



Materiais produzidos com cimento reciclado e RCD por carbonatação acelerada

Versão final pós defesa

Luciana Sucupira Cristino

Dissertação de Mestrado
Engenharia Civil
(2.º Ciclo de estudos)

Orientador: Prof. Doutor João Paulo de Castro Gomes

Janeiro de 2021

Agradecimentos

A realização deste trabalho não estaria devidamente concluído, sem que nele expressasse os meus mais sinceros agradecimentos e enorme reconhecimento.

Ao orientador, Prof. Doutor João Castro Gomes, pelo acompanhamento e apoio, estando sempre dedicado a me ajudar a ter o melhor trabalho possível, contribuindo sempre com ideias e diversas soluções no sentido de o potencializar a pesquisa.

Um agradecimento especial aos meus pais, amigos e namorado que sempre me apoiaram e incentivaram em todas as minhas decisões, e acima de tudo, pelo vosso amor.

Resumo

Atualmente, o planeta atravessa uma emergência climática, na qual, a sociedade está a ser afetada com as consequências causadas pela grande incidência de poluentes no meio ambiente. Um dos principais causadores dessa incidência, no aumento do índice de poluição, são as empresas geradoras de materiais cimentícios. A União europeia adotou um programa de combate a grande geração de gases do efeito estufa e, com isso, diversos países estão incentivando pesquisas para substituir os materiais poluidores, como também soluções para diminuir o CO₂ do meio.

Com isso, essa pesquisa aborda a análise das características de um material 100 % reciclado obtido por com carbonatação acelerada, contendo cimento reciclado termoativado (CR) e resíduos de construção e demolição (RCD) de betão, para ser utilizado na construção civil. O novo material reciclado foi comparado com um material semelhante produzido com cimento Portland (CP), através de um conjunto de ensaios de caracterização utilizados nessa pesquisa, nomeadamente termogravimetria (TGA), difração de raios-X, porosimetria de mercúrio, espectroscopia de infravermelhos, caracterização microestrutural em microscópio eletrônico e resistência à compressão.

Os resultados dos ensaios indicaram que o material 100% reciclado (com CR) apresentou uma exigência maior de água e também a decomposição de alguns compostos, isso se deve ao CR ter sido obtido por um processo de termoativação a 650°C com vista a ser utilizado como ligante. Os resultados da resistência à compressão do material produzido com CR foram inferiores aos do material obtido com CP, porém o valor está dentro do aceitável para ser utilizado na construção. O ensaio de porosimetria de mercúrio indicaram que o material com CR apresenta uma maior quantidade de vazios, ou seja, mais porosidade que o material obtido com CP. Os resultados do ensaio de raio-x demonstraram que o material com CP apresenta uma estrutura mais cristalina que o material obtido com CR. Além disso, o ensaio de espectroscopia de infravermelhos e o TGA indicaram que o material com CR apresentou uma maior absorção de CO₂ em comparação com o material obtido com CP, podendo ter ocorrido tanto na preparação da amostra, nas misturas e a execução dos cubos, como na carbonatação acelerada por 24 horas.

Com isso, pode-se concluir que este estudo contribuiu para compreender como a utilização de materiais 100% reciclados, obtidos com CR e RCD de betão, podem substituir o cimento Portland e agregados, para a fabricação de blocos de construção. Além disso, utilizar a carbonatação acelerada em vez da cura por hidratação permite a captação e mineralização de CO₂ nos materiais de construção. Portanto, a utilização de

cimento reciclado termoativado como ligante e RCD como agregado em materiais de construção poderá ser uma prática tecnicamente viável, promovendo, por um lado a reutilização e a valorização de materiais com baixo valor e, por outro lado, a captura e utilização de CO₂.

Palavras-chave

Sustentabilidade; Resíduos, Cimento reciclado termoativado, Carbonatação acelerada.

Abstract

The planet is currently going through a climate emergency, in which society is being affected with the consequences caused by the great incidence of pollutants in the environment. One of the main causes of this incidence, in the increase of the pollution index, are the companies that generate cementitious materials. The European Union has adopted a program to combat the large generation of greenhouse gases, and with this, several countries are encouraging research to replace polluting materials, as well as solutions to reduce CO₂ from the environment.

With this, this research addresses the analysis of the characteristics of a 100 % recycled material obtained by with accelerated carbonation, containing thermally activated recycled cement (CR) and concrete construction and demolition waste (CDW), to be used in civil construction. The new recycled material was compared with a similar material produced with Portland cement (PC), through a set of characterization tests used in this research, namely thermogravimetry (TGA), X-ray diffraction, mercury porosimetry, infrared spectroscopy, microstructural characterization in electron microscope and compressive strength.

The results of the tests indicated that the 100% recycled material (with BW) presented a higher water demand and also the decomposition of some compounds this is due to the BW having been obtained by a process of thermoactivation at 650°C in order to be used as a binder. The results of the compressive strength of the material produced with RC were lower than those of the material obtained with PC, but the value is within the acceptable range to be used in construction. The mercury porosimetry test indicated that the material with RC presents a larger amount of voids, i.e., more porosity than the material obtained with PC. The X-ray test results showed that the PC material presents a more crystalline structure than the material obtained with RC. Furthermore, the infrared spectroscopy test and the TGA indicated that the RC material presented a higher absorption of CO₂ compared to the material obtained with PC, which may have occurred both in the preparation of the sample, the mixtures and the execution of the cubes, and in the accelerated carbonation for 24 hours.

With this, it can be concluded that this study has contributed to understanding how the use of 100% recycled materials, obtained with CR and concrete CDW, can replace Portland cement and aggregates to manufacture building blocks.. In addition, using accelerated carbonation instead of hydration curing allows the capture and mineralization of CO₂ in the construction materials. Therefore, using thermally activated recycled cement as a binder and RCD as aggregate in building materials could be a

technically feasible practice, promoting on the one hand the reuse and valorization of materials with low value and on the other hand the capture and utilization of CO₂.

Keywords

Sustainability; Waste; Thermally activated recycled cement; Accelerated carbonation.

Índice

Agradecimentos	iv
Resumo	vi
Abstract.....	ix
Lista de figuras	xiv
Lista de tabelas	xvi
Lista de abreviaturas e acrónimos.....	xvii
Listas de compostos químicos.....	xvii
Listas de Unidades.....	xviii
Capítulo 1 - Introdução.....	1
1.1 Enquadramento e justificativa.....	1
1.2 Objetivo principal.....	3
1.3 Organização da dissertação.....	4
2.1 Cimento reciclado.....	5
2.2 Resíduos de construção e demolição (RCD).....	7
2.3 Carbonatação acelerada	10
Capítulo 3 – Materiais e Metodologia.....	13
3.1 Materiais.....	13
3.1.1 Cimento reciclado termoativado.....	13
3.1.2 Cimento Portland	14
3.1.3 Agregado fino reciclado	15
3.2 Metodologia.....	16
3.2.1 Execução dos corpos de prova	16
3.2.2 Preparação das amostras para os ensaios	19
3.2.3 Resistência à Compressão	20
3.2.3 Difração de Raios-X (DRX).....	20
3.2.4 Análise Termogravimétrica.....	21
3.2.5 Caracterização microestrutural.....	22
3.2.6 Espectroscopia de infravermelho.....	23
3.2.7 Porosimetria por intrusão de mercúrio	23
Capítulo 4 – Resultados	25
4.1 Exigência de água para misturar e ativação com CO ₂	25

4.2	Resistência à compressão.....	27
4.3	Difração de Raios-X (DRX).....	29
4.4	Análise Termogravimétrica.....	32
4.5	Caracterização microestrutural.....	35
4.7	Porosímetria por intrusão de mercúrio	38
	Capítulo 5 – Discussão	40
5.1	Discussão dos resultados	40
	Capítulo 6 – Considerações finais.....	44
6.1	Conclusões gerais	44
6.2	Recomendações de trabalhos futuros	45
	Bibliografia	46

Lista de figuras

Figura 1: Os 17 objetivos do desenvolvimento sustentável [11].	3
Figura 2: Agregado reciclado.....	15
Figura 3: Curva Granulométrica de Resíduos de Construção e Demolição (RCD) 16	
Figura 4: Misturadora automática de argamassas.	17
Figura 5: Moldes para produzir cubos por compressão.	17
Figura 6: Esquema da compressão estática.	18
Figura 7: Câmara de carbonatação, protótipo da UBI.	18
Figura 8: Estufa de cura.	19
Figura 9: Partículas de CR e de CP após a carbonatação acelerada, no excicador (#<63 µm).....	19
Figura 10: Prensa hidráulica ELE 3000kN.....	20
Figura 11: Difrátometro de raios X (DRX), Rigaku DMAX III/C, no Centro de Óptica da UBI.	21
Figura 12: Equipamento TGA Q50 TA Instruments, no laboratório de construção da UBI.	22
Figura 13: Microscópio Eletrônico de Varrimento, SEM Hitachi S, no Centro de Ótica de UBI.	23
Figura 14: Porosímetro por intrusão de mercúrio, Micromeritics AutoPore IV 9500. 24	
Figura 15: Cubos CR e CP depois da carbonatação acelerada, e de 24 horas na estufa a 70 °C.....	25
Figura 16: Cubos na câmara de carbonatação depois de 24 horas de carbonatação acelerada.	27
Figura 17: Cubo de CR depois do ensaio de resistência à compressão.....	27
Figura 18: Cubo de CP depois do ensaio de resistência à compressão.....	28
Figura 19: Comparação da resistência a compressão do CP e do CR (MPa) ...	29
Figura 20: Análise DRX, presença de CaCO ₃ do CP(em baixo-D2) e do CR(em cima-D3).	29
Figura 21: Análise DRX, presença de Tilleyite do CP (em baixo -D2) e do CR(em cima-D3).	30
Figura 22: Análise DRX, presença de Ca ₂ (AlFe+3) ₂ O ₂ do CP (em baixo-D2) e do CR(em cima-D3).....	30
Figura 23: Análise DRX, presença de Lamite do CP(em baixo-D2) e do CR(em cima-D3).	31

Figura 24: Análise DRX, presença de Bassanite do CP(em baixo-D2) e do CR(em cima-D3).....	31
Figura 25: Análise DRX, presença de etringite do CP(em baixo-D2) e do CR(em cima-D3).	32
Figura 26: TGA e DTG do CR antes da carbonatação acelerada.	33
Figura 27: TGA e DTG do CP antes da carbonatação acelerada.....	33
Figura 28: TG e DTG da amostra CR depois da carbonatação acelerada.....	34
Figura 29: TG e DTG da amostra CP depois da carbonatação acelerada.	34
Figura 30 :Análise das imagens do microscopia eletrónica de varrimento do CR, onde se apresentam as dimensões das partículas D1=29,748 um, D2=24,584 um, D3= 34,168 um.....	35
Figura 31: Análise das imagens do microscopia eletrónica de varrimento do CR.	36
Figura 32: Análise das imagens do microscopia eletrónica de varrimento do CR.	36
Figura 33: Análise das imagens do microscopia eletrónica de varrimento do CP, onde se apresentam as dimensões das partículas b1=19,384 um, D2=24,090 um, D3= 17,670 um.	36
Figura 34: Análise das imagens do microscopia eletrónica de varrimento do CP.	37
Figura 35:Análise das imagens do microscopia eletrónica de varrimento do CP.	37
Figura 36 : Espectros FTIR das amostras CR e CP.....	38
Figura 37: Volume de intrusão incremental A) CP e B) CR.....	39
Figura 38: Volume de intrusão acumulado A) CP e B) CR.	39

Lista de tabelas

Tabela 1: Geração RCD em todo o mundo [24].	7
Tabela 2: Análise elementar do CR (% mássica).....	13
Tabela 3: Análise em óxidos do CR (% mássica).....	14
Tabela 4: Análise elementar do CP (% mássica).....	14
Tabela 5: Análise em óxidos do CP (% mássica)	14
Tabela 6 : Percentagem de material (% mássica)	25
Tabela 7: Massas das misturas de CP.....	26
Tabela 8: Massas das misturas de CR.....	26
Tabela 9: Resultados do ensaio de resistência à compressão.....	28
Tabela 10: Co das amostras CR e CP.....	34
Tabela 11: Co, C, Cmax e DC das amostras CR e CP	34

Lista de abreviaturas e acrónimos

a/c -Relação água/cimento em massa

CC- Cura por Carbonatação

CIB- Concelho Internacional da Construção

C-MADE- Centro de materiais e tecnologias construtivas

CP- Cimento Potland

CR- Cimento reciclado termoativado

DRX- Análise de difração de raio X

EDX- Espectrografia de raios X por dispersão de energia

HR- Umidade relativa.

MIC- Micrómetros

MIP- Porosimetria por intrusão de mercúrio

PIB- Produto Interno Bruto

RCD- Resíduo de construção e demolição

SEM- Microscopia eletrónica de varrimento (MEV)

TGA- Análise termogravimétrica

UBI- Universidade da Beira Interior

Listas de compostos químicos

Al-Alumínio

Al₂O₃- Óxido de alumínio

Ca- Cálcio

CaCO₃- Carbonato de cálcio

CaO- Óxido de cálcio

Ca(OH)₂- Hidróxido de cálcio

CO₂- Dióxido de carbono

Fe- Ferro

Fe₂O₃- Óxido de ferro

H₂O- Água

K- Potássio

K₂O- Óxido de potássio

Mg- Magnésio

MgCO₃- Carbonato de magnésio

MgO- Óxido de magnésio

O- Oxigénio

Si- Silício

SiO₂- Dióxido de silício

S- Enxofre

SO₃- Óxido sulfúrico

Listas de Unidades

m- Metro

cm- Centímetro

mm- Milímetro

µm- Micrómetro

nm -Nanómetro

h -Hora

min- Minuto

s - Segundo

Ton- Tonelada

kg- Quilograma

km- quilómetros

g - Grama

MPa- Megapascal

N - Newton

°C- Graus Celcius

Capítulo 1 - Introdução

O capítulo introdutório do presente trabalho, que visa apresentar um estudo preliminar da obtenção de materiais obtidos com cimento reciclado termoativado (CR) e resíduos de construção e demolição de betão (RCD) por moldagem e carbonatação acelerada, tem como propósito contextualizar o trabalho, apresentar os seus objetivos científicos e metodologia, assim como, apresentar a forma como este está estruturado.

1.1 Enquadramento e justificativa

A crescente vulnerabilidade dos sistemas naturais e humanos enfatiza a necessidade de amenizar o impacto das mudanças climáticas para evitar eventos extremos e generalizados, como ondas de calor, incêndios florestais, inundações, secas e ciclones que ameaçam todo o ecossistema e impedem o desenvolvimento social e económico mundial. Os impactos que as mudanças climáticas causam começaram a afetar os ecossistemas naturais e as sociedades, levando a grandes mudanças de recursos naturais e padrões de habitação [1].

A utilização cada vez maior de recursos naturais para o fornecimento das construções se tornou um dos grandes motivos da grande emergência climática atual. Muitos produtos devido à sua versatilidade, como o cimento Portland, são de grande procura pelo mercado atual, pois possuem adequada resistência mecânica e baixo custo. Atualmente, o cimento Portland é o material de construção mais utilizado no mundo. Desse modo, a produção deste material enfrenta importantes desafios ambientais, não só relacionados com o destino dos resíduos após o final da sua vida útil, e com o consumo elevado de recursos naturais, mas sobretudo, com a elevada quantidade de emissões de gases de estufa, nomeadamente de CO₂ [2–4].

O plano de ação adotado em 2015 pela Comissão Europeia visa acelerar a transição da Europa para uma Economia Circular, impulsionar a competitividade global e promover o crescimento sustentável. Este tem o intuito de estabelecer uma abordagem para desenvolvimento de produtos com um ciclo de vida completo - ou seja, que reutilize materiais [5].

Em 2019 foi apresentado um relatório com as principais metas do plano de ação, também definidos os desafios futuros da economia e apresentado o conceito de uma economia circular. As propostas apresentadas irão contribuir para a reciclagem e reutilização, trazendo benefícios para o meio ambiente e para a economia [5]. Ações como estas valorizam a proteção do ambiente e da saúde humana, tornam os produtos mais eficientes em recursos e capacitam os consumidores a escolher melhores produtos.

Cada País da União Europeia possui uma estratégia para consolidar este Plano, visando uma economia mais competitiva. A estratégia desenvolvida por Portugal prevê que este País utilize seus potenciais de disponibilidade de materiais reciclados para serem reutilizados na construção civil [6]. Já é sabido que existem preocupações mundiais com o desenvolvimento sustentável, com

vista a encontrar novas soluções para mitigar o aquecimento global e a acumulação de resíduos em aterros.

A geração de resíduos de construção e demolição ultrapassa 3 mil milhões de toneladas em todo o mundo, sendo uma parte elevada desses resíduos os resíduos de betão. Para evitar que os resíduos de betão vão para aterros, muitos países estão efetivamente realizando pesquisas para encontrar uma melhor aplicação. Com esse intuito, uma solução bastante promissora consiste na produção de cimento reciclado mais eco-eficiente a partir de resíduos à base de cimento. O cimento reciclado é considerado um substituto parcial do Clinquer em aplicações estruturais e não estruturais [2].

Nos últimos anos têm sido estudadas tecnologias de reidratar resíduos de cimento para serem reutilizadas na construção civil como ligantes, sendo 100% reciclado. Com isso, mostra uma solução para uma grande preocupação com a indústria da construção, uma vez que o cimento Portland é dos que mais contribui para a emissão de CO₂. Os estudos sobre o cimento reciclado ainda são poucos, porém apresentam resultados satisfatórios para serem utilizados na construção civil. Como é observado na pesquisa experimental feito por Bogas et al, onde aborda a utilização de cimento reciclado termoativado em diferentes temperaturas, obtendo resultados satisfatórios para serem utilizados nas obras de engenharia civil [7,8].

Atualmente, outro método de amenizar a alta quantidade de CO₂ do meio é a carbonatação acelerada, onde o CO₂ é capturado para o endurecimento do material. Já é estudada a carbonatação acelerada como meio de produzir produtos de construção comercializáveis. Esse método ocorre principalmente com o intuito de analisar o potencial dos resíduos industriais na captação de CO₂ da atmosfera. Esse método também apresenta a vantagem de não precisar de uma elevada quantidade de hidratação, pois durante o processo de carbonatação acelerada uma elevada quantidade de água é liberada para ocorrer a entrada de CO₂ nos materiais carbonatados [9,10].

O desenvolvimento sustentável aborda várias dimensões sociais, económicas e ambientais. Existem 17 objetivos do desenvolvimento sustentável, como se mostra na Figura 1. Neste tema iremos trabalhar com dois objetivos, um deles é o de produção e consumo sustentáveis e ação climática [11]. Este projeto enquadra-se nos dois objetivos descritos, pois utiliza um resíduo da construção civil como matéria-prima para a obtenção de materiais reciclados, além de captar o CO₂ do meio para o endurecimento do material, obtendo assim, um produto sustentável que se adequa ao plano de desenvolvimento sustentável da Organização das Nações Unidas.



Figura 1: Os 17 objetivos do desenvolvimento sustentável [11].

1.2 Objetivo principal

Diante do exposto, esta pesquisa tem por objetivo desenvolver um estudo laboratorial de comparação das propriedades de materiais produzidos com cimento reciclado termoativado (CR) e resíduos de construção e demolição de betão (RCD) obtidos por moldagem e carbonatação acelerada, com materiais semelhantes obtidos com cimento Portland normal (CP). Os objetivos científicos e tecnológicos do projeto foram alcançados através da seguinte metodologia e das seguintes etapas:

- Análise das características físicas e químicas do cimento reciclado termoativado e resíduos de betão, para o desenvolvimento materiais adsorventes de CO₂, visando 100% de reciclagem do cimento reciclado termoativado combinado com resíduos de betão e alta capacidade de captura de carbono.
- Desenvolvimento de um estudo laboratorial com vista a obter materiais eco-eficientes com cimento reciclado termoativado obtidos por moldagem e carbonatação acelerada.
- Determinação da quantidade de CO₂ adsorvido.
- Descrição das reações químicas, formação da microestrutura e propriedades mecânicas dos materiais eco-eficientes (argamassas) e comparação com materiais obtidos com cimento Portland, com composição semelhante.
- Análise dos resultados, em comparação com materiais convencionais à base de cimento, com propriedades semelhantes.

O intuito dessa pesquisa experimental tem como objetivo analisar a ativação dos materiais com CO₂, nomeadamente a sua morfologia e microestrutura de cimento reciclado termoativado e o cimento Portland com o agregado de resíduo de construção e demolição de betão. Para tal, foram realizados ensaio de caracterização morfológica que envolve os ensaios de termogravimetria (TGA), difração de raios-X (DRX) e o EDX, para além dos ensaios de resistência mecânica. A caracterização microestrutural envolveu as análises de microscopia eletrônica de varrimento (MEV).

1.3 Organização da dissertação

A presente dissertação encontra-se dividida em seis capítulos, onde no primeiro é realizada uma introdução à temática através da sua contextualização e apresentação dos objetivos, da metodologia e da estrutura do trabalho.

O estado da arte dedica-se no capítulo dois, onde primeiramente são abordado os tipos de cimento reciclados abordados por diversos autores, depois é abordado a carbonatação acelerada, indicando como ela ocorre, e por fim, são abordados os resíduos de construção e demolição de betão para serem utilizados como agregados na engenharia civil.

No terceiro capítulo é proposta a metodologia da pesquisa laboratorial, demonstrando como foi realizada a parte experimental da pesquisa, nomeadamente, este capítulo descreve os materiais utilizados e os ensaios realizados.

No capítulo quadro apresenta-se os resultados obtidos durante o procedimento experimental. Já no capítulo cinco são discutidos os resultados obtidos, fornecendo informações relevantes sobre a utilização de um material 100% reciclado com a carbonatação acelerada.

No capítulo seis apresentam-se as conclusões da investigação realizada. Além disso, no capítulo seis também se apresentam algumas propostas futuras. Por fim, encontram-se as referências bibliográficas.

Capítulo 2 – Estado da Arte

Nesta secção apresenta-se uma revisão do estado da arte sobre a utilização de materiais da construção civil reciclados, para obras de engenharia civil, e também o modo como esses resíduos são tratados para serem reutilizados, assim como o surgimento da carbonatação acelerada. Os resultados dos trabalhos de investigação apresentados justificam o desenvolvimento de investigação nesta pesquisa.

2.1 Cimento reciclado

O cimento Portland é um produto abundante e fácil de ser encontrado no mercado, devido a sua alta procura para as construções. Dentre dos constituintes do betão, o cimento assume mais de 80% do total de emissões de poluentes, se concentrando essencialmente nas etapas de produção do Clínquer. Com isso, a diminuição dessa produção e a substituição desse ligante por outro material se torna fundamental para a conservação do meio ambiente [4,8].

Desde 1994, o Concelho Internacional da Construção – CIB incentiva uma construção mais sustentável, com métodos que garantam a sobrevivência dos ecossistemas, sendo importante reduzir as emissões de gases de efeito de estufa, conservar os recursos naturais e incentivar a reutilização dos materiais [12]. Porém os estudos relacionados com cimento reciclado ainda são poucos. Na literatura, encontram-se alguns trabalhos que abordam a utilização de cimento reciclado, referentes à caracterização mecânica de argamassas [9,11–13, 15].

A primeira tentativa de recuperação de resíduos de materiais cementícios foi proposta por Splittgerber e Mueller; eles estudaram a hipótese de que as transformações das fases que ocorrem durante a hidratação do cimento, de acordo com os autores, são um processo reversível, podendo ser ativadas por meio de fornecimento de uma quantidade ideal de calor [16].

Ao longo dos anos existem vários métodos para aproveitar a capacidade de reidratação dos materiais cementícios. Onde o conceito abordado para obter o cimento reciclado consiste na separação da fração de cimento dos demais componentes do betão residual, em seguida, ocorre a redução a um pó e logo depois acontece a desidratação em altas temperaturas para a recuperação da sua capacidade de hidratação [3].

O tratamento térmico geralmente segue três estágios principais: rampa de aquecimento, tempo de residência em uma temperatura de recozimento personalizada e

resfriamento. É de se esperar que em uma taxa de aquecimento mais baixa se obtenha condições mais adequadas para a desidratação total. Uma baixa taxa de aquecimento irá favorecer a cinética de degradação e as etapas de desidratação ocorrendo abaixo da temperatura de recozimento. Recentemente, temperaturas de recozimento entre aproximadamente 500–800 °C com um período de 2 ou 3 horas tornou-se o mais comum para se compreender a desidroxilação de C-H e a decomposição de C-S-H [3,17].

De acordo com uma pesquisa realizada por Bogas [7], que desenvolveu uma pasta com cimento reciclado a partir de resíduo de materiais cimentícios, o processo de hidratação de cimento reciclado é fortemente afetado pela temperatura de termoativação. Os resultados obtidos mostram que as pastas de cimento reciclado desenvolveram resistências mecânicas aos 28 dias até 30 % inferiores à de pastas correntes com cimento Portland normal.

De acordo com as análises realizadas por Bogas [3,8] tanto no documento de revisão como no experimental, a temperatura de recozimento que obteve melhores resultados para a utilização na engenharia civil foi a de 650 °C, com resultados de resistência à compressão mais elevados, diminuindo a resistência para temperaturas superiores. Além disso, obteve-se uma reduzida porosidade para valores ligeiramente baixos de consumo de energia, assim como, de emissões de gases do efeito estufa [8].

Pro outro lado, um aspeto relevante que se torna bem diferente do cimento Portland normal é a relação a/c, principalmente devido à elevada área superficial e morfologia porosa dos compostos desidratados, e à elevada quantidade de CaO livre formado durante o tratamento térmico. Portanto, uma elevada relação a/c é necessária para atingir a fluidez adequada e garantir a compactação adequada de pastas e argamassas [15,18,19].

De acordo com Bogas [20] e Bandeira [13], que estudaram a matriz cimentícia com CR verificaram que a microestrutura seria composta por duas fases distintas: uma delas relativa a porosidade interna das partículas de CR e outra relacionado com o espaço entre elas. Ou seja, devido a formação de produtos de hidratação interior nas partículas de CR, a microestrutura interna do CR hidratado apresenta menor porosidade e, por causa da elevada relação da água/ligante, possuindo uma porosidade entre partículas hidratadas menos densa [20].

Com as análises dos ensaios de SEM, MIP e adsorção de nitrogénio os autores verificaram que nas idades iniciais as pastas endurecidas com CR apresentam um maior volume de produtos hidratados, assim como uma maior área de superfície específica, em relação às pastas com cimento Portland [13,20].

2.2 Resíduos de construção e demolição (RCD)

Os resíduos de construção e demolição são gerados todos os anos durante a construção, reforma e demolição de edifícios e infraestruturas. A quantidade total de RCD gerados em todo o mundo a cada ano excede 10 mil milhões de toneladas, das quais os Estados Unidos produzem cerca de 500 milhões de toneladas e a União Europeia mais de 800 milhões de toneladas [21]. A China contribui com cerca de 2,3 mil milhões de toneladas de RCD a cada ano devido à urbanização acelerada e aos planos de renovação urbana constante, sendo responsável por cerca de 40% do total de resíduos sólidos gerados [22].

Os impactos ambientais causados por resíduos de construção e demolição incluem principalmente o consumo de espaço terrestre, esgotamento de aterros, consumo de recursos energéticos e não energéticos, esgotamento de recursos, poluição do ar, poluição sonora, poluição da água, entre outros. Com isso, torna-se um problema mundial, como indica a tabela 1, que deve ser resolvido [23].

Tabela 1: Geração RCD em todo o mundo [24].

País	Geração RCD (milhões de toneladas)	Área (km²)	População 2018 (milhões)	PIB 2018 (bilhões de dólares)
1- Hong Kong	20	1.050	7,4	363
2- Austrália	20,4	7.692.020	25	1.434
3- Países Baixos	22	33.690	17,2	914
4- Itália	39	294.140	60,5	2.084
5- Reino Unido	58	241.930	66,5	2.855
6- França	65	547.557	67	2.778
7- Alemanha	86	349.360	83	3.948
8- Estados Unidos	534	9.147.420	327	20.544
9- China	2300	9.388.210	1393	13.608

Nos últimos 10 anos aumentou o número de pesquisas relacionadas com RCD, procurando estratégias para a reutilização destes materiais. Porém os resultados estão longe de ser os melhores. A principal razão desta ineficiência é devido à compreensão inadequada dos principais fatores, que incluem estratégias de redução, reutilização e reciclagem [24].

A produção de RCD é inevitável, portanto uma estratégia viável é a reutilização desses materiais nos diversos tipos de obras a fim de reduzir a sua quantidade em aterros sanitários. O reaproveitamento do RCD é fundamental mesmo que seja em funções diferentes das que já foram utilizados originalmente. Se esses resíduos gerados não puderem ser reaproveitados é importante que ocorra a conversão desses materiais em novos materiais por meio da reciclagem [25,26].

Nos países mais desenvolvidos, a utilização de resíduos de cimento e demolição é regulamentada de tal forma que a taxa de reciclagem ultrapassa os 90%. Em países da Ásia, como o Japão e Singapura, as taxas de reciclagem estão acima de 99%, enquanto na Austrália atinge-se os 90%. Por sua vez, em países menos desenvolvidos, como a Malásia, a taxa de reciclagem é menos de 50% dos RCD são utilizados [27].

Em Portugal, de acordo com a Diretiva 2008/98/CE, foi cumprido o objetivo de se garantir mais de 70% de reciclagem em 2020, mesmo ocorrendo uma reutilização de baixo valor dos RCD, como o enchimento em camadas de sub-base de pavimentos ou em recuperação paisagística. Assim, a utilização de resíduos de construção torna-se essencial, seja na utilização de agregados ou na produção de cimento reciclado, o importante é ocorrer a reutilização[28].

A utilização de agregados reciclados tem-se tornado importante para a indústria de construção ao substituir os agregados convencionais. Porém, para a aplicação em projetos de infraestrutura depende essencialmente da sua qualidade. A exigência necessária desse material depende da natureza e da origem dos RCD, como também do tratamento que foram submetidas. Para ocorrer um material de melhor qualidade é preciso ocorrer uma demolição seletiva do material que irá ser utilizado, para com isso obter uma melhor qualidade e um consumo energético menor [29].

O agregado reciclado proveniente de betão pode ser usado com um processo de britagem apenas, no qual se obtém o RCD de diferente granulometria. No entanto, nestas circunstâncias, o agregado apresenta elevada quantidade de pasta de cimento aderida, que contribui para um aumento da sua absorção de água e redução da sua resistência, pois apresenta uma massa volúmica menor. Assim, são obtidos agregados de pior qualidade que afetam as características de trabalhabilidade, resistência mecânica e

durabilidade do betão, porém que podem apresentar resultados necessários para aquele tipo de obra [30].

Com as diversas pesquisas realizadas nessa área de reciclagem de construção e demolição, existem vários métodos propostos no sentido de melhorar a qualidade dos RCD, embora ainda nenhum deles seja capaz de atingir elevados rendimentos sem grande impacto ambiental. Em geral, estes métodos consideram processos de tratamento mecânicos (britagem, moagem, peneiração), térmicos ou químicos. A eficiência dos métodos mecânicos depende das características do agregado e da pasta, além disso estão ainda associados a elevado consumo energético e algum impacto ambiental [31–33].

De acordo com estudos realizados por Brito [34] relacionados com argamassas em que se substituem os agregados naturais por agregados RCD, foram encontrados resultados de resistência a compressão do RCD semelhantes ao do agregado convencional. Esses resultados favoráveis se devem pelo RCD apresentar melhores características dos agregados reciclados e menor a quantidade de impurezas; o ligante utilizado na argamassa era de elevada resistência, compensando as características desfavoráveis dos agregados reciclados [34].

Por outro lado, de acordo com os autores, Bogas, J.A. et al, percebeu-se que a introdução do RCD teve um efeito mais negativo no concreto de alta resistência. Na verdade, a menor resistência mecânica dos agregados reciclados é mais relevante no concreto de alta resistência, não existindo uma diferença significativa no concreto que não possui uma alta resistência [35].

De acordo com Pito [36], que realizou uma investigação com argamassas de agregados finos reciclados, foram obtidos resultados de resistência a compressão aos 28 dias de cura por hidratação decrescentes com o aumento da percentagens de RCD na mistura. Além disso, as massas volúmicas das argamassas no estado endurecido diminuíram ligeiramente com o aumento da percentagem de material agregado reciclado.

Em outro estudo, realizado por Rangel [37] as massas volúmicas no betão em estado endurecido apresentam uma pequena perda de massa com o aumento da incorporação dos agregados reciclados. Esta perda pode ser explicada pelos baixos valores de massa volúmica que os agregados reciclados apresentaram, em comparação com os valores dos agregados naturais. Com isso, de acordo com os autores, as argamassas com incorporação de agregados reciclados torna-se um material viável e com um bom potencial para ser utilizado pela indústria da construção [36,37].

2.3 Carbonatação acelerada

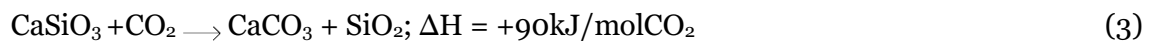
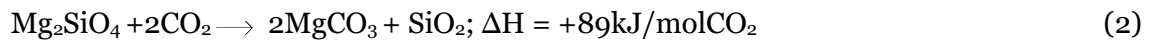
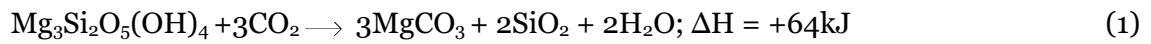
Desde a era industrial o mundo sofre com as grandes quantidades de CO₂ do meio. Este aumento ao longo dos anos é parcialmente devido ao desmatamento e atividades de mudança da terra, causas naturais, e principalmente por emissões relacionadas ao uso de combustíveis fósseis. Com isso, ocasiona a interrupções do ciclo natural do carbono, alterando o armazenamento de CO₂ em reservatórios terrestres e oceânicos. O ciclo do carbono é o processo de trocas de carbono entre a atmosfera, a terra e o oceano por meio de processos físico-químicos e biológicos. Os fluxos de carbono dentro dos sistemas terrestres envolvem a absorção de CO₂ pelas plantas para ocorrer a fotossíntese [38].

Atualmente, existem vários esquemas e tecnologias de redução de CO₂ para limitar o aquecimento global. Estes esforços foram propostos por governos, líderes da indústria e instituições científicas. Uma dessas propostas é a captura de carbono e estratégia do seu armazenamento [39].

Inicialmente a captura de carbono foi adotada apenas para eliminar as altas emissões de CO₂. Porém atualmente com as descobertas dos benefícios que a captura e armazenamento obtiveram, se tornou um recurso alternativo e sustentável para as indústrias de energia, água e alimentos. A captura e armazenamento de carbono é considerada uma importante estratégia de mitigação do excesso de CO₂ no meio. Os métodos que utilizam o CO₂ são divididos principalmente em cinco categorias: conversão de CO₂ em produtos químicos e combustíveis, carbonatação mineral, recuperação aprimorada de óleo, conversão biológica e utilização direta de CO₂ [1].

O processo de mineralização não é considerado apenas um meio de melhorar a extração de carbonatos, mas também de armazenar CO₂ nas formações geológicas, sendo que uma tonelada de CO₂ pode ser absorvida por aproximadamente 1,6-3,7 toneladas de rocha [40]. A carbonatação ocorre naturalmente quando óxidos metálicos, como magnésio e cálcio, reagem com o CO₂ atmosférico, sendo, no entanto, um processo de reação lento. Por outro lado, a reação do CO₂ com óxidos metálicos encontrados em minerais é uma reação exotérmica, devido ao estado de menor energia dos carbonatos em comparação com o CO₂ [1].

Noutros estudos, foram identificados os principais compostos para ocorrência da carbonatação. Os óxidos de cálcio e magnésio são os principais responsáveis pela alta captura de CO₂. De acordo com as Equações 1, 2 e 3 a carbonatação ocorre em minerais de silicato de Mg e Ca com o CO₂ atmosférico, o que resulta na precipitação de carbonatos [4,41,42].



Com as descobertas realizadas por outros pesquisadores, o processo de carbonatação divide-se em dois tipos: o direto e o indireto. O processo direto é realizado por meio de uma reação de uma única etapa, onde a extração do mineral da rocha coincide com a formação do carbonato sob altas pressões e requer baixas quantidades de energia. Já a indireta possui três reações sistemáticas e permite uma cinética de reação mais rápida. A primeira reação envolve a remoção do metal da rocha mineral por meio de um agente de separação, como sais fundidos. A segunda reação envolve a hidratação do metal para formar hidróxidos metálicos. Finalmente, a terceira reação une a reação de carbonatação do CO₂ com hidróxidos metálicos para a produção de carbonatos [41].

Uma aplicação de carbonatos minerais é na indústria de construção usando blocos obtidos por carbonatação em vez de blocos à base de cimento Portland, por causa de sua alta quantidade de carbono negativa. Além das rochas minerais naturais, os resíduos das indústrias de aço ou cimento, que são ricos em óxidos de cálcio e magnésio, também podem ser usados para formar carbonatos na presença de CO₂ [4,43,44].

Na produção de blocos, as condições de captação de CO₂ são importantes, devendo ser controladas e entendidas, pois afetam a cinética da reação de carbonatação e têm forte influência no desenvolvimento das propriedades do material. O teor de água da mistura é um parâmetro crítico porque influencia a reatividade. Além disso, a penetração do dióxido de carbono no bloco depende da água livre presente nos poros da matriz [10]. Por outro lado, a temperatura é um aspecto importante para a reação, sendo necessário estabelecer uma temperatura ideal, pois altas temperaturas desenvolvem a difusão de CO₂, mas aceleram a evaporação da água e reduzem a solubilidade aquosa [45].

A carbonatação também contribui para aumentar as propriedades mecânicas e a durabilidade dos materiais. De acordo com várias pesquisas, os materiais podem ser carbonatados com diferentes finalidades, quer para a melhoria das propriedades do betão, com armazenamento de CO₂ no seu interior, quer com o desenvolvimento de ligante ativado com dióxido de carbono. Para materiais ativados com dióxido de carbono, a carbonatação também tem um papel de endurecimento [10,42,46].

Capítulo 3 – Materiais e Metodologia

No presente capítulo apresentam-se as características dos materiais utilizados, como também a parte experimental conduzida no presente trabalho, de modo a cumprir os objetivos definidos no capítulo 1. Inicialmente, serão apresentadas as características dos materiais utilizados, indicando com sua composição química. De seguida, procede-se à descrição dos procedimentos experimentais, indicando como foram realizados os corpos de prova e os ensaios, ao longo deste trabalho.

Esse estudo experimental foi realizado nos laboratórios de construção da UBI, centro de materiais e tecnologias construtivas (C-MADE) no departamento de Engenharia Civil e Arquitetura.

3.1 Materiais

3.1.1 Cimento reciclado termoativado

O cimento reciclado termoativado utilizado foi disponibilizado pelo instituto superior técnico da Universidade de Lisboa o qual foi utilizado para análise experimental de uma dissertação de mestrado, que aborda a caracterização de cimento reciclado sujeito a diferentes temperaturas de termoativação. O cimento reciclado termoativado utilizado nessa pesquisa foi obtido com temperatura de termoativação de 650 °C, a qual obteve os melhores resultados na caracterização da suas propriedades [47].

A análise dos elementos e dos óxidos do CR foram obtidos com a média de ensaios EDX, em uma área de material representativa para obter uma leitura de percentagens mais precisas, em microscopia eletrónica de varrimento no Centro de Óptica da UBI. O resultado está apresentado nas tabelas 2 e 3.

Tabela 2: Análise elementar do CR (% mássica)

Elementos	CR
O	34.57
Mg	1.05
Al	2.53
Si	7.49
S	1.20
Ca	50.95
Fe	2.20

Tabela 3: Análise em óxidos do CR (% mássica)

Oxidos	CR
MgO	1.74
Al ₂ O ₃	4.79
SiO ₂	16.03
SO ₃	3.00
CaO	71.29
Fe ₂ O ₃	3.15

3.1.2 Cimento Portland

O Cimento Portland CEM I 42,5R utilizado nessa pesquisa é fabricado pela CIMPOR e foi fornecido pela BetãoLiz da Covilhã, o lote e a data de fabricação do cimento não foi possível obter. A análise dos elementos e dos óxidos do CP foram obtidos com EDX, em microscopia eletrónica de varrimento no Centro de Óptica da UBI. O resultado é encontrado nas tabelas 4 e 5.

Tabela 4: Análise elementar do CP (% mássica)

Elementos	CP
O	34.63
Mg	1.29
Al	2.53
Si	7.25
S	1.69
K	1.64
Ca	49.21
Fe	1.77

Tabela 5: Análise em óxidos do CP (% mássica)

Óxidos	CP
MgO	2.15
Al ₂ O ₃	4.78
SiO ₂	15.51
SO ₃	4.22
K ₂ O	1.97
CaO	68.85
Fe ₂ O ₃	2.52

3.1.3 Agregado reciclado

Os agregados finos reciclados foram obtidos a partir da britagem de antigos corpos de prova de betão expostos no Laboratório desde 2014 . Estes encontravam-se armazenados no Laboratório de Tecnologia e Ensaios Mecânicos do DECA da UBI. De acordo com guia para a utilização de agregados reciclados grossos em betões de ligantes hidráulicos, o tipo de agregado utilizado nessa documento, Figura 2 , se enquadra na classe ARB1 que são relativos ao material que constitui o agregado reciclado, constituído por betão e argamassa [48].



Figura 2: Agregado reciclado

De acordo com o guia a classe ARB1 pode ser utilizado em uma percentagem de 100% do agregado da mistura. Além disso, os finos com dimensões inferiores a 0,063 mm foram descartados. A curva granulométrica foi realizada de acordo com o método de peneiração da norma NP EN 933-1, obtendo a curva mostrada na Figura 3. Com isso, para estar de acordo com as normas e utilizar uma granulometria adequada para o tamanho dos corpos de prova ,a granulometria do material reciclado utilizada foi entre 4 mm e 1 mm [48].

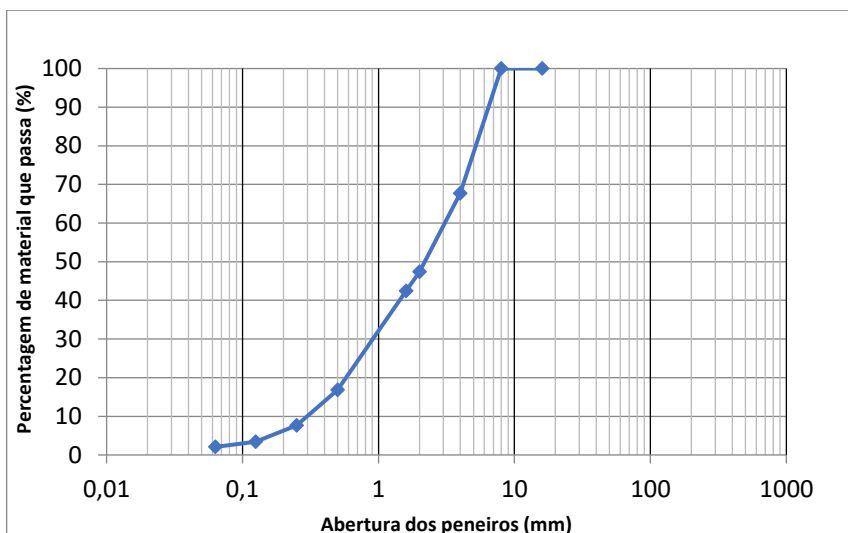


Figura 3: Curva Granulométrica de Resíduos de Construção e Demolição (RCD)

3.2 Metodologia

Esse estudo experimental foi realizado nos laboratórios de materiais da UBI, Centro de materiais e Tecnologias construtivas (C-MADE) do departamento de Engenharia Civil e Arquitetura da Universidade da Beira Interior. A metodologia experimental adotada está a seguir apresentada.

3.2.1 Execução dos corpos de prova

As misturas foram preparadas com CR e CP , com o agregado RCD e água . Foram misturadas mecanicamente durante cerca de 3 min em um misturador mecânico, conforme apresentado na Figura 4, resultando em uma mistura homogênea e, posteriormente, colocadas nos moldes cúbicos (arestas = 40 mm), conforme apresentado na Figura 5.



Figura 4: Misturadora automática de argamassas.



Figura 5: Moldes para produzir cubos por compressão.

Para cada mistura foram produzidos cinco corpos de prova, com compressão estática, compactando-se com uma pressão de compactação estática de 30 MPa aplicada na superfície superior, e ao alcançá-la a pressão foi mantida por 60 s, para um melhor ajuste das partículas dos corpos de prova; conforme sequência da compressão estática apresentado na Figura 6.

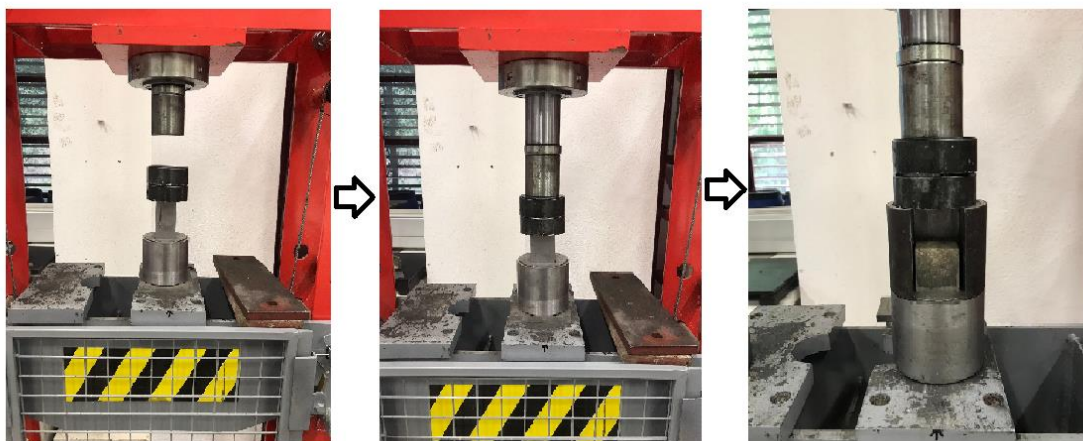


Figura 6: Esquema da compressão estática.

Os corpos de prova moldados foram submetidos a um período de cura de CO₂ de 24 horas (CC) em atmosfera controlada (concentração de CO₂ > 99%; pressão parcial = 0,9 bar; temperatura = ± 60 °C; humidade relativa (HR%) > 75%) em uma câmara de carbonatação, conforme apresentado na Figura 7. Em seguida, foram colocados em estufa para retirar toda a água e também para estabilizar as reações química e a estrutura, Figura 8, a uma temperatura de 60 °C, durante 24 horas.



Figura 7: Câmara de carbonatação, protótipo da UBI.



Figura 8: Estufa de cura.

3.2.2 Preparação das amostras para os ensaios

Para a realização dos ensaios, os corpos de prova tiveram que passar por alguns processos. Para o ensaio de resistência a compressão foram utilizados os corpos de prova em forma cúbica (arestas = 40 mm). No ensaio do MIP foram utilizadas amostras dos corpos de prova com dimensão de mais ou menos 10 mm. Nos demais ensaios, difração de raios - X (DRX), análise termogravimétrica, caracterização microestrutural e espectroscopia de infravermelhos, as amostras foram peneiradas para obter um fino que possuísse uma granulometria menor que 63 MIC, Figura 9.



Figura 9: Partículas de CR e de CP após a carbonatação acelerada, no excicador ($<63 \mu\text{m}$).

3.2.3 Resistência à Compressão

Os testes de resistência à compressão foram realizados após o período de secagem na estufa a 60°C. Os ensaios foram realizados no laboratório de materiais da Universidade da Beira Interior em uma prensa hidráulica ELE 3000kN com Leitura Digital, conforme Figura 10. Foram submetidas à compressão corpos de prova com dimensões de 4×4×4 cm e foram ensaiadas de acordo com a norma EN 1015-1 [49].

Os corpos de prova foram colocados no prato inferior da prensa, centrados, garantindo a perpendicularidade das forças de compressão aplicadas na face superior do corpo de prova em contato com o molde. A taxa de carga usada nos ensaios foi de 0.05 kN/seg e os valores de resistência à compressão foram obtidos pela fórmula: $\sigma = F/A$, em que σ é a tensão de rotura em MPa, F a força de compressão à qual o provete resiste em kN e, A, a área do corpo de prova em mm².



Figura 10: Prensa hidráulica ELE 3000kN.

3.2.3 Difração de Raios-X (DRX)

O ensaio da difração de raio -X foi realizado com o Difrátometro de raios X (DRX), Rigaku DMAX III/C no Centro de Optica da UBI, conforme Figura 11. A técnica da difração por raio-x identifica a estrutura interna dos corpos cristalinos. A difração dos raios-x delinea na periodicidade tridimensional da estrutura interna dos corpos cristalinos e no fato de o comprimento de onda dos raios-x ser da mesma ordem de grandeza das distâncias inter-atômicas. O DRX é um fenômeno no qual os átomos de um cristal, em virtude de seu espaçamento uniforme, causam um padrão de interferência das ondas presentes em um feixe incidente de raios X. É uma técnica

usada para determinar a estrutura atômica e molecular de uma amostra, medindo os ângulos e as intensidades dos feixes difratados podem obter informações sobre os compostos presente [50].



Figura 11: Difratômetro de raios X (DRX), Rigaku DMAX III/C, no Centro de Óptica da UBI.

3.2.4 Análise Termogravimétrica

A Termogravimetria é a técnica que analisa as propriedades físicas ou químicas de uma substância, ou de seus produtos de reação, onde ocorre a mudança da massa em função da temperatura. A mudança de massa acontece devido à interação com a atmosfera, vaporização e decomposição dos compostos [51].

A análise termogravimétrica ou TGA (Thermogravimetric analysis) tem como objetivo analisar as perdas de massa de cada amostra, quando sujeitas a altas temperaturas. Nesta pesquisa o equipamento utilizado foi o TGA Q50 da TA Instruments, que se encontra nos laboratórios de construção da Universidade da Beira Interior, conforme Figura 12. Este ensaio consiste em submeter uma quantidade pequena de pó de um corpo de prova, entre 5-8 mg, a uma temperatura crescente até atingir os 1000 °C, com um incremento de temperatura constante de 20 °C/min. No final os resultados vêm sobre a forma de gráfico onde é analisada a perda total de massa, bem como as variações de massa ao longo do tempo.

O comportamento de degradação térmica dos corpos de prova permite a identificação e quantificação dos processos de desidratação, desidroxilação e descarbonatação, como também ganho de massa (por exemplo, carbonatação e oxidação), obtendo informações adicionais sobre os produtos da carbonatação [52].



Figura 12: Equipamento TGA Q50 TA Instruments, no laboratório de construção da UBI.

Com o ensaio de TGA é possível obter a quantidade de CO₂ adsorvido após a carbonatação acelerada. Para se obter esse valor é calculado o grau de carbonatação (CD) que foi determinado, utilizando a Eq (1), conforme apresentado por Matsushita et al [53].

$$CD(\%) = \frac{[C - C_0]}{[C_{max} - C_0]} * 100 \quad (4)$$

Onde C é a quantidade de CO₂ na amostra carbonatada, C₀ a quantidade de CO₂ na amostra antes da carbonatação e C_{max} é a quantidade teórica de CO₂ necessária para reagir com todo o CaO no CP e no CR e na forma de CaCO₃, Eq (2)[54]. A quantidade de CO₂ adsorvido foi obtida com a perda de massa entre 550 e 1000°C [55][56].

$$C_{max}(\%) = 0,785(CaO - 0,56Ca(CO_3) - 0,75SO_3) + 1,091MgO + 0,71Na_2O + 0,468K_2O \quad (5)$$

A equação assume que todos os compostos (CaO, MgO, Na₂O e K₂O) formados na matriz cimentícia reagem com o CO₂ formando carbonatos [54,56].

3.2.5 Caracterização microestrutural

A caracterização da microestrutura é o estudo da superfície de materiais sólidos e da sua morfologia interior. Nesta pesquisa os corpos de prova em pó foram analisados por um Microscópio Eletrónico de Varrimento, SEM Hitachi S, no Centro de ótica da UBI, como apresentado na Figura 13. O microscópio eletrónico é um aparelho em que um feixe de elétrões é usado para criar imagem ampliada dos corpos de prova. A resolução extra- fina deste equipamento permite observar detalhes da morfologia com dimensões abaixo de 0,1 µm.



Figura 13: Microscópio Eletrônico de Varrimento, SEM Hitachi S, no Centro de Ótica de UBI.

3.2.6 Espectroscopia de infravermelho

A espectroscopia de infravermelho é utilizada para identificar um composto, monitorar reações e fornecer informações úteis para a estrutura molecular. O ensaio identifica principalmente as moléculas orgânicas e organometálicas [57]. Nesta pesquisa a identificação do composto foi realizada no departamento de Química da UBI com recurso ao Espectrómetro Thermo Scientific Nicolet IS10.

3.2.7 Porosimetria por intrusão de mercúrio

O ensaio de porosimetria por intrusão de mercúrio determina o volume e a distribuição do diâmetro médio dos poros das argamassas. Esta análise foi realizada pelo equipamento “Micromeritics AutoPore IV 9500” dos Laboratórios de construção da Universidade da Beira Interior, como mostra a Figura 14. Este instrumento permite a determinação de volumes de vazios correspondentes a poros médios entre 6 e 0,01 μm , e a variação da pressão desde valores de pressão atmosférica até 33000 psi (228 MPa). Em cada medição, o teste foi realizado em duas etapas. O primeiro estágio é o estágio de baixa pressão com a pressão variando de 0 a 0,14 MPa. O segundo estágio é o estágio de alta pressão.

O ensaio de porosimetria por intrusão de mercúrio foi realizado nas duas amostras de argamassa, uma de cimento Portland e outra com cimento reciclado termoativado, sendo as duas com o resíduo de construção e demolição, a fim de se verificar a diferença de porosidade decorrente da diferença de ligantes utilizados.



Figura 14: Porosímetro por intrusão de mercúrio, Micromeritics AutoPore IV 9500.

Capítulo 4 – Resultados

No presente capítulo será abordada a parte dos resultados obtidos no presente trabalho, conforme indicado ao longo do capítulo 3, de modo a cumprir os objetivos definidos nesse documento. Essa análise dos resultados corresponde aos ensaios realizados nos corpos de prova de cimento reciclado termoativado e do cimento Portland normal, como mostra na Figura 15, para serem discutidas posteriormente.

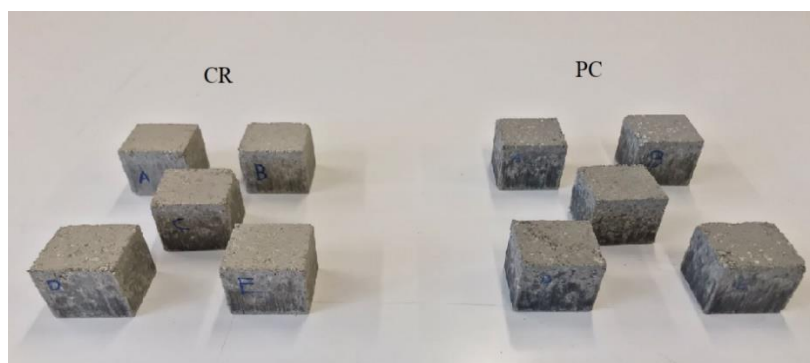


Figura 15: Cubos CR e CP depois da carbonatação acelerada, e de 24 horas na estufa a 70 °C.

Neste estudo, conforme já referido anteriormente, foram realizados ensaios para obter as características de um material 100% reciclado, nomeadamente os ensaios de resistência a compressão, difração de raio-X, termogravimétrica, microestrutura, espectroscopia de infravermelhos e porosimetria por intrusão de mercúrio.

4.1 Exigência de água para misturar e ativação com CO₂

De acordo com os documentos analisados já era sabido que o cimento reciclado termoativado precisava de uma quantidade de água maior que o cimento Portland [7,8]. Ao ser realizados alguns testes preliminares para saber a quantidade ideal de água, foi obtido um valor de 20 % de água para o cimento reciclado termoativado enquanto para o cimento Portlando foi utilizado 10%, como indica da Tabela 6.

Tabela 6 : Percentagem de material (% mássica)

CP		CR	
CP	38,78%	CR	35,56%
Água	9,10%	Água	16,67%
RCD	52,12%	RCD	47,77%

Na carbonatação acelerada não é necessária água, a água necessária serve apenas para misturar e ocorrer uma boa homogeneidade das misturas para a execução dos corpos de

prova cúbicos por compactação. Ao logo da carbonatação acelerada a água existente nos corpos de prova acaba por sair dos mesmos, à medida que o CO₂ penetra, isso é observado na Tabela 7 e 8 onde mostra a diferença de massa dos corpos de prova.

Além disso, também foi observado que os cubos com cimento reciclado termoativado não eliminaram muita água, ficando com suas massas quase inalteradas. Porém depois de ficar 24h em estufa a 60°C todos os cubos registraram perda de massas. Como se pode verificar, os cubos têm uma aparência superficial de estarem secos. Para além disso, também se pode verificar que a base da estufa é feita uma chapa perfurada que permite a livre circulação de CO₂. A Figura 17 mostra os corpos de prova na câmara de carbonatação logo após a cura.

Tabela 7: Massas das misturas de CP

CP	Antes da cura	Despois da cura	Varição da massa de água depois da cura	Depois da secagem a 70°C	Varição da massa de água depois da secagem
A	120,73	114,02	-1,284	113,95	-1,258
B	122,23	115,7	0,396	115,65	0,442
C	121,55	115,52	0,216	115,43	0,222
D	121,17	114,6	-0,704	114,54	-0,668
E	121,46	116,68	1,376	116,47	1,262

Tabela 8: Massas das misturas de CR

CR	Antes da cura	Despois da cura	Varição da massa de água depois da cura	Depois da secagem a 70°C	Varição da massa de água depois da secagem
A	109,65	109,65	1,338	107,8	0,836
B	108,94	108,9	0,588	107,35	0,386
C	109,94	109,98	1,668	108,28	1,316
D	109,64	107,59	-0,722	106,82	-0,144
E	107,71	105,44	-2,872	104,57	-2,394



Figura 16: Cubos na câmara de carbonatação depois de 24 horas de carbonatação acelerada.

4.2 Resistência à compressão

Como referido anteriormente no Capítulo 3, a resistência à compressão foi analisada em corpos de prova de dimensões 4 x 4 x 4 cm. Depois de 24 horas na estufa os corpos de prova, após ficarem na temperatura ambiente, foram submetidos ao ensaio de compressão. A Figura 18 mostra o corpo de prova logo após o ensaio, onde se verifica ter ocorrido uma rotura normal. Os resultados de compressão obtidos com os 5 cubos das duas misturas estão apresentados na tabela 9 e na figura 19 apresenta-se o gráfico com a comparação das médias dos valores da resistência a compressão.



Figura 17: Cubo de CR depois do ensaio de resistência à compressão



Figura 18: Cubo de CP depois do ensaio de resistência à compressão

Tabela 9: Resultados do ensaio de resistência à compressão.

Cubos	Resistência à Compressão (MPa)	Média (MPa)	Desvio Padrão	Coef. de Variação [%]
CP	A	33	32,02	3%
	B	30,9		
	C	31,4		
	D	33,3		
	E	31,5		
CR	A	17,9	20,24	8%
	B	20,2		
	C	19,8		
	D	21,9		
	E	21,4		

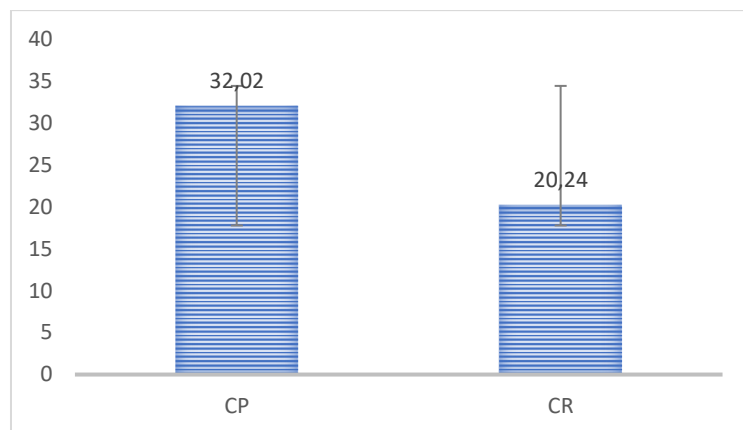


Figura 19: Comparação da resistência a compressão do CP e do CR (MPa)

4.3 Difração de Raios-X (DRX)

As análises da amostra CR e CP do ensaio DRX são apresentadas na Figura 20. Por serem materiais semelhantes os dados obtidos foram semelhantes, porém a amostra CR não possui alguns dos elementos encontrados na amostra CP. Além disso, também foi observada um grau de cristalinidade superior na amostra CP em comparação a amostra CR.

Pelas análises dos gráficos apresentados na Figura 20 é encontrado o composto calcite CaCO_3 , sendo encontrado nas duas amostras, significando que esse composto aparece nas duas amostras com a mesma proporção, não sendo afetado pelo processo a que o CR foi submetido para ser reutilizado.

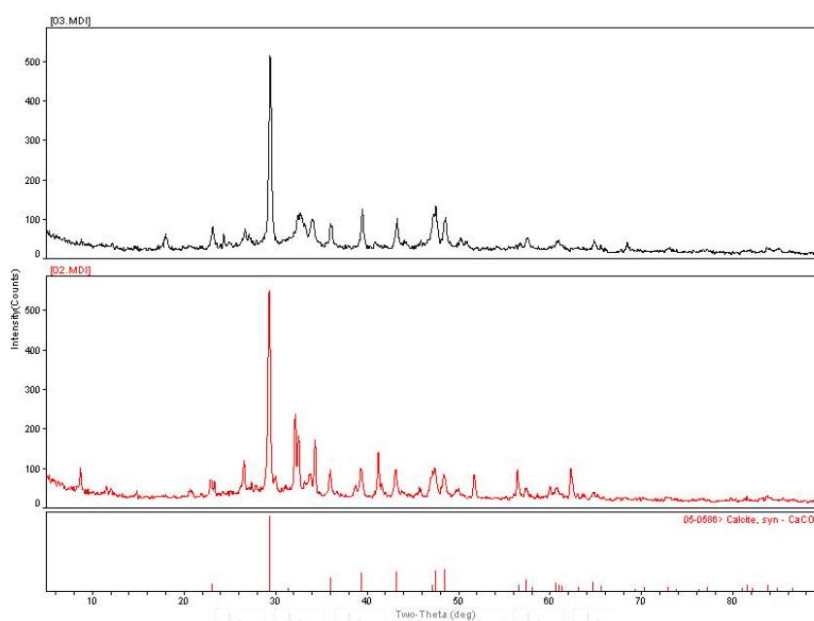


Figura 20: Análise DRX, presença de CaCO_3 do CP(em baixo-D2) e do CR(em cima-D3).

Na Figura 21 verifica-se a presença do composto Tilleyite, enquanto que na Figura 22 mverifica-se a presença de $\text{Ca}_2(\text{AlFe}+3)_2 \text{O}_2$. Na Figura 23 verifica-se a presença de Lamite e na Figura 23 de Bassanite. Nos gráficos obtidos com esses compostos são observados que o CP apresenta mais picos que o CR nos 4 compostos e mais ou menos nas mesmas inclinações.

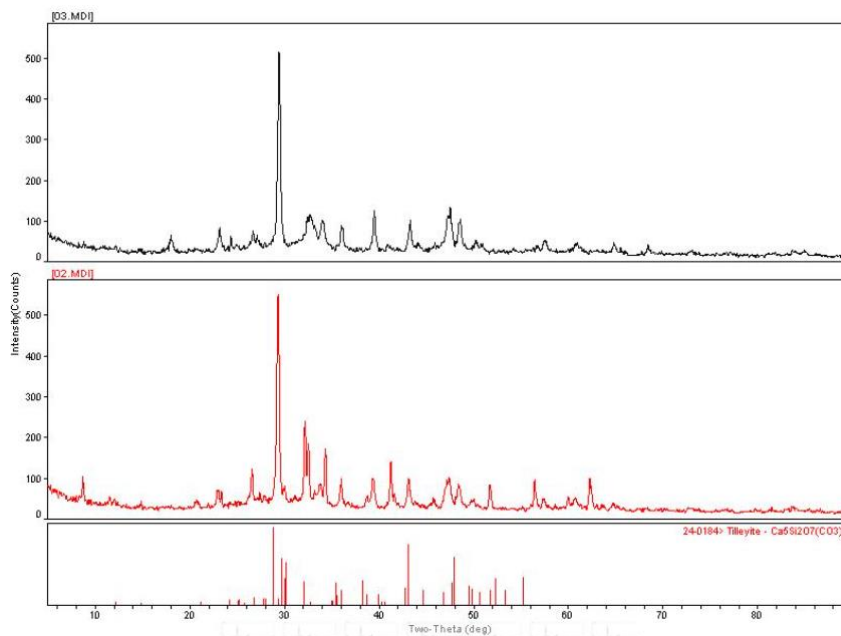


Figura 21: Analise DRX, presença de Tilleyite do CP (em baixo -D2) e do CR(em cima-D3).

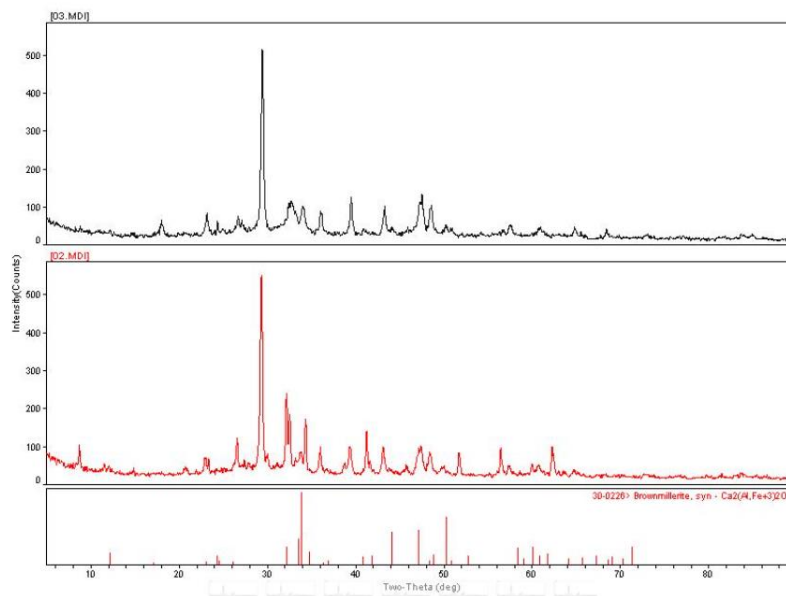


Figura 22: Analise DRX, presença de $\text{Ca}_2(\text{AlFe}+3)_2 \text{O}_2$ do CP (em baixo-D2) e do CR(em cima-D3).

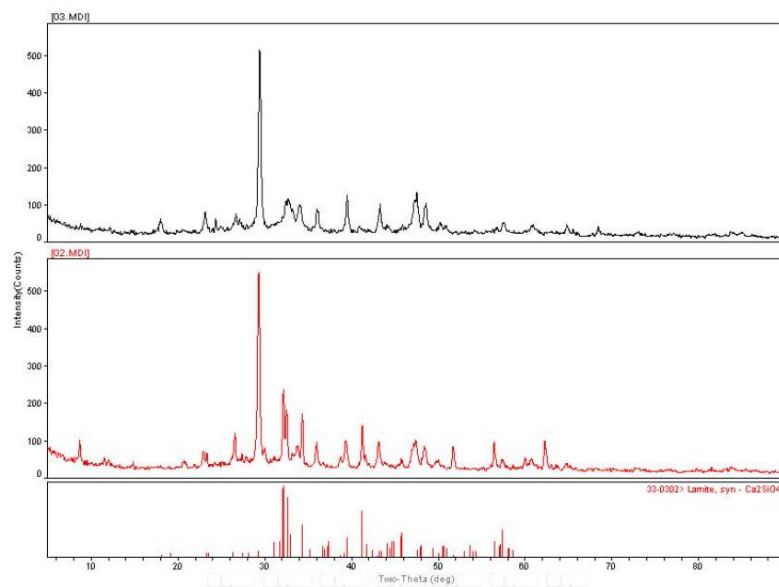


Figura 23: Analise DRX, presença de Lamite do CP(em baixo-D2) e do CR(em cima-D3).

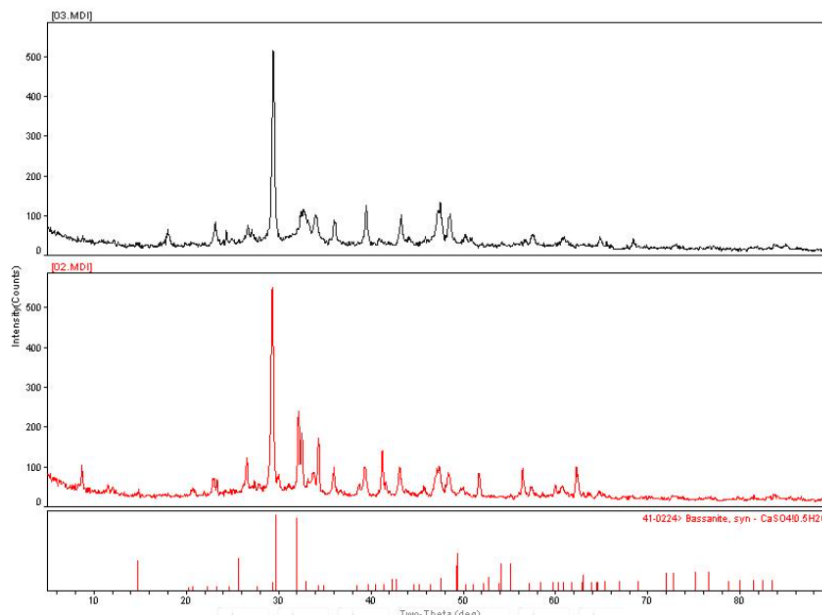


Figura 24: Analise DRX, presença de Bassanite do CP(em baixo-D2) e do CR(em cima-D3).

A Figura 25 apresenta o gráfico da etringite presente na amostra CR e CP. É observado que existe uma diferença nos picos das amostras; a amostra CP apresenta picos bem mais elevados e em maiores quantidades com esse composto, do que a amostra CR.

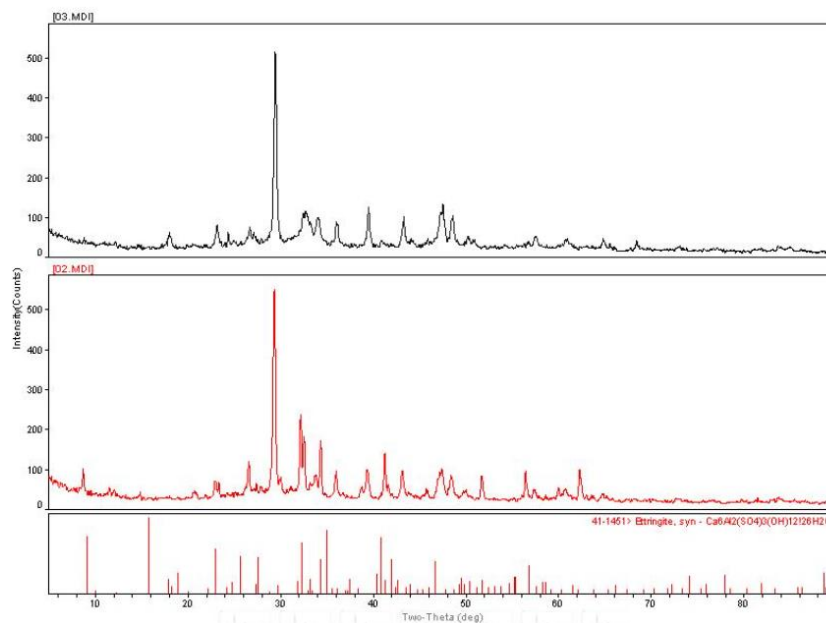


Figura 25: Análise DRX, presença de etringite do CP(em baixo-D2) e do CR(em cima-D3).

4.4 Análise Termogravimétrica

Como referido anteriormente no Capítulo 3, a análise termogravimétrica foi executada com o material em pó, partículas menores que 63 μm . Com este ensaio foi permitido medir qual a perda de massa de cada mistura quando expostos a uma temperatura até 1000 $^{\circ}\text{C}$. Nas Figuras 26 apresentam-se as curvas da análise termogravimétrica do cimento reciclado termoativado e na Figura 27 apresenta-se essa análise para a amostra de cimento Portland.

É observado nestes gráficos que existem intervalos em que o pico (correspondente à perda de massa) do CP é maior que o pico do CR, no intervalo de 100 $^{\circ}\text{C}$ a 200 $^{\circ}\text{C}$. Já no intervalo de 400 $^{\circ}\text{C}$ a 500 $^{\circ}\text{C}$ o pico é mais elevado na amostra CR. Para os materiais comêntícios provenientes do cimento Portland ocorrem as seguintes fases nos intervalos de temperatura [58–60]:

- Na temperatura de 0 $^{\circ}\text{C}$ aos 200 $^{\circ}\text{C}$ começa por se perder a água livre e de seguida a água quimicamente ligada, correspondente à decomposição do silicato de cálcio hidratado (CSH) e da etringite.
- Na temperatura de 200 $^{\circ}\text{C}$ aos 550 $^{\circ}\text{C}$ ocorre a decomposição do hidróxido de magnésio e posteriormente ocorre a decomposição do hidróxido de cálcio, $\text{Ca}(\text{OH})_2$. É também neste intervalo de temperatura que ocorre a decomposição da matéria orgânica.

- Na temperatura de 550°C aos 850°C ocorre a decomposição do carbonato de cálcio, CaCO_3 .
- Na temperatura de 850°C aos 1000°C ocorre a decomposição do carbonato de magnésio, MgCO_3 .

Com os gráficos obtidos no TGA e DTG do material (CP e CR) antes da carbonatação acelerada, Figuras 26 e 27, obteve-se o valor do C_0 , assim como o C_{max} , valores esses que estão apresentados na Tabela 10. Note-se que embora nesta pesquisa tenham sido realizadas argamassas, ligante e agregado, porém para obter o valor da absorção de CO_2 utilizou-se o material do corpo de prova # <63 μm e como a granulometria utilizada no agregado foi entre 4 mm e 1 mm, assume-se que o material abaixo de 63 μm seja de cimento, o RCD pressupõe que seja uma quantidade mínima. Com isso a grande parte do pó obtido para realizar o ensaio foi do ligante, por esse motivo determinou-se o C_0 somente do ligante CP e do CR.

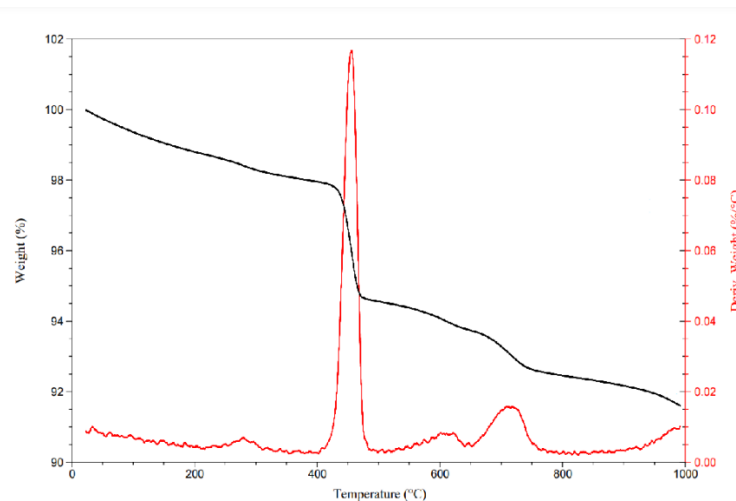


Figura 26: TGA e DTG do CR antes da carbonatação acelerada.

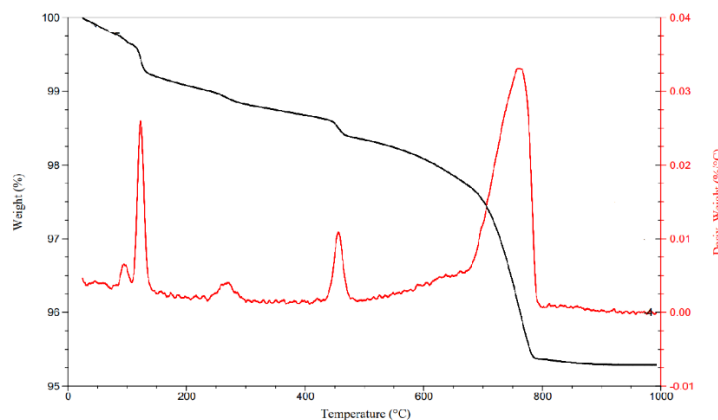


Figura 27: TGA e DTG do CP antes da carbonatação acelerada

Tabela 10: C₀ das amostras CR e CP

Amostras	C ₀ (%)
CR	2,78
CP	3,06

Depois da carbonatação acelerada foi realizado o ensaio TGA e DTG dos corpos de prova em pó, estando o gráfico dos resultados do ensaio apresentado nas Figuras 28 e 29. Com os resultados foi obtido o valor do C dos corpos de prova e apresentado na tabela 11 conjuntamente com o C_{max} e o DC.

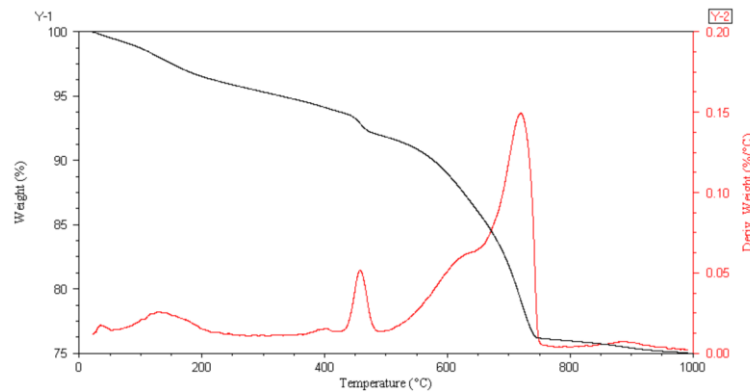


Figura 28: TG e DTG da amostra CR depois da carbonatação acelerada.

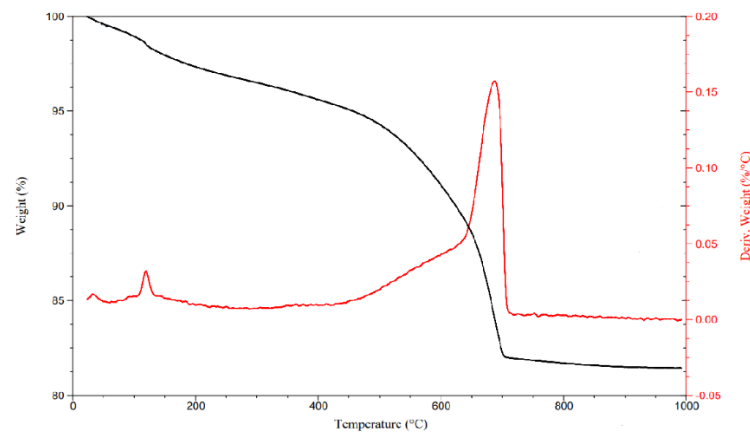


Figura 29: TG e DTG da amostra CP depois da carbonatação acelerada.

Tabela 11: C₀, C, C_{max} e DC das amostras CR e CP

Material	C ₀ (%)	C (%)	C _{max} (%)	DC (%)
CR	2,78	14,38	54,98	22,22
CP	3,06	11,25	53,64	16,19

4.5 Caracterização microestrutural

Como abordado anteriormente no Capítulo 3, as análises de microscopia eletrônica de varrimento apresentam-se nas imagens das Figuras 30,31 e 32, correspondentes às amostras de cimento reciclado termoativado e de cimento Portland, após a cura por carbonatação acelerada.

Através destas imagens observa-se que a amostra CR apresentou uma área superficial maior, conforme apresentado na Figura 30, onde são indicadas as dimensões das partículas. Além disso, é observado que existe uma maior quantidade de vazios no CR em comparação ao CP. Ademais é observado uma maior irregularidade das partículas na amostra CP, enquanto a amostra CR apresenta as partículas em dimensões semelhantes, como pode ser observado nas imagens nas Figuras 33,34 e 35.

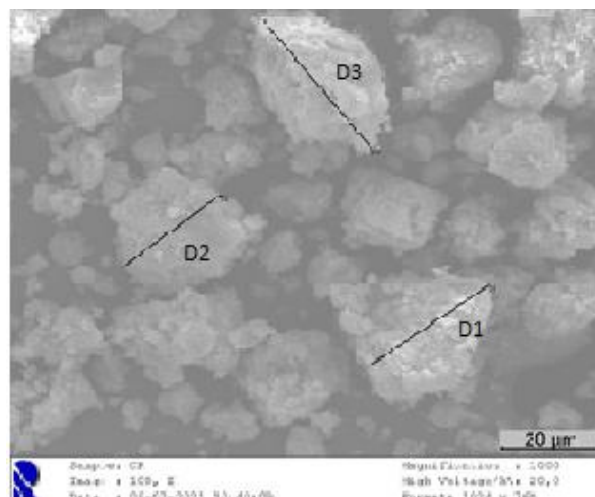


Figura 30 :Análise das imagens do microscopia eletrônica de varrimento do CR, onde se apresentam as dimensões das partículas D1=29,748 um, D2=24,584 um, D3= 34,168 um.

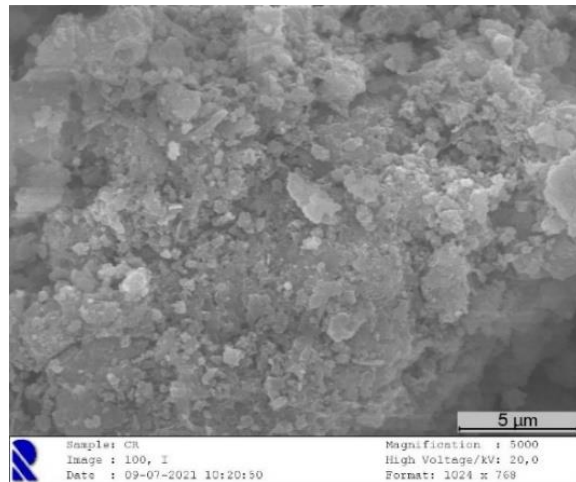


Figura 31: Análise das imagens do microscopia eletrônica de varrimento do CR.

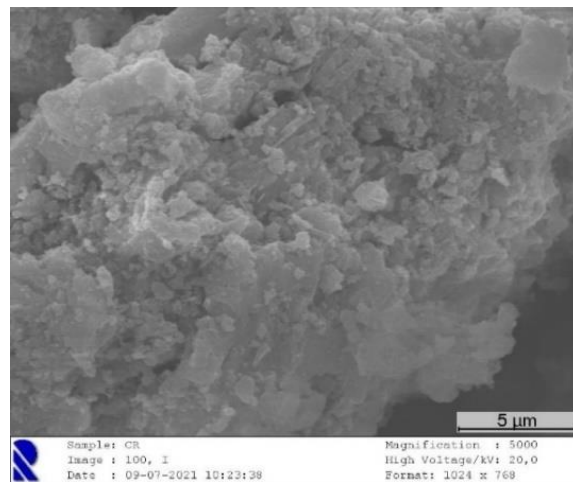


Figura 32: Análise das imagens do microscopia eletrônica de varrimento do CR.

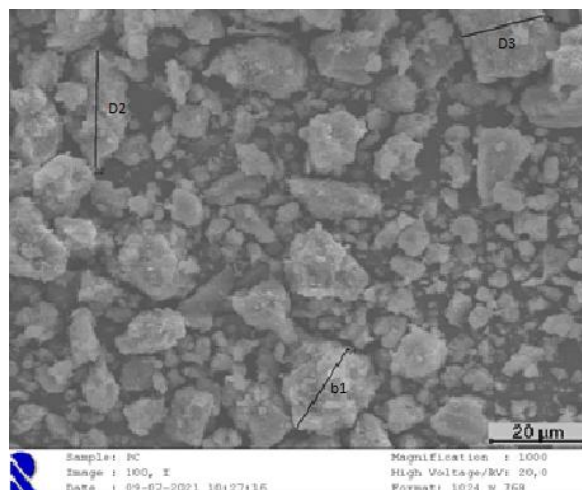


Figura 33: Análise das imagens do microscopia eletrônica de varrimento do CP, onde se apresentam as dimensões das partículas $b_1=19,384$ um, $D_2=24,090$ um, $D_3=17,670$ um.

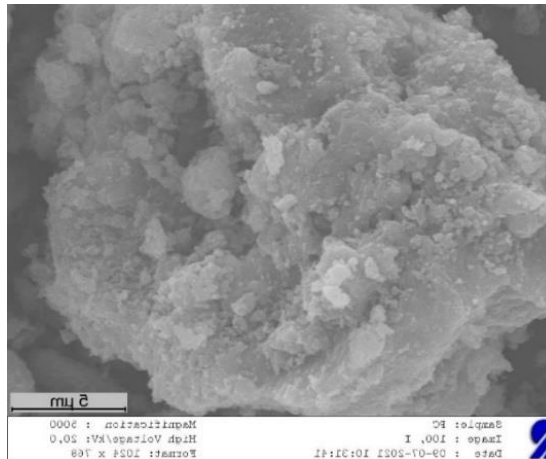


Figura 34: Análise das imagens do microscopia eletrônica de varrimento do CP.

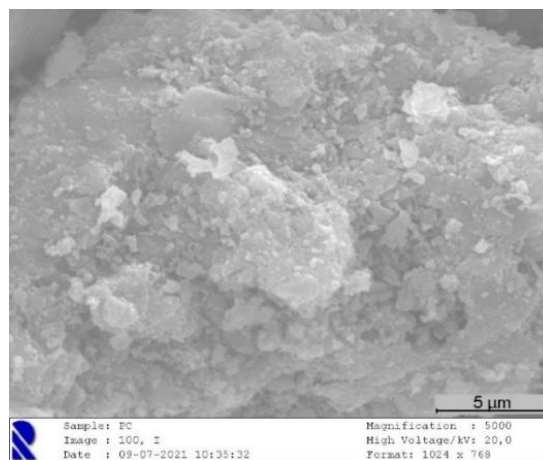


Figura 35: Análise das imagens do microscopia eletrônica de varrimento do CP.

4.6 Espectroscopia de infravermelho

Os resultados obtidos do ensaio FTIR são apresentados na Figura 36. Com os resultados verificou-se a ocorrência de picos de frequência 2980 cm^{-1} , 2900 cm^{-1} e 1410 cm^{-1} que correspondem às vibrações de alongamento e a banda de vibração de flexão OH nos produtos de hidratação.

Os picos 1410 cm^{-1} e 872 cm^{-1} correspondem às vibrações de vibração de alongamento assimétrico e banda de vibração de flexão de CO_3^{2-} , que estão relacionadas com os carbonatos gerados pela reação, que pode ser causada pela reação de carbonatação entre as amostras e o CO_2 do ar durante a cura e da preparação da amostra. Já os picos de absorção em 1050 cm^{-1} são os picos característicos da vibração de estiramento assimétrico e vibração de flexão de Si-O-Si [61–63].

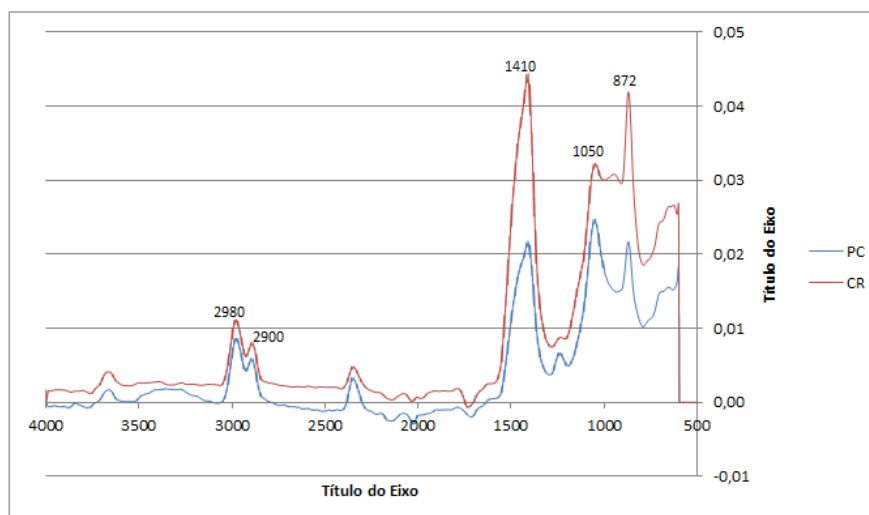


Figura 36 : Espectros FTIR das amostras CR e CP.

4.7 Porosimetria por intrusão de mercúrio

Neste trabalho, foi utilizado a técnica de porosimetria de mercúrio para comparar a porosimetria da argamassa de cimento Portland (CP) e de cimento reciclado termoativado, nas duas misturas com agregado RCD de betão.

O processo foi realizado em duas etapas, sendo a segunda com uma pressão maior, pois pequenos poros podem, possivelmente, estar presentes no interior da pasta, mas tenham acesso ao exterior apenas através de canais de pequeno diâmetro. O volume total dos poros é definido como o volume total de mercúrio intrudido na pressão máxima aplicada na primeira intrusão. Em seguida, a porosidade total é calculada como o volume total de poros dividido pelo volume total da amostra [64].

Com os dados obtidos no ensaio foi apresentado um gráfico com o volume de intrusão acumulado real para a mesma gama de diâmetros de poros dos corpos de prova do CP e do CR, onde logo é observado uma diferença entre as curvas. Nas figuras 37 e 38 apresentam-se os resultados obtidos no estudo realizado, com microporosímetro. A figura 37 relaciona o volume de intrusão incremental por massa unitária de argamassa, para diferentes diâmetros de poros, num ciclo de intrusão de mercúrio de aumento progressivo de pressão. Já a figura 38 apresenta o volume de intrusão acumulado para a mesma gama de diâmetros de poros.

Com as análises da Figura 37 é observado que a amostra de CR apresentou uma maior quantidade de volume de intrusão em comparação a amostra de CP. Além disso, a argamassa com CP apresenta uma maior distribuição de poros em 1 μm e indicando uma menor quantidade de poros com diâmetro no intervalo de 10 a 100 μm . Já a argamassa

com CR apresentou um maior valor do diâmetro dos poros de 0,1 μm e um menor valor também no intervalo de 10 a 100 μm , não tendo ocorrido praticamente intrusão de mercúrio nesse intervalo.

Esta diferença é mais evidente na Figura 38, verificando-se uma grande diferença na curva correspondente à argamassa com CR na região do poro 0,01 μm , em contraste com o observado na argamassa de CP em que esta gama de poros é detetada com o ensaio. Porém é observado que na argamassa CP todos os poros são preenchidos, não encontrando nenhum poro sem intrusão, diferente dos dados encontrados na argamassa CR, onde apresenta diâmetros em que não houve intrusão de mercúrio, sendo que isso ocorre no intervalo de 10 μm a 100 μm .

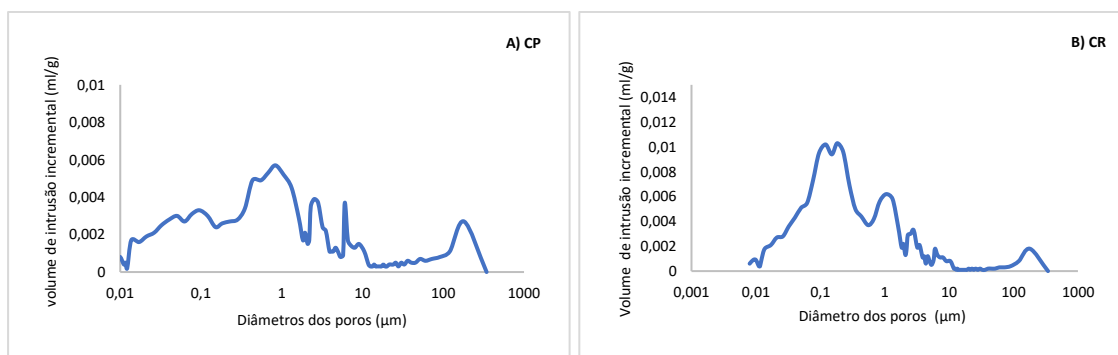


Figura 37: Volume de intrusão incremental A) CP e B) CR.

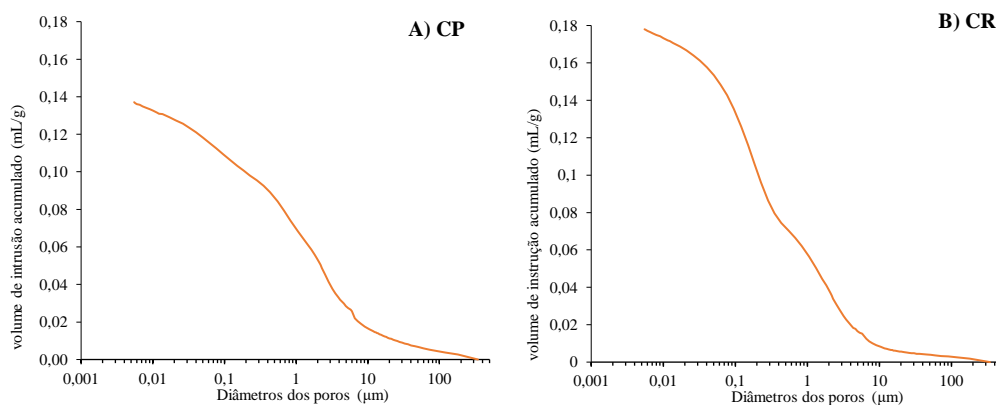


Figura 38: Volume de intrusão acumulado A) CP e B) CR.

Capítulo 5 – Discussão

Esta dissertação de mestrado teve como principais objetivos a avaliação de um material 100% reciclado com cura por carbonatação acelerada, por vários ensaios com amostras de cimento reciclado termoativado com resíduo de construção e demolição comparada com cimento Portland com resíduo de construção e demolição. Tendo em conta os resultados obtidos, apresentam-se seguidamente as sínteses a retirar da investigação realizada.

5.1 Discussão dos resultados

Com os resultados demonstrados no capítulo 5 podemos analisar que os materiais utilizados para fazer um material 100 % reciclado demonstraram resultados bastantes adequados para serem utilizados nas obras de engenharia civil. Mesmo o material CR com RCD precisando de uma quantidade de água mais elevado que o material CP com RCD apresenta resultados positivos nos ensaios realizado nessa pesquisa, como será discutido nesta secção.

Em relação à quantidade de água que foi necessário utilizar para realizar as mistura, a mesma pode ser explicada pois o cimento Portland precisam de uma quantidade de água para realizar uma cura por hidratação inicial, mesmo em seguida sendo realizada a carbonatação acelerada, isso já não ocorre em escórias de acordo com outros autores [10,65]. A quantidade maior de água do CR em relação ao CP se deve por causa da termoativação do material, ocorrendo a desidratação do material.

A carbonatação acelerada é um método em que os corpos de prova adsorvem CO₂ para o seu endurecimento. Nesse método não é necessário uma quantidade elevada de água, pois a quantidade de água necessária é apenas para o preparação das misturas. Quando ocorre o processo de ativação de CO₂ a água acaba por sair dos poros à medida que o CO₂ penetra no corpo de prova.

Os resultados obtidos indicam que a resistência à compressão dos materiais com cimento reciclado termoativado e resíduo de construção e demolição após cura por carbonatação apresenta um resultado favorável para serem utilizados na construção civil. Além disso, os valores obtidos pelo cimento Portland normal não apresentam uma discrepância em relação ao cimento reciclado termoativado depois de 24 horas por carbonatação acelerada.

De acordo com os dados analisados na revisão bibliográfica o resultado de resistência à compressão era esperado que não fosse muito alto, pois o cimento reciclado termoativado e os resíduos de construção e demolição possuem uma baixa resistência. De acordo com Bogas [14], logo que aumenta a quantidade de cimento reciclado termoativado diminui a resistência a compressão na cura por hidratação; sendo que os valores de resistência à compressão obtidos por Bogas não foram muito maiores que 20 MPa.

Os resíduos de construção e demolição, de acordo com Brito [34], são comumente utilizados como agregados e para apresentarem uma resistência à compressão elevada são executadas argamassas com ligantes que forneçam uma alta resistência. Porém com os resultados analisados nessa pesquisa foram encontrados valores aceitáveis para serem utilizados em obras de engenharia civil. Além disso, utilizar um material onde 100% dos constituintes são reciclados e a ativação é obtida por CO₂ é bastante benéfico para o meio ambiente, pois permite eliminar esses poluentes do meio ambiente.

Ademais, a cura por carbonatação fez com que as materiais absorvessem CO₂ e ainda que não se verifique uma adosorção com grandes variações entre as amostras de CR e CP, a amostra com CR obteve um valor de resistência ligeiramente maior que a cura por hidratação, obtida por Bogas, demonstrando que a cura por carbonatação acelerada apresentou vantagens nas amostras de CR [14].

Com o ensaio DRX é possível identificar mais substâncias cristalinas em CP, onde tem ordem de longo alcance, apresentando os picos mais acentuados. Já em CR é encontrado mais as substâncias amorfas que não possuem ordem de longo alcance e picos menos acentuados.

As análises DRX demonstraram que as misturas possuíam os mesmos compostos. Porém em quantidades diferentes, como mostram os picos dos gráficos onde o CP apresenta picos maiores. Essa menor quantidade de picos na argamassa de CR com RCD, pressupõe-se que seja por causa da termoativação que o material sofreu antes de ser utilizado, ocorrendo a decomposição de parte desses compostos, deixando o material mais amorfo. Essa termoativação ocorreu a 650°C, afetado os compostos existentes no cimento Portland.

No resultado do TGA é observado que as curvas da perda de massa são praticamente as mesmas nas duas amostras, porém os componentes de cada amostra são diferentes, que é facilmente explicado pelo facto do CR já ter sofrido tratamento térmico. A curva da perda de massa nas duas amostras mostra que a massa manteve-se aproximadamente com uma pequena perda de massa até perto dos 450 °C, em seguida dá-se uma queda

acentuada de perda da massa para as duas amostras. Com isso, as explicações das possíveis perdas destas amostras são as mesmas.

Com os dados das curvas do DTG é encontrado um pico de perda de massa diferente nas duas amostras, isso se deve porque o cimento reciclado termoativado ocorreu a decomposição de alguns compostos com a temperatura de 650 °C, para obter as propriedades necessários para ser reutilizado como ligante. Com isso, diversos componentes do cimento foram alterados, isso é indicado com a diferença de curvas existentes no gráfico do cimento Portland em comparação com o cimento reciclado termoativado.

De acordo com os gráficos DTG os picos maiores são encontrados na mesma temperatura, a 727,94°C, nas duas amostras, o que é devido à descarbonização da calcita (CaCO_3), que geralmente é encontrada para a faixa de temperatura de 700-900 °C [66]. Além disso, o outro pico de perda de massa identificado na amostra CR, a uma temperatura de 452,83°C e na amostra de CP vários picos de perda de massa no intervalo de 450 a 500 °C, são atribuídos principalmente à desidratação do hidróxido de cálcio (Ca(OH)_2) [11,19].

Ademais, com os resultados determinados pelo TGA foi possível obter a quantidade de CO_2 absorvido pelas amostras após a carbonatação acelerada, por meio do método de Matsushita et al [53]. Os resultados indicam que o CR apresentou ,22,22 %, uma maior absorção de CO_2 em comparação ao CR, 16,19 %, isso indica que o material 100% reciclado obteve um melhor desempenho, sendo mais sustentável a sua utilização nas construções.

Os materiais analisados nessa pesquisa ocorrem também a cura por hidratação, que começa logo depois do preparo das misturas, porém não se sabe ao certo o fim da cura por hidratação, mas sabe-se que ela termina dentro da câmara de carbonatação. Por um tempo ocorre a ativação por CO_2 e a cura por carbonatação simultâneas, mas ao fim a carbonatação se torna mais intensa, pois quase toda a água dos corpos de prova sai.

Em termos de microestrutura, também é possível observar uma diferença na formação das argamassas. A amostra CR apresenta partículas maiores que a CP, isso demonstra a exigência maior de água da argamassa. Na amostra CP existe a formação de uma matriz mais irregular, menos homogênea, em relação às matrizes formadas nas misturas CR. Além disso, são verificados mais vazios na amostra de CR, sendo que isso se deve, mais uma vez, à decomposição de compostos na termoativação do material CR.

A respeito da análise FTIR verificou-se que na mistura com CR apresentou maiores picos de vibração de alongamento assimétrico e banda de vibração de flexão em relação à

mistura com CP. Além disso, a amostra com CR apresenta um maior pico na vibração que corresponde ao OH, indicando um maior grau de hidratação da amostra, como os demais ensaios indicam também. Além disso, a amostra com CR também apresentou picos maiores na vibração correspondente a CO_3^{2-} , indicando que o corpo de prova com CR absorve uma quantidade maior de CO_2 em comparação ao corpo de prova com CP, podendo ter sido durante a preparação da amostra como também durante a cura por carbonatação acelerada [63].

Com os resultados obtidos no ensaio de porosímetria de mercúrio, pode concluir-se que a intrusão do mercúrio na amostra CR é maior que a intrusão na amostra com CP; isso já era esperado pela grande quantidade de vazios observados no estudo da microestrutura. Porém é observado que a argamassa com CP apresenta uma quantidade uniforme de poros, porém eles são constituídos em vários tipos de diâmetros; isso também era esperado por causa das imagens da microestrutura das partículas. Já em CR é diferente, pois podem não possuir alguns tipos de diâmetros de poros existentes no CP.

Capítulo 6 – Considerações finais

Ao longo dos capítulos expostos foram observadas e retiradas algumas conclusões que se apresentaram relevantes para a realização e compreensão do estudo realizado com o cimento reciclado termoativado e os resíduos de construção e demolição.

6.1 Conclusões gerais

A utilização de materiais eco-eficientes para o desenvolvimento de misturas cimentícias é um assunto já debatido, levantando muitos estudos ao longo dos anos, sendo uma alternativa sustentável ao depósito em aterros, o uso do cimento reciclado termoativado em misturas curadas por carbonatação trazer inúmeras vantagens. Como foi referido neste estudo, a aplicação deste tipo de material deve ser feita tendo em conta a sua tendência em reduzir os resíduos em aterros e o desenvolvimento de novos materiais sustentáveis para serem utilizados na engenharia civil.

No decorrer deste estudo foi analisado o comportamento de duas misturas, demonstrando que a amostra CR exigiu uma maior quantidade de água, além de demonstrar uma maior decomposição dos materiais. Além disso, no ensaio de resistência à compressão os valores obtidos mostram que o cimento reciclado termoativado com o resíduo de construção e demolição, mesmo com as pesquisas bibliográfica de outros autores afirmando que o material não atinge uma resistência muito elevada, obteve resultados satisfatórios para serem utilizados na construção civil como blocos.

Os demais ensaios demonstraram que a amostra com cimento reciclado termoativado demonstraram resultados satisfatórios, podendo ser utilizados pela indústria na construção civil. Mesmo os materiais apresentando irregularidades com a deposição dos compostos, uma alta porosidade e também uma alta exigência de água, indicou ser um material 100 % reciclado que apresentou ótimos resultados para serem utilizados.

De forma geral pode concluir-se que este estudo contribuiu para compreender como a utilização de materiais 100% reciclado, CR com RCD, pode substituir o cimento Portland com agregado comum. Além disso, ao utilizar a cura por carbonatação acelerada em vez da cura por hidratação diminui-se assim a utilização de água nas misturas e permite a captação de CO₂. A utilização de cimento reciclado termoativado como ligante e RCD como agregado nas misturas torna-se uma prática viável, pois promove a reutilização e a valorização de materiais com baixo valor.

6.2 Recomendações de trabalhos futuros

Na mesma linha de valorização de resíduos, sugere-se a importância do estudo de resíduos nas diversas áreas da engenharia civil. Entre outros, estudar materiais resultantes também dos resíduos urbanos, de forma a dar uma nova vida a esses materiais, conservando os recursos naturais, diminuindo o volume de depósito destes em aterros, produzindo materiais economicamente viáveis e com qualidade.

Bibliografia

- [1] Ghiat I, Al-Ansari T. A review of carbon capture and utilisation as a CO₂ abatement opportunity within the EWF nexus. *J CO₂ Util* 2021;45:101432. <https://doi.org/10.1016/j.jcou.2020.101432>.
- [2] Akhtar A, Sarmah AK. Construction and demolition waste generation and properties of recycled aggregate concrete: A global perspective. *J Clean Prod* 2018;186:262–81. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2018.03.085>.
- [3] Carriço A, Bogas JA, Guedes M. Thermoactivated cementitious materials – A review. *Constr Build Mater* 2020;250. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2020.118873>.
- [4] Scrivener KL, John VM, Gartner EM. Eco-efficient cements: Potential economically viable solutions for a low-CO₂ cement-based materials industry. *Cem Concr Res* 2018;114:2–26. <https://doi.org/10.1016/j.cemconres.2018.03.015>.
- [5] European Commission. Circular Economy n.d. https://ec.europa.eu/environment/circular-economy/index_en.htm (accessed November 12, 2019).
- [6] República Portuguesa. Plano Nacional Integrado Energia e Clima 2021-2030 2018:1–11.
- [7] Bogas A, Sousa V. Comparison of energy consumption and carbon emissions from clinker and recycled cement production 2021;306. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2021.127277>.
- [8] Bogas JA, Carriço A, Pereira MFC. Mechanical characterization of thermal activated low-carbon recycled cement mortars. *J Clean Prod* 2019;218:377–89. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2019.01.325>.
- [9] Nielsen P, Boone MA, Horckmans L, Snellings R, Quaghebeur M. Accelerated carbonation of steel slag monoliths at low CO₂ pressure - Microstructure and strength development. *J CO₂ Util* 2020;36:124–34. <https://doi.org/10.1016/j.jcou.2019.10.022>.
- [10] Humbert PS, Castro-Gomes J. CO₂ activated steel slag-based materials: A review. *J Clean Prod* 2019;208:448–57. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2018.10.058>.
- [11] NAÇÕES UNIDAS. OBJETIVOS DE DESENVOLVIMENTO SUSTENTÁVEL n.d. <https://unric.org/pt/objetivos-de-desenvolvimento-sustentavel/> (accessed April 2, 2020).
- [12] PACHECO TORGAL, F., JALALI S. A Sustentabilidade dos Materiais de Construção. Universidade do Minho. Escola de Engenharia, 2010.
- [13] BANDEIRA J. Retração de argamassas produzidas com cimento reciclado. Dissertação de Mestrado em Engenharia Civil. Universidade de Lisboa, 2020.
- [14] CARRIÇO, A., REAL, S., BOGAS, J. A., PEREIRA MFC. Mortars with thermo activated recycled cement: Fresh and mechanical characterisation. *Constr Build Mater* 256 2020.
- [15] Serpell R, Lopez M. Properties of mortars produced with reactivated cementitious materials. *Cem Concr Compos* 2015;64:16–26. <https://doi.org/10.1016/j.cemconcomp.2015.08.003>.
- [16] F. Splittgerber AM. Inversão da hidratação do cimento Como novo método de identificação e / ou reciclagem? 11th Int Congr Chem Cem 2003;pp. 1282-.
- [17] Q. Zhang GY. Cinética de desidratação da pasta de cimento Portland em alta temperatura. *J Therm Anal Calorim* 2012.
- [18] Shui Z, Xuan D, Chen W, Yu R, Zhang R. Cementitious characteristics of hydrated cement paste subjected to various dehydration temperatures. *Constr Build Mater* 2009;23:531–7. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2007.10.016>.

- [19] Yu R, Shui Z. Influence of agglomeration of a recycled cement additive on the hydration and microstructure development of cement based materials. *Constr Build Mater* 2013;49:841–51. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2013.09.004>.
- [20] BOGAS, J. A., CARRIÇO, A., TENZA-ABRIL AJ. Microstructure of thermoactivated recycled cement pastes. *Cem Concr Res* 138 2020.
- [21] Wu H, Zuo J, Zillante G, Wang J, Yuan H. Status quo and future directions of construction and demolition waste research: A critical review. *J Clean Prod* 2019;240:118163. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2019.118163>.
- [22] Zheng L, Wu H, Zhang H, Duan H, Wang J, Jiang W, et al. Characterizing the generation and flows of construction and demolition waste in China. *Constr Build Mater* 2017;136:405–13. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2017.01.055>.
- [23] Akanbi LA, Oyedele LO, Akinade OO, Ajayi AO, Davila Delgado M, Bilal M, et al. Salvaging building materials in a circular economy: A BIM-based whole-life performance estimator. *Resour Conserv Recycl* 2018;129:175–86. <https://doi.org/10.1016/j.resconrec.2017.10.026>.
- [24] Kabirifar K, Mojtahedi M, Wang C, Tam VWY. Construction and demolition waste management contributing factors coupled with reduce, reuse, and recycle strategies for effective waste management: A review. *J Clean Prod* 2020;263:121265. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2020.121265>.
- [25] Yuan H, Shen L. Trend of the research on construction and demolition waste management. *Waste Manag* 2011;31:670–9. <https://doi.org/10.1016/j.wasman.2010.10.030>.
- [26] J. Park RT. Overcoming barriers to the reuse of construction waste material in Australia: a review of the literature. *Int J Constr Manag* 2017.
- [27] Mah CM, Fujiwara T, Ho CS. Environmental impacts of construction and demolition waste management alternatives. *Chem Eng Trans* 2018;63:343–8. <https://doi.org/10.3303/CET1863058>.
- [28] Filipe D, Leal F. Durabilidade de betões produzidos com cimento reciclado *Engenharia Civil* 2020;2020.
- [29] Barbudo A, Ayuso J, Lozano A, Cabrera M, López-Uceda A. Recommendations for the Management of Construction and Demolition Waste in Treatment Plants. *Proceedings* 2018;2:1278. <https://doi.org/10.3390/proceedings2201278>.
- [30] AKBARNEZHAD, A., ONG, K. C. G., ZHANG, M. H., TAM, C. T., FOO TWJ. Microwave-assisted beneficiation of recycled concrete aggregates. *Constr Build Mater* 2011.
- [31] AL-BAYATI, H. K. A., DAS, P. K., TIGHE, S. L., BAAJ H. Evaluation of various treatment methods for enhancing the physical and morphological properties of coarse recycled concrete aggregate. *Constr Build Mater* 2016.
- [32] LOTFI, S., DEJA, J., REM, P., MRÓZ, R., ROEKEL, E. V., VAN DER STELT H. Mechanical recycling of EOL concrete into high-grade aggregates. *Resour Conserv Recycl* 2014.
- [33] TAM, V., TAM, C., LE KN. Removal of cement mortar remains from recycled aggregate using presoaking approaches *Resources. Conserv Recycl* 2007.
- [34] de Brito J. Agregados reciclados e sua influência nas propriedades dos betões. *Lição Sint Para Provas Agreg Inst Super Técnico, Lisboa* 2005:91.
- [35] Bogas JA, De Brito J, Ramos D. Freeze-thaw resistance of concrete produced with fine recycled concrete aggregates. *J Clean Prod* 2016;115:294–306. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2015.12.065>.
- [36] Pinto HAS. Propriedades do Betão Auto-compactável com Incorporação de Agregados Finos Reciclados 2011.
- [37] Propriedades do betão auto-compactável com incorporação de agregados grossos

reciclados Mauro Rangel 2010.

- [38] C. Le Quéré , RM Andrew , P. Friedlingstein , S. Sitch , J. Pongratz , AC Manning , JI Korsbakken , GP Peters , JG Canadell , RB Jackson , TA Boden , PP Tans , OD Andrews , VK Arora , DCE Bakker , L. Barbero , M. Becker, RA Betts , L. Bopp , F. Chevallier DZ. Global Carbon Budget 2017. *Earth Syst Sci* 2018;405–48. <https://essd.copernicus.org/articles/10/405/2018/>.
- [39] Nocito F, Dibenedetto A. Atmospheric CO₂ mitigation technologies: carbon capture utilization and storage. *Curr Opin Green Sustain Chem* 2020;21:34–43. <https://doi.org/10.1016/j.cogsc.2019.10.002>.
- [40] Alper E, Yuksel Orhan O. CO₂ utilization: Developments in conversion processes. *Petroleum* 2017;3:109–26. <https://doi.org/10.1016/j.petlm.2016.11.003>.
- [41] Cuéllar-Franca RM, Azapagic A. Carbon capture, storage and utilisation technologies: A critical analysis and comparison of their life cycle environmental impacts. *J CO₂ Util* 2015;9:82–102. <https://doi.org/10.1016/j.jcou.2014.12.001>.
- [42] WardaAshraf. Carbonation of cement-based materials: Challenges and opportunities. *Construction and Building Materials*; 2016.
- [43] Di Maria A, Snellings R, Alaert L, Quaghebeur M, Van Acker K. Environmental assessment of CO₂ mineralisation for sustainable construction materials. *Int J Greenh Gas Control* 2020;93:102882. <https://doi.org/10.1016/j.ijggc.2019.102882>.
- [44] Humbert PS. Synthesis and Characterisation of CO₂ Activated Binders and Concretes using Industrial Wastes for Precast Buildings Applications 2020.
- [45] Abdullahi M, Odigure JO, Kovo AS, Abdulkareem AS. Characterization and predictive reaction model for cement-sand-kaolin composite for CO₂ sequestration. *J CO₂ Util* 2016;16:169–81. <https://doi.org/10.1016/j.jcou.2016.06.008>.
- [46] Jang JG, Kim GM, Kim HJ, Lee HK. Review on recent advances in CO₂ utilization and sequestration technologies in cement-based materials. *Constr Build Mater* 2016;127:762–73. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2016.10.017>.
- [47] Ana P, Saldanha M. Caracterização de pastas produzidas com cimento reciclado sujeito a diferentes temperaturas de termoativação Miguel Alexandre Filipe Caetano de Carvalho Mestrado Integrado em Engenharia Civil Júri 2020.
- [48] LNEC E 471. E 471-2009, Guia para utilização de agregados reciclados grossos em betões de ligantes hidráulicos 2009;9:8.
- [49] NP EN 206-1. Betão - Parte 1: Especificação, desempenho, produção e conformidade. *Concrete* 2007.
- [50] Filipe JMR. Ativação alcalina de lamas residuais das minas da Panasqueira incorporando vidro moído 2013:126.
- [51] Rodrigues G, Marcheto O. Análises Térmicas. *Caracter Mater* 2009:1–47.
- [52] Deboucha W, Leklou N, Khelidj A, Oudjit MN. Hydration development of mineral additives blended cement using thermogravimetric analysis (TGA): Methodology of calculating the degree of hydration. *Constr Build Mater* 2017;146:687–701. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2017.04.132>.
- [53] Huntzinger DN, Gierke JS, Kawatra SK, Eisele TC, Sutter LL. Carbon dioxide sequestration in cement kiln dust through mineral carbonation. *Environ Sci Technol* 2009;43:1986–92. <https://doi.org/10.1021/es802910z>.
- [54] Kim MS, Jun Y, Lee C, Oh JE. Use of CaO as an activator for producing a price-competitive non-cement structural binder using ground granulated blast furnace slag. *Cem Concr Res* 2013;54:208–14. <https://doi.org/10.1016/j.cemconres.2013.09.011>.
- [55] Tonoli GHD, Carmello GF, Fioroni CA, Pereira T de L, Rocha G, Souza RB de, et al.

- Influence of the initial moisture content on the carbonation degree and performance of fiber-cement composites. *Constr Build Mater* 2019;215:22–9. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2019.04.159>.
- [56] Leber I, Blakey FA. Acción del anhídrido carbónico sobre los morteros y el hormigón; Some effects of carbon dioxide on mortars and concrete 1957;7:0–1.
- [57] Raffael KD, Smith DM. Infrared spectroscopy of the ν_1 band of sulfur tetrafluoride, SF₄. *J Mol Spectrosc* 2002;214:21–7. <https://doi.org/10.1006/jmsp.2002.8570>.
- [58] Esteves TC, Rajamma R, Soares D, Silva AS, Ferreira VM, Labrincha JA. Use of biomass fly ash for mitigation of alkali-silica reaction of cement mortars. *Constr Build Mater* 2012;26:687–93. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2011.06.075>.
- [59] Cheah CB, Ramli M. The implementation of wood waste ash as a partial cement replacement material in the production of structural grade concrete and mortar: An overview. *Resour Conserv Recycl* 2011;55:669–85. <https://doi.org/10.1016/j.resconrec.2011.02.002>.
- [60] Rajamma R, Ball RJ, Tarelho LAC, Allen GC, Labrincha JA, Ferreira VM. Characterisation and use of biomass fly ash in cement-based materials. *J Hazard Mater* 2009;172:1049–60. <https://doi.org/10.1016/j.jhazmat.2009.07.109>.
- [61] Berra M, Mangialardi T, Paolini AE. Residual Capability of Alkali Binding by Hydrated Pozzolanic Cements in Long-Service Concrete Structures. *Adv Mater Sci Eng* 2018;2018. <https://doi.org/10.1155/2018/4853141>.
- [62] Catarina A, Fernandes C. Estudo da lixiviação por medição de pH e condutividade elétrica de materiais de ativação alcalina 2018.
- [63] Xinlei Weia,b,c, Wen Nia,b,c, Siqi Zhanga,b,c*, Xue Wanga,b,c, Jiajie Lia,b c. Influencing factors and optimal curing method of steel slag- desulfuration gypsum_based carbonation materials. *J Build Eng* n.d.
- [64] Zuo Y, Ye G. Pore structure characterization of sodium hydroxide activated slag using mercury intrusion porosimetry, nitrogen adsorption, and image analysis. *Materials (Basel)* 2018;11. <https://doi.org/10.3390/ma11061035>.
- [65] Humbert PS, Castro-Gomes JP, Savastano H. Clinker-free CO₂ cured steel slag based binder: Optimal conditions and potential applications. *Constr Build Mater* 2019;210:413–21. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2019.03.169>.
- [66] Chromá M, Vo D, Bayer P. Concrete Rehydration after Heating to Temperatures of up to 1200 ° C. *Int Conf Durab Build Mater Components* 2011:1633–9.