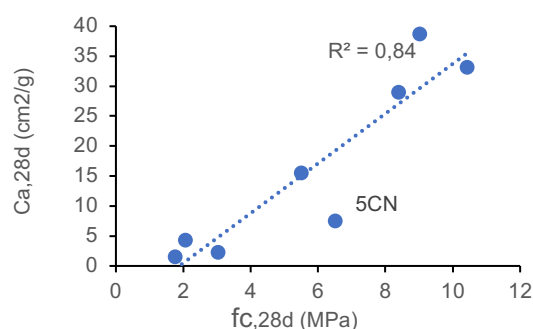


Figura 52: Coeficiente de abrasão (Ca) versus resistência à compressão aos 28 dias ($f_{c,28d}$) dos BTC, após cura ao ar.

4.9 Condutibilidade térmica

Na Figura 53 apresentam-se os resultados obtidos do ensaio de condutibilidade térmica, considerando diferentes condições de ensaio (Sat - saturado, OD - seco em estufa, AC - cura ao ar).

A condutibilidade térmica é uma característica intrínseca dos materiais, que mede a capacidade destes transferirem calor através da sua estrutura interna. Em materiais compostos, a condutibilidade térmica é função da condutibilidade térmica dos diferentes materiais que o constituem. Assim, a condutibilidade térmica dos BTC depende da sua composição.

Conforme esperado, verificou-se um aumento importante do coeficiente de condutibilidade com o teor de humidade dos BTC (Figura 53), visto que a água facilita a transmissão de calor. Segundo (Ashworth e Ashworth, 1991), a água ao possuir uma condutibilidade térmica cerca de 25 vezes superior à do ar, afecta de forma significativa a condutibilidade dos BTC. O λ dos BTC saturados foi

cerca de 2,1-2,5 vezes superior à sua condutibilidade térmica no estado seco. Por sua vez, a condutibilidade dos BTC curados ao ar foi apenas 10-50% superior à dos BTC no estado seco, o que indica que grande parte da água livre foi eliminada durante a cura ao ar. Verifica-se uma maior variação entre composições para condições de cura ao ar, devido ao facto dos BTC terem sido ensaiados com teores em água diferentes. Como é facilmente constatado na Figura 53, o teor em água dos BTC teve mais influência na condutibilidade do que o teor e tipo de ligante. Apesar dos BTC terem sido produzidos com composições e porosidades muito distintas, a condutibilidade térmica no estado seco variou apenas entre 0,6 e 0,76 W/m°C.

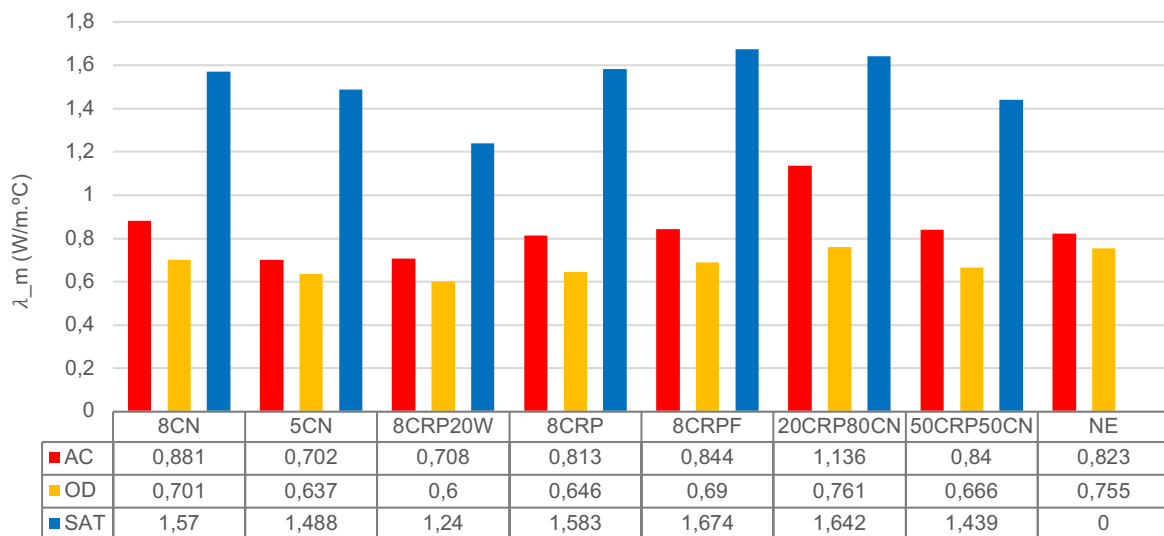


Figura 53: Condutibilidade térmica medida para cada BTC ensaiado, em função das condições de cura

Para o mesmo teor em água, a menor condutibilidade térmica foi observada nos BTC de menor teor de ligante e com incorporação de CRP, associados a menor massa volúmica e maior porosidade (Figura 53). Neste caso, a condutibilidade térmica dos BTC com 8% CRP foi 8% inferior à dos BTC com 8%CN de igual teor em água. A menor condutibilidade térmica foi obtida nos BTC com 20% TW, cuja compactidade foi significativamente menor do que a dos BTC com CN e do que dos BTC não estabilizado (NE). Face a 8CRP20W, com 20% TW, a mistura 8CRP, com 14% TW, apresentou condutibilidade térmica 15% superior. De facto, conforme é reportado na literatura para BTC e para outros materiais de base cimentícia, existe uma boa correlação entre a condutibilidade térmica e a massa volúmica (Figura 54). Na Figura 54 é possível ainda verificar que foram obtidos resultados semelhantes aos reportados por Silva (2015), que teve em conta BTC com 5-10% de estabilizante, composto por cimento e cimento e cal. Conclui-se assim que o tipo de estabilizante tem influência pouco significativa no parâmetro analisado.

Na Figura 54, confirma-se ainda pequenas diferenças entre os BTC com CRP e CRPF, e a tendência geral de redução progressiva de λ com o teor de CRP. Apenas para a mistura com 20% CRP foi observado maior λ , estando de acordo com a microestrutura mais densa atingida nesta mistura, conforme sugerido nos ensaios mecânicos em 4.2 e 4.4.

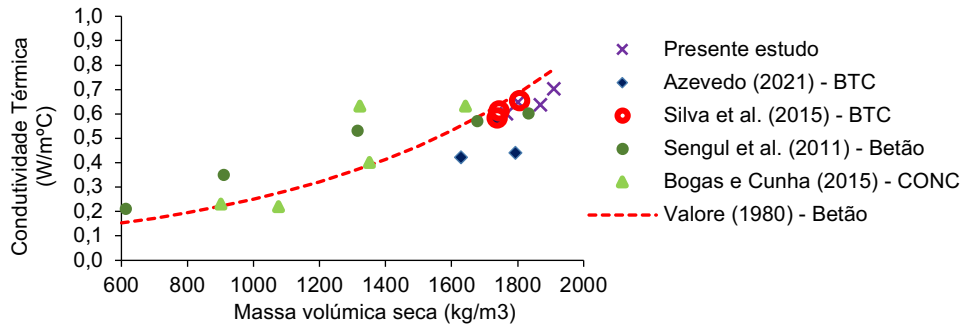


Figura 54 – Relação entre a condutibilidade térmica, λ , e a massa volúmica seca de diferentes materiais (BTC, betões, blocos), tendo em consideração diferentes autores

Em face da importância da massa volúmica na condutibilidade térmica, e tal como constatado por Azevedo (2021), seria esperado uma boa correlação entre λ e P_T . Porém, isso não foi observado (Figura 55). Uma razão está relacionada com a muito apertada gama de valores de λ analisados neste trabalho, pois, como referido, os vários tipos de BTC apresentaram características de isolamento semelhantes.

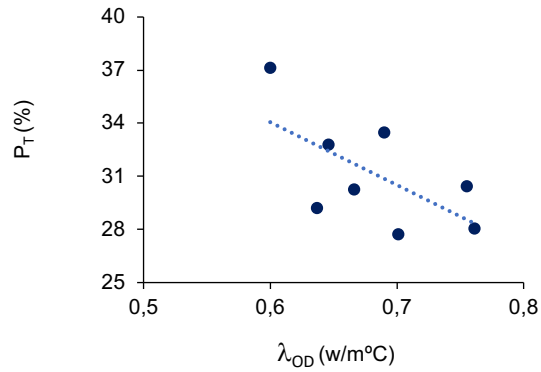


Figura 55 – Relação entre a condutibilidade térmica, λ_{OD} , e a porosidade total (P_T) de BTC, após secagem em estufa

5 Conclusões

Neste capítulo apresentam-se as conclusões finais extraídas da análise dos resultados obtidos para cada um dos ensaios laboratoriais, nomeadamente ao nível do desempenho mecânico dos blocos de terra comprimida (BTC) estabilizados com cimento reciclado de pasta (CRP).

5.1 Conclusões finais

A massa volúmica fresca, isto é, logo após a compactação das misturas, dos blocos produzidos neste estudo variou entre 2026 e 2227 kg/m³, inserindo-se quase perfeitamente no intervalo de valores sugerido por Rigassi (1985), entre 1800 e 2200 kg/m³, como sendo a gama de massa volúmica fresca habitual para BTC, atestando, assim, a qualidade do processo de compactação destes blocos. Comparando com estudos mais recentes, Azevedo (2021) e Silva (2015) reportaram valores mais baixos de massa volúmica fresca o que indicia uma melhor optimização da curva granulométrica da mistura granular utilizada neste trabalho. O teor de ligante não se mostrou relevante nos parâmetros de massa volúmica fresca e de porosidade total, estando, no entanto, ligado ao aumento da massa volúmica aos 28 dias de idade para maiores percentagens de estabilizante incorporado, em resultado da fixação da água consumida durante as reações de hidratação do cimento. Em relação ao tipo de ligante, verificou-se que os BTC estabilizados com CRP desenvolveram menor massa volúmica fresca e aos 28 dias por comparação com blocos estabilizados com igual teor de cimento normal (CN), estando associado a um aumento da porosidade total. No caso da mistura 8CRP observou-se uma diminuição de cerca 7% em comparação com a 8CN. Como seria esperado, existe uma forte relação entre os parâmetros da porosidade total e da massa volúmica fresca, principalmente entre os BTC de igual TW.

A resistência à compressão dos blocos com CRP, aos 28 dias e em condições AC, variou entre 1,8MPa e 10,4MPa. Em geral, as resistências obtidas neste trabalho revelaram BTC com melhor desempenho mecânico do que os resultados reportados em Azevedo (2021), que, para a mistura estabilizada com 10% CRP, obteve apenas 4,4MPa, cerca de 80% do valor obtido no presente estudo para a mistura com 8% CRP (5,5MPa). À semelhança da massa volúmica, também na resistência à compressão são evidentes os benefícios da utilização de uma mistura granular optimizada. Expectavelmente, a resistência à compressão aumentou com o teor de ligante incorporado, independentemente do tipo de cimento considerado, à excepção da mistura com 5% CRP que, por culpa de um teor em água (TW) elevado, donde resultou porosidade total bastante elevada, atingiu resistência à compressão inferior à dos blocos não estabilizados (NE). A influência da relação a/l vai ao encontro das conclusões apresentadas por diversos autores (Bogas e Gomes, 2013; Kerali, 2001), observando-se maior resistência à compressão para menor relação água/ligante, associada a menor volume de vazios. Como se verificou nos ensaios de termogravimetria (3.5.2.2), o CRP possui menor quantidade de compostos não carbonatados, em comparação com o CN. Assim, antecipa-se que o CRP produza menor quantidade de produtos hidratados (Bogas et al. 2022), que estão directamente ligados ao desenvolvimento de resistência mecânica através da interligação entre as frações do solo e a matriz cimentícia. Tal facto aliado à maior exigência de água do CRP, poderão estar na origem da diferença de resistências observada entre os blocos com 8% CRP (5,5MPa) e 8% CN (9,0MPa), em condições AC e aos 28 dias, cerca de 39% inferior no caso do CRP. Verifica-se uma excelente inter-

relação entre a porosidade total e a resistência à compressão, o que confirma que a maior exigência de água do CRP estará também na origem do desenvolvimento de menor resistência à compressão por oposição às misturas com igual teor de CN. Observa-se, ainda, a diminuição da resistência à compressão com a substituição progressiva de CN por CRP, pelo menos para valores acima de 20% de incorporação, ocorrendo o oposto para a porosidade total. Note-se que a mistura com 4%CRP e 4%CN resultou em BTC com maior resistência à compressão do que a mistura com 5% CN, o que atesta a eficiência do CRP na estabilização dos BTC. Prova disto é também o facto de a resistência da mistura com 8% CRP ter sido cerca de 2,7 vezes superior à dos blocos NE, ficando demonstrado o elevado poder ligante do CRP. Verifica-se que a incorporação de cimento reciclado fino (CRPF) não promoveu benefícios ao nível da resistência à compressão, possivelmente devido à maior exigência de água deste ligante, o que caracteriza o CRP e ainda mais o CRPF (Carricho et al., 2022b). Contrariamente ao observado em estudos com betões e argamassas (Carricho et al., 2022a; Real et al., 2021), a evolução da resistência foi mais rápida nos BTC com CN do que com CRP, apresentando, os primeiros, logo desde os 3 dias de idade maior resistência à compressão do que os segundos. Ainda assim, a diferença de resistências tende a diminuir com o avançar da idade de cura (54% aos 7 dias, e 29% aos 28). Isto deve-se ao facto dos BTC com CRP terem sido sujeitos a cura húmida nos primeiros 7 dias de idade. Conforme esperado, a resistência à compressão aumentou com a diminuição do TW dos blocos, atingindo o seu máximo após secagem em estufa (condições OD – secos em estufa).

Dado que a resistência à tração e a resistência à compressão dependem ambas da porosidade total e das características da matriz ligante, verifica-se uma boa correlação entre estes dois parâmetros. Em média, a resistência à tração por compressão diametral e a resistência à flexão corresponderam a cerca de 4-6% e 12-15% da resistência à compressão, respectivamente. Estas relações são ligeiramente inferiores às reportadas por Azevedo (2021), entre 8 e 10% para a compressão diametral e entre 16 e 23% para a flexão. Atingiram-se resultados de elevada variabilidade, em especial para os blocos de menor resistência. À semelhança da resistência à compressão, observa-se o aumento da resistência à tração para maiores teores de ligante incorporado. No caso das misturas estabilizadas com CRP, conclui-se que o aumento do teor de ligante, de 5% para 8%, conduziu ao incremento da resistência à tração por compressão diametral e por flexão em 64% e 171%, respectivamente. A mistura com 5% CRP foi a única mistura a não satisfazer o valor mínimo de resistência à flexão (0,35MPa) recomendado na norma HB-195 (2002). Também à semelhança da resistência à compressão, os BTC com CRP apresentaram menor resistência á tração do que os BTC com CN, a substituição progressiva do CN por CRP conduziu ao enfraquecimento do desempenho mecânico dos BTC, e verifica-se também uma boa correlação entre a porosidade total e a resistência à tração. Para 50% de substituição de CRP, a perda de resistência à tração por compressão diametral e por flexão foi de 32% e 17%, respectivamente. Novamente, a incorporação de CRPF não resultou em quaisquer benefícios ao nível do desempenho mecânico dos blocos. No caso dos BTC com CRP observou-se uma tendência oposta entre a resistência à flexão e a resistência por compressão diametral, quando sujeitos a cura húmida. Na primeira situação, a resistência dos blocos foi 34% superior, e no ensaio de compressão diametral a resistência foi cerca de 45% inferior. No entanto, não foi encontrada uma razão clara que explique tais tendências.

O módulo de elasticidade médio variou entre 0,78 GPa e 4,6 GPa, consoante o tipo de composição, enquadrando-se na gama de valores reportados por outros autores, como Bahar et al. (2004) e Azevedo (2021). Neste estudo, para a mistura com 8% CN, o módulo de elasticidade (3,6 GPa) foi cerca de 30% superior ao valor obtido por Azevedo (2021) para uma mistura com 10% de CN (2,8 GPa), em linha com o aumento de resistência mecânica verificado neste trabalho. Considerando os dois tipos de ligante em análise, observa-se que os BTC estabilizados com 8% CRP apresentaram módulo de elasticidade cerca de 31% inferior ao da mistura com 8% CN, o que está directamente relacionado com a natureza porosa demonstrada pelo cimento reciclado (Real et al., 2021). Ainda assim, os valores reportados por Azevedo (2021) indicam 2,1 GPa para os BTC com CRP, cerca de 16% inferior ao da mistura com 10% de CRP obtido neste trabalho. Adicionalmente, como prova da eficácia do CRP em estabilizar os BTC, concorre o facto do módulo de elasticidade dos blocos estabilizados com cimento reciclado ser 3,2 vezes superior ao módulo de elasticidade da mistura não estabilizada. À semelhança da resistência à compressão, também o módulo de elasticidade aumenta com o teor de ligante, independentemente do tipo de cimento, existindo uma boa correlação entre estes dois parâmetros.

A gama de valores obtida no ensaio de propagação de ultrassons (UPV) fixou-se entre 878 e 2494 m/s, consoante a composição dos blocos. Os valores reportados no presente trabalho comparam bem com os resultados de trabalhos anteriores, muito devido ao facto de se ter produzido blocos de maior compacidade. Também no ensaio de UPV o aumento do teor de ligante resultou no aumento da velocidade de propagação das ondas, e os blocos estabilizados com CRP apresentaram menor UPV por comparação com os estabilizados com CN. Neste caso, face aos BTC com 8% CN a redução do UPV por incorporação de igual teor CN, em condições secas, foi de 23,6%. Com a realização do ensaio UPV, confirma-se que a influência de se substituir CN por CRP ocorre mais ao nível da compacidade atingida nos blocos e não tanto da capacidade de hidratação e ligação do cimento.

A estabilização da retração ocorreu entre os 20º e 25º dias de monitorização, sendo que mais de 25% da retração ocorreu durante os primeiros três dias de ensaio. Consoante a mistura em análise, a retração máxima variou entre 1,4 e 2,1 mm/m nos BTC estabilizados e atingiu 3 mm/m nos não estabilizados. Estes valores são bastante elevados e inclusivamente superiores ao recomendado na literatura, ou nalgumas normas consultadas, como a NTC 5324, onde se recomenda uma retração inferior a 0,45mm/m após estabilização considerando a exposição a um ambiente exterior (33-45°C e 50%HR) mais agressivo ao considerado neste trabalho. Neste estudo, todos os blocos superaram este valor, o que poderá estar relacionado com o tipo de solo utilizado, que é constituído por minerais argilosos expansivos do grupo smectite.

Relativamente ao ensaio do esclerómetro pendular, o índice esclerométrico (IE) acompanhou o aumento do teor de ligante incorporado, sendo que os blocos estabilizados apresentaram maior IE do que os não estabilizados. A excepção ocorreu para a mistura com 5% CRP que, devido ao elevado TW, apresentou IE inferior ao dos blocos não estabilizados. Observa-se uma relação clara entre o IE e a resistência à compressão, de natureza directa, em que o aumento do IE acompanha o aumento da resistência à compressão.

Do ensaio de resistência à abrasão superficial conclui-se que a estabilização apresentou benefícios neste parâmetro, à excepção dos BTC estabilizados com CRP e elevado TW. Verifica-se, também, uma boa correlação entre o coeficiente de abrasão e o índice esclerométrico, visto que ambos os ensaios estão dependentes da dureza superficial dos BTC. Portanto, pode-se afirmar que, em geral, se observaram as mesmas tendências às indicadas no ensaio do índice esclerométrico. Por último, as partículas de CRP apresentam menor dureza do que o CN e, por isso, os blocos estabilizados com cimento reciclado tendem a apresentar menor resistência á abrasão.

Finalmente, em relação ao ensaio de condutibilidade térmica, verifica-se que este parâmetro aumenta com o teor de humidade dos blocos, sendo que a condutibilidade dos provetes saturados foi cerca de 2,1 a 2,5 vezes superior à dos blocos no estado seco. Verifica-se também que a condutibilidade tende a diminuir com a redução do teor de ligante incorporado, devido ao facto destes blocos possuírem maior porosidade e menor massa volúmica. Em relação ao tipo de ligante, os BTC com 8% CRP apresentaram condutibilidade térmica cerca de 8% inferior à dos blocos com igual teor de CN, e a menor condutibilidade térmica foi obtida para os BTC com 20% TW. Neste sentido, também se conclui que o TW da mistura tem uma influência importante na condutibilidade térmica dos blocos. Por último, a incorporação de CRPF não resultou em diferenças significativas face aos BTC com CRP de granulometria normal, e confirma-se a redução da condutibilidade térmica com a substituição progressiva do CN por CRP.

Em suma, conclui-se que a incorporação de CRP é eficaz na estabilização química de BTC, como comprovam os resultados aos ensaios de compressão, tração e módulo de elasticidade, ficando, ainda assim aquém da estabilização com CN. Por último, ficou demonstrado a importância da optimização granulométrica das misturas, como comprovam os resultados obtidos neste trabalho, superiores aos de Azevedo (2021) em vários dos ensaios onde este parâmetro tem influência.

5.2 Desenvolvimentos futuros

O presente trabalho vem no seguimento de estudos passados que tiveram como objectivo a estabilização química de blocos de terra comprimida através da incorporação de cimento reciclado em misturas de terra. Deste modo, pretendeu-se o desenvolvimento de novos materiais construtivos mais eco-eficientes e sustentáveis. Após a realização deste trabalho, referem-se as seguintes sugestões para futuros desenvolvimentos nesta área de investigação:

- Optimizar o teor óptimo de água (TOA) dos BTC aplicando o ensaio de compactação (Proctor) às misturas de terra, e utilizando um equipamento de precisão para medir, de forma exacta, o teor de humidade dos diferentes constituintes dos BTC;
- Explorar a produção de BTC aplicando novas pressões de compactação, através da utilização de uma prensa hidráulica capaz de aplicar diferentes níveis de pressão. Avaliar a influência deste parâmetro no desempenho dos BTC;
- Proceder à produção e caracterização de alvenarias expostas em ambiente real;
- Estudar a viabilidade económica da produção de BTC com cimento reciclado;
- Estudar, de forma mais aprofundada, as vantagens ambientais provenientes da utilização de cimento reciclado e da implementação de uma economia circular na construção;

Referências

- NT 21.33:1996. (1996). In *Blocs de terre comprimée ordinaires – Spécifications techniques. Tunisian Standards*.
- Abdulsalam, M., Abdulkarem, M., Olumide, E. E., & Hejazi, F. (2018). *Civil Eng Res J Effect of Addition of Silica Fume and Oil Palm Fiber on the Engineering Properties of Compressed Earth Block*. <https://doi.org/10.19080/CERJ.2018.06.555684>
- Alexander, M., & Mindess, S. (2005). *Aggregates in Concrete*. CRC Press. <https://doi.org/10.1201/9781482264647>
- Alexandre Bogas, J., Carriço, A., & Real, S. (2022). Thermoactivated Recycled Cement. In *Sustainability of Concrete With Synthetic and Recycled Aggregates*. IntechOpen. <https://doi.org/10.5772/intechopen.98488>
- Alonso, C., & Fernandez, L. (2004). Dehydration and Rehydration Processes of Cement Paste Exposed to High Temperature Environments. *Journal of Materials Science*, 39, 3015–3024. <https://doi.org/10.1023/B:JMISC.0000025827.65956.18>
- ARS 670: Part 4: Code of Practice for Production and Construction. (1996). In *Standards on CEB Construction: Compressed Earth Block Masonry*. African Standards Organisation.
- ARS 670-1 (2014). (2014). In *African Standard. Compressed earth blocks. Part 1: Definitions, classification, specifications and conformity criteria*. ARSO.
- ARS 670-2 (2014). (2014). In *African Standard. Compressed earth blocks. Part 2: Earth mortars*. ARSO.
- ARS 670-3 (2014). (2014). In *African Standard. Compressed earth blocks. Part 3: Test methods*. ARSO.
- ARS 670-4 (2014). (2014). In *African Standard. Compressed earth blocks. Part 4: Code of practice for production and construction*. ARSO.
- Ashworth, T., & Ashworth, E. (1991). *Thermal Conductivity of Several Concretes as a Function of Moisture* (G. R. S. & D. C. Wysocki, Eds.). USA: ASTM International.
- ASTM C805. (n.d.). *Standard Test Method for Rebound Number of Hardened Concrete*.
- ASTM D 698. (2000). *Standard Test Methods for Laboratory Compaction Characteristics of Soil Using Standard*.
- Azevedo, B. V. de. (2021). *Blocos de terra comprimida estabilizados com cimento reciclado*. Instituto Superior Técnico - Universidade de Lisboa.
- Bahar, R., Benazzoug, M., & Kenai, S. (2004). Performance of compacted cement-stabilised soil. *Cement and Concrete Composites*, 26(7), 811–820. <https://doi.org/10.1016/j.cemconcomp.2004.01.003>
- Baldusco, R., Nobre, T. R. S., Angulo, S. C., Quarcioni, V. A., & Cincotto, M. A. (2019). Dehydration and Rehydration of Blast Furnace Slag Cement. *Journal of Materials in Civil Engineering*, 31(8). [https://doi.org/10.1061/\(asce\)mt.1943-5533.0002725](https://doi.org/10.1061/(asce)mt.1943-5533.0002725)
- Barbosa, N. P. (1996). Transferência e aperfeiçoamento da tecnologia construtiva com tijolos prensados de terra crua em comunidades carentes Normando Perazzo Barbosa. In C. T. Formoso & A. Ino (Eds.), *Inovação, Gestão da Qualidade & Produtividade e Disseminação do Conhecimento na Construção Habitacional*.

- Berge, B., Butters, C., & Henley, F. (2009). The chemical and physical properties of building materials. In *The Ecology of Building Materials* (Second edition, pp. 57–63). Elsevier. <https://doi.org/10.1016/B978-1-85617-537-1.00004-4>
- Boden, T. A., Andres, R. J., & Marland, G. (2020). Global, Regional, and National Fossil-Fuel CO2 Emissions, Carbon Dioxide Information Analysis Center. *Oak Ridge National Laboratory, U.S. Department of Energy, Oak Ridge, Tenn., USA*.
- Bogas, J. A., Carriço, A., & Pereira, M. F. C. (2019). Mechanical characterization of thermal activated low-carbon recycled cement mortars. *Journal of Cleaner Production*, 218, 377–389. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2019.01.325>
- Bogas, J. A., Carriço, A., & Real, S. (2022). Durability of concrete produced with recycled cement from waste concrete. *Materials Today: Proceedings*, 58, 1149–1154. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.matpr.2022.01.280>
- Bogas, J. A., Carriço, A., & Tenza-Abril, A. J. (2020). Microstructure of thermoactivated recycled cement pastes. *Cement and Concrete Research*, 138. <https://doi.org/10.1016/j.cemconres.2020.106226>
- Bogas, J. A., & Gomes, A. (2013). A simple mix design method for structural lightweight aggregate concrete. *Materials and Structures*, 46(11), 1919–1932. <https://doi.org/10.1617/s11527-013-0029-1>
- Bogas, J. A., Gomes, M. G., & Gomes, A. (2013). Compressive strength evaluation of structural lightweight concrete by non-destructive ultrasonic pulse velocity method. *Ultrasonics*, 53(5), 962–972. <https://doi.org/10.1016/j.ultras.2012.12.012>
- Bogas, J. A., Real, S., Carriço, A., Abrantes, J. C. C., & Guedes, M. (2022). Hydration and phase development of recycled cement. *Cement and Concrete Composites*, 127. <https://doi.org/10.1016/j.cemconcomp.2022.104405>
- Bogas, J. A., Silva, M., & Glória Gomes, M. (2019). Unstabilized and stabilized compressed earth blocks with partial incorporation of recycled aggregates. *International Journal of Architectural Heritage*, 13(4), 569–584. <https://doi.org/10.1080/15583058.2018.1442891>
- Bogas, J. A., Silva, M., & Gomes, M. G. (2019). Unstabilized and stabilized compressed earth blocks with partial incorporation of recycled aggregates. *International Journal of Architectural Heritage*, 13(4), 569–584. <https://doi.org/10.1080/15583058.2018.1442891>
- Bogas, J., Silva, M., & Gomes, M. (2018). Unstabilized and stabilized compressed earth blocks with partial incorporation of recycled aggregates. *International Journal of Architectural Heritage*, 13, 1–16. <https://doi.org/10.1080/15583058.2018.1442891>
- 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))
- Carriço, A., Bogas, J. A., & Guedes, M. (2020a). Thermoactivated cementitious materials – A review. *Construction and Building Materials*, 250, 118873. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2020.118873>
- Carriço, A., Bogas, J. A., & Guedes, M. (2020b). 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. A., Hu, S., Real, S., & Costa Pereira, M. F. (2021). Novel separation process for obtaining recycled cement and high-quality recycled sand from waste hardened concrete. *Journal of Cleaner Production*, 309. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2021.127375>
- Carriço, A., Bogas, J. A., Real, S., & Pereira, M. F. C. (2022a). Shrinkage and sorptivity of mortars with thermoactivated recycled cement. *Construction and Building Materials*, 333. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2022.127392>
- Carriço, A., Bogas, J. A., Real, S., & Pereira, M. F. C. (2022b). Shrinkage and sorptivity of mortars with thermoactivated recycled cement. *Construction and Building Materials*, 333, 127392. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2022.127392>
- Carriço, A., Real, S., Bogas, J. A., & Costa Pereira, M. F. (2020). Mortars with thermo activated recycled cement: Fresh and mechanical characterisation. *Construction and Building Materials*, 256, 119502. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2020.119502>
- Carvalho, M. A. F. C. de. (2020). *Caracterização de pastas produzidas com cimento reciclado sujeito a diferentes temperaturas de termoativação*.
- CEMBUREAU. (2020). *Activity Report*. www.cembureau.eu.
- Cid-Falceto, J., Cañas, I., & Mazarrón, F. (2011). The earth building normative documents in the world. *Informes de La Construcción*, 63, 159–169. <https://doi.org/10.3989/ic.10.011>
- Cid-Falceto, J., Mazarrón, F. R., & Cañas, I. (2012). Assessment of compressed earth blocks made in Spain: International durability tests. *Construction and Building Materials*, 37, 738–745. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2012.08.019>
- Crook, D. N., & Murray, M. J. (1970). Regain of strength after firing of concrete. *Magazine of Concrete Research*, 22(72), 149–154. <https://doi.org/10.1680/mac.1970.22.72.149>
- CSIRO 5 (1987). (1987). In *Earth-wall construction. Bulletin 5. National building technology centre. Austrália. SAI*.
- Delgado, M., & Cañas, I. (2007). The selection of soils for unstabilised earth building: A normative review. *Construction and Building Materials*, 21, 237–251. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2005.08.006>
- DIN 18945 (2013). (2013). In *Blocs de terre Termes et définitions, exigences, méthodes d'essai Avertissement. Norme Allemande. NABau*.
- Doat, P., Hays, A., Houben, H., Matuk, S., & Vitoux, F. (1979). *Construire en terre*. CRAterre, Collection AnArchitecture.
- Elavarasan, S., Priya, A. K., Gurusamy, R. R., Naveeth, J. M. R., & Natesh, S. (2020). Experimental study on compressed earth block using fly-ash stabilizer. *Materials Today: Proceedings*, 37(Part 2), 3597–3600. <https://doi.org/10.1016/j.matpr.2020.09.641>
- EN 196-1:2016. (2016). *Methods of Testing Cement - Part 1: Determination of Strength*.
- EN 196-3:2016. (2016). *Methods of Testing Cement - Part 3: Determination of Setting Times and Soundness*.
- EN 197-1:2011, Cement Composition, specifications and conformity criteria for common cements (2011).

- EN 772-1:2000. (2000). *Methods of Test for Masonry Units - Part 1: Determination of Compressive Strength*.
- EN 772-4:1998. (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*.
- EN 772-6:2001. (2001). *Methods of Test for Masonry Units - Part 6: Determination of Bending Tensile Strength of Aggregate Concrete Masonry Units*.
- EN 933-11:2009. (2009). *Tests for Geometrical Properties of Aggregates - Part 11: Classification Test for the Constituents of Coarse Recycled Aggregate*.
- EN 1015-3:1999. (1999). *Methods of Test for Mortar for Masonry - Part 3: Determination of Consistence of Fresh Mortar (by Flow Table)*.
- EN 1015-6:1998. (1998). *Methods of Test for Mortar for Masonry - Part 6: Determination of Bulk Density of Fresh Mortar*.
- EN 1015-11:2019. (2019). *Methods of Test for Mortar for Masonry - Part 11: Determination of Flexural and Compressive Strength of Hardened Mortar*.
- EN 12390-6:2009. (2009). *Testing Hardened Concrete - Part 6: Tensile Splitting Strength of Test Specimens*.
- EN 12620:2013. (2013). *Aggregates for Concrete*.
- F. W. Taylor, H. (1996). *Cement Chemistry*. Thomas Telford.
- GCCA. (n.d.). <https://gccassociation.org/>.
- Gomes, M. I., Santos, T., Pereira, C., & Faria, P. (2019). *Construção com Base em Terra: Contributo para a Ecoeficiência na Construção*.
- Gonçalves, S. A. S. (2016). *Blocos de terra comprimida com incorporação de outros materiais - Universidade do Minho Departamento de Engenharia Civil*.
- Hall, M. R., Lindsay, R., & Krayenhoff, M. (2012). Overview of modern earth building. In *Modern Earth Buildings: Materials, Engineering, Constructions and Applications* (pp. 3–16). Elsevier Ltd. <https://doi.org/10.1533/9780857096166.1.3>
- Hall, M. R., Najim, K. B., & Keikhaei Dehdezi, P. (2012). Soil stabilisation and earth construction: Materials, properties and techniques. In *Modern Earth Buildings: Materials, Engineering, Constructions and Applications* (pp. 222–255). Elsevier Ltd. <https://doi.org/10.1533/9780857096166.2.222>
- HB 195. (2002).
- HB 195 (2002). (2002). In *The australian earth building handbook*. Standards Australia. SAI.
- Heathcote, K. A. (1995). Durability of earthwall buildings. *Construction and Building Materials*, 9(3), 185–189. [https://doi.org/10.1016/0950-0618\(95\)00035-E](https://doi.org/10.1016/0950-0618(95)00035-E)
- Houben, H., & Guillaud, H. (2008). *Earth construction: a comprehensive guide*. Practical Action Publishing, Warwickshire.
- <https://cdwvalue.eu>. (n.d.).

- Kamali, M., Hewage, K., & Sadiq, R. (2019). Conventional versus modular construction methods: A comparative cradle-to-gate LCA for residential buildings. *Energy and Buildings*, 204. <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2019.109479>
- Kasinikota, P., & Tripura, D. D. (2021). Evaluation of compressed stabilized earth block properties using crushed brick waste. *Construction and Building Materials*, 280. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2021.122520>
- Kerali, A. G. (2001). *DURABILITY OF COMPRESSED AND CEMENT-STABILISED BUILDING BLOCKS*. <http://go.warwick.ac.uk/wraphttp://go.warwick.ac.uk/wrap/71203>
- Krosnowski, A. D. (2011). *A Proposed Best Practice Method of Defining a Standard of Care for Stabilized Compressed Earthen Block Production*.
- KS02-1070:1993 (1999). (1999). In *Specifications for stabilized soil blocks*. Nairobi: Kenya Bureau of Standards.
- Kurdowski, W. (2014). *Cement and Concrete Chemistry*. Springer Science & Business.
- Lavie Arsène, M.-I., Frédéric, C., & Nathalie, F. (2020). Improvement of lifetime of compressed earth blocks by adding limestone, sandstone and porphyry aggregates. *Journal of Building Engineering*, 29, 101155. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.job.2019.101155>
- Lea, F. M. (1970). *The Chemistry of Cement and Concrete* (3rd ed.). Edward Arnold Publishers Limited.
- Leal, D. F. F. (2021). *Durabilidade de betões produzidos com cimento reciclado*. Instituto Superior Técnico - Universidade de Lisboa.
- Letelier, V., Tarela, E., Muñoz, P., & Moriconi, G. (2017). Combined effects of recycled hydrated cement and recycled aggregates on the mechanical properties of concrete. *Construction and Building Materials*, 132, 365–375. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2016.12.010>
- Lima, V. C., & Lima, M. R. de. (2007). Formação do Solo. In *O Solo no Meio Ambiente*.
- LNEC E 239 - 1970. (1970). In *Solos - Análise Granulométrica Por Peneiração Húmida*.
- LNEC E 397. (1993). *Betão – Determinação Do modulo de Elasticidade Em Compressão*. Lisboa. LNEC.
- LNEC E 398. (1998). *Betões – Determinação Da Retracção e Da Expansão*.
- LNEC E-195. (1966). In *reparação por via seca de amostras para ensaios de identificação*. Lisboa, 1966.
- LNEC E-197 (1966). (1966). In *Solos - Ensaio de Compactação*.
- Lothenbach, B., Durdzinski, P., & de Weerd, K. (2018). *A Practical Guide to Microstructural Analysis of Cementitious Materials* (K. Scrivener, R. Snellings, & B. Lothenbach, Eds.; 1st Edition). CRC Press. <https://doi.org/10.1201/b19074>
- Malkanathi, S. N., Wickramasinghe, W. G. S., & Perera, A. A. D. A. J. (2021). Use of construction waste to modify soil grading for compressed stabilized earth blocks (CSEB) production. *Case Studies in Construction Materials*, 15. <https://doi.org/10.1016/j.cscm.2021.e00717>
- Mansour, M. Ben, Jelidi, A., Cherif, A. S., & Jabrallah, S. Ben. (2016). Optimizing thermal and mechanical performance of compressed earth blocks (CEB). *Construction and Building Materials*, 104, 44–51. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2015.12.024>

- Marchon, D., & Flatt, R. J. (2016). Mechanisms of cement hydration. In P.-C. Aïtcin & R. Flatt (Eds.), *Science and technology of concrete admixtures*.
- Minke, G. (2009). *Design and Technology of a Sustainable Architecture*. Birkhäuser. <https://doi.org/doi:10.1515/9783034612623>
- Monteagudo, S. M., Moragues, A., Gálvez, J. C., Casati, M. J., & Reyes, E. (2014). The degree of hydration assessment of blended cement pastes by differential thermal and thermogravimetric analysis. Morphological evolution of the solid phases. *Thermochemica Acta*, 592, 37–51. <https://doi.org/10.1016/j.tca.2014.08.008>
- Morel, J. C., Pkla, A., & Walker, P. (2007). Compressive strength testing of compressed earth blocks. *Construction and Building Materials*, 21(2), 303–309. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2005.08.021>
- Mostafa, M., & Uddin, N. (2016). Experimental analysis of Compressed Earth Block (CEB) with banana fibers resisting flexural and compression forces. *Case Studies in Construction Materials*, 5, 53–63. <https://doi.org/10.1016/j.cscm.2016.07.001>
- Mota, J. B., Bandeira, P., Alexandre, J., Brito, D., Bogas, A., Francisco, M., Pereira, C., Presidente, J., Professora, :, De, M. C., Matos, O., Orientador, S., Fernando, A., Leite, F., & de Azevedo, C. (2020). *Caracterização mecânica e retração em argamassas produzidas com cimento reciclado Engenharia Civil*.
- Namango, S. S. (2006). *Development of Cost-Effective Earthen Building Material for Housing Wall Construction: Investigations into the Properties of Compressed Earth Blocks Stabilized with Sisal Vegetable Fibres, Cassava Powder and Cement Compositions*. Faculty of Environmental Science and Process Engineering of the Brandenburg Technical University Cottbus .
- NBR 8492 (2012). (2012). In *Tijolo de solo-cimento - Análise dimensional, determinação da resistência à compressão e da absorção de água - Método de ensaio*. Rio de Janeiro, ABNT.
- NBR 10833 (2012). (2012). In *Fabricação de tijolo e bloco de solo-cimento com utilização de prensa manual ou hidráulica - Procedimento*. Rio de Janeiro, ABNT.
- Neves, M. F. F. (2019). *Proposta de procedimentos normativos para a caracterização mecânica de blocos de terra compactada estabilizada com cimento*. Instituto Superior Técnico - Universidade de Lisboa.
- Neville, A. M. and others. (1995). *Properties of concrete* (Vol. 4). Longman London.
- Newman, A. J. (1986). *Microclimate and Its Effects on Durability*. Paper to SCI/BBA Symposium on Building Detereology.
- NF XP P13-901 (2001). (2001). In *Blocs de terre comprimée pour murs et cloisons. Définitions, spécifications, méthodes d'essai, conditions de reception*. Paris, AFNOR.
- NP EN 1097-6:2016. (2016). *Determinação Da Massa Volúmica* .
- NP EN 12504 - 4. (2007). *Ensaio Do Betão Nas Estruturas Parte 4: Determinação Da Velocidade de Propagação Dos Ultra-Sons*.
- NP EN 12504-2. (2003). *Ensaio Do Betão Nas Estruturas Parte 2: Ensaio Não Destrutivo Determinação Do Índice Esclerométrico*.

- NP-83 (1965). (1965). In *Solos: densidade de partículas, IPQ, Lisboa*.
- NP-143 (1969). (1969). In *Solos: determinação dos limites de consistência, IPQ, Lisboa*.
- NT 21.35:1996. (1996). In *Blocs de terre comprimée - Définition, classification et désignation. Tunisian Standards, 1998*.
- NTC 5324 (2004). (2004). In *Bloques de suelo cemento para muros y divisiones. Definiciones. Especificaciones. Métodos de ensayo. Condiciones de entrega. Bogotá. ICONTEC*.
- NZS 4297 (1998). (1998). In *Engineering design of earth buildings. New Zealand. SNZ*.
- NZS 4298 (1998). (1998). In *Materials and workmanship for earth buildings. New Zealand. SNZ*.
- NZS 4299 (1998). (1998). *Earth Buildings Not Requiring Specific Design. New Zealand. SNZ*.
- Ouedraogo, K. A. J., Aubert, J.-E., Tribout, C., & Escadeillas, G. (2020). Is stabilization of earth bricks using low cement or lime contents relevant? *Construction and Building Materials*, 236, 117578. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2019.117578>
- Pacheco Torgal, F., Eires, R. M. G., & Jalali, S. (2009). *Construção em Terra*.
- Paula Junior, A. C., Jacinto, C., Turco, C., Fernandes, J., Teixeira, E., & Mateus, R. (2022). Analysis of the effect of incorporating construction and demolition waste on the environmental and mechanical performance of earth-based mixtures. *Construction and Building Materials*, 330, 127244. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2022.127244>
- Poppe, L., Paskevich, V., & Blackwood, D. (2001). *Laboratory Manual for X-Ray Powder Diffraction*.
- Proctor, R. (1933). Fundamental Principles of Soil Compaction. *News Reward*, 3, 286–289.
- Real, S., Bogas, J. A., Carriço, A., & Hu, S. (2021). Mechanical Characterisation and Shrinkage of Thermoactivated Recycled Cement Concrete. *Applied Sciences*, 11(6), 2454. <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>
- Real, S., Sousa, V., Meireles, I., Bogas, J. A., & Carriço, A. (2022). Life Cycle Assessment of Thermoactivated Recycled Cement Production. *Materials*, 15(19), 6766. <https://doi.org/10.3390/ma15196766>
- Reddi, L. N., Jain, A. K., & Yun, H. B. (2012). Soil materials for earth construction: Properties, classification and suitability testing. In *Modern Earth Buildings: Materials, Engineering, Constructions and Applications* (pp. 155–171). Elsevier Ltd. <https://doi.org/10.1533/9780857096166.2.155>
- Reddy BVV. (2012). Stabilised soil blocks for structural masonry in earth construction. In M. Hall M., L. R., & K. M. Woodhead (Eds.), *Modern Earth Buildings* (1st ed.). Limited.
- Rigassi, V. (1985). Manual of Production. In *Compressed Earth Blocks: (Vol. 1)*. CRATerre-EAG.
- Riza, F., & Abdul Rahman, I. (2015). The properties of compressed earth-based (CEB) masonry blocks. In *Eco-efficient Masonry Bricks and Blocks: Design, Properties and Durability* (pp. 379–392). <https://doi.org/10.1016/B978-1-78242-305-8.00017-6>

- Riza, F. V., Rahman, I. A., & Zaidi, A. M. A. (2010). A Brief Review of Compressed Stabilized Earth Brick (CSEB). *2010 International Conference on Science and Social Research (CSSR 2010)*, 999–1004. <https://doi.org/10.1109/CSSR.2010.5773936>
- Rodrigues, R. A. (2019). *OTIMIZAÇÃO GEOMÉTRICA DO BLOCO DE TERRA COMPRIMIDA*.
- Santos, M. N. dos. (2012). *Análise do Efeito da Estabilização Mecânica em Matrizes de Terra*. Pontifícia Universidade Católica.
- Schroeder, H. (2012). 4 - Modern earth building codes, standards and normative development. In M. R. Hall, R. Lindsay, & M. Krayenhoff (Eds.), *Modern Earth Buildings* (pp. 72–109). Woodhead Publishing. <https://doi.org/https://doi.org/10.1533/9780857096166.1.72>
- Sérgio C. Angulo, Mário S. Guilge, Valdecir A. Quarcioni, Raphael Balduco, & Maria A. Cincotto. (2015). Rehydration of Cement Fines: A TG/Calorimetry Study. In I. Martins, C. Ulsen, & S. C. Angulo (Eds.), *III Progress of Recycling in the Built Environment* (pp. 222–229). RILEM Publications SARL.
- Serpell, R., & Lopez, M. (2013). Reactivated cementitious materials from hydrated cement paste wastes. *Cement and Concrete Composites*, 39, 104–114. <https://doi.org/10.1016/j.cemconcomp.2013.03.020>
- Serpell, R., & Lopez, M. (2015). Properties of mortars produced with reactivated cementitious materials. *Cement and Concrete Composites*, 64, 16–26. <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. *Cement and Concrete Research*, 100, 398–412. <https://doi.org/10.1016/j.cemconres.2017.08.001>
- Shui, Z., Xuan, D., Chen, W., Yu, R., & Zhang, R. (2007). *Cementitious characteristics of hydrated cement paste subjected to various dehydration temperatures*.
- Silva, M. F. C. G. Da. (2015). *Blocos de terra compactada com e sem materiais cimentícios Engenharia Civil*. Instituto Superior Técnico - Universidade de Lisboa.
- Splittgerber, F., & Mueller, A. (2003, January). *INVERSION OF THE CEMENT HYDRATION AS A NEW METHOD FOR IDENTIFICATION AND/OR RECYCLING?* <https://doi.org/10.13140/2.1.2201.3766>
- Stafford, F. N., Raupp-Pereira, F., Labrincha, J. A., & Hotza, D. (2016). Life cycle assessment of the production of cement: A Brazilian case study. *Journal of Cleaner Production*, 137, 1293–1299. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2016.07.050>
- Standards Australia International. (n.d.). *HB 195-2002*.
- UNE 41410 (2008). (2008). In *Bloques de tierra comprimida para muros y tabiques Definiciones, especificaciones y métodos de ensayo. Norma española. Madrid. AENOR*.
- Uzoegbo, H. C. (2019). Dry-stack and compressed stabilized earth-block construction. In *Nonconventional and Vernacular Construction Materials: Characterisation, Properties and Applications* (pp. 305–350). Elsevier. <https://doi.org/10.1016/B978-0-08-102704-2.00012-3>
- Venkatarama Reddy, B. v. (2012). Stabilised soil blocks for structural masonry in earth construction. In *Modern Earth Buildings: Materials, Engineering, Constructions and Applications* (pp. 324–363). Elsevier Ltd. <https://doi.org/10.1533/9780857096166.3.324>

- Vieira, D. R., Calmon, J. L., & Coelho, F. Z. (2016). Life cycle assessment (LCA) applied to the manufacturing of common and ecological concrete: A review. In *Construction and Building Materials* (Vol. 124, pp. 656–666). Elsevier Ltd. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2016.07.125>
- Walker, P. (1995). Strength, durability and shrinkage characteristics of cement stabilised soil blocks. *Cement & Concrete Composites*, 17, 301–310.
- Wang, B., Yan, L., Fu, Q. N., & Kasal, B. (2021). *A Comprehensive Review on Recycled Aggregate and Recycled Aggregate Concrete*.
- Wang, J., Mu, M., & Liu, Y. (2018). Recycled cement. *Construction and Building Materials*, 190, 1124–1132. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2018.09.181>
- WD-ARS 1333. (2018). *Compressed Stabilized Earth Blocks — Requirements, Production and Construction*.
- Xia, B., Ding, T., & Xiao, J. (2020). Life cycle assessment of concrete structures with reuse and recycling strategies: A novel framework and case study. *Waste Management*, 105, 268–278. <https://doi.org/10.1016/j.wasman.2020.02.015>
- XP 13-901. (2001).
- XP N13-901. (2001). *Blocs de terre comprimée pour murs et cloisons*.
- XP P13-901. (2001). *Compressed Earth Blocks Fo Walls and Partitions: Definitions - Specifications - Test Methods - Delivery Acceptance Conditions*.
- Xuan, D. X., & Shui, Z. H. (2011). Rehydration activity of hydrated cement paste exposed to high temperature. *Fire and Materials*, 35(7), 481–490. <https://doi.org/https://doi.org/10.1002/fam.1067>
- 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. *Construction and Building Materials*, 49, 841–851. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2013.09.004>
- Zhang, L., Ji, Y., Huang, G., Li, J., & Hu, Y. (2018a). Modification and enhancement of mechanical properties of dehydrated cement paste using ground granulated blast-furnace slag. *Construction and Building Materials*, 164, 525–534. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2017.12.232>
- Zhang, L., Ji, Y., Huang, G., Li, J., & Hu, Y. (2018b). Modification and enhancement of mechanical properties of dehydrated cement paste using ground granulated blast-furnace slag. *Construction and Building Materials*, 164, 525–534. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2017.12.232>

Anexos

A.1 – Resultado do ensaio de resistência à compressão aos 3 dias

Mistura	h (mm)	Massa (g)	ρ_{3d} (kg/m ³)	ρ_{3d} - med (kg/m ³)	F (kN)	σ_c (MPa)	σ_c – med(MPa)
8CN20W.1	79	3735,6	2047,016	2080	51,540	2,231	2,368
8CN20W.2	79	3856,8	2113,431		57,860	2,505	
8CN.1	80	3838,0	2076,840	2063	104,040	4,504	4,461
8CN.2	75	3529,9	2037,460		92,956	4,024	
8CN.3	80	3957,0	2141,234		116,876	5,060	
8CN.4	80	3686,8	1995,022		98,311	4,256	
5CN.1	75	3559,8	2054,719	2039	75,441	3,266	3,333
5CN.2	76	3478,1	1981,146		71,870	3,111	
5CN.3	75	3605,8	2081,270		81,156	3,513	
5CN.4	*	*	*		79,538	3,443	
8CRP20W.1	79	3740,9	2049,921	2001	17,895	0,775	0,700
8CRP20W.2	78	3647,4	2024,309		14,547	0,630	
8CRP20W.3	80	3437,8	1860,281		16,069	0,696	
8CRP20W.4	79	3778,1	2070,305		0,000	0,000	
8CRP17W.1	78	3613,3	2005,384	-	35,110	1,520	-
8CRP.1	80	3633,0	1965,909	1995	49,500	2,143	2,191
8CRP.2	78	3663,8	2033,411		47,792	2,069	
8CRP.3	81	3718,0	1987,066		57,198	2,476	
8CRP.4	79	3634,7	1991,726		47,943	2,075	
5CRP.1	77	3551,4	1996,627	2041	10,541	0,456	0,597
5CRP.2	80	3862,7	2090,206		22,754	0,985	
5CRP.3	78	3699,4	2053,169		11,880	0,514	
5CRP.4	78	3645,7	2023,366		9,957	0,431	
50CRP50CN.1	80	3676,1	1989,232	2048	34,821	1,507	2,230
50CRP50CN.2	78	3752,1	2082,418		46,013	1,992	
50CRP50CN.3	80	3767,0	2038,420		59,831	2,590	
50CRP50CN.4	80	3848,9	2082,738		65,395	2,831	
NE.1	77	3374,7	1897,285	1981	10,758	0,466	0,405
NE.2	74	3475,0	2032,877		8,210	0,355	
NE.3	74	3438,2	2011,349		8,386	0,363	
NE.4	*	*	*		10,037	0,435	

*Medições não realizadas

B.1 – Resultado do ensaio de resistência à compressão aos 7 dias

Mistura	Amb. Cura	h (mm)	Massa (g)	ρ_{7d} (kg/m ³)	ρ_{7d} - med (kg/m ³)	F (kN)	σ_c (MPa)	σ_c – med(MPa)
8CN20W.1	AC	81	3884,5	2076,052	2018	92,532	4,006	4,127
8CN20W.2	AC	81	3605,2	1926,781		55,08*	2,384*	
8CN20W.3	AC	79	3744,6	2051,948		98,154	4,249	
8CN.1	AC	78	3787,7	2102,176	2019	162,310	7,026	5,877
8CN.2	AC	77	3486,5	1960,139		106,979	4,631	
8CN.3	AC	76	3560,5	2028,082		150,751	6,526	
8CN.4	AC	75	3436,7	1983,665		123,008	5,325	
8CRP20W.1	AC	74	3321,2	1942,904	1917	25,140	1,088	1,048
8CRP20W.2	AC	79	3484,4	1909,365		23,070	0,999	
8CRP20W.3	AC	77	3361,7	1889,976		19,490	0,844	
8CRP20W.4	AC	77	3425,2	1925,676		29,130	1,261	
8CRP17W.1	AC	77	3365,8	1892,281	1898	51,825	2,244	2,487
8CRP17W.2	AC	78	3428,6	1902,875		63,067	2,730	
8CRP.1	AC	79	3572,0	1957,368	2007	57,527	2,490	2,675
8CRP.2	AC	78	3685,3	2045,344		71,446	3,093	
8CRP.3	AC	78	3566,7	1979,520		51,355	2,223	
8CRP.4	AC	79	3735,5	2046,961		66,833	2,893	
NE.1	AC	79	3652,0	2001,206	2017	15,749	0,682	0,653
NE.2	AC	79	3678,5	2015,727		15,827	0,685	
NE.3	AC	80	3760,9	2035,119		13,679	0,592	

*bloco bastante danificado nos cantos. Ensaio não considerado

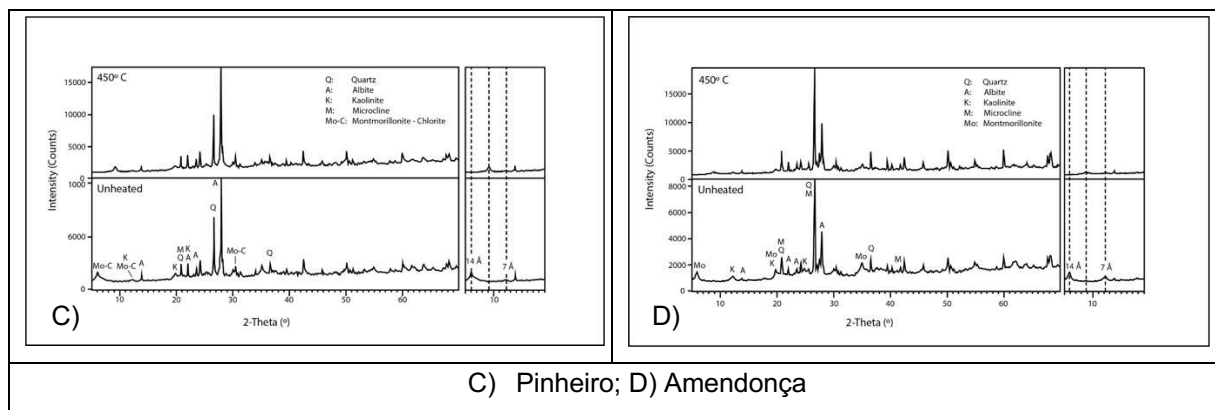
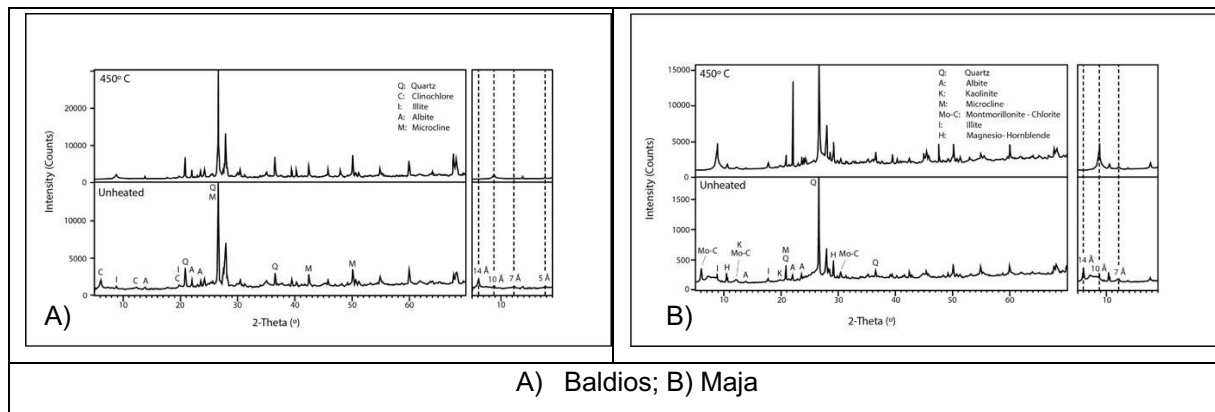
C.1 – Resultado do ensaio de resistência à compressão aos 28 dias em condições AC – Parte 1/2

Mistura	Amb. Cura	h (mm)	Massa (g)	ρ_{28d} (kg/m ³)	ρ_{28d} - med (kg/m ³)	F (kN)	σ_c (MPa)	σ_c - med (MPa)
8CN.1	AC	78	3733,4	2072,056	2048	211,580	9,159	9,035
8CN.2	AC	78	3671,7	2037,813		209,060	9,050	
8CN.3	AC	76	3575,4	2036,574		181,180	7,843	
8CN.4	AC	78	3663,4	2033,206		233,710	10,117	
8CN.5	AC	76	3633,5	2069,668		222,100	9,615	
8CN.6	AC	76	3579,1	2038,682		194,670	8,427	
5CN.1	AC	75	3546,8	2047,219	2010	152,810	6,615	6,518
5CN.2	AC	74	3397,5	1987,549		125,961	5,453	
5CN.3	AC	76	3510,6	1999,657		155,359	6,725	
5CN.4	AC	75	3479,6	2008,431		163,433	7,075	
5CN.5	AC	76	3534,3	2013,157		163,293	7,069	
5CN.6	AC	75	3471,9	2003,987		142,500	6,169	
8CN32,5.1	AC	78	3538,5	1963,851	1960	162,462	7,033	6,795
8CN32,5.2	AC	83	3722,5	1941,517		176,060	7,622	
8CN32,5.3	AC	76	3409,4	1941,994		140,390	6,077	
8CN32,5.4	AC	79	3439,3	1884,633		149,929	6,490	
8CN32,5.5	AC	78	3516,5	1951,641		151,161	6,544	
8CN32,5.6	AC	76	3645,3	2076,364		161,780	7,003	
8CRP20W.1	AC	79	3468,3	1900,564	1879	53,695	2,324	3,032
8CRP20W.2	AC	77	3368,4	1893,744		71,047	3,076	
8CRP20W.3	AC	78	3358,9	1864,203		76,372	3,306	
8CRP20W.4	AC	78	3350,9	1859,763		65,800	2,848	
8CRP20W.5	AC	79	3452,0	1891,632		74,160	3,210	
8CRP20W.6	AC	78	3358,7	1864,092		79,113	3,425	
8CRP.1	AC	79	3632,3	1990,434	1966	153,350	6,639	5,509
8CRP.2	AC	77	3516,3	1976,909		130,700	5,658	
8CRP.3	AC	76	3476,2	1980,075		115,970	5,020	
8CRP.4	AC	80	3590,0	1942,615		139,840	6,054	
8CRP.5	AC	78	3477,1	1929,812		112,160	4,855	
8CRP.6	AC	78	3560,6	1976,155		111,470	4,826	
5CRP.1	AC	77	3395,0	1908,703	1870	48,758	2,111	1,764
5CRP.2	AC	77	3363,6	1891,050		38,725	1,676	
5CRP.3	AC	79	3386,7	1855,831		39,482	1,709	
5CRP.4	AC	75	3194,4	1843,818		38,329	1,659	
5CRP.5	AC	76	3292,8	1875,605		40,313	1,745	
5CRP.6	AC	78	3324,3	1844,993		38,828	1,681	
8CRPF.1	AC	79	3519,6	1928,659	1906	127,390	5,515	5,281
8CRPF.2	AC	80	3464,2	1874,566		121,054	5,240	
8CRPF.3	AC	79	3456,8	1894,246		124,671	5,397	
8CRPF.4	AC	79	3387,6	1856,326		107,171	4,639	
8CRPF.5	AC	79	3549,8	1945,208		129,376	5,601	
8CRPF.6	AC	77	3445,3	1936,995		122,296	5,294	

D.1 – Resultado dos ensaios de resistência à compressão aos 28 dias em condições AC – Parte 2/

Mistura	Amb. Cura	h (mm)	Massa (g)	ρ_{28d} (kg/m ³)	ρ_{28d} - med (kg/m ³)	F (kN)	σ_c (MPa)	σ_c - med (MPa)
20CRP80CN.1	AC	80	3813,7	2063,703	2025	292,430	12,659	10,433
20CRP80CN.2	AC	76	3592,0	2046,050		258,750	11,201	
20CRP80CN.3	AC	77	3576,7	2010,831		208,360	9,020	
20CRP80CN.4	AC	77	3555,3	1998,818		245,370	10,622	
20CRP80CN.5	AC	76	3564,9	2030,605		170,590	7,385	
20CRP80CN.6	AC	81	3742,2	1999,993		270,450	11,708	
50CRP50CN.1	AC	76	3612,1	2057,476	2011	221,380	9,584	8,394
50CRP50CN.2	AC	76	3563,3	2029,679		189,020	8,183	
50CRP50CN.3	AC	76	3468,2	1975,509		167,550	7,253	
50CRP50CN.4	AC	76	3450,5	1965,427		181,270	7,847	
50CRP50CN.5	AC	77	3574,1	2009,397		210,100	9,095	
50CRP50CN.6	AC	77	3608,1	2028,512		194,050	8,400	
NE.1	AC	71	3206,3	1954,922	1938	54,478	2,358	2,078
NE.2	AC	73	3320,6	1969,137		49,116	2,126	
NE.3	AC	73	3204,6	1900,348		46,187	1,999	
NE.4	AC	74	3339,0	1953,288		42,720	1,849	
NE.5	AC	70	2995,8	1852,674		44,979	1,947	
NE.6	AC	74	3414,8	1997,631		50,494	2,186	

D.2– Difractogramas - Terras



E.1 – Resultado dos ensaios de resistência à compressão aos 28 dias em condições SAT

Mistura	Amb. Cura	h (mm)	Massa (g)	$\rho_{28d,SAT}$ (kg/m ³)	$\rho_{28d,SAT} - med$ (kg/m ³)	F (kN)	σ_c (MPa)	$\sigma_c - med$ (MPa)
8CN.1	SAT	77	3769,027	2118,979	2160	127,430	5,516	6,195
8CN.2	SAT	78	3899,535	2164,244		131,910	5,710	
8CN.3	SAT	78	3907,835	2168,851		155,540	6,733	
8CN.4	SAT	78	3991,035	2215,027		155,830	6,746	
8CN.5	SAT	79	3893,344	2133,456		145,940	6,318	
8CN.6	SAT	76	3791,119	2159,444		141,950	6,145	
5CN.1	SAT	75	3718,318	2146,215	2171	98,692	4,272	3,879
5CN.2	SAT	78	3889,447	2158,645		100,503	4,351	
5CN.3	SAT	75	3794,618	2190,256		83,384	3,610	
5CN.4	SAT	76	3847,428	2191,517		77,931	3,374	
5CN.5	SAT	76	3856,128	2196,473		92,176	3,990	
5CN.6	SAT	80	3960,066	2142,893		84,880	3,674	
8CRP20W.1	SAT	81	3848,060	2056,576	2061	33,764	1,462	1,558
8CRP20W.2	SAT	80	3829,774	2072,388		38,156	1,652	
8CRP20W.3	SAT	76	3702,730	2109,097		36,750	1,591	
8CRP20W.4	SAT	79	3738,488	2048,599		31,560	1,366	
8CRP20W.5	SAT	78	3698,902	2052,893		36,071	1,562	
8CRP20W.6	SAT	76	3557,630	2026,447		39,631	1,716	
8CRP.1	SAT	77	3777,280	2123,618	2092	71,340	3,088	2,527
8CRP.2	SAT	81	3830,758	2047,329		56,200	2,433	
8CRP.3	SAT	77	3788,380	2129,859		65,240	2,824	
8CRP.4	SAT	78	3726,874	2068,417		57,240	2,478	
8CRP.5	SAT	79	3789,769	2076,699		56,950	2,465	
8CRP.6	SAT	77	3746,080	2106,077		43,320	1,875	
5CRP.1	SAT	78	3656,236	2029,213	2036	17,720	0,767	0,682
5CRP.2	SAT	78	3560,236	1975,933		15,098	0,654	
5CRP.3	SAT	78	3608,536	2002,739		15,407	0,667	
5CRP.4	SAT	78	3817,536	2118,734		15,484	0,670	
5CRP.5	SAT	75	3604,454	2080,493		16,387	0,709	
5CRP.6	SAT	77	3573,208	2008,888		14,360	0,622	

F.1 – Resultado dos ensaios de resistência à compressão aos 28 dias em condições OD

Mistura	Amb. Cura	h (mm)	Massa (g)	$\rho_{28d,OD}$ (kg/m ³)	$\rho_{28d,OD} - med$ (kg/m ³)	F (kN)	σ_c (MPa)	$\sigma_c - med$ (MPa)
8CN.1	OD	79	3523,053	1930,546	1910	321,903	13,935	12,200
8CN.2	OD	76	3348,414	1907,276		251,503	10,888	
8CN.3	OD	79	3481,253	1907,640		333,603	14,442	
8CN.4	OD	75	3341,768	1928,870		304,203	13,169	
8CN.5	OD	76	3386,414	1928,921		304,203	13,169	
8CN.6	OD	74	3173,922	1856,746		175,503	7,598	
5CN.1	OD	75	3308,680	1909,772	1869	195,238	8,452	8,700
5CN.2	Od	74	3146,772	1840,863		189,438	8,201	
5CN.3	OD	74	3215,472	1881,053		201,138	8,707	
5CN.4	OD	76	3318,187	1890,059		206,538	8,941	
5CN.5	OD	77	3204,995	1801,875		200,738	8,690	
5CN.6	OD	75	3275,080	1890,378		212,738	9,209	
8CRP20W.1	OD	77	3164,742	1779,244	1767	134,653	5,829	4,920
8CRP20W.2	OD	78	3184,041	1767,145		93,563	4,050	
8CRP20W.3	OD	79	3224,940	1767,188		123,269	5,336	
8CRP20W.4	OD	80	3304,140	1787,954		91,527	3,962	
8CRP20W.5	OD	79	3166,840	1735,350		129,050	5,587	
8CRP20W.6	OD	80	3261,940	1765,119		109,841	4,755	
8CRP.1	OD	79	3266,529	1789,977	1802	190,911	8,265	7,900
8CRP.2	OD	78	3298,720	1830,792		204,811	8,866	
8CRP.3	OD	77	3188,411	1792,551		177,311	7,676	
8CRP.4	OD	80	3300,639	1786,060		193,971	8,397	
8CRP.5	OD	80	3287,539	1778,971		174,531	7,555	
8CRP.6	OD	77	3261,511	1833,649		153,411	6,641	
5CRP.1	OD	77	3105,759	1746,083	1737	74,465	3,224	2,610
5CRP.2	OD	77	3134,559	1762,275		68,777	2,977	
5CRP.3	OD	79	3210,986	1759,541		58,356	2,526	
5CRP.4	OD	74	2875,217	1682,004		49,664	2,150	
5CRP.5	OD	75	3023,031	1744,895		68,969	2,986	
5CRP.6	OD	78	3112,072	1727,202		41,509	1,797	

G.1 – Resultado dos ensaios de resistência à compressão em condições WC

Mistura	Amb. Cura	h (mm)	Massa (g)	$\rho_{28d,OD}$ (kg/m ³)	$\rho_{28d,SAT}$ - med (kg/m ³)	F (kN)	σ_c (MPa)	σ_c - med(MPa)
8CNWC.1	WC	77	3733,700	2099,117	2074	170,013	7,360	7,668
8CNWC.2	WC	75	3698,100	2134,545		182,226	7,889	
8CNWC.3	WC	77	3534,800	1987,294		174,688	7,562	
8CNWC.4	WC	78	3565,000	1978,577		157,269	6,808	
8CNWC.5	WC	75	3700,100	2135,700		193,990	8,398	
8CNWC.6	WC	74	3609,700	2111,677		184,550	7,989	
8CRPWC.1	WC	77	3400,600	1911,846	1850	76,717	3,321	3,016
8CRPWC.2	WC	75	3225,900	1861,991		63,877	2,765	
8CRPWC.3	WC	77	3266,100	1836,229		69,520	3,010	
8CRPWC.4	WC	76	3215,200	1831,397		74,849	3,240	
8CRPWC.5	WC	74	3082,000	1802,972		54,552	2,362	
8CRPWC.6	WC	80	3430,800	1856,494		78,475	3,397	

H.1 – Resultado dos ensaios de resistência à tração por compressão diametral

Mistura	h (mm)	Massa (g)	ρ (kg/m ³)	ρ - med (kg/m ³)	F (kN)	$\sigma_{ctm,sp}$ (MPa)	$\sigma_{ctm,sp}$ - med(MPa)
8CN.1	77	3699,8	2,080	2,039	13,539	0,509	0,492
8CN.2	76	3617,8	2,061		13,474	0,513	
8CN.3	79	3730,7	2,044		14,570	0,534	
8CN.4	76	3457,3	1,969		10,844	0,413	
8CNWC.1	78	3889,0	2,158	2,121	13,230	0,491	0,624
8CNWC.2	75	3632,1	2,096		17,822	0,688	
8CNWC.3	79	3866,7	2,119		18,468	0,676	
8CNWC.4	76	3702,1	2,109		16,843	0,641	
5CN.1	75	3485,4	2,012	2,017	10,672	0,412	0,372
5CN.2	78	3625,0	2,012		9,025	0,335	
5CN.3	77	3528,1	1,984		10,200	0,383	
5CN.4	76	3621,3	2,063		9,441	0,359	
8CRP20W.1	77	3251,0	1,828	1,874	4,883	0,184	0,187
8CRP20W.2	77	3346,0	1,881		5,172	0,194	
8CRP20W.3	79	3447,1	1,889		1,413	0,0517574072701607*	
8CRP20W.4	78	3423,0	1,900		4,948	0,184	
8CRP.1	77	3531,1	1,985	1,942	6,580	0,247	0,230
8CRP.2	79	3578,7	1,961		6,540	0,240	
8CRP.3	77	3296,3	1,853		4,330	0,162725124814146*	
8CRP.4	79	3594,2	1,970		5,530	0,203	
8CRPWC.1	79	3537,0	1,938	1,889	3,465	0,127	0,129
8CRPWC.2	77	3372,8	1,896		3,627	0,136	
8CRPWC.3	79	3403,2	1,865		3,058	0,112	
8CRPWC.4	74	3170,5	1,855		3,593	0,141	
5CRP.1	76	3276,0	1,866	1,858	1,857	0,071	0,070
5CRP.2	77	3296,6	1,853		1,784	0,067	
5CRP.3	75	3214,0	1,855		1,942	0,075	
5CRP.4	78	3350,1	1,859		1,859	0,069	
20CRP80CN.1	78	3584,4	1,989	2,007	10,530	0,391	0,415
20CRP80CN.2	76	3471,5	1,977		9,300	0,354	
20CRP80CN.3	75	3510,0	2,026		11,850	0,457	
20CRP80CN.4	76	3570,8	2,034		12,030	0,458	
50CRP50CN.1	80	3683,6	1,993	2,005	7,560	0,273	0,337
50CRP50CN.2	79	3633,3	1,991		10,820	0,396	
50CRP50CN.3	79	3650,0	2,000		9,660	0,354	
50CRP50CN.4	78	3664,3	2,034		8,710	0,323	
8CRPF.1	80	3537,8	1,914	1,883	6,600	0,239	0,214
8CRPF.2	81	3485,5	1,863		6,980	0,249	
8CRPF.3	78	3397,7	1,886		4,670	0,173	
8CRPF.4	82	3542,4	1,870		5,490	0,194	
NE.1	77	3482,3	1,958	1,898	1,997	0,075	0,072
NE.2	78	3275,2	1,818		1,964	0,073	
NE.3	77	3309,2	1,860		1,805	0,068	
NE.4	75	3392,1	1,958		1,844	0,071	

*Valor considerado como outlier

I.1 – Resultado dos ensaios de resistência à tração por flexão – Parte 1/2

Mistura	h (mm)	Massa (g)	ρ (kg/m ³)	ρ - med (kg/m ³)	F (kN)	$\sigma_{ctm,r}$ (MPa)	$\sigma_{ctm,r}$ - med(MPa)
8CN.1	79	3695,0	2,025	2,007	2,920	1,203	1,158
8CN.2	75	3385,3	1,954		2,460	1,125	
8CN.3	78	3581,4	1,988		2,660	1,124	
8CN.4	77	3690,5	2,075		2,900	1,258	
8CN.5	79	3634,4	1,992		2,870	1,183	
8CN.6	79	3666,3	2,009		2,560	1,055	
8CNWC.1	74	3621,5	2,119	2,134	3,389	1,591	1,529
8CNWC.2	77	3821,4	2,148		3,523	1,528	
8CNWC.3	75	3747,4	2,163		3,812	1,743	
8CNWC.4	75	3700,2	2,136		3,307	1,512	
8CNWC.5	75	3674,7	2,121		3,173	1,451	
8CNWC.6	77	3769,1	2,119		3,107	1,348	
5CN.1	75	3405,8	1,966	1,987	1,888	0,863	0,878
5CN.2	74	3335,3	1,951		2,069	0,972	
5CN.3	78	3706,2	2,057		2,399	1,014	
5CN.4	74	3294,2	1,927		1,690	0,794	
5CN.5	75	3523,8	2,034		1,916	0,876	
5CN.6	77	3534,1	1,987		1,724	0,748	
8CRP20W.1	79	3292,3	1,804	1,842	1,184	0,488	0,459
8CRP20W.2	80	3254,0	1,761		1,009	0,405	
8CRP20W.3	75	3272,8	1,889		0,928	0,424	
8CRP20W.4	77	3347,8	1,882		1,048	0,455	
8CRP20W.5	75	3233,9	1,867		1,108	0,507	
8CRP20W.6	80	3414,0	1,847		1,183	0,475	
8CRP.1	79	3394,7	1,860	1,922	1,280	0,527	0,633
8CRP.2	77	3380,3	1,900		1,424	0,618	
8CRP.3	80	3488,2	1,888		1,297	0,521	
8CRP.4	78	3478,1	1,930		2,139	0,904	
8CRP.5	77	3508,4	1,972		1,456	0,631	
8CRP.6	77	3527,5	1,983		1,377	0,597	
8CRPWC.1	79	3379,9	1,852	1,872	1,434	0,591	0,617
8CRPWC.2	77	3448,1	1,939		1,700	0,737	
8CRPWC.3	81	3632,2	1,941		1,793	0,703	
8CRPWC.4	79	3487,1	1,911		1,760	0,725	
8CRPWC.5	77	3194,8	1,796		0,994	0,431	
8CRPWC.6	77	3193,7	1,796		1,186	0,514	
5CRP.1	77	3387,4	1,904	1,906	0,490	0,213	0,280
5CRP.2	78	3539,7	1,965		0,649	0,274	
5CRP.3	76	3237,4	1,844		0,568	0,253	
5CRP.4	77	3373,9	1,897		0,469	0,203	
5CRP.5	75	3348,5	1,933		0,883	0,404	
5CRP.6	76	3321,2	1,892		0,752	0,335	

J.1 – Resultado dos ensaios de resistência à tração por flexão – Parte 2/2

Mistura	h (mm)	Massa (g)	ρ (kg/m ³)	ρ - med (kg/m ³)	F (kN)	$\sigma_{ctm,r}$ (MPa)	$\sigma_{ctm,r}$ - med(MPa)
20CRP80CN.1	77	3611,8	2,031	2,034	3,300	1,431	1,255
20CRP80CN.2	79	3643,0	1,996		2,660	1,096	
20CRP80CN.3	78	3672,0	2,038		2,730	1,154	
20CRP80CN.4	77	3608,1	2,029		3,180	1,379	
20CRP80CN.5	78	3745,4	2,079		2,870	1,213	
50CRP50CN.1	79	3629,6	1,989	2,003	2,550	1,051	0,962
50CRP50CN.2	78	3689,6	2,048		2,110	0,892	
50CRP50CN.3	81	3826,1	2,045		2,690	1,054	
50CRP50CN.4	77	3497,2	1,966		1,950	0,846	
50CRP50CN.5	80	3634,7	1,967		2,410	0,968	
NE.1	72	3247,8	1,953	1,944	0,596	0,296	0,292
NE.2	72	3267,2	1,964		0,668	0,331	
NE.3	72	3157,0	1,898		0,533	0,264	
NE.4	74	3446,9	2,016		0,731	0,343	
NE.5	73	3011,4	1,786		0,226	0,109	
NE.6	73	3446,1	2,044		0,852	0,411	

*Valor considerado como outlier

J.2– Ficha Técnica CEM II/B-L 32,5N (Retirado de www.secil.pt)

Parâmetros		CEM II/B-L 32,5 N
Composição		65% - 79% Clínquer Portland
		21% - 35% Calcário
		0%-5% Outros Constituintes
Teor de Sulfatos		≤ 3,5%
Teor de Cloretos		≤ 0,1%
Resistência à Compressão	7 dias	≥ 16 MPa
	28 dias	≥ 32,5 MPa e ≤ 52,5 MPa
Tempo de Presa	Início	≥ 75 min
Expansibilidade		≤ 10 mm

J.3– Curvas de compactação – Terras

