



Comportamento a elevadas temperaturas de blocos de terra estabilizados com cimento reciclado

Tiago Caracol Dinis

Dissertação para obtenção do Grau Mestre em

Engenharia Civil

Orientadores:

Professor Doutor José Alexandre de Brito Aleixo Bogas

Doutora Sofia Alexandra de Carvalho Ferreira Real

Júri:

Presidente: Professor Doutor Nuno Gonçalo Cordeiro Marques de Almeida

Orientador: Professor Doutor José Alexandre de Brito Aleixo Bogas

Vogal: Professor Doutor Pedro Miguel Soares Raposeiro da Silva

Novembro 2025

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.

Comportamento a elevadas temperaturas de blocos de terra estabilizados com cimento reciclado

Tiago Caracol Dinis

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 4 – Thermal performance of CSEB

Projeto PTDC/ECI-CON/0704/2021



Resumo

Os blocos de terra comprimida (BTC) representam uma evolução tecnológica da técnica ancestral do adobe, melhorando o desempenho destes através da sua estabilização mecânica por prensagem a elevada pressão. Ainda assim, a estabilização química é essencial no sentido de dotar os BTC de durabilidade suficiente à ação da água. Porém, os estabilizantes tradicionais, como o cimento e a cal, apresentam elevada pegada carbónica, sendo necessário soluções mais sustentáveis.

Este estudo explora a utilização do cimento reciclado (CR) na estabilização de BTC, com o objetivo específico de analisar o seu comportamento a elevadas temperaturas, dando seguimento a estudos anteriores focados apenas na caracterização mecânica e de durabilidade à ação da água. Os BTC com CR são caracterizados antes e após submetidos a exposição térmica, e o seu comportamento é avaliado em relação a BTC padrão estabilizados com cimento Portland (CP) ou não estabilizados. Para tal, os BTC são submetidos a vários patamares de temperatura (200 °C, 400 °C, 600 °C, 800 °C e 1000 °C), e ensaiados quanto à massa volúmica, termogravimetria, porosidade aberta, absorção de água, resistência à compressão, módulo de elasticidade, velocidade de ultrassons, resistência à abrasão e dureza superficial. Foi ainda considerada substituição de 25% do volume de terra por resíduos de construção e demolição (RCD) de modo a aumentar a sustentabilidade dos BTC.

Em geral, os BTC estabilizados com CR foram capazes de apresentar um desempenho semelhante ao dos blocos de referência com CP. No entanto, resultante da maior exigência de água, os BTC com CR foram produzidos com maior porosidade e menor resistência mecânica do que os BTC com CP. Ainda assim, o CR foi capaz de triplicar a resistência à compressão seca face aos BTC não estabilizados, e torna-los resistentes à água. Até 600 °C os BTC com CP e CRP apresentaram desempenho idêntico, não sofreram reduções significativas de coesão e capacidade resistente até 400°C. A 600 °C identificou-se o aparecimento de fendilhação superficial, que se agravou para 800 °C. Ainda assim, até esta temperatura qualquer dos tipos de BTC estabilizados apresentou adequada resistência à água e desempenho muito superior ao dos BTC não estabilizados. Nos BTC não estabilizados, a resistência à compressão aumentou de forma contínua até 800 °C, ocorrendo uma reestruturação e consolidação da matriz de terra. Para temperaturas superiores a 800 °C, os BTC sofreram forte degradação, não resistindo à ação térmica, independentemente da composição. A partir de 600 °C, os BTC com CR desenvolveram maior fissuração e perda de coesão superficial do que os restantes BTC, conduzindo a um maior aumento de porosidade aberta e absorção e maior diminuição de resistência mecânica e UPV.

Palavras-Chave:

Blocos de Terra Comprimida; Cimento Reciclado; Sustentabilidade; Caracterização a Elevadas Temperaturas

Abstract

Compressed earth blocks (CEB) are a technological evolution of the ancient adobe technique, improving their performance through mechanical stabilisation by high-pressure pressing. However, chemical stabilisation is essential to give CEBs sufficient durability against the action of water. However, traditional stabilisers, such as cement and lime, have a high carbon footprint, requiring more sustainable solutions.

This research investigates the application of recycled cement (RC) in the stabilisation of BTC, with the specific aim of analysing its behaviour at high temperatures, following on from previous studies focused only on mechanical characterisation and durability against water action. BTC with RC are characterised before and after thermal exposure, and their behaviour is evaluated against reference BTC that are unstabilised or stabilised with Portland cement (PC). To this end, the BTCs are subjected to different temperature levels (200 °C, 400 °C, 600 °C, 800 °C and 1000 °C) and tested in terms of density, thermogravimetry, open porosity, water absorption, compressive strength, modulus of elasticity, ultrasonic velocity, abrasion resistance and surface hardness. The replacement of 25% of the soil volume with construction and demolition waste (CDW) was also considered in order to increase the sustainability of the BTCs.

In general, CR-stabilised BTCs were able to perform similarly to CP reference blocks. However, due to higher water requirements, CR-stabilised BTCs were produced with higher porosity and lower mechanical strength than CP-stabilised BTCs. Nevertheless, CR was able to triple the dry compressive strength compared to unstabilised BTCs and make them water resistant. Up to 600 °C, BTCs with CP and CRP showed identical performance, with no significant reductions in cohesion and resistance capacity up to 400 °C. At 600 °C, surface cracking was observed, which worsened at 800 °C. Even so, up to this temperature, all types of stabilised BTC showed adequate water resistance and much better performance than unstabilised BTC. In unstabilised BTC, compressive strength increased continuously up to 800 °C, with restructuring and consolidation of the soil matrix. At temperatures above 800 °C, the CBMs suffered severe degradation and did not withstand the thermal action, regardless of their composition. From 600 °C onwards, the CBMs with RC developed greater cracking and loss of surface cohesion than the other CBMs, leading to a greater increase in open porosity and absorption and a greater decrease in mechanical strength and UPV.

Keywords:

Compressed Earth Blocks; Recycled Cement; Sustainability; Characterisation at High Temperatures

Índice

1. Introdução.....	1
1.1. Considerações gerais.....	1
1.2. Objetivos e metodologia.....	2
1.3. Estrutura da dissertação.....	3
2. Estado da Arte.....	5
2.1. Introdução.....	5
2.2. Composição dos BTC.....	6
2.3. Cimento Reciclado	9
2.4. Resistência ao fogo dos materiais	13
2.5. Comportamento a elevada temperatura da construção em terra	14
3. Campanha Experimental.....	19
3.1 Resumo da campanha experimental.....	19
3.2. Caracterização do solo e do resíduo argiloso.....	20
3.3. Caracterização do resíduo de construção e demolição	24
3.4. Estabilizantes	25
3.4.1 Cimento Portland.....	25
3.4.2 Cimento Reciclado	25
3.5. Produção dos BTC	31
3.5.1 Composição dos BTC	31
3.5.2 Preparação dos materiais	32
3.5.3. Mistura, prensagem e cura dos BTC	33
3.6. Exposição térmica	34
3.6.1 Definição da exposição térmica	34
3.6.2. Escolha e preparação dos termopares	35
3.6.3. Disposição dos BTC e posição dos termopares	36
3.7. Caracterização dos BTC	37

3.7.1. Massa volúmica e porosidade aberta	38
3.7.2. Resistência à compressão	38
3.7.3. Absorção por imersão	39
3.7.4. Absorção de água por capilaridade	39
3.7.5. Módulo de elasticidade	40
3.7.6. Velocidade de propagação de ultrassons	41
3.7.7. Esclerómetro pendular	42
3.7.8. Abrasão superficial	42
4. Apresentação e análise de resultados	43
4.1. Caracterização dos BTC	43
4.1.1 Estado fresco após prensagem	43
4.1.2 Estado endurecido	44
4.2. Exposição a altas temperaturas	46
4.2.1 Análise visual	48
4.2.2 Análise termogravimétrica	53
4.2.3 Massa volúmica e porosidade aberta	55
4.2.4 Absorção de água por imersão	57
4.2.5 Absorção de água por capilaridade	59
4.2.6 Resistência à compressão	62
4.2.7 Eficiência Estrutural	66
4.2.8 Módulo de elasticidade	66
4.2.9 Velocidade de propagação de ultrassons	69
4.2.10. Dureza superficial e resistência à abrasão	72
5. Conclusões	75
5.1 Considerações finais	75
5.2 Propostas de trabalho futuras	77

Índice de figuras

Figura 1 – a) Muralha da China em taipa (Gao, 2008); b) Templo de Ramsés II em adobe (Delso, 2022); c) cidade de Xibam em adobe (Gao, 2013).	5
Figura 2 – a) Distribuição da construção em taipa no território português; b) Distribuição da construção em adobe no território português; c) Distribuição da construção em tabique no território português. ...	6
Figura 3 – Fuso granulométrico para produção de BTC. Adaptado de XP P13-901 (2001).	7
Figura 4 – Diagrama de plasticidade para a produção de BTC. Adaptado de XP P13-901 (2001).	7
Figura 5 – Esquema de ciclo de vida do Cimento Reciclado e Cimento Portland (Bandeira, 2020).	11
Figura 6 – Curvas de incêndio (Oliveira et al., 2021).	14
Figura 7 – Fenómenos associados à ação térmica (Adaptado de Beckett et al., 2019).	15
Figura 8 – Esquema relativo à água capilar e água quimicamente ligada. Adaptado de Khoury et al. (2002).	16
Figura 9 – Disposição dos termopares no painel (Buson et al., 2012b).	18
Figura 10 – a) Terra FA; b) Resíduo argiloso TV.	20
Figura 11 – Curva granulométrica do solo FA, resíduo TV, RCD adaptado de (Rodrigues, 2024) e fuso granulométrico proposto pela norma XP P-13-901 (2001).	21
Figura 12 – Difractogramas do solo FA e resíduo TV. Adaptado de: Rodrigues, (2024)	22
Figura 13 – Curvas termogravimétricas e as suas derivadas do solo FA e resíduo TV.	23
Figura 14 – Resíduo de construção e demolição.	24
Figura 15 – a) Cubo de pasta de cimento; b) britadeira de mandíbulas; c) agregado grosseiro derivado da pasta.	26
Figura 16 – a) Britadeira de mandíbulas de dimensão média; b) agregado de dimensão média; c) britadeira de cilindros; d) agregado fino resultante da britagem.	26
Figura 17 – a) Moinho de bolas; b) esferas metálicas; c) aditivo desfloculante; d) partículas de diâmetro inferior a 150 μm	27
Figura 18 – a) Forno horizontal b) gráfico correspondente à programação utilizada para termoativação.	27
Figura 19 – Curvas granulométricas do CP e do CRP.	28
Figura 20 – a) Provetes desmoldados; b) prensa Form + Test Seidner 505/200/10 DM.	29
Figura 21 – Curvas Termogravimétricas e as suas derivadas para: a) CP anidro e respetiva pasta aos 28 dias; b) CR e respetiva pasta aos 28 dias.	30

Figura 22 – Termobalança de alta precisão Kern DBL.	32
Figura 23 – Curvas granulométricas das 3 composições consideradas bem como o fuso aconselhado pelo documento XP P13-901 (2001).	32
Figura 24 – a) Solo FA distribuído numa lona plástica; b) pulverizador de pás mecânico; c) crivo rotativo.	33
Figura 25 – a) Misturadora de eixo vertical; b) prensa hidráulica semiautomática OSKAM V/F e BTC não estabilizados recém prensados; c) BTC estabilizados embalados para o transporte.	34
Figura 26 – a) Lã cerâmica; b) grelha metálica.	35
Figura 27 – a) Termopar tipo K; b) perfuração do bloco; c) termopares fixos no interior do BTC.	35
Figura 28 – Disposição dos termopares no forno e respetiva legenda.	36
Figura 29 – a) Fragmentos de silicato de cálcio; b) chapéus de lã cerâmica; c) datalogger SPIDER 8; d) software Catman.	37
Figura 30 – a) Prensa com BTC e tábuas de contraplacado na parte superior e inferior do bloco; b) rotura do BTC à compressão.	39
Figura 31 – a) Face inferior dos BTC submersa bem como faces laterais isoladas; b) tiras metálicas.	40
Figura 32 – Esquema do ensaio relativo ao módulo de elasticidade.	40
Figura 33 – a) Grelha; b) afastamento de 20 cm entre os pontos; c) provete na vertical e prensa Instron.	41
Figura 34 – a) Vaselina sólida num dos transdutores; b) transdutores nas faces opostas do BTC.	41
Figura 35 – a) Posição do pêndulo antes de ser libertado; b) medição lida no esclerómetro.	42
Figura 36 – Escova de aço com 3 kg acoplados.	42
Figura 37 – Resistência à compressão não confinada em condições laboratoriais em função da porosidade total, comparativamente aos resultados obtidos por Rodrigues (2024).	46
Figura 38 – Curvas de temperatura teóricas.	46
Figura 39 – Gradientes de temperatura na evolução da profundidade dos BTC no: a) Instante inicial; b) Instante final.	47
Figura 40 – Aspeto visual da superfície dos BTC com CP (CP8).	48
Figura 41 – Aspeto visual da superfície dos BTC com CRP (CRP8).	49
Figura 42 – Aspeto visual da superfície dos BTC não estabilizados (NE).	49
Figura 43 – BTC cobertos com película aderente na caixa de polipropileno.	51

Figura 44 – Interior dos BTC com CRP e CP após exposição a diferentes temperaturas.	53
Figura 45 – Imersão em água de um BTC com CP após exposição a 1000 °C – Hidratação de cal livre.	53
Figura 46 – Curvas termogravimétricas e respectivas derivadas para a composição BTC CRP8	54
Figura 47 – Evolução da massa volúmica no estado endurecido (ρ) com a temperatura e perda relativa de massa face à temperatura ambiente (T_{amb}).....	56
Figura 48 – Evolução da porosidade aberta com o aumento de temperatura e perda relativa de porosidade face à temperatura ambiente (T_{amb}).	57
Figura 49 – Evolução da absorção por imersão a longo prazo em percentagem de massa (Abs_m) com a temperatura.	58
Figura 50 – Imersão dos BTC em água até massa constante.	59
Figura 51 – Relação entre a porosidade aberta e a absorção de água por imersão em percentagem de massa (Abs_m).....	59
Figura 52 – Absorção capilar ao longo do tempo para as diferentes temperaturas para o BTC CP8..	60
Figura 53 – Absorção capilar ao longo do tempo para as diferentes temperaturas para o BTC CRP8.	60
Figura 54 – Evolução do coeficiente de absorção capilar aos 10 minutos ($C_{abs,10min}$) com a temperatura.	61
Figura 55 – Evolução da resistência à compressão não confinada seca ($f_{c,un,seca}$) com o aumento da temperatura.	62
Figura 56 – Evolução da resistência à compressão não confinada saturada ($f_{c,un,sat}$) com a temperatura.	65
Figura 57 – Evolução do coeficiente de eficiência estrutural (CEE) para os BTC CP8 e CRP8 com o aumento da temperatura.	66
Figura 58 – Gráficos força-deformação de CP8 para diferentes temperaturas.	67
Figura 59 – Gráficos tensão-deformação do BTC CRP8 para diferentes temperaturas.	68
Figura 60 – Gráficos tensão-deformação do BTC NE para diferentes temperaturas.	68
Figura 61 – Relação entre módulo de elasticidade (E) e resistência à compressão não confinada ($f_{c,un}$).	69
Figura 62 – Evolução da perda de massa com a temperatura para os provetes ensaiados imediatamente após o tratamento térmico.	70

<i>Figura 63 – Evolução da perda de massa com a temperatura para os provetes ensaiados em condições saturadas</i>	70
Figura 64 – Relação entre a perda de massa e a velocidade de propagação de ultrassons para diferentes condições de humidade: a) seco; b) saturado até massa constante.	71
Figura 65 – Relação entre a porosidade aberta e a velocidade de propagação de ultrassons (UPV). 72	
Figura 66 – Relação entre a resistência à compressão não-confinada ($f_{c,un}$) com: a) coeficiente de abrasão (C_a); b) índice esclerométrico (IE).	73
Figura 67 – Relação entre o coeficiente de abrasão (C_a) e o índice esclerométrico (IE).	74

Índice de tabelas

Tabela 1 – Caracterização do solo FA e do resíduo argiloso TV. Adaptado de Rodrigues (2024).	21
Tabela 2 – Composição química do solo FA e resíduo TV.....	23
Tabela 3 – Caracterização do resíduo de construção e demolição (RCD). Adaptado de: Rodrigues (2024)	24
Tabela 4 – Caracterização do cimento Portland (CP).....	25
Tabela 5 – Características do CRP bem como as normas associadas. Adaptado de Rodrigues (2024).	28
Tabela 6 – Perdas de massa, água quimicamente ligada (W_b), grau de hidratação (α_{TG}) e teor de portlandite (CH) dos anidros CP e CR e das respectivas pastas aos 28 dias de idade (PCP e PCR, respetivamente).....	30
Tabela 7 –Composição das misturas de BTC e número de blocos produzidos.	31
Tabela 8 – Ensaio realizados, respetivas normas e as suas condições.	37
Tabela 9 – Composição dos BTC estudados.....	43
Tabela 10 – Massa volúmica fresca (ρ_F), volume de vazios após compactação (V_v) e porosidade total (P_T).....	44
Tabela 11 – Resistência média à compressão não confinada ($f_{c,un}$) aos 7, 28 e 90 dias para diferentes condições de ensaio	44
Tabela 12 – Massa volúmica no estado endurecido (ρ) e porosidade aberta para diferentes temperaturas.	55
Tabela 13 – Coeficiente de absorção capilar aos 10 minutos ($C_{abs,10min}$) e absorção capilar no final do ensaio ($Abs_{c,72h}$) para diferentes temperaturas.....	60
Tabela 14 – Módulo de elasticidade (E) [GPa] para diferentes temperaturas.	67
Tabela 15 – Velocidade de propagação de ultrassons (UPV) para diferentes temperaturas e condições de humidade.....	70
Tabela 16 – Índice esclerométrico (IE) e coeficiente de abrasão (C_a) para diferentes temperaturas. .	72

Abreviaturas

a.C. – Antes de Cristo

a/c – Relação água cimento/ cimento reciclado

a/l – Relação água ligante

a/lef – Relação água ligante efetiva

Absm – Absorção de água em percentagem de massa

At – Absorção total de água

BTC – Bloco de terra comprimida

CP – Cimento Portland

CR – Cimento reciclado

CRP – Cimento reciclado de pasta

DSC - Calorimetria de varredura diferencial

DTG – Curva derivada da termogravimetria

FA – Força Aérea

IE – Índice esclerométrico

IP – Índice de plasticidade

IST – Instituto Superior Técnico

LC – Laboratório de Construção

LL – Limite de liquidez

LP – Limite de plasticidade

MCP – Massa de cimento Portland

MCR – Massa de cimento reciclado

MFA – Massa de solo FA

ML – Massa de ligante

MRCD – Massa de resíduos da construção e demolição

MTV – Massa de resíduo TV

NE – Não estabilizado

PA – Porosidade aberta

PCP – Pasta de cimento Portland

PCR – Pasta de cimento reciclado

PT – Porosidade total

RCC – Resíduos de carboneto de cálcio

RCD – Resíduos da construção e demolição

TG - Termogravimetria

TOA – Teor ótimo de água

TV – Torres Vedras

TWA – Absorção de água total

Vv – Teor de vazios acidentais

XRG – Fluorescência de raios X

Simbologia

% – Percentagem

ΔPa (%) – Perda relativa de porosidade aberta

C_2 – Carbono diatômico

C_3S – Tricálcico silicato

Ca – Cálcio

Ca – Coeficiente de abrasão

Cabs – Coeficiente de absorção capilar

CaO – Óxido de cálcio (cal)

C-H ou $Ca(OH)_2$ – Hidróxido de cálcio

E – Módulo de elasticidade

F_c – Força máxima suportada pelo bloco

f_c – Resistência à compressão

$f_{c,un,lab}$ – Resistência à compressão não confinada (laboratório)

$f_{c,un,sat}$ – Resistência à compressão não confinada (saturado)

$f_{c,un,seca}$ – Resistência à compressão não confinada (seco)

Ldc – Fase de descarbonatação

Ldh – Fase de desidratação

Ldx – Fase de desidroxilação

Ma – Massa abrasada

Mágua,ef – Massa de água efetiva

Mw – Massa de água total

α' H-C₂S – Belita (silicato dicálcico)

α -Fe₂O₃ – Hematite

α H – Grau de hidratação a longo prazo

α H-C₂S – Silicato dicálcico de alta temperatura

wb – Água quimicamente ligada após hidratação completa

ρ – Massa Volúmica

ρ_f – Massa volúmica fresca

ρ_w – Massa volúmica da água

Unidades

cm – Centímetro

GPa – Giga Pascal

Kg – Quilograma

kg/m³ – Quilograma por metro cúbico

m – Metro

mg - miligrama

min – Minutos

mL– Mililitro

mm – Milímetro

MPa – Mega Pascal

W - Watt

°C – Graus Celsius

μ m – Micrómetro

1. Introdução

1.1. Considerações gerais

A inovação no setor da construção tem originado implicações significativas ao nível ambiental, sendo a poluição uma das principais preocupações, decorrente da exploração descontrolada de matérias-primas e da acumulação de resíduos poluentes em aterros. Neste contexto, a sustentabilidade constitui atualmente um dos maiores desafios e compromissos da Engenharia Civil. A crescente necessidade de empregar materiais com menor pegada ecológica é uma das principais motivações deste estudo.

A terra é um dos primeiros materiais empregues na construção, destacando-se pelas suas propriedades vantajosas, ampla disponibilidade e diversidade de aplicações. Em particular, os blocos de terra comprimida (BTC) surgem como uma evolução tecnológica da técnica ancestral do adobe, melhorando o desempenho destes através da sua estabilização mecânica por prensagem a elevada pressão. Ainda assim, a estabilização química é essencial no sentido de dotar os BTC de durabilidade suficiente à ação da água, principalmente em aplicações diretamente expostas em ambiente exterior. Nesse sentido, diversas investigações têm sido conduzidas de modo a procurar alternativas aos estabilizantes tradicionais, como o cimento e a cal, associados a elevada pegada carbónica.

No âmbito do projeto EcoHydB, recentemente concluído no IST, foi desenvolvido e caracterizado um novo tipo de ligante mais sustentável e de desempenho idêntico ao do cimento Portland (CP) – o cimento reciclado (CR). Basicamente, o cimento reciclado é diretamente obtido de resíduos de pasta de cimento hidratada, tendo como objetivo recuperar a sua capacidade ligante através de tratamento térmico a baixa temperatura (Carriço et al. 2020a). Este ligante foi detalhadamente analisado em termos das suas condições ótimas de termoativação (Real et al., 2020) capacidade de hidratação (Bogas et al., 2022), microestrutura (Bogas et al., 2020), e desempenho térmico, mecânico e de durabilidade, quando incorporado em argamassas e betões (e.g., Carriço et al., 2020b, Real et al., 2021, Carriço et al., 2021b, Carriço et al., 2022). A sua viabilidade económica e ambiental é abordada em estudos dos mesmos autores (e.g., Sousa & Bogas 2021, Real et al., 2022). No seguimento deste projeto e da validação do CR, procurou-se estender os avanços alcançados ao desenvolvimento de novos produtos de base cimentícia mais sustentáveis, por incorporação deste ligante. Neste contexto, os BTC destacam-se como excelentes candidatos à utilização de CR, reduzindo o impacto ambiental sem alterar significativamente o respetivo desempenho mecânico e de durabilidade (Bogas et al., 2023, Cruz & Bogas, 2024). Este assunto tem sido explorado no domínio da investigação Eco+RCEB – “Eco-efficient recycled cement compressed earth blocks”, ref. PTDC/ECI-CON/0704/2021, que tem exatamente por objetivo desenvolver uma nova geração de BTC estabilizados com CR, e no qual se enquadra o presente trabalho.

Contudo, este campo de investigação é muito recente, existindo ainda várias lacunas no conhecimento e no entendimento do comportamento dos BTC, como é o caso do seu desempenho a longo prazo em ambiente real ou quando exposto a elevadas temperaturas. Por outro lado, os próprios

BTC ainda enfrentam vários desafios no setor da construção. A sua suscetibilidade à água e as limitações no desempenho estrutural são fatores que dificultam a sua aceitação. Além disso, a elevada variabilidade das características dos solos, aliada à inexistência de normas técnicas específicas e à ausência de padronização nos métodos de produção, gera incertezas adicionais relativamente à durabilidade, resistência mecânica e comportamento térmico dos BTC. Deste modo, justifica-se o desenvolvimento de investigação adicional nesta área.

1.2. Objetivos e metodologia

Esta dissertação tem como propósito central a análise do comportamento a elevadas temperaturas de BTC produzidos com cimento reciclado, e a avaliação do seu comportamento relativo aos BTC padrão sem estabilizante ou estabilizados com cimento Portland (CP). Para tal, BTC das composições referidas foram submetidos a diferentes patamares de temperatura, nomeadamente 200 °C, 400 °C, 600 °C, 800 °C e 1000 °C, e posteriormente ensaiados relativamente à massa volúmica, termogravimetria, porosidade aberta, absorção por imersão e capilar, resistência à compressão, velocidade de ultrassons, módulo de elasticidade, resistência à abrasão e dureza superficial.

Inicialmente, produziu-se o CR a partir de resíduos de pasta cimentícia antigos, termoativados a 650 °C. Seguidamente, procedeu-se à produção de BTC com 8% de incorporação de CR, tendo em consideração a formulação e a técnica de execução otimizada em estudos anteriores. Paralelamente, foram produzidos BTC de referência com incorporação de igual teor de CP (8%) e a mesma relação água/ligante, e ainda BTC não estabilizados (NE). De modo a aumentar o carácter sustentável dos BTC produzidos neste estudo, incorporaram-se ainda resíduos de construção e demolição (RCD) em substituição de 25% do volume de terra.

Após cerca de 90 dias, pelo menos 2 blocos de cada composição foram submetidos aos patamares de temperatura referidos durante 1 hora, utilizando um forno elétrico existente no laboratório de Construção (LC) do Instituto Superior Técnico (IST). Finalmente, os blocos foram caracterizados tendo em consideração os vários ensaios referidos. Para alguns dos ensaios, os blocos foram caracterizados em condições secas e saturadas, devido à elevada influência da humidade no comportamento dos BTC. Os resultados foram comparados com os conseguidos nos BTC previamente à exposição térmica, de modo a quantificar o impacto desta ação no seu desempenho.

Com a realização desta investigação, espera-se contribuir para a compreensão do comportamento a elevadas temperaturas de BTC produzidos com CR, promovendo a sua validação e maior aceitação no setor da construção. Com a utilização de CR como estabilizante dos BTC espera-se igualmente promover a formulação de iniciativas sustentáveis, tanto economicamente como ambientalmente.

Como referido, importa salientar que este estudo foi efetuado no domínio do plano de investigação Eco+RCEB, com o auxílio relevante de um investigador de doutoramento, quer na fase de produção quer nas etapas de realização da campanha experimental e interpretação de resultados.

1.3. Estrutura da dissertação

A dissertação divide-se em cinco capítulos, concebidos para proporcionar uma compreensão clara e sistemática do trabalho desenvolvido. O Capítulo 1 estabelece o enquadramento global do tema de investigação, delinea os objetivos específicos do estudo e expõe a motivação subjacente à sua realização. O Capítulo 2 é dedicado à Revisão do Estado da Arte, este capítulo compila e analisa os principais contributos científicos relevantes para o tema em estudo, fornecendo a base teórica e contextual para a investigação. No Capítulo 3, procede-se à descrição pormenorizada da Campanha Experimental, que inclui a identificação dos materiais, a explicação das metodologias e procedimentos adotados e a referência às normas técnicas e regulamentares consideradas na execução do trabalho. O Capítulo 4 contempla a Apresentação, Análise e Discussão dos Resultados, onde os dados obtidos experimentalmente são expostos, analisados criticamente e interpretados, evidenciando as principais conclusões da investigação. Por fim, o Capítulo 5 é reservado às Conclusões Finais, em que são sintetizados os resultados mais relevantes da dissertação e são formuladas sugestões para futuras linhas de investigação.

2. Estado da Arte

2.1. Introdução

A terra é um dos primeiros materiais construtivos de que há registo. Este material com existência em abundância na natureza, se trabalhado convenientemente, possui características favoráveis à construção. Acredita-se que os primeiros indícios da sua utilização datam de 8000 a 6000 a.C. (Minke, 2006). Atualmente, as construções em terra encontram-se maioritariamente em países em desenvolvimento, com mais expressão nos continentes: africano, asiático e americano, sobretudo na América do Sul e Central (Silva, 2015). Existem construções, como é o caso de troços em taipa da Muralha da China (Figura 1a), que após mais de 2000 anos do início da sua construção mantêm a sua integridade. Outro exemplo de longevidade é o Templo de Ramsés II (Figura 1b) em Gourná, construído em adobe, e que conta atualmente com mais de 3200 anos de existência. É igualmente relevante mencionar a cidade de Xibam (Figura 1c), no Iémen, classificada como património mundial pela UNESCO em 1982. Esta cidade, construída no século XVI, destaca-se pela construção em altura, que remete a cidades de países desenvolvidos construídas em betão armado. Os edifícios com até 11 andares foram exclusivamente construídos em adobe (Rodrigues, 2024).

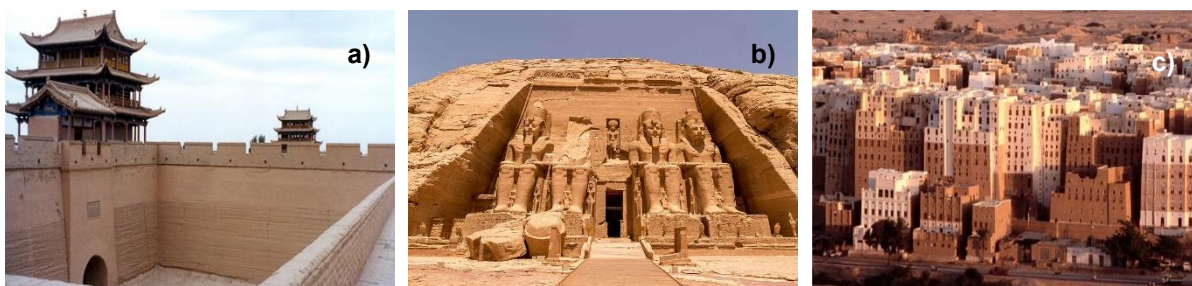


Figura 1 – a) Muralha da China em taipa (Gao, 2008); b) Templo de Ramsés II em adobe (Delso, 2022); c) cidade de Xibam em adobe (Gao, 2013).

Em Portugal, a empregabilidade do solo na construção apresenta três contextos principais: a técnica da taipa, a construção em adobe e o tabique (Silva et al., 2013). A taipa é a tipologia mais frequente, principalmente da zona a sul do Tejo até ao Algarve (Figura 2a). Esta prática baseia-se no levantamento de paredes em terra compactada com o auxílio de um pilão, confinadas com recurso a cofragem. A aplicação desta técnica deve-se principalmente à escassez e, consequentemente, ao preço elevado dos materiais utilizados nas restantes regiões, bem como à influência islâmica dos séculos VII a XIII com a construção de edifícios para fins militares utilizando o mesmo procedimento (Silva, 2015). Por sua vez, o adobe consiste em blocos de terra moldada com adição de fibras vegetais, maioritariamente palha, para conferir melhor coesão e permitir melhor controlo da fissuração por retração. Este tipo de construção pode ser observado predominantemente na zona da Beira Litoral e do Ribatejo (Figura 2b). Por sua vez, o tabique é uma técnica utilizada, principalmente, para a elaboração de paredes interiores, sendo mais comum no Norte de Portugal, nomeadamente, Trás-os-Montes e Alto Douro (Figura 2c). O processo construtivo tem por base uma estrutura, geralmente em madeira, em que os seus vazios são preenchidos com terra.

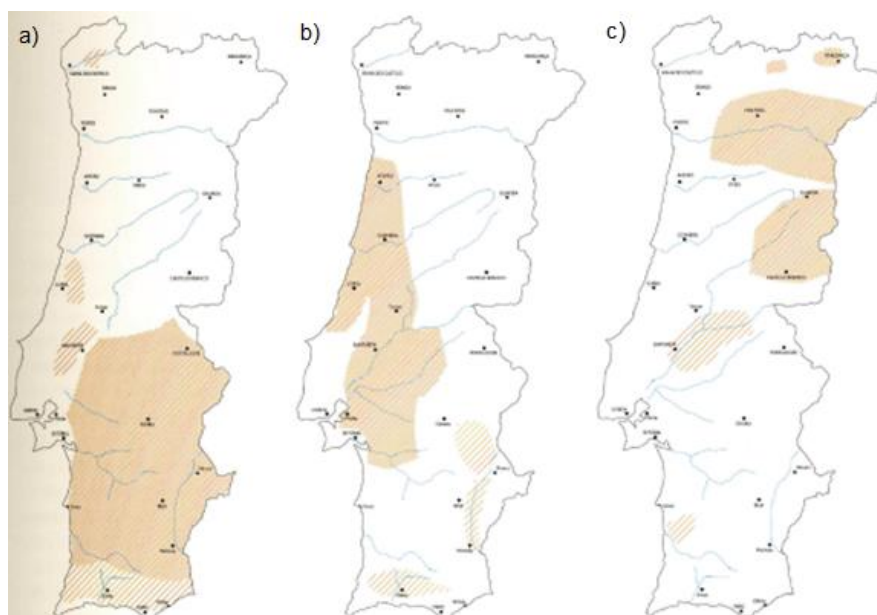


Figura 2 – a) Distribuição da construção em taipa no território português; b) Distribuição da construção em adobe no território português; c) Distribuição da construção em tabique no território português.

Os BTC surgem como alternativa às técnicas tradicionais de construção em terra anteriormente descritas, tratando-se de uma evolução da técnica do adobe em que, para além do solo ser colocado num molde, é compactado com recurso a uma prensa, o que promove uma melhoria do desempenho mecânico e da durabilidade. Por conseguinte, é uma técnica com elevado potencial, visto que minimiza os problemas de baixa coesão e capacidade mecânica da construção em terra, mantendo as vantagens inerentes de energia incorporada reduzida, ampla disponibilidade de matéria-prima, custo reduzido, conforto higrotérmico e de resistência ao fogo (Hall & Swaney, 2012; Van Damme & Houben, 2018). Visando a busca de soluções mais sustentáveis, o sector da construção tem também fomentado a reincorporação de resíduos de construção e demolição (RCD) nos materiais de construção, o que está de acordo com as novas metas da comunidade europeia, exigindo que 70% dos RCD sejam reutilizados (União Europeia, 2008). Esta substituição promove uma economia circular impedindo que esta tipologia de resíduo seja destinada a aterro.

No entanto, um dos maiores desafios desta técnica de construção, bem como das técnicas descritas anteriormente, reside na elevada suscetibilidade à água. Desse modo, é comum proceder-se à estabilização da terra, conforme será abordado em 2.2.

2.2. Composição dos BTC

A percentagem de terra face à massa dos BTC está geralmente compreendida entre 80 e 90% (Rodrigues, 2024), o que torna a sua granulometria, teor ótimo de água, limites de consistência, teor de matéria orgânica e tipo e teor de argila parâmetros fundamentais.

Em relação à granulometria, deve-se assegurar que a granulometria do solo seja o mais ampla possível de modo a garantir o arranjo entre partículas grossas e finas, com as partículas menores

preenchendo os vazios entre as partículas de dimensão superior, reduzindo-se o volume de vazios e atingindo-se maiores níveis de compactidade. A *Association Française de Normalization* (XP P13-901, 2001) recomenda que para a produção de BTC, a curva granulométrica da terra esteja dentro do fuso granulométrico apresentado na Figura 3. No que se refere à fração argilosa, Uzoegbo (2019) indica que o teor de argila e de silte no solo deve ser, no mínimo, de 10% para garantir a trabalhabilidade adequada da mistura. Além disso, é recomendável que não exceda os 30% (Houben & Guillaud, 1994) de modo a assegurar a sua estabilização eficaz com cimento. Relativamente ao tipo de argilas, é aconselhável que o solo não apresente argilas expansivas do grupo da *smectite*, como é o caso da *montmorillonite*. Esse tipo de argila é menos estável durante os ciclos de molhagem e secagem, o que reduz a durabilidade dos BTC (Ouedraogo et al., 2020).

Os limites de consistência constituem um dos parâmetros fundamentais que permitem a avaliação do comportamento do solo em presença de água, traduzindo o grau de plasticidade do solo. Os limites de consistência, na prática, representam os teores de água que regulam o comportamento dos solos relativamente à consistência, sendo válidos apenas para materiais plásticos, propriedade atribuída às partículas de argila (Azevedo, 2021). A *Association Française de Normalization* (XP P13-901, 2001) recomenda para os BTC que os limites de consistência do solo estejam enquadrados no fuso representado na Figura 4.

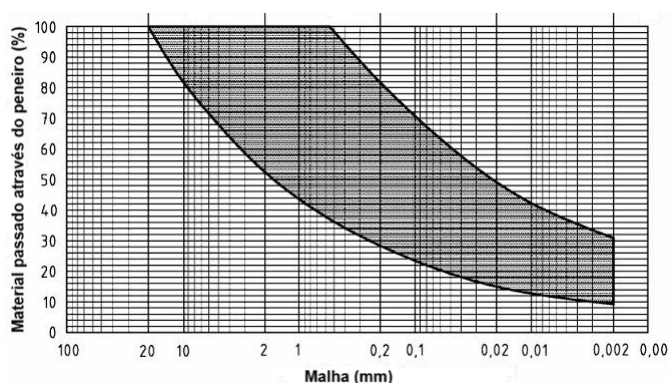


Figura 3 – Fuso granulométrico para produção de BTC. Adaptado de XP P13-901 (2001).

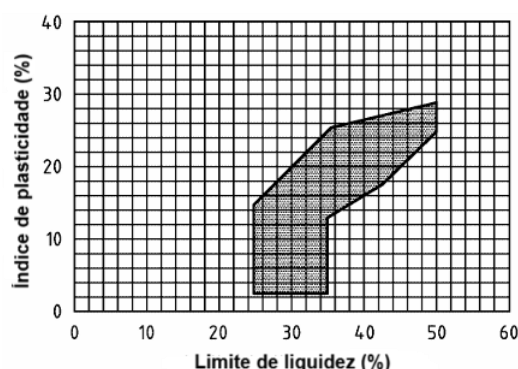


Figura 4 – Diagrama de plasticidade para a produção de BTC. Adaptado de XP P13-901 (2001).

Relativamente à quantidade de água empregue na produção dos BTC, é comum considerar-se o teor ótimo de água (TOA). O parâmetro mencionado define-se como o teor de humidade responsável por conduzir à máxima compactidade do solo e, consequentemente, máxima massa volúmica (Gonçalves, 2023). Rigassi (1985) sugere um TOA entre 9 e 17%, enquanto Riza et al. (2010), utilizando métodos mais modernos, indicam um TOA de 10 a 13%. Importa ainda destacar que altos teores de matéria orgânica no solo são indesejáveis, pois esta decompõe-se, ao longo do tempo e sob altas temperaturas, deixando vazios adicionais nos BTC.

Quanto ao teor de ligante a utilizar, por norma, situa-se entre 4 e 10% (Rodrigues, 2024), em que acima de 10% é economicamente inviável e, abaixo dos 4% não existe melhoria relevante das propriedades dos BTC face aos não estabilizados (Azevedo, 2021).

Estabilização

A estabilização tem por objetivo reduzir a suscetibilidade da terra a variações dimensionais e a perda de coesão, essencialmente por alteração do seu teor de humidade, melhorando as suas propriedades físicas e/ou mecânicas, para uma dada aplicação (Hall et al., 2012). A estabilização pode ser realizada através de uma ou mais das seguintes formas: mecânica, física, química.

Estabilização Mecânica

No caso dos BTC, a estabilização mecânica é intrínseca à produção dos mesmos. Neste tipo de estabilização, o solo é compactado, o que promove a diminuição dos vazios entre partículas e, consequentemente, uma diminuição da porosidade e da permeabilidade do material. Assim, a durabilidade e a resistência mecânica dos BTC são melhoradas. No entanto, devido à maior proximidade entre partículas, a capacidade de isolamento térmico torna-se menor (Mansour et al., 2016).

Estabilização Física

A estabilização física baseia-se na adição de materiais ao solo e/ou na alteração da distribuição granulométrica. Por norma, este tipo de estabilização está relacionado com a adição de fibras ou com a alteração da distribuição granulométrica através da adição de um determinado tipo de agregado. A adição de fibras é utilizada desde o começo da utilização de terra na construção, nomeadamente na técnica do adobe, em que se recorria a fibras de origem vegetal ou animal. As fibras conferem maior coesão entre as partículas e, por conseguinte, maior resistência mecânica. Para além disto, diminuem a retração durante a secagem, através da redistribuição de tensões por todo o bloco, evitando a formação de fendas que fragilizam os blocos. Embora pouco comum, até porque vai contra a natureza ecológica da construção em terra, podem também ser utilizadas fibras de aço que aumentam a resistência mecânica do bloco à flexão por tração (Osula, 1996), mas podem conduzir a problemas de durabilidade se estas não forem protegidas. Outro estudo realizado por Buson et al. (2012a) aponta fibras de papel *kraft* proveniente de sacos de cimento como sendo eficazes em melhorar as propriedades dos BTC. Um estudo realizado por Turco et al. (2021) concluiu que diversos tipos de fibras vegetais, animais e sintéticas melhoraram a durabilidade e resistência mecânica dos BTC, mas pioraram a ductilidade e o isolamento acústico e térmico.

A adição de um agregado tem como objetivo a alteração da distribuição granulométrica, diminuindo a porosidade do material e, consequentemente, melhorando a durabilidade a agentes externos. A adição de agregados, geralmente finos, que preenchem os vazios intersticiais (efeito de *filler*) melhora a compacidade da mistura. Yassin (2023) verificou que a adição de resíduo de tijolo cerâmico proporcionou uma maior densidade ao BTC, assim como um incremento da resistência à compressão em composições com até 20% dessa adição. Conforme referido anteriormente, existe também a possibilidade de utilizar RCD que, para além da sustentabilidade associada à sua utilização, pode reduzir ligeiramente a condutibilidade térmica dos BTC devido à presença de agregados porosos na sua composição, sem que se afete de forma significativa a capacidade mecânica (Real et al., 2024a).

Estabilização Química

A estabilização química consiste na adição de novos constituintes, visando melhorar as propriedades físicas e químicas inerentes ao solo através de reações químicas que formam novos compostos, e que, consequentemente, aumentam a coesão entre partículas. Este é o tipo de estabilização mais eficiente, contribuindo de forma predominante para a estabilização dimensional e para o aumento de resistência e durabilidade dos BTC. De entre os ligantes mais comuns, destaca-se o cimento pela sua elevada capacidade de ligação. O cimento permite a floculação e separação de partículas de argila, estabelecendo depois a ligação entre estas por cimentação, que aumenta a sua capacidade mecânica e reduz a sua variação dimensional (Prusinski & Bhattacharja, 1999). Na produção de BTC, são referidas dosagens de cimento típicas de 5 a 10% da massa de terra (Reddy, 2012).

A hidratação do cimento envolve a sua reação com água, resultando na formação de um gel insolúvel constituído por aluminatos de cálcio hidratados e silicatos. O gel insolúvel interage principalmente com as partículas de maior dimensão do solo (seixo e areia), promovendo a sua ligação e impulsionando o aumento da resistência. Para além deste ganho de resistência, é referida a possibilidade de reação adicional entre o hidróxido de cálcio libertado na hidratação do cimento e a fração fina do solo (argila), proporcionando novos produtos de hidratação (Adam, 2001; Exelbirt, 2011; Kerali, 2001; Rix, 1998). Porém, isso não deverá ser significativo na argila, associada a reduzida quantidade de material amorfo reativo.

Apesar do cimento conferir melhorias significativas no desempenho dos BTC, a sua utilização reduz a sustentabilidade inerente à construção em terra. Um dos principais problemas é a elevada pegada de carbono do cimento. Desse modo, a comunidade científica tem estudado a estabilização de BTC com ligantes alternativos, de base natural, como é o caso de resinas naturais (Millogo et al., 2014), ou através da substituição de cimento por adições minerais, como a sílica de fumo (Abdulsalam et al., 2018), a cinza volante (Egenti et al., 2013) e a escória de alto-forno (Sekhar & Nayak, 2018). Contudo, estas soluções têm demonstrado ser pouco eficientes, para além de algumas das adições referidas provirem de indústrias poluentes, o que impede a sua produção e utilização futura. Para além disso, dependendo do tipo de ligante, foram também encontradas desvantagens a nível económico.

No IST, foi recentemente criada uma vertente de investigação focada no desenvolvimento de cimento reciclado (CR), a partir da termoativação da fração cimentícia de resíduos de pasta de cimento e de betão. Este cimento apresenta-se como uma alternativa mais eco-eficiente face ao cimento Portland (CP), conforme é abordado no próximo ponto.

2.3. Cimento Reciclado

O cimento reciclado surgiu após a verificação da capacidade reidratação do cimento em ensaios de resistência ao fogo do betão realizados na década de 70 (Carriço et al., 2020a). No entanto, apenas neste milénio foi propositadamente produzido cimento reciclado a partir de pastas artificiais

(Splittgerber & Mueller, 2003). Desde essa data e até à segunda década deste milénio, foram realizados alguns trabalhos importantes, essencialmente relacionados com a possibilidade de produção de CR e a sua incorporação em pastas cimentícias (Castellote et al., 2003; Shui et al., 2007a; Carriço et al., 2020a). Porém, apenas nos últimos 10 anos intensificou-se a pesquisa do CR, com o Departamento de Engenharia Civil do IST a assumir um papel de relevo na investigação internacional nesta área, desempenhando um papel relevante nos avanços recentes relacionados com a produção, caracterização e aplicação do CR em materiais de base cimentícia.

Na produção de CR, uma das principais dificuldades consiste na separação da fração cimentícia dos resíduos do betão, individualizando este constituinte dos agregados em que se encontra aderido. Efetivamente, em contraste com a maioria dos estudos realizados, que produzem CR a partir de resíduos de pasta artificialmente produzida em laboratório, na prática, o cimento hidratado está incorporado na mistura, juntamente com os agregados. Neste âmbito, no IST, foi concebido um método inovador de separação de betão (Bogas et al., 2021), que permite atingir frações cimentícias com pureza superior a 75 % e agregados com menos de 3 % em massa de pasta aderida (Carriço et al., 2021a). Basicamente, este método consiste em duas etapas: uma de libertação mecânica nos constituintes e outra de separação com base num processo magnético de alta intensidade. Na primeira fase, os resíduos de betão são sujeitos a britagem, moagem e peneiração até se obterem partículas de dimensão inferior a 1 mm. De seguida, as partículas resultantes são divididas em três frações granulométricas (150-250 µm, 250-500 µm e 500-1000 µm), sujeitas a separação magnética. O processo de separação das duas frações com dimensões inferiores a 500 µm, tem uma taxa de aproveitamento de cerca de 20 % e 16,5 % de partículas de cimento reciclado com purezas de aproximadamente 89 % e 73,6 %, respetivamente (Real et al., 2022).

De seguida, a fração cimentícia separada é moída até atingir uma dimensão próxima à do cimento corrente (Carriço et al., 2020b), aumentando a superfície específica do material, e, consequentemente, melhorando a sua capacidade reativa e de hidratação (Kurdowski, 2014; Marchon & Flatt, 2016). Após a separação e moagem, a fração cimentícia obtida é sujeita a termoativação (Carriço et al., 2021a).

Esta etapa envolve o aquecimento controlado, a permanência na temperatura máxima e o arrefecimento lento até à temperatura ambiente (Serpell & Lopez, 2015). A temperatura ideal de termoativação varia entre 600 e 800 °C (Real et al., 2020; Shui et al., 2007; Yu & Shui, 2013; Zhang et al., 2018) e a taxa de aquecimento ideal varia entre 5 e 15 °C (Bandeira, 2020; Real et al., 2020).

De forma geral, o CR caracteriza-se por uma elevada exigência de água, decorrente da sua natureza porosa e elevada área superficial, bem como da necessidade de hidratação do CaO livre, transformando-o em Ca(OH)_2 (Baldusco et al., 2019). Existe ainda evaporação de água, induzida pelo facto de a reação inicial ser fortemente exotérmica (Real et al., 2020).

Vários estudos têm demonstrado a elevada capacidade de reidratação do CR, com capacidade de desenvolver produtos de hidratação idênticos aos do CP (Carriço et al., 2020b, Real et al., 2020, Bogas et al., 2020). A pasta termoativada recupera a sua capacidade de hidratação, comportando-se como um ligante hidráulico, embora apresente propriedades distintas da pasta de CP.

Mineralogicamente, o CR tratado a 650 °C não contém C_3S na sua constituição, mas apresenta um polimorfo do C_2S , o α' - C_2S (Bogas et al., 2022). Consequentemente, a microestrutura das pastas com CR apresenta uma tendência diferente da microestrutura das pastas com CP, visto que se forma uma microestrutura bifásica, constituída por porosidades interpartícula e intrapartícula distintas, resultante da natureza porosa do CR (Bogas et al., 2020). Neste contexto, parte da água presente na mistura é absorvida pelas partículas porosas do CR, reduzindo a distância entre si. Como tal, as pastas com CR tendem a apresentar uma estrutura mais refinada com maior concentração de poros de menor dimensão em relação a pastas com CP. Bogas et al. (2022) analisaram o comportamento do CR durante a hidratação e constataram que, embora os compostos hidratados produzidos sejam semelhantes aos dos cimentos convencionais, a cinética de hidratação difere ligeiramente. O α' - C_2S exibe a reação de hidratação mais ativa entre 1 e 3 dias, correspondendo a um retardamento na evolução da microestrutura até 24 horas e um desenvolvimento posterior mais acelerado até os 3 dias de idade. A longo prazo, o volume de compostos hidratados tende a ser menor no CR devido à menor quantidade de produtos com capacidade de hidratação, principalmente quando ocorre carbonatação parcial do material de origem durante a sua vida útil (Bogas et al., 2020; Bogas, Real, et al., 2022).

Durante os últimos 5 anos, o comportamento de pastas e betões com CR foi detalhadamente analisado, tendo possibilitado a produção de misturas ligantes compostas por CP e 20, 50 e 100 % de CR, comparáveis a cimentos tipo I da classe 52.5, 42.5 e 32.5, respetivamente, de acordo com a EN 197-1 (2011) (Carriço et al., 2020a). Por sua vez, constatou-se que, até 40 % de substituição de CP por CR, a resistência mecânica e a durabilidade do betão face à carbonatação e ao ataque de cloretos, não foram significativamente afetadas (Real et al., 2021, Carriço et al., 2021b). Estas foram importantes conclusões no sentido de tornar viável a incorporação de CR em materiais de construção mais eco eficientes. Na Figura 5, ilustra-se a importância do CR no ciclo de vida e na economia circular do cimento, promovendo-se a reutilização e mitigando-se os impactos ambientais associados a esta indústria. Em termos de impacto ambiental, prevê-se que a incorporação de CR como substituto do CP reduz o nível de emissões de CO_2 em, aproximadamente, 60 % (Sousa et al., 2021).

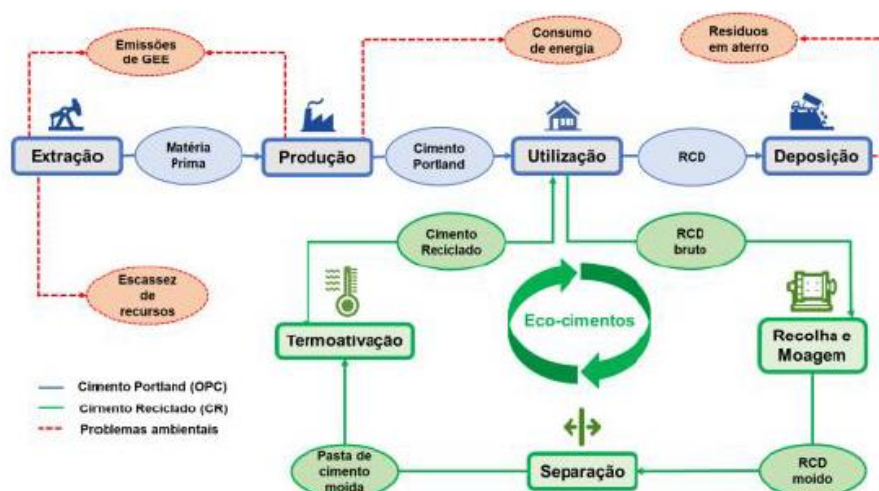


Figura 5 – Esquema de ciclo de vida do Cimento Reciclado e Cimento Portland (Bandeira, 2020).

Como referido anteriormente, a estabilização da terra com cimento contraria os princípios de sustentabilidade da construção em terra. Nesse contexto, o CR surge como alternativa com menor pegada ecológica. Porém, apesar dos resultados promissores obtidos em argamassas e betões, é importante perceber o impacto do CR nos materiais compostos por terra.

O CR foi utilizado pela primeira vez na estabilização da terra, no âmbito de um trabalho de mestrado em BTC (Azevedo, 2021). Nesse estudo, foi possível demonstrar a sua viabilidade, obtendo-se resistências mecânicas cerca de 2 vezes superiores à de BTC não estabilizados, apesar de provocar uma redução significativa do seu desempenho em comparação com os blocos estabilizados com CP. O mesmo foi confirmado em estudos posteriores envolvendo diferentes tipos de terras e diferentes teores de substituição de CP por CR (Nabais, 2023; Rodrigues, 2024; Gonçalves, 2023). Estes estudos salientam que a reduzida resistência mecânica dos BTC com CR face aos BTC com CP resulta do aumento de porosidade ocorrido após a produção e compactação dos BTC, motivado pela maior exigência de água do CR. No entanto, para igual teor de porosidade total, verificou-se que a resistência compressiva é semelhante, o que sugere idêntica capacidade de estabilização e cimentação do CR face ao CP (Bogas et al., 2023).

Destaca-se ainda o excelente comportamento observado em termos de resistência à água, verificando-se níveis de erosão desprezáveis e semelhantes aos dos BTC com CP, quer em *drip tests* quer em *spray tests*, que simulam a ação de chuva fraca e chuva intensa, respetivamente (Cruz et al., 2024). Por sua vez, a durabilidade foi bastante superior à dos BTC não estabilizados, que sofreram erosão total após poucos minutos de ensaio. O impacto da adição do CR nas propriedades higrotérmicas dos BTC foi também analisado em estudos posteriores (Real et al., 2024a; Real et al., 2024b), tendo por base a influência deste ligante no desenvolvimento da estrutura porosa dos blocos. Em geral, concluiu-se que os BTC com CR tendem a aumentar a capacidade de isolamento térmico dos blocos, devido ao aumento da sua porosidade. Mesmo em condições de idêntica porosidade, a capacidade de isolamento tende a ser ligeiramente superior nos BTC com CR devido ao maior refinamento da microestrutura. A substituição parcial de terra por RCD melhorou a capacidade de isolamento térmico dos BTC (Real et al., 2024b). Finalmente, a microestrutura tende a ser refinada após a estabilização da terra, afetando a higroscopicidade independentemente de se utilizar CP ou CR. No entanto, essa influência depende do tipo de solo, verificando-se que a capacidade higroscópica é diminuída em solos argilosos e é aumentada em solos fortemente arenosos. De qualquer forma, concluiu-se que a higroscopicidade dos BTC não é significativamente afetada pelo tipo de estabilizante, sendo a maior porosidade dos BTC com CR compensada pela sua microestrutura mais refinada (Real et al., 2024a).

O comportamento dos BTC com CR quando sujeitos a elevada temperatura nunca foi anteriormente abordado, sendo o principal objeto do presente trabalho. A ideia é perceber se a variação das características destes BTC segue uma tendência semelhante à observada nos BTC com CP, envolvendo os mesmos patamares de instabilização e de redução das suas propriedades físicas e mecânicas.

2.4. Resistência ao fogo dos materiais

Segundo a EN 1991-1-2 (2002), a resistência ao fogo pode-se definir como a capacidade de uma estrutura, de uma parte de uma estrutura, ou de um elemento, de cumprir as funções exigidas para um nível de carga específico, quando expostos ao fogo por um período de tempo determinado. Porém, esta definição é muito vaga, sendo necessário avaliar a definição proposta pela regulamentação portuguesa. Segundo a Portaria n.º 135/2020, de 2 de junho, e definindo o Regulamento Técnico de Segurança Contra Incêndio em Edifícios, a resistência ao fogo define-se como a “propriedade de um elemento de construção, ou de outros componentes de um edifício, de preservar durante um determinado período de tempo a estabilidade e/ou a estanquidade, isolamento térmico, resistência mecânica, ou outra função específica, quando sujeito a aquecimento resultante de um incêndio”. Assim, de forma sucinta, pode-se definir a resistência ao fogo como o período em que os elementos estruturais ou demais componentes são capazes de manter as suas propriedades iniciais e desempenhar as funções atribuídas.

As construções devem assegurar tanto a segurança estrutural quanto a proteção das pessoas em caso de incêndio. Isso envolve a capacidade de resistir às cargas adicionais geradas pelo fogo e pela expansão térmica, além da reação dos materiais utilizados ao fogo. Essas características são essenciais para assegurar a segurança e a integridade das estruturas em caso de incêndio (EN 1991-1-2 2002).

A avaliação dos elementos construtivos é realizada segundo critérios específicos como estanquidade, que mede a capacidade de evitar a propagação de chamas e gases quentes para o lado não exposto; isolamento térmico, que avalia a quantidade de calor que é transmitida da face exposta ao incêndio para a face oposta, e estabilidade, que corresponde à capacidade de um elemento ou sistema construtivo de preservar a sua função estrutural ou de vedação sem colapsar durante a exposição ao fogo.

Quanto ao comportamento dos materiais de construção durante incêndios, a norma (EN 13823 (2020) classifica-os relativamente à sua inflamabilidade, contribuição para o desenvolvimento do fogo, produção de fumos e emissão de gotículas ou partículas incandescentes bem como métodos de ensaio para avaliação do desempenho face ao fogo. Os materiais construtivos são classificados da classe A (produtos não combustíveis ou de combustão limitada em que não apresentam contribuição significativa em caso de incêndio) à classe F (produtos não testados ou com desempenho insuficiente). Adicionalmente, existe a classificação de produção de fumos s1 (baixa produção de fumo) a s3 (alta produção de fumo) e libertação de partículas inflamadas d0 (ausência de libertação de partículas inflamadas) a d2 (libertação de partículas inflamadas que podem causar ignição secundária). Enquadrando os BTC nesta classificação, embora dependa de parâmetros como quantidade de matéria orgânica e o facto de serem estabilizados ou não, a classe que melhor definiria o comportamento ao fogo seria a C (combustibilidade moderada, contribui para o incêndio com propagação controlada), s1 (baixa produção de fumo) e d0 (ausência de libertação de partículas inflamadas).

O cumprimento dos vários critérios é essencial para garantir a segurança de pessoas e das construções vizinhas. Desse modo, a resistência ao fogo é uma obrigação legal que varia conforme o país ou região, e depende do tamanho, uso e ocupação da construção. Assim, é importante salientar que os testes de resistência ao fogo baseiam-se na aplicação de curvas de incêndio padrão, que definem as condições de temperatura a que o elemento é exposto por um determinado intervalo de tempo. A norma EN 1991-1-2 (2002) especifica três curvas de temperatura: a curva de incêndio padrão ISO 834 (Equação 2.1), a curva de incêndio para elementos exteriores (Equação 2.2) e a curva de incêndio de hidrocarbonetos (Equação 2.3). A curva ISO 834 é a curva de incêndio padrão mais utilizada internacionalmente para testes de resistência ao fogo (Oliveira et al., 2021). A curva de incêndio para elementos exteriores é utilizada nas superfícies externas das paredes de um edifício expostas a um incêndio que se desenvolve fora de um edifício ou às chamas que passam pelas aberturas das fachadas (Oliveira et al., 2021). A curva apresenta o mesmo comportamento que a da ISO 834 até aproximadamente 650 °C. A curva de incêndio de hidrocarbonetos é aplicada para descrever situações em que a temperatura pode aumentar mais rapidamente do que na curva nominal padrão (Oliveira et al., 2021).

$$T = 20 + 345 \log_{10}(8t + 1) \quad 2.1$$

$$T = 660(1 - 0,687e^{-0,32t} - 0,313e^{-3,8t}) + 20 \quad 2.2$$

$$T = 1080(1 - 0.325e^{-0.167t} - 0.675e^{-2,5t}) + 20 \quad 2.3$$

Nas equações anteriores, T representa a temperatura (em graus Celsius) no compartimento de incêndio ao fim do tempo t (em minutos). As curvas de incêndio apresentam-se na Figura 6.

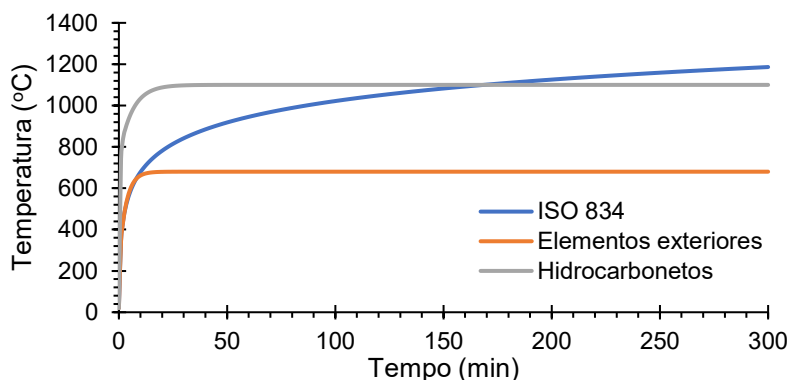


Figura 6 – Curvas de incêndio (Oliveira et al., 2021).

2.5. Comportamento a elevada temperatura da construção em terra

A terra crua é caracterizada pela sua incombustibilidade e pela não libertação de gases tóxicos em caso de incêndio, ou seja, os produtos resultantes da combustão não comprometem a saúde humana. Além disso, como já referido, a terra possui relativamente baixa condutibilidade térmica, na ordem de 1,1 W/m°C (Bogas et al., 2018). Estas características concedem à construção em Terra uma boa resistência ao fogo. No entanto, a incombustibilidade do solo necessita ser demonstrada. Segundo

o documento normativo ARS 1333 (2018), a incombustibilidade pode ser indiretamente comprovada caso o solo tenha um teor de matéria orgânica inferior a 1% ou uma massa volúmica superior a 1700 kg/m³. Para além disto, o mesmo documento normativo refere ainda que o cumprimento destes requisitos é de particular importância quando são adicionados outros agregados ou adições à mistura de solo.

Relativamente aos fenómenos que ocorrem durante o aquecimento a elevadas temperaturas de materiais construtivos compostos por terra, destaca-se o trabalho de Beckett et al. (2019) que fez um paralelismo entre tijolos refratários e taipa. Os tijolos refratários partilham várias propriedades com as diversas técnicas de construção em terra devido à utilização de material argiloso como matéria-prima. Os principais fenómenos resumem-se na Figura 7, destacando-se as seguintes fases: 1) evaporação, que consiste na perda de água livre capilar (0-150 °C) (Figura 8); 2) desidratação, que pode ser separada nas etapas de remoção de água fisicamente retida na superfície das partículas de argila por adsorção (150-350 °C), e de eliminação da água quimicamente ligada, ou água interlamelar nas partículas de argila (350-750 °C) (Figura 8); 3) desidroxilação, que consiste na perda da água estrutural da fração argilosa, ou seja, remoção dos iões OH⁻ da estrutura cristalina da argila com consequente colapso estrutural dos aluminossilicatos dos minerais argilosos (750-1110 °C). Em relação aos fenómenos químicos associados à termodinâmica destacam-se os seguintes: 1) mecanismos de sucção devido à perda da água livre; 2) consequente retração e reorganização de agregados (0-100 °C); 3) combustão de matéria carbonosa que resulta na formação de hidrocarbonetos e resíduos de carbono (150-650 °C); 4) oxidação dos carbonatos de Ca, Mg e Fe que se decompõem em óxidos, e, consequentemente, forma-se dióxido de carbono dependendo da quantidade de oxigénio disponível (300-950 °C); 5) sinterização, que consiste na fusão parcial da fração argilosa, unindo as partículas e conferindo resistência (>950 °C).

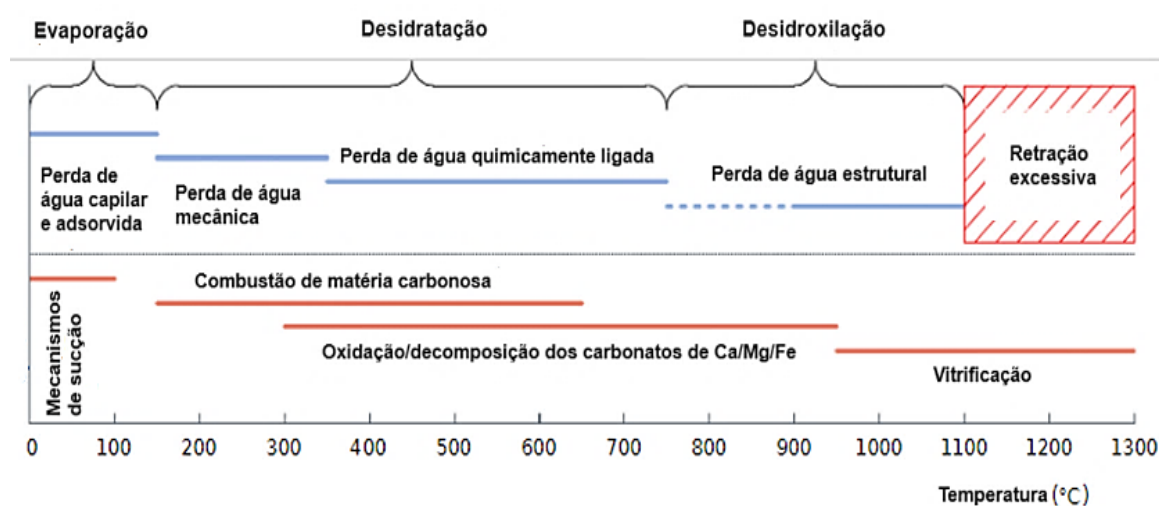


Figura 7 – Fenómenos associados à ação térmica (Adaptado de Beckett et al., 2019).

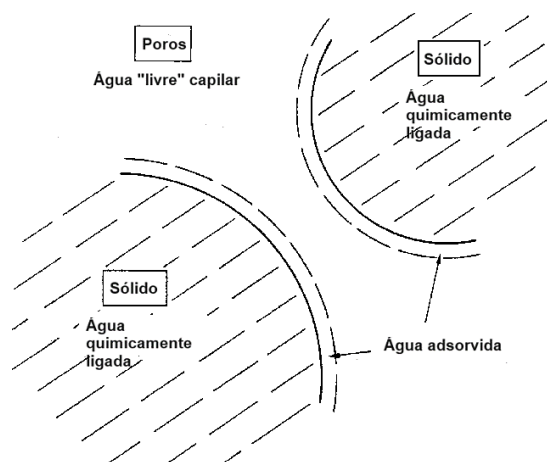


Figura 8 – Esquema relativo à água capilar e água quimicamente ligada. Adaptado de Khoury et al. (2002).

Para além da avaliação da combustibilidade e do entendimento dos fenómenos que ocorrem, é também relevante avaliar o efeito de temperaturas elevadas nas propriedades do material, que ainda se manifestam de forma pouco compreendida. Como é natural, o desempenho dos tijolos refratários cozidos é superior ao dos não cozidos. Isso deve-se principalmente à desidratação e desidroxilação dos minerais argilosos e à subsequente sinterização (Tsega et al., 2017). No entanto, Siyapze et al. (2023) e Pohowe et al. (2023) reportaram a diminuição da resistência à compressão de adobes e argamassas de terra, quando sujeitos a tratamento térmico entre 150-300 °C. Isto deveu-se à incorporação de fibras vegetais e, consequentemente, à ocorrência de pirólise. Após 300 °C e, até aos 800 °C, os autores verificaram uma melhoria no desempenho mecânico, coincidente com a desidroxilação dos minerais argilosos. Conclusões semelhantes foram reportadas por Boussadia (2021) e Siyapze (2022), mas entre os 450 °C e os 600 °C.

Em BTC estabilizados com cimento, destaca-se o trabalho realizado por Ferreira et al. (2020). Os autores avaliaram a resistência à compressão de blocos estabilizados com 10% CEM II/B-L 32,5N e com substituição parcial de solo por resíduos orgânicos, quando sujeitos a seis patamares de temperatura distintos: 20 °C, 100 °C, 200 °C, 400 °C, 600 °C e 800 °C. Os autores estabeleceram um tempo de permanência do bloco na temperatura desejada de 15 minutos. Os blocos foram ensaiados após arrefecimento até à temperatura ambiente. Constatou-se um incremento da resistência à compressão dos BTC até à temperatura de 400 °C, atingindo o dobro do observado nos blocos de referência, ensaiados a 20 °C. No entanto, para temperaturas superiores a 400 °C, registou-se uma diminuição da resistência, obtendo-se para 800 °C valores semelhantes aos verificados nos BTC de referência. Lima (2017) e Coelho (2019) obtiveram conclusões semelhantes em BTC estabilizados com até 10 % em massa de CP e de cal. Estes resultados sugerem que, em caso de incêndio ou após exposição a altas temperaturas, pode ser necessário tomar as devidas precauções e reforçar a alvenaria devido às modificações negativas na estrutura dos materiais após voltarem à temperatura ambiente. Por outro lado, Bakam et al. (2020) reportaram um aumento da resistência mecânica em BTC estabilizados com 5 % CP, quando estes foram expostos até 850 °C, permanecendo 90 minutos nessa temperatura. Os autores atribuíram esta melhoria de desempenho mecânico ao elevado índice de plasticidade do solo. Por sua vez, Nshimiyimana et al. (2022) observaram o aumento da resistência

compressiva em BTC estabilizados com 8 % CP após exposição a 600 °C. Os autores destacam a ocorrência de fissuras na superfície dos BTC durante a exposição. Noutro estudo, Nshimiyimana et al. (2024a) submeteram BTC estabilizados com 8 % CP ou com 10 % de resíduos de carboneto de cálcio (RCC) a temperaturas de 300, 600, 900 e 1200 °C por 2 horas. Os autores observaram alterações de cor com a temperatura relacionadas com a desidroxilação dos minerais argilosos e com a oxidação dos minerais ferrosos (Akinshipe & Kornelius, 2017). Nos blocos expostos a 1200°C, foram observadas fissuras relacionadas com o choque térmico. As propriedades físico-mecânicas e a durabilidade dos blocos, nomeadamente a resistência à compressão em estado seco e saturado, a absorção por imersão e por capilaridade e a abrasão foram determinadas antes e após o tratamento térmico. Os autores reportam que, para ambos os BTC, o coeficiente de absorção capilar (C_{abs}) aumentou com a temperatura a qual foram sujeitos e de forma mais drástica acima dos 600 °C, onde se atingiu a saturação ao fim das primeiras horas de ensaio. Isto sugere que, para além da perda da água capilar entre partículas, a exposição dos BTC a temperaturas elevadas promove a criação de poros adicionais ou de maiores dimensões, possivelmente relacionados com a formação de fissuras superficiais e internas. Foi observada uma tendência semelhante à da absorção capilar para a resistência à compressão em condições secas e saturadas, bem como para a absorção por imersão às 24 horas. De facto, todos os BTC sujeitos a uma temperatura de até 600 °C foram classificados como fracamente capilares ($C_{abs,10min} < 20 \text{ g/cm}^2 \cdot \text{min}^{0.5}$), segundo o documento normativo NTC 5324 (2004), e não ultrapassaram o limite recomendado pelo documento normativo NBR 8492 (1984) para a absorção por imersão (< 20 %). Por fim, a abrasão manteve-se estável nos BTC CP até aos 600 °C, enquanto nos BTC CCR aumentou progressivamente com a sua exposição a temperaturas mais elevadas.

Buson et al. (2012b) avaliaram a resistência ao fogo de uma parede de alvenaria construída com BTC estabilizados com CP e BTC estabilizados com papel *kraft* derivado de sacos de cimento e com argamassa solo-cimento nas juntas. Para tal, os autores construíram a parte inferior da parede com BTC estabilizados com CP e a parte superior com BTC estabilizados com papel *kraft*. A parede foi ainda dividida em três tiras verticais, apresentando soluções de revestimento distintas: a tira central não foi revestida em ambos os lados da parede; uma tira lateral foi revestida apenas na face exposta ao fogo; a outra tira lateral foi revestida em ambos os lados da parede. Foram considerados seis painéis (Figura 9) e adotada a mesma argamassa de solo e cimento para o reboco com 12% de cimento em massa, na tira vertical do meio não foi colocado reboco, na tira da esquerda foi apenas rebocado o lado exposto e na tira da direita foram rebocados ambos os lados. O teste seguiu a curva de temperatura ISO 834 durante duas horas. Embora a temperatura máxima do forno tenha sido atingida às 2 horas de ensaio, a temperatura dos painéis continuou a aumentar posteriormente devido ao processo de transferência de calor. Os autores observaram que o aquecimento provocou a evaporação de água de dentro dos blocos e, por conseguinte, a sua condensação no reboco da face não exposta diretamente ao fogo (P3 e P6). Perto do final do teste, foi também observado o surgimento de uma fenda vertical na superfície dos painéis não expostos ao fogo e sem reboco (P2 e P5). No entanto, segundo os autores, a integridade da parede nunca esteve em risco e não houve passagem de gases quentes ou chamas. Para além disso, o critério de isolamento térmico, avaliado pelo tempo no qual não ocorre um

aumento descontrolado da temperatura na face não exposta ao fogo (EN 1363-1 2020), também foi cumprido, ou seja, em nenhum ponto dos painéis foi ultrapassada a temperatura média inicial em 180 °C e o aumento da temperatura média de todos os pontos foi inferior a 140 °C. Por fim, os autores concluíram que os BTC *kraft* apresentaram um desempenho ligeiramente superior ao dos BTC CP. Isto deveu-se à menor transferência de calor apresentada pelos painéis com BTC *kraft*. Outro estudo semelhante foi realizado por Ferreira et al. (2019), em que uma parede, sem reboco, com BTC estabilizados com CEM II/B-L 32,5N e com adição de resíduos orgânicos em substituição parcial de solo, foi submetida à curva de temperatura ISO 834 durante 90 minutos. Os autores não observaram fissuras significativas nos blocos, mas verificaram a ocorrência de fissuração nas juntas de argamassa, o que permitiu a libertação de fumo e gases. No entanto, os critérios de isolamento térmico e integridade foram cumpridos. Após o ensaio, confirmou-se a alteração de cor dos blocos.

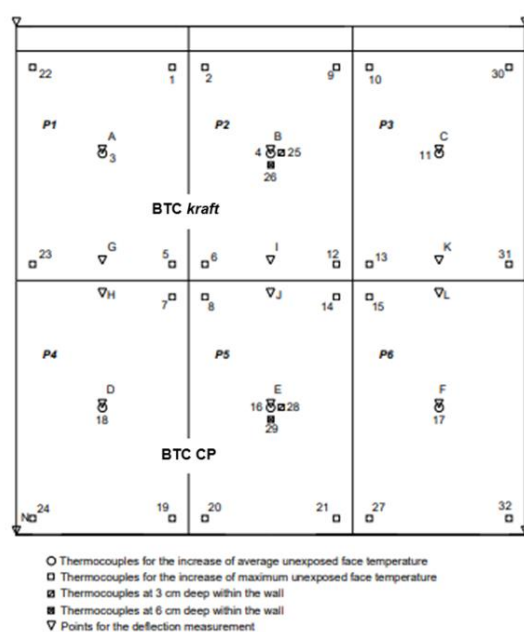


Figura 9 – Disposição dos termopares no painel (Buson et al., 2012b).

3. Campanha Experimental

No presente capítulo, é apresentada a metodologia do trabalho experimental. Planeado em função dos objetivos definidos no capítulo 1, designadamente a caracterização de blocos de terra comprimida (BTC) estabilizados com cimento reciclado quando sujeitos a elevadas temperaturas. Inicialmente, procedeu-se à descrição, seleção e caracterização dos materiais empregues (solo, resíduo argiloso e resíduos de construção e demolição) e da produção e caracterização do cimento reciclado. Posteriormente, descreveu-se a produção dos BTC, as composições utilizadas, o processo de exposição aos patamares de temperatura e os ensaios de caracterização efetuados.

Conforme mencionado, o trabalho experimental foi concebido no domínio do projeto de investigação Eco+RCEB – “Eco-efficient recycled cement compressed earth blocks”, ref. PTDC/ECI-COM/0704/2021, com o apoio da respetiva equipa de investigação. Os BTC foram produzidos nas Oficinas do Convento em Montemor-o-Novo (ACOC), a produção do cimento reciclado no laboratório de geociências e geotecnologias no Instituto Superior Técnico (GeoLAB-IST), a caracterização do solo e do resíduo argiloso no laboratório de geotecnia do Departamento de Engenharia Civil do IST (LabGeo) e a caracterização do resíduo de construção e demolição (RCD), a termoativação do cimento reciclado, e os ensaios a elevada temperatura e de caracterização dos BTC foram efetuados no laboratório de construção do Departamento de Engenharia Civil do IST (LC-IST).

3.1 Resumo da campanha experimental

A campanha experimental pode ser dividida em cinco etapas: a recolha e caracterização do solo, do resíduo argiloso e dos resíduos de construção e demolição (RCD); a produção e caracterização do cimento reciclado; a produção e cura dos BTC; o ensaio dos BTC a elevada temperatura; a caracterização dos BTC antes e após a exposição térmica.

Inicialmente, tendo por base o trabalho prévio de Rodrigues (2024), foram selecionados, recolhidos e caracterizados os seguintes agregados para a produção dos BTC: um tipo de solo arenoso proveniente do Campo de Tiro de Alcochete (Força Aérea Portuguesa); um resíduo fino de pó de argila proveniente de uma fábrica de telhas cerâmicas da empresa Cobert; um RCD de dimensão inferior a 8 mm proveniente da empresa Vimajas. A utilização de resíduo argiloso e RCD visou corrigir a mistura, nomeadamente na falta de finos do solo arenoso, bem como a produção de BTC mais sustentáveis.

A segunda etapa abrange a produção de cimento reciclado (CRP), a partir de resíduos de pasta de cimento produzidos em laboratório, sujeitos a processos de britagem, moagem e termoativação. O CRP, bem como o cimento Portland (CP) que lhe deu origem, CEM I 42,5 R, foram posteriormente utilizados como estabilizantes dos BTC.

A terceira etapa compreendeu a seleção de 3 composições de referência e a respetiva produção e cura dos BTC. As composições consideram BTC não estabilizados, ou estabilizados com 8% CP ou 8% RCP. A produção foi efetuada nas Oficinas do Convento em Montemor-o-Novo (ACOC), onde foi iniciado o seu processo de cura húmida. De seguida, os blocos foram transportados para o LC-IST.

Na quarta etapa, os BTC foram expostos a 5 patamares de temperatura entre cerca de 200 e 1000 °C, durante uma hora. Desse modo, foi possível avaliar o comportamento dos BTC quando sujeitos a elevadas temperaturas.

Finalmente, na quinta etapa procedeu-se à caracterização física (massa volúmica, porosidade aberta e velocidade de propagação de ultrassons), mecânica (resistência à compressão, módulo de elasticidade, abrasão) e de durabilidade (absorção por imersão e capilaridade) dos BTC.

3.2. Caracterização do solo e do resíduo argiloso

Como anteriormente referido, o solo utilizado neste trabalho foi proveniente do Campo de Tiro de Alcochete, pertencente à Força Aérea Portuguesa (Figura 10a). A extração do solo (FA) foi realizada a uma profundidade superior a 1 metro de modo a garantir a menor presença possível de matéria orgânica. Antes da caracterização, o solo foi pulverizado e peneirado numa malha de 8 mm, de modo a ficar nas mesmas condições com que foi utilizado para produzir os BTC. Como este solo apresentava características muito arenosas, realizou-se uma correção granulométrica através da adição de um resíduo argiloso (TV) (Figura 10b), resultante do fabrico de telhas cerâmicas.

Estes materiais foram analisados em termos de granulometria (peneiração a seco), teor de argila (adsorção de raios-X), teor ótimo de água, limites de consistência, teor de matéria orgânica e massa volúmica das partículas. A sua caracterização foi realizada no âmbito de um trabalho inserido no projeto Eco+RCEB (Rodrigues, 2024). Na Tabela 1, apresentam-se as principais propriedades destes materiais. Na Figura 11, apresenta-se as curvas granulométricas de FA e TV, bem como o fuso de granulometria proposto pelo documento normativo XP P13-901 (2001), com vista à produção de BTC estabilizados. Confirma-se a fraca presença de materiais muito finos no solo FA (argila e silte), tornando-o pouco adequado para a produção de BTC. Assim, justifica-se a sua correção com o TV.



Figura 10 – a) Terra FA; b) Resíduo argiloso TV.

Tabela 1 – Caracterização do solo FA e do resíduo argiloso TV. Adaptado de Rodrigues (2024).

Parâmetro		Normas	FA	TV
Granulometria (%)	Gravilha ($d > 4,75$ mm)	LNEC E-195 (1966)	1,4	0,0
	Areia ($0,075 < d < 4,75$ mm)		85,6	8,5
	Silte + Argila ($d < 75$ μ m)		13,0	49,3
Argila (%) ^a			10,7	42,2
Limites de consistência (%)	Limite de liquidez	NP 143 (1969)	24	47
	Limite de plasticidade		18	26
	Índice de plasticidade		6	21
Massa volúmica das partículas (kg/m ³)		NP 83 (1965)	2633	-
		NP EN 1097-7 (2008)		2630
Absorção de água (%)		NP EN 1097-6 (2003)	1,4	-
Matéria orgânica (%)		XP P94-047 (1998)	0,8	1,5
Teor ótimo de água (%)		ASTM D698 (2000)	12,8	-

a: determinado a partir de ensaios de adsorção por raios X

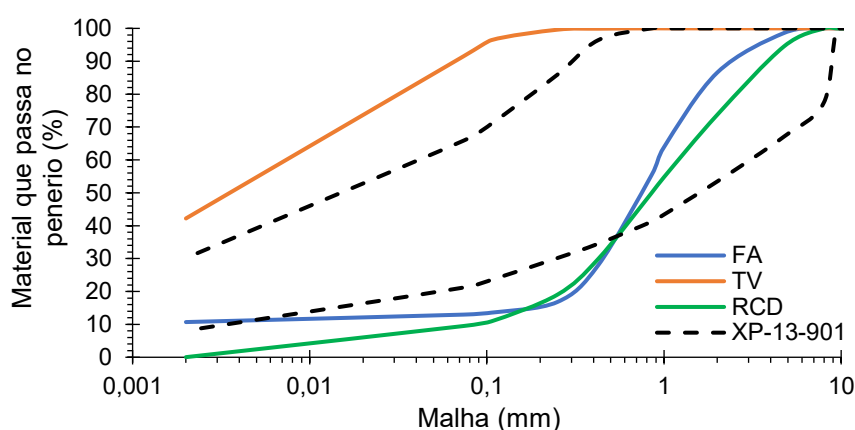


Figura 11 – Curva granulométrica do solo FA, resíduo TV, RCD adaptado de (Rodrigues, 2024) e fuso granulométrico proposto pela norma XP P-13-901 (2001).

Devido à fraca presença de finos, o solo FA apresenta um baixo índice de plasticidade (Tabela 1), que terá de ser aumentado pela incorporação de TV. O solo FA apresenta um enquadramento próximo aos limites de consistência sugeridos na literatura para a utilização em BTC estabilizados com cimento ou não estabilizados, para índice de plasticidade (IP) entre 2 e 18 % e limite de liquidez (LL) entre 25 e 40 % (NBR 10833, 1989; ASR 1333, 2018; HB 195, 2002). O teor de matéria orgânica é inferior ao máximo de 2-4% estipulado na literatura (ARS 1333, 2018; HB 195, 2002). Por sua vez, o teor ótimo de água de FA situa-se entre 10-13 %, como reportado por Riza et al. (2010).

Para além dos ensaios anteriormente referidos, foi também determinada a composição mineralógica da terra FA e do resíduo argiloso TV. Para tal, utilizou-se a técnica de difração de raios-X através de um difractómetro *PANalytical X'Pert Pro*. A captação de dados foi realizada entre aproximadamente 5° e 70° 2 θ , para um passo de 0,033° e 148 s. A composição mineralógica foi identificada com recurso ao software *X'Pert Highscore Plus*. A análise das amostras foi efetuada sem pré-tratamento térmico, dado que os picos associados aos minerais argilosos se mantiveram inalterados após aquecimento. Esta caracterização foi também realizada no âmbito do trabalho de Rodrigues (2024). Na Figura 12, apresentam-se os difractogramas obtidos. Verifica-se que a terra FA

e o resíduo TV são essencialmente compostos por minerais argilosos cauliníticos e ílíticos não expansivos, além de quartzo e microclina. O FA apresenta ainda albite e ortoclase. A presença essencialmente de minerais argilosos não expansivos favorece a aplicação de FA e TV em BTC (Gomes *et al.*, 2014).

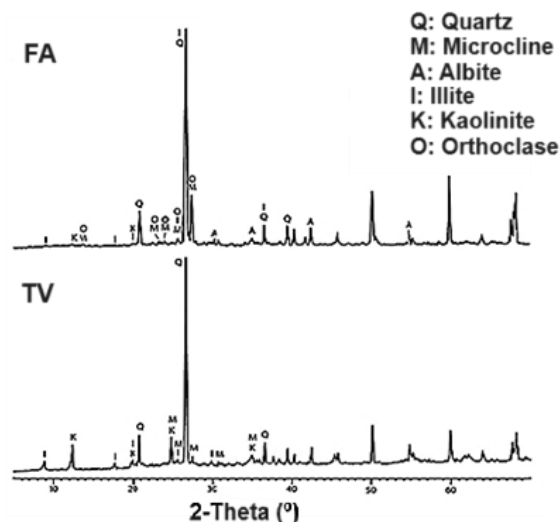


Figura 12 – Difractogramas do solo FA e resíduo TV. Adaptado de: Rodrigues, (2024)

Complementarmente, os materiais foram também sujeitos a uma análise termogravimétrica. Esta análise foi realizada por intermédio de um equipamento *Hitachi Nexta STA*. Amostras com uma massa entre 9 e 16 mg foram colocadas num recipiente de platina e a sua perda de massa foi registada em atmosfera de azoto (100 mL/min), com uma taxa de aquecimento de 15 °C/min e entre 20 e 950 °C. Importa referir que as amostras de FA e TV não sofreram nenhum pré-tratamento (por exemplo secagem) antes desta análise. As curvas termogravimétricas e as suas derivadas encontram-se apresentadas na Figura 13.

Com base na análise de XRD, pode-se confirmar que a illite e a caulinite são os principais minerais argilosos presentes nas amostras de FA. No entanto, a análise TG não fornece informações sobre a presença de apenas um tipo de filossilicato ou de ambos. Isso resulta do intervalo de temperaturas na qual ocorrem as perdas de massa ser semelhante para ambos os tipos de minerais argilosos. Em relação ao TV, destaca-se a presença de três picos distintos na curva de DTG correspondentes a diferentes fases de perda de massa: um na fase de desidratação (perda de água de adsorção) e dois na fase de desidroxilação. O pico inicial apresenta uma queda acentuada, o que pode ser atribuído à ausência de pré-secagem das amostras antes da análise. Os picos seguintes estão relacionados com a presença de dois tipos distintos de filossilicatos, sugerindo a presença simultânea de illite e caulinite. De facto, tanto a illite como a caulinite contribuem com perdas de massa entre 400 e 700 °C, atribuídas à sua decomposição por perda de água estrutural (intercamada) e desidroxilação (Keppert, 2024, Gamouz et al., 2019). A decomposição acima de 650 °C refere-se à decomposição de carbonatos (Gamouz et al, 2007; Keppert, 2024). A illite é o principal mineral responsável por perda de

água por desidratação (até cerca de 200 °C), visto que esta parcela tende a ser menos relevante na caulinite (Keppert, 2024).

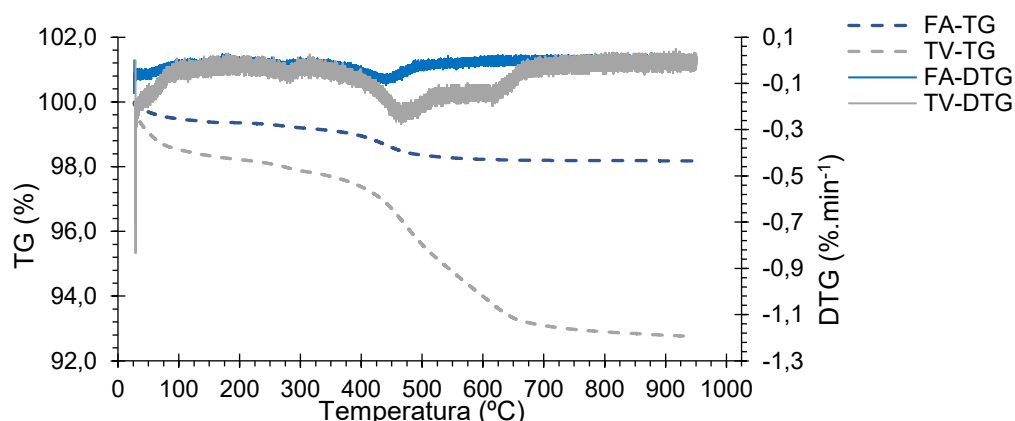


Figura 13 – Curvas termogravimétricas e as suas derivadas do solo FA e resíduo TV.

A composição química das amostras foi aferida por intermédio de uma análise de fluorescência de raios X (XRF), realizada com um espectrómetro de raios X sequencial *PHILIPS MAGIX PRO PW2400*. O software utilizado foi o *SuperQ*. A Tabela 2 apresenta a composição química expressa em percentual em massa de óxidos para as amostras FA e TV.

Tabela 2 – Composição química do solo FA e resíduo TV.

Óxido (%)	Concentração (%)	
	FA	TV
Na ₂ O	0,760	-
MgO	-	0,906
Al ₂ O ₃	18,1	19,9
SiO ₂	55,7	65,6
SO ₃	0,19	-
K ₂ O	5,27	3,84
CaO	0,725	0,500
TiO ₂	0,418	1,52
Fe ₂ O ₃	3,92	7,60
NiO	0,0495	0,0452
Rb ₂ O	0,0610	-
ZrO ₂	0,0247	0,0449

Ambas as amostras apresentam uma percentagem de SiO₂ superior a 50%. Isto pode ser atribuído ao facto de todos os minerais presentes pertencerem ao grupo dos silicatos. De forma semelhante, as percentagens de Al₂O₃ obtidas situam-se no intervalo de 18,1-19,9%, uma vez que, à exceção do quartzo, todos os minerais contêm alumínio na sua composição. A presença de illite e microclina em ambas as amostras, e de ortoclase na terra FA explica as percentagens obtidas de K₂O. Do mesmo modo, a presença de albite na terra FA explica os níveis de sódio detetados em ambas as amostras. Por fim, a quantidade significativa de Fe₂O₃ na análise sugere a possível presença de um óxido em concentração muito baixa (não detetado na análise XRD) ou a presença de ferro na estrutura da illite, em ambas as amostras. Adicionalmente, parte do magnésio, cálcio, sódio e potássio

encontrados nas amostras poderá também estar presente nos espaços interlamelares dos filossilicatos ou, no caso do magnésio, poderá integrar a camada octaédrica dos minerais argilosos.

3.3. Caracterização do resíduo de construção e demolição

O agregado reciclado foi diretamente obtido a partir da empresa de gestão de resíduos Vimajas. As partículas do material fornecido apresentam dimensão máxima inferior a 8 mm (Figura 11), o que o torna especialmente adequado para misturas de terra a utilizar na produção de BTC (Cruz et al., 2024). A reutilização deste material contribui para a sustentabilidade da indústria de construção, através da redução de materiais enviados para aterro e da utilização de matérias-primas naturais.



Figura 14 – Resíduo de construção e demolição

O agregado reciclado foi analisado relativamente à granulometria (peneiração a seco), massa volúmica, absorção de água e composição. A sua caracterização foi realizada no âmbito do projeto Eco+RCEB (Rodrigues, 2024) e encontra-se na Tabela 2. A curva granulométrica é apresentada na Figura 11, em 3.2. Observa-se uma grande semelhança entre a granulometria do RCD e da terra FA, facilitando a substituição direta de FA por RCD, sem alterar significativamente a compacidade granular da mistura. A presença de materiais de base cimentícia e betuminosos na sua composição contribui para perdas de massa abaixo de 700 °C.

Tabela 3 – Caracterização do resíduo de construção e demolição (RCD). Adaptado de: Rodrigues (2024)

Parâmetro		Norma	RCD
Massa volúmica aparente (kg/m³)		NP EN 1097-6 (2003)	2300
Absorção de água (%)			4,3
Granulometria (%)	Gravilha (d>4,75 mm)	NP EN 933-11 (2011)	5,5
	Areia (0,075<d<4,75 mm)		85,0
	Silte + argila (d<0,075 mm)		9,5
Composição (%)	Betão e argamassa	NP EN 933-1 (2012)	45,3
	Agregado natural e pedra		27,9
	Material cerâmico		16,4
	Material betuminoso		2,2
	Outros		8,3

3.4. Estabilizantes

3.4.1 Cimento Portland

Relativamente à produção de BTC estabilizados com cimento Portland (CP), e o cimento de origem posteriormente reciclado recorreu-se a cimento CEM I 42,5R fornecido pela SECIL. A caracterização deste ligante encontra-se na Tabela 4. Os resultados foram disponibilizados pelo fabricante, à exceção do referente à superfície específica BET, cuja determinação foi solicitada à universidade de Aveiro.

Tabela 4 – Caracterização do cimento Portland (CP).

Parâmetros	Norma	CP
Massa volúmica (g/cm ³)	LNEC E-64 (1979)	3,07
Superfície específica BET ^a (m ² /g)	NP EN 196-6 (2018)	1,97
Resistência à compressão (MPa)	2 dias	29,3
	7 dias	43,3
	28 dias	56,3
SiO ₂ +Al ₂ O ₃ +Fe ₂ O ₃ (%)	NP EN 196-2 (2014)	19,45 + 4,98 + 2,91
CaO + MgO (%)	NP EN 196-2 (2014)	63,0 + 1,63
CaO livre (%)	NP EN 451-1 (2017)	2,73
Consistência normal	NP EN 196-3 (2016)	0,30
Tempo de presa (min)	Inicial	158
	Final	236

3.4.2 Cimento Reciclado

O cimento reciclado (CR) foi obtido a partir de provetes de pasta artificialmente produzidos em laboratório. Isso permitiu uma maior produtividade de cimento reciclado, bem como a garantia da obtenção final de um produto homogéneo, associado a uma reduzida variabilidade da sua composição. Em trabalhos anteriores, verificou-se que o cimento reciclado obtido de betão apresenta um desempenho semelhante ao CR de pasta (Nabais 2023, Cruz & Bogas, 2024). Inicialmente, procedeu-se à produção de provetes de pasta de cimento. Os provetes foram elaborados com uma relação água/ligante (a/l) de 0,55, em moldes cúbicos de 15 cm de aresta. Ao todo foram produzidos cerca de 10 provetes de pasta (Figura 15a). Após desmoldagem às 24 horas, procedeu-se à cura dos provetes de pasta por cerca de 7 dias em câmara húmida (≈ 95 % humidade relativa). Aos 28 dias de idade, foi aferida a resistência à compressão dos provetes de pasta (36 MPa), de acordo com a norma NP EN 12390-6 (2011). Importa salientar que os provetes de pasta, apenas foram submetidos a reciclagem após os 90 dias de idade, de forma a serem representativos de pastas com um grau elevado de hidratação. A escolha de uma relação água/cimento (a/c) de 0,55 visou a obtenção de cimento suficientemente hidratado, para além da produção de pastas fluidas, fáceis de moldar. Num estudo anterior, verificou-se que a relação a/c tem pouca influência nas características finais do cimento reciclado (Carriço et al. 2022).

A reciclagem dos provetes de pasta iniciou-se no LC-IST, com uma britadeira de maxilas (Figura 15b) para reduzir o tamanho das partículas até aproximadamente 7 cm (Figura 15c). Posteriormente, o material foi encaminhado para o Geolab-IST, onde foi submetido a uma passagem numa britadeira de mandíbulas (Figura 16a). As partículas foram reduzidas até uma dimensão de

aproximadamente 1 cm (Figura 16b). Seguidamente, as partículas foram submetidas a dupla passagem no moinho de rolos (Figura 16c), obtendo-se um material com dimensão máxima de sensivelmente 2 mm (Figura 16d). De seguida, procedeu-se à moagem das partículas no moinho de bolas de modo a atingirem granulometria similar à do CP (Figura 17a). Inicialmente, o material foi seco numa estufa ventilada a 105 °C, durante pelo menos 24 h. Posteriormente, cerca de 12 kg de material seco foi colocado no moinho de bolas juntamente com 625 esferas de aço (Figura 17b) com diâmetro variável entre 10 e 50 mm. A esta carga foi adicionado 0,2 % em peso de um aditivo de moagem fornecido pela SECIL (Figura 17c), que teve como função evitar a aglomeração das partículas durante a moagem. Este processo teve uma duração de 2 h, tendo resultado num material constituído maioritariamente por partículas de diâmetro inferior a 150 µm (Figura 17d).

Por fim, este material foi submetido a um tratamento térmico num forno horizontal localizado no LC-IST (Figura 17a). Esta fase permitiu que o cimento readquirisse a sua capacidade de hidratação, podendo re utilizado como ligante. Este tratamento térmico, também denominado de termoativação, foi realizado tendo como base estudos anteriores (Real et al., 2020; Shui et al., 2007b; Yu & Shui, 2013; Zhang et al., 2018), seguindo a curva térmica da Figura 17b): **1**-10 °C/min até 150 °C; **2**-1 hora a 150 °C; **3**-10 °C/min até 450 °C; **4**-1 hora a 450 °C; **5**-10 °C/min até 650 °C; **6**-3 horas a 650 °C. Após termoativação, o material foi arrefecido no interior do forno até equilíbrio térmico com o exterior.

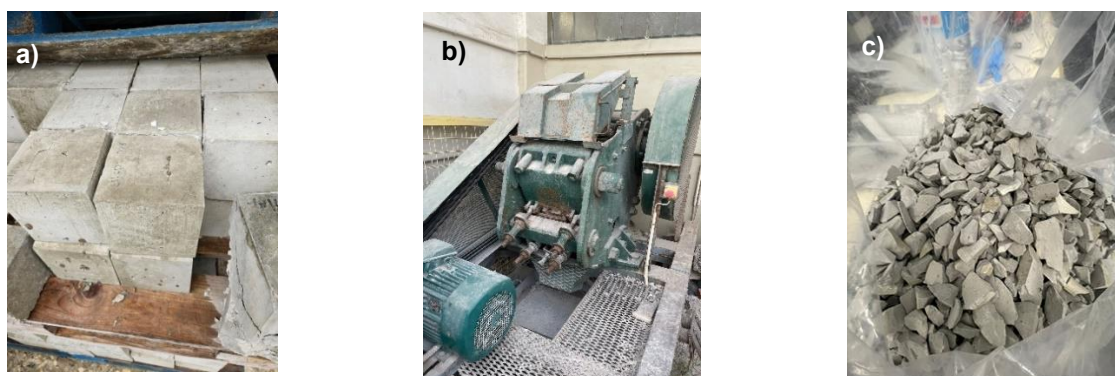


Figura 15 – a) Cubo de pasta de cimento; b) britadeira de mandíbulas; c) agregado grosseiro derivado da pasta.

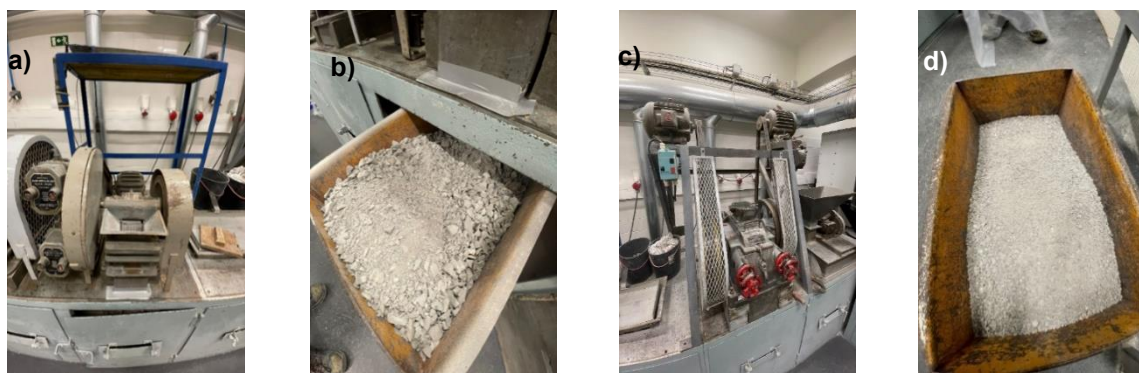


Figura 16 – a) Britadeira de mandíbulas de dimensão média; b) agregado de dimensão média; c) britadeira de cilindros; d) agregado fino resultante da britagem.



Figura 17 – a) Moinho de bolas; b) esferas metálicas; c) aditivo desfloculante; d) partículas de diâmetro inferior a 150 μm .

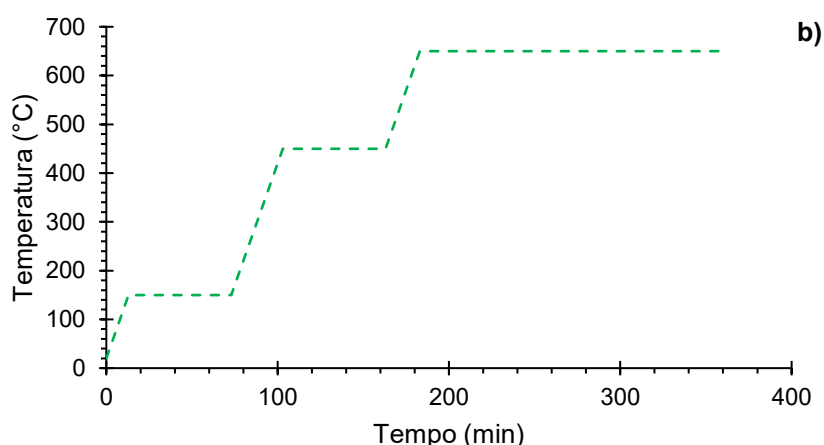


Figura 18 – a) Forno horizontal b) gráfico correspondente à programação utilizada para termoativação.

A caracterização do CRP foi realizada no âmbito de outro trabalho, inserido no projeto Eco+RCEB (Rodrigues, 2024), e é apresentada na Tabela 5. A curva granulométrica do CRP, determinada por granulometria a laser (*Mastersizer 3000, Malvern*), bem como a do CP, apresentadas na Figura 19. Note-se que o CRP apresentou uma granulometria ligeiramente mais grosseira do que o CP. Além disso, salienta-se a elevada exigência de água e o elevado teor de cal livre do CRP em comparação com o CP (Tabelas 4 e 5). A elevada necessidade de água deve-se à estrutura porosa e amplo valor de superfície específica BET das partículas de CRP (9,81 m^2/g , Tabela 5, Rodrigues, 2024). O tempo final de presa do CRP foi aproximadamente 65% mais longo do que o obtido para o CP. Este fenómeno deve-se ao desenvolvimento retardado do polimorfo α' - C_2S do CRP até o primeiro dia de idade (Bogas et al. 2022). Destaca-se também a similaridade do tempo inicial de presa do CP e do CRP, em contraste com o reportado por outros autores (Nabais, 2023; Gonçalves, 2023). Vyšvařil *et al.* (2014) observaram que a redução do tempo de presa relaciona-se com a maior presença de cal livre. A introdução de uma nova etapa de temperatura durante a termoativação pode ter diminuído a

hidratação precoce do CaO estimulando a capacidade de reidratação e, consequentemente, o desenvolvimento mais rápido do tempo de presa.

Para além das propriedades descritas na Tabela 5, a resistência mecânica do CRP foi também avaliada. Para tal, produziu-se provetes de pasta (a/c de 0,74) de dimensão 160x40x40 mm³ de acordo com a norma EN 1015-2 (1998). Os provetes foram compactados em duas camadas, cada uma sujeita a 60 pancadas numa mesa de compactação. De seguida, a superfície foi alisada e os provetes foram selados com película plástica durante 24 h. Depois, os provetes foram desmoldados (Figura 20a) e colocados numa câmara húmida até ser atingida a idade do ensaio. Aos 28 dias de idade, os provetes foram submetidos a ensaios à flexão e as metades resultantes a ensaios à compressão, para uma velocidade de carga de 0,05 kN/s e 2,40 kN/s, respetivamente. Estes ensaios foram realizados numa prensa *Form + Test Seidner 505/200/10 DM* (Figura 20b) de acordo com a EN 1015-11 (1999). A resistência à compressão aos 28 dias da pasta com CRP foi de 14,3 MPa. Estes valores foram ligeiramente inferiores em relação aos reportados por Carvalho (2020), que obteve 19 MPa aos 28 dias em pastas com a/c de 0,72 e CRP, também termoativado a 650 °C.

Tabela 5 – Características do CRP bem como as normas associadas. Adaptado de Rodrigues (2024).

Parâmetros	Norma	CRP
Massa volúmica (g/cm ³)	LNEC E-64 (1979)	3,00
Superfície específica BET (m ² /g)	NP EN 196-6 (2018)	9,81
SiO ₂ +Al ₂ O ₃ +Fe ₂ O ₃ (%)	NP EN 196-2 (2016)	19,1 + 5,1 + 3,0
CaO + MgO (%)	NP EN 196-2 (2014)	60,8 + 1,8
CaO livre (%)	NP EN 451-1 (2017)	17,9
Consistência normal	NP EN 196-3 (2016)	0,74
Tempo de presa (min)	Inicial	170
	Final	460

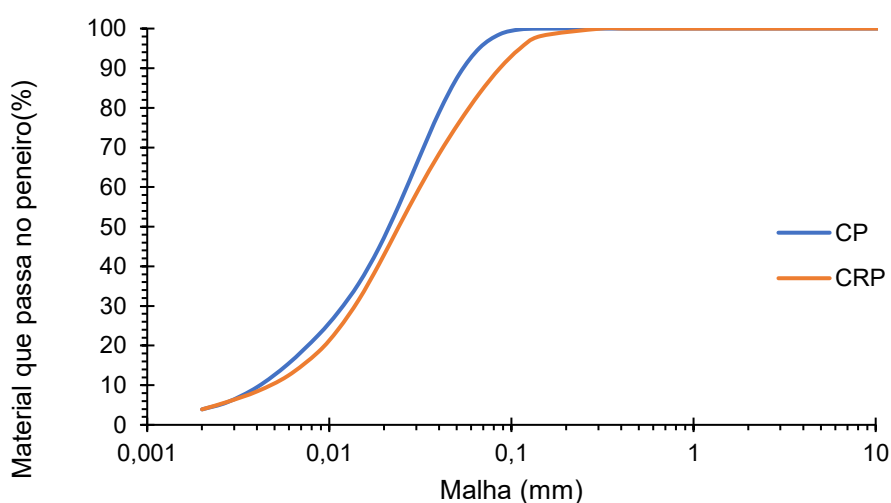


Figura 19 – Curvas granulométricas do CP e do CRP.

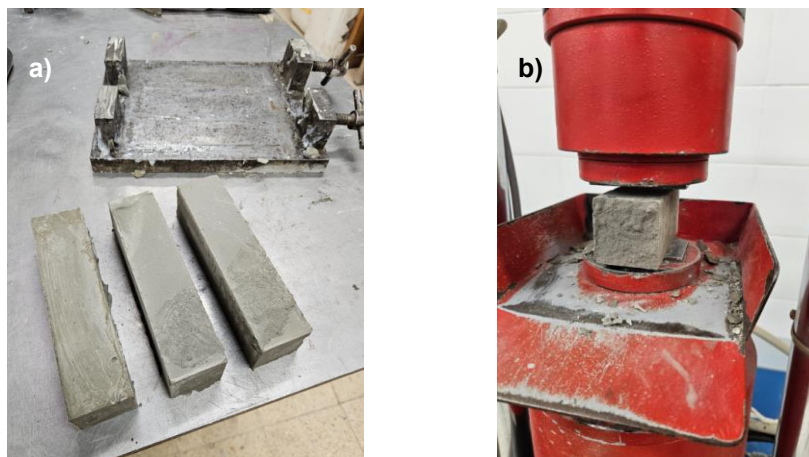


Figura 20 – a) Provete desmoldados; b) prensa Form + Test Seidner 505/200/10 DM.

Complementarmente, os cimentos anidros CP e CR e as respectivas pastas de cimento aos 28 dias de idade (PCP e PCR) foram sujeitos a uma análise de TG por intermédio de um equipamento *Hitachi Nexta STA*. Amostras com massa de cerca de 10-15 mg foram previamente moídas até se obter um pó fino e depois devidamente homogeneizadas. Em seguida, foram colocadas num recipiente de alumina e a sua perda de massa foi analisada em atmosfera de azoto (100 mL/min), com uma taxa de aquecimento de 15 °C/min até aos 950 °C. As curvas termogravimétricas e as suas derivadas foram registadas e utilizadas para determinar a perda de massa correspondente às fases de desidratação (L_{dh}), desidroxilação (L_{dx}) e descarbonatação (L_{dc}), (Braun, 1987). Estas fases, segundo Zhang e Ye (2012), estão relacionadas com: a perda de água quimicamente ligada nos produtos hidratados, incluindo os silicatos de cálcio hidratados (C-S-H) e as fases aluminadas (AFm e Aft), (L_{dh}); a perda de água combinada na portlandite (hidróxido de cálcio, CH), (L_{dx}); a descarbonatação dos compostos carbonatados, (L_{dc}). Assume-se que L_{dh} inicia-se acima dos 105 °C, embora parte da perda de água dos produtos hidratados, em especial de Aft, se inicie a temperaturas inferiores. Assim, em geral, os intervalos de temperatura de L_{dh} , L_{dx} e L_{dc} situaram-se, respetivamente, entre 105–400 °C, 400–500 °C e acima dos 500 °C (Real et al., 2020). Os intervalos exatos de cada fase e as respetivas perdas de massa foram determinados pelo método tangencial (Lothenbach et al., 2016). As perdas de massa referentes a estas fases encontram-se na Tabela 6. O grau de hidratação (α_{TG}) referente às pastas endurecidas foi determinado a partir da razão entre a água quimicamente ligada não evaporável (W_b), determinada pela Equação 3.1, e a quantidade de água necessária, em massa, para a completa hidratação do cimento anidro, que é adotada, de forma simplificada, como 0,23% para o CP (Neville, 1995) e 0,22% para o CR (Bogas et al., 2022). Na Equação 3.1, $L_{dc,a}$ é um fator de correção que corresponde à descarbonatação do cimento anidro. O teor de C-H foi estimado através da Equação 3.2, onde M_{CH} , M_{H_2O} e M_{CO_2} correspondem às massas molares do CH, da H_2O e do CO_2 , respetivamente.

$$W_b = L_{dh} + L_{dx} + \frac{M_{H_2O}}{M_{CO_2}} * (L_{dc} - L_{dc,a}) \quad (3.1)$$

$$CH = L_{dx} * \frac{M_{CH}}{M_{H_2O}} + \frac{M_{CH}}{M_{CO_2}} * (L_{dc} - L_{dc,a}) \quad (3.2)$$

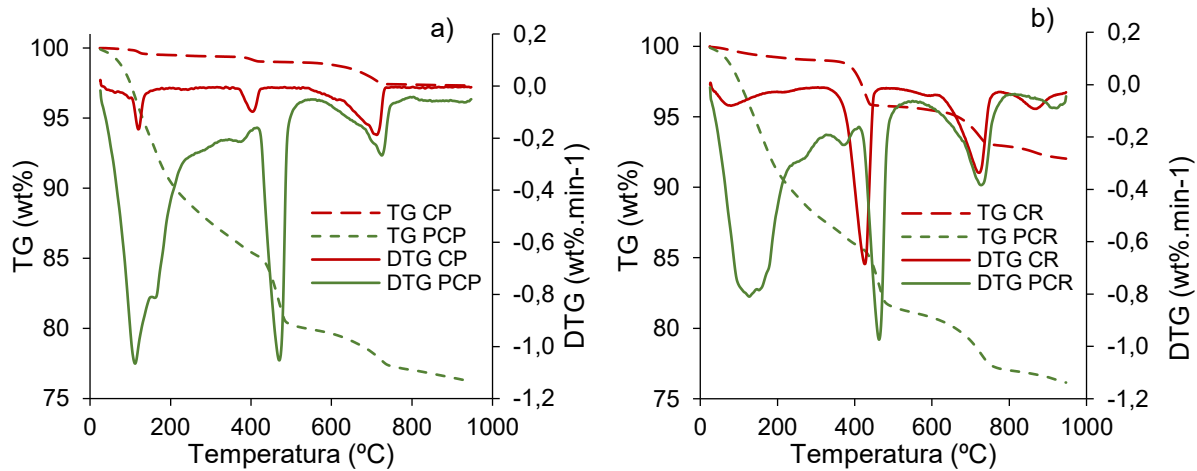


Figura 21 – Curvas Termogravimétricas e as suas derivadas para: a) CP anidro e respetiva pasta aos 28 dias; b) CR e respetiva pasta aos 28 dias.

Tabela 6 – Perdas de massa, água quimicamente ligada (W_b), grau de hidratação (α_{TG}) e teor de portlandite (CH) dos anidros CP e CR e das respetivas pastas aos 28 dias de idade (PCP e PCR, respetivamente).

Amostra	L_{dh} (%)	L_{dx} (%)	L_{dc} (%)	W_b (%)	α_{TG} (%)	CH (%)
CP	0.5	0.3	1.7	0.8	3.5	1.2
CR	0.7	3.0	3.8	3.7	16.0	12.3
PCP	12.7	4.0	4.3	17.8	77.5	21.3
PCR	12.1	3.3	5.8	16.4	74.8	17.9

O CP anidro apresentou perdas de massa mais significativas por volta dos 100–140 °C e entre os 700–800 °C, essas reduções de massa foram respetivamente atribuídas à decomposição do gesso e à descarbonatação da calcite. Em contraste, o CR anidro não revelou perdas de massa significativas por desidratação. Contudo, entre os 360–460 °C, o CR apresentou uma perda de massa considerável, relacionada com a formação de portlandite, o que indica a hidratação precoce do CaO livre posteriormente ao tratamento térmico e durante o armazenamento. Paralelamente, o CR exibiu uma perda de massa superior à do CP acima dos 600 °C, o que indica a formação de uma maior quantidade de produtos carbonatados durante o armazenamento.

Comparativamente às pastas de cimento Portland, a PCR apresenta uma menor perda de massa abaixo dos 200 °C, não evidenciando um pico nitidamente definido na curva DTG entre 105–115 °C (Figura 21). Isto pode ser atribuído à reduzida formação de etringite. Por sua vez, a reidratação das fases AFm carbonatadas ou sulfatadas deverá ser mais relevante. De facto, as pastas de cimento reciclado revelam picos de perda de massa maioritariamente entre 140–180 °C e picos largos e pouco intensos entre os 250 e 300 °C, os quais deverão estar associados à desidratação das fases AFm. O intervalo de temperaturas correspondente à desidroxilação foi semelhante nas pastas de cimento Portland e de cimento reciclado, entre 420–500 °C e 410 e 490 °C, respetivamente, sugerindo a formação do mesmo tipo de CH. No entanto, a perda de massa nas pastas de CR é inferior à observada

nas pastas de CP, o que poderá ser explicado pelo facto de estas conterem C_3S , que durante a hidratação gera maiores quantidades de C-H do que o α'_H-C_2S presente nas pastas de CR (Bogas et al., 2020). Observa-se também uma maior perda de massa na fase de descarbonatação (L_{dc}) para as pastas de CR (Tabela 6 e Figura 21). De facto, como o tratamento térmico dos resíduos de pasta foi realizado a 650 °C, não ocorreu uma descarbonatação significativa, ou seja, o CR ainda apresentava produtos de carbonatação, os quais persistiram na PCR. Como tal, o CR anidro revelou um volume menor de produtos com potencial de hidratação em relação ao CP, o que favorece a formação, a longo prazo, de menores quantidades de C-S-H e C-H (L_{dh} e L_{dx} , Tabela 6).

3.5. Produção dos BTC

Neste subcapítulo, apresentam-se as composições e as etapas referentes à produção dos BTC. As composições dos BTC foram definidas com base no estudo de otimização efetivado no contexto de outro trabalho (Rodrigues, 2024). A produção dos blocos foi efetuada na Associação Cultural de Arte e Comunicação das Oficinas do Convento, em Montemor-o-Novo.

3.5.1 Composição dos BTC

Na Tabela 7 resume-se a composição e a quantidade de blocos produzidos para cada uma das misturas. De acordo com o documento normativo ASTM D2497-11 (2011), a terra FA é classificada como SC-SM (silty clayed sand), o TV como SCL (*sandy lean clay*) e a combinação das duas terras nas proporções seleccionadas como SC (clayed sand). Este último é mais adequado à produção de BTC, conforme observado na Figura 23.

Tabela 7 – Composição das misturas de BTC e número de blocos produzidos.

Designação	Ligante	Nº blocos	%Ligante ^a	%Água ^b	%RCD ^c	%TV ^a
CP8	CEM I 42,5R	32	8	12	25	11
CRP8	CRP	32	8	12	25	11
NE	-	18	0	9	25	18

a: % massa seca de FA+TV+RCD; b: % massa seca de sólidos; c: % volume de FA+TV+CDW; d: % volume de FA+TV

As designações de cada uma das misturas foram estabelecidas segundo os critérios expostos: as letras referem-se ao tipo de ligante utilizado na mistura (CP ou CRP), seguidas do algarismo que representa a percentagem de ligante na mistura (8%). “NE” indica que a mistura não é estabilizada. A percentagem de ligante a incorporar na mistura foi definida com base em trabalhos anteriores (Rodrigues, 2024; Azevedo, 2021) e na gama recomendada na literatura. A quantidade de resíduo TV, foi definida com base nos resultados preliminares do trabalho de Rodrigues (2024). Neste trabalho, o autor concluiu que, para misturas não estabilizadas, é necessário introduzir um teor de TV superior em relação às estabilizadas, sendo que estes BTC apresentam apenas a argila como ligante.

O teor de água de CRP8 e NE foi fixado com base no teor ótimo de água após compactação, bem como no estudo de otimização realizado por Rodrigues (2024). A mistura com CP (CP8) foi produzida com o mesmo teor em água de CRP8 de modo a facilitar a comparação entre as misturas. Porém, por apresentar menor exigência de água face ao CRP, o teor ótimo de água do CP8 seria mais

baixo, de cerca de 9%. A quantidade de água total utilizada considerou ainda o teor de humidade de FA, TV e do RCD, na altura da sua utilização, determinado por intermédio de uma termobalança de alta precisão (*Kern DBL*) (Figura 22), bem como a água absorvida pelos componentes da mistura (Tabelas 1 e 3).

Na Figura 23, mostram-se as curvas granulométricas das composições CP8, CRP8 e NE. Confirma-se que todas as composições cumprem o fuso limite sugerido em XP P13-901 (2001) para a produção dos BTC. Para as composições mencionadas na Tabela 7, assegura-se que a quantidade de finos é inferior a 30% e a argila inferior a 15%, em consonância com o fuso recomendado nesta norma.



Figura 22 – Termobalança de alta precisão Kern DBL.

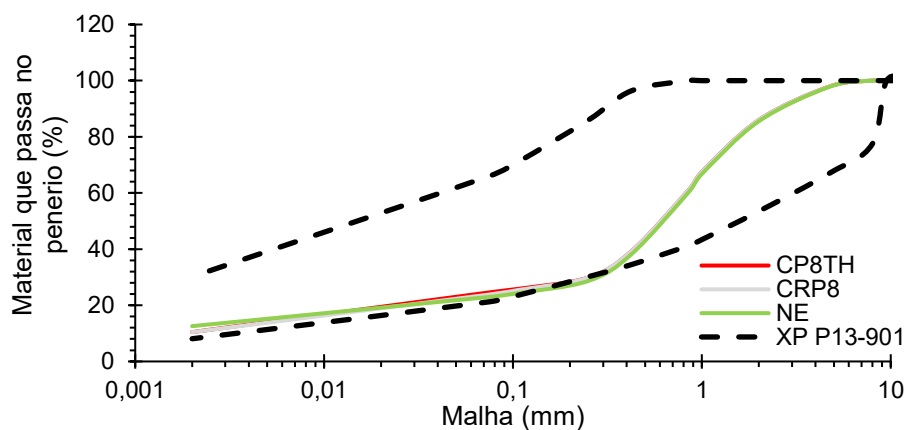


Figura 23 – Curvas granulométricas das 3 composições consideradas bem como o fuso aconselhado pelo documento XP P13-901 (2001).

3.5.2 Preparação dos materiais

A preparação dos materiais iniciou-se com o espalhamento e destorroamento da terra FA (Figura 24a), no telheiro das Oficinas do Convento, em Montemor-o-Novo. Esta etapa teve como objetivo promover a secagem do material, facilitando as etapas seguintes. Em seguida, a terra FA foi transportada com recurso a carrinho de mão até ao pulverizador (Figura 24b). A quantidade estimada de terra a pulverizar correspondia ao necessário para a produção dos 82 blocos (≈ 6 carrinhos de mão).

Após a pulverização, o solo foi peneirado com recurso a um crivo rotativo (Figura 24c) com uma malha quadrada de 8 mm para garantir a ausência de pedras de maior dimensão, torrões e material orgânico, corrigindo a granulometria de FA. Em seguida, o solo foi armazenado até à sua utilização. O resíduo TV e o agregado reciclado RCD não foram alvo de qualquer tipo de pré-tratamento, tendo em conta que foram fornecidos na forma aproximadamente seca e com um diâmetro inferior a 8 mm.



Figura 24 – a) Solo FA distribuído numa lona plástica; b) pulverizador de pás mecânico; c) crivo rotativo.

3.5.3. Mistura, prensagem e cura dos BTC

Posteriormente à preparação dos materiais, seguiu-se o processo de mistura. Inicialmente, todos os constituintes sólidos foram pesados e colocados numa misturadora de eixo vertical (Figura 25a), com capacidade para aproximadamente 160 kg de material. De seguida, procedeu-se à homogeneização dos materiais sólidos (FA, TV, RCD e ligante). Depois, efetuou-se a adição gradual de água, acompanhada da respetiva mistura. De salientar que, devido à elevada quantidade de material na misturadora, foi necessário complementar a ação da misturadora com uma mistura manual, recorrendo a colheres de pedreiro.

De seguida, pesou-se a mistura em baldes e colocou-se na prensa hidráulica semiautomática OSKAM V/F (Figura 25b). Este equipamento tem um rendimento de aproximadamente 60 blocos por hora com uma dimensão de 295x140x90 mm³. Resumidamente, a prensagem dos blocos consiste em: 1) colocar a mistura num compartimento; 2) acionar uma alavanca que resulta na queda da mistura do compartimento para o molde; 3) compactar a mistura com uma pressão de 5-6 MPa; 4) acionar de novo a alavanca que impele o bloco fora do molde para um tapete de rolos.

Após a desmoldagem, selecionaram-se 3 blocos por composição para estimativa da sua massa volúmica no estado fresco. Para tal, procedeu-se à pesagem e medição da geometria dos blocos imediatamente após a sua produção. De seguida, os blocos foram transportados para paletes onde foram regados com água regularmente e cobertos com uma lona de plástico, assegurando uma humidade relativa (HR) perto de 100%. É de notar que após desmoldagem os blocos possuem uma fraca coesão e estabilidade, pelo que o transporte dos blocos do tapete até às paletes tem de ser realizado cuidadosamente para evitar danos nas suas arestas. Após 7 dias de cura húmida, arrumaram-se os blocos em paletes (Figura 25c) de forma a transportar os BTC até ao LC-IST, local onde foram conduzidos os diferentes ensaios de caracterização descritos em 3.7. No IST, os blocos permaneceram

expostos ao ambiente laboratorial, para uma temperatura entre cerca de 19-26 °C e uma HR entre 55-75 %.



Figura 25 – a) Misturadora de eixo vertical; b) prensa hidráulica semiautomática OSKAM V/F e BTC não estabilizados recém prensados; c) BTC estabilizados embalados para o transporte.

3.6. Exposição térmica

3.6.1 Definição da exposição térmica

No presente trabalho, os BTC foram submetidos a um aumento de temperatura a uma taxa constante, de 2 °C/min, permanecendo a 200, 400, 600, 800 ou 1000 °C durante aproximadamente 1 hora. Esta metodologia teve em consideração outros trabalhos realizados no IST em betão (Pino, 2013, Cunha 2014), que tiveram por base os princípios básicos definidos no documento da RILEM TC 129 MHT (2000). De acordo com este documento, a taxa de aquecimento e arrefecimento deveria ser de 0,5 °C/min. No entanto, de modo a conseguir reproduzir as curvas pretendidas no horário de funcionamento do laboratório, considerou-se uma taxa de aquecimento de 2 °C/min (Pino, 2013).

Inicialmente, foi necessário proceder à calibração do forno utilizado de modo a perceber o seu modo de funcionamento e a sua capacidade de reproduzir as curvas tempo-temperatura definidas face ao tipo e à quantidade de carga a ensaiar. Tendo em conta as características do forno, após diversos testes prévios, e de forma a se atingir a taxa pretendida de 2 °C/min na superfície dos BTC, optou-se por definir o *input* de uma taxa de aquecimento de 4 °C/min na programação do forno. A taxa de arrefecimento foi definida como 10 °C/min. Para manter o patamar de temperatura durante cerca de 60 minutos, aplicou-se uma taxa de arrefecimento de 2 a 4 °C/min nesse período, dependente do patamar desejado.

A figura 26^a apresenta o forno utilizado neste trabalho. As suas dimensões exteriores são aproximadamente 1,60 m de largura e de profundidade e interiores de 1,00x0,96x0,56 m³. Importa salientar que, de modo a mitigar a existência de perdas de temperatura através das pequenas aberturas existentes no forno, as paredes internas laterais e o topo das mesmas foram revestidos com lã cerâmica (Figura 26b). Foi ainda necessário criar uma base no forno para dispor os BTC. Optou-se por construir uma laje de betão revestida por tijolo refratário. Para não danificar as resistências do forno, por eventual

ocorrência de *spalling* (mais comum em betão), recorreu-se à colocação de uma rede metálica no topo, abaixo do local onde se encontravam as resistências (Figura 26c).

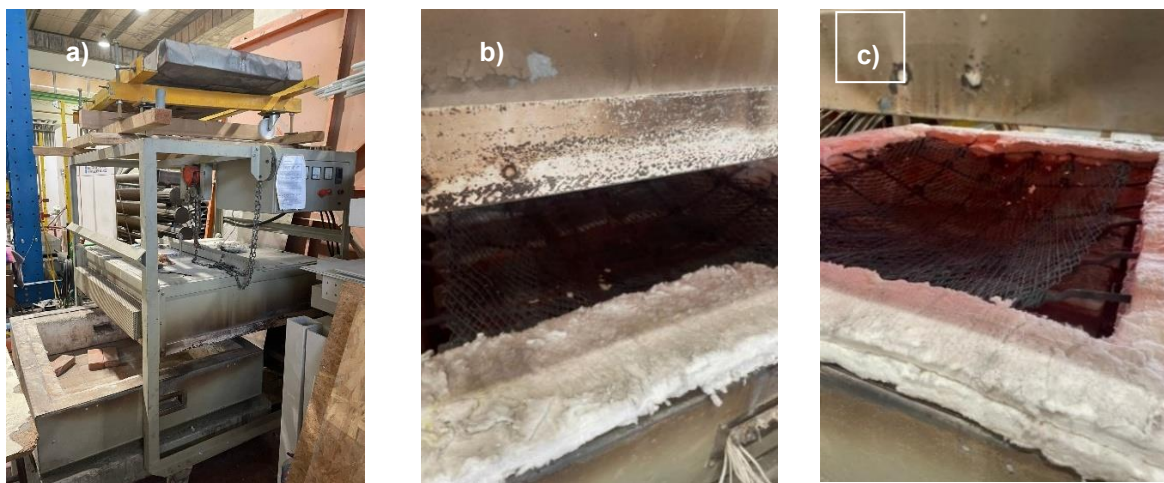


Figura 26 – a) Lã cerâmica; b) grelha metálica.

3.6.2. Escolha e preparação dos termopares

A escolha do tipo de termopar consistiu na sua capacidade de apresentar elevada precisão mesmo quando sujeito elevadas temperaturas. Desse modo, termopares do tipo K (Figura 27a) foram seleccionados devido à sua capacidade em suportar até 1260°C. A preparação teve início com o seu corte tendo em consideração o comprimento requerido. Considerou-se a utilização de 9 termopares com cerca 3 metros de comprimento e 18 termopares com 2,5 metros. Os termopares de 3 metros foram colocados na superfície dos BTC e os termopares de 2,5 metros foram inseridos no interior dos BTC, até meia-altura. Para tal, os BTC foram perfurados (Figura 27b) e os termopares foram colocados cuidadosamente no seu interior (Figura 27c), tendo-se procurado garantir a sua verticalidade e o contacto com o BTC. Por fim, o termopar foi fixado com bucha química. Excepcionalmente, nos blocos testados a 1000°C, foram instalados dois termopares no interior de cada tipo de bloco: um a meia altura, como nos demais, e outro a 1 quarto da profundidade. Em cada termopar, procedeu-se à soldagem de uma extremidade para captura dos valores de temperatura.

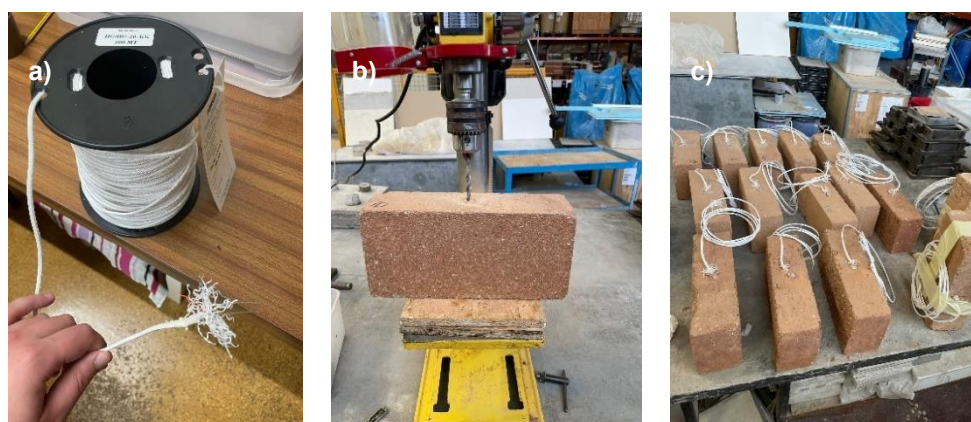


Figura 27 – a) Termopar tipo K; b) perfuração do bloco; c) termopares fixos no interior do BTC.

3.6.3. Disposição dos BTC e posição dos termopares

Para assegurar a mesma inércia térmica, foi necessário estabelecer a mesma disposição dos BTC dentro do forno para os patamares de exposição. Esta disposição encontra-se representada na Figura 28, salientando que os blocos estavam afastados em cerca de 10 cm. Os blocos definidos para serem ensaiados à absorção capilar (3.7.4) foram colocados nas pontas do forno para que apresentassem semelhante exposição térmica entre diferentes composições. Note-se que, visto que as resistências se encontram no topo do forno, a variação espacial da temperatura foi pouco significativa em planta, mas relevante em altura.

De forma a maximizar e uniformizar a área de exposição dos BTC, estes foram colocados no forno, assentes sobre pequenos calços de silicato de cálcio posicionados na base (Figura 29a). Estes calços, capazes de suportar altas temperaturas, permitiram desligar os blocos da laje, evitando o seu contacto e, consequentemente, conferindo uma maior área de exposição. No topo dos BTC foi colocado um “chapéu” de lã cerâmica (Figura 29b). As temperaturas no interior do forno foram controladas através de diversos termopares tipo K (identificados como “T” na Figura 28), sendo que o próprio forno também registava automaticamente as temperaturas ocorridas no topo do mesmo, perto das resistências. Os termopares foram ligados a um datalogger *SPIDER 8* através de conectores. O datalogger *SPIDER 8* (Figura 29c) teve como função a transmissão das leituras dos termopares para um computador, registrando as suas evoluções ao longo do tempo, recorrendo ao software *Catman* (Figura 29d).

Após a realização dos ensaios, os BTC foram identificados e cobertos em película aderente com o intuito de reduzir a exposição à humidade e conservar as suas propriedades.

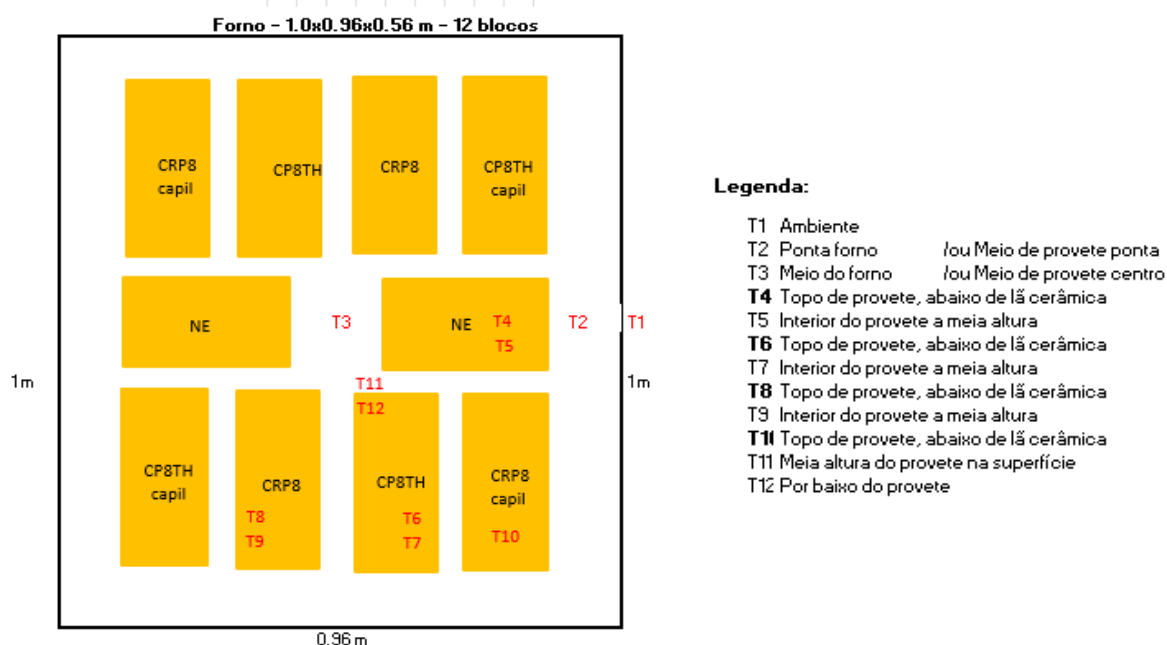


Figura 28 – Disposição dos termopares no forno e respetiva legenda.

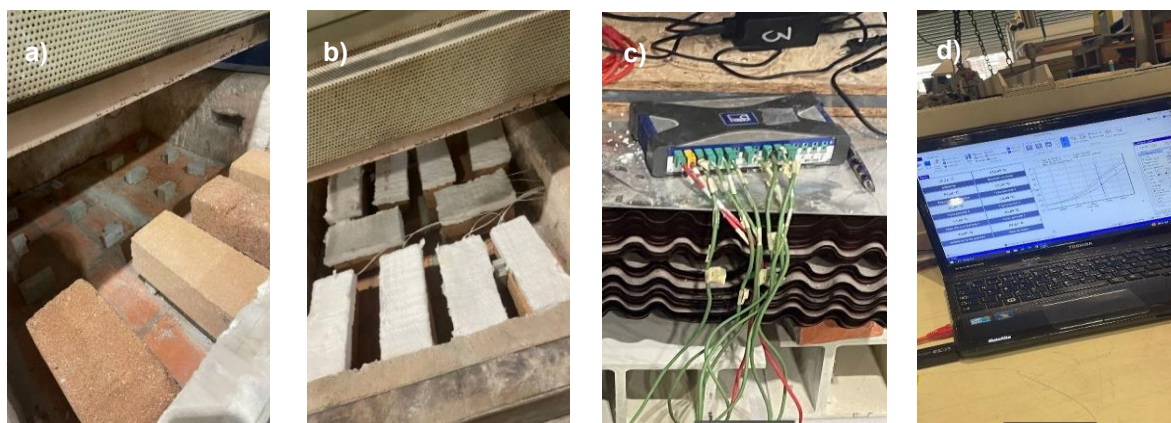


Figura 29 – a) Fragmentos de silicato de cálcio; b) chapéus de lã cerâmica; c) datalogger SPIDER 8; d) software Catman.

3.7. Caracterização dos BTC

No contexto deste trabalho, avaliou-se o comportamento físico, mecânico e de absorção dos BTC, ao longo da exposição a elevadas temperaturas. Na Tabela 8, apresentam-se os ensaios realizados no decorrer do trabalho, as normas consideradas e as condições em que foram realizados. Os blocos sujeitos à ação de elevadas temperaturas foram ensaiados aos 90 dias de idade. Foram também ensaiados aos 7 e 28 dias de idade blocos não sujeitos à ação térmica. As designações para as condições de ensaio foram as seguintes: Seco (SE) – BTC secos; Saturado (SAT) – BTC saturados em água; Ambiente laboratorial (AL) – BTC em equilíbrio com o ambiente laboratorial (temperatura de 19-26 °C e HR de 55-75 %). De salientar que os blocos SE foram secos no forno aquando da exposição aos diferentes patamares de temperatura.

Para os ensaios referentes ao módulo de elasticidade, à resistência superficial e à abrasão, foram ensaiados blocos inteiros. Nos ensaios relativos a massa volúmica, porosidade aberta, absorção por imersão e por capilaridade, resistência à compressão e velocidade de propagação de ultrassons foram considerados meio blocos com, em média, 147.5x140x90 mm³.

Tabela 8 – Ensaios realizados, respetivas normas e as suas condições.

Ensaio	Norma	Idade (dias)	Temperaturas	Condições do ensaio
Massa volúmica	EN 772-13 (2000)	0 e 90	20, 200, 400, 600 e 800 °C	Fresco e SE
Porosidade aberta	EN 772-4 (1998)	90	20, 200, 400, 600 e 800 °C	-
Resistência à compressão	EN 772-1 (2011)	7, 28 e 90	20, 200, 400, 600 e 800 °C	SE, SAT
Absorção por imersão	LNEC E394 (1993)	90	20, 200, 400, 600 e 800 °C	SE
Absorção por capilaridade	NP EN 772-11 (2002)	90	20, 200, 400, 600 e 800 °C	SE
Módulo de elasticidade	Videoextensometria	90	20, 200, 400 e 600 °C	SE
Velocidade de propagação de ultrassons	NP EN 12504-4 (2007)	7, 28 e 90	20, 200, 400, 600 e 800 °C	SE, SAT
Esclerómetro pendular	NP EN 12504-2 (2003)	90	20, 200, 400 e 600 °C	SE
Abrasão superficial	XP P13-901 (2001)	90	20, 200, 400, 600 e 800 °C	SE

3.7.1. Massa volúmica e porosidade aberta

A massa volúmica foi determinada de acordo com a norma EN 772-13 (2000) referente a blocos de alvenaria e baseou-se na proporção da massa em relação ao volume do BTC. O volume no estado endurecido foi determinado por pesagem hidrostática conforme o método especificado na NP EN 772-3 (2000). Quer para o estado fresco (in-situ, logo após a desmoldagem dos blocos) quer para os blocos não estabilizados, o volume foi calculado através da medição do bloco.

A porosidade aberta foi determinada em consonância com a EN 772-4 (1998), correspondendo à fração do volume total ocupado por poros interconectados, permitindo o transporte de fluidos para o interior do BTC. Esta propriedade foi estimada tendo em consideração a massa saturada dos blocos com superfície seca (m_{sat}) à pressão atmosférica, a massa seca (m_{seca}) e a massa obtida através de pesagem hidrostática (m_{hidro}), de acordo com a Equação 3.1. A porosidade aberta obtida é uma subestimativa, uma vez que os BTC não foram sujeitos a vácuo para retirar todo o ar dos poros antes de serem saturados. Este ensaio foi apenas realizado para os blocos estabilizados, visto que os não estabilizados desfazem-se após a sua imersão.

$$Porosidade\ aberta\ (\%) = \frac{m_{sat} - m_{seca}}{m_{sat} - m_{hidro}} * 100 \quad (3.1)$$

3.7.2. Resistência à compressão

A resistência à compressão foi determinada com base nos documentos normativos EN 772-1 (2011) e NBR 8492 (1984). Esta propriedade foi determinada em meio-blocos, com a maior face perpendicular ao vetor da carga. Para tal, foi utilizada uma prensa *Controls* com 3000 kN de capacidade e uma velocidade de carga mínima de 0,1 kN/s. Para averiguar se esta prensa apresentava baixa sensibilidade para valores reduzidos de força, recorreu-se a uma célula de carga com 400 kN de capacidade, conectada a um *datalogger SPIDER 8*. Previamente à realização do ensaio, tábuas de contraplacado foram colocadas entre o meio-bloco e os pratos superior e inferior da prensa (Figura 30a), a fim de se assegurar uma distribuição de carga uniforme no provete e minimizar o atrito. A resistência à compressão (f_c) foi determinada segundo a aplicação da Equação 3.2, em que A representa a área da superfície comprimida e F_c a força máxima necessária para a rotura do provete (Figura 30b). A partir da determinação da resistência à compressão determinou-se a resistência à compressão não confinada, $f_{c,un}$, de modo a reduzir a dependência desta propriedade da geometria dos blocos e do efeito benéfico de confinamento originado pelo atrito dos pratos da prensa (Bogas et al., 2023). Para tal, determinou-se $f_{c,un}$ em conformidade com a norma HB 195 (2002), multiplicando f_c por um fator de correção de 0,56, determinado em função da relação altura/largura dos blocos (Bogas et al., 2023).

$$f_c = \frac{F_c}{A} \quad (3.2)$$



Figura 30 – a) Prensa com BTC e tábuas de contraplacado na parte superior e inferior do bloco; b) rotura do BTC à compressão.

3.7.3. Absorção por imersão

O ensaio referente à absorção por imersão foi realizado conforme a especificação LNEC E 394 (1993) e a norma NBR 8492 (1984). Este ensaio não foi realizado para os BTC não estabilizados, uma vez que estes perdem a integridade após contacto com a água.

Após serem submetidos à ação de elevadas temperaturas, foi registada a massa seca dos BTC. De seguida, os provetes foram imersos em água até massa constante. Foram dispostas ripas de aproximadamente 0,5 cm entre o tanque e os blocos, permitindo que a absorção ocorresse também pela face inferior. A massa dos blocos saturados foi registada após remoção do excesso de água na superfície com um pano absorvente, assegurando que a superfície estivesse seca. A absorção de água total por imersão foi determinada em percentagem de massa de acordo com a Equação 3.3 em que A_t (% massa) representa a absorção total de água em massa.

$$A_t = \frac{m_{sat} - m_{seca}}{m_{seca}} \times 100 \quad (3.3)$$

3.7.4. Absorção de água por capilaridade

O ensaio de absorção capilar foi realizado conforme as normas NTC 5324 (2004) e NP EN 772-11 (2002). Esta propriedade foi determinada em meio-blocos e a sua preparação consistiu no isolamento das faces laterais, de modo que a absorção ocorresse apenas pela face imersa (Figura 31a). Foram ainda colocadas tiras metálicas na base do recipiente, evitando que o contato direto dos blocos com o tanque impedisse a absorção de água (Figura 31b). Ao contrário do recomendado nos documentos normativos, os provetes foram ensaiados em posição vertical, de modo a aumentar o tempo necessário para atingir a absorção total. Os meio-blocos foram pesados após 10 minutos, 20 minutos, 30 minutos, 60 minutos, 2 horas, 6 horas, 24 horas e 72 horas. Previamente à pesagem, a humidade superficial foi removida com um pano absorvente.

A Equação 3.4 representa o cálculo para aferir o coeficiente de absorção capilar.

$$C_{abs} = \frac{(m_t - m_i)}{A\sqrt{t}} \times 100 \quad (3.4)$$

Onde C_{abs} ($g/(cm^2 \cdot min^{0.5})$) simboliza o coeficiente de absorção capilar de água no instante t , m_t (g) é a massa do provete em t , m_i (g) é a massa do provete inicialmente, t (min) é o tempo decorrido de ensaio e A (m^2) representa a área de contacto entre a água e o bloco. Pelas razões mencionadas em 4.2.5, nomeadamente a possibilidade de comparar o desempenho dos blocos sujeitos a diferentes patamares de temperatura, neste estudo o coeficiente de absorção foi determinado até à raiz quadrada de 10 minutos, $C_{abs,10min}$. Para elevadas temperaturas, após este período, a taxa de absorção afasta-se da relação linear com a raiz do tempo (Rodrigues 2024).



Figura 31 – a) Face inferior dos BTC submersa bem como faces laterais isoladas; b) tiras metálicas.

3.7.5. Módulo de elasticidade

A aferição do módulo de elasticidade foi realizada por meio de vídeo-extensometria. Este procedimento permite medir a deformação através da captura contínua de imagens, com recurso a uma câmara de vídeo de alta-precisão e um computador. Tal deformação é medida através de pontos delineados na face de maior área do BTC, em que a distância entre os pontos representa a posição no instante inicial, isto é, o comprimento de referência, tal como é evidenciado na Figura 32.

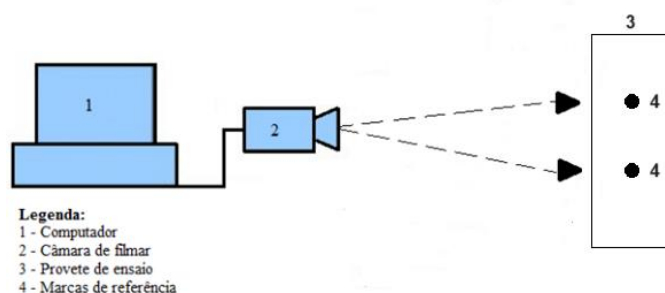


Figura 32 – Esquema do ensaio relativo ao módulo de elasticidade.

A preparação do ensaio consistiu no desenho de uma grelha numa das faces do bloco (Figura 33a). Depois, foi colocada fita-cola branca na grelha e desenhados pontos com uma caneta de acetato preta. O afastamento entre os pontos foi definido como 20 cm (Figura 33b). De seguida, o bloco foi posicionado na vertical entre os pratos da prensa *Instrom* (Figura 33c). Depois, preparou-se a câmara de alta-precisão, de modo a apontar diretamente para o bloco a ensaiar (Figura 33c). Posteriormente, um holofote foi ligado e a captação de dados, bem como a posição dos pontos de referência, foi definida no computador. O sistema foi ligado a um datalogger *SPIDER 8* para aquisição de dados. Foram realizados, no mínimo, três ciclos de carga-descarga, com um incremento de 0,5 MPa de tensão

aplicada, até que esta atingisse cerca de 1/3 da resistência à compressão, anteriormente definida segundo o mesmo esquema de ensaio.

O cálculo do módulo de elasticidade encontra-se na Equação 3.5, que relaciona as tensões (σ) aplicadas com a deformação elástica (ϵ) na região linear do gráfico tensão-deformação. O módulo de elasticidade indica o quanto um material se deforma elasticamente quando submetido a uma força.

$$E = \frac{\Delta\sigma}{\Delta\epsilon} = \frac{\sigma_f - \sigma_i}{\epsilon_f - \epsilon_i} * 10^{-3} \quad (3.5)$$



Figura 33 – a) Grelha; b) afastamento de 20 cm entre os pontos; c) provete na vertical e prensa Instron.

3.7.6. Velocidade de propagação de ultrassons

O ensaio foi executado com base na norma NP EN 12504-4 (2007), utilizando o equipamento *Pundit Lab+ (Proceq)*. Este ensaio avalia indiretamente a compacidade dos BTC. O aumento da velocidade de propagação das ondas implica uma maior densidade do material.

Para corrigir as irregularidades dos blocos e melhorar o contacto, aplicou-se vaselina sólida nos transdutores do equipamento (Figura 34a). Em resumo, o ensaio consiste em registar o intervalo de tempo necessário para a propagação das ondas entre os transdutores, que são dispostos em faces opostas do bloco (Figura 34b). A velocidade de propagação dos ultrassons é calculada dividindo a distância entre os transdutores (largura do bloco, 140 mm) pelo respetivo tempo de propagação.

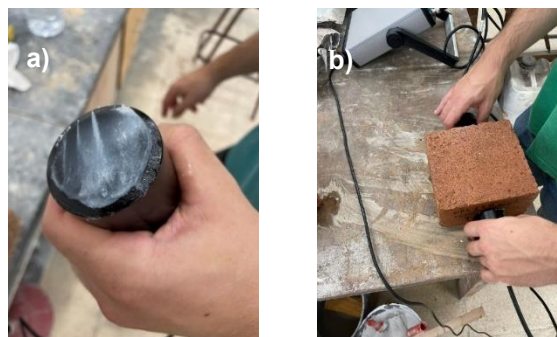


Figura 34 – a) Vaselina sólida num dos transdutores; b) transdutores nas faces opostas do BTC.

3.7.7. Esclerómetro pendular

O ensaio, de carácter não destrutivo, consistiu na medição da dureza superficial do bloco. O ensaio foi realizado segundo a norma NP EN 12504-2 (2003) com um esclerómetro do tipo PT. Em suma, o ensaio baseia-se em apoiar o esclerómetro no bloco e libertar o pêndulo, permitindo que este descreva um arco de 180° até atingir a superfície do bloco (Figura 35a). De modo a não haver perdas significativas de energia, os blocos foram encostados a uma superfície rígida e lisa. O ressalto caracteriza a energia recuperada, o resultado é lido na escala do equipamento (Figura 35b).

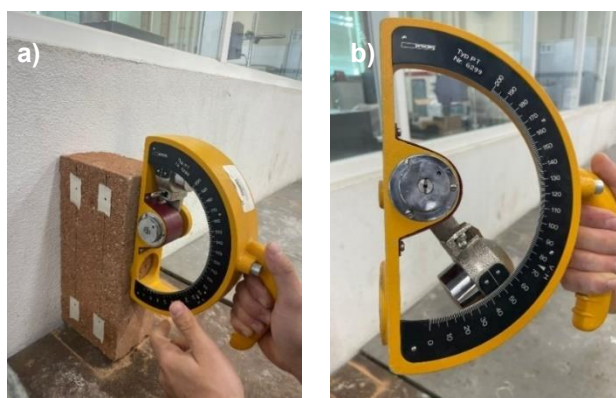


Figura 35 – a) Posição do pêndulo antes de ser libertado; b) medição lida no esclerómetro.

3.7.8. Abrasão superficial

Esta propriedade determina a resistência superficial do BTC quando exposto a fenómenos de erosão. O procedimento considerado baseou-se na norma XP P13-901 (2001). Executaram-se movimentos horizontais durante 1 minuto na face de maior área de um bloco inteiro com uma escova de aço na qual se acoplou um peso de 3 kg (Figura 36). No final, removeram-se as partículas soltas e pesou-se o bloco. O coeficiente de abrasão (C_a) foi calculado com base na Equação 3.6, que consiste no quociente entre a área da escova de aço (A) e a massa abradada (M_a). Quanto menor o coeficiente menor deverá ser a resistência à abrasão do bloco.

$$C_a = \frac{A}{M_a} \quad (3.6)$$



Figura 36 – Escova de aço com 3 kg acoplados.

4. Apresentação e análise de resultados

Este capítulo dedica-se à análise e interpretação dos resultados obtidos durante a campanha experimental previamente descrita no capítulo 3, concebida em função dos objetivos definidos no capítulo 1. Como mencionado, o foco principal consistiu em avaliar o comportamento a elevadas temperaturas de BTC estabilizados com um novo ligante - cimento reciclado obtido a partir de resíduos de pasta hidratada (CRP). Por comparação, foram também considerados blocos de terra comprimida de referência não estabilizados (NE) e estabilizados com cimento Portland (CP). As composições resumem-se na Tabela 9. Aos 90 dias de idade, antes e após o tratamento térmico (200 °C, 400 °C, 600 °C e 800 °C), os blocos foram analisados relativamente à massa volúmica no estado endurecido, porosidade aberta, absorção de água (imersão e capilaridade), resistência à compressão (seca e saturada), módulo de elasticidade, velocidade de propagação de ultrassons (seca e saturada), dureza superficial (índice esclerométrico), abrasão superficial e termogravimetria. Os BTC foram também alvo de análise visual. Para além disso, a massa volúmica fresca, a porosidade total e a resistência à compressão dos BTC aos 7 e aos 28 dias de idade (antes do tratamento térmico) também foi avaliada.

Tabela 9 – Composição dos BTC estudados.

Composição	M _{CP} (kg/m ³)	M _{CR} (kg/m ³)	M _{RCD} (kg/m ³)	M _{FA} (kg/m ³)	M _{TV} (kg/m ³)	M _{água,total} (kg/m ³)	a/l _{ef} (%)
CP8	140	-	390	1209	147	260	1,62
CRP8	-	136	380	1179	144	253	1,62
NE	-	-	441	1260	273	215	-

M_{CP}: massa de cimento Portland; M_{CR}: massa de cimento reciclado; M_{RCD}: massa de resíduos de construção e demolição; M_{FA}: massa de solo FA; M_{TV}: massa de resíduo argiloso TV; M_{água,total}: massa de água total da mistura; a/l_{ef}: razão água ligante efetiva.

4.1. Caracterização dos BTC

4.1.1 Estado fresco após prensagem

Para as composições indicadas anteriormente, na Tabela 10, encontram-se os resultados obtidos referentes à massa volúmica após a prensagem dos blocos (massa volúmica fresca, ρ_F). Com base na composição dos BTC, nas massas volúmicas dos materiais considerados e nos valores determinados para ρ_F , foi possível calcular o teor de vazios acidentais (V_v) presentes nos BTC após compactação (Tabela 10). Adicionalmente, foi estimada a porosidade total dos BTC (P_T), através da Equação 4.1, que representa a porosidade a longo prazo, após hidratação do ligante. Esta propriedade foi estimada somando-se V_v ao volume de água evaporada, não consumida na hidratação. Na Equação 4.1, M_w corresponde à massa de água total e ρ_w representa a massa volúmica da água, M_L refere-se à massa de estabilizante, w_b é a água quimicamente ligada após hidratação completa dos ligantes, assumido como 0,23 para CP e 0,22 para CR (Bogas et al., 2022), e α_H representa o grau de hidratação a longo prazo, assumido como 0,8 para ambos os ligantes.

$$P_T = V_v + \frac{M_w - \alpha_H \times w_b \times (1 - 0.254) \times M_L}{\rho_w} \quad 4.1$$

Tabela 10 – Massa volúmica fresca (ρ_F), volume de vazios após compactação (V_v) e porosidade total (P_T)

Composição	ρ_F (kg/m ³)	V_v (%)	P_T (%)
CP8	2145	4,0	28,1
CRP8	2092	6,2	29,7
NE	2190	4,4	25,9

A massa volúmica fresca diminuiu com a substituição de CP por CRP (Tabela 10). Como estes ligantes apresentaram massa volúmica e granulometria semelhantes, a redução de ρ_F deveu-se à natureza porosa e consequente elevada área superficial do CRP face ao CP, que conduziu a uma maior exigência de água e, por conseguinte maior dificuldade de compactação. Rigassi et al. (1985) sugerem um valor mínimo de ρ_F de 1870 kg/m³ e um valor ideal próximo de 2200 kg/m³. Os BTC produzidos cumpriram o requisito mínimo, mas apenas os BTC NE obtiveram valores próximos do valor ideal de ρ_F . A composição CP8 apresentou menor massa volúmica do que NE, visto ter sido produzida com maior teor de água, mais longe do seu TOA, de modo a respeitar a mesma composição de CRP. Os valores obtidos são semelhantes aos atingidos por Rodrigues (2024), que considerou as mesmas composições produzidas com os mesmos materiais e a mesma prensa hidráulica semi-automática OSKAM V/F.

Por sua vez, a P_T seguiu uma tendência inversamente proporcional à massa volúmica, tendo sido mais elevada no CRP8 e mais baixa no NE (Tabela 10). Novamente, estes valores foram semelhantes ao reportado por Rodrigues (2024) que, para as mesmas composições, verificou um aumento de aproximadamente 6% na porosidade total de BTC estabilizados com CRP face aos estabilizados com CP, confirmando a obtenção de blocos com menor compacidade quando se utiliza cimento reciclado como estabilizante. Esse facto deverá condicionar o seu comportamento nas restantes propriedades analisadas no presente trabalho.

4.1.2 Estado endurecido

Na Tabela 11, apresentam-se os resultados da resistência à compressão não confinada em condições laboratoriais ($f_{c,un,lab}$) aos 7, 28 e 90 dias de idade, antes da exposição a altas temperaturas. Esta propriedade foi determinada de acordo com 3.7.2. Na mesma tabela, indica-se também a resistência à compressão não confinada em condições saturadas e secas ($f_{c,un,sat}$ e $f_{c,un,seca}$, respetivamente) aos 28 dias.

Tabela 11 – Resistência média à compressão não confinada ($f_{c,un}$) aos 7, 28 e 90 dias para diferentes condições de ensaio

BTC	Teor de ligante (%)	P_T (%)	$f_{c,un,lab}$ (MPa)			$f_{c,un,sat}$ (MPa)	$f_{c,un,seca}$ (MPa)
			7 dias	28 dias	90 dias	28 dias	28 dias
CP8	8	28,1	4,5	6,9	7,4	3,2	9,9
CRP8	8	29,7	4,5	5,3	6,4	2,8	8,2
NE	0	25,9	1,5	1,8	1,8	-	4,0

Os blocos NE perderam a sua integridade após a imersão em água. Desse modo, de acordo com a HB 195 (2002), o valor mínimo de 1 MPa para a $f_{c,un,sat}$ apenas foi alcançado através da estabilização química dos BTC, quer com CP ou CRP. Para além disso, de acordo com a ARS 1333 (2018), os blocos CP8 e CRP8 enquadram-se na classe mais elevada de resistência à compressão saturada (Classe A). Por sua vez, a $f_{c,un,seca}$ variou entre 4,0 e 9,9 MPa (Tabela 11), excedendo o mínimo de 2 MPa recomendado pela HB 195 (2002). Todas as composições pertencem à classe mais elevada (Classe A) de resistência à compressão seca de acordo com a ARS 1333 (2018), recomendados para construções com maior exigência estrutural.

Como seria expectável, a $f_{c,un}$ aumentou com o grau de secagem do bloco (Tabela 11). Isto deve-se à pressão que a água exerce nos poros do bloco e à liquefação da argila não estabilizada do solo (Riza & Rahman 2015). Segundo Gonçalves (2023), uma diferença notável de resistência à compressão entre os estados seco e saturado é indicador de que as ligações químicas entre as partículas de solo são fracas. De facto, a eficácia da estabilização está relacionada com o rácio $f_{c,un,sat}/f_{c,un,seca}$ dos BTC (Riza & Rahman 2015). O mínimo recomendado para os BTC serem classificados como tendo durabilidade adequada em ambiente natural é de 0,33 (Heathcote 1995). Neste estudo, o rácio $f_{c,un,sat}/f_{c,un,seca}$ foi de 0,32 e 0,34, para CP8 e CRP8, sugerindo que o CRP foi tão eficiente na estabilização do solo como o CP. No entanto, a substituição de CP por CRP resultou numa redução da resistência à compressão a partir dos 28 dias de idade, independentemente da condição de humidade (Tabela 11). Isso resultou essencialmente da menor compacidade atingida pelos blocos de CRP após a sua produção. De facto, tendo também em conta os resultados obtidos por Rodrigues (2024), que produziu BTC com diferentes percentagens de incorporação de CP e CRP, utilizando os mesmos materiais e a mesma pressão de compactação, observa-se uma elevada correlação entre $f_{c,un,lab}$ e P_T , para o mesmo teor de ligante (8%) (Figura 37). Esta relação foi independente do tipo de estabilizante. Na Figura 37, confirma-se uma excelente correspondência da linha de tendência com os resultados obtidos no presente estudo para BTC estabilizados. Assim, a redução de resistência está principalmente relacionada com a menor compacidade alcançada nos blocos produzidos com CRP (4.1.1) e não com um eventual menor desenvolvimento de produtos de hidratação. No presente estudo, a resistência à compressão do CRP8 foi ligeiramente inferior ao reportado por Rodrigues (2024) para a mesma mistura. Para além de pequenas variações na produção do CRP e dos BTC, bem como do teor de humidade no momento da realização do ensaio, esta diferença pode resultar do CRP ter sido obtido a partir de blocos de pasta de cimento mais antigas, associadas a maior taxa de carbonatação e, como tal, menor capacidade de reidratação. Apesar da menor P_T , o NE desenvolveu uma resistência significativamente inferior à dos BTC estabilizados, salientando a importância da estabilização da terra.

Como esperado, o aumento de $f_{c,un,lab}$ ao longo do tempo foi superior nos BTC estabilizados em comparação com NE (Tabela 11). Isso resulta do desenvolvimento de produtos de hidratação nos BTC estabilizados. Além disso, o desenvolvimento da resistência até aos 7 dias de idade foi semelhante nos BTC com CP e CRP. Esta tendência está de acordo com o reportado em trabalhos anteriores para argamassas e betões produzidos com CRP e CP e igual relação a/l (Carrico et al., 2022). Segundo

Bogas et al. (2022), este fenómeno justifica-se pela elevada reatividade nos primeiros dias de idade do $\alpha'_H\text{-C}_2\text{S}$ presente no CRP.

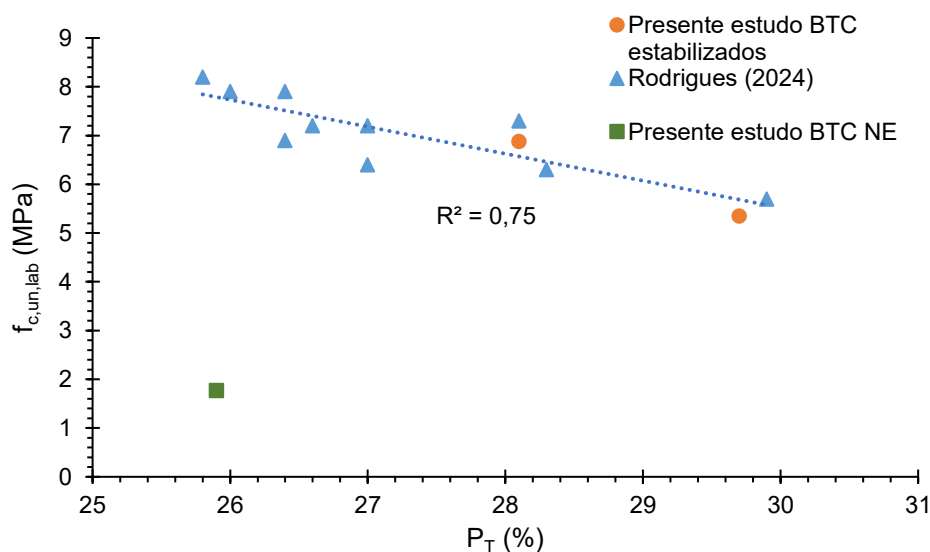


Figura 37 – Resistência à compressão não confinada em condições laboratoriais em função da porosidade total, comparativamente aos resultados obtidos por Rodrigues (2024).

4.2. Exposição a altas temperaturas

Como referido em 3.6.1, os BTC foram submetidos à temperatura de ensaio, a uma taxa constante de 2 °C/min, permanecendo a 200 °C, 400 °C, 600 °C, 800 °C ou 1000 °C durante aproximadamente 1 hora. A Figura 38 mostra o perfil de temperaturas teórico pretendido para o topo dos BTC, para uma taxa de aquecimento de 2 °C/min e de arrefecimento de 10 °C/min.

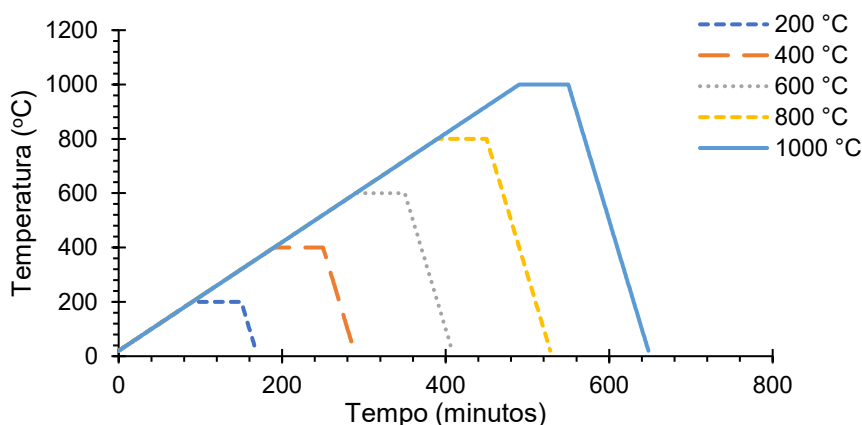


Figura 38 – Curvas de temperatura teóricas.

As temperaturas no interior do forno foram controladas através de termopares tipo K. Para os patamares de 200 °C, 400 °C, 600 °C, 800 °C foram necessários 12 termopares, dispostos no forno como ilustrado na Figura 28 (em 3.6.3). No patamar de 1000 °C, foi ainda colocado um termopar adicional num BTC de cada composição a uma profundidade correspondente a três quartos da altura do bloco. A leitura da temperatura ao longo do tempo foi realizada através da ligação dos termopares

a um datalogger *SPIDER 8* e recorrendo ao software *Catman*. As Figuras A 1 a A 10 do Anexo I mostram as curvas de temperatura-tempo registadas para cada composição. De forma geral, verificou-se que o patamar de temperatura proposto para o topo dos BTC foi alcançado. No entanto, a temperatura da superfície dos blocos não se manteve constante ao longo do patamar e variou aproximadamente ± 25 °C face à temperatura alvo. De referir ainda que, no último patamar, a 1000 °C (Figura A 5 do anexo I), os termopares localizados no topo dos BTC atingiram, no máximo, 975 °C. Isto sucedeu porque, por questões de segurança, a temperatura máxima do forno é limitada a 1200 °C, o que se mostrou insuficiente para atingir os 1000 °C no topo dos BTC.

Face às temperaturas alvo (T_{alvo}), destacam-se as seguintes diferenças médias de temperatura (Figuras A 1 a A 5 do Anexo I e Tabela A 2 do Anexo I): 200 °C – BTC NE 25 °C acima de T_{alvo} ; 400 °C – BTC NE 40 °C acima de T_{alvo} e BTC CP8 20 °C abaixo de T_{alvo} enquanto BTC CRP8 20 °C acima; 600 °C – BTC NE 20 °C acima de T_{alvo} ; 800 °C – BTC NE 75 °C abaixo de T_{alvo} e BTC CRP8 26 °C acima de T_{alvo} ; 1000 °C – BTC NE e BTC CRP8 50 °C abaixo de T_{alvo} e BTC CP8 25 °C abaixo de T_{alvo} . Importa também salientar que a temperatura na superfície dos blocos variou conforme a sua localização no forno elétrico. Conforme observado nas Figuras A 1 a A11 do Anexo I, os provetes colocados nas extremidades do forno elétrico apresentaram uma temperatura superficial até cerca de 7% inferior à dos provetes centrais (ver esquema da Figura 28 em 3.6.3). Porém, essas diferenças foram muito pouco significativas para os patamares de 200, 400 e 800 °C.

Conforme esperado, a temperatura registada no interior dos BTC foi diferente da registada no topo (Figuras A 6 a A 10 do Anexo I e Tabelas A 1 e A 2). Esta diferença variou apenas ligeiramente entre patamares de temperatura. As Figuras 39a e 39b e Figuras A 12 a A 14 do Anexo I representam os gradientes térmicos (°C/cm) no instante inicial e final da exposição dos blocos à temperatura alvo, respetivamente, referindo-se à variação da temperatura nos blocos relativamente à profundidade do termopar.

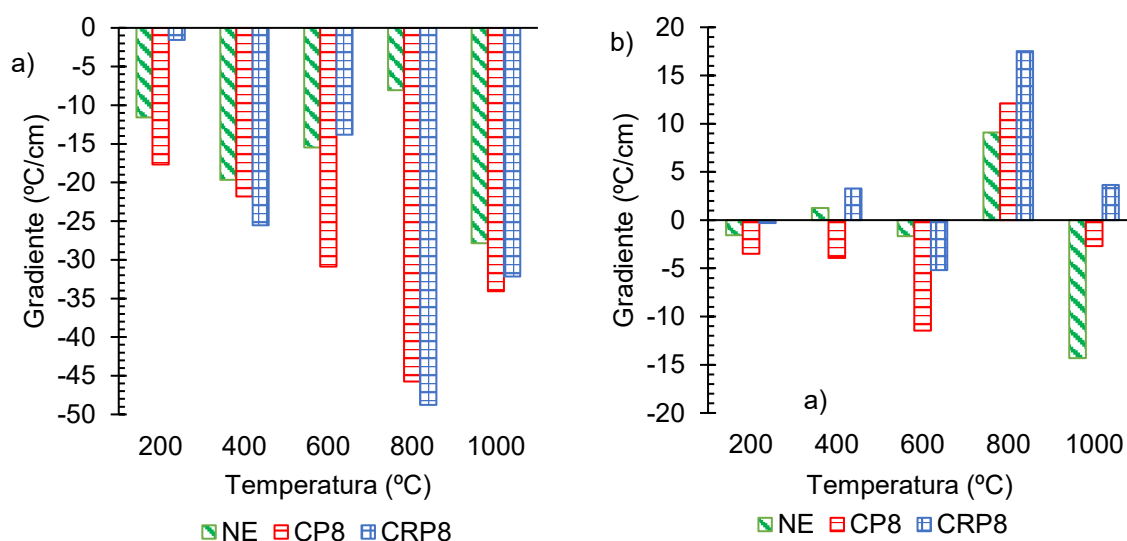


Figura 39 – Gradientes de temperatura na evolução da profundidade dos BTC no: a) Instante inicial; b) Instante final.

No instante inicial do patamar de exposição à temperatura alvo, observou-se que a temperatura registada na superfície dos BTC foi sempre superior à temperatura medida no interior dos mesmos, independentemente da composição (Figura 39a). Este comportamento foi particularmente evidente nos BTC CP8 e CRP8 (Figura 39a). A estabilização química tende a reduzir a porosidade dos blocos, diminuindo a difusividade térmica (Real et al., 2024a). No entanto, no instante final (1h após o início da exposição dos blocos à temperatura alvo), para alguns casos, observou-se uma inversão da tendência observada no instante inicial, ou seja, a temperatura no interior dos blocos foi semelhante, ou até superior à temperatura registada no topo. Este contraste no gradiente de temperatura, entre o instante inicial e o instante final de exposição à temperatura alvo, pode ser explicado pela elevada inércia térmica dos BTC, ou seja, uma elevada capacidade do material em resistir a mudanças de temperatura. De facto, uma hora após o início da exposição dos blocos à temperatura alvo, a temperatura interna dos blocos mantém-se elevada, enquanto a temperatura do ar no interior do forno elétrico começa a decrescer, situando-se abaixo do valor estipulado para a temperatura alvo. Como resultado, a superfície dos blocos começa a perder calor enquanto o interior mantém a sua temperatura por um maior período.

4.2.1 Análise visual

Os materiais que compõem os BTC sofrem transformações químicas e físicas a elevadas temperaturas, que afetam a sua integridade estrutural, cor e coesão. As Figuras 40-42 mostram a superfície dos blocos após serem expostos a cerca de 200 °C, 400 °C, 600 °C, 800 °C e 1000 °C em forno elétrico durante uma hora. A superfície dos blocos à temperatura ambiente encontra-se também representada para efeitos de comparação.

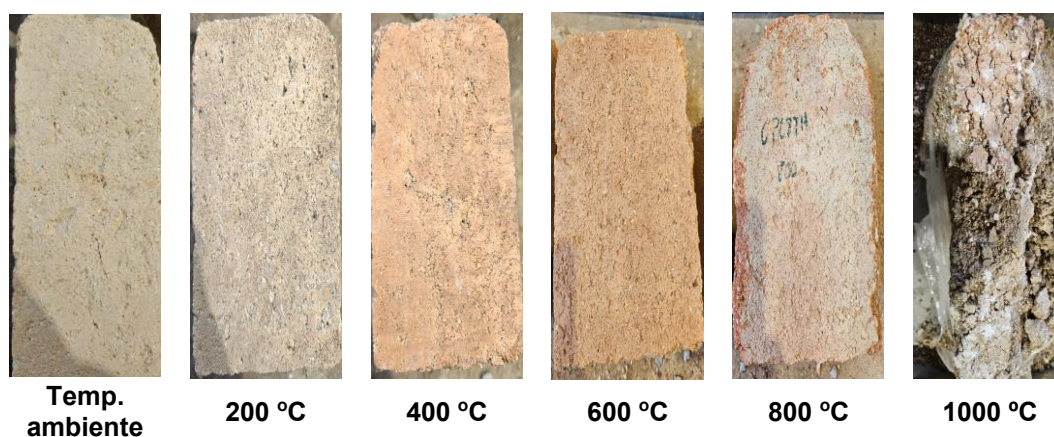


Figura 40 – Aspeto visual da superfície dos BTC com CP (CP8).

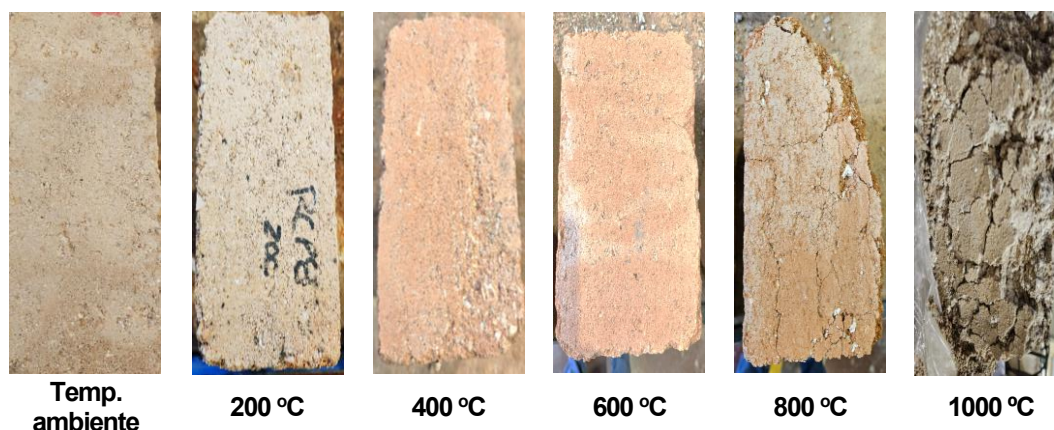


Figura 41 – Aspeto visual da superfície dos BTC com CRP (CRP8).

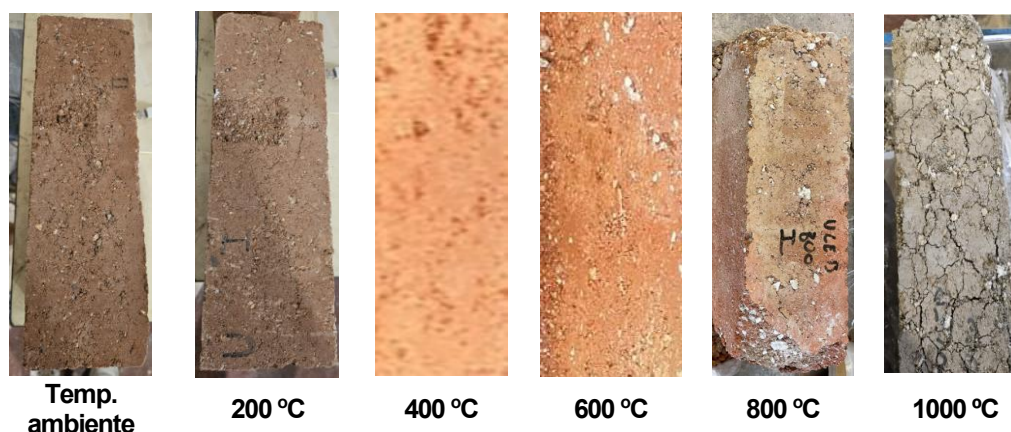
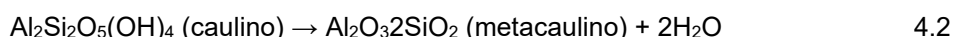


Figura 42 – Aspeto visual da superfície dos BTC não estabilizados (NE).

Após a exposição a 200 °C, não foram identificadas alterações significativas na coesão e integridade dos blocos face ao observado à temperatura ambiente, independentemente da composição. De facto, a única alteração assinalável consistiu no aparecimento de uma tonalidade ligeiramente mais clara da superfície dos blocos, provavelmente resultante da evaporação da água capilar e da secagem da superfície. Foi também visível o aparecimento de alguns pontos pretos na superfície dos blocos, que resulta da degradação térmica do material betuminoso presente nos RCD. Tal como a 200 °C, a exposição a 400 °C não resultou em alterações aparentes da coesão e integridade dos BTC. Verificou-se apenas uma alteração na cor/tonalidade da superfície dos blocos. Nestes casos, a superfície dos blocos adquiriu tonalidade alaranjada, independentemente da composição dos BTC. Isso é essencialmente atribuído à oxidação do ferro presente no solo (Ulery et al., 1993; Certini, 2025). Tendo em conta a cor acastanhada da terra FA, o ferro presente deverá estar na forma de goethite ($\alpha\text{-FeOOH}$) (United States Department of Agriculture, 2022). Assim, a partir de aproximadamente 300 °C, a goethite sofre desidroxilação e transforma-se em hematite ($\alpha\text{-Fe}^{+3}\text{O}_3$, Gialanella et al., 2010), adquirindo coloração vermelho-alaranjada (United States Department of Agriculture, 2022). Esta coloração foi mais intensa para os blocos NE do que para os blocos estabilizados (Figuras 40-42). Isto deveu-se, provavelmente, à maior proporção de FA+TV nos NE comparativamente com os BTC CP8 ou CRP8 e à ausência de estabilizante. Conforme observado nas imagens à temperatura ambiente, o estabilizante, de tonalidade acinzentada, esbate a coloração acastanhada da terra. Por sua vez, os BTC não

estabilizados foram produzidos com uma maior quantidade de TV, de tonalidade mais avermelhada (Figura 10b em 3.2), e que segundo a análise de fluorescência de raios X (Tabela 2 em 3.2) apresenta um teor mais elevado de ferro.

A exposição a 600 °C resultou no aparecimento de uma ligeira fissuração na superfície dos blocos, independentemente do tipo de BTC. Por um lado, a desidroxilação dos minerais argilosos ocorre essencialmente entre 400-600 °C (3.2). Este processo leva à expulsão de água em forma de vapor que, consequentemente, pode levar à retração e fissuração do bloco. As curvas termogravimétricas da terra e resíduo TV bem como as suas derivadas encontram-se apresentadas na Figura 13 em 3.2. Inicialmente, entre 20 e 120 °C, ocorreu uma pequena perda de massa que corresponde à evaporação da água livre. A partir desta temperatura, até aproximadamente 300-350 °C, ocorreu a remoção de água fisicamente adsorvida e interlamelar, caracterizada por uma perda de massa reduzida. Para o solo FA, entre este patamar de temperatura e aproximadamente 520 °C, ocorreu a desidroxilação da caulinite (Stevenson & Gurnick, 2016, Elgamouz et al., 2019), (Equação 4.2). A ilite, também identificada em FA, tende a perder a água por desidroxilação de forma mais gradual e para temperaturas ligeiramente superiores (Jiang et al., 2008). No caso do resíduo argiloso TV, a perda de massa ocorreu até aproximadamente 675 °C, sugerindo a desidroxilação mais evidente da ilite para além da caulinite (Jiang et al., 2008, Csáki et al., 2022). A maior evidência nas perdas de massa de TV resulta deste resíduo ser composto por uma fração de argila muito superior à de FA.



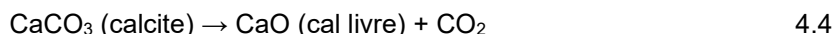
Para além da desidroxilação dos minerais argilosos, ocorre também a transformação de fase no quartzo (α -para- β) em torno de 573 °C, provocando uma expansão volumétrica súbita de 0,79% (Skinner et al., 1966), bem como uma respetiva contração após arrefecimento, o que também pode contribuir para o aparecimento de fissuração nos BTC (Hager, 2013).

Por outro lado, nos BTC estabilizados ocorre ainda a decomposição dos produtos de hidratação do cimento, nomeadamente do C-S-H, dos aluminatos de cálcio hidratados e da portlandite (CH). De acordo com vários autores, a fase mais importante de desidroxilação do C-S-H ocorre até cerca de 600°C (Tantawy, 2017, Menéndez et al. 2012, Bogas et al. 2022). A despolimerização do C-S-H ocorre de forma mais importante a partir dos 400 °C, acompanhada pela formação de silicatos de cálcio anidros e respetiva perda da sua capacidade ligante (Tantawy, 2017; Bogas et al., 2022). Por sua vez, a desidroxilação da portlandite em cal livre (Equação 4.3) ocorre entre cerca de 400-500 °C (3.4.2).



Aos 800 °C, a fissuração dos blocos foi mais acentuada em todas as composições, esta fissuração foi igualmente acompanhada por perda de coesão. Ainda assim, observou-se ligeiramente maior fissuração e dano superficial nos BTC com CRP do que nos restantes BTC. Como referido, no caso dos BTC com CP ou CRP, a decomposição do C-S-H a esta temperatura deverá ser total. Para além disso, ocorre também a descarbonatação da calcite, transformando-se em cal livre (Equação 4.4)

entre 600-900 °C (Karunadasa et al., 2019), principalmente até 750 °C (4.2.2). Existe também a possibilidade de ter ocorrido uma reidratação da cal durante o arrefecimento dos blocos em contacto com o ar atmosférico. Conforme observado em 4.2.2, isso terá sido mais relevante nos BTC expostos a 1000 °C. De acordo com Tantawy (2017), isso favorece o aparecimento de fissuração. Conforme descrito em 3.6.3, após saírem do forno elétrico os blocos foram imediatamente identificados, cobertos com película aderente e guardados numa caixa de polipropileno até à realização dos ensaios (Figura 43), minimizando a ocorrência da reidratação da calcite. No entanto, esse fenómeno poderá ter ocorrido parcialmente durante o arrefecimento dos blocos no forno.



É ainda necessário considerar a decomposição da calcite devido à presença de RCD na composição dos BTC, os quais incluem resíduos antigos de betão e argamassa (45% em massa, em 3.3). Assim, pode ter ocorrido a reidratação da cal após o arrefecimento do bloco, o que também contribui para a perda de coesão, inclusive nos NE. A ocorrência de possível sinterização da reduzida proporção de argila presente nos blocos, não terá sido significativa para impedir a perda de coesão dos BTC NE.

A fissuração resulta ainda da expansão térmica diferencial e restrita dos blocos, sujeitos a gradientes de temperatura (Nshimiyimana et al 2024a).

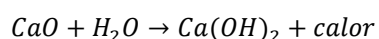


Figura 43 – BTC cobertos com película aderente na caixa de polipropileno.

A exposição a 1000 °C resultou numa perda de coesão total dos BTC, independentemente da sua composição (Figuras 40-42). Acima de 900 °C, poderá ter ocorrido o início de uma rápida vitrificação da superfície do bloco, impedindo a libertação do vapor de água e do dióxido de carbono resultantes da desidroxilação dos minerais argilosos, da portlandite e da calcite (Bruno et al., 2019; Akinshipe & Kornelius, 2017). Isto favorece a criação de poros de grandes dimensões e irregulares, resultando numa consequente fissuração do bloco (Bruno et al., 2019). De facto, segundo a Figura A 5 (Anexo I), a temperatura na superfície do bloco foi atingida mais rapidamente do que tinha sido inicialmente definido, o que terá favorecido a ocorrência de uma rápida vitrificação. A ocorrência de vitrificação exige a presença de sílica, sobretudo na forma de feldspato, identificado em FA (3.2). A mudança de cor dos BTC para uma tonalidade mais escura após exposição a 1000 °C está relacionada

com a alteração para uma atmosfera redutora (Akinshipe & Kornelius, 2017), com redução dos óxidos de ferro e possível formação de fases vítreas (Castellanos et al., 2012). A descarbonatação dos carbonatos, nomeadamente de CaCO_3 , com consequente libertação de CO_2 , contribui para a criação de um ambiente redutor no forno (Nshimiyimana et al., 2024a).

Relativamente ao interior dos blocos, de forma semelhante ao observado na superfície, ocorreu também uma mudança de cor a partir de cerca de 400 °C (Figura 44). No entanto, verificou-se uma diferença de tonalidade entre o interior e as zonas mais próximas da superfície do bloco. Isto deve-se, em grande parte, ao facto de a superfície dos BTC ter ficado diretamente exposta à atmosfera rica em oxigénio do forno elétrico, o que conduziu à oxidação dos compostos de ferro. Por outro lado, o interior do bloco ficou menos exposto ao oxigénio, resultando num ambiente redutor, no qual a oxidação foi limitada. Consequentemente, os compostos de ferro não se oxidaram, conferindo ao interior uma tonalidade mais escura. Para além disto, de acordo com Akinshipe e Kornelius (2017), a libertação de vapor de água pode impedir a penetração de oxigénio no interior do bloco. Consequentemente, o carbono reage com o vapor libertado, formando gases fortemente redutores, nomeadamente, hidrogénio e monóxido de carbono, que, a elevadas temperaturas, podem alterar o estado de oxidação do ferro, originando variações de tonalidade no interior do bloco. Salienta-se também a ocorrência da libertação de calor aquando da imersão em água dos blocos expostos a 800 °C e a 1000 °C. Esta reação deveu-se à presença significativa de cal livre, resultante principalmente da decomposição da calcite (Equação 4.4), que ao entrar em contacto com a água produz hidróxido de cálcio (Equação 4.5). O resultado da imersão em água de um BTC com CP após exposição a 1000 °C é apresentado na Figura 45, ocorrendo o consumo rápido de água e a consequente formação de CH, acompanhado de fenómenos de expansão. Este fenómeno é demonstrado em 4.2.2.



4.5



200 °C



400 °C



Figura 44 – Interior dos BTC com CRP e CP após exposição a diferentes temperaturas.



Figura 45 – Imersão em água de um BTC com CP após exposição a 1000 °C – Hidratação de cal livre.

4.2.2 Análise termogravimétrica

Procedeu-se à realização de análises termogravimétricas (TG) aos vários tipos de BTC sujeitos a diferentes temperaturas de exposição. Estes ensaios foram efetuados de acordo com o descrito em 3.2, apresentando-se na Figura 46 a curva de TG e derivada da TG (DTG) para a composição BTC CRP8. Nas Figuras A 17 a A 21 do Anexo III, encontram-se ainda as curvas termogravimétricas (TG) e de DSC (Differential scanning calorimetry) das restantes composições. A configuração das curvas de DSC para as restantes composições foi bastante semelhante.

Nos BTC expostos a temperaturas inferiores a 600 °C, observa-se um pico claro de perda de massa entre cerca de 400 e 500 °C, que está associado à desidroxilação dos minerais argilosos, conforme documentado em 3.2. Como esperado, para temperaturas de exposição superiores a 600 °C, os minerais argilosos desaparecem, demonstrando que a desidroxilação foi efetiva a partir de 600 °C, inclusive. Por sua vez, até 800 °C, observa-se uma perda de massa significativa por descarbonatação em todas as misturas (picos entre cerca de 600-750 °C). Isso resulta essencialmente da presença de calcite nos RCD, dado que em 3.2 não foi identificada a presença significativa de calcite na terra FA e resíduo TV.

As perdas de massa por descarbonatação tendem a ser mais elevadas nos BTC estabilizados, e prolongam-se desde cerca de 500-550 °C. Nestas misturas, mesmo para temperaturas inferiores a 400 °C, não se identifica a presença significativa de C-H resultante do ligante, devendo ter ocorrido a sua carbonatação. Os compostos recém-formados deverão apresentar menor cristalinidade, o que faz com que estejam associados a perdas de massa inferiores às dos restantes carbonatos presentes na mistura (Real et al. 2020). O reduzido teor de ligante utilizado nos blocos, de apenas 8% da massa de terra, torna as perdas de massa por desidratação dos produtos hidratados menos evidentes. No entanto, à temperatura ambiente e até 200 °C, são observadas maiores perdas de massa nos BTC estabilizados face aos não estabilizados (NE). Como se verifica na Figura 46 e nas Figuras A 18 e A 20 do Anexo III, as perdas de massa até 400 °C foram muito semelhantes nos BTC com CRP e com CP, indicando a idêntica capacidade de hidratação destes estabilizantes. O mesmo foi confirmado em trabalhos anteriores realizados em pastas cimentícias (Bogas et al., 2020, Bogas et al., 2022).

Nos BTC expostos a 1000 °C, aparece um pico próximo dos 400 °C, que resulta da reidratação parcial da cal livre, entretanto formada por descarbonatação dos constituintes carbonatados da amostra. Isso está de acordo com o fenómeno observado na Figura 45. Finalmente, na curva de DSC do CRP8, e que se confirma para as restantes misturas (Figuras A 17, 19 e 21 do Anexo III), distingue-se um pico adicional perto de 573 °C, resultante da transformação do quartzo α em β . Confirma-se a presença relevante de areia siliciosa na amostra.

As variações entre as curvas de TG das diferentes composições estão também relacionadas com a heterogeneidade das amostras e as temperaturas a que estas foram efetivamente sujeitas para cada patamar de temperatura de exposição (variando com a posição do bloco e a profundidade a que foi obtida a amostra para análise, que foi recolhida da região central dos BTC).

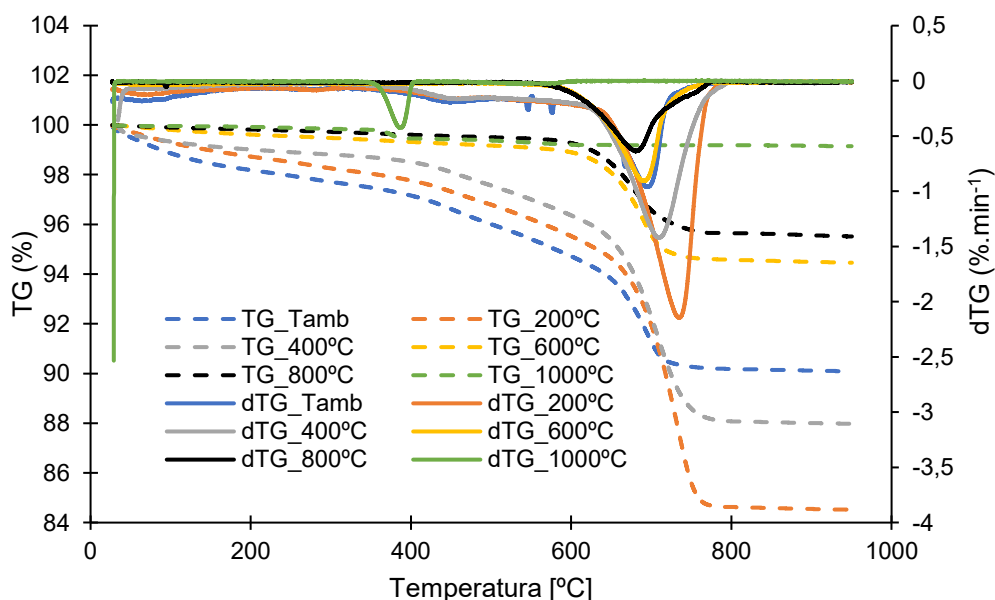


Figura 46 – Curvas termogravimétricas e respetivas derivadas para a composição BTC CRP8

4.2.3 Massa volúmica e porosidade aberta

A Tabela 12 apresenta os valores referentes à massa volúmica após endurecimento (ρ) e à porosidade acessível à água dos BTC previamente e posteriormente à exposição a elevadas temperaturas. A perda de coesão completa dos BTC após exposição a temperaturas próximas de 1000 °C impossibilitou a determinação destas propriedades. No caso dos NE, o volume dos blocos foi determinado por intermédio da medição da sua geometria. O documento normativo ARS 1333 (2018) classifica os BTC de acordo com a sua massa volúmica no estado endurecido da seguinte forma: Classe A, B e C para massas volúmicas entre 1900–2200 kg/m³, 1800–1900 kg/m³ e 1700–1800 kg/m³, respetivamente. À temperatura ambiente, todos os blocos enquadram-se na Classe A, independentemente da composição.

Tabela 12 – Massa volúmica no estado endurecido (ρ) e porosidade aberta para diferentes temperaturas.

Composição	Propriedades	Temperatura ambiente	200 °C	400 °C	600 °C	800 °C
CP8	ρ (kg/m ³)	1988	1905	1888	1815	1713
	Porosidade aberta (%)	18,4	24,8	26,6	28,7	30,8
CRP8	ρ (kg/m ³)	1960	1887	1857	1792	1669
	Porosidade aberta (%)	18,5	24,5	26,8	28,9	32,5
NE	ρ (kg/m ³)	1988	1958	1936	1869	1812
	Porosidade aberta (%)	-	-	-	-	-

Nos BTC estabilizados, a massa volúmica no estado endurecido seguiu a mesma tendência da massa volúmica no estado fresco, tendo sido superior no CP8 do que no CRP8 (Tabela 12), independentemente da temperatura. Conforme esperado, a massa volúmica dos BTC diminuiu com o aumento da temperatura de exposição, ocorrendo um respetivo aumento do teor de porosidade aberta (Tabela 12, Figura 47). Dado que os BTC CP8 e CRP8 foram produzidos com o mesmo teor de água (Tabela 9), a comparação de ρ entre estas composições considera essencialmente a decomposição térmica dos produtos de hidratação dos ligantes, embora possam ocorrer também eventuais perdas de massa por alteração da estrutura ou danos provocados nos blocos.

A massa volúmica à temperatura ambiente (T_{amb}) foi determinada em blocos não secos, após equilíbrio com as condições de humidade do laboratório. Desse modo, a variação de massa volúmica entre o estado fresco e endurecido à T_{amb} depende do grau de secagem de cada composição. Visto que os BTC com CP e CRP foram produzidos com o mesmo teor de água, seria de esperar reduções de massa volúmica do estado fresco para o endurecido semelhantes. Porém, verificou-se que o CP8 (157 kg/m³) apresentou maior perda de massa do que o CRP8 (132 kg/m³). Assumindo que possuem níveis de hidratação idênticos, isso significa que apesar de CRP8 possuir maior P_T , a secagem terá sido mais lenta do que no CP8. Uma das razões deverá estar relacionada com a microestrutura mais refinada do CRP8, conforme demonstrado em estudos anteriores (Bogas et al., 2020, Bogas et al., 2022). De facto, a natureza porosa do CR faz com que parte do espaço capilar inter-partícula seja reduzido após absorção da água da mistura (Bogas et al., 2020). Real et al. (2024b) analisaram a higroscopicidade e adsorção de diferentes tipos de BTC, confirmando a tendência para maiores tempos de secagem nos BTC com CR. Porém, verifica-se igualmente uma maior redução de massa no CP8 do

que no CRP8 entre T_{amb} e 200 °C, o que exclui a hipótese de ser apenas a influência da microestrutura. Em parte, isso pode também estar relacionado com o maior desenvolvimento de etringite nas misturas com CP (Bogas et al., 2022, Subcapítulo 3.4.2). De facto, a desidratação da etringite ocorre a partir dos 60-70 °C (Shimada & Young, 2001; Zhou et al., 2004). Este composto é formado quando os iões sulfato provenientes do gesso reagem com os silicatos de cálcio na presença de água (Mehta & Klein, 1967).

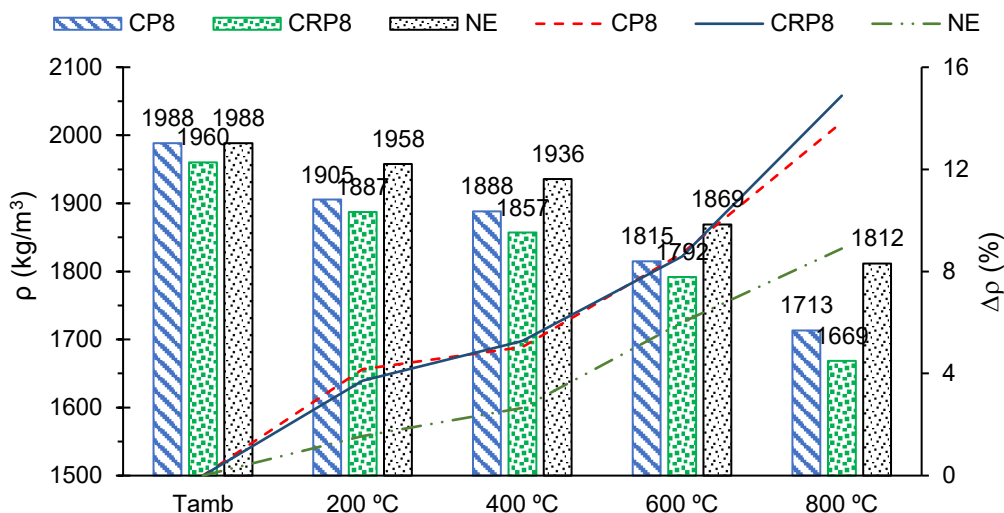


Figura 47 – Evolução da massa volúmica no estado endurecido (ρ) com a temperatura e perda relativa de massa face à temperatura ambiente (T_{amb}).

De qualquer forma, conforme observado nas Figuras 62 e 63, a perda de massa em função da temperatura foi muito semelhante nos CRP8 e CP8, podendo-se considerar que apresentaram idêntico comportamento. No intervalo 200-400 °C, a maior redução de massa foi observada nos CRP8, compensando a menor perda inicial até 200 °C. Isso está de acordo com o verificado em 3.4.2 e com o reportado por Real et al. (2020), que observaram, entre 270-330 °C, uma perda de massa ligeiramente superior em pastas de CR comparativamente com pastas de CP. Segundo os autores, este evento pode ser atribuído à formação de quantidades ligeiramente superiores de monossulfoaluminato de cálcio hidratado (AFm) no CR. Entre 400-600 °C, ocorre uma redução de massa volúmica ligeiramente superior no CP8, dado o CP tender a desenvolver maior teor de C-H do que o CR (Bogas et al., 2020; Bogas et al., 2022). Finalmente, entre 600 °C e 800 °C, verificam-se maiores perdas no CRP8 (123 kg/m³) do que no CP8 (108 kg/m³), essencialmente resultantes do maior teor inicial de substâncias carbonatadas, tal como observado em 4.2.2. Ocorre também maior dano superficial nos CRP8 (4.2.1). A maior quantidade de substâncias carbonatadas no CR é igualmente documentada por outros autores (Real et al., 2020; Bogas et al., 2020). Este fenómeno está associado à maior carbonatação dos resíduos da pasta de cimento e à possível carbonatação do cimento reciclado após o processo de termoativação (Bogas et al., 2022).

Por sua vez, o BTC NE, apesar de não ser estabilizado e, como tal, não reter água de hidratação, apresentou uma perda de massa igual ao CP8. Isso resulta do NE ter sido inicialmente produzido com menor teor de água de mistura. A redução da massa volúmica endurecida nos BTC NE

deve-se, principalmente, à perda de água livre e fisicamente adsorvida na superfície das partículas, bem como à resultante da desidroxilação das argilas e da descarbonatação dos carbonatos. Desse modo, e como esperado, a maior perda de massa ocorreu entre 400°C e 600°C, devido à desidroxilação das argilas, e entre 600°C e 800°C, associada essencialmente à descarbonatação dos compostos carbonatados do RCD.

A porosidade aberta aumentou de forma semelhante nos BTC com CP e CRP até 600 °C (Tabela 12 e Figura 48). A 800 °C ocorreu um aumento mais expressivo da porosidade no CRP8, que acompanha a maior perda de massa verificada anteriormente. Esta porosidade não resulta apenas dos fenómenos de desidratação, desidroxilação e descarbonatação, mas também do desenvolvimento de fissuração (4.2.1). Face a estes resultados, conclui-se que a substituição de CP por CR conduz a um aumento de porosidade a altas temperaturas, em parte já resultante da menor compacidade com que foram produzidos. No entanto, importa salientar que a porosidade aberta apenas tem em consideração os poros interconectados, ou seja, aqueles que são acessíveis à água, sendo uma subestimativa da porosidade total, que é superior no CRP8. Gamas semelhantes de porosidade aberta foram reportadas por Nshimiyimana et al. (2024a) em BTC estabilizados com 8% CP expostos a 1200 °C.

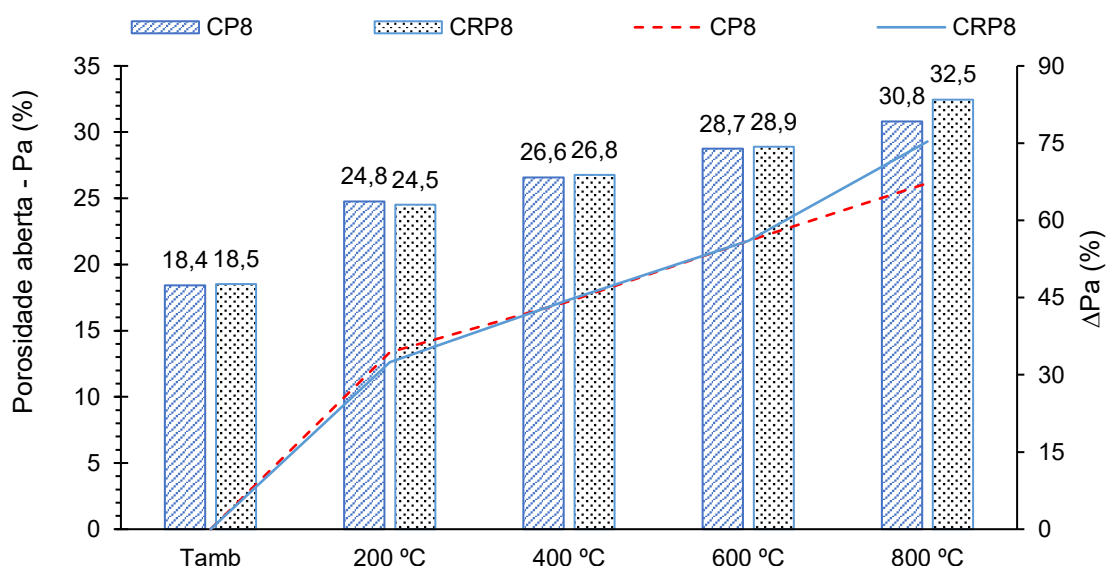


Figura 48 – Evolução da porosidade aberta com o aumento de temperatura e perda relativa de porosidade face à temperatura ambiente (T_{amb}).

4.2.4 Absorção de água por imersão

A absorção de água durante a imersão do BTC está diretamente relacionada com a porosidade acessível à água, fornecendo uma indicação da interconectividade da microestrutura dos BTC e da sua suscetibilidade à penetração da água. Na Figura 49, apresentam-se os valores médios do ensaio de absorção por imersão até massa constante, sendo representados em percentagem de massa, Abs_m . Não foi possível determinar esta propriedade para os BTC NE, pois estes BTC perderam a integridade poucos minutos após imersão em água.

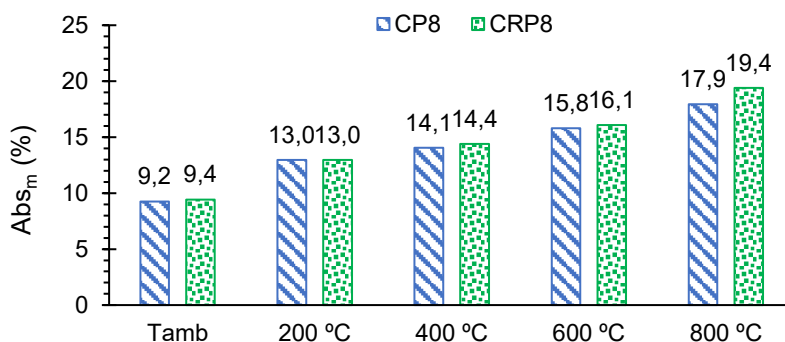


Figura 49 – Evolução da absorção por imersão a longo prazo em percentagem de massa (Abs_m) com a temperatura.

A norma NBR 8492 (1984) exige que a absorção após 24 horas de ensaio seja inferior a 20% (em massa) para que a aplicação dos BTC seja recomendada em ambientes húmidos. À temperatura ambiente, os blocos satisfizeram largamente o critério, mesmo após saturação até massa constante (Figura 49). Como esperado, a absorção aumentou com a temperatura de exposição, seguindo a tendência verificada para a porosidade aberta. No entanto, mesmo após exposição a 800 °C, ambos os tipos de BTC estabilizados cumpriram o estipulado na NBR 8492 (1984).

Mais uma vez, o BTC CRP8 apresentou o mesmo comportamento do BTC CP8 até 600 °C, desenvolvendo idênticos níveis de absorção de água. Note-se que, dado que a massa volúmica do CRP8 é ligeiramente inferior à do CP8, iguais percentagens de absorção em massa significam absorções ligeiramente menores em volume no CRP8. Isso não seria esperado, visto que os BTC com CRP foram inicialmente produzidos com porosidade total superior à dos BTC com CP (4.1.1). Segundo Cruz e Bogas (2024), a absorção de água nos BTC com CR tende a ser dificultada pelo desenvolvimento de uma microestrutura mais fina e menos conectada. Conforme referido, isso resulta da formação de uma microestrutura bifásica, caracterizada por porosidade intrapartícula e interpartícula (Bogas et al., 2020). Neste caso, para o mesmo teor de água, a existência de porosidade intrapartícula faz reduzir a porosidade interpartícula comparativamente com pastas de CP com idêntico a/l (Real et al., 2020). Consequentemente, a microestrutura sofre um refinamento, diminuindo a interconectividade entre os poros. De facto, os valores de porosidade aberta determinados à temperatura ambiente (4.2.3) foram 62% e 66% da porosidade total no CRP8 e CP8 (4.1.1), respetivamente. Por sua vez, aos 200 °C, os valores de porosidade aberta corresponderam a 83% e 88% da P_T para os BTC CRP8 e CP8, respetivamente. Isso confirma a maior interconectividade da microestrutura do CP8 comparativamente com a do CRP8.

Como referido anteriormente, até aos 600 °C, esta propriedade foi sempre semelhante nos BTC com CP e CRP. Apenas após a exposição a 800 °C, a Abs_m foi 8% superior em CRP8 do que em CP8. A maior perda de massa por descarbonatação e o desenvolvimento de fissuração, com aumento da conectividade do sistema, terão facilitado o maior aumento de porosidade aberta no CRP8. Ainda assim, até temperaturas de exposição de 800 °C, os BTC estabilizados demonstraram uma forte resistência à ação da água, preservando tanto a sua integridade física como a coesão entre partículas, independentemente do tipo de estabilizante (Figura 50).



Figura 50 – Imersão dos BTC em água até massa constante.

Como expectável, observa-se um elevado coeficiente de correlação linear ($R^2=0,98$) entre a porosidade aberta (acessível à água) e a absorção de água por imersão até massa constante (Figura 51).

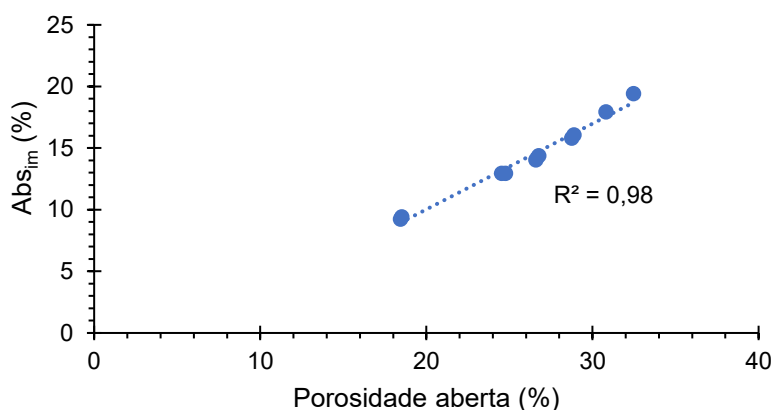


Figura 51 – Relação entre a porosidade aberta e a absorção de água por imersão em percentagem de massa (Abs_m).

4.2.5 Absorção de água por capilaridade

Nas Figuras 52 e 53, encontram-se as curvas da evolução da absorção por capilaridade até 72 horas dos BTC CP8 e CRP8 submetidos a diferentes temperaturas, conforme o ensaio apresentado em 3.7.4. Para os blocos expostos à temperatura ambiente, observa-se que a absorção evoluiu de forma aproximadamente linear com a raiz quadrada do tempo nas primeiras 6 horas. Após este período, os blocos aproximam-se da saturação e ocorre uma contribuição progressiva dos poros menos acessíveis à água, reduzindo a taxa de absorção. Nos blocos sujeitos a temperatura mais elevada, o aumento de porosidade e conectividade levou ao incremento significativo da taxa de absorção inicial e à redução do período até à ocorrência de saturação. Por exemplo, para o CRP8, essa transição na taxa de absorção ocorreu a partir dos 120 minutos, 60 minutos, 30 minutos e 10-20 minutos, para 200 °C, 400 °C, 600 °C e 800 °C, respetivamente. Assim, dado que o período em que a absorção evoluiu de forma linear com a raiz quadrada do tempo variou com a temperatura, decidiu-se considerar apenas o coeficiente de absorção referente aos primeiros 10 minutos de ensaio ($C_{abs, 10min}$). Note-se que este parâmetro é afetado pelas características superficiais do bloco, conduzindo a uma maior variabilidade dos resultados. Ainda assim, é o parâmetro mais comum considerado na literatura para a

caracterização da absorção capilar dos BTC, visto que são materiais de porosidade elevada. O coeficiente de absorção capilar (C_{abs}) e a absorção capilar, após 72 horas, ($Abs_{c,72h}$), encontram-se na Tabela 13.

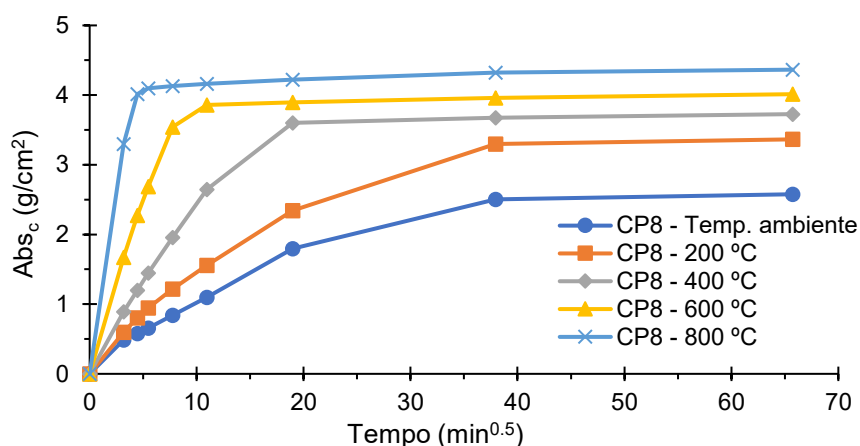


Figura 52 – Absorção capilar ao longo do tempo para as diferentes temperaturas para o BTC CP8.

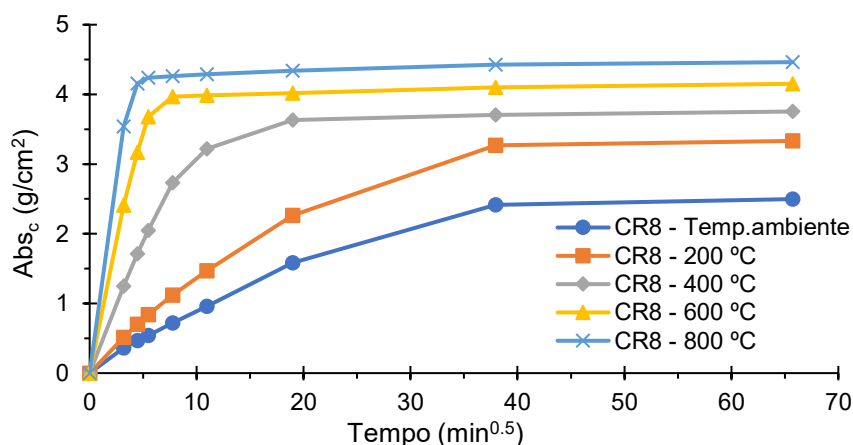


Figura 53 – Absorção capilar ao longo do tempo para as diferentes temperaturas para o BTC CRP8.

Tabela 13 – Coeficiente de absorção capilar aos 10 minutos ($C_{abs,10min}$) e absorção capilar no final do ensaio ($Abs_{c,72h}$) para diferentes temperaturas.

Composição	Propriedades	Temperatura ambiente	200 °C	400 °C	600 °C	800 °C
CP8	$C_{abs,10min} (x10^{-2}g/cm^2.min^{0.5})$	15,4	18,9	28,1	52,9	104,2
	$Abs_{c,72h} (g/cm^2)$	2,6	3,4	3,7	4,0	4,4
CRP8	$C_{abs,10min} (x10^{-2}g/cm^2.min^{0.5})$	11,4	16,2	39,5	76,2	112,0
	$Abs_{c,72h} (g/cm^2)$	2,5	3,3	3,8	4,2	4,5

Como esperado, o coeficiente de absorção aos 10 minutos aumentou de forma significativa com a temperatura, de até 9,8 e 6,8 vezes para os BTC CRP8 e BTC CP8, comparando a exposição à temperatura ambiente com a exposição a 800 °C, respectivamente (Tabela 13, Figura 54). Segundo a norma NTC 5324 (2004), os BTC classificam-se como de “muito baixa” ou “baixa” absorção capilar para $C_{abs,10min}$ inferior a $20x10^{-2}g/cm^2.min^{0.5}$ e $40x10^{-2}g/cm^2.min^{0.5}$, respectivamente. Assim, os BTC estabilizados, ensaiados no presente trabalho, classificam-se como tendo muito baixa absorção até à temperatura de exposição de 200 °C e baixa absorção até 400 °C, inclusive.

O coeficiente de absorção capilar aos 10 minutos evoluiu de forma quase exponencial com a temperatura (Figura 54). Esta propriedade, numa fase inicial (ou seja, nos primeiros 10 minutos de ensaio) é essencialmente comandada pelos macroporos (de dimensão ≥ 50 nm) (Nshimiyimana et al., 2024a). Isso indica que a exposição a altas temperaturas promoveu um aumento significativo da macroporosidade. A partir dos 600 °C, ocorreu um maior agravamento da taxa de capilaridade (Figura 54), acompanhado pelo aumento de conectividade resultante da degradação térmica dos produtos de hidratação e compostos carbonatados, e do desenvolvimento de fissuração.

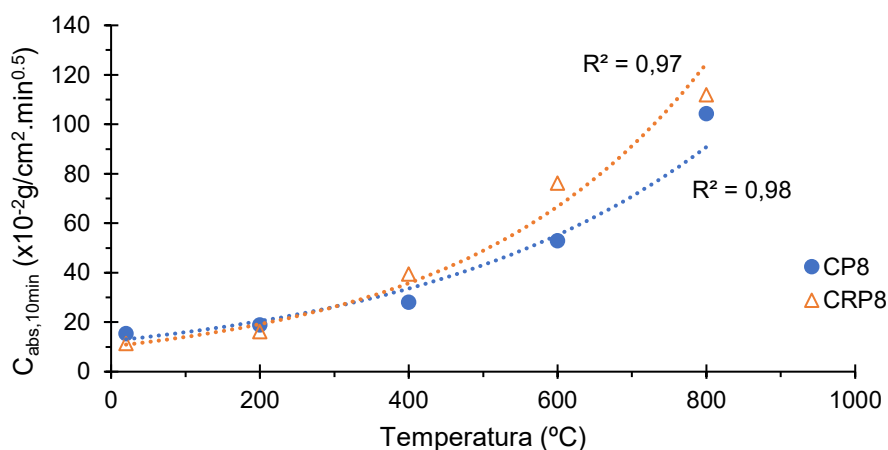


Figura 54 – Evolução do coeficiente de absorção capilar aos 10 minutos ($C_{abs,10min}$) com a temperatura.

Apesar de apresentar maior porosidade total, CRP8 manifestou menor coeficiente de capilaridade à temperatura ambiente do que o CP8. Por um lado, como referido em 4.2.3, o CRP conduz a porosidades menos grosseiras e de menor conectividade. Por outro lado, os blocos à temperatura ambiente foram ensaiados em condições de equilíbrio com o ambiente de laboratório. Desse modo, o CRP8 deverá apresentar uma maior quantidade de poros finos preenchidos com água e uma secagem mais lenta. Estes dois fatores justificam o menor coeficiente de absorção do CRP8 face ao CP8. Após exposição a 200 °C, ocorre uma maior aproximação da taxa de absorção nos dois tipos de BTC, mas ainda continua a ser ligeiramente inferior no CRP8. Isso está de acordo com os menores valores de perda de massa e de porosidade aberta do CRP8 face ao CP8, observados em 4.2.3 para 200 °C. Neste caso, prevalece o primeiro fator referido acima. Porém, após 400 °C, existe uma inversão da tendência de evolução da taxa de absorção. Em que ocorre a destruição progressiva dos compostos hidratados e a respetiva alteração da microestrutura, existindo um maior aumento de porosidade aberta (4.2.3) e absorção (4.2.4) no CRP8, também acompanhado de maior fissuração para temperaturas acima de 600 °C. A partir de 600 °C, confirma-se que os BTC CRP8 apresentaram maior macroporosidade e conectividade do que os BTC CP8. Em relação à absorção às 72h, observa-se a mesma tendência de inversão a partir de 400 °C, embora as diferenças entre o CRP8 e o CP8 sejam menos significativas. De referir que este parâmetro é afetado pela capacidade de saturação dos blocos, limitando a comparação entre misturas a partir de 200 °C.

4.2.6 Resistência à compressão

Nas Figuras 55 e 56, apresentam-se os resultados médios da resistência à compressão aos 90 dias de idade, para cada temperatura de exposição, em condições secas e saturadas. As Figuras A 15 e A 16 do Anexo II apresentam o modo de rotura dos provetes após os ensaios à compressão. Em condições saturadas, foram ensaiados apenas os BTC CP8 e BTC CRP8, visto que os blocos não estabilizados perderam a coesão quando imersos em água. Todos os valores indicados correspondem à transformação dos valores de resistência para a resistência não confinada ($f_{c,un}$). Como referido, este parâmetro permite uma melhor comparação com a resistência obtida por outros autores, por não depender da geometria dos BTC (Rodrigues, 2024).

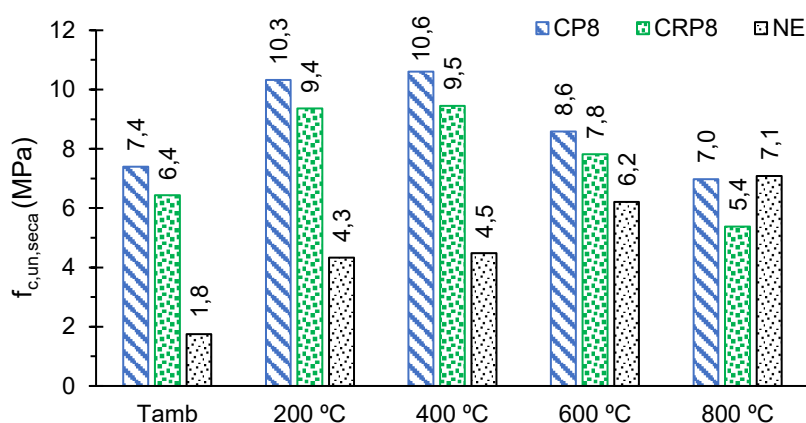


Figura 55 – Evolução da resistência à compressão não confinada seca ($f_{c,un,seca}$) com o aumento da temperatura.

Nos BTC NE, ocorreu um aumento contínuo da resistência à compressão com o incremento de temperatura (Figura 55). Constatações semelhantes foram reportadas por Bruno et al. (2019) para blocos não estabilizados compactados com um proctor. Isso resulta do efeito de “dry-hardening” em que, após evaporação da água de capilaridade e adsorvida, existe uma aproximação e reorganização das partículas de argila, aumentando as forças de coesão (Houben, 1994; Nshimiyimana et al., 2024a). Como observado em 4.2.2, a partir de 400 °C, a desidroxilação provoca a perda dos grupos hidroxilo presentes na estrutura cristalina das camadas de argila, enfraquecendo as ligações químicas e causando uma alteração na estrutura tridimensional (Tadonbou et al., 2024). Neste caso, as camadas aproximam-se (densificação) devido à redução das forças repulsivas entre elas, auxiliada pela perda das cargas negativas dos grupos hidroxilo (Tadonbou et al., 2024). Acima de 600 °C, o fenómeno de sinterização contribui adicionalmente para o aumento de coesão entre as partículas, aumentando a resistência mecânica dos BTC. No presente estudo, registou-se um aumento significativo da resistência à compressão seca, que quadruplicou face à obtida à temperatura ambiente. Conclui-se assim que os NE podem manter (e até melhorar) a sua capacidade estrutural a elevada temperatura. Porém, apesar de não terem sido ensaiados, os NE apresentaram degradação e perda de coesão excessiva após exposição a 1000 °C, resultante da formação de elevada fissuração (4.2.1).

Nos BTC estabilizados, a resistência aumentou entre a temperatura ambiente e os 200 °C, mantendo-se semelhante até 400 °C. Porém, diminuiu progressivamente para temperaturas superiores.

Sobretudo até 200 °C, ocorre o fenómeno anteriormente referido de “dry-hardening”, com desidratação dos minerais argilosos da terra (FA+TV) e aproximação entre partículas de argila, promovendo um aumento de coesão. Entre 400-550 °C, ocorre a desidroxilação da argila, mas este fenómeno nos BTC estabilizados é contraposto pelo mecanismo de decomposição dos produtos de hidratação do cimento, conduzindo a uma redução da capacidade ligante e do efeito de estabilização. Tal como nos materiais cimentícios comuns, a partir de 600 °C, existiu uma natural redução da resistência mecânica (Andiç-Çakir & Hizal, 2012; Hoff et al., 2000; Neville 1995). A transformação de fase no quartzo (α -para- β) poderá também afetar a redução de resistência à compressão entre 400 °C e 600 °C (Tadonbou et al., 2024). No entanto, este fator teve pouca importância nos NE.

Bakam et al. (2020) reportaram tendências diferentes em BTC estabilizados com 5% CP (% massa), tendo-se verificado um aumento contínuo da resistência à compressão até 800 °C. Noutro estudo, envolvendo BTC estabilizados com 8% CP (% massa) tal como no presente trabalho, Nshimiyimana et al. (2024a) reportaram um aumento de resistência até 600 °C, seguido do decréscimo da mesma para temperaturas mais elevadas. A tendência de inversão foi similar ao observado no presente estudo, embora tenha ocorrido a temperaturas superiores.

Importa referir que no presente trabalho, ao contrário dos estudos anteriormente referenciados, a terra (FA+TV) foi parcialmente substituída por 25% de resíduos de construção (% em volume). Isto aumentou a heterogeneidade e o teor de materiais cimentícios na mistura, para além de reduzir a fração de argila na mesma, contribuindo para uma maior influência na redução de resistência mecânica. Assim, a decomposição dos produtos de hidratação do cimento terá tido um maior impacto na resistência. Importa também salientar que, para materiais semelhantes ao RCD utilizado neste estudo, um dos principais minerais identificados é o quartzo (Sabai et al., 2016) que, como referido, poderá ter um efeito negativo na resistência à compressão a 600 °C, devido à transformação de fase e consequente variação volumétrica. Ainda assim, a resistência à compressão seca dos BTC estabilizados permaneceu superior ao mínimo de 2,0 MPa sugerido no documento normativo HB 195 (2002) até 800 °C. Acrescente-se que, apenas para 800 °C, a resistência à compressão foi inferior à dos BTC ensaiados à temperatura ambiente, em cerca de 6% e 16% no caso dos BTC com CP e CRP, respetivamente. Desse modo, até 800 °C não ocorreu perda significativa da capacidade estrutural dos BTC. Os BTC evidenciaram elevada estabilidade mecânica, apesar do aumento de porosidade e desenvolvimento de fissuração generalizada a partir de 600 °C (4.2.1).

Como observado nas restantes propriedades, os BTC CRP8 apresentaram uma tendência de evolução da resistência à compressão com a temperatura semelhante à dos BTC CP8 até 600 °C (Figura 55). De facto, até 600 °C, a resistência à compressão dos CRP8 manteve-se na ordem de 87-91% da resistência à compressão do CP8. Apenas para 800 °C, a diferença de resistência foi superior, sendo 23% inferior no CRP8 face ao CP8. Os resultados estão de acordo com a evolução de porosidade observada em 4.2.3 e o aumento de fissuração verificado no CRP8 (4.2.1). Confirma-se assim uma ligeira redução de desempenho dos BTC com CR quando expostos a temperaturas superiores a 600 °C, relativamente aos BTC com CP, de igual a/c e teor de ligante.

Independentemente da ligeira redução de resistência observada após 800 °C, os BTC estabilizados apresentam um comportamento a elevada temperatura superior ao de outros materiais de base cimentícia. Rao e Tadepalli (2024) reportaram que betões convencionais apresentam uma redução de cerca de 20% na sua resistência quando expostos a apenas 300°C, e uma perda significativa de resistência entre 300 °C e 800 °C.

Contrariamente ao constatado para a resistência à compressão seca, a resistência à compressão saturada dos BTC estabilizados aumentou até 600 °C, tendo diminuído posteriormente para temperaturas mais elevadas (Figura 56). Nshimiyimana et al. (2024a) reportaram resultados semelhantes para BTC estabilizados com 8% CP (% massa). Este aumento de resistência ao longo da exposição a temperaturas mais elevadas pode estar relacionado com a possível reidratação dos produtos de hidratação do cimento quando em contacto com água. Alonso et al. (2004) relataram que pastas de cimento expostas a 450 °C e 750 °C tornam-se instáveis em ambientes húmidos, sofrendo reidratação. O mesmo estudo também indicou a formação de compostos semelhantes aos da pasta de cimento original, nomeadamente C-S-H e portlandite. Estes resultados estão em concordância com as observações de Xuan e Shui (2011), Real et al. (2020) e Bogas et al. (2022), estando na base do desenvolvimento do cimento reciclado utilizado no presente estudo.

Em contraste, para temperaturas de exposição acima de 600 °C, após a desidroxilação dos minerais argilosos, ocorre uma maior estabilização da argila, tornando-a menos sensível à água (Nshimiyimana et al., 2024a). Na Figura 56, apresenta-se também a evolução do rácio $f_{cun,sat}/f_{cun,sec}$, confirmando-se que, para elevadas temperaturas (>400 °C), os BTC adquirem maior estabilidade e menor sensibilidade à água. No entanto, quando sujeitos a 800°C, a resistência dos BTC decresceu abruptamente. Como referido, neste patamar, a calcite decompõe-se em cal livre, que ao entrar em contacto com a água desenvolve uma reação exotérmica. Isso promove o aumento de fissuração, com consequente diminuição da resistência. Ainda assim, em oposição à tendência da resistência à compressão seca, a $f_{cun,sat}$ a 800 °C foi superior à obtida a temperatura ambiente, independentemente do tipo de estabilizante. Acrescente-se que é largamente cumprido o mínimo de 1,0 MPa recomendado no documento normativo HB 195 (2002), independentemente da temperatura. Até 400 °C, enquanto o estabilizante manteve as suas propriedades, o rácio $f_{cun,sat}/f_{cun,sec}$ foi semelhante no CRP8 e no CP8. Isso indica que o CP e o CR desenvolveram semelhante capacidade ligante e estabilizadora.

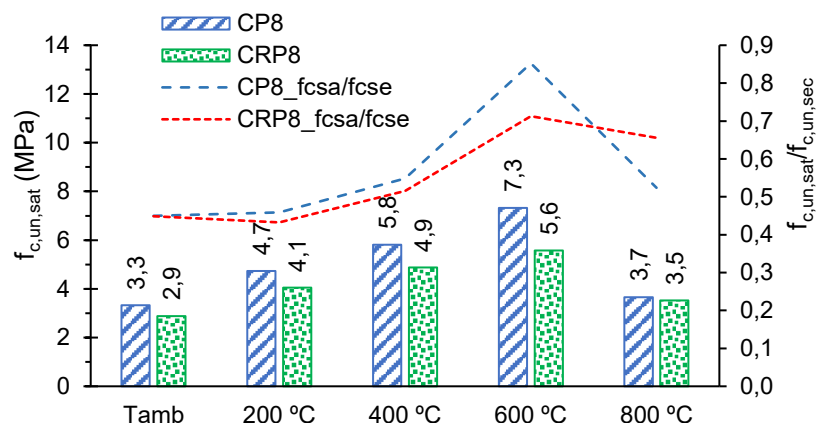


Figura 56 – Evolução da resistência à compressão não confinada saturada ($f_{c,un,sat}$) com a temperatura.

Mais uma vez, salienta-se o comportamento ligeiramente diferente dos BTC CP8 e BTC CRP8 a partir dos 600 °C (Figura 56). A 600 °C, é possível que após o segundo ciclo de reidratação do CRP, este possa ter desenvolvido menores produtos de hidratação do que o CP reidratado. Isso depende do tipo e teor de C_2S gerado após desidratação (Bogas et al., 2022). Porém, entre os 600-800 °C o decréscimo de resistência nos BTC CP8 (50%) foi superior ao dos BTC CRP8 (37%).

A saturação dos BTC após serem submetidos a elevada temperatura pode ainda beneficiar do desenvolvimento de interações químicas entre o cimento reativado (CP ou CR) e a argila, entretanto calcinada. De facto, durante o processo de queima ocorre a desidroxilação dos minerais argilosos (Fernandez et al., 2011; Sperinck et al., 2011), com colapso das camadas de silicato e reorganização estrutural (Sperinck et al., 2011; Izadifar et al., 2020), resultando numa estrutura amorfa (Fernandez et al., 2011; Garg & Skibsted, 2019) de elevada reatividade pozolânica, em especial no caso da caulinite (Li et al., 2010; HANZLICEK & Steinerová-Vondráková, 2002; Moodi et al., 2011). Assim, esta argila calcinada, após contacto com a água e o C-H proveniente da decarbonatação da calcite ou da reidratação do cimento, tem capacidade de desenvolver reações pozolânicas. Neste caso, conforme observado em 4.2.2 e 4.2.3, a decarbonatação e a formação de C-H foram superiores no CRP8, podendo ter contribuído para uma menor perda de resistência mecânica aos 800 °C. Note-se que a temperatura de exposição a 800 °C corresponde a temperaturas inferiores no interior dos blocos (4.2), pois para temperaturas mais elevadas as argilas calcinadas reorganizam-se e aumentam a sua cristalinidade, perdendo a sua reatividade (Garg & Skibsted, 2019).

Importa salientar que os blocos sujeitos ao ensaio de compressão em condições saturadas não foram imediatamente ensaiados após a exposição a elevada temperatura. Inicialmente, os blocos arrefeceram até à temperatura ambiente dentro do forno elétrico (≈ 1 dia), depois foram sujeitos ao ensaio de absorção capilar e finalmente imersos em água até massa constante durante cerca de 7 dias. Ou seja, os blocos foram sujeitos a uma cura húmida por aproximadamente 7 dias antes de serem ensaiados. Caso o período de cura tivesse sido superior poderiam ter sido esperadas resistências mais elevadas. O mesmo sucede em relação à reidratação do cimento. De facto, para pastas de cimento

submetidas a 500 °C ou 800 °C durante duas horas, Suh et al. (2020) reportam maiores recuperações da resistência à compressão para períodos mais longos de reidratação.

4.2.7 Eficiência Estrutural

A eficiência estrutural refere-se à capacidade de um elemento ou sistema estrutural suportar cargas, minimizando simultaneamente o uso de material e o peso. Esta propriedade é avaliada através do rácio resistência à compressão/massa volúmica, atingindo-se maiores rácios nos materiais de maior eficiência estrutural (Macdonald, 2001). Na Figura 57, resumem-se os valores do coeficiente de eficiência estrutural (CEE) obtidos para as diferentes temperaturas, dado por $f_{\text{cun,seco}}/\rho_{\text{seco}}$.

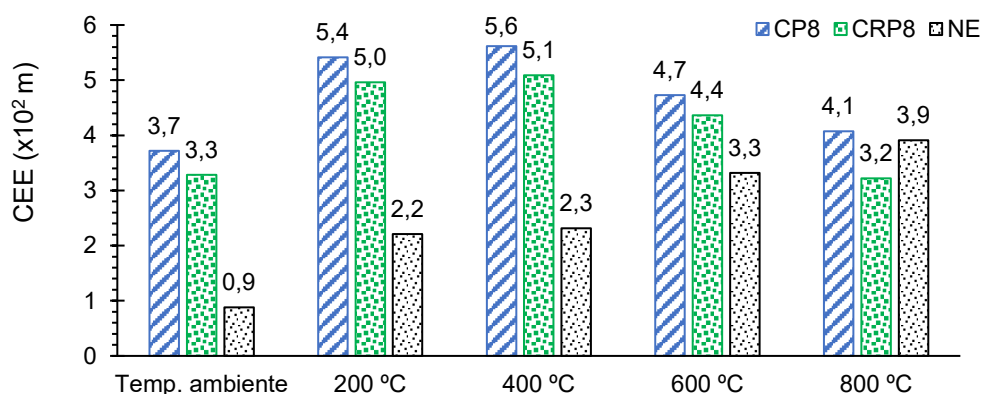


Figura 57 – Evolução do coeficiente de eficiência estrutural (CEE) para os BTC CP8 e CRP8 com o aumento da temperatura.

Face à temperatura ambiente, o CEE aos 200 °C aumentou aproximadamente 1,5 e 2,5 vezes nos BTC estabilizados e não estabilizados, respetivamente. Entre 200 °C e 400 °C CEE manteve-se praticamente constante, tal como sucedeu na evolução da massa volúmica (4.2.3) e resistência à compressão (4.2.6). Para temperaturas superiores, a evolução de CEE acompanhou o observado para a resistência à compressão, diminuindo nos BTC estabilizados e aumentando no NE (Figura 57). No entanto, mesmo para 800 °C o CEE foi superior no BTC com CP (9%) e praticamente idêntico no BTC com CRP (-2%) em relação aos BTC expostos apenas à temperatura ambiente. Estes resultados confirmam que a estabilidade estrutural dos BTC produzidos com CP ou CR foi, pelo menos, mantida até 800 °C. Por sua vez, ocorre um crescimento significativo na eficiência estrutural do NE, atingindo 4,4 vezes o seu valor inicial aos 800 °C. Para esta temperatura, a eficiência estrutural do NE foi inclusivamente superior à dos BTC com CR. Este resultado era esperado tendo em conta a tendência observada para a resistência à compressão analisada em 4.2.6.

4.2.8 Módulo de elasticidade

Conforme mencionado em 3.7.5, o módulo de elasticidade foi determinado a partir de cinco ciclos de carga-descarga, variando entre 1 MPa e, aproximadamente, um terço da resistência à compressão previamente determinada para os BTC com a mesma composição e sob o mesmo esquema de ensaio, a uma velocidade de carga de 0.5 kN/s. O cálculo do módulo de elasticidade baseou-se na fase de descarga dos cinco ciclos, assumindo-se que as deformações irreversíveis

ocorrem predominantemente na fase de carga, enquanto a fase de descarga reflete um comportamento essencialmente elástico, embora não linear (Bruno et al., 2015). Importa salientar que não foi determinado o módulo de elasticidade dos BTC sujeitos a 800 °C. Conforme mencionado em 4.2.1, a esta temperatura os provetes apresentaram alguma fissuração e perda de coesão na superfície, dificultando a realização do ensaio por videoextensometria.

Os diagramas tensão-deformação obtidos podem ser claramente divididos em dois segmentos (Figuras 58 a 60), apresentando tendências semelhantes às observadas por Sandra et al. (2024) e Mbumbia et al. (2002). O primeiro segmento caracteriza-se por deformações mais elevadas a baixas tensões, o que pode estar associado à irregularidade da superfície dos BTC. Além disso, esta resposta inicial pode também resultar do ajuste da microestrutura dos BTC sob carga (Khaliq & Bashir, 2016). Esta fase não é característica do material e oculta o verdadeiro comportamento elástico do BTC (Moevus et al., 2012). No segundo segmento, o material apresenta um comportamento mais rígido, apresentando um menor incremento da deformação para tensões mais elevadas. Isto deve-se à nova configuração da microestrutura dos BTC, que reduziu a deformação sob tensões mais elevadas (Khaliq & Bashir, 2016). Nesta região, os BTC comportaram-se como um material Hookeano, ou seja, a deformação variou de forma linearmente proporcional à tensão aplicada. As Figuras 58-60 apresentam os diagramas de tensão-deformação obtidos para os BTC CP8, CRP8 e NE, respetivamente, onde se pode observar claramente os dois segmentos diferentes. De acordo com Kouakou e Morel (2009), o segundo segmento representa o comportamento intrínseco do material. Assim, o módulo de elasticidade foi aferido a partir do declive do segundo segmento dos diagramas tensão-deformação. Os valores obtidos para o módulo de elasticidade apresentam-se na Tabela 14.

Tabela 14 – Módulo de elasticidade (E) [GPa] para diferentes temperaturas.

Designação	Temperatura ambiente	200 °C	400 °C	600 °C
CP8	2,37	2.93	2.95	1.61
CRP8	1,92	2.33	2.35	1.36
NE	1,05	1.64	1.64	1.72

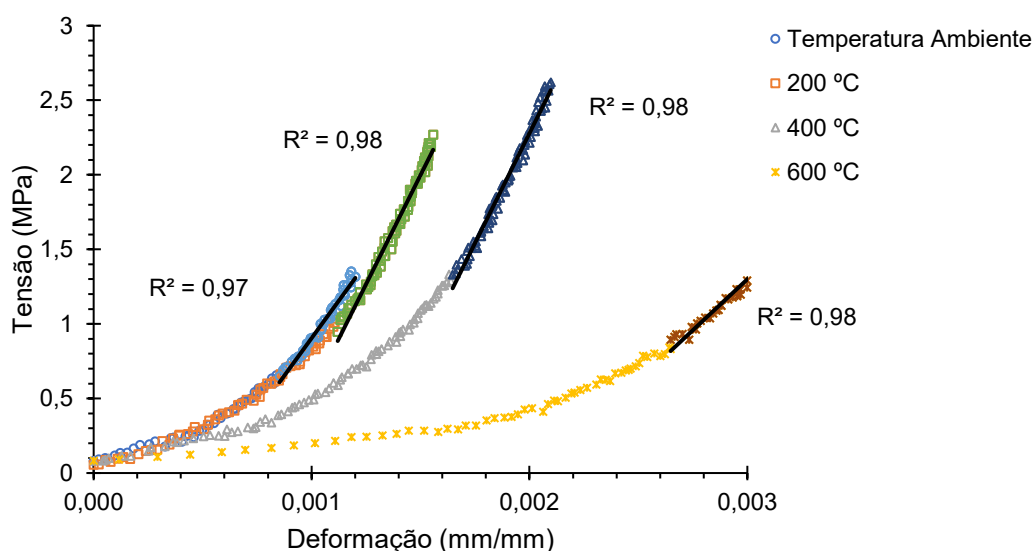


Figura 58 – Gráficos força-deformação de CP8 para diferentes temperaturas.

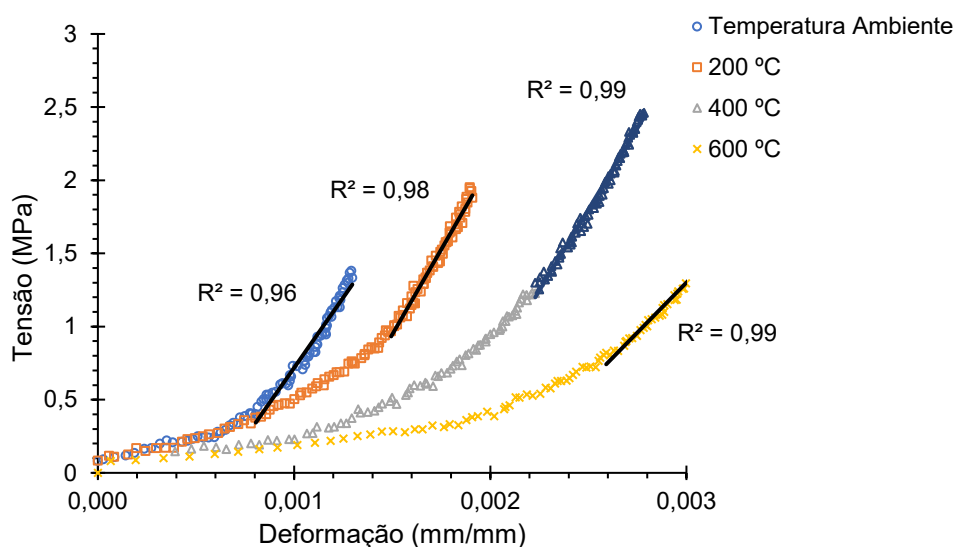


Figura 59 – Gráficos tensão-deformação do BTC CRP8 para diferentes temperaturas.

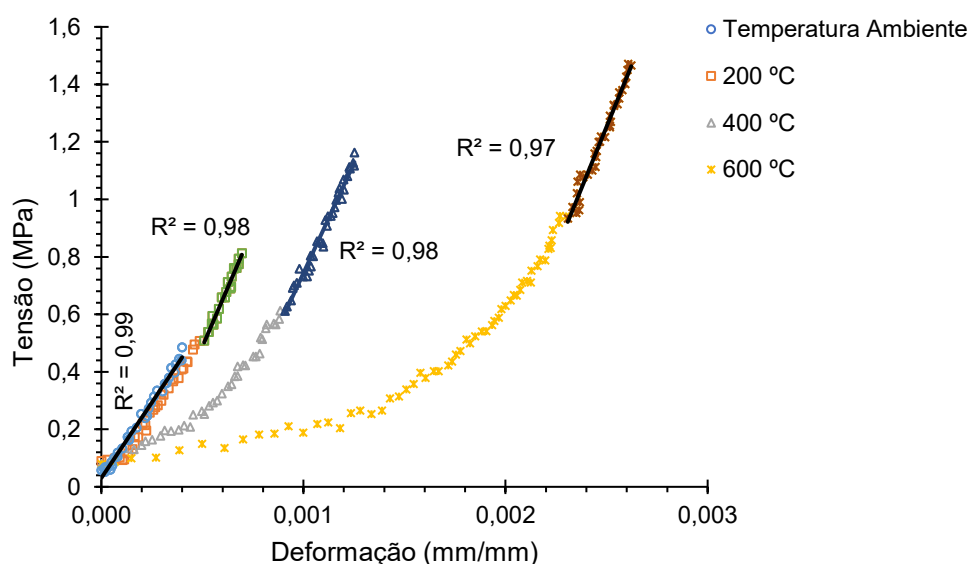


Figura 60 – Gráficos tensão-deformação do BTC NE para diferentes temperaturas.

Como esperado, o módulo de elasticidade acompanhou a tendência de evolução observada para a resistência à compressão. Até 400 °C, ocorreu um incremento progressivo da rigidez nos BTC estabilizados, variando de forma pouco significativa entre 200 e 400 °C. Ferreira et al. (2019) também reportaram aumentos de rigidez até 400 °C em BTC estabilizados com CP. Acima de 400 °C, a rigidez diminuiu de forma significativa nos BTC estabilizados e aumentou ligeiramente nos BTC não estabilizados. Em geral, as justificações indicadas para a resistência mecânica são aplicadas à evolução do módulo de elasticidade. Porém, a redução de rigidez entre 400 °C e 600 °C (55-58%) nos BTC estabilizados foi muito maior do que a redução de resistência à compressão (17-19%). Neste caso, a perda de coesão e da capacidade ligante, bem como o desenvolvimento de fissuração superficial, teve maior impacto no módulo de elasticidade do que na resistência compressiva. Ainda assim, o módulo de elasticidade em qualquer dos BTC analisados foi muito superior ao mínimo de 0,7 GPa

recomendado na norma ARS 1333 (2018), independentemente da sua composição e temperatura de exposição. Os BTC com CP e CRP revelaram desempenho idêntico. A redução de rigidez do CRP8 face ao CP8 à temperatura ambiente (9%), manteve-se semelhante para temperaturas superiores (6-10%).

Por sua vez, nos BTC NE, o aumento da temperatura de exposição de 400 °C para 600 °C originou um pequeno acréscimo no módulo de elasticidade (5%), que foi significativamente inferior ao registado na resistência à compressão (39%). A reestruturação da matriz argilosa com consequente ganho de coesão entre as partículas teve menor impacto na rigidez do que na resistência à compressão. Esta propriedade também terá sido mais afetada pelo desenvolvimento de fissuração observado em 4.2.1.

Na Figura 61, mostra-se a correlação entre a resistência à compressão e o módulo de elasticidade. Note-se que, os BTC estabilizados sujeitos a 600 °C não seguem a mesma linha de tendência. Isso resulta da perda de capacidade ligante do estabilizante e da fissuração apresentarem maior impacto na perda de coesão e deformabilidade dos blocos do que na resistência à compressão. O mesmo tipo de comportamento é reportado em estudos com betões (Kodur & Harmathy, 2002; Andiç-Çakir & Hizal, 2012; Neville, 1995; Pino, 2013).

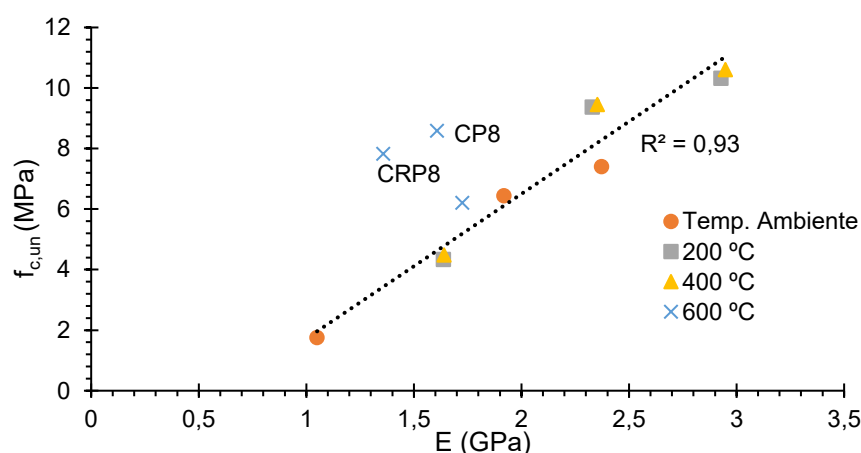


Figura 61 – Relação entre módulo de elasticidade (E) e resistência à compressão não confinada ($f_{c,un}$).

4.2.9 Velocidade de propagação de ultrassons

A velocidade de propagação de ultrassons (*ultrasonic pulse velocity*, UPV) está diretamente relacionada com a rigidez e a massa volúmica dos BTC. Para além disso, é ainda influenciada pela humidade, uma vez que as ondas sonoras se deslocam de forma mais célere em líquidos do que em gases. A Tabela 15 apresenta os resultados obtidos para cada temperatura e composição.

Tabela 15 – Velocidade de propagação de ultrassons (UPV) para diferentes temperaturas e condições de humidade.

Composição	UPV (m/s)	Temperatura ambiente	200 °C	400 °C	600 °C	800 °C
CP8	Seco	1341	1192	708	449	372
	Saturado	2501	2611	2198	1640	1254
CRP8	Seco	1234	966	656	428	291
	Saturado	2221	2366	1919	1490	1169
NE	Seco	1349	1430	1067	502	413
	Saturado	-	-	-	-	-

Por sua vez, as perdas de massa de cada bloco foram determinadas através da sua pesagem imediatamente após o tratamento térmico (condição seca) ou após a sua imersão em água até massa constante (condição saturada). Os resultados são apresentados nas Figuras 62 e 63. Como referido em 4.2.1, a perda de massa até 800 °C deveu-se essencialmente à evaporação da água livre, à remoção de água fisicamente adsorvida na superfície das partículas, à desidroxilação dos minerais argilosos, à decomposição dos produtos resultantes da hidratação do cimento e à decarbonatação da calcite, podendo ainda resultar de perda de material superficial por falta de coesão, principalmente para temperaturas superiores a 600 °C.

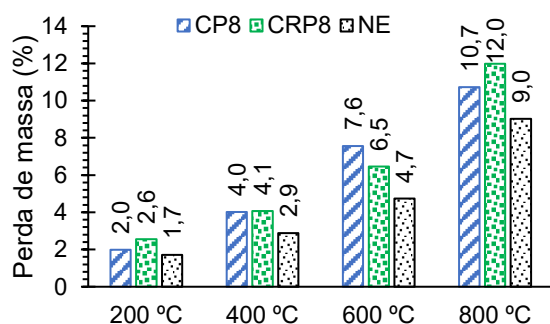


Figura 62 – Evolução da perda de massa com a temperatura para os provetes ensaiados imediatamente após o tratamento térmico.

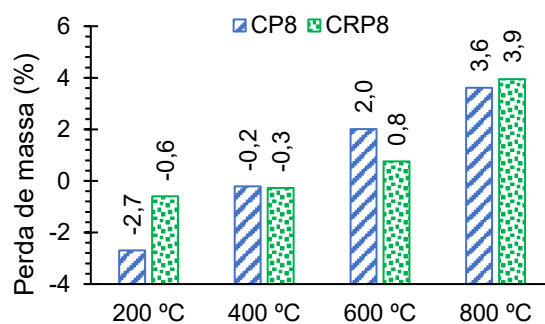


Figura 63 – Evolução da perda de massa com a temperatura para os provetes ensaiados em condições saturadas

Foram registadas variações significativas de UPV em função da temperatura, oscilando entre 291 e 2611 m/s, dependendo da composição e da condição de humidade (Tabela 15). Nos BTC estabilizados em condição seca, a UPV diminuiu com a temperatura em resultado do aumento de porosidade e perda de rigidez. Para argamassas de terra expostas até 600 °C, Tadonbou et al. (2024) também verificaram que a velocidade de propagação de ultrassons segue uma relação linear com a perda de massa dos provetes (em percentagem). Kaya (2022) obteve conclusões semelhantes para argamassas geopoliméricas. A relação entre UPV e a perda de massa até 600 °C também pode ser aproximada através de uma relação linear, independentemente da composição (Figura 64a). Para 800 °C, a relação entre estes dois parâmetros, apesar de linear, seguiu uma tendência distinta (Figura 64a). Para esta temperatura, UPV é também mais afetada pela fendilhação e rigidez dos BTC, ao contrário do que sucede até 400 °C.

Como expectável, a velocidade de propagação de ultrassons medida nos BTC secos foi sempre consideravelmente inferior à obtida nos BTC saturados. De facto, em termos médios, para a temperatura ambiente, o UPV no estado saturado foi aproximadamente 154% superior ao registado em estado seco. Esta diferença foi aumentando com a temperatura, sendo de 270% a 800 °C. Isso pode ser explicado pelo incremento de porosidade nos BTC, aumentando a influência da água após saturação. Outros autores obtiveram conclusões semelhantes para argamassas à base de cimento (Moura et al., 2024), cal (Pachta et al., 2018) ou terra (Tadonbou et al., 2024).

No entanto, entre a temperatura ambiente e 200 °C, verificou-se um aumento na velocidade de propagação de ultrassons nos BTC NE. Uma tendência semelhante foi observada por Kasinikota et al. (2022). Segundo os autores, este fenómeno pode ser atribuído à ocorrência de uma consolidação das partículas de terra, o que leva ao aumento da UPV. Isso permite também justificar o aumento da UPV em condições saturadas, até 200 °C, tanto para CP8 como para CRP8. Após 200 °C, a relação foi linear até 800 °C (Figura 64b). Refira-se que após 600 °C os NE apresentaram melhor desempenho do que os BTC estabilizados (maior UPV).

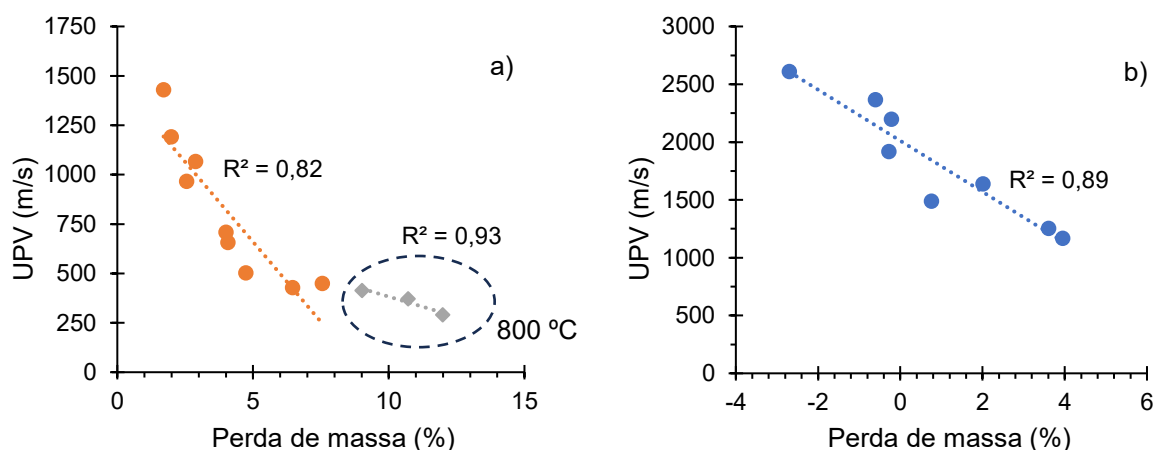


Figura 64 – Relação entre a perda de massa e a velocidade de propagação de ultrassons para diferentes condições de humidade: a) seco; b) saturado até massa constante.

O facto de a UPV ser superior em CP8 face ao CRP8 está relacionado com a maior compacidade atingida nesta mistura (4.1.1). Tal como noutras propriedades estudadas neste trabalho, esta diferença manteve-se semelhante até 600 °C, confirmando o idêntico comportamento de CP8 e CRP8 até esta temperatura de exposição. Para 800 °C, a redução da UPV e a perda de massa foram claramente superiores em CRP8. Note-se que a perda de massa imediatamente após o tratamento térmico do CRP8 aos 800 °C foi ligeiramente superior face ao CP8 (12,0% vs 10,7%, Figura 62). De facto, como mencionado em 4.2.2 e 4.2.3, o CRP8 apresenta maior teor de material carbonatado na sua composição. No entanto, esta diferença foi ligeiramente superior ao esperado tendo em consideração os resultados obtidos para a massa volúmica em 4.2.3. Isso resulta de ter ocorrido maior perda de coesão e de material na superfície dos CRP8 a 800 °C. Porém, o mesmo não se verificou em relação à perda de massa nos BTC saturados, indiciando que a perda de massa está mais relacionada com um aumento de porosidade, conforme observado em 4.2.3.

Segundo Bogas et al. (2013), para materiais homogêneos, o UPV varia proporcionalmente à raiz quadrada da razão entre o módulo de elasticidade e a massa volúmica. No entanto, no presente estudo essa relação foi fraca, o que se pode justificar pelo facto de a fissuração afetar de forma diferente o módulo de elasticidade e a UPV. O mesmo se verifica entre UPV e $f_{c,un,seca}$. De facto, o que se verifica é uma correlação elevada entre a UPV e a porosidade aberta do material (Figura 65). Estas duas propriedades estão inversamente relacionadas entre si, ou seja, com o aumento da porosidade aberta do material, a velocidade de propagação de ultrassons diminui. Esta é uma constatação esperada, pois as ondas propagam-se mais lentamente em meios porosos.

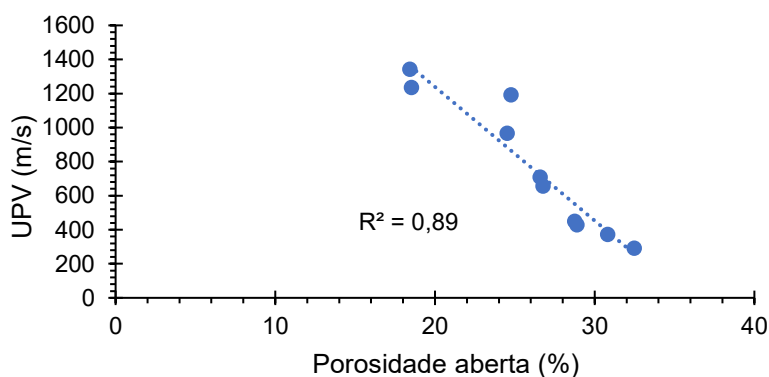


Figura 65 – Relação entre a porosidade aberta e a velocidade de propagação de ultrassons (UPV).

4.2.10. Dureza superficial e resistência à abrasão

O ensaio de dureza superficial envolveu o impacto de um pêndulo na face dos BTC, traduzindo-se o resultado sob a forma de índice esclerométrico (IE). Por sua vez, o coeficiente de abrasão (C_a) avalia a resistência superficial à abrasão dos BTC, que, de certa forma, também se relaciona com a dureza superficial. Valores de C_a elevados indicam menor quantidade de material desagregado e, consequentemente, maior resistência à abrasão. Na Tabela 16, apresentam-se os valores médios de IE e C_a para cada composição sujeita a diferentes temperaturas. O índice esclerométrico não foi determinado em BTC expostos a 800 °C, visto que apresentaram reduzida coesão superficial, haveria o risco de se desintegrarem e não ser possível realizar os restantes ensaios.

Tabela 16 – Índice esclerométrico (IE) e coeficiente de abrasão (C_a) para diferentes temperaturas.

Composição	Propriedade	Temperatura ambiente	200 °C	400 °C	600 °C	800 °C
CP8	C_a (cm ² /g)	22,7 ± 2,9	36,9 ± 0,0	39,1 ± 14,5	15,6 ± 4,0	4,4 ± 0,8
	IE	75 ± 1	80 ± 1	81 ± 2	61 ± 3	-
CRP8	C_a (cm ² /g)	20,0 ± 0,3	31,1 ± 4,1	32,0 ± 10,1	11,7 ± 0,8	2,9 ± 0,6
	IE	68 ± 1	74 ± 2	75 ± 6	57 ± 1	-
NE	C_a (cm ² /g)	3,9 ± 0,5	4,8 ± 1,6	5,2 ± 0,9	3,1 ± 0,2	2,6 ± 1,1
	IE	56 ± 1	66 ± 2	68 ± 1	55 ± 1	-

Estudos anteriores concluíram que o coeficiente de abrasão e a resistência à compressão podem ser relacionados através de uma curva de potência, conforme a Equação 4.5 (Nshimiyimana et al., 2024b; Djibo et al., 2023). Por sua vez, o índice esclerométrico e a resistência à compressão podem ser relacionados através de uma equação linear (Nabais, 2023; Azevedo, 2021; Rodrigues, 2024;

Gonçalves, 2023). Neste estudo, verificou-se uma boa correlação entre $f_{c,un}$ e C_a ou IE até aos 400 °C (Figuras 66a e 66b). Para a relação entre $f_{c,un}$ e C_a obteve-se um R^2 de 0,94 e os parâmetros “A” e “B” foram de 1,32 e 0,56, respetivamente. Nshimiyimana et al. (2024b) obtiveram, para BTC estabilizados com ligantes ricos em cal, valores de “A” e “B” de 1,6 e 0,35, respetivamente. Por sua vez, Pedro (2025), tendo em conta diferentes tipos de BTC produzidos em condições idênticas às do presente trabalho, verificou valores de “A” e “B” de 1,55 e 0,46, respetivamente. Ambos os trabalhos envolveram apenas BTC não expostos a elevadas temperaturas. Para a relação entre $f_{c,un}$ e IE , o R^2 foi de 0,91.

Acima de 400 °C, verificaram-se diferentes relações entre estas propriedades, com ambos os ensaios a mostrarem-se menos adequados. De facto, por exemplo entre 600-800 °C, para os NE, o C_a diminuiu aproximadamente 18%, apesar do aumento na $f_{c,un,dry}$ de 0,9 MPa. Mesmo nos BTC CP8 e CRP8, para o mesmo intervalo de temperatura, a diminuição na resistência à abrasão foi superior à verificada na resistência à compressão (Figura 64a). O mesmo se observa em relação ao IE a 600 °C (Figura 64b). Estes resultados devem-se ao facto de a degradação superficial ter maior impacto na abrasão do que na resistência à compressão. Conforme referido, a temperatura no interior dos BTC foi aproximadamente 30 a 50 °C inferior à registada na superfície (4.2), o que contribui para a maior degradação superficial.

$$f_{c,un} = A * (C_a)^B \quad 4.5$$

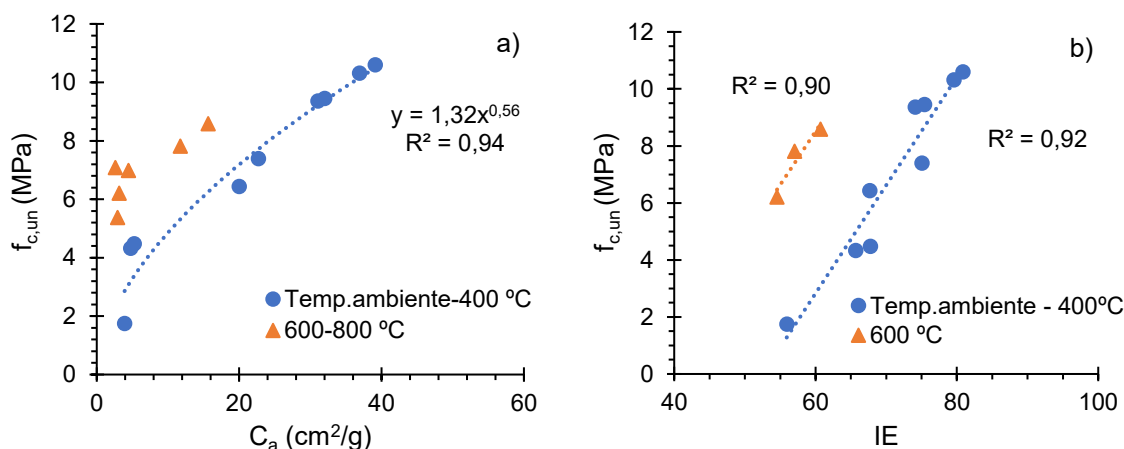


Figura 66 – Relação entre a resistência à compressão não-confinada ($f_{c,un}$) com: a) coeficiente de abrasão (C_a); b) índice esclerométrico (IE).

A resistência à abrasão superficial e a dureza superficial do BTC CRP8 foram, em média, 28% e 8% inferiores à do BTC CP8, respetivamente, para BTC expostos apenas à temperatura ambiente, isso resulta essencialmente da menor compacidade atingida pelo CRP8 face ao CP8. Para tal contribui ainda a menor dureza do CRP, derivada da natureza porosa do material, que, segundo Zhang et al. (2018), pode ser 11 vezes inferior à das partículas de CP. Essa diferença sofreu uma ligeira alteração até 600 °C na dureza superficial e até 400 °C na abrasão superficial. Porém, tal como observado nas outras propriedades, para temperaturas superiores, os BTC CRP8 sofreram maior redução de desempenho. Assim, pode-se concluir que os blocos estabilizados com CR sofreram uma degradação mais acentuada da sua superfície, sobretudo acima de 600 °C.

De referir que os valores de C_a e IE nos BTC CRP8 foram sempre superiores aos do BTC NE, mesmo para 800 °C, o que salienta a importância da estabilização na resistência à abrasão superficial e na dureza superficial dos BTC. De facto, de acordo com o documento normativo XP P13-901 (2001), os BTC CP8 e CRP8 mantiveram-se na classe mais elevada de resistência à abrasão superficial, denominada de BTC60 ($C_a > 7 \text{ cm}^2/\text{g}$) até aos 600 °C, passando para a classe mais baixa, BTC20 ($2 \text{ cm}^2/\text{g} < C_a < 5 \text{ cm}^2/\text{g}$) aos 800 °C. Por sua vez, os BTC NE mantiveram-se sempre na classe mais baixa, independentemente da temperatura de exposição. Como estas propriedades avaliam os blocos superficialmente, verificou-se uma correlação razoável entre C_a e IE (Figura 67).

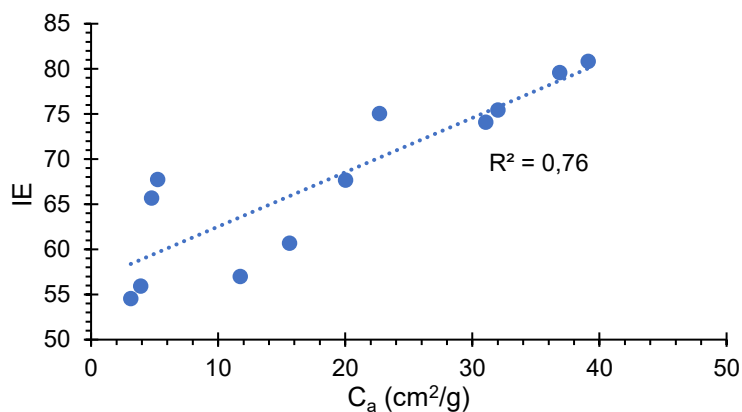


Figura 67 – Relação entre o coeficiente de abrasão (C_a) e o índice esclerométrico (IE).

5. Conclusões

No presente capítulo, apresentam-se as principais conclusões obtidas após a realização deste trabalho, que considerou a produção e caracterização a elevadas temperaturas de BTC estabilizados com cimento reciclado (CR), bem como BTC de referência não estabilizados (NE) e estabilizados com cimento Portland (CP) de igual teor em água. Para tal, os vários BTC foram ensaiados à temperatura ambiente e após exposição a diferentes patamares de temperatura, nomeadamente 200, 400, 600, 800 e 1000 °C. Os BTC foram avaliados em termos de massa volúmica, porosidade, absorção por imersão e capilaridade, resistência à compressão, módulo de elasticidade, termogravimetria, velocidade de propagação de ultrassons, dureza superficial e resistência à abrasão.

O trabalho foi desenvolvido no âmbito do projeto Eco+RCEB – “Eco-efficient recycled cement compressed earth blocks”, ref. PTDC/ECI-CON/0704/2021, tendo contado com a colaboração de um investigador de doutoramento e de um aluno de mestrado, quer na produção dos blocos quer na realização de algumas fases do trabalho experimental. Em seguida, apresentam-se as considerações finais relativas aos resultados conseguidos no decorrer do estudo, bem como propostas de desenvolvimentos futuros.

5.1 Considerações finais

O CR, associado à natureza porosa e grande área superficial, apresentou elevada exigência de água, o que resultou na produção de BTC de menor massa volúmica, maior porosidade e menor resistência mecânica do que os BTC com CP de igual teor em água. Porém, o CR revelou idêntica capacidade de hidratação e de poder ligante face ao CP, observando-se uma elevada correlação entre a resistência mecânica e a porosidade, para ambas as composições estabilizadas. O CR foi ainda capaz de aumentar em mais de 3,5 vezes a resistência à compressão seca, em comparação com os BTC não estabilizados, e ao contrário destes, permitiu que os BTC com ele produzidos apresentassem elevada resistência à água, mantendo a sua integridade após várias horas imersos em água. Tal como observado em trabalhos anteriores, o CR revelou ainda grande capacidade estabilizante, sendo tão eficiente como o CP em aproximar a resistência à compressão em condições saturadas da resistência em estado seco.

Para temperaturas superiores a 800 °C, os BTC sofreram forte fissuração e perda de coesão, não resistindo à ação térmica. Assim, nenhum dos tipos de BTC revelou capacidade de manter a sua integridade em caso de incêndio.

Até 400 °C, os BTC não sofreram reduções significativas de coesão e capacidade resistente, alterando apenas a tonalidade da superfície, sem afetar a sua integridade. Até esta temperatura, os BTC com CP e CRP apresentaram desempenho idêntico nas várias propriedades analisadas, manifestando idêntica resistência nesta gama de temperaturas. A 600 °C, identificou-se o aparecimento de fendilhação superficial, que se agravou para 800 °C, independentemente do tipo de BTC. Para esta gama de temperaturas, já terá ocorrido a desidratação e despolimerização dos produtos hidratados, a

desidroxilação da argila, e posteriormente a descarbonatação dos produtos carbonatados, acompanhado de desenvolvimento de fissuração. O desenvolvimento destas várias fases foi confirmado por análise termogravimétrica. Ocorreu um aumento esperado da porosidade aberta dos BTC com a temperatura de exposição, com redução respectiva da sua massa volúmica.

Os BTC com CP e CRP apresentaram perdas de massa semelhantes até cerca de 600 °C, sugerindo o desenvolvimento do mesmo nível de hidratação. Porém, a partir de 600 °C, os BTC com CR desenvolveram maior fissuração e perda de coesão superficial do que os restantes BTC. Isso levou a uma maior redução de desempenho dos BTC com CR a 800 °C face aos BTC com CP, conduzindo a um maior aumento de porosidade aberta e consequentemente absorção e uma diminuição mais acentuada de resistência mecânica e UPV. Confirma-se um refinamento superior da microestrutura dos BTC estabilizados com CR, revelando menor conectividade do que CP8 para temperaturas abaixo de 400 °C, em que se manteve intacta a matriz cimentícia das misturas. Essa tendência inverte-se para temperaturas superiores a 600 °C. Até 800 °C qualquer dos tipos de BTC estabilizados apresentou adequada resistência à água, embora a taxa de absorção tenha aumentado até cerca de 7 e 10 vezes no CP8 e CRP8, respetivamente.

Nos BTC não estabilizados, a resistência à compressão aumentou de forma contínua com a temperatura, em resultado do rearranjo microestrutural provocado pelos efeitos de “*dry-hardening*”, desidroxilação e sinterização. A capacidade estrutural em estado seco foi significativamente melhorada até 800 °C, e a rigidez e velocidade de ultrassons aumentaram com a temperatura, ocorrendo uma reestruturação e consolidação da matriz de terra.

Nos BTC estabilizados, a resistência à compressão aumentou até 400 °C, diminuindo após este patamar de temperatura devido à decomposição do estabilizante. Ainda assim, mesmo para 800 °C, não ocorreu perda significativa de eficiência estrutural dos BTC face à temperatura ambiente. Apesar de o CRP8 ter mostrado maior perda de resistência a 800 °C do que o CP8, o comportamento de ambos os tipos de BTC foi idêntico até 600 °C. A resistência à compressão após saturação foi ainda possivelmente afetada pela reidratação do cimento, estabilização da argila e desenvolvimento de pozolanicidade, o que justifica o seu aumento até 600 °C. Acima de 800 °C, os efeitos benéficos de reidratação do cimento e de pozolanicidade perdem-se.

O módulo de elasticidade seguiu a tendência observada para a resistência à compressão, aumentando nos BTC estabilizados até 400 °C e diminuindo para temperaturas superiores. A redução do módulo de elasticidade foi significativa após 600 °C, com esta propriedade a ser mais afetada pela perda de coesão e pelo desenvolvimento de fissuração superficial do que a resistência à compressão. Até esta temperatura, os BTC com CP e CR revelaram igual evolução de rigidez.

A velocidade de propagação de ultrassons seguiu a tendência de evolução da massa volúmica com a temperatura, mostrando uma elevada correlação com a porosidade aberta. Esta propriedade foi significativamente afetada pelo teor de humidade, cuja influência aumento com a temperatura de exposição. A UPV não foi capaz de distinguir adequadamente BTC de diferente resistência mecânica ou módulo de elasticidade.

Até 400 °C, inclusive, a resistência à compressão e o módulo de elasticidade apresentaram forte correlação, bem como o coeficiente de abrasão e o índice esclerométrico. Para temperaturas superiores a 600 °C, a degradação superficial teve maior impacto nestas últimas propriedades do que na resistência à compressão. Como constatado na resistência à compressão, acima de 600 °C, os BTC CRP8 apresentaram maior redução de resistência à abrasão do que os BTC com CP.

Conclui-se que os blocos estabilizados com CR sofreram uma degradação mais acentuada da sua superfície acima de 600 °C, apresentando menor resistência a elevadas temperaturas do que os BTC com CP. Ainda assim, até 600 °C apresentaram desempenho idêntico aos dos BTC com CP e significativamente superior ao dos BTC não estabilizados.

5.2 Propostas de trabalho futuras

Nos últimos anos, tem-se intensificado a investigação na construção em terra, procurando-se encontrar soluções mais ecológicas para construções de menor exigência estrutural. No âmbito do projeto ECO+RCEB, tem-se procurado conciliar a necessidade de reduzir a pegada carbónica dos estabilizantes mais comuns (cimento e cal) com as exigências de desempenho e durabilidade requeridas para as construções em terra. Neste âmbito, tem sido explorado o desenvolvimento e a caracterização de BTC totalmente estabilizados com cimento reciclado. Estudos anteriores já abordaram a resistência mecânica, microestrutura, resistência à água, higroscopicidade e capacidade de isolamento térmico dos BTC. Com o presente trabalho, foi possível perceber o comportamento destes materiais a elevada temperatura, contribuindo para reduzir uma lacuna que ainda existia neste âmbito de estudo. No entanto, apesar destes esforços indicam-se em seguida alguns temas que ainda justificam desenvolvimentos futuros:

- Estender o presente trabalho à caracterização de soluções de alvenaria compostas por BTC e argamassas de junta produzidas com incorporação de cimento reciclado, quando submetidas a temperatura elevada e à ação do fogo;
- Análise da microestrutura dos BTC após exposição a elevadas temperaturas;
- Exploração de adição simultânea de aditivos naturais capazes de minimizar a elevada exigência de água do cimento reciclado, com consequente aumento de compacidade dos BTC;
- Consideração simultânea de outras técnicas de estabilização, como a adoção de fibras vegetais, que permitam reduzir a sensibilidade dos BTC a variações dimensionais;
- Comportamento acústico de BTC estabilizados com cimento reciclado;
- Análise económica e ambiental de BTC produzidos com cimento reciclado em alternativa aos BTC estabilizados com cimento corrente;
- Análise da interação argila-cimento na evolução da hidratação e microestrutura do cimento reciclado;
- Estudos a longo prazo do comportamento de alvenarias de BTC com CR expostos em ambiente real;
- Desenvolvimento de outros produtos de base cimentícia com incorporação de CR, visando atingir soluções de maior sustentabilidade para o sector da construção.

Referências

Abdulsalam, M., Abdulkarem, M., Olumide, E., & Hejazi, F. (2018). Effect of addition of silica fume and oil palm fiber on the engineering properties of compressed earth block. *Civil Engineering Research Journal*. <https://doi.org/10.19080/CERJ.2018.05.555653>

- Adam, E. (2001). Compressed Stabilised Earth Block Manufacture in Sudan - UNESCO.
- Akinshipe, O., & Kornelius, G. (2017). Chemical and thermodynamic processes in clay brick firing technologies and associated atmospheric emissions metrics: A review. *Journal of Pollution Effects & Control*, 5(1), 1000190. <https://doi.org/10.4172/2375-4397.1000190>
- Alonso, C., & Fernandez, L. (2004). Dehydration and rehydration processes of cement paste exposed to high temperature environments. *Journal of Materials Science*, 39(9), 3015–3024. <https://doi.org/10.1023/B:JMSC.0000025827.65956.18>
- Andiç-Çakir, Ö., & Hızal, S. (2012). Influence of elevated temperatures on the mechanical properties and microstructure of self consolidating lightweight aggregate concrete. *Construction and building materials*, 34, 575-583. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2012.02.088>
- Associação Brasileira de Normas Técnicas. (1984). NBR 8492: Determinação da resistência à tração na flexão de telhas de fibrocimento. Associação Brasileira de Normas Técnicas.
- ASTM D698. (2000) - Standard Test Methods for Laboratory Compaction Characteristics of Soil Using Standard Effort.
- ASTM International. (2011). *ASTM D2497-11: Standard practice for classification of soils for engineering purposes (Unified Soil Classification System)*. ASTM International.
- Azevedo, B. (2021). *Blocos de terra comprimida estabilizados com cimento reciclado* Dissertação de mestrado, Instituto Superior Técnico, Universidade de Lisboa.
- Bakam, V. A., Mbishida, M. A., Danjuma, T., Zingfat, M. J., Hamidu, L. A. J., & Pyendang, Z. S. (2020). Effect of firing temperature on abrasive and compressive strengths of an interlocking compressed stabilized earth block (CSEB). *Int. J. Recent Eng. Sci*, 7, 44-46. DOI: [10.14445/23497157/IJRES-V7I3P109](https://doi.org/10.14445/23497157/IJRES-V7I3P109)
- 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) [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)MT.1943-5533.0002725](https://doi.org/10.1061/(ASCE)MT.1943-5533.0002725)
- Bandeira, J. (2020). *Caracterização mecânica e retração em argamassas produzidas com cimento reciclado*. Dissertação de Mestrado em Engenharia Civil. Instituto Superior Técnico, Universidade de Lisboa.
- Beckett, C., Kazamias, K., & Law, A. (2019). Investigations into the high temperature behaviour of unstabilised rammed earth. In *Fifth International Conference on Sustainable Construction Materials and Technologies*. DOI: [10.18552/2019/IDSCMT5161](https://doi.org/10.18552/2019/IDSCMT5161)
- Bogas, J. A., Carriço, A., & Real, S. (2022). Thermoactivated Recycled Cement. IntechOpen. DOI: 10.5772/intechopen.98488
- 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.2012.11.010>

- Bogas, J. A., Pereira, M. F. C., Guedes, A. M., Carriço, A., Hu, S., & Sousa, R. (2021). *Processo de separação dos componentes de resíduos de betão endurecido para obtenção de cimento reciclado* (Separation process of waste hardened concrete for obtaining recycled cement from waste concrete) (Patente internacional nº WO 2021/173022). PCT/PT2021/050005. <https://worldwide.espacenet.com/patent/search/family/075539885/publication/WO2021173022A1?q=WO%202021%2F173022>
- Bogas, J. A., Real, S., Cruz, R., & Azevedo, B. (2023). Mechanical performance and shrinkage of compressed earth blocks stabilised with thermoactivated recycled cement. *Journal of Building Engineering*, 79, 107892. <https://doi.org/10.1016/j.jobbe.2023.107892>
- Bogas, J. A., Silva, M., & Glória Gomes, M. (2018). Unstabilized and stabilized compressed earth blocks with partial incorporation of recycled aggregates. *International Journal of Architectural Heritage*, 13(4), 569-584. DOI: [10.1080/15583058.2018.1442891](https://doi.org/10.1080/15583058.2018.1442891)
- Bogas, J., Carriço, A., & Tenza-Abril, A. (2020). Microstructure of thermoactivated recycled cement pastes. In *Cement and Concrete Research* (Vol. 138). Elsevier Ltd. <https://doi.org/10.1016/j.cemconres.2020.106226>
- Bogas, J., Real, S., Carriço, A., Abrantes, J., & Guedes, M. (2022). Hydration and phase development of recycled cement. In *Cement and Concrete Composites* (Vol. 127). Elsevier Ltd. <https://doi.org/10.1016/j.cemconcomp.2022.104405>
- Boussadia, B. (2021). Comportement à haute température de matériaux de terre crue, rapport de stage de master. CY Cergy Paris Université.
- Braun, R. D. (1987). Chapter 27: Thermal analysis. In *Introduction to instrumental analysis* (pp. 803–829). McGraw-Hill.
- Bruno, A. W., Gallipoli, D., Perlot, C., & Mendes, J. (2019). Optimization of bricks production by earth hypercompaction prior to firing. *Journal of Cleaner Production*, 214, 475-482. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2018.12.302>
- Bruno, A. W., Gallipoli, D., Perlot, C., Mendes, J., & Salmon, N. (2015). Mechanical properties of unstabilized earth compressed at high pressures. *Academic Journal of Civil Engineering*, 33(2), 85-92. <https://doi.org/10.26168/icbbm2015.12>
- Buson, C., Lopes, N., Varum, H., Sposto, R., & Real, P. (2012a). Fire resistance of walls made of soil-cement and Kraftterra compressed earth blocks. *Fire and Materials*, 36(6), 469–481. <https://doi.org/10.1002/fam.2148>
- Buson, M., Lopes, N., Varum, H., Sposto, R. M., & Real, P. V. (2012b). Evaluation of performance under fire of compressed earth blocks. In *15th International Conference on Experimental Mechanics (ICEM15)*.
- Carriço, A., Bogas, J. A., & Guedes, M. (2020)a. Thermoactivated cementitious materials—A review. *Construction and Building Materials*, 250, 118873. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2020.118873>
- Carrico, A., Bogas, J. A., Real, S., & Pereira, M. F. C. (2022). 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., Bogas, J., Hu, S., Real, S., & Pereira, M. (2021)a. Novel separation process for obtaining recycled cement and high-quality recycled sand from waste hardened concrete. *Journal of Cleaner Production*, 309.Elsevier Ltd. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2021.127375>
- Carriço, A., Real, S., & Bogas, J. A. (2021)b. Durability performance of thermoactivated recycled cement concrete. *Cement and Concrete Composites*, 124, 104270. <https://doi.org/10.1016/j.cemconcomp.2021.104270>
- Carriço, A., Real, S., Bogas, J., & Pereira, M. (2020)b. Mortars with thermo activated recycled cement: Fresh and mechanical characterisation. In *Construction and Building Materials* (Vol. 256). Elsevier Ltd. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2020.119502>
- Carvalho, M. (2020). *Caracterização de pastas produzidas com cimento reciclado sujeito a diferentes temperaturas de termoativação*. Dissertação de Mestrado em Engenharia Civil. Instituto Superior Técnico, Universidade de Lisboa.
- Castellanos A, O. M., Ríos R, C. A., Ramos G, M. A., & Plaza P, E. V. (2012). A comparative study of mineralogical transformations in fired clays from the Laboyos Valley, Upper Magdalena Basin (Colombia). *Boletín de Geología*, 34(1), 43-55.
- Castellote, M., Alonso, C., Andrade, C., Turrillas, X., & Campo, J. (2004). Composition and microstructural changes of cement pastes upon heating, as studied by neutron diffraction. *Cement and concrete research*, 34(9), 1633-1644. [https://doi.org/10.1016/S0008-8846\(03\)00229-1](https://doi.org/10.1016/S0008-8846(03)00229-1)
- Certini, G. (2005). Effects of fire on properties of forest soils: a review. *Oecologia*, 143, 1-10. <https://doi.org/10.1007/s00442-004-1788-8>
- Coelho, R. E. F. (2019). *Avaliação do Desempenho Acústico e na Presença do Fogo de Btc*. Dissertação de Mestrado em Engenharia Civil. Universidade do Minho.
- Comité Europeu de Normalização. (2020). *EN 1363-1: Ensaios de resistência ao fogo - Parte 1: Requisitos gerais*. CEN.
- Coulibaly, Y. (2023). *Tenue à haute température des blocs en terre comprimées stabilisées au ciment et à la chaux* (Dissertação de mestrado, Institut International d'Ingénierie de l'Eau et de l'Environnement).
- Cruz, R., & Bogas, J. A. (2024). Durability of compressed earth blocks stabilised with recycled cement from concrete waste and incorporating construction and demolition waste. *Construction and Building Materials*, 450, 138673. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2024.138673>
- Csáki, Š., Sunitrová, I., Lukáč, F., Łagód, G., & Trník, A. (2022). Thermal properties of illite–zeolite mixtures up to 1100 °C. *Materials*, 15(9), 3029. <https://doi.org/10.3390/ma15093029>
- de Lima, D. P. (2017). *Ensaios de resistência termomecânica em regime estacionário em Bloco de Terra Compactada (BTC)*. Dissertação de Mestrado em Engenharia Civil Instituto Politécnico de Bragança.

- Delso, D. (2022). *Templo de Ramsés II, Abu Simbel, Egipto* [Fotografia].
https://upload.wikimedia.org/wikipedia/commons/5/54/Templo_de_Rams%C3%A9s_II%2C_Abu_Simbel%2C_Egipto%2C_2022-04-02%2C_DD_03.jpg (accedido a 17/10/2024)
- Djibo, K. B., Sore, S. O., Nshimiyimana, P., Ouedraogo, H., & Messan, A. (2023). Physico-mechanical performances of compressed earth blocks stabilized with calcined clay-based geopolymer. *NanoWorld J*, 9(S2), S268-S273. DOI:[10.17756/nwj.2023-s2-046](https://doi.org/10.17756/nwj.2023-s2-046)
- do Nascimento Moura, M. A., Leal, C. E. F., Júnior, A. L. M., dos Santos Ferreira, G. C., & Parsekian, G. A. (2024). Post-fire prediction of residual compressive strength of mortars using ultrasonic testing. *Construction and Building Materials*, 416, 135273.
<https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2024.135273>
- Egenti, Clement & Khatib, Jamal & Oloke, David. (2015). High Carbon Fly ash and Soil in Shelled Compressed Earth Masonry Units. *International Journal of Interdisciplinary Research and Innovations*. 3. 61-65.
- El Gamouz, A., Bendifi, H., El Amane, M., Messaoudi, L., & Tijani, N. (2007). Physico-chemical characterisation of a clay rock from Meknes-Tafilalet region. *Physical & chemical news*, (34), 120-125.
- El Gamouz, A., Tijani, N., Shehadi, I., Hasan, K., & Kawam, M. A. F. (2019). Characterization of the firing behaviour of an illite-kaolinite clay mineral and its potential use as membrane support. *Heliyon*, 5(8). <https://doi.org/10.1016/j.heliyon.2019.e02281>
- EN 1015-11. (1999) - *Methods of test for mortar for masonry – Part 11: Determination of flexural and compressive strength of hardened mortar*.
- EN 1015-2. (1998) - *Methods of test for mortar for masonry - Part 2: Bulk sampling of mortars and preparation of test mortars*.
- EN 1097-7. (2008) - *Tests for mechanical and physical properties of aggregates*.
- EN 13823. (2020) - *Reaction to fire tests for building products – Building products excluding floorings exposed to the thermal attack by a single burning item*. CEN.
- EN 196-3. (2016) - *Methods of testing cement - Part 3: Determination of setting times and soundness*.
- EN 196-6. (2018) *Methods of testing cement - Part 6: Determination of fineness*.
- EN 197-1:2011, *Cement Composition, specifications and conformity criteria for common cements* (2011).
- EN 1991-1-2 (2002): *Actions on structures - Part 1-2: General actions - Actions on structures exposed to fire*. European Committee for Standardization.
- EN 451-1. (2017). *Method of testing fly ash - Part 1: Determination of free calcium oxide content*.
- EN 772-1. (2011). *Methods of test for masonry units – Part 1: Determination of compressive strength*. European Committee for standardization (CEN).

- EN 772-13. (2000) - Methods of test for masonry units - Part 13: Determination of net and gross dry density of masonry units (except for natural stone)
- EN 772-4 (1998). *Methods of test for masonry units – Part 4: Determination of real and bulk density of masonry units*. European Committee for Standardization CEN.
- Exelbirt, J. (2011). *Characterizing Compressed Earth Bricks Based on Hygrothermal Aging and Wind-Driven Rain Erosion* (Doctoral dissertation, University of Florida).
- Fernandes, J., Peixoto, M., Mateus, R., & Gervásio, H. (2019). Life cycle analysis of environmental impacts of earthen materials in the Portuguese context: Rammed earth and compressed earth blocks. *Journal of cleaner production*, 241, 118286. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2019.118286>
- Fernandez, R., Martirena, F., & Scrivener, K. L. (2011). The origin of the pozzolanic activity of calcined clay minerals: A comparison between kaolinite, illite and montmorillonite. *Cement and concrete research*, 41(1), 113-122. <https://doi.org/10.1016/j.cemconres.2010.09.013>
- Ferreira, D. M., Luso, E., Cruz, M. L., Mesquita, L. M., & Gontijo, G. (2020). Fire behaviour of ecological soil–cement blocks with waste incorporation: Experimental and numerical analysis. *Journal of Fire Sciences*, 38(2), 173-193. <https://doi.org/10.1177/0734904119893921>
- Gao, J. (2008). *Jiayuguan Fort* [Fotografia]. <https://upload.wikimedia.org/wikipedia/commons/1/10/JiayuguanFort.jpg> (acedido a 17/10/2024)
- Gao, J. (2013). *Shibam details Wadi Hadhramaut Yemen* [Fotografia]. https://upload.wikimedia.org/wikipedia/commons/0/06/Shibam_details_Wadi_Hadhramaut_Yemen.jpg (acedido a 17/10/2024)
- Garg, N., & Skibsted, J. (2019). Dissolution kinetics of calcined kaolinite and montmorillonite in alkaline conditions: Evidence for reactive Al(V) sites. *Journal of the American Ceramic Society*, 102(12), 7720–7734. <https://doi.org/10.1111/jace.16663>
- Gialanella, S., Girardi, F., Ischia, G., Lonardelli, I., Mattarelli, M., & Montagna, M. (2010). On the goethite to hematite phase transformation. *Journal of thermal analysis and calorimetry*, 102(3), 867-873. <https://doi.org/10.1007/s10973-010-0756-2>
- Gomes, M., Gonçalves, T., & Faria, P. (2014). Unstabilised rammed earth: characterization of the material collected from old constructions in south Portugal and comparison to normative requirements. *International Journal of Architectural Heritage*. 8:2, 185-212. <http://dx.doi.org/10.1080/15583058.2012.683133>
- Gonçalves, D. (2023). *Estabilização de blocos de terra com ligantes recuperados a partir da fração cimentícia de resíduos de betão - Durabilidade*. Dissertação de Mestrado em Engenharia Civil. Instituto Superior Técnico, Universidade de Lisboa.
- Hager, I. (2013). Behaviour of cement concrete at high temperature. *Bulletin of the Polish Academy of Sciences: Technical Sciences*, (1). DOI:[10.2478/bpasts-2013-0013](https://doi.org/10.2478/bpasts-2013-0013)

- Hall, M. R., & Swaney, W. (2012). European modern earth construction. In *Modern Earth Buildings* (pp. 650-687). Woodhead Publishing. <https://doi.org/10.1533/9780857096166.5.650>
- Hall, M. R., Najim, K. B., & Dehdezi, P. K. (2012). Soil stabilisation and earth construction: materials, properties and techniques. In *Modern earth buildings* (pp. 222-255). Woodhead Publishing. <https://doi.org/10.1533/9780857096166.2.222>
- HANZLICEK, T., & Steinerová-Vondráková, M. (2002). Investigation of dissolution of aluminosilicates in aqueous alkaline solution under laboratory conditions. *Ceramics (Praha)*, 46(3), 97-103.
- HB 195 (2002) - The Australian earth building handbook.
- Heathcote, K.A. (1995) Durability of Earthwall Buildings. *Construction and Building Materials*, 9, 185-189. [https://doi.org/10.1016/0950-0618\(95\)00035-E](https://doi.org/10.1016/0950-0618(95)00035-E)
- Hoff, G. C., Bilodeau, A., & Malhotra, V. M. (2000). Elevated temperature effects on HSC residual strength. *Concrete International*, 22(4), 41-48.
- Houben, H., & Guillaud, H. (1994). *Earth construction: A comprehensive guide*. Intermediate Technology Publications.
- ISO (International Organization for Standardization). (Ano). *ISO 834: Fire resistance tests – Elements of building construction*.
- Izadifar, M., Thissen, P., Steudel, A., Kleeberg, R., Kaufhold, S., Kaltenbach, J., & Emmerich, K. (2020). Comprehensive examination of dehydroxylation of kaolinite, disordered kaolinite, and dickite: Experimental studies and density functional theory. *Clays and Clay Minerals*, 68(4), 319-333. <https://doi.org/10.1007/s42860-020-00082-w>
- Jiang, T., Li, G., Qiu, G., Fan, X., & Huang, Z. (2008). Thermal activation and alkali dissolution of silicon from illite. *Applied Clay Science*, 40(1-4), 81-89. <https://doi.org/10.1016/j.clay.2007.08.002>
- Karunadasa, K. S., Manoratne, C. H., Pitawala, H. M. T. G. A., & Rajapakse, R. M. G. (2019). Thermal decomposition of calcium carbonate (calcite polymorph) as examined by in-situ high-temperature X-ray powder diffraction. *Journal of Physics and Chemistry of solids*, 134, 21-28. <https://doi.org/10.1016/j.jpcs.2019.05.023>
- Kasinikota, P., & Tripura, D. D. (2022). Prediction of physical–mechanical properties of hollow interlocking compressed unstabilized and stabilized earth blocks at different moisture conditions using ultrasonic pulse velocity. *Journal of Building Engineering*, 48, 103961. <https://doi.org/10.1016/j.jobbe.2021.103961>
- Kaya, M. (2022). Effect of steel fiber additive on high temperature resistance in geopolymer mortars. *Iranian Journal of Science and Technology, Transactions of Civil Engineering*, 46(3), 1949-1967. <https://doi.org/10.1007/s40996-021-00798-2>
- Keppert, M., Pommer, V., Šádková, K., Krejsová, J., Vejmelková, E., Černý, R., & Koňáková, D. (2024). Thermal activation of illitic-kaolinitic mixed clays. *Journal of Thermal Analysis and Calorimetry*, 149(19), 10533-10544. <https://doi.org/10.1007/s10973-024-13342-x>

- Kerali, A. (2001). *Durability of Compressed and Cement-Stabilised Building Blocks*. PhD Dissertation, University of Warwick.
- Khaliq, W., & Bashir, M. F. (2016). High temperature mechanical and material properties of burnt masonry bricks. *Materials and Structures*, 49, 5195-5208. <https://doi.org/10.1617/s11527-016-0854-0>
- Khoury, G. A., Majorana, C. E., Pesavento, F., & Schrefler, B. A. (2002). Modelling of heated concrete. *Magazine of Concrete Research*, 54(2), 77–101. <https://doi.org/10.1680/macr.2002.54.2.77>
- Kodur, V. R., & Harmathy, T. Z. (2002). Properties of building materials. In P. J. DiNenno (Ed.), *SFPE Handbook of Fire Protection Engineering* (3rd ed., pp. 1.155–1.181). Society of Fire Protection Engineers.
- Kouakou, C. H., & Morel, J. C. (2009). Strength and elasto-plastic properties of non-industrial building materials manufactured with clay as a natural binder. *Applied Clay Science*, 44(1-2), 27-34. <https://doi.org/10.1016/j.clay.2008.12.019>
- Kurdowski, W. (2014). *Cement and Concrete Chemistry*. Springer Science & Business.
- Li, C., Sun, H., & Li, L. (2010). A review: The comparison between alkali-activated slag (Si + Ca) and metakaolin (Si + Al) cements. *Cement and Concrete Research*, 40(9), 1341–1349. <https://doi.org/10.1016/j.cemconres.2010.03.020>
- LNEC E-195. (1966) - Preparação por via seca de amostras para ensaios de identificação.
- LNEC (1993). E394 – Materiais de construção: Determinação da absorção de água por capilaridade.
- LNEC E-64. (1979) – Cimentos: determinação da massa volúmica.
- Lothenbach, B., Durdziński, P., & De Weerd, K. (2016). Chapter 5: Thermogravimetric analysis. In K. Scrivener, R. Snellings, & B. Lothenbach (Eds.), *A practical guide to microstructural analysis of cementitious materials* (pp. 177–211). CRC Press. <https://doi.org/10.1201/b19074-5>
- Macdonald, A. J. (2001). *Structural and architecture* (2nd ed.). Architectural Press.
- Mansour, M. B., Jelidi, A., Cherif, A. S., & Jabrallah, S. B. (2016). Optimizing thermal and mechanical performance of compressed earth blocks (CEB). *Construction and Building Materials*, 104, 44-51. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2015.12.024>
- Marchon, D., & Flatt, R. J. (2016). Mechanisms of cement hydration. In *Science and technology of concrete admixtures* (pp. 129-145). Woodhead Publishing. DOI: [10.1016/j.cemconres.2010.09.011](https://doi.org/10.1016/j.cemconres.2010.09.011)
- Mbumbia, L., & de Wilmars, A. M. (2002). Behaviour of low-temperature fired laterite bricks under uniaxial compressive loading. *Construction and Building Materials*, 16(2), 101-112. [https://doi.org/10.1016/S0950-0618\(01\)00035-6](https://doi.org/10.1016/S0950-0618(01)00035-6)
- Mehta, P. K., & Klein, A. (1967). Formation of ettringite in pastes containing calcium aluminoferrites and gypsum. *Highway Research Record*, 192, 32-45.

- Menéndez, E., Vega, L., & Andrade, C. (2012). Use of decomposition of portlandite in concrete fire as indicator of temperature progression into the material: Application to fire-affected builds. *Journal of thermal analysis and calorimetry*, 110(1), 203-209.
<https://doi.org/10.1007/s10973-011-2159-4>
- Millogo, Y., Morel, J., Aubert, J., & Ghavami, K. (2014). Experimental analysis of Pressed Adobe Blocks reinforced with Hibiscus cannabinus fibers. In *Construction and Building Materials* (Vol. 52, pp. 71–78). Elsevier Ltd. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2013.10.094>
- Minke, G. (2006). *Building with earth: design and technology of a sustainable architecture*. De Gruyter.
- Moevus, M., Anger, R., & Fontaine, L. (2012). Hygro-thermo-mechanical properties of earthen materials for construction: a literature review. In *Terra 2012, XI International Conference on the Study and Conservation of Earthen Architectural Heritage*.
- Moodi, F., Ramezaniapour, A. A., & Safavizadeh, A. S. (2011). Evaluation of the optimal process of thermal activation of kaolins. *Scientia Iranica*, 18(4), 906-912.
<https://doi.org/10.1016/j.scient.2011.07.011>
- Nabais, M (2023). Caraterização mecânica de blocos de terra comprimida com incorporação de agregado e cimento reciclado. Dissertação de Mestrado em Engenharia Civil. Instituto Superior Técnico, Universidade de Lisboa.
- NBR 10833. (1989) - Fabricação de tijolo maciço e bloco vazado de solo-cimento com utilização de prensa hidráulica.
- Neville, A. M. (1995). *Properties of concrete* (4th ed.). Longman.
- NF XP P13-901 (2001). In Blocs de terre comprimée pour murs et cloisons. Definitions, spécifications, méthodes d'essai, conditions de reception. Paris, AFNOR.
- NP EN 1097-6. (2003) – Ensaio das propriedades mecânicas e físicas dos agregados.
- NP EN 12390-6. (2011) - Ensaios do betão endurecido: resistência à tração por compressão de provetes, IPQ, Lisboa.
- NP EN 12504-2. (2003). *Ensaios Do Betão Nas Estruturas Parte 2: Ensaio Não Destrutivo Determinação Do Índice Esclerométrico*. Instituto Português da Qualidade (IPQ)
- NP EN 12504-4. (2007). *Ensaios Do Betão Nas Estruturas Parte 4: Detecção de dano com ultrassons em elementos de betão*. Instituto Português da Qualidade (IPQ)
- NP EN 196-1. (2016). Métodos de ensaio de cimentos. Parte 1: Determinação das resistências mecânicas, IPQ, Lisboa.
- NP EN 196-2. (2014). Métodos de ensaio de cimentos. Parte 2 : análise química dos cimentos, IPQ, Lisboa.
- NP EN 772-11. (2002) - Unidades de alvenaria - Métodos experimentais - Parte 1: Agregado e natural - Determinação de absorção, Lisboa.

- NP EN 772-3. (2000) - Métodos de ensaio para elementos de alvenaria - Parte 3 : Determinação do volume líquido e da percentagem de furação em elementos cerâmicos para alvenaria por pesagem hidrostática.
- NP EN 933-1. (2012) - Tests for geometrical properties of aggregates - Part 1: Determination of particle size distribution - Sieving method.
- NP EN 933-11. (2011) - Ensaio das propriedades geométricas dos agregados: parte 11: ensaio para classificação dos constituintes de agregados grossos reciclados.
- NP-143. (1969) - Solos: determinação dos limites de consistência, IPQ, Lisboa.
- NP-83. (1965) - Solos: densidade de partículas, IPQ, Lisboa.
- Nshimiyimana, P., Djibo, K. B., Sore, S. O., Coulibaly, Y., Pru'Homme, E., Zhao, Z., & Courard, L. (2024a). High-Temperature Performances of Compressed Earth Blocks Stabilized with Cementitious Binders. In International Conference on Earthen Construction (pp. 376-386). Cham: Springer Nature Switzerland. DOI:[10.1007/978-3-031-62690-6_39](https://doi.org/10.1007/978-3-031-62690-6_39)
- Nshimiyimana, P., Hema, C., Sore, S. O., Zoungana, O., Messan, A., & Courard, L. (2022). DURABILITY PERFORMANCES OF COMPRESSED EARTH BLOCKS EXPOSED TO WETTING–DRYING CYCLES AND HIGH TEMPERATURE. *Eco-Architecture IX: Harmonisation between Architecture and Nature*, 210, 147. DOI:[10.2495/ARC220121](https://doi.org/10.2495/ARC220121)
- Nshimiyimana, P., Messan, A., & Courard, L. (2021). Hydric and durability performances of compressed earth blocks stabilized with industrial and agro by-product binders: calcium carbide residue and rice husk ash. *Journal of Materials in Civil Engineering*, 33(6), 04021121. [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)MT.1943-5533.0003745](https://doi.org/10.1061/(ASCE)MT.1943-5533.0003745)
- Nshimiyimana, P., Messan, A., & Courard, L. (2024b). A snapshot review on the improvement of structural performances of compressed earth blocks stabilized with alternative binders: the case of Burkina Faso. *Innovative Infrastructure Solutions*, 9(12), 477. <https://doi.org/10.1007/s41062-024-01787-w>
- NTC 5324. (2004). *Bloques de suelo cemento para muros y divisones. Definiciones. Especificaciones. Métodos de ensayo. Condiciones de entrega*. ICONTEC. Bogotá.
- Oliveira, P. N., Fonseca, E. M., Campilho, R. D., & Piloto, P. A. (2021). Analytical equations applied to the study of steel profiles under fire according to different nominal temperature-time curves. *Mathematical and Computational Applications*, 26(2), 48. <https://doi.org/10.3390/mca26020048>
- Osula, D. (1996). A comparative evaluation of cement and lime modification of laterite. In *Engineering Geology* (Vol. 42, pp. 71–81). Elsevier Ltd. [https://doi.org/10.1016/0013-7952\(95\)00067-4](https://doi.org/10.1016/0013-7952(95)00067-4)
- 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>

- Pachta, V., Triantafyllaki, S., & Stefanidou, M. (2018). Performance of lime-based mortars at elevated temperatures. *Construction and Building Materials*, 189, 576–584.
<https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2018.09.027>
- Pedrp, M., 2025. Dissertação a ser discutida
- Pino, E., 2013. “Comportamento de betões leves estruturais submetidos à acção de temperaturas elevadas”, Dissertação de Mestrado em Engenharia Civil, Instituto Superior Técnico, Lisboa
- Pohowe, S. I., Abdallah, R., Pliya, P., & Beaucour, A. L. (2023). Influence of sawdust and flax shives on the high temperature mechanical behavior of earthen materials. *Materials Today: Proceedings*. <https://doi.org/10.1016/j.matpr.2023.06.240>
- Portugal. (2020). *Portaria n.º 135/2020, de 2 de junho*. Diário da República n.º 107/2020, Série I.
<https://data.dre.pt/eli/port/135/2020/p/cons/20200727/pt/html>
- Prusinski, J. R., & Bhattacharja, S. (1999). Effectiveness of Portland Cement and Lime in Stabilizing Clay Soils. *Transportation Research Record*, 1652(1), 215-227.
<https://doi.org/10.3141/1652-28>
- Rao, S. K. P., & Tadepalli, T. (2024). *High-temperature behaviour of concrete: A review*. In R. K. Pancharathi et al. (Eds.), *Low Carbon Materials and Technologies for a Sustainable and Resilient Infrastructure* (pp. 167–186). Springer Nature Singapore. https://doi.org/10.1007/978-981-99-7464-1_13
- 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., Bogas, J. A., Cruz, R., & Gomes, M. G. (2024)b. Eco-recycled cement's effect on the microstructure and hygroscopic behaviour of compressed stabilised earth blocks. *Journal of Building Engineering*, 95, 110227. <https://doi.org/10.1016/j.jobbe.2024.110227>
- Real, S., Bogas, J. A., Cruz, R., Gomes, M. G., & Nabais, M. (2024)a. Thermal performance of compressed earth blocks stabilised with thermoactivated recycled cement. *Energy and Buildings*, 314, 114288.<https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2024.114288>
- Real, S., Carriço, A., Bogas, J. A., & Guedes, M. (2020). Influence of the treatment temperature on the microstructure and hydration behavior of thermoactivated recycled cement. *Materials*, 13(18), 3937. <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>
- Reddy, B. V. (2012). Stabilised soil blocks for structural masonry in earth construction. In *Modern earth buildings* (pp. 324-363). Woodhead Publishing.
<https://doi.org/10.1533/9780857096166.3.324>
- Rigassi, V., & CRATerre-EAG (1985). *Mecânica dos solos-Introdução à engenharia geotécnica: Vol.1*. Deutsches Zentrum für Entwicklungstechnologien – GATE

- RILEM TC 129 MHT, 2000. "Test methods for mechanical proprieties of concrete at high temperatures. Part 8: Steady – state creep and creep recovery for service and accident conditions", *Materials and Structures*, v. 33, pp 6-13
- Rix, C. G. (1998). *Stabilisation of a highly plastic clay soil for the production of compressed earth blocks*. University of the Witwatersrand.
- Riza, F. V., & Rahman, I. A. (2015). The properties of compressed earth-based (CEB) masonry blocks. In *Eco-efficient masonry bricks and blocks* (pp. 379-392). Woodhead Publishing. <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, J. (2024). *Estabilização de blocos de terra com ligantes recuperados a partir da fração cimentícia de resíduos de betão - Durabilidade*. Dissertação de Mestrado em Engenharia Civil. Instituto Superior Técnico, Universidade de Lisboa
- Sabai, S. M. M., Lichtenberg, J. J., Egmond, E. L. C., Florea, M. M., & Brouwers, H. J. H. (2016). Construction and demolition waste characteristics in Tanzania. *Huria: Journal of the Open University of Tanzania*, 23(1), 1-19. DOI:<https://doi.org/10.61538/huria.v23i0.24>
- Sandra, N., Yusmar, F., Melinda, A. P., Juliafad, E., Murdiansyah, L., & Caronge, M. A. (2024). INFLUENCE OF FIRING TEMPERATURE ON THE MECHANICAL PROPERTIES OF BRICKS. *GEOMATE Journal*, 26(117), 124-131. DOI:[10.21660/2024.117.q13381](https://doi.org/10.21660/2024.117.q13381)
- Sekhar, D., & Nayak, S. (2018). Utilization of granulated blast furnace slag and cement in the manufacture of compressed stabilized earth blocks. In *Construction and Building Materials* (Vol. 166, pp. 531–536). Elsevier Ltd. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2018.01.125>
- Serpell, R., & Lopez, M. (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>
- Shimada, Y., & Young, J. F. (2001). Structural changes during thermal dehydration of ettringite. *Advances in cement research*, 13(2), 77-81. <https://doi.org/10.1680/adcr.2001.13.2.77>
- Shui, Z., Xuan, D., Chen, W., Yu, R., & Zhang, R. (2007). *Cementitious characteristics of hydrated cement paste subjected to various dehydration temperatures*. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2007.10.016>
- Shui, Z., Xuan, D., Wan, H., & Cao, B. (2008). Rehydration reactivity of recycled mortar from concrete waste experienced to thermal treatment. *Construction and Building materials*, 22(8), 1723-1729. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2007.05.012>
- Shukla, A., Tiwari, G. N., & Sodha, M. S. (2009). Embodied energy analysis of adobe house. *Renewable Energy*, 34(3), 755–761. <https://doi.org/10.1016/j.renene.2008.04.002>

- Silva, R. A., Oliveira, D. V., Miranda, T. F., Cristelo, N. M., Escobar, M. C., & Soares, E. (2013). Rammed earth construction with granitic residual soils: The case study of northern Portugal. *Construction and Building Materials*, 47*, 181–191.
<https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2013.05.047>
- Silva, M. (2015). *Blocos de terra compactada com e sem materiais cimentícios*. Dissertação de mestrado em Engenharia Civil. Instituto Superior Técnico, Universidade de Lisboa.
- Siyapze, F. (2022). Influence du taux de fibres et de l'humidité sur le comportement à haute température des briques de terre crue, rapport de stage de master. *CY Cergy Paris Université*.
- Siyapze, F., Pliya, P., Abdallah, R., Beaucour, A. (2023) Influence of sawdust and soil type on the high temperature behavior of raw earth bricks. *Materials Today: Proceedings*.
<https://doi.org/10.1016/j.matpr.2023.07.093>
- Skinner, B. J. (1966). Section 6: thermal expansion. <https://doi.org/10.1130/MEM97-p75>
- Sousa, V., & Bogas, J. A. (2021). Comparison of energy consumption and carbon emissions from clinker and recycled cement production. *Journal of Cleaner Production*, 306, 127277.
<https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2021.127277>
- Sperinck, S., Raiteri, P., Marks, N., & Wright, K. (2011). Dehydroxylation of kaolinite to metakaolin—a molecular dynamics study. *Journal of Materials Chemistry*, 21(7), 2118-2125.
DOI:[10.1039/C0JM01748E](https://doi.org/10.1039/C0JM01748E)
- Splittgerber, F., & Mueller, A. (2003, May). Inversion of the cement hydration as a new method for identification and/or recycling. In *International congress on the chemistry of cement, Durban, South Africa* (pp. 1282-1290). [https://doi.org/10.1016/S0008-8846\(03\)00229-1](https://doi.org/10.1016/S0008-8846(03)00229-1)
- Stevenson, C. M., & Gurnick, M. (2016). Structural collapse in kaolinite, montmorillonite and illite clay and its role in the ceramic rehydroxylation dating of low-fired earthenware. *Journal of Archaeological Science*, 69, 54-63. <https://doi.org/10.1016/j.jas.2016.03.004>
- Suh, H., Jee, H., Kim, J., Kitagaki, R., Ohki, S., Woo, S., Jeong, K., & Bae, S. (2020). Influences of rehydration conditions on the mechanical and atomic structural recovery characteristics of Portland cement paste exposed to elevated temperatures. *Construction and Building Materials*, 235, 117453. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2019.117453>
- Tadonbou, J., Pliya, P., Beaucour, A. L., Faria, P., & Noumowé, A. (2024). Behavior of earth mortars at high temperature. *Construction and Building Materials*, 425, 136093.
<https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2024.136093>
- Tantawy, M. A. (2017). Effect of high temperatures on the microstructure of cement paste. *Journal of Materials Science and Chemical Engineering*, 5(11), 33–48.
<https://doi.org/10.4236/msce.2017.511004>
- Tsega, E., Mosisa, A., & Fufa, F. (2017). Effects of firing time and temperature on physical properties of fired clay bricks. *American Journal of Civil Engineering*, 5(1), 21–26.
[10.11648/j.ajce.20170501.14](https://doi.org/10.11648/j.ajce.20170501.14)

- Turco, C., Junior, A. C. P., Teixeira, E. R., & Mateus, R. (2021). Optimisation of Compressed Earth Blocks (CEBs) using natural origin materials: A systematic literature review. *Construction and Building Materials*, 309, 125140. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2021.125140>
- Ulery, A. L., & Graham, R. C. (1993). Forest fire effects on soil color and texture. *Soil Science Society of America Journal*, 57(1), 135-140. <https://doi.org/10.2136/sssaj1993.03615995005700010026x>
- União Europeia. (2008). *Diretiva 2008/98/CE do Parlamento Europeu e do Conselho, de 19 de novembro de 2008, relativa aos resíduos e que revoga certas diretivas*. Recuperado de <http://eur-lex.europa.eu/legal-content/EN/TXT/?uri=CELEX:32008L0098>
- United States Department of Agriculture. (2022). *The color of soil*. <https://www.usda.gov>
- 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>
- Van Damme, H., & Houben, H. (2018). Earth concrete. Stabilization revisited. *Cement and Concrete Research*, 114, 90-102. <https://doi.org/10.1016/j.cemconres.2017.02.035>
- Vyšvařil, M., Bayer, P., Chromá, M., & Rovnaníková, P. (2014). Physico-mechanical and microstructural properties of rehydrated blended cement pastes. *Construction and Building Materials*, 54, 413-420. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2013.12.021>
- WD-ARS-1333 (2018) Compressed stabilized earth blocks — Requirements, production and construction. ARSO.
- XP P94-047. (1998) - Soils: investigation and testing. Determination of the organic matter content. Ignition method.
- 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/10.1002/fam.1067>
- Yassin, N. I. M., Burhanudin, M. K., Ekhwan, N. I. I., & Hadipramana, J. (2023). A Study of Performance of Compressed Earth Brick Incorporation with Waste Fire Clay Brick as a Filler. *International Journal of Sustainable Construction Engineering and Technology*, 14(3), 193-199. <https://doi.org/10.30880/ijscet.2023.14.03.016>
- 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. (2018). 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, Q., & Ye, G. (2012). Dehydration kinetics of Portland cement paste at high temperature. *Journal of thermal analysis and calorimetry*, 110(1), 153-158. DOI: [10.1007/s10973-012-2303-9](https://doi.org/10.1007/s10973-012-2303-9)

Zhou, Q., Lachowski, E. E., & Glasser, F. P. (2004). Metaettringite, a decomposition product of ettringite. *Cement and Concrete Research*, 34(4), 703-710.
<https://doi.org/10.1016/j.cemconres.2003.10.027>

Anexos

Anexo I

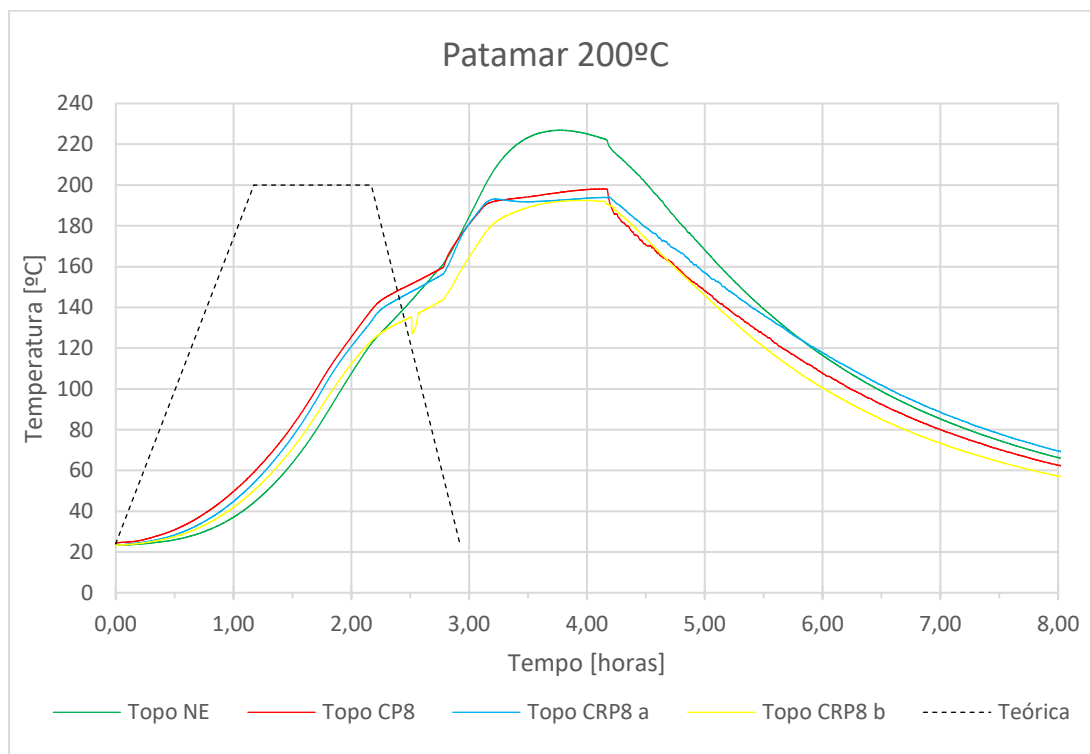


Figura A 1- Temperatura registrada no topo dos BTC no patamar de 200 °C.

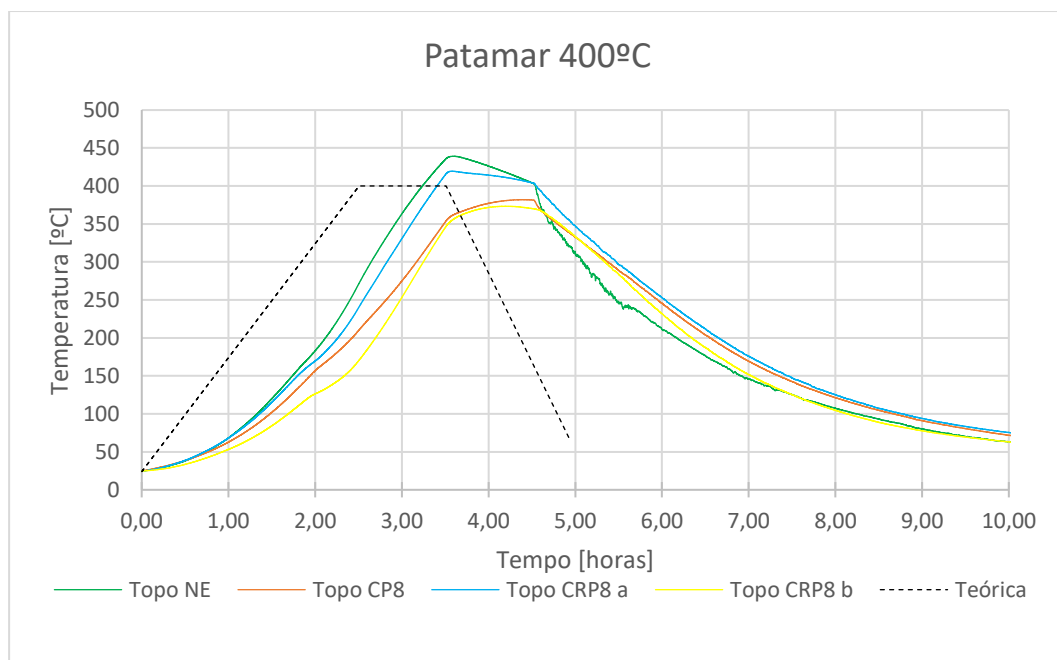


Figura A 2 - Temperatura registrada no topo dos BTC no patamar de 400 °C.

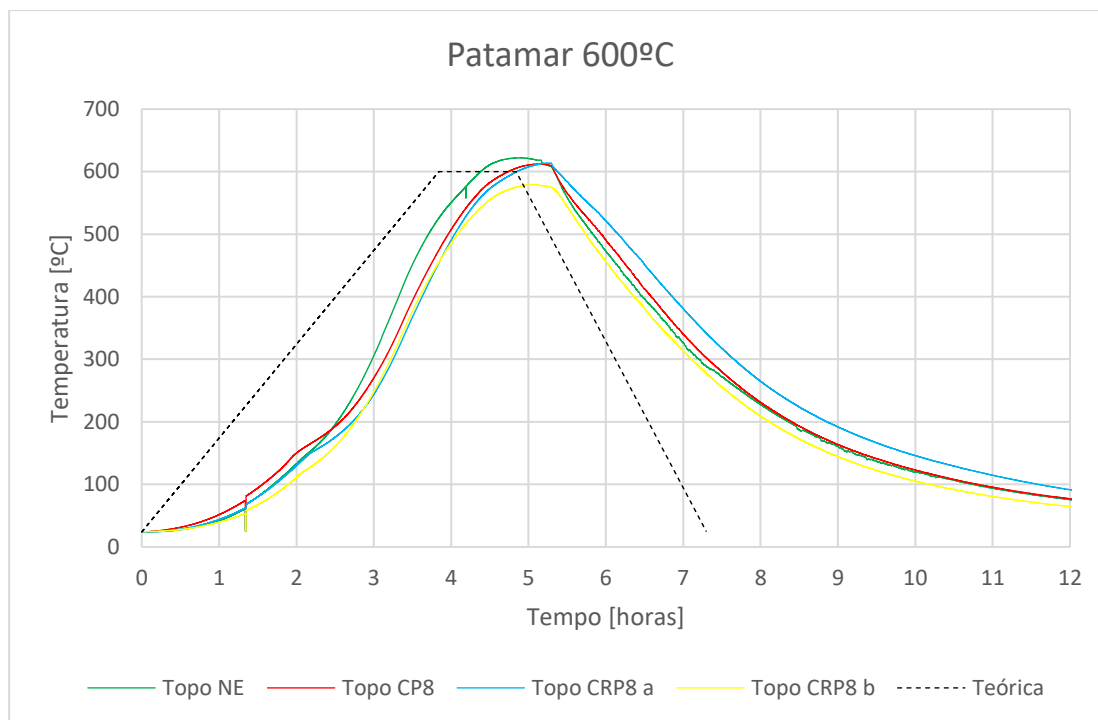


Figura A 3 - Temperatura registada no topo dos BTC no patamar de 600 °C.

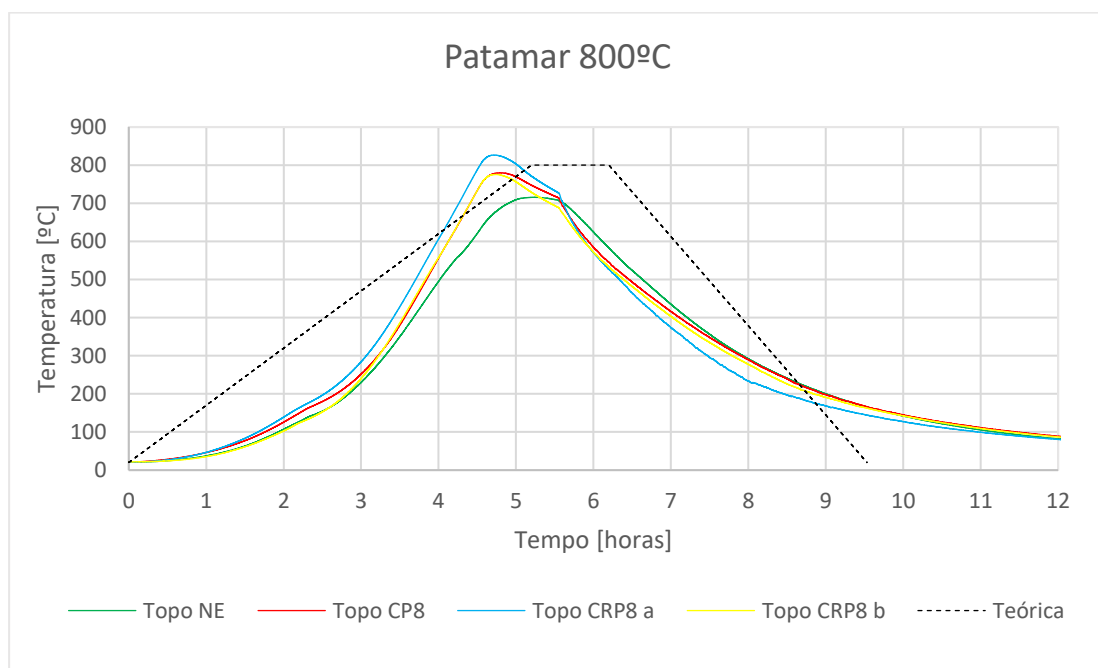


Figura A 4 – Temperatura registada no topo dos BTC no patamar de 800 °C.

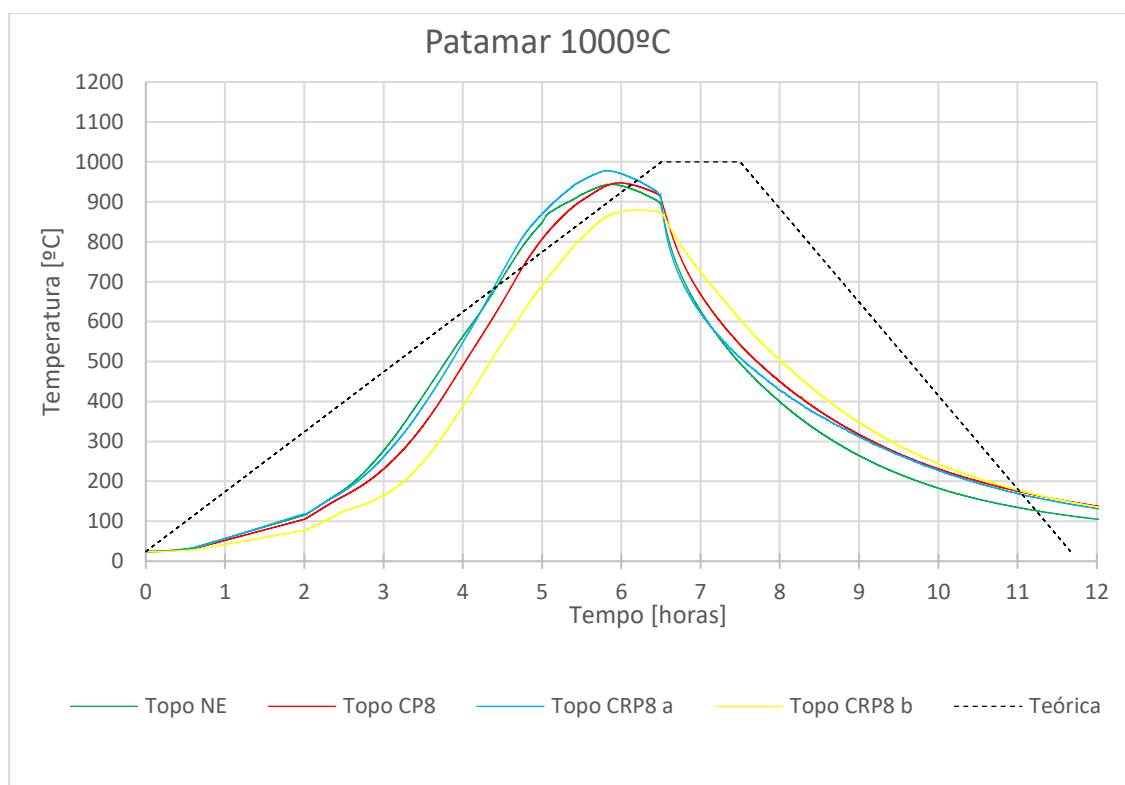


Figura A 5 - Temperaturas registradas no topo dos BTC no patamar de 1000 °C.

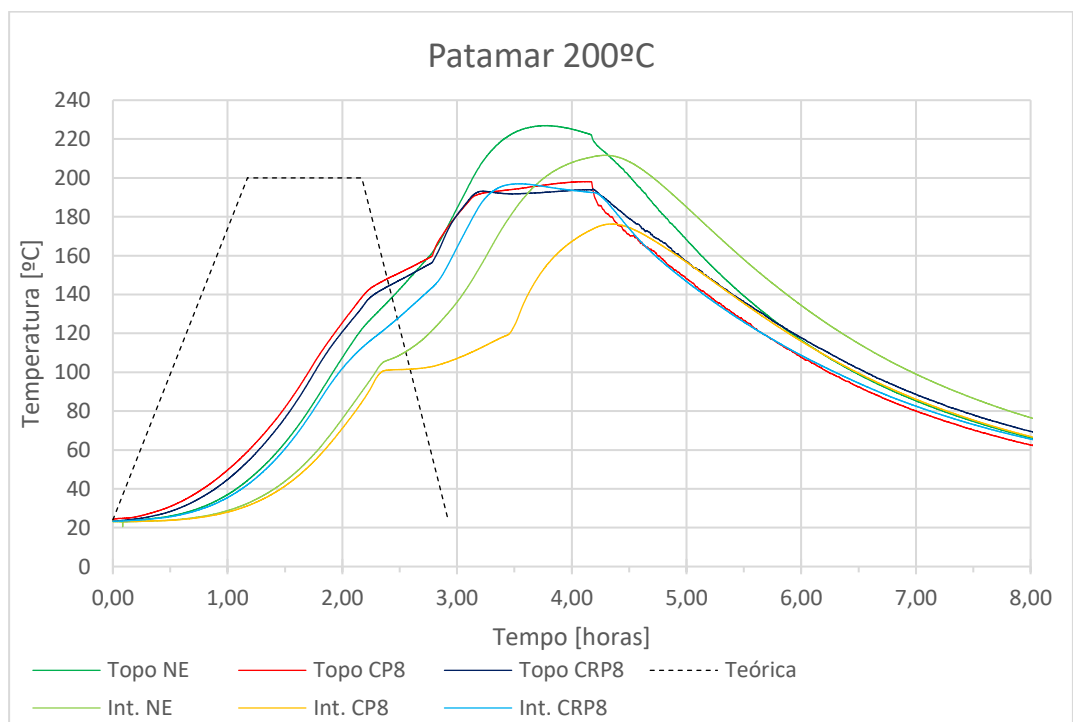


Figura A 6 - Temperaturas registradas no topo e interior dos BTC no patamar de 200 °C.

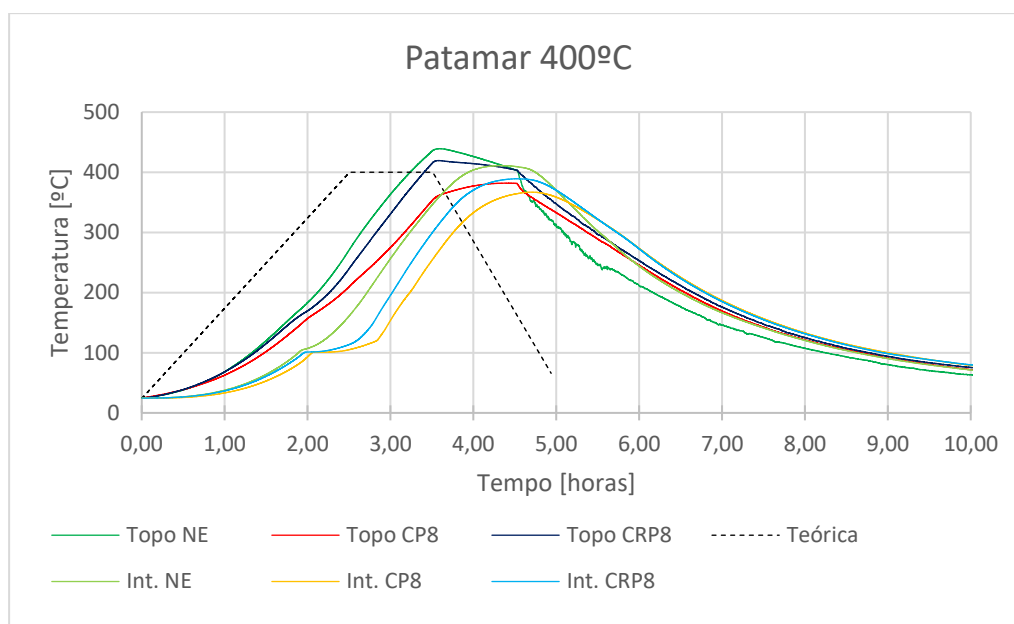


Figura A 7 - Temperaturas registadas no topo e interior dos BTC no patamar de 400 °C

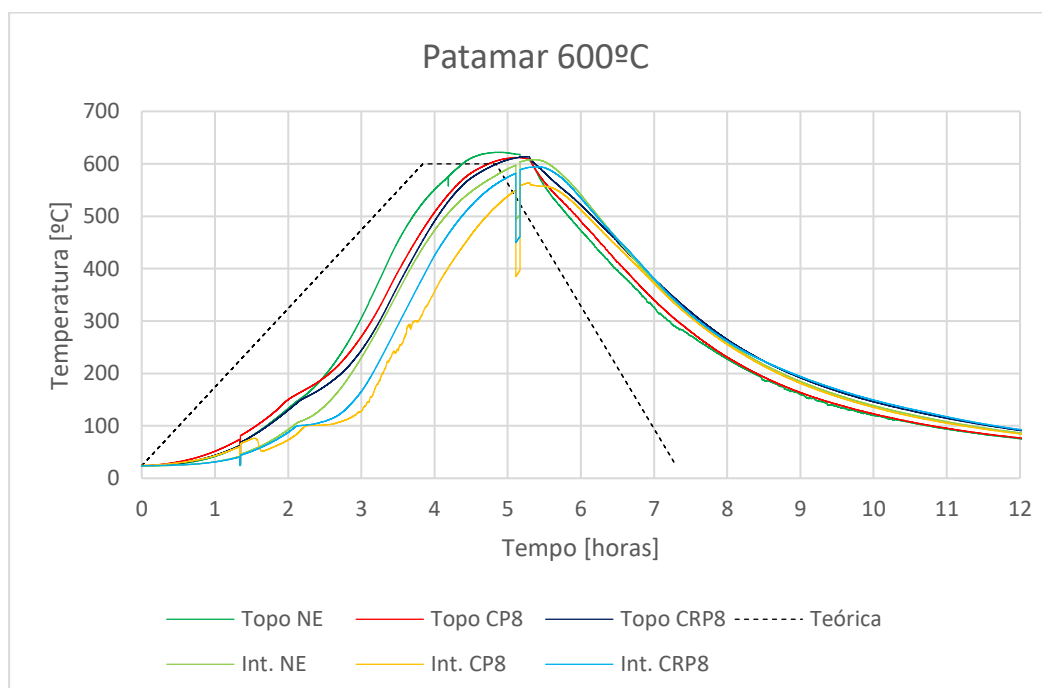


Figura A 8 - Temperaturas registadas no topo e interior dos BTS no patamar de 600 °C.

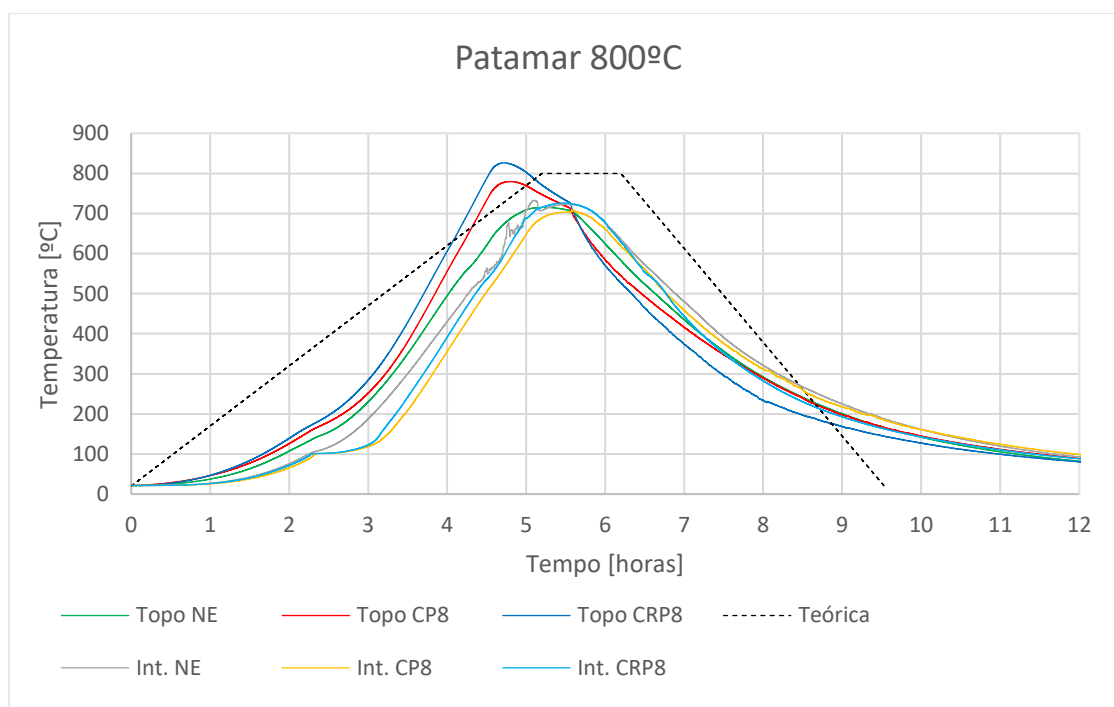


Figura A 9 - Temperaturas registadas no topo e interior dos BTS no patamar de 800 °C.

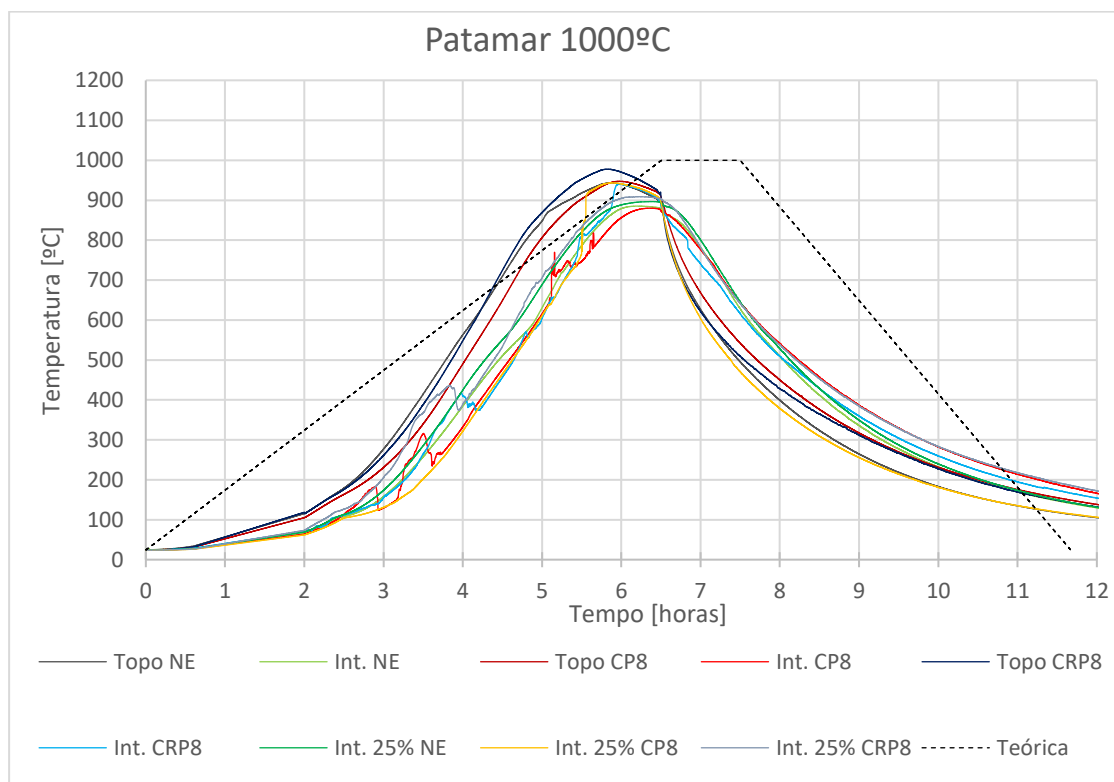


Figura A 10 - Temperaturas registadas no topo, interior e a 25% da profundidade dos BTC no patamar de 1000 °C.

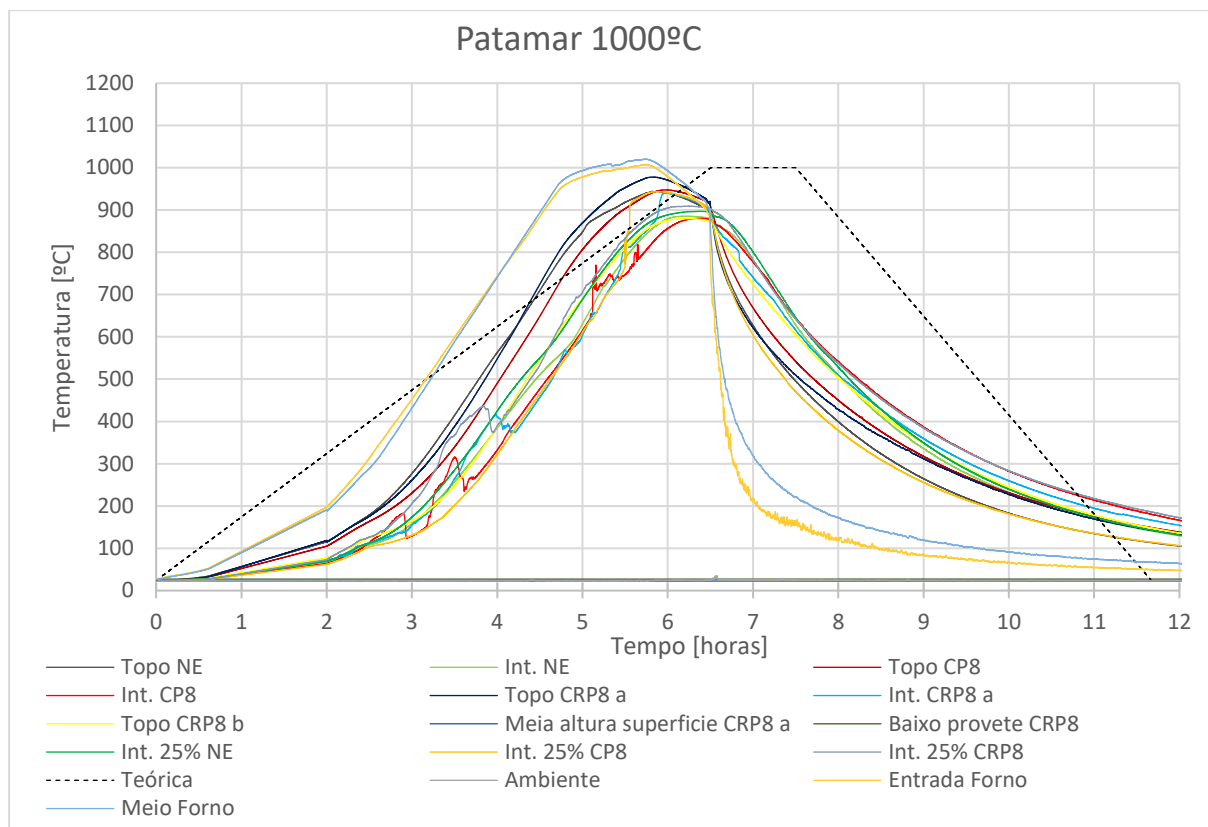


Figura A 11 - Temperatura registada nos 15 termopares utilizados para o patamar de 1000 °C.

Tabela A 1 - Temperaturas máximas registadas no interior dos BTC.

Temperatura		200 °C	400 °C	600 °C	800 °C	1000 °C	
Profundidade		1/2 H					1/4H
Composições	NE	209,5	410,5	607,9	722,9	885,3	845,4
	CP8	173,5	370,0	560,0	703,5	880,0	896,7
	CRP8	196,5	386,5	594,3	726,1	933,1	943,4

Tabela A 2 - Temperaturas máximas registadas no topo dos BTC.

Composições	Temperatura	200 °C	400 °C	600 °C	800 °C	1000 °C
	NE	226,9	439,1	622,0	715,7	950,7
	CP8	198,1	381,9	612,2	779,7	946,4
	CRP8	193,9	419,4	613,2	826,4	974,5

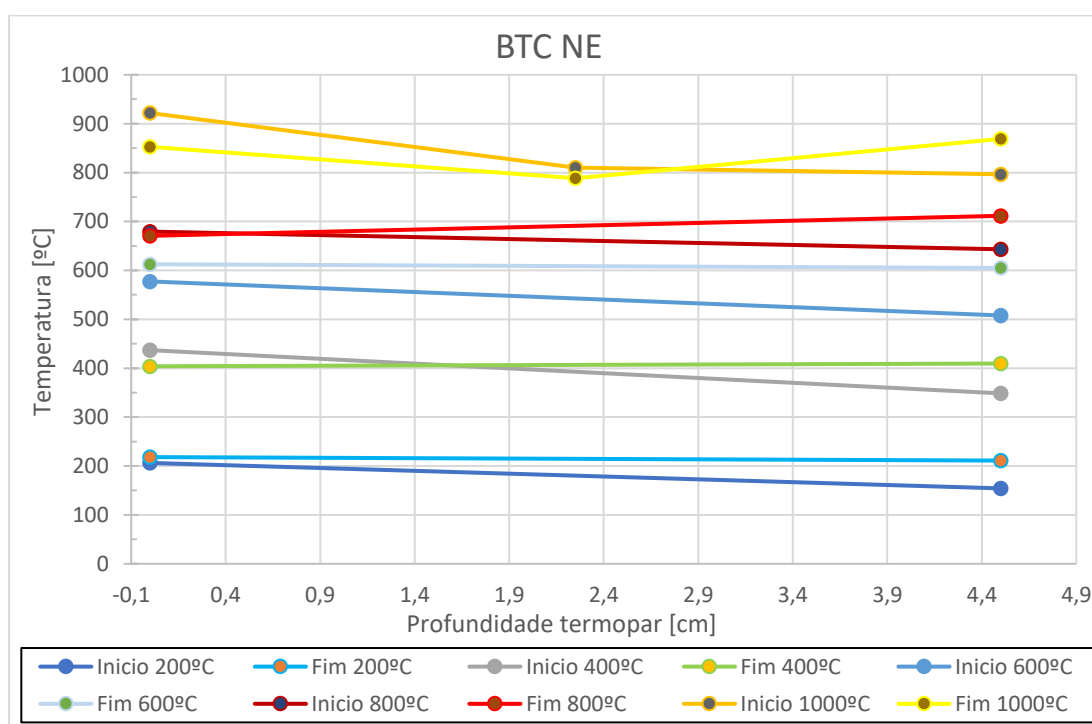


Figura A 12 - Gradiente térmico ao longo da profundidade do BTC NE

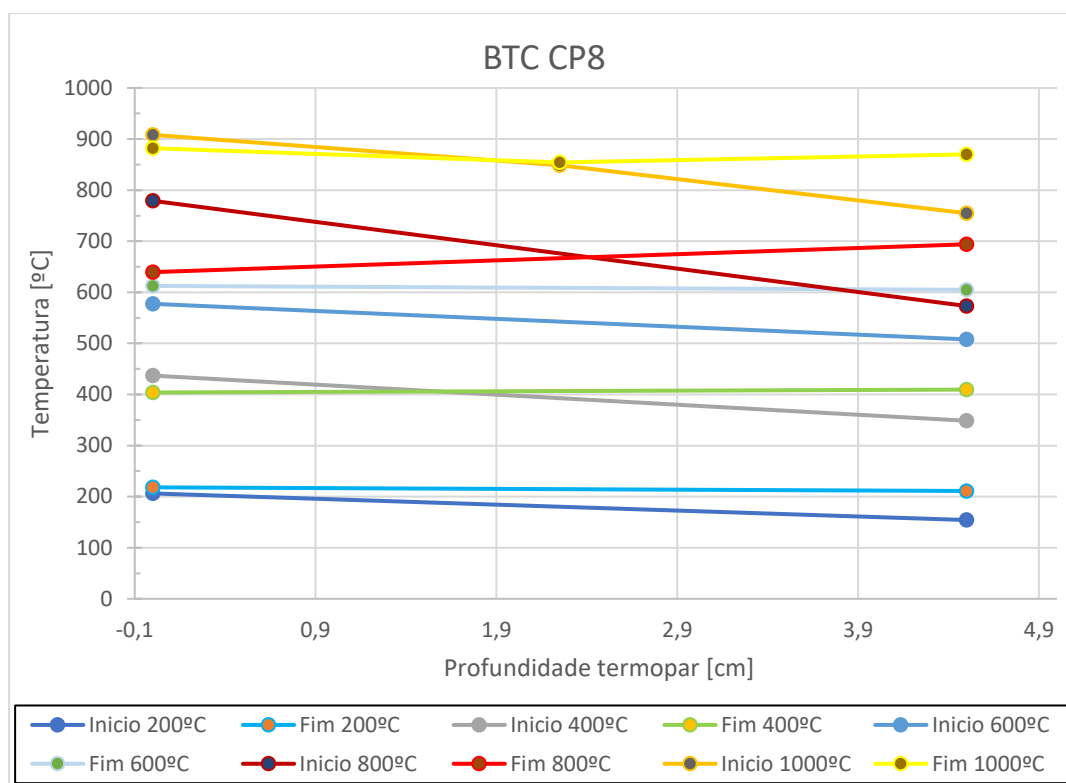


Figura A13 - Gradiente térmico ao longo da profundidade do BTC CP8

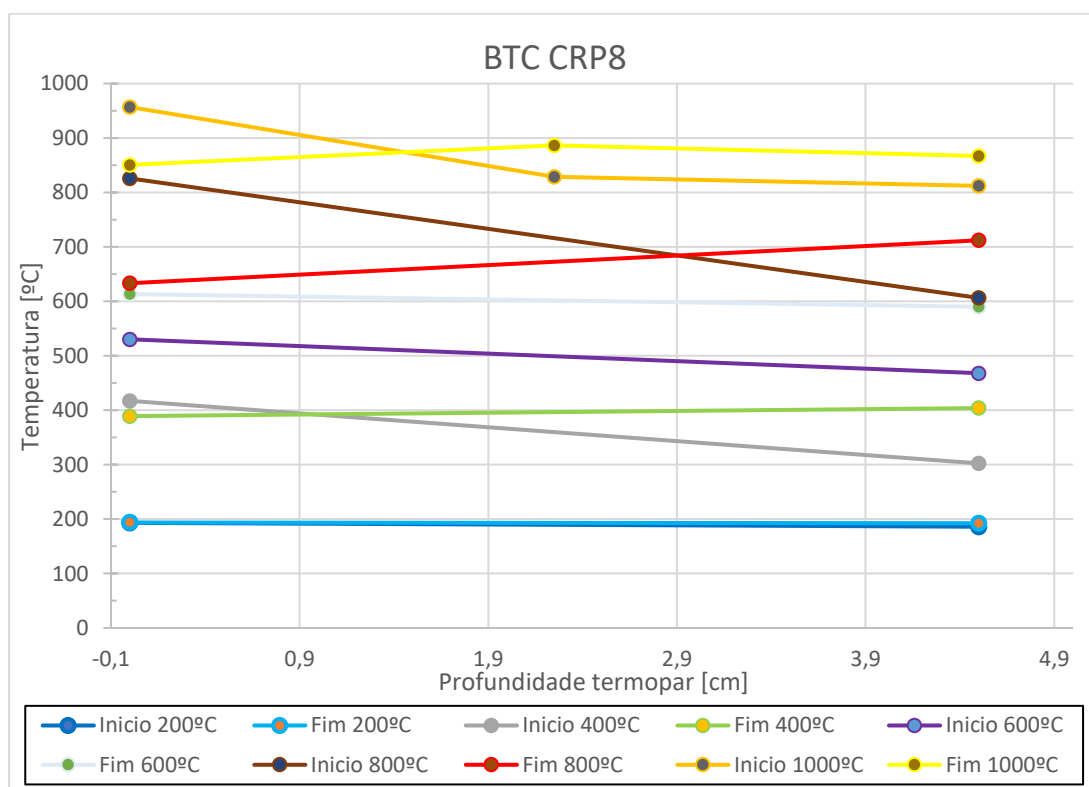


Figura A 14 - Gradiente térmico ao longo da profundidade do BTC CRP8

Anexo II



Figura A 15 - BTC NE ensaiado à Resistência à Compressão com a célula de carga na zona inferior da prensa.



Figura A 16 - Modo de rotura dos blocos ensaiados à Compressão.

Anexo III

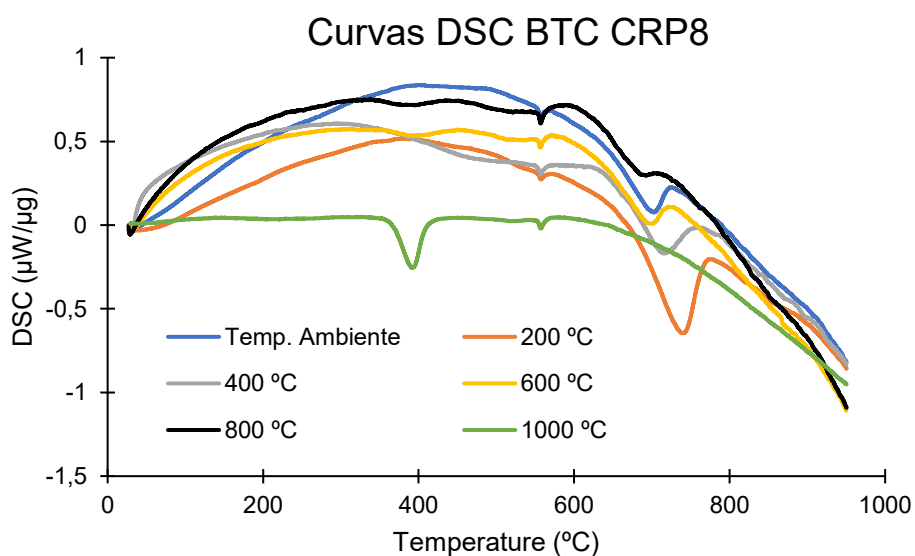


Figura A 127 - Curvas DSC do BTC CRP8

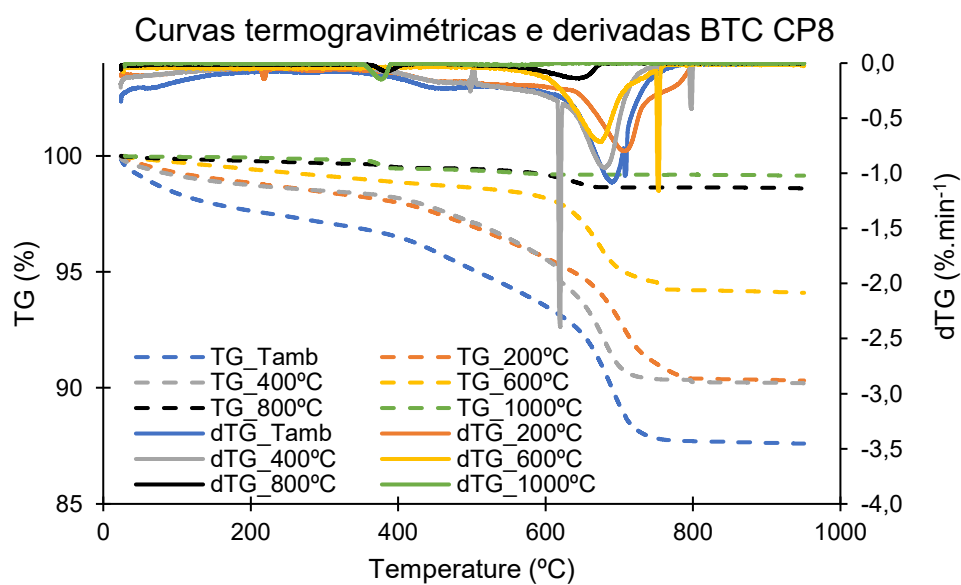


Figura A 138 - Curvas termogravimétricas e derivadas dos BTC CP8.

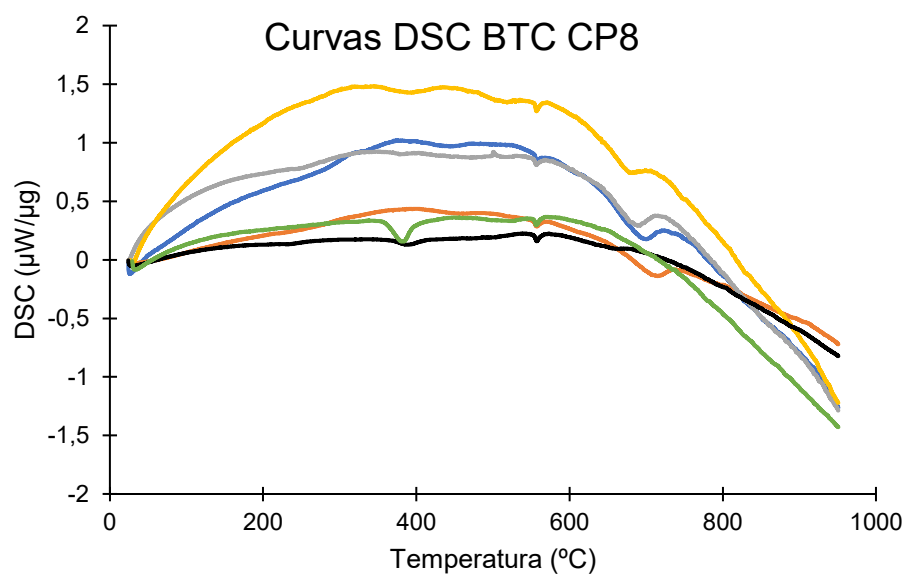


Figura A 149 - Curvas DSC dos BTC CP8.

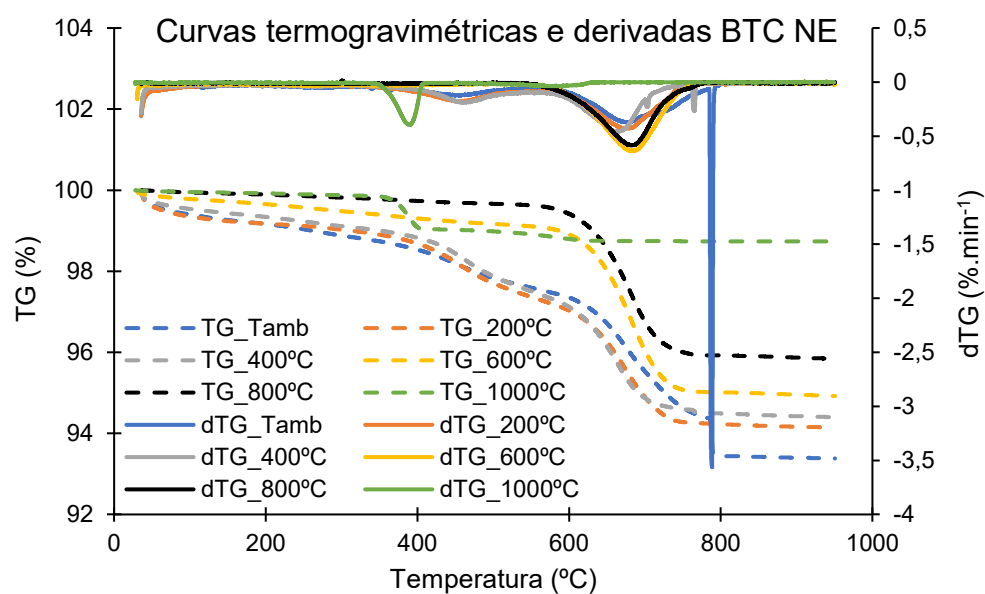


Figura A 20 - Curvas termogravimétricas e derivadas dos BTC NE.

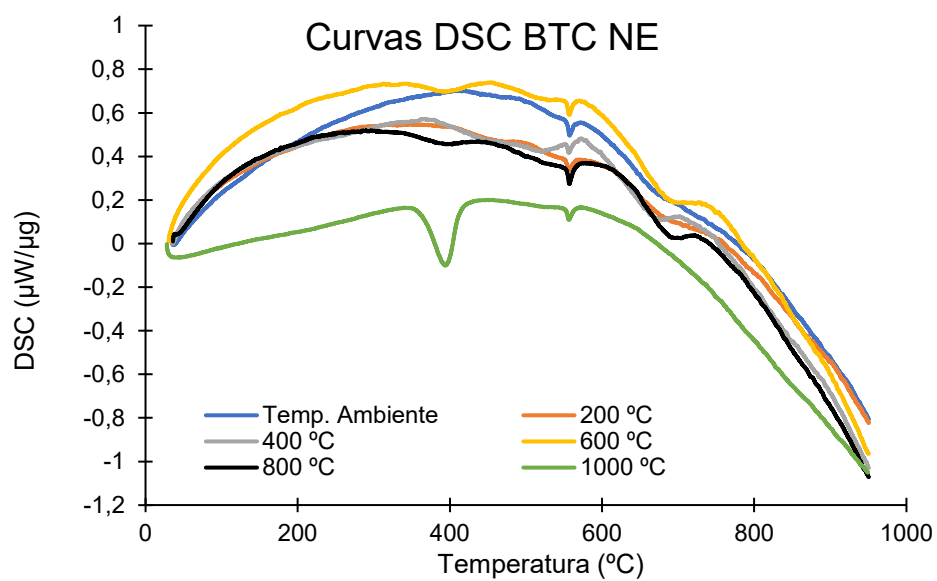


Figura A 21 - Curvas DSC dos BTC NE.