

Cimentos-cola com incorporação de cimento e agregado reciclados

Diogo Miguel da Silva Raquel Pereira

Dissertação para obtenção do Grau de Mestre em

Engenharia Civil

Orientadores

Professor Doutor José Alexandre De Brito Aleixo Bogas

Engenheiro Luís Miguel Cardoso da Silva

Júri

Presidente: Professor Doutor Vítor Faria e Sousa

Orientador: Professor Doutor José Alexandre De Brito Aleixo Bogas

Vogal: Professor Doutor Pedro Miguel Soares Raposeiro da Silva

Junho 2022

(página intencionalmente deixada em branco)

Declaração:

Declaro que o presente documento é um trabalho original da minha autoria e que cumpre todos os requisitos do Código de Conduta e Boas Práticas da Universidade de Lisboa.

(página intencionalmente deixada em branco)

Cimentos-cola com incorporação de cimento e agregado reciclado

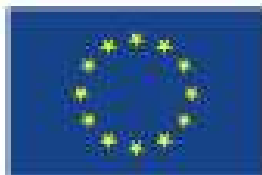
Diogo Miguel da Silva Raquel Pereira

Dissertação para obtenção do Grau de Mestre em
Engenharia Civil

Dissertação elaborada no âmbito do Projeto FCT EcoHydB

Eco – efficient hydraulic binders produced from waste cement – based
materials

Projeto FCT PTDC/ECI-CON/28308/2017



FCT Fundação
para a Ciência
e a Tecnologia

(página intencionalmente deixada em branco)

Agradecimentos

Em primeiro lugar quero agradecer ao Professor José Alexandre Bogas, por toda a ajuda prestada nos últimos meses de modo a obter o melhor resultado possível. Quero também agradecer à Eng^a. Ana Chambel Carriço por me ter orientado durante a longa campanha experimental.

Ao meu Coorientador, Eng.^o Luís Silva, pelo acolhimento e orientação nas instalações da Saint-Gobain Weber, bem como ajuda na análise de resultados.

Quero agradecer à minha colega de trabalho Madalena Borges, por toda a ajuda e companheirismo durante o trabalho, sem ela o caminho seria mais difícil de percorrer. Ao Sr. Francisco Baptista e ao Sr. Pedro Costa, técnicos do Laboratório de Construção do IST, por toda a ajuda e disponibilidade.

Quero agradecer à minha namorada e aos meus amigos, que me acompanharam neste percurso difícil, estando sempre presentes para ouvir desabafos e para dar força.

Quero agradecer aos meus pais e restante família, que nunca me faltaram com nada e que me proporcionaram tudo para que conseguisse chegar onde estou hoje.

Por fim, quero dar um agradecimento especial à minha mãe, que durante todo o meu percurso escolar acreditou em mim e nas minhas capacidades, sem ela não estaria onde estou.

(página intencionalmente deixada em branco)

Resumo

Os produtos de base cimentícia são foco de elevado impacto ambiental, opondo-se aos novos objetivos ambientais de neutralidade carbônica em 2050, e de crescimento económico dissociado do uso de recursos. Assim, têm sido dirigidos esforços por parte da comunidade técnica e científica para se encontrarem alternativas viáveis que reduzam a utilização de clínquer ou que permitam a produção de clínqueres mais eco-eficientes, bem como a reutilização de resíduos de construção e demolição. Neste contexto, tem sido desenvolvida investigação relevante no instituto superior técnico, no âmbito do projeto EcoHydb, que visa a produção inovadora de cimento reciclado (CR).

Este trabalho teve como objetivo analisar a utilização de CR e areia reciclada (AR) na produção de um novo tipo de cimento-cola (CC) comercializável, de maior eco-eficiência e sustentabilidade, mas tecnicamente e economicamente viável no mercado. Desse modo, desenvolveram-se 7 tipos de CC, com substituição parcial a total de cimento normal (CPN) por CR e de areia normal (AN) por AR, que foram caracterizados em termos da sua aplicabilidade (espalhamento, tempo de presa, transferência, poder molhante e exigência de água), resistência mecânica e aderência, sobre condições variáveis de envelhecimento (por imersão em água ou calor). Este trabalho realizou-se em colaboração com a empresa Weber.

A incorporação de CR diminui a trabalhabilidade, com repercussão na resistência mecânica e nas suas propriedades de durabilidade. No entanto, verifica-se que para percentagens de incorporação até 50% CR foi possível atingir CC mais sustentáveis com condições de aplicabilidade e de aderência, antes e após envelhecimento, dentro da norma.

Palavras-chave:

Cimento reciclado; areia reciclada; cimento-cola; resistência mecânica; aderência.

(página intencionalmente deixada em branco)

Abstract

Cement-based products are a focus of high environmental impact, opposing the new environmental goals of carbon neutrality in 2050, and economic growth decoupled from resource use. Thus, efforts have been directed by the technical and scientific community to find viable alternatives that reduce the use of clinker or allow the production of more eco-efficient clinkers, as well as the reuse of construction and demolition waste. In this context, relevant research has been developed at the superior technical institute, under the EcoHydb project, which aims at the innovative production of recycled cement (RC).

This work aimed to analyze the use of CR and recycled sand (RA) in the production of a new type of cement-glue (CC) marketable, of greater eco-efficiency and sustainability, but technically and economically feasible in the market. Thus, 7 types of SCC were developed, with partial to total replacement of normal cement (CPN) by CR and normal sand (AN) by RA, which were characterized in terms of their applicability (spreading, setting time, transfer, wetting power and water requirement), mechanical strength and adhesion, under variable aging conditions (by immersion in water or heat). This work was carried out in collaboration with the company Weber.

The incorporation of CR decreases workability, with repercussions on mechanical strength and durability properties. However, it was found that for incorporation percentages of up to 50% of CR it was possible to achieve more sustainable CC with applicability and adherence conditions, before and after aging, within the standard.

Keywords:

Recycled cement; concrete recycling; cement-glue; mechanical strength; adhesion.

(página intencionalmente deixada em branco)

Índice

1	Introdução.....	21
1.1	Enquadramento e motivação	21
1.2	Objetivo e metodologia.....	22
1.3	Estrutura da dissertação.....	23
2.	Revisão da literatura.....	25
2.1	O impacto ambiental na construção.....	25
2.2	Mitigação da pegada de carbono dos materiais de base cimentícia	26
2.3	Cimento reciclado como alternativa mais eco eficiente ao cimento normal	27
2.4	Avanços atingidos no cimento reciclado (temperaturas de processamento, propriedades, comportamento em pastas e argamassas).....	27
2.5	A incorporação de cimento reciclado em novos produtos mais eco-eficientes.	29
2.6	Argamassa cola.....	30
2.7	Cimento-cola	30
2.7.1	Cimento	30
2.7.2	Agregados	31
2.7.3	Aditivos	31
2.8	Requisitos funcionais dos cimentos-cola.	34
2.9	Normalização nos cimentos-cola.	36
3.	Campanha experimental	37
3.1	Descrição da campanha experimental.....	37
3.2	Materiais utilizados.....	38
3.2.1	Cimento	38
3.2.2	Cimento reciclado.....	38
3.2.3	Separação dos constituintes do betão e obtenção de areia reciclada (AR).....	42
3.2.4	Areia natural (AN).....	43
3.2.5	Aditivos	43
3.3	Formulação dos cimento-cola	44
3.4	Produção das argamassas de cimento-cola.....	46
3.5	Ensaio de argamassas de cimento-cola no estado fresco.....	47
3.5.1	Massa volúmica.....	47
3.5.2	Espalhamento.....	47

3.5.3	Consistência normal e tempo de presa.....	47
3.5.4	Transferência e poder molhante	48
3.6	Caracterização mecânica das argamassas de cimento-cola.....	50
3.6.1	Resistência à flexão.	50
3.6.2	Resistência à compressão.	51
3.6.3	Ensaio de aderência por pull-off.....	51
3.6.4	Ensaio de aderência por pull-off após envelhecimento ao calor.	52
3.6.5	Ensaio de aderência por pull-off após envelhecimento por imersão em água.	52
4.	Apresentação e análise de resultados	53
4.1	Resultados obtidos na primeira fase – Cimentos-cola de idêntica consistência.	53
4.1.1	Caracterização no estado fresco.....	54
4.1.2	Tempo de presa	56
4.1.3	Resistência à flexão e compressão nos cimento-cola	58
4.1.4	Ensaio de aderência por Pull-OFF, sem envelhecimento	60
4.1.5	Ensaio de aderência por Pull-OFF, envelhecimento por imersão em água.....	62
4.1.6	Ensaio de aderência por Pull-OFF, envelhecimento por Calor	64
4.2	Resultados obtidos na segunda fase – Cimentos-cola de Aplicabilidade melhorada	65
4.2.1	Poder molhante e transferência	65
4.2.2	Tempo de presa	68
4.2.3	Ensaio de aderência por Pull-OFF, sem envelhecimento	69
4.2.4	Ensaio de aderência por Pull-OFF, envelhecimento por imersão em água.....	72
4.2.5	Ensaio de aderência por Pull-OFF, envelhecimento por Calor	74
5.	Conclusões	77
5.1	Conclusões finais	77
5.2	Desenvolvimentos futuros	80
6.	Bibliografia.....	81
7.	Anexos.....	A

Índice de figuras

Figura 1 – Esquema representativo do ciclo de obtenção de cimento reciclado.....	22
Figura 2 - Emissões globais de CO ₂ de 1920 a 2020	25
Figura 3 - CR obtido no âmbito do projeto EcoHydb	29
Figura 4 – Efeito flocculante do éter de amido do tipo 1 e tipo 2.....	33
Figura 5 - Rotura adesiva entre ladrilho e a cola (AF-T).....	34
Figura 6 - Rotura adesiva entre cola e o suporte (AF-S).....	34
Figura 7 - Rotura adesiva entre ladrilho e peça de tração (BT).....	35
Figura 8 - Rotura coesiva na cola (CF-A).....	35
Figura 9 - Rotura coesiva no suporte (CF-S).....	35
Figura 10 - Rotura coesiva no ladrilho (CF-T).....	35
Figura 11 - Moldes para betão	39
Figura 12 - Moldes preenchidos	39
Figura 13 - Britadeira de maxilas	40
Figura 14 - Britadeira pequena de maxilas - GEOLAB	40
Figura 15 - Moinho de rolos - GEOLAB	40
Figura 16 - Moinho de bolas - GEOLAB.....	41
Figura 17 - Forno horizontal	41
Figura 18 - Forno rotativo para Termoativação do CR	41
Figura 19 - Curva granulométrica da areia natural (AN) e da areia reciclada (AR).....	43
Figura 20 - Misturadora para produção de CC.....	46
Figura 21 - Camara húmida para condicionamentos dos provetes	46
Figura 22 - Determinação da massa volúmica no estado fresco	47
Figura 23 - Ensaio de espalhamento	47
Figura 24 – Preparação para ensaio de transferência e poder molhante: i) Placa de betão de base; ii) aplicação da primeira camada; iii) base para a segunda camada; iv) aplicação da segunda camada; v) Denteamento da segunda camada (de cima para baixo e da esquerda para a direita).....	49
Figura 25 - Ensaio de transferência e poder-molhante. Aplicação do peso sobre a chapa de vidro ...	49
Figura 26 - Ensaio de transferência e poder molhante. Chapa e vidro após remoção do peso.....	49
Figura 27 - Ensaio de transferência e poder molhante - remoção do peso.....	50
Figura 28 - Ensaio de transferência - avaliação da quantificação de material transferido para o vidro	50

Figura 29 - Ensaio à flexão.....	51
Figura 30 - Ensaio à compressão	51
Figura 31 - Ensaio de Pull-off. Aplicação de ladrilhos cerâmicos	52
Figura 32 - Ensaio de Pull-off. Ladrilhos cerâmicos após retirar o peso	52
Figura 33 - Ensaio de Pull-off após envelhecimento por calor.....	52
Figura 34 - Ensaio de Pull-off após envelhecimento por imersão.....	52
Figura 35 - Massa volúmica fresca	55
Figura 36 - Tensão de aderência por Pull-off - resultados da primeira fase.....	62
Figura 37 - Aderência sem envelhecimento versus aderência com envelhecimento submerso - resultados da primeira fase	63
Figura 38 - Aderência aos 28 dias versus aderência com envelhecimento ao calor.....	64
Figura 39 - Tensão de aderência por Pull-off entre 7 e 28 dias - resultados da segunda fase	71
Figura 40 - Aderência após imersão 1ªfase versus aderência após imersão 2ªfase	72
Figura 41 - Tensão de aderência por Pull-off aos 28 dias sem envelhecimento após imersão em água - resultados da segunda fase.	74
Figura 42 - Tensão de aderência por Pull-off aos 28 dias, sem envelhecimento e após envelhecimento por calor - resultados da segunda fase	75

Índice de Tabelas

Tabela 1 - Características	34
Tabela 2 - Propriedades de aplicação - adaptado de – 1º parte.....	35
Tabela 3 - Especificações para cimentos-cola.....	36
Tabela 4 - Características CEM I 42,5 R.....	38
Tabela 5 - Composição de pasta (PO) e betão de origem (BO).....	39
Tabela 6 - Propriedades do CR.....	42
Tabela 7 - Aditivos utilizados.....	44
Tabela 8 - Composições consideradas (Traço ponderal relativo à massa de ligante).....	45
Tabela 9 - traço ponderal relativo à massa do ligante	45
Tabela 10 - Espalhamento, massa volúmica fresca e teor de vazios estimados.	54
Tabela 11 - Composições consideradas (por m ³).....	56
Tabela 12 - Tempo de início e fim de presa.....	57
Tabela 13 - Massa volúmica e resistência à compressão e flexão de cimentos-cola.	58
Tabela 14 - Modo de rotura de provetes não sujeitos a envelhecimento (Média de área de rotura) ...	60
Tabela 15 - Tensão de aderência de provetes não sujeitos a envelhecimento (Média de tensão de aderência).....	60
Tabela 16 - Tensão de aderência e modo de rotura após imersão em água (valores médios de tensão de aderência e área de rotura).....	62
Tabela 17 - Tensão de aderência e modo de rotura após envelhecimento por calor (valores médios de tensão de aderência e área de rotura).....	64
Tabela 18 - Poder molhante e transferência valores médios % de área total transferida ao cerâmico	66
Tabela 19 - Tempo de início e fim de presa - fase 2.....	68
Tabela 20 - Modo de rotura de provetes não sujeitos a envelhecimento (valores médios de área de rotura - fase 2).....	69
Tabela 21 - Tensão de aderência de provetes não sujeitos a envelhecimento (valores médios de tensão de aderência – fase 2).....	69
Tabela 22 - Tensão de aderência e modo de rotura após imersão em água (alores médios de tensão de aderência e área de rotura - fase 2).....	72
Tabela 23 - Tensão de aderência e modo de rotura após envelhecimento por calor (valores médios de tensão de aderência e área de rotura - fase 2	74
Tabela 24 - Tendência de aderência.....	80

(página intencionalmente deixada em branco)

Lista de abreviaturas e símbolos

Abreviaturas

AF-S	Rotura adesiva entre cola e o suporte
AF-T	Rotura adesiva entre ladrilho e a cola
AP	Acelerador de presa.
AR	Areia reciclada.
AN	Areia normal.
BO	Betão de origem.
CC	Cimento cola.
CR	Cimento reciclado.
CPN	Cimento normal
CPNAN	Cimento Portland normal com areia normal.
CPNAR	Cimento Portland normal com areia reciclada
CRAN	Cimento reciclado com areia normal
CRAR	Cimento reciclado com areia reciclada
50CRAR	Cimento Portland normal com cimento reciclado com areia reciclada
50FCAN	Cimento Portland normal com filer calcário e com areia normal.
50CRFLAR	Cimento reciclado com filer calcário e areia reciclada
CRARgel	Cimento reciclado com areia reciclada incorporada com água gelada
CF- A	Rotura coesiva na cola
CF-T	Rotura coesiva no ladrilho
CF-S	Rotura coesiva no suporte
EC	Éter de celulose.
EA	Éter de amido.
FC	Filer calcário.
FCT	Fundação para a ciência e tecnologia.
GEE	Gases de efeito de estufa
GEOLAB	Laboratório de Geociências e Geoecologias
PO	Pasta de origem
RCD	Resíduos provenientes de construção e demolição
RDP	Resina.

Compostos químicos

C_3S	Silicato tricálcico.
C_2S	Silicato Bicálcico
C_3A	Aluminato tricálcico.
C_4AF	Alumino ferrato tetra cálcico
$CaCl_2$	Cloreto de cálcio
$CaCO_3$	Carbonato de cálcio.
CO_2	Dióxido de carbono.

Simbologia

F_c	Força média de rotura à compressão
F_t	Média das cargas de compressão máxima aplicada
A	Área da secção comprimida
f_{cm}	Tensão média de rotura à compressão

Unidades

MPa	Megapascal.
N	Newton
mm	Milímetros
°C	Graus Celcius
min	Minuto
h	Hora
kg	Quilograma
g	Grama
s	Segundo
μm	Micrómetro
m	Metro
cm	Centímetro

Introdução

1.1 Enquadramento e motivação

A indústria cimenteira é uma das maiores a nível mundial, tendo uma ampla cadeia de valor associada. A influência desta indústria faz-se sentir em muitos setores exteriores à mesma, criando uma variedade de operações que acabam por se traduzir num impacto ambiental considerável, devido ao consumo de recursos e à emissão de gases poluentes.

Em 2020, foram produzidos 14 bilhões de m³ de betão que levou ao consumo de 4.2 bilhões de toneladas de cimento, sendo 40% deste para o mercado residencial (Hu 2019). São por isso materiais associados a elevado consumo de recursos naturais e elevada libertação de gases de efeito estufa, essencialmente relacionado com a produção do cimento. Estima-se que a indústria cimenteira seja responsável por cerca de 7% do total de emissões antropogénicas em todo o mundo (Kaliyavaradhan and Ling 2017; Mazurana et al. 2022), libertando aproximadamente 800 kg de CO₂ por tonelada de clínquer produzido (Kaliyavaradhan and Ling 2017).

O elevado impacto ambiental do cimento esbarra com as severas exigências ambientais da comissão europeia, que visam a neutralidade carbónica em 2050, bem como o crescimento económico dissociado do uso de recursos (European Deal 2019). Desse modo, a indústria do cimento tem definido como prioridade reduzir fortemente a sua pegada ambiental. De acordo com o Roteiro nacional para a descarbonização da indústria cimenteira (European Deal 2019), várias estratégias devem ser implementadas de modo a permitir uma redução global de emissões de CO₂ de 75% em 2050 face a 1990. Uma das principais alavancas para a redução do impacto ambiental do cimento, enquanto não são economicamente e tecnicamente viáveis os sistemas de captura e uso de carbono (CCS/CCU), consiste na redução do rácio de clínquer ou na utilização de cimentos alternativos de baixo carbono (Carriço et al. 2020). Neste contexto, no Departamento de Engenharia Civil do Instituto Superior Técnico (IST) tem sido desenvolvida uma linha de investigação que visa a produção de cimento reciclado (CR), termoativado a partir de resíduos de betão endurecido, e a sua incorporação em materiais de base cimentícia. No âmbito do projeto em curso, EcoHydb (financiado pela fundação para a ciência e tecnologia, FCT), no qual se integra o presente trabalho, têm sido realizados vários estudos que exploram a otimização da produção e caracterização do CR, visando a sua aplicação no desenvolvimento de produtos mais ecológicos e de maior sustentabilidade.

O estado atual do conhecimento nesta área é ainda escasso em face da juventude do tema. A maioria dos trabalhos publicados a nível internacional têm menos de 5-10 anos, estando-se ainda numa fase de desenvolvimento do CR e na compreensão dos fenómenos de hidratação e desenvolvimento das fases a ele associado (Carriço et al. 2020). A sua incorporação em materiais de base cimentícia tem-se cingido essencialmente à caracterização mecânica de pastas e argamassas, sendo escassos os estudos realizados ao nível do desenvolvimento de outros produtos da construção (Bogas et al. 2021). Assim, numa nova etapa que dá seguimento ao trabalho que tem sido realizado no âmbito do projeto EcoHydb, pretende-se explorar a utilização de RC em produtos mais ecológicos que possam ser comercializáveis e aumentem a competitividade das empresas ligadas ao sector da construção.

1.2 Objetivo e metodologia

O presente trabalho, tem como principal objetivo analisar a viabilidade da utilização de cimento reciclado (CR) e areia reciclada (AR) na produção de um novo tipo de cimento-cola (CC), procurando-se desta forma criar e desenvolver um produto de construção mais ecológico. Pretende-se que este novo produto seja comercializável, constituindo-se uma alternativa tecnicamente e economicamente viável aos CC atualmente existentes no mercado.

Baseado numa forte componente experimental, o trabalho consistiu no desenvolvimento e caracterização de cimentos-cola produzidos com substituição total a parcial de cimento normal por CR, bem como de areia natural por AR. Este trabalho foi realizado em colaboração com a empresa Weber, tendo-se realizado parte do programa experimental nas suas instalações e parte no laboratório de construção do IST.

Numa primeira fase do trabalho procedeu-se à produção do cimento reciclado, tendo por base a metodologia definida em outros trabalhos realizados no âmbito do projeto EcoHydb. Inicialmente produziu-se uma pasta de origem em laboratório, que após vários dias de idade pudesse ser representativa da matriz cimentícia hidratada encontrada em detritos de betão resultantes da atividade de construção e demolição. Em seguida, após moagem e Termoativação dos resíduos de pasta, procedeu-se à produção do CR. Em simultâneo, tendo em consideração um método de separação desenvolvido e patenteado no âmbito do projeto EcoHydb, foi considerada a utilização de areia reciclada obtida a partir de detritos de betão. O betão de origem e a areia reciclada de melhor qualidade foram produzidos no âmbito do trabalho de mestrado de (Hu 2019).

Numa segunda fase do trabalho, foram realizados estudos de composição visando a produção de cimentos-cola com 100% CR ou 50% CR e 50% cimento normal (de agora em diante designado por CPN), bem como a incorporação de AR. A utilização conjunta de CR e AR visa o objetivo ambicioso de desenvolver um produto 100% reciclável, seguindo-se uma filosofia circular, conforme o esquema da Figura 1.

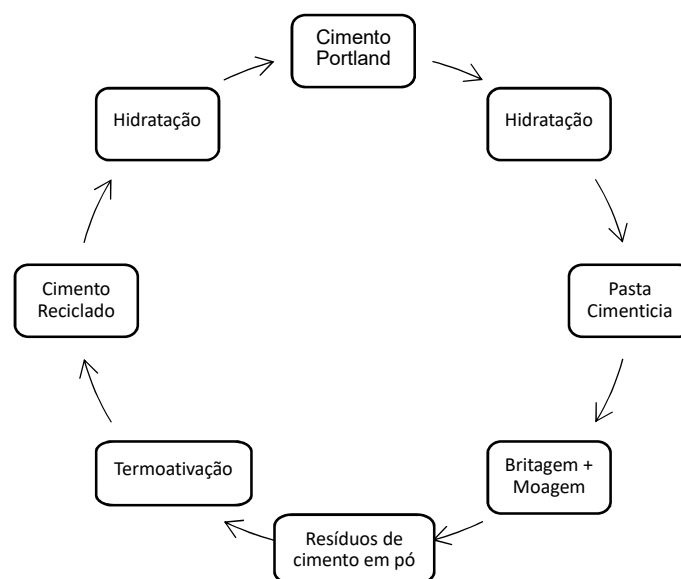


Figura 1 – Esquema representativo do ciclo de obtenção de cimento reciclado

Em paralelo foram produzidos cimentos-cola de referência com apenas CPN e/ou areia natural (AN), ou com incorporação parcial de filer calcário, de modo a avaliar a contribuição do CR no desenvolvimento das propriedades físicas e mecânicas dos CC. As composições de referência foram definidas tendo em consideração a experiência prévia da empresa Weber. Os CC foram caracterizados no estado fresco (espalhamento, tempo de presa, transferência, poder molhante e exigência de água) e no estado endurecido (resistência mecânica, aderência em condições normais, após imersão e após envelhecimento por ação do calor).

1.3 Estrutura da dissertação

A presente dissertação de mestrado foi organizada em 5 capítulos, para além das referências bibliográficas e dois anexos apresentados no final.

No capítulo 1 apresenta-se o enquadramento geral do tema e os principais objetivos do trabalho, indicando-se a metodologia seguida para os concretizar.

O capítulo 2 é dedicado a alguns aspetos do estado da arte relevantes para o tema. Inicialmente aborda-se a importância da redução do impacto ambiental na construção e, em particular, na indústria dos materiais de base cimentícia, sugerindo-se estratégias para a sua mitigação. Posteriormente, abordam-se alguns dos últimos avanços atingidos ao nível do cimento reciclado e da valorização dos resíduos de construção e demolição, referindo-se também obstáculos à sua implementação. Finalmente, apresenta-se um breve enquadramento dos cimentos-cola, com revisão dos requisitos funcionais, composição e função dos principais constituintes, caracterização e normalização.

No capítulo 3 é descrita a campanha experimental, com referência aos materiais utilizados e aos procedimentos adotados para a produção e caracterização do CR, areia reciclada e cimentos-cola. Inicialmente, descreve-se a produção da pasta de origem, moagem e Termoativação dos resíduos de pasta para obtenção do cimento reciclado e o procedimento adotado para a obtenção da areia reciclada. Posteriormente, são definidas as composições adotadas para os cimentos-cola bem como o procedimento seguido para a sua produção. Finalmente, é apresentada a descrição das metodologias de ensaio consideradas na caracterização dos cimentos-cola no estado fresco e endurecido.

No capítulo 4 são apresentados e discutidos os resultados obtidos no programa experimental. Neste capítulo é analisada a influência da incorporação de CR e areia reciclada no desempenho dos cimentos-cola no estado fresco e endurecido. Esta avaliação tem em consideração alguns dos principais requisitos exigidos aos cimentos-cola.

No capítulo 5 resumem-se as principais conclusões obtidas no trabalho e são sugeridas possíveis propostas para a realização de desenvolvimentos futuros.

Finalmente, nos anexos é apresentado os resultados obtidos dos ensaios à compressão, flexão, aderência sem envelhecimento 1ª fase, aderência com envelhecimento após imersão e calor 1º e 2º fases.

(página intencionalmente deixada em branco)

2. Revisão da literatura

No presente capítulo apresenta-se uma breve revisão do estado da arte, com enquadramento do tema e referência a alguns dos principais avanços atingidos no desenvolvimento dos cimentos reciclados, bem como uma abordagem geral relativa à produção, caracterização, normalização e aplicação dos cimentos-cola na construção.

2.1 O impacto ambiental na construção

O desenvolvimento sustentável procura satisfazer as necessidades do presente sem comprometer a capacidade de as gerações futuras satisfazerem as suas necessidades. Atualmente, as excessivas emissões de gases com efeito de estufa (GEE) e o consumo desmesurado de matérias-primas ultrapassam a capacidade regenerativa anual da natureza. Em 2021, no 209º dia do ano, esta sobrecarga foi novamente atingida (Lin et al. 2021)

Estima-se que estejam a ser utilizados mais de 74% dos recursos que o planeta pode oferecer por ano. Este é um dos motivos que tem justificado a aceleração do aquecimento global desde a década de 70 (RNC2050. 2018), conforme indicado na Figura 2.

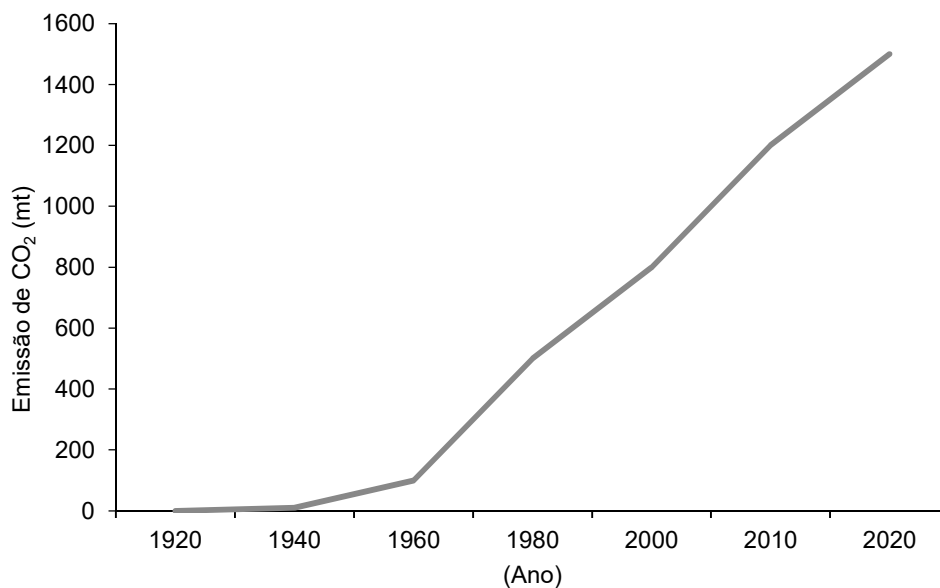


Figura 2 - Emissões globais de CO₂ de 1920 a 2020

Uma das indústrias que mais contribui para o problema do aquecimento global é a indústria da construção. De facto, este sector enfrenta três grandes desafios ambientais: a emissão elevada de gases de estufa, significando até cerca de 12% das emissões globais; o consumo excessivo de recursos naturais, envolvendo cerca de 50% dos materiais extraídos; a geração significativa de resíduos de construção e demolição (RCD), correspondendo a mais de 35% dos resíduos sólidos totais (Wang et al. 2021).

Em resultado deste elevado impacto ambiental, têm sido realizadas vários acordos e cimeiras internacionais com o objetivo de promover a reutilização/reciclagem e o desenvolvimento de matérias

de construção mais eco eficiente, contribuindo para uma economia circular de baixo carbono, competitiva e desprovida de recursos naturais (European Deal 2019). A redução das emissões de gases de estufa em 55% até 2030 e o atingimento da neutralidade carbónica em 2050, são objetivos bem definidos pelo (European Deal 2019). Em sintonia com esta estratégia, foi recentemente estabelecido um investimento gradual de dois milhões de euros para as várias empresas nacionais ligadas à indústria da construção se tornarem neutras em emissões de carbono até 2050. (RNC2015. 2018).

As matérias de base cimentícia, e em particular o betão, são os mais utilizados no mundo da construção, implicando a elevada extração de matérias-primas, grandes emissões de gases de efeito estufa, (GEE) e de geração de RCD. De entre os vários constituintes, o cimento é o principal responsável pela grande pegada ecológica dos materiais de base cimentícia. De facto, é reportado que a manufatura do cimento abrange mais de 80 % das emissões de CO₂ atribuídas à produção destes materiais (Tam et al. 2009). Por sua vez, este valor aumenta em mais cerca de 20 % em 2050, devido à crescente demanda de cimento (Tam et al. 2009), em especial nos países em desenvolvimento. Assim, a comunidade científica e a indústria do cimento têm-se concentrado na investigação e desenvolvimento de soluções alternativas ou que mitiguem o elevado impacto do cimento.

2.2 Mitigação da pegada de carbono dos materiais de base cimentícia

Em face do elevado impacto do cimento na pegada de carbono do betão, esta indústria tem definido estratégias para reduzir o nível de emissões de CO₂ (Biroi 2018), tecnologias de produção mais eficientes; combustíveis alternativos; redução da razão de clínquer/cimento ou ligantes alternativos; tecnologias de captura de carbono.

A captura de carbono é, muito provavelmente, a resposta mais promissora dentro das medidas referidas. No entanto, a sua utilização para ser viável tem de superar ainda vários desafios técnicos e económicos. A substituição parcial do clínquer é atualmente a via mais viável e aquela que efetivamente mais reduz o nível de emissões (Scrivener 2019). Em média, atualmente o nível de incorporação de adições minerais comuns, nomeadamente fíler, cinzas volantes e escórias ronda os 25% (Bogas 2021). Porém, o limite de incorporação máxima foi atingido, sendo necessário encontrar novas soluções. Por outro lado, as adições que resultam de indústrias muito poluentes, como as cinzas volantes e as escórias, vão deixar de estar disponíveis num futuro próximo (Scrivener 2019). A utilização de argila calcinada tem despertado cada vez mais interesse, em face da sua abundância, baixo custo e boa reatividade pozolânica. Incorporações de até 30-40% desta adição têm sido documentadas como viáveis (Scrivener 2019). Porém, dosagens superiores não são viáveis e a sua utilização também não resolve o problema ligado à necessidade de reutilizar e reincorporar os resíduos de construção em novos produtos. Neste sentido, nos últimos anos tem sido no departamento de engenharia civil do IST um novo tipo de ligante reciclado a partir de pasta cimentícia endurecida, proveniente de betões antigos (Carriço et al. 2020).

2.3 Cimento reciclado como alternativa mais eco eficiente ao cimento normal

O cimento reciclado (CR) tem por objetivo recuperar as propriedades hidráulicas do cimento endurecido, recorrendo à sua Termoativação a baixas temperaturas, tipicamente entre 600-800°C (Carriço et al. 2020). Dado que a temperatura de queima é cerca de metade da utilizada na produção de clínquer e visto que neste processo é evitada a etapa de descarbonatação (processo onde se dá a separação do carbonato de cálcio em óxido de cálcio e dióxido de carbono) o cimento reciclado reduz potencialmente a redução de emissões de CO₂ em mais de 60% quando comparado com o cimento Portland normal (CPN) (Bogas 2021).

Este domínio de investigação teve início quando se percebeu a que o betão apresentava capacidade de reidratação após ser submetido à ação do fogo (Bogas et al 2019). Vários autores demonstraram que após a desidratação promovida pela exposição do betão a elevadas temperaturas, este era capaz de reagir novamente com a água e desenvolver novos produtos de hidratação (Carriço et al 2020).

Esta descoberta criou muito interesse dentro da comunidade científica porque revelou uma nova direção promissora para produzir cimento com baixa emissão de CO₂. Além disto, a produção deste cimento promove a recuperação dos resíduos de construção e demolição (RCD) e a redução do consumo de recursos naturais.

2.4 Avanços atingidos no cimento reciclado (temperaturas de processamento, propriedades, comportamento em pastas e argamassas)

Um primeiro estudo focado na recuperação das capacidades hidráulicas do betão após expostas as elevadas temperaturas mostrou que o cimento desidratado é capaz de desenvolver compostos anidros com características parecidas ao clínquer que lhe deu origem (Bogas et al. 2019).

A Termoativação procura explorar as diferentes transformações químicas que ocorrem nas fases de desidratação, desidroxilação (perda de iões hidróxidos) e descarbonatação. As primeiras duas fases são responsáveis pelo restabelecimento de novos compostos capazes de serem reidratáveis, sendo desejável que estas transformações assumam um volume importante. A fase de descarbonatação deve ser minimizada, quer pelo baixo teor de produtos carbonatáveis no cimento endurecido quer pelas baixas temperaturas de processamento (Carriço et al 2020).

A produção de cimento reciclado envolve essencialmente 3 etapas: a separação do cimento dos outros constituintes do betão; a cominuição dos resíduos de cimento para dimensão similar à do CPN; Termoativação e obtenção do cimento reciclado (Bogas et al. 2021). A separação efetiva do cimento dos restantes constituintes tem sido um obstáculo difícil de ultrapassar, não existindo ainda um método efetivo capaz de cumprir este objetivo. Recentemente, no IST foi desenvolvido e patenteado um novo método de separação, que permite obter frações de pasta com mais de 85% de pureza, em volume (Carriço et al. 2021). Este método tem a vantagem de permitir ainda obter agregados reciclados de melhor qualidade, visto que promove a remoção da pasta aderida no agregado natural. Como se sabe, a pasta aderida nos agregados reciclados vai contribuir para o aumento de porosidade e absorção dos mesmos, afetando negativamente o comportamento mecânico e de durabilidade dos betões com eles produzidos (B. Wang et al. 2021). Isso faz com que atualmente os agregados reciclados tenham sido

apenas considerados em betões de baixa qualidade ou em soluções de enchimento. Assim, pelos motivos referidos, é desejável encontrar um método efetivo que permita obter a individualização efetiva dos constituintes do betão. Nesse contexto, o método patenteado no IST permite produzir areias recicladas finas com até cerca de menos de 5% em peso de pasta aderida. A metodologia idealizada, baseada num processo de separação magnética de alta intensidade, distingue-se ainda de outros métodos correntes de maior impacto ambiental e económico, baseadas em separação mecânica, térmica ou gravítica (Bogas et al. 2021). Para além disso as metodologias existentes mostram ser pouco efetivas, estando associadas a elevados níveis de contaminação (Al-Bayati et al. 2016; Bogas et al. 2021).

Para que se consiga obter um cimento reciclado de qualidade, procura-se um grau de finura da mesma gama do CPN. Isto permite que o CR se torne mais reativo e que a sua estrutura seja menos porosa, com influência na sua exigência de água. Isto não é fácil de atingir em moinhos não industriais, logo para a maioria dos estudos realizados laboratório a dimensão máxima das partículas tende a ser superior a 150 µm (Bogas et al. 2021).

Em geral, a termoativação é realizada a uma taxa de 5-10 °C/min, seguido por um tempo de residência à temperatura máxima, e respetivo arrefecimento (Cariço et al. 2020). Vários estudos realizados nesta área têm procurado otimizar a temperatura máxima do tratamento e o tempo de residência. O tempo de residência é usualmente superior a 2-2,5 horas. A temperatura ideal para a termoativação varia muito entre autores, situando-se desde 500°C a 800°C (Bogas et al. 2021).

Shuit et al (2009) analisou pastas cimentícia submetidas a temperaturas de termoativação entre 300 e 900°C, com um incremento de temperatura de 10°C/min e um tempo de residência de 2h30min. O arrefecimento após a Termoativação foi lento, dentro do forno, até à temperatura ambiente. Os autores verificaram que o máximo de resistência à compressão aos 28 dias, de cerca de 60 % da obtida em CPN, foi atingida no CR termoativado a 800°C (Cariço et al. 2020; Shui et al. 2008). Verificou-se ainda que a exigência de água aumentou com a temperatura, exigindo a produção de pastas de maior a/c.

Mais recentemente, num estudo desenvolvido no IST, (Real et al. 2020) verificaram quem em pastas com CR tratadas a 400-900°C a máxima reatividade e resistência mecânica foi atingida para 650-700°C.

Em face da juventude deste domínio de investigação, os escassos trabalhos desenvolvidos envolvendo a incorporação de CR em materiais de base cimentícia tem-se cingido essencialmente à produção e caracterização mecânica de pastas (Bogas et al. 2020; Cariço et al. 2020; J. Wang et al. 2018; Zhang et al. 2018). A resistência é influenciada por vários fatores, tais como as características do betão de origem, a finura e estado de aglomeração do CR, temperatura de tratamento e teor de CR (Bogas et al. 2019; J. Wang et al. 2018; Zhang et al. 2018). Para diferentes relações água/ligante (a/l) e em função destes fatores, têm-se reportado resistências mecânicas em pastas com 100% CR entre cerca de 8 e 30 MPa, representando 20 a 80% da obtida em pastas de referência com CPN (Bogas et al. 2021). De salientar, o facto de se terem verificado variações pouco significativas de resistência para até 15% de incorporação de CR (Bogas et al. 2019; Cariço et al. 2020). Para além disso, no âmbito da investigação desenvolvida no projeto EcoHydb, no qual se enquadra o presente trabalho, foi possível produzir ligantes com substituição de CPN por 20, 50 e 100% CR, enquadráveis nas classes de resistência 52.5,

42.5 e 32.5 da EN 197-1, respetivamente (Carriço et al. 2020). Este projeto tem demonstrado a viabilidade de produzir cimento 100% reciclado associado a mais de 60% de redução nas emissões de CO₂ (Figura 3).



Figura 3 - CR obtido no âmbito do projeto EcoHydb (EcoHydb 2022)

Dois problemas com que se tem confrontado o CR relacionam-se com a sua elevada exigência de água e a influência da pré-hidratação e pré-carbonatação na sua eficiência. Para igual consistência, verificam-se exigências de água no CR que podem ser até 3 vezes superiores à do CPN, afetando de forma importante a utilização deste ligante (Real et al. 2020). Isso é atribuído à elevada área superficial, natureza porosa, alto teor de CaO livre e estado de aglomeração do CR (Carriço et al. 2020). Nestes termos, a utilização racional de adjuvantes de alta gama tem permitido contrariar este problema (Real et al. 2021). A pré-carbonatação durante o tratamento de resíduos, Termoativação e armazenamento reduz a quantidade de produtos anidros disponíveis para reidratar (Carriço et al. 2020).

2.5 A incorporação de cimento reciclado em novos produtos mais eco-eficientes.

O desenvolvimento de um novo processo de separação dos constituintes do betão, no âmbito do projeto EcoHydB, permitindo obter frações de pasta de cimento mais puras e agregados reciclados mais limpos, abriu portas ao desenvolvimento de uma nova geração de produtos de construção mais eco-eficientes. Esta filosofia vai de acordo com os objetivos do European Green Deal, no sentido de promover uma maior reutilização dos resíduos e uma maior circularidade dos materiais de construção (European Deal 2019).

Os primeiros resultados obtidos no domínio dos cimentos reciclados, conforme exposto em 2.4, tornam bastante otimista a sua utilização em materiais de base cimentícia, pelo menos como substituição parcial do CPN. Por outro lado, a possibilidade de se produzirem areias recicladas mais limpas, permite que seja possível atingir produtos de construção verdes, com elevados teores de incorporação de materiais reciclados. Desde logo se destaca o desenvolvimento de argamassas para assentamento ou para reboco, bem como cimentos-cola, onde estes produtos perfazem a sua composição. Estas indústrias têm se confrontado de forma séria com as novas metas de reutilização e emissões impostas pela comunidade europeia, procurando de forma ativa o desenvolvimento necessário de produtos mais verdes, que permitam manter as empresas deste sector competitivas no mercado. É neste contexto, que em colaboração com a empresa Weber, este trabalho visa o desenvolvimento inovador de novos cimentos-cola mais eco-eficientes, explorando a utilização de cimento e areia reciclada. Nas próximas

secções são abordadas os principais materiais constituintes, requisitos funcionais e normalização associada à produção de cimentos-cola, estabelecendo-se a base para o desenvolvimento do plano experimental apresentado no capítulo 3.

2.6 Argamassa cola

A argamassa-cola é um adesivo que tem como objetivo unir duas superfícies com características químicas diferentes, como por exemplo o assentamento de ladrilhos cerâmicos e pedras naturais em reboco. É um produto muito utilizado no mundo da construção e distingue-se do betão, principalmente pela diferença no tamanho dos seus agregados, apresentando um tamanho inferior. Esta é utilizada como adesivo, dado que não é tão resistente como o betão, e a sua necessidade de água é maior devido à dimensão dos seus agregados (Bayer e Lutz 2006; Flores-Colen e Brito 2015). Desta forma, grande parte das argamassas-cola apresentam algumas desvantagens como por exemplo, contração na secagem, baixa estabilidade estruturas, endurecimento entardecido e baixa resistência à compressão. Para que seja possível ultrapassar estes problemas são adicionados polímeros e resinas, com o intuito de estabilizar as misturas. (Leuchs e Beth 2005). Existem diversos tipos de argamassas-cola, sendo que a escolha do uso de cada uma é feito em função das suas propriedades, do tipo de material a assentar e do suporte onde se irá aplicar. As argamassas podem assim ser classificadas pelos seguintes tipos: cimento-cola, adesivo em dispersão e cola reativa (Mendes 2017). O cimento-cola CC é uma mistura de ligantes hidráulicos, adjuvantes inorgânicos e água, sendo que água é apenas adicionada no momento da mistura. O CC é essencialmente utilizado na aplicação de cerâmicos tanto em ambientes exteriores como interiores.

Neste trabalho o tipo de argamassa-cola a ser estudada é o cimento-cola. Para isso é necessário conhecer os seus constituintes e comportamentos químicos, como será abordado de seguida.

2.7 Cimento-cola

O cimento-cola apresenta, geralmente, na sua composição ligantes minerais, agregados de pequena dimensão, polímero e adjuvantes. Abaixo apresenta-se os respetivos constituintes e as suas percentagens no cimento-cola (Bayer e Lutz 2006).

- Cimento Portland normal – 45%
- Areia de Sílica – 53,1 a 51,6%
- Pó Redispersível – 0 a 4%
- Éter de celulose – 0 a 4%
- Aditivos – 0 a 5%

2.7.1 Cimento

De acordo com a (NP EN 197-1 2012) o cimento define-se por “[...] ligante hidráulico, isto é, um material inorgânico finamente moído que, quando misturado com água, forma uma pasta que faz presa e endurece devido a reações e processos de hidratação e que, depois do endurecimento, conserva a sua resistência mecânica e estabilidade mesmo debaixo de água”.

Os cimentos têm diferentes constituintes que lhes conferem diferentes propriedades coesivas e adesivas através de reações químicas de hidratação. A hidratação ocorre quando se dá mistura do cimento com água.

Os principais compostos presentes no cimento são:

- C_3S – Silicato tricálcico
- C_2S – silicato Bicálcico
- C_3A – Aluminato tricálcico
- C_4AF – Alumino ferrato tetra cálcico

O cimento é utilizado no cimento-cola como ligante.

2.7.2 Agregados

Nos cimentos-cola, os agregados são adicionados para dar alguma estrutura, compacidade e estabilidade volumétrica. Estes podem ser classificados em grossos e/ou finos (areias). As areias provêm grande maioria das vezes da separação natural ou britagem das rochas. Estas podem agrupar-se em dois conjuntos:

- Areias siliciosas;
- Areias calcárias.

A (NP EN 12620 2003) estabelece a areia como o agregado de menor dimensão. A partícula de maior diâmetro, D , tem que ser ≤ 4 mm. O limite inferior é definido por 0,063 mm, sendo que é comum denominar-se partículas que passam no peneiro de 0,063 por “fíler” ou “finos”.

Na grande maioria dos cimentos-cola é utilizada a areia de quartzo (siliciosa), usando um intervalo granulométrico de 0,05 a 0,5 mm (Marios e Peter 2018).

2.7.3 Aditivos

Os aditivos são materiais orgânicos que podem ser adicionados numa percentagem máxima entre os 0,2 % e os 0,5 % de uma mistura. O objetivo dos mesmos é aprimorar a reologia das misturas no estado fresco e as suas propriedades no estado endurecido.

No caso do cimento-cola, os aditivos utilizados geralmente são:

- Retentores de água;
- Introdutores de ar;
- Resinas;
- Aceleradores de presa.

Estes só podem ser adicionados, sob a forma de pó, na mistura ainda seca. Caso seja adicionado mais do que um aditivo, estes devem ser compatíveis entre si.

Metilcelulose (éter de celulose)

O éter de celulose (EC) é um polímero linear de glicose que, desde os anos 60, tem como principal função reter água no CC durante um maior período de tempo. (Patural et al. 2011). Tem também a capacidade de aumentar a trabalhabilidade, adesão ao substrato e durabilidade. Este tipo de aditivo é geralmente utilizado na forma de pó. A retenção de água ocorre devido às forças de Van der Waals criadas entre a água e o éter de celulose, formando um gel. Isto leva a um aumento da viscosidade e do teor de ar. (Patural et al. 2011; Pichniarczyk e Niziurska 2015).

Porém, este incremento na viscosidade da água intersticial, em consequência da adição de Metilcelulose, aumenta a consistência do cimento-cola no estado fresco, criando uma maior necessidade de água para se conseguir obter a consistência pretendida. Esta adição melhora características como: a tensão de aderência, tempo aberto e resistência ao deslizamento. No entanto, pode levar a uma menor resistência à compressão e de tração do cimento devido à maior porosidade presente no mesmo. (Ma et al. 2012; Patural et al. 2011).

Polímero redispersível (resina)

Os polímeros redispersíveis, muitas vezes denominados por resinas – são ligantes orgânicos que ministram uma maior elasticidade aos cimentos-cola. Tal sucede, uma vez que na estrutura do cimento já hidratado os hidratos de cálcio encontram-se conectados por ligações (Van der Waals) fracas, o que leva a que se criem microfissuras. No entanto, ao adicionar este polímero cria-se um filme que se liga ao cimento e aos agregados, que permite a existência de maior elasticidade, capacidade de resistência e de aglutinação aos suportes e ladrilhos (Ana e Saldanha 2020; Mansur et al. 2009).

Esta incorporação de resina no cimento-cola, tem um segundo objetivo a absorção de tensões resultantes de variações de temperatura e/ou cargas intensas, através da sua capacidade de deformação, sem que exista redução de adesão. Este polímero procura também trazer uma maior coesão e impermeabilização (Ana e Saldanha 2020).

Éter de amido

Outro éter que se pode adicionar para além do éter de celulose é o éter de amido. Este polímero é constituído por amilopectina. No entanto, este só deve ser adicionado em dosagens menores, dentro do intervalo de 0,01 % a 0,05 % (Jiang et al. 2020).

O éter de amido tem como principal objetivo melhorar o estado fresco do cimento-cola, através da mudança das suas características reológicas. O éter tem como principais propriedades a capacidade de espessar a solução, criar estabilidade em soluções de cola e a capacidade para formar uma película. O que determina o comportamento do éter de amido na cimento-cola é o seu peso molecular e grau de esterificação, responsáveis por grande parte da trabalhabilidade e consistência. (Glatthor 2016; Jiang et al. 2020).

Existem dois tipos de éter de amido, tal como se pode ver na figura 4 abaixo, sendo que diferem apenas na sua capacidade espessante. O éter do tipo 1 favorece a floculação até determinada concentração, depois dessa concentração ultrapassada faz o efeito contrário. Este fenómeno de floculação deve-se

às forças atrativas entre partículas, enquanto a desfloculação deve-se à predominância de forças repulsivas entre particular. O éter do tipo 2 favorece a floculação quanto maior for a sua concentração (Glatthor 2016).

Sendo assim, o éter de amido do tipo 2 tem uma baixa capacidade surfactante, dado que apresenta uma reduzida interação com a água e com o ar. É possível chegar à conclusão que, quando o polímero age como floculante, aumenta a viscosidade, diminui a aderência do cimento-cola ao substrato e apresenta baixa atividade surfactante. E quando age como desfloculante comporta-se como um plastificante, tornando a mistura mais fluida e com maior aderência (Marques 2020).

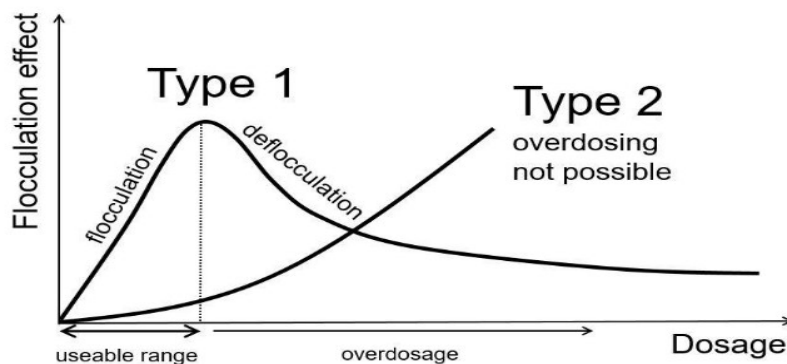


Figura 4 – Efeito floculante do éter de amido do tipo 1 e tipo 2 (adaptado de Glatthor 2016)

Sendo assim, a adição de éter de amido em baixas concentrações serve unicamente para melhorar a sua consistência, permitindo que o cerâmico não escorregue e não deslize quando aplicado em superfícies verticais. Isto porque, este usado em baixas taxas, age como floculante unindo as partículas do cimento.

Acelerador de presa

Como o nome indica, o acelerador de presa é usado, habitualmente, para acelerar o processo de presa do cimento. Tal permite a diminuição dos tempos de cofragem na aplicação de pré-esforço e em descimbramento. Isto porque, em ambos os casos, esta utilização possibilita o avanço da obra ou produção de misturas mais rapidamente. É também comum o uso do mesmo para betonagens em tempo frio.

Na grande maioria das vezes, os aceleradores de presa são sais minerais, sendo que o composto mais empregue é o cloreto de cálcio (CaCl_2). Ao nível de argamassas industriais, a utilização de formato de cálcio é bastante comum por se tratar de um sal pouco higroscópico e com um grau de eficiência bastante aceitável.

Em argamassas e cimentos-cola o acelerador de presa é misturado a seco e na forma de pó. Este não tem apenas como objetivo acelerar a presa, mas também melhorar a força inicial. É usado, uma vez mais, devido ao seu efeito anticoagulante, para evitar a lenta reação das misturas em construções realizadas no inverno ou com elevadas concentrações de humidade (Henriques 2014).

Fíler calcário

O fíler calcário ou “pó de pedra” é todo o material inerte que pode ser usado para preencher a curva granulométrica de uma mistura, para tapar poros e que atravessa o peneiro de 0,063 mm de abertura. Este deve conter um teor de carbonato de cálcio (CaCO_3) $\geq 75\%$ e um teor de argila $\leq 1,2\%$. A argila tem uma significativa variação de volume quando em contacto com a água, algo que não é desejado (F.Birol 2018).

O efeito químico do fíler numa mistura é irrelevante, sendo que o seu principal objetivo é, como referido acima, preencher os poros vazios. Isto deve-se à necessidade de criar uma maior compacidade na mistura que por sua vez, se torna menos permeável e, como consequência, mais resistente à compressão.

O fíler também tem a capacidade de tornar a mistura mais viscosa, algo que é desejável num cimento-cola, pretendendo-se que o mesmo possua uma capacidade de transmissibilidade alta (Henriques 2014).

2.8 Requisitos funcionais dos cimentos-cola.

O cimento-cola deve cumprir vários requisitos funcionais, devido à sua usual utilização para a fixação de cerâmicos, em termos de aplicabilidade, aderência e resistência mecânica a diferentes idades. Entre estes requisitos apresenta-se a boa capacidade de retenção de água, longo tempo aberto, boa trabalhabilidade e durabilidade no ambiente onde irá ser aplicado (Phan 2013). Assim, são vários os fatores que podem afetar a aderência, como a quantidade e composição do cimento, o polímero utilizado, a forma de aplicação do cerâmico e a sua absorção de água e o a/c da mistura (Marques 2020).

Apresenta-se assim na tabela 1 e 2 e nas figuras 5 a 10 abaixo, um resumo das propriedades, padrões a serem considerados e algumas definições relevantes:

Tabela 1 - Características (EN 12004:2007+A1: 2012)

Propriedades de aplicação	Propriedades Finais	Padrões de Rotura
- Tempo de vida útil	- Tensão de aderência	- Rutura adesiva (AF-S ou AF-T)
- Tempo de repouso	- Deformabilidade	- Rutura coesiva na cola (CF-A)
- Tempo de vida	- Deformação transversal	- Rutura coesiva no suporte ou no ladrilho (CF-S ou CF-T)
- Tempo aberto		
- Poder molhante		
- Deslizamento		
- Tempo de ajustabilidade		

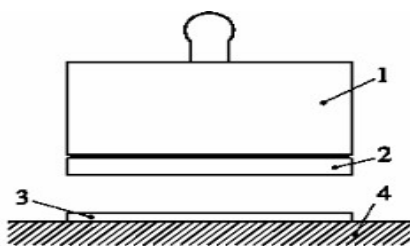


Figura 6 - Rotura adesiva entre ladrilho e a cola (AF-T)

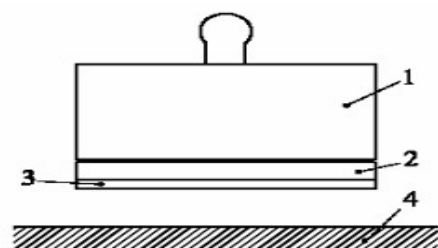


Figura 5 - Rotura adesiva entre cola e o suporte (AF-S)

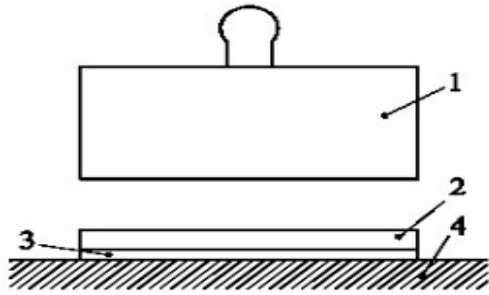


Figura 7 - Rotura adesiva entre ladrilho e peça de tração (BT)

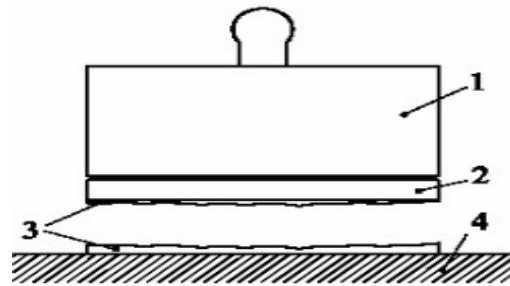


Figura 8 - Rotura coesiva na cola (CF-A)

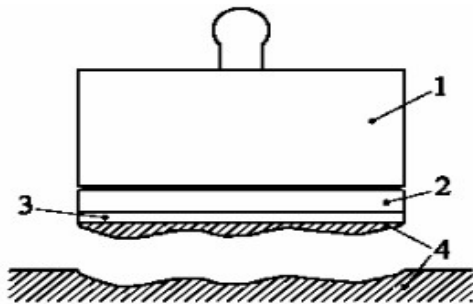


Figura 9 - Rotura coesiva no suporte (CF-S)

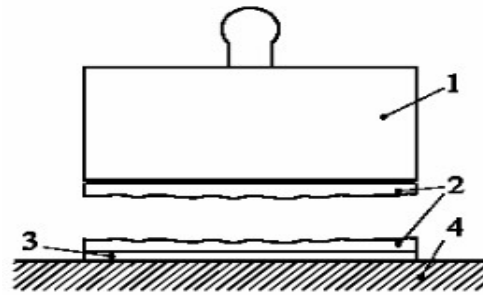


Figura 10 - Rotura coesiva no ladrilho (CF-T)

Tabela 2 - Propriedades de aplicação - adaptado de (Marques 2020) – 1ª parte

Propriedades de aplicação	Definição
Tempo de armazenamento	Duração que uma cola consegue ser armazenada, em condições predefinidas, mantendo as suas propriedades de aplicação.
Tempo de repouso	Tempo entre a preparação da cola e o momento em que deve ser aplicada.
Tempo de vida	Duração máxima em que a cola é utilizável depois da sua preparação.
Tempo aberto	Período em que o cerâmico pode ser aplicado na superfície da argamassa e obter a aderência adequada, ou seja, o tempo em que a superfície permanece “pegajosa” ao toque.
Poder molhante	Capacidade que uma camada de cola tem de molhar os substratos.
Deslizamento	Deslocação sobre uma superfície vertical de um ladrilho, aplicado sobre uma camada de cola.
Tempo de ajustabilidade	Período máximo durante o qual a posição de um ladrilho na camada de cola pode ser corrigida após colocação, sem perda significativa da aderência final.

Tabela 2 - Propriedades de aplicação - adaptado de (Marques 2020) – 2ª parte

Propriedades finais	Definição
Aderência	É medida com a aplicação de uma força de tração ou de corte, que correspondente à força máxima de rutura por unidade de superfície.
Deformabilidade	Capacidade da cola endurecida de deformar por tensões entre o ladrilho e a superfície de suporte, sem que ocorra a rutura da aderência.
Deformação transversal	Deflexão registada no centro da superfície da cimento-cola endurecido, quando é submetido a uma carga aplicada em três pontos. Pode ser utilizada para avaliar a deformabilidade da cola.

2.9 Normalização nos cimentos-cola.

É importante que os materiais de construção definidos na (NP EN 12004 2008) tenham em consideração as tensões normais devidas aos trabalhos a que estão destinados. Existem algumas características necessárias para certos produtos devido aos diferentes tipos de suportes e aos diferentes climas e ações agressivas dos climas. Os cimentos-cola de presa normal, rápida e opcionais são apresentados na tabela 3 abaixo.

Tabela 3 - Especificações para cimentos-cola adaptado de NP EN 12004 2008

Características Fundamentais		
Cimentos-Cola de presa normal		
Características	Requisito	Método de ensaio
Tensão de aderência inicial à tração	$\geq 0.5 \text{ N/mm}^2$	8.2 da EN 1348:2007
Tensão de aderência à tração após imersão em água	$\geq 0.5 \text{ N/mm}^2$	8.3 da EN 1348:2007
Tensão de aderência à tração após ação do calor	$\geq 0.5 \text{ N/mm}^2$	8.4 da EN 1348:2007
Tensão de aderência à tração após ciclos de gelo-degelo	$\geq 0.5 \text{ N/mm}^2$	8.5 da EN 1348:2007
Tempo aberto: tensão de aderência à tração	$\geq 0.5 \text{ N/mm}^2$	EN 1346
Cimentos-Cola de presa rápida		
Características	Requisito	Método de ensaio
Tensão de aderência rápida à tração	$\geq 0.5 \text{ N/mm}^2$ após não mais de 6h	8.2 da EN 1348:2007
Tempo aberto: tensão de aderência à tração	$\geq 0.5 \text{ N/mm}^2$ após não mais de 6h.	EN 1346

3. Campanha experimental

No presente capítulo apresenta-se a campanha experimental realizada no decurso do trabalho de mestrado, visando atingir os objetivos definidos no capítulo 1, nomeadamente a produção e caracterização de cimento-cola com incorporação de cimento reciclado (CR) e areia fina reciclada (AR).

Inicialmente, apresenta-se o resumo do estudo experimental realizado. Em seguida, procede-se à descrição das características dos materiais utilizados, produção do CR e AR, e da composição, mistura e produção dos provetes de cimento-cola. Por fim, descrevem-se os ensaios considerados na caracterização física e mecânica dos cimentos-cola.

3.1 Descrição da campanha experimental

A campanha experimental foi definida tendo por objetivo a fabricação de cimentos-cola de maior eco-eficiência, produzidos com incorporação de CR e AR. A utilização destes dois produtos permite visar a obtenção, pela primeira vez, de um cimento-cola praticamente todo reciclado. O trabalho foi essencialmente desenvolvido em 4 fases, definidas em seguida.

Numa primeira fase foram produzidos provetes de betão e de pasta de cimento, com a/c de 0,55, que serviram de base à obtenção do cimento e da areia reciclada. Estes provetes foram curados durante cerca de 5 meses de modo a serem representativos de betões bem hidratados, usualmente encontrados nos resíduos de construção e demolição (RCD). A produção de pastas de origem (PO), para além dos betões (BO), visou a obtenção de um produto descontaminado, o que facilita a análise da influência do CR nas propriedades dos cimentos-cola. Para além disso, permite obter um maior rendimento de material em curto tempo, visto que a obtenção de CR a partir de betão exige uma etapa prévia e morosa de separação do betão.

Numa segunda fase os provetes de betão e de pasta foram sujeitos a várias etapas de moagem até se atingir uma granulometria similar à do cimento Portland (CPN). O material proveniente do betão moído foi posteriormente sujeito a um método de separação patenteado no IST (Carriço et al. 2020), de modo a se obter CR e AR. O material proveniente das pastas foi diretamente conduzido para a Termoativação. Finalmente, a fração de pasta obtida de cada um destes processos foi tratada termicamente em forno rotativo, obtendo-se o CR.

A terceira fase envolveu o fabrico dos cimentos-cola a partir do CR, considerando-se a incorporação de 50% ou 100% de CR em substituição de CPN. Adicionalmente foram ainda consideradas misturas de referência com 100% CPN e com 50% CPN e 50% filer calcário (FC). Desse modo, consideraram-se as seguintes misturas:

- CPNAN- 100% CPN + 100% areia normal (AN) – composição de referência;
- CPNAR - 100% CPN + 100% AR;
- CRAN - 100% CR + 100% AN;
- CRAR - 100% CR + 100% AR;
- 50CRAR - 50% CPN + 50% CR + 100% AR;
- 50CRFLAR - 50% CPN + 50% FC + 100% AR.

Finalmente, os vários provetes produzidos foram submetidos a diferentes ensaios de caracterização física e mecânica, nomeadamente massa volúmica e espalhamento no estado fresco, teor de ar, transferência e poder molhante, resistência mecânica (compressão e flexão) e aderência sob diferentes condições de envelhecimento. Nos próximos pontos descrevem-se as várias etapas referidas em maior pormenor.

3.2 Materiais utilizados

Nas próximas secções apresentam-se os materiais utilizados no trabalho, bem como as suas principais propriedades.

3.2.1 Cimento

O cimento utilizado neste trabalho para a produção dos provetes de pasta e betão a reciclar, bem como os provetes de cimento-cola, foi o cimento tipo I 42,5 provindo da Secil em Outão. As principais características químicas, físicas e mecânicas de acordo com ensaios realizados pelo fabricante sobre amostras colhidas do cimento fornecido, apresentam-se na Tabela 4.

Tabela 4 - Características CEM I 42,5 R

Parâmetros		Cimento I 42,5 R
Resíduo no peneiro 45 µm (%)		3,5
Superfície específica (cm ² /g)		4388
Resistência à compressão da argamassa de referência (MPa)	2 Dias	28,6
	7 Dias	40,6
	28 Dias	52,1
Índice de atividade (%)		-
Expansão (mm)		0,75
Perda de ignição (%)		3,64
SiO ₂ +Al ₂ O ₃ +Fe ₂ O ₃ (%)		18,49 + 4,95 + 3,61
CaO+MgO livre (%)		63,11 + 1,62
Massa Volúmica (kg/m ³)		0,60 + 0,80
Tempo de presa (min)	Início	130
	Fim	210

3.2.2 Cimento reciclado

O cimento reciclado utilizado no presente trabalho foi produzido a partir de pastas e betões de origem, de acordo com os procedimentos de moagem, separação e Termoativação referidos nos pontos seguintes.

3.2.2.1 Produção da pasta e betão de origem.

Tal como mencionado, foram inicialmente produzidos betões (BO) e pastas de origem (PO), de modo a serem posteriormente reciclados. A composição da PO e BO apresenta-se na Tabela 5, tendo sido produzidas com pastas de relação a/c de 0,55, de modo a serem representativas de betões correntes existentes.

Tabela 5 - Composição de pasta (PO) e betão de origem (BO)

Material de origem	a/l	M _{cimento} (kg/m ³)	V _{água} (L/m ³)	V _{agreg.grossos} (L/m ³)	V _{agreg.finos} (L/m ³)
BO	0.55	360	198	406	260
PO	0.55	1032	568	-	-

A PO foi produzida com o auxílio de recipientes estanques de 30 litros e uma misturadora elétrica de modo a garantir uma boa homogeneização do produto final. A mistura seguiu o seguinte procedimento: colocação de metade da água de mistura; adição da totalidade do cimento; mistura durante 4 minutos seguido de um período de repouso de 30 segundos; adição gradual da restante água e mistura durante mais 4 minutos. Foram moldados provetes de pasta com aproximadamente 30x15x15 cm, conforme ilustrado na Figura 2. Em seguida os provetes foram cobertos com uma película plástica até serem desmoldados, após 24 horas. Finalmente, os provetes foram colocados em câmara húmida, com humidade relativa (HR) superior a 95 %, durante 7 dias e curados ao ar até à idade de moagem, superior a 150 dias. Em paralelo foram moldados provetes cúbicos de pasta de modo a avaliar a sua resistência à compressão. Estes foram mantidos em câmara húmida até à idade de ensaio.

O BO foi produzido no âmbito de um trabalho realizado em paralelo, como se pode ver nas Figuras 11 e 12 apresentadas abaixo, também inserido nos objetivos do projeto EcoHydB, tendo-se adotado um procedimento semelhante. A resistência aos 28 dias obtida nos provetes de PO e BO foi de 41 MPa e 46 MPa, respetivamente (Filipe 2021).



Figura 11 - Moldes para betão



Figura 12 - Moldes preenchidos

3.2.2.2 Britagem, moagem e crivagem do PO e BO

O CPN apresenta usualmente uma superfície específica de pelo menos 350 a 380 m²/kg, em que grande parte das partículas exibe dimensões abaixo de 50 µm. Desse modo, os provetes de PO foram sujeitos a várias etapas de britagem e moagem de modo a atingirem granulometria fina. Esse trabalho foi essencialmente realizado no Laboratório de Geociências e Geoecologias (GEOLAB) do IST.

Numa primeira, os vários provetes foram britados numa britadeira de maxilas com abertura na base de cerca de 2 cm (Figura 13). Esta fase de moagem foi realizada no laboratório de Engenharia Civil, obtendo-se materiais granulares de dimensão máxima de 70 mm.



Figura 13 - Britadeira de maxilas

Posteriormente, já no GEOLAB, o material foi adicionalmente moído numa britadeira de maxilas de menor dimensão, seguido de moagem em moinho de rolos. De acordo com este procedimento, o material foi reduzido a uma dimensão inferior a cerca de 5 mm (Figura 14;15).



Figura 14 - Britadeira pequena de maxilas - GEOLAB



Figura 15 - Moinho de rolos - GEOLAB

No caso dos provetes de betão, a moagem no moinho de rolos foi repetida até que grande parte do material se apresentasse com granulometria inferior a 1 mm. Essa dimensão teve de ser garantida de modo que fosse aplicado o método de separação abordado em 3.2.3. Para tal, à saída do moinho de rolos, o material foi peneirado através de peneiros com malha de 1 mm.

Após a primeira fase de moagem, e o procedimento de separação de acordo com 3.2.3 (no caso do BO), o material foi colocado num moinho de bolas de modo a atingir partículas de granulometria semelhante ao CPN (Figura 16). Para tal, foram utilizadas 525 bolas metálicas de aço de 20 a 30 mm), tendo-se submetido o material a 2 horas de moagem a 40 rpm, com auxílio de um agente de moagem. Antes da moagem, o material foi seco em forno horizontal (Figura 17), durante 3 horas a 110 °C, de modo a evitar a formação de grumos durante a moagem. Durante as várias etapas o material foi devidamente selado em sacos de plástico para evitar fenómenos de pré-carbonatação.



Figura 16 - Moinho de bolas - GEOLAB



Figura 17 - Forno horizontal

Ao contrário do que se pode atingir em ambiente industrial, o procedimento de moagem conduzido em laboratório permite apenas a obtenção de partículas de máxima dimensão ligeiramente acima de 250 μm . De modo a uniformizar o material obtido, este foi peneirado manualmente no peneiro de 500 μm a 250 μm , descartando-se todo o material de granulometria superior.

3.2.2.3 Termoativação

De modo a ativar o material moído, procedeu-se ao seu tratamento a elevada temperatura. Esse tratamento de Termoativação foi realizado com recurso ao forno rotativo presente no Laboratório do Departamento de Eng^a. Civil do IST (Figura 18), de acordo com a seguinte curva de queima: 10 °C por minuto até 150 °C; manter a 150 °C durante 1 hora; 10 °C por minuto até 650 °; manter a 150 °C durante 3 horas; arrefecimento dentro do forno até próximo da temperatura ambiente (cerca de 12 horas). O procedimento adotado seguiu o utilizado em outros trabalhos realizados no âmbito do EcoHydb (Real et al. 2020, 2021). O forno permite tratar cerca de 6 kg de cada vez, para uma rotação de 2 rpm. A utilização de forno rotativo permite uma melhor uniformização do tratamento por todas partículas.



Figura 18 - Forno rotativo para Termoativação do CR

Imediatamente após o processo de Termoativação o material foi colocado em sacos e selados de modo a reduzir o tempo em contacto com a humidade e com o ar, evitando-se fenómenos de pré-hidratação e pré-carbonatação excessiva.

Apesar de temperaturas mais elevadas permitirem uma maior taxa de eficácia da desidratação e por sua vez obterem uma maior capacidade reativa, estas iriam conduzir a um maior consumo de energia e de produção de CO₂ devido à eventual descarbonatação dos agregados calcários. De referir ainda que a temperatura escolhida de Termoativação (650 °C) permite um bom compromisso entre a máxima capacidade de reidratação do CR e o impacto ambiental gerado por este processo, evitando-se elevados consumos de energia térmica e de emissões de CO₂.

3.2.2.4 Propriedades do Cimento reciclado

O cimento reciclado obtido foi caracterizado em termos das suas principais propriedades físicas e químicas. Exceto no que se refere ao ensaio de consistência normal e tempo de presa (ver 3.5.4), a caracterização física e química foi efetuada com auxílio da empresa Secil, sobre amostras recolhidas imediatamente após o procedimento de Termoativação e enviadas para o laboratório de betões desta empresa. É possível observar as características do CR na tabela 6 abaixo.

Tabela 6 - Propriedades do CR

Parâmetro	Procedimento	CR
Massa volúmica absoluta (g/cm ³)	Picnómetro de hélio	3.005
SiO ₂ +Al ₂ O ₃ +Fe ₂ O ₃ (%)	EN 196-2	19.14+5.13+3.0
CaO+MgO (%)	EN 196-2	60.79+1.77
CaO livre (%)	EN 451-1	13.94
Consistência normal (w/b)	EN 196-3	0.74
Tempo de presa (min)	Inicial	290
	Final	385

3.2.3 Separação dos constituintes do betão e obtenção de areia reciclada (AR)

Para a separação dos constituintes do betão foi seguido o processo de separação desenvolvido no IST, que se encontra protegido pela patente (WO 2021/173022, 2021). A descrição detalhada do processo seguido apresenta-se em (Hu 2019). O processo de separação foi realizado num âmbito de uma dissertação de mestrado desenvolvida em paralelo a este trabalho e também inserida nos objetivos do projeto EcoHydb. Deste processo resultou a obtenção de uma fração cimentícia com um grau de pureza de 74%, bem com um agregado fino melhorado com menos de 5% de pasta aderida, em peso. Para o presente trabalho apenas se considerou a AR resultante deste processo. A quantidade de pasta aderida na AR foi determinada com auxílio de ensaios de Termo gravimetria, conforme apresentado em (Hu 2019). A AR produzida apresentava dimensão máxima de 0.5 mm e a curva granulométrica indicada na Figura 19. A massa volúmica da AR foi estimada de acordo com a norma (EN 1097-6 2003), obtendo-se o valor de 2510 kg/m³. De acordo com a mesma norma, estimou-se 2.3% de absorção no agregado.

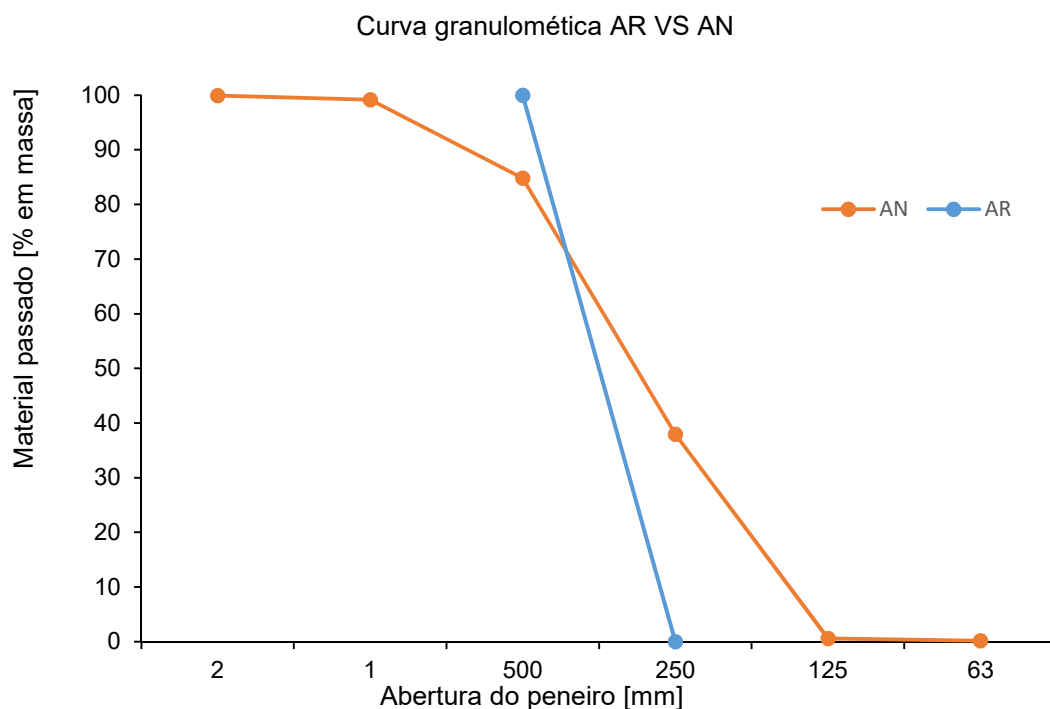


Figura 19 - Curva granulométrica da areia natural (AN) e da areia reciclada (AR)

3.2.4 Areia natural (AN)

Para os cimentos-cola de referência foi utilizada uma areia natural fina 0-1, usualmente utilizada em produtos comerciais desenvolvidos pela empresa Weber. Esta areia de massa volúmica de 2610 kg/m^3 apresentava a granulometria indicada também na Figura 9. Conforme se pode observar, a AN e a AR apresentam curvas granulométricas muito parecidas, facilitando a análise do desempenho relativo de cada um destes materiais. No entanto, importa salientar que, ao contrário da NA, a areia reciclada é formada por partículas britadas de geometria mais alongada, para além de estar associada a maior absorção, devido ao pequeno teor de pasta aderida.

3.2.5 Aditivos

Para a produção dos cimentos-cola foram utilizados diferentes aditivos com vista a melhorar a sua aplicabilidade e as suas características de aderência. Neste caso, foram utilizados dois retentores de água (éter de celulose, EC) (Ficha técnica - Aceh 2010), um promotor de aderência (resina RDP) (Ficha técnica - Compounds), um espessante promotor de coesão (éter de amido, EA) (Ficha técnica - Tylovis) e formiato de cálcio como acelerador de presa (AP) (Ficha técnica - Formiato de cálcio), como se pode visualizar na Tabela 7 presente abaixo:

Tabela 7 - Aditivos utilizados

Constituintes	Ficha técnica
ETC1	ETC1 de base hidroxietilmetilcelulose modificado, foi concebido para aplicações à base de cimento, tais como revestimentos de argamassas de reparação, adesivos à base de cimento para azulejos e as partes cimentícias de um sistema de isolamento e acabamento exterior (EIFS). Transmite propriedades bem equilibradas, incluindo tempo aberto, resistência ao escorregamento, aderência, boa resistência ao impacto e resistência ao cisalhamento, de acordo com diferentes condições de armazenamento. Esta também acrescenta uma boa trabalhabilidade e melhora a retenção de água. A distribuição granulométrica selecionada oferece uma dissolução rápida e sem grumos. É compatível com todos os aglomerantes minerais e orgânicos convencionais.
ETC2	ETC2 Oferece uma excelente retenção de água a baixas taxas de dosagem e confere viscosidade em aplicações à base de cimento, tais como fibrocimento, argamassas de leito fino e adesivos à base de cimento-cola. Transmite propriedades bem equilibradas, incluindo tempo aberto, aderência e resistência ao cisalhamento. Esta também acrescenta uma boa trabalhabilidade e melhora a retenção de água. A distribuição granulométrica selecionada proporciona uma dissolução rápida e sem grumos. É compatível com todos os aglomerantes minerais e orgânicos convencionais.
Resina, RDP	A RDP faz com que os compostos apresentem melhor aderência e resistência à coesão, resistência à flexão, resistência à abrasão e trabalhabilidade. Este contém aditivos minerais finos como agente anti bloqueante. Está isento de solventes, plastificantes e agentes formadores de filme.
Éter de amido, EA	O EA é compatível com todos os aditivos comuns de argamassa seca, por exemplo, agentes de arrastamento de ar, dispersantes e hidrofóbicos. Em adesivos que contêm doses mais elevadas de Metilcelulose, a viscosidade e a formação de pele podem ser reduzidas através da adição do mesmo.
Acelerador de presa, AP	AP é um aditivo funcional de formação de cálcio, que pode ser utilizado para acelerar a betonagem para cimento no Inverno. Para sistemas de mistura seca, pode acelerar a taxa de endurecimento do cimento e encurtar o tempo de coagulação para evitar a condensação do tempo a baixas temperaturas. Pode tornar o azulejo adesivo e assegura uma performance superior em toda a sua volta. Também prolonga o tempo de abertura, acelera o endurecimento e aumenta a faixa de aderência.

A principal função destes componentes no comportamento dos cimentos-cola foi abordada em 2.6. A sua utilização nos cimentos-cola foi otimizada tendo por base a experiência da empresa weber em trabalhos prévios, respeitando-se as formulações atualmente especificadas para produtos comerciais correntes. Em Anexo I apresenta-se a ficha técnica de cada um dos aditivos utilizados neste trabalho.

3.3 Formulação dos cimento-cola

Como abordado em 3.1, no presente trabalho foram analisados 7 tipos de cimento-cola, constituídos por CPN e/ou CR ou filer calcário (FC), areia natural (AN) ou reciclada (AR), e aditivos. Os diferentes tipos de cimento-cola (CC) foram definidos de modo a se estudar a influência separada do CR e do AN no seu comportamento. A consideração de FC, com massa volúmica de 2700 Kg/m³ teve por objetivo perceber melhor a eventual contribuição do CR como agente ativo, promotor de produtos extra de hidratação. A composição de referência foi definida para a mistura composta apenas por CPN e AN, tendo por base um cimento-cola comercial indicado pela empresa weber. As restantes composições foram afinadas a partir da composição de referência por ensaios tentativa-erro, tendo em conta a

diferente exigência de água dos seus constituintes, em especial do CR e da AR. Os vários cimentos-cola foram produzidos em 2 fases. Inicialmente procurou-se otimizar as misturas de modo a apresentar valores de espalhamento entre 145 e 155 mm, de acordo com o ensaio da (NP EN 1015-3 , 2006), em 3.5.1. Nas Tabelas 8 e 9 resumem-se as composições consideradas para os vários cimentos-cola produzidos durante a primeira fase. As composições encontram-se definidas em termos de traço ponderal (ligante: Cimento: CR: AN: AR; EC: RDP: EA: EA: AP: água), visto que a composição por m³ depende do teor de ar atingido nas misturas, que neste caso é elevado devido à incorporação de EC. Nesta fase os teores de EC, RDP, EA e AP face ao total de sólidos nas misturas, foram de 0,27%, 2,42%, 0,02% e 0,42%, respetivamente. Na primeira fase não foram consideradas misturas com FC.

Tabela 8 - Composições consideradas (Traço ponderal relativo à massa de ligante)

Materiais\ Cimento-cola	CPNAN	CPNAR	CRAN	CRAR	50CRAR
Ligante	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0
Cimento	1.0	1.0	-	-	0.5
CR	-	-	1.0	1.0	0.5
AN	2.30	-	2.30	-	-
AR	-	2.30	-	2.30	2.30
EC	0.0092	0.0092	0.0092	0.0092	0.0092
RDP	0.0825	0.0825	0.0825	0.0825	0.0825
EA	0.0007	0.0007	0.0007	0.0007	0.0007
AP	0.0165	0.0165	0.0165	0.0165	0.0165
Relação a/l	0.66	0.68	0.95	1.00	0.80

No entanto, visto que o ensaio de consistência não é adequado para avaliar o comportamento de cimentos-cola em termos de aplicabilidade e capacidade de aderência, foi adotado uma nova estratégia.

Tabela 9 - traço ponderal relativo à massa do ligante

Materiais\ Cimento-cola	CPNAN	CPNAR	CRAR	50CRAR	50FCAN	50CRFCAR
Ligante	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0
Cimento	1.0	1.0	-	0.5	0.5	-
CR	-	-	1.0	0.5	-	0.5
FC	-	-	-	-	0.5	0.5
AN	2.30	-	-	-	2.30	-
AR	-	2.30	2.30	2.30	-	2.30
EC	0.0089	0.0096	0.0102	0.0096	0.0089	0.0098
RDP	0.0825	0.0825	0.0825	0.0825	0.0825	0.0825
EA	0.0007	0.0007	0.0007	0.0007	0.0007	0.0007
AP	0.0165	0.0165	0.0165	0.0165	0.0165	0.0165
Relação a/l	0.68	0.74	1.20	0.93	0.75	1.05

Assim, numa segunda fase, as misturas foram ajustadas tendo em conta a realização de ensaios no estado fresco (transferência e poder molhante) de modo a apresentarem condições adequadas de aplicabilidade, bem como de aderência. Este processo foi bastante moroso, obrigando à realização de

várias misturas experimentais antes de se definirem as composições indicadas na Tabela 9. As misturas foram essencialmente corrigidas ao nível da relação a/l e teor de EC, que são parâmetros condicionantes na trabalhabilidade e aplicabilidade das misturas. A mistura CRAN não foi considerada na segunda fase, visto que a influência do agregado é contemplada nas misturas com CPN. Em contrapartida, foram consideradas duas misturas adicionais com 50%FC e 50%CPN (50FCAN) ou 50% CR (50CRFCAR). A segunda mistura face à primeira reflete a incorporação de material reciclado em substituição de CPN e AN.

3.4 Produção das argamassas de cimento-cola

As misturas foram produzidas numa misturadora com 2 litros de capacidade máxima (Figura 20), tendo por base o procedimento proposto na norma (NP EN 1348 2000):

- 1) Adicionar a água à cuba da misturadora;
- 2) Adicionar o ligante e a areia;
- 3) Misturar durante 30 segundos;
- 4) Retirar a cuba da misturadora e misturar com colher de pedreiro durante 1 minuto;
- 5) Misturar na misturadora mais 1 minuto;
- 6) Deixar repousar a mistura durante 45 segundos e voltar a misturar mais 15 segundos.



Figura 20 - Misturadora para produção de CC



Figura 21 - Camara húmida para condicionamentos dos provetes

Após a produção das misturas, as argamassas foram submetidas a vários ensaios no estado fresco, conforme descrito em 3.5. Para algumas das composições, CPNAN, CPNAR, CRAN, CRAR e 50CRAR foram produzidos provetes prismáticos de 160x40x40 mm, com vista à sua caracterização mecânica (compressão e flexão). Os provetes foram compactados em duas camadas de acordo com o indicado na norma (NP EN 196-1 2006) recorrendo a duas séries de 60 pancadas na mesa de compactação. Apenas para os primeiros 5 CC da Tabela 7 foi analisada a resistência mecânica. Estas misturas visam numa primeira análise avaliar a atividade do CR face ao CPN.

Após este procedimento, os moldes foram cobertos com uma película plástica e deixados no ambiente de laboratório durante 24 horas, antes da sua colocação em câmara húmida (Figura 21). Em seguida, os provetes permaneceram na câmara húmida até à data de ensaio. Para cada composição e idade de ensaio foram produzidos 3 prismas de modo a serem ensaiados aos 3, 7 e 28 dias.

3.5 Ensaio de argamassas de cimento-cola no estado fresco.

As argamassas de cimento-cola foram caracterizadas no estado fresco, em termos de massa volúmica, espalhamento, transferência e transmissibilidade. Adicionalmente, procedeu-se ainda à avaliação do tempo de presa diretamente sobre a componente ligante dos cimentos-cola.

3.5.1 Massa volúmica

A massa volúmica no estado fresco foi determinada de acordo com a norma (NP EN 1015-6, 2006), recorrendo a um recipiente cilíndrico de 1 litro (Figura 22). Depois de produzida a mistura, procedeu-se ao preenchimento do cilindro e à compactação da mesma em duas camadas. A compactação foi realizada através de 25 pancadas. A massa volúmica da mistura é dada pelo quociente entre a massa da amostra e o volume do recipiente.



Figura 22 - Determinação da massa volúmica no estado fresco



Figura 23 - Ensaio de espalhamento

3.5.2 Espalhamento.

O ensaio de espalhamento foi realizado de acordo com a norma (NP EN 1015-3 2006). Este ensaio tem como objetivo determinar a consistência da mistura no seu estado fresco, medindo-se a deformabilidade da amostra de cimento-cola quando este é sujeito à ação repetida de queda de uma mesa. No final do ensaio é registado o diâmetro médio de espalhamento, medido em 3 direções diferentes (Figura 23).

3.5.3 Consistência normal e tempo de presa.

O ensaio de consistência de pasta normal e tempo de presa foi realizado de acordo com a norma (NP EN 196-3, 2005). Este ensaio é pensado para ligantes, dando uma ideia da sua exigência de água e

da rapidez do desenvolvimento das primeiras reações que conduzem à sua perda de plasticidade. Em seguida, resumem-se os principais passos a seguir na determinação destas propriedades. De notar que o “tempo zero” é o tempo em que a pasta se encontra com a consistência normal.

Consistência normal:

1. Regular a agulha de Vicat de modo a ajustar o zero da escala com a altura da sonda que se encontra em contacto com a base;
2. Subir a sonda e encher o molde com a pasta deixando-a totalmente lisa;
3. Encostar a sonda à pasta e soltar a mesma aguardando até que estabilize;
4. Registrar a altura entre a base e a sonda. Para considerar a pasta de consistência normal a leitura da sonda deve situar-se no intervalo de 4 a 8 mm;
5. Se a altura for superior a 8 mm, aumentar a quantidade de água e repetir o ensaio.

Início de presa:

1. Imergir o molde de Vicat e a base num recipiente com água e posicionar no aparelho de Vicat;
2. Regular o aparelho de Vicat, ajustando o zero da escala com a agulha (de início de presa);
3. Baixar a agulha até à superfície da pasta e trancar a mesma;
4. Libertar a agulha e esperar até que estabilize;
5. Registrar a altura entre a agulha e a base. Registrar o tempo até atingir o “tempo zero”;
6. Repetir desde o passo 4 em diferentes zonas da pasta, obtendo-se diferentes leituras;
7. Quando a leitura estiver dentro do intervalo de 3 a 9 mm registar o “tempo zero” como sendo o tempo de início de presa.

Fim de presa:

1. Inverter o molde de Vicat e colocá-lo na base, submerso em água;
2. Substituir a agulha de início de presa pela de fim de presa;
3. Regular o aparelho ajustando a escala para o zero quando a agulha contacta com a base;
4. Repetir o processo do início de presa a partir do ponto 4 até que o valor registado seja menor que 0.5 mm. O tempo decorrido até esse valor corresponde ao fim de presa.

3.5.4 Transferência e poder molhante

Os ensaios de transferência e poder molhante foram realizados de acordo com um procedimento interno definido na empresa Weber, tendo por base a norma (EN 12004-2 2017) e (EN 1347 2006). Para tal recorre-se a uma placa de betão quadrada com cerca de 30 cm de lado e 5 cm de espessura. Inicialmente é espalhada uma primeira camada de cimento-cola, com o auxílio da parte lisa de uma talocha dentada, sobre a placa de betão. Após esta primeira camada, espalha-se uma segunda camada usando a parte dentada da talocha. Esta segunda camada é “penteada”, de modo a facilitar as condições posteriores de aderência (Figura 24).



Figura 24 – Preparação para ensaio de transferência e poder molhante: i) Placa de betão de base; ii) aplicação da primeira camada; iii) base para a segunda camada; iv) aplicação da segunda camada; v) Denteamento da segunda camada (de cima para baixo e da esquerda para a direita)

O ensaio de transferência e poder molhante foi medido após 5, 10, 20 e 30 minutos. Para tal, coloca-se uma chapa de vidro com 50x50 mm² sobre o cimento-cola, pressionando-a de seguida contra o suporte durante 30 segundos, através de um peso de 2 kg. Deve-se ter o cuidado de fazer coincidir todas as arestas do peso com as do vidro, de modo a uniformizar a carga (Figura 25).



Figura 25 - Ensaio de transferência e poder-molhante. Aplicação do peso sobre a chapa de vidro



Figura 26 - Ensaio de transferência e poder molhante. Chapa e vidro após remoção do peso.

Após 30 segundos, retira-se o peso (Figura 28) e procede-se à determinação do poder molhante (Figura 26). O poder molhante é determinado registando-se a percentagem de cimento-cola que fica em contacto com o vidro (observado por transparência). Em seguida, foi avaliado o poder de transferência, retirando-se a peça de vidro e avaliando a quantidade de produto que é transferido para o tardo do vidro (Figura 27 e 28). A quantidade de produto é medida em percentagem da área total de vidro.



Figura 27 - Ensaio de transferência e poder movente - remoção do peso



Figura 28 - Ensaio de transferência - avaliação da quantificação de material transferido para o vidro.

3.6 Caracterização mecânica das argamassas de cimento-cola.

A caracterização das argamassas no estado endurecido envolveu a realização de ensaios de resistência à flexão e compressão, bem como ensaios de aderência por pull-OFF, antes e após envelhecimento por calor e imersão.

3.6.1 Resistência à flexão.

A resistência à flexão foi determinada sobre provetes prismáticos de 160x40x40 mm³, de acordo com a norma (NP EN 1015-3 2006). Os provetes foram colocados sobre dois apoios cilíndricos, espaçados de 100 mm, aplicando-se depois uma carga pontual a meio vão do provete (Figura 29). O ensaio é realizado com uma velocidade de 0,1 KN/s até à rotura, registando-se o valor da carga máxima aplicada. A resistência é calculada de acordo com a equação 1.

$$f_t = 1,5 \times \frac{F_t \times l}{b \times d^2} \quad (1)$$

Em que:

f_t - Tensão de rotura à flexão [MPa];

F_t - Média das cargas máximas aplicadas à flexão [N];

l - Distância entre os apoios [100 mm];

b - Largura do prisma [40 mm];

d - Espessura do prisma [40 mm].



Figura 29 - Ensaio à flexão



Figura 30 - Ensaio à compressão

3.6.2 Resistência à compressão.

O ensaio de resistência à compressão foi realizado de acordo com a norma (NP EN 1015-3 , 2006), tendo por base as duas metades obtidas do ensaio de flexão em 3.6.1. Cada uma das metades é colocada sobre uma base de 40 mm de largura de modo a obter uma área de contacto de 40x40 mm² (Figura 30). Este ensaio é realizado para uma velocidade média na ordem de 0,4 kN/s, registando-se no final o valor da carga máxima aplicada. A resistência à compressão é calculada de acordo com a equação 2.

$$f_c = \frac{F_t}{A} \quad (2)$$

Em que:

f_c - Tensão de rotura à compressão [MPa];

F_t - Média das cargas de compressão máxima aplicada [N];

A - Área da secção comprimida [40x40 mm²].

3.6.3 Ensaio de aderência por pull-off

O ensaio de pull-OFF foi realizado de acordo com o indicado na norma (NP EN 1348, 2000). Inicialmente aplica-se uma camada fina de cimento-cola sobre uma lajeta quadrada de betão com 5 cm de espessura, através da parte lisa de uma talocha dentada. Em seguida aplica-se outra camada mais espessa e “penteá-la” com a parte dentada da talocha, apresentando entalhes com cerca de 6x6 mm. Durante a aplicação, a talocha deve ser mantida num ângulo de aproximadamente 60° face à lajeta.

Após 5 minutos de repouso, são aplicados ladrilhos com 50 x 50 mm² sobre o cimento-cola, aplicando-se em seguida uma força de 20 N durante 30 segundos (Figura 32). Esta força é realizada através de um peso de 2 kg, conforme realizado no ensaio de transferência em 3.6.2.



Figura 31 - Ensaio de Pull-off. Aplicação de ladrilhos cerâmicos

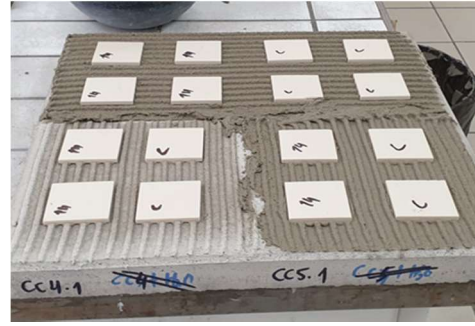


Figura 32 - Ensaio de Pull-off. Ladrilhos cerâmicos após retirar o peso

Aos 7, 14 e 28 dias são colados discos de metal sobre os provetes e é aplicada com um dispositivo uma força à tração de 250 N/s a velocidade constante até ocorrer a rotura.

3.6.4 Ensaio de aderência por pull-off após envelhecimento ao calor.

Nos ensaios de envelhecimento por calor, os provetes são sujeitos a um esquema de cura antes da realização dos ensaios de aderência (NP EN 1348 2000). Após colagem dos ladrilhos, os provetes são inicialmente condicionados em condições normalizadas, ao ar, durante 14 dias, seguido de cura em estufa ventilada durante 14 dias a 70 °C (Figura 33). Em seguida, colocam-se os discos metálicos e os provetes são condicionados mais 24 horas em condições normalizadas. Após este período de cura, procede-se à realização do ensaio de aderência, de acordo com o procedimento descrito em 3.6.3. A resistência à tração é determinada aplicando uma força de 250 N/s a velocidade constante até à rotura.



Figura 33 - Ensaio de Pull-off após envelhecimento por calor.



Figura 34 - Ensaio de Pull-off após envelhecimento por imersão.

3.6.5 Ensaio de aderência por pull-off após envelhecimento por imersão em água.

Nos ensaios de envelhecimento por imersão em água, os provetes são inicialmente curados ao ar durante 7 dias, seguido de 20 dias submersos em água a temperatura normalizada, 23 ± 2 °C (NP EN 1348 2000). Após serem enxaguados (Figura 34), aplicam-se os discos metálicos e após 7 horas são mergulhados novamente em água até ao dia seguinte. Finalmente, procede-se à realização do ensaio de aderência, de acordo com o procedimento descrito em 3.6.3. A resistência à tração é realizada aos 28 dias e é determinada aplicando uma força de 250 N/s a velocidade constante até à rotur

4. Apresentação e análise de resultados

Este capítulo tem como principal objetivo a apresentação e análise dos resultados obtidos durante a campanha experimental descrita no capítulo 3. O trabalho visou essencialmente a análise de viabilidade de se produzirem cimentos-cola mais eco eficientes, com incorporação separada ou simultânea de cimento reciclado (CR) e/ou areia reciclada (AR). Para tal, recordam-se as composições e as designações definidas no capítulo 3 e que serão alvo de análise no presente capítulo:

- CPNAN – 100% cimento normal + 100% areia normal
- CPNAR – 100% cimento normal + 100% areia reciclada
- CRAN – 100% cimento reciclado + 100% areia normal
- CRAR – 100% cimento reciclado + 100% areia reciclada
- 50CRAR – 50% cimento normal + 50% cimento reciclado + 100% areia reciclada
- 50FCAN – 50% cimento normal + 50% filler calcário + 100% areia normal
- 50CRFCAR – 50% cimento reciclado + 50% filler calcário + 100% areia reciclada

Tal com referido, a campanha experimental foi desenvolvida em duas fases, de modo a realizar uma otimização faseada dos vários tipos de cimentos-cola analisados. Assim, numa primeira fase, as misturas foram produzidas e caracterizadas tendo por base a mesma composição de referência, variando-se apenas a relação a/l de modo a apresentarem igual consistência. Numa segunda fase, procedeu-se à correção adicional da composição das misturas, de modo a apresentarem condições de aplicabilidade e aderência melhoradas. Para tal, procedeu-se igualmente ao ajuste dos teores de adjuvante, nomeadamente do éter de celulose (EC) e éter de amido (EA). Os resultados são apresentados e discutidos visando a análise da influência da incorporação inovadora de CR e AR no comportamento dos cimentos-cola.

4.1 Resultados obtidos na primeira fase – Cimentos-cola de idêntica consistência.

Tendo em consideração as composições bases indicadas em 3.1, foram produzidos diferentes tipos de cimentos-cola de idêntica consistência, 140 ± 5 mm, de modo a avaliar a influência dos seus constituintes em algumas das suas principais propriedades no estado fresco e endurecido.

Este ensaio, apesar de realizado, não é tradicionalmente usado para determinar a trabalhabilidade de uma argamassa-cola, que tende a ser muito impactada pelo éter de celulose e, como tal, pela introdução de ar no seu estado fresco, o que se demonstra claramente pela introdução de ar no estado fresco, o que se demonstra na Tabela 10. Isto significa que nem sempre um espalhamento maior implica uma argamassa mais fácil de trabalhar. No entanto, não deixa de ser um ensaio admissível para comparar reologias de diferentes pastas.

Nos próximos pontos discutem-se os resultados obtidos nesta primeira fase do trabalho experimental. Foram consideradas apenas as primeiras 5 composições indicadas acima, cujas composições apresentam-se em 3.5, nomeadamente a CPNAN, CPNAR, CRAN, CRAR e 50 CRAR. Estas misturas foram produzidas sem alteração do tipo e teor de aditivos entre elas.

4.1.1 Caracterização no estado fresco.

Na Tabela 10, apresentam-se os resultados obtidos para o espalhamento e massa volúmica fresca das misturas produzidas na primeira fase. Indica-se ainda a estimativa do volume de vazios, tendo em conta a proporção dos vários constituintes definidos na Tabela 4 em 3.3.

Tabela 10 - Espalhamento, massa volúmica fresca e teor de vazios estimados.

Composição	a/l	Espalhamento (mm)	Mv _{fresca} (kg/m ³)	Teor de vazios (%)
CPNAN	0,66	141	1419	31,5
CPNAR	0,68	139	1397	31,1
CRAN	0,95	145	1598	17,2
CRAR	1,00	135	1584	15,9
50CRAR	0,80	140	1415	28,1

Para as várias misturas, o espalhamento situou-se dentro da gama alvo de 140 ± 5 mm. Para tal, e visto que não se fez alterar o teor de aditivos, houve necessidade de corrigir a relação a/l, consoante a exigência de água das misturas.

A substituição de areia natural por areia reciclada conduziu a um ligeiro aumento da relação a/l (3%). Por um lado, apesar do método de separação permitir uma remoção significativa de pasta aderida, o teor estimado de cerca de 5% contribui para um ligeiro incremento da quantidade de água de mistura. Considerando 2.3% de absorção na AR (3.2.3), isso corresponde a variações de a/l na ordem de 0,05 (8%). Este nível de absorção é estimado para teores de saturação da pasta, devendo ser menor durante o curto período de mistura. Por outro lado, visto que a areia reciclada é obtida por um processo de britagem, a geometria das partículas (associada a maior área superficial) conduz a uma maior exigência de água do que a forma mais arredondada da areia natural.

Ainda assim, o teor de vazios foi semelhante nas misturas CPNAN e CPNAR, conduzindo a eficiências de compactação semelhantes. Isso sugere também que a maior relação a/l esteve essencialmente associada à água absorvida pelo agregado. Destaca-se o elevado teor de vazios obtidos nestas 2 misturas, bastante superior ao usualmente observado em argamassas correntes. Isso resulta de dois fatores: a utilização de éter de celulose (EC), que age como introdutor de ar (2.7), promovendo a formação de microbolhas espalhadas pela matriz do cimento-cola; a utilização de areia com dimensão máxima de 1 mm, conduzindo a maior volume de vazios acidentais (este fator assumindo menor contribuição).

A substituição de CPN por CR conduziu a um aumento significativo da razão a/l, de cerca de 44%. Este aumento resulta da elevada exigência de água do CR, conforme observado na Tabela 4, onde a quantidade de água para a produção de pasta de consistência normal foi cerca de 2,3 vezes superior à do CPN. A mesma tendência é reportada por vários autores na literatura (Carrigo et al. 2020; Shui et al. 2008; B. Wang et al. 2021), estando essencialmente associado à natureza porosa e à elevada área superficial do CR, bem como à presença de cal livre. Como se observa nas Tabelas 4 versus Tabela

6, a área superficial do CR é cerca de 3 vezes maior do que a do CPN. Este é sem dúvida um dos maiores obstáculos à utilização do CR.

No entanto, ao contrário do esperado, apesar dos cimentos-cola com CR terem sido produzidos com maior a/l e do CR possuir maior massa volúmica do que o CPN, a massa volúmica foi 13% superior à dos cimentos-cola com CPN (Figura 35). Tendo em consideração a dosagem dos seus constituintes, isso conduziu a um teor de vazios de apenas 17%, quase metade do obtido com o CPN. Estes resultados sugerem que a quantidade de ar gerado nas misturas com CR, resultante da adição de EC, terá sido menor. Uma razão para este fenómeno pode estar relacionado com a excessiva adsorção do EC nas partículas de CR, associadas a elevada área superficial, o que dificulta a sua ação surfactante em contacto com a água. Outro fator está relacionado com o excesso de calor de hidratação inicial desenvolvido pelo CR, o que pode colidir com o domínio de estabilidade do EC. A geração de elevado calor de hidratação inicial nos CR foi reportado por vários autores e resulta da elevada área superficial do CR, da sua menor barreira à dissolução/precipitação dos compostos hidratados e da presença de cal livre (Balduco et al. 2019; Carriço et al 2020; Shui et al. 2009).

A destabilização do EC com a temperatura depende das suas características e temperatura de utilização, existindo EC mais adequados para domínios de temperatura superiores, conforme abordado em 4.2.1. Independentemente do fenómeno associado, verifica-se que o CR foi quimicamente incompatível com o EC utilizado. Isso também contribui para a perda de trabalhabilidade e aumento de exigência de água destas misturas, pois a introdução de ar pelo EC melhora a sua reologia.

O desenvolvimento de um produto 100% reciclável, composto por apenas CR e AR, conduziu à maior exigência de água, tornando difícil atingir o espalhamento alvo para valores razoáveis de a/l. O aumento de a/l com a introdução adicional de AR foi semelhante ao verificado nas misturas de CPN. Mais uma vez, obteve-se massa volúmica mais elevada e menor teor de vazios do que na mistura de referência, confirmando a baixa eficiência do EC.

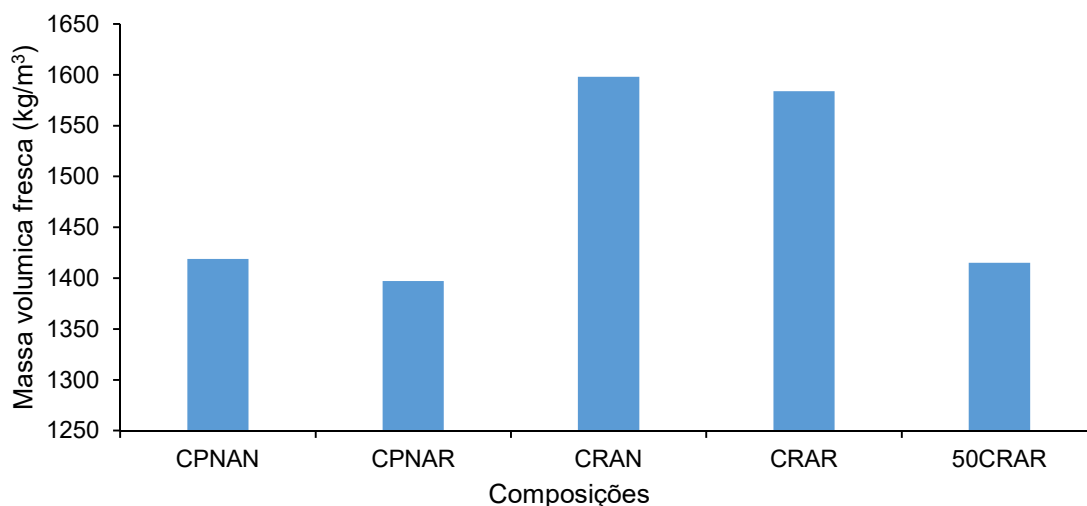


Figura 35 - Massa volúmica fresca

Finalmente, a substituição parcial de 50% CPN por igual teor de CR conduziu a um aumento da relação a/l inferior ao intermédio do obtido nas misturas CPNAR e CRAR. Esse aumento foi de apenas 17,6% face a CPNAR. Por outro lado, ao contrário do observado nos restantes cimentos-cola com CR, a

massa volúmica e o teor de vazios foram da ordem de grandeza do obtido na mistura de referência com apenas CPN. Isso indica que o EC terá funcionado e sido compatível com o ligante misto de CR e CPN nesta mistura. Neste caso, a quantidade de EC adsorvida ou o desenvolvimento de calor de hidratação não terá sido suficiente para desativar a função do EC, permitindo a geração e distribuição de microbolhas na matriz do cimento-cola. Essa introdução de ar contribui para o aumento de trabalhabilidade, aproximando mais a relação a/l da utilizada nos cimentos-cola de referência com CPN.

Importa referir, que apesar dos cimentos-cola produzidos apresentarem similar consistência, as suas características de aplicabilidade foram muito distintas. Isso resulta do ensaio de espalhamento permitir apenas relacionar-se com um dos parâmetros reológicos da mistura (tensão de escoamento) (Malhotra 1984), não traduzindo adequadamente a sua aptidão em termos de poder molhante, transferência e capacidade de aderência (2.7). Por outro lado, o ensaio de espalhamento realizado imediatamente após a mistura não tem em conta a perda de trabalhabilidade decorrente da absorção ao longo do tempo dos produtos porosos de CR e AR. Desse modo, na segunda fase deste trabalho procedeu-se à correção das misturas tendo estes fatores em consideração, o que promoveu uma maior diferença entre as várias misturas (4.2).

Tendo por base o conhecimento da massa volúmica fresca e a estimativa do volume de vazios, na Tabela 11 apresentam-se as composições por m³ obtidas para as várias composições estudadas nesta fase.

Tabela 11 - Composições consideradas (por m³)

Materiais\ Cimento-cola	CPNAN	CPNAR	CRAN	CRAR	50CRAR
Cimento (kg/m ³)	349	342	-	-	168
CR (kg/m ³)	-	-	367	360	168
FC (kg/m ³)	-	-	-	-	-
AN (kg/m ³)	802	-	843	-	-
AR (kg/m ³)	-	786	-	826	773
EC (kg/m ³)	3.2	3.2	3.4	3.3	3.1
RDP (kg/m ³)	29	28	30	30	28
EA (kg/m ³)	0.2	0.2	0.2	0.2	0.2
AP (kg/m ³)	5.8	5.6	6	5.9	6.0
Água (kg/m ³)	230	233	348	359	269
Relação a/l	0.66	0.68	0.95	1.00	0.80

4.1.2 Tempo de presa

Na Tabela 12 apresenta-se os valores dos tempos de presa medidos nos cimentos-cola, por tipo de ligante utilizado. Ao contrário do referido na norma (NP EN 196-3, 2005), os ensaios do tempo de presa foram diretamente realizados sobre as argamassas cola, incluindo a incorporação de areia. Isso significa que os ensaios não foram realizados para as condições de “pasta de consistência normal”, mas de forma mais realística caracterizando a presa do produto final, nas condições em que é aplicado.

Por este motivo, os ensaios não podem ser comparáveis com o de outros autores, visto que as areias afetam a penetração da agulha de Vicat.

Tabela 12 - Tempo de início e fim de presa

Mistura teste	a/l	Presa (h)	Observações
CPNAN	0,66	12 - 15	Endurece em toda a espessura
CPNAR	0,68	12 - 18	Endurece em toda a espessura
CRAR	0,95	>24	Endurece à superfície
50CRAR	0,80	>24	Endurece à superfície

Ainda assim, os resultados obtidos permitem uma análise comparativa do desempenho das diferentes misturas, até porque estas foram produzidas de modo a apresentarem idêntica consistência. Em geral, verifica-se que a incorporação de areia reciclada conduziu a um ligeiro aumento do tempo de fim de presa. Isso deverá resultar do aumento imposto na relação a/l, sabendo-se que o tempo de presa aumenta com este parâmetro (Li et al. 2009). Porém, as diferenças não terão grande significado, visto que como se referiu, pelo menos parte deste excesso de a/l é consumido na absorção do AR. O tempo de presa de CPNAN e CPNAR foi bastante superior ao caracterizado para o CPN utilizado neste trabalho (Tabela 4). Isso resulta essencialmente do facto dos cimentos-cola conterem EC e EA na sua composição, promovendo o retardamento do tempo de presa. De facto, o EC tende a estender o período de indução e a retardar o desenvolvimento de hidratação, devido à sua adsorção e bloqueio nos produtos de hidratação e não hidratados do cimento (Ou et al. 2012). Por sua vez, o EA vai agir como agente espessante e floculante, dificultando uma maior dispersão das partículas de cimento (Glatthor and Glatthor 2016b).

Nos cimentos-cola com incorporação de CR verifica-se um maior retardamento do tempo de presa, com o seu início a ser superior a 24 horas. Inclusivamente, constatou-se que após 24 horas a amostra apresentava comportamento heterogéneo ao longo da sua espessura, endurecendo na superfície, mas mantendo-se com características plásticas no núcleo. Em geral, vários estudos reportam menores tempos de presa para o CR do que para o CPN, sendo atribuído a diferentes fatores: presença de fases desidratadas de sulfoaluminatos; rápida polimerização de CSH; hidratação do CaO; elevada reatividade do CR de elevada área superficial (Balusco et al. 2017; Serpell e Lopez 2015; Shui et al. 2009; J. Wang et al. 2018). No entanto, outros autores, incluindo vários trabalhos realizados no nosso departamento (Bogas et al. 2019b; Bogas et al. 2020; Real et al. 2020; Vyšvařil et al. 2014), verificaram tendências contrárias, em que o CR esteve associado a períodos mais longos de presa. Isso foi atribuído a fenómenos de aglomeração do CR, maior dimensão das suas partículas devido à dificuldade de moagem, e a eventuais fenómenos de pré-hidratação e pré-carbonatação que reduzem a sua capacidade reativa. Tempos de presa 2 vezes superiores aos observados em pastas com CPN foram reportados por (Real et al. 2020). De acordo com (Serpell e Lopez 2015), há um fenómeno de falsa presa relacionado com a hidratação do CaO pode seguir-se um retardamento do tempo de presa. O mesmo foi observado por (Carriço et al. 2020). No presente trabalho constata-se uma clara tendência para o retardamento do tempo de presa com a incorporação de CR. Isso está de acordo com os ensaios de tempo de presa sobre pastas, realizados aquando da caracterização destes cimentos (Tabela 4

versus Tabela 6). Porém, outros fatores também contribuem para a tendência observada. Por um lado, o aumento da relação a/l devido à maior exigência de água do CR promove períodos de presa mais longos. Por outro lado, conforme discutido em 4.1.1, a adsorção de EC e EA tende a ser superior no CR, associado a maior área superficial, o que pode também contribuir para uma maior lentidão no processo de dissolução/precipitação dos produtos de hidratação.

Como referido, não se fez alterar o teor do acelerador de presa nas várias misturas. No entanto, este pode atuar de forma diferente consoante a composição da matriz cimentícia. De acordo com (Heikal 2004) o formiato de cálcio (AP) atua na aceleração do tempo de presa através da formação de sulfoaluminatos de cálcio hidratados (essencialmente ettringite) e acelerando também a hidratação de C3S e C2S. No primeiro caso, a sua efetivação depende do teor de aluminatos, taxa de dissolução do sulfato de cálcio e taxa de libertação de CH. Por sua vez, a precipitação de $\text{Ca}(\text{OH})_2$ e a decomposição do silicato de cálcio é acelerada na presença do formiato de cálcio (Heikal 2004). Refere-se a aceleração da dissolução dos iões hidróxido existentes na camada hidratada em volta das partículas de cimento (Wang et al. 2022). Porém, conforme observado por (Bogas et al. 2020) e Bogas et al. (2021), o CR apresenta um mecanismo de hidratação distinto, reidratando de forma rápida monosulfoaluminatos de cálcio de que se encontram desidratados no CR anidro após Termoativação. Nesse sentido, a eficiência do formiato de cálcio pode ser diferente. Para melhor compreensão do efeito deste aditivo no CR justifica-se a realização de investigações futuras que considerem a influência isolada deste fator no mecanismo de hidratação de pastas com CR, bem como outros tipos de aceleradores, como o carbonato de lítio, de modo a potenciar a reatividade das fases aluminato.

4.1.3 Resistência à flexão e compressão nos cimento-cola

Na Tabela 13 apresentam-se os resultados de resistência mecânica obtidos em provetes de argamassa produzidos e ensaiados de acordo com 3.6.1 e 3.6.2, respetivamente. Os ensaios foram realizados aos 7 e 28 dias de idade, obtendo-se coeficientes de variação aos 28 dias (CV_{28d}) inferiores a 5%. Na Tabela 10 apresentam-se ainda os valores de massa volúmica aos 28 dias, medido imediatamente após retirar os provetes da câmara húmida. O teor de vazios após compactação e endurecimento aos 28 dias (V_{v28d}), foi medido tendo em consideração a estimativa de massa de ligante por m^3 indicada na Tabela 9 e admitindo que a hidratação média do CPN e do CR correspondeu a 20% da massa de ligante. O volume de vazios é uma estimativa da porosidade total, sem incluir a água livre na mistura.

Tabela 13 - Massa volúmica e resistência à compressão e flexão de cimentos-cola.

Misturas	a/l	Mv _{28d} (kg/m ³)	Vv _{28d} (%)	Resistência à Compressão (MPa)			Resistência à Flexão (MPa)		
				7 dias	28 dias	CV _{28d}	7 dias	28 dias	CV _{28d}
				CPNAN	0,66	1536	49.3	2,3	4,3
CPNAR	0,68	1495	49.2	3,76	5,5	3%	1,62	2,22	3%
CRAN	0,95	1684	46.6	1,92	3,3	1%	0,43	1,47	5%
CRAR	1,00	1713	46.5	3,04	3,9	5%	1,40	1,77	3%
50CRAR	0,80	1654	50.0	3,09	4,2	5%	1,43	2,12	4%

Apesar da diferença na relação a/l, a resistência à compressão dos cimentos-cola com CPN foi pouco afetada pela substituição de AN por AR. Inclusive, verificou-se um ligeiro aumento da resistência à compressão na argamassa com AR. Para além da variabilidade do próprio ensaio, isso estará essencialmente relacionado com uma possível redução do a/l efetivo do CPNAR. De facto, apesar da relação a/l total ter sido superior em CPNAR, a a/l efetiva é semelhante a inferior (ver 4.1.1), visto que parte da água absorvida no agregado não participa na hidratação e aumento de porosidade da matriz.

As resistências mais baixas foram atingidas nas misturas com 100% CR, que está associada a maior a/l. De acordo com o observado por outros autores (Bogas et al. 2020; Wang et al. 2018), o CR tende a desenvolver maior resistência inicial, tipicamente até 3 dias, e menor resistência a longo prazo. Isso justifica-se pelo facto da maior área superficial do CR permitir o desenvolvimento mais rápido das reações, e pela natureza porosa do CR que absorve parte da água da mistura, reduzindo a relação a/l e a distância entre partículas (Bogas et al. 2020). No entanto, a longo prazo constata-se que o volume de produtos de hidratados tende a ser inferior no CR do que no CP, visto que parte dos produtos desenvolvem-se na região intrapartícula e dado que parte dos compostos anidros são inativados por eventuais fenómenos de pré-carbonatação (Real et al. 2020).

Em comparação com as misturas de referência com CPN, de facto, constata-se uma maior proximidade nas resistências aos 7 dias do que aos 28 dias. Embora não tenham sido realizados ensaios em idades inferiores a 7 dias, o maior atraso observado no desenvolvimento da hidratação do CR (4.1.2) pode ser responsável por um menor desempenho relativo dos CR face ao CPN, para os cimentos-cola desenvolvidos no presente trabalho. Porém, apesar da eventual menor eficiência do CR e da maior relação a/l (43-47%), a redução de resistência à compressão aos 28 dias foi inferior a 29%. Conforme discutido em 4.1.1, existe uma menor ação do EC e EA nas misturas com CR, o que gera um menor volume de vazios, com influência na resistência mecânica. Conforme se observa na Tabela 10, a estimativa de vazios total, V_v28d , é ligeiramente inferior nas misturas com CR.

Na mistura com 50% CR e 50% CPN foi obtida uma resistência intermédia de CPNAR e CRAR. Neste caso, a relação a/l foi mais próxima das misturas de referência e o teor de vazios após compactação foi inferior. Tal como observado por (Real et al. 2021) em betões de igual a/l com substituição de até 40% CPN por CR, a resistência mecânica dos cimentos-cola não foi significativamente afetada pela incorporação de 50% CR.

Porém, em face da grande influência do teor de vazios na resistência mecânica dos materiais de base cimentícia, para os quais 1% do teor de ar pode significar uma redução de 5% na resistência mecânica, não é possível concluir em rigor do desempenho relativo do CR face ao CPN. O mesmo teor de acelerador de presa (AP) foi utilizado em todas as misturas, não sendo possível avaliar a sua contribuição nos diferentes tipos de cimento-cola, visto que não foram produzidas misturas de referência sem este aditivo.

Em geral, como seria de esperar, a resistência à flexão seguiu as tendências verificadas na resistência à compressão, reforçando a justificação dos resultados considerada para a resistência à compressão.

4.1.4 Ensaios de aderência por Pull-OFF, sem envelhecimento

Na Tabela 14 e 15 apresentam-se os resultados referentes ao ensaio de aderência por pull-OFF de provetes não sujeitos a envelhecimento. Nesta tabela indica-se a tensão média de aderência aos 7, 14 e 28 dias, tendo em conta o ensaio de 4 provetes a cada idade. De acordo com o critério definido em 2.8 apresenta-se o modo de rotura (adesiva - AFS ou AFT; coesiva na cola – CFA; coesiva no suporte ou no ladrilho – CFS ou CFT, respetivamente), com indicação da percentagem média de área do ladrilho associado a cada um destes modos de rotura. Os valores obtidos em cada provete apresentam-se no anexo II.

Tabela 14 - Modo de rotura de provetes não sujeitos a envelhecimento (Média de área de rotura)

Composição	Modo de Rotura (7dias)	Modo de Rotura (14dias)	Modo de Rotura (28dias)
CPNAN	85 CFA 15 AFT	90 CFA 10 AFT	90 CFA 10 AFT
CPNAR	70 CFA 30 AFT	80 CFA 20 AFT	80 CFA 20 AFT
CRAN	70 AFT 30 CFA	60 AFT 40 CFA	80 CFA 20 AFT
CRAR	80 AFT 20 CFA	60 AFT 40 CFA	80 CFA 20 AFT
50CRAR	60 AFT 40 CFA	55 AFT 45 CFA	55 AFT 45 CFA

Os resultados de aderência apresentam uma tendência distinta do observado nos ensaios de resistência mecânica, constatando-se uma má relação entre estas propriedades. Neste caso, para além da capacidade do ligante, outros fatores afetam esta propriedade, nomeadamente a contribuição dos aditivos EC, EA e resina (RDP), (2.7), bem como a capacidade molhante e de transferência das misturas, afetada pela relação a/l e sua interação com os aditivos. A resina, como promotor de aderência, terá uma maior contribuição para a aderência do que para a resistência mecânica. Na primeira fase, o teor de resina foi mantido constante entre as diferentes misturas, de modo a que este constituinte não tivesse uma influência significativa no comportamento relativo entre elas.

Tabela 15 - Tensão de aderência de provetes não sujeitos a envelhecimento (Média de tensão de aderência)

Composição	σ_m (MPa)	CV_{7d}	σ_m (MPa)	CV_{14d}	σ_m (MPa)	CV_{28d}
CPNAN	1,31	1%	1,31	1%	1,08	3%
CPNAR	1,24	1%	1,07	1%	1,18	2%
CRAN	0,48	3%	0,39	4%	0,50	3%
CRAR	0,29	4%	0,47	4%	0,48	4%
50CRAR	0,73	4%	0,62	3%	0,53	3%

Para os vários casos analisados, a rotura ocorreu de forma coesiva no cimento-cola (CFA) ou adesiva entre o ladrilho e a cola (AFT). A rotura por AFT pode indicar uma aderência insuficiente com o ladrilho, resultante do fraco poder de molhagem e de transferência do cimento-cola utilizado. Por sua vez a rotura coesiva pelo cimento-cola, para valores modestos de tensão de aderência, indica uma fraca capacidade resistente da mistura ligante.

Apenas as misturas com CPN ou 50% CR atingiram valores de aderência superiores a 0,5 MPa, conforme recomendado na (EN 1348 , 2007). As misturas com 100% CR apenas atingiram valores próximos deste limite aos 28 dias. De facto, verificou-se que durante a aplicação estas misturas manifestaram fraca capacidade de molhagem e poder colante. Isso reflete-se na maior percentagem de rotura por aderência (AFT) observada nestes cimentos-cola (Tabela 13). A mistura ressequiu de forma acelerada, ocorrendo uma rápida descida de água livre no sistema e de perda de plasticidade do cimento-cola. Dois fatores terão contribuído para este fenómeno: a elevada exigência de água e o rápido desenvolvimento de calor de hidratação, resultante da elevada área superficial do CR e da existência de cal livre neste ligante; perda de eficiência do EC (conforme discutido em 4.1.1), reduzindo a capacidade de retenção de água da mistura e a consequente aderência ao suporte. Assim, para além de uma eventual redução da sua capacidade resistente, os cimentos-cola com CR não manifestavam as condições reológicas ideais para a sua correta aplicação.

A substituição de areia natural por areia reciclada conduziu a uma ligeira tendência de redução da tensão de aderência média, e incremento da percentagem de rotura por AFT. Isso deverá estar associado à forma menos favorável das partículas de AR, bem como à maior rapidez de secagem e perda de trabalhabilidade resultante da sua maior absorção face à AN. No entanto, as diferenças foram pequenas e sugerem que a correção da mistura em termos de a/l e teor de aditivos poderá melhorar a sua aplicabilidade (fase 2 em 4.2).

Finalmente, o cimento-cola com 50% CR apresentou desempenho intermédio entre CPNAR e CRAR, mas mais próximo de CRAR, especialmente aos 28 dias. Tal como nas misturas com apenas CR, constatou-se que a quantidade de água e teor de aditivos devem ser corrigidos, conforme abordado em 4.2. Para as composições consideradas na primeira fase deste trabalho, a incorporação de mais de 50% CR conduziu a desempenhos baixos em termos de aderência.

De referir ainda que, em geral, a tensão de aderência não seguiu uma tendência clara de crescimento ou decréscimo entre 7 e 28 dias (Figura 36). Para além da variabilidade do ensaio, a aderência é afetada pela resina (RDP), cujas propriedades não variam de forma significativa com a idade. A variação não uniforme resulta da variabilidade do próprio ensaio, que é muito suscetível às condições de aplicação dos ladrilhos, e ao reduzido número de provetes ensaiados a cada idade (4 provetes por composição). Uma eventual redução da tensão de aderência ao longo do tempo, como sucede em 50CRAR, pode resultar da ocorrência de retração, com possível desenvolvimento de microfissuração e perda de coesão. Para idêntica relação a/l, verifica-se que a retração nas misturas com até 40% CR pode ser 15% superior à das misturas de referência com CPN (Real et al. 2021). No entanto, devido ao aumento provocado na relação a/l para idêntica aplicabilidade, essa diferença tende a ser superior. Para igual trabalhabilidade, (Marques 2020) verificou retrações aos 90 dias até 3 vezes superiores em argamassas com 100% CR, associadas a uma relação a/l duas vezes maior do que da argamassa de referência com apenas CPN. De facto, (Marques 2020) reporta também situações de redução da tensão de aderência com a idade, referindo que ocorre possível degradação das ligações entre o cimento-cola e o ladrilho. Este fenómeno foi atribuído ao fenómeno de retração do cimento-cola ao longo do tempo de cura, provocando fissuras na interface do cimento-cola.

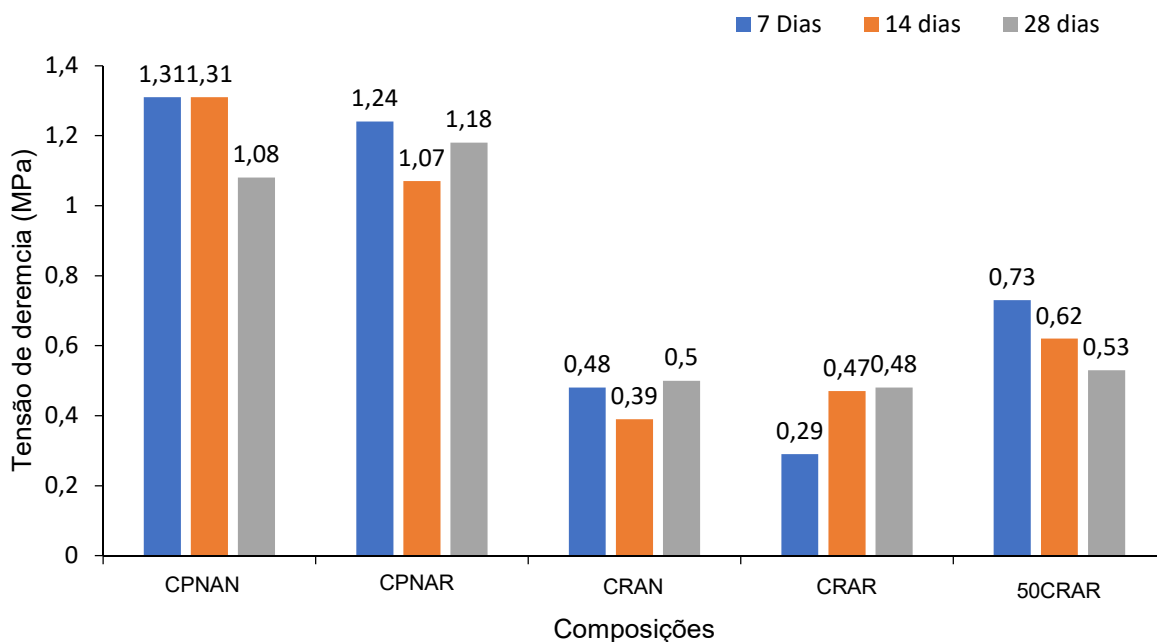


Figura 36 - Tensão de aderência por Pull-off - resultados da primeira fase

4.1.5 Ensaios de aderência por Pull-OFF, envelhecimento por imersão em água

Na Tabela 16 apresenta-se os resultados de tensão de aderência após imersão em água, de acordo com o procedimento descrito em 3.6.5. Os resultados da tensão de aderência correspondem à média de 4 amostras. Na Figura 38 confrontam-se os resultados obtidos neste ensaio com os apresentados em 4.1.4, envolvendo ensaios sensivelmente à mesma idade (28 dias), mas sem envelhecimento.

Tabela 16 - Tensão de aderência e modo de rotura após imersão em água (valores médios de tensão de aderência e área de rotura)

Composição	σ_m (MPa)	CV _{28v}	Modo de Rotura
CPNAN	0,91	1%	65 CFA 35 AFT
CPNAR	0,79	3%	70 CFA 30 AFT
CRAN	0,17	3%	100 AFT
CRAR	0,32	3%	98 AFT 2 CFA
50CRAR	0,51	3%	60 CFA 40 AFT

A perda de aderência após imersão está essencialmente associada à alteração ocorrida ao nível da resina, que tende a saponificar na presença de água e de um meio com elevado pH, como sucede nos materiais de base cimentícia. Basicamente, as reações de saponificação em polímeros e resinas com grupo hidroxilos, conduzem à degradação das ligações na interface do cimento-cola com o ladrilho. Nesse caso, a aderência passa a ser apenas controlada pela componente cimentícia do ligante.

Em todas as misturas testadas nesta fase confirmou-se uma perda da capacidade de aderência após envelhecimento em água, sendo que esta quebra foi de 16 %, 33 %, 66%, 33% e 5% para as misturas

CPNAN, CPNAR, CRAN, CRAR e 50CRAR, respetivamente (Figura 37). Como seria de esperar, em geral, esta redução de desempenho foi acompanhada pelo aumento da percentagem de rotura por AFT, face aos resultados dos ensaios sem envelhecimento (Tabela 15 versus Tabela 16). A estes resultados deve-se acrescentar que a rotura nas misturas com 100% CR desenvolveu-se totalmente pela interface adesivo-ladrilho, sem mobilização da coesão do cimento-cola. O pior desempenho observado nestas misturas indica que a adesão entre o ladrilho e o cimento-cola estava a ser essencialmente garantido pela resina, com fraca contribuição do cimento-cola. Mais uma vez, confirma-se o fraco poder molhante e colante dos cimentos-cola com CR, para as composições definidas durante esta primeira fase da campanha experimental.

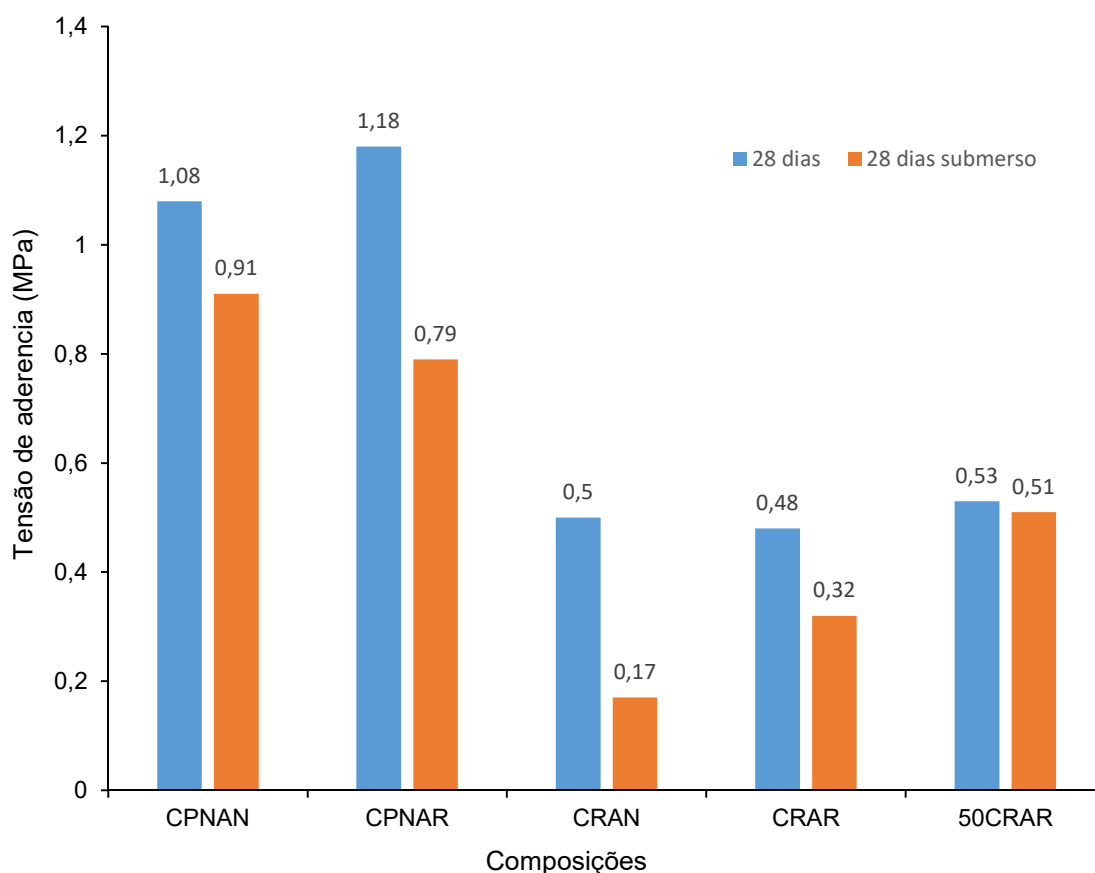


Figura 37 - Aderência sem envelhecimento versus aderência com envelhecimento submerso - resultados da primeira fase

Neste ensaio, não é clara a influência do tipo de agregado fino, verificando-se resultados contraditórios nas misturas com CPN e CR. Por outro lado, ao contrário do esperado, a mistura 50CRAR foi a que apresentou melhor desempenho, verificando-se uma alteração pouco significativa da tensão de aderência e da percentagem de rotura atribuída a AFT. Não foi possível encontrar uma razão clara para este melhor desempenho face às restantes misturas. Em comparação com os resultados obtidos aos 7 e 14 dias, a tensão de aderência aos 28 dias foi anormalmente mais baixa nos ensaios não sujeitos a envelhecimento, talvez por problemas de retração ou aplicação destes provetes (Tabela 11). Esta quebra não esperada de desempenho aos 28 dias faz com que a perda relativa de resistência após

imersão se torne aparentemente baixa. No entanto, por comparação com os resultados obtidos nas misturas com 100% CPN e 100% CR, estimaram-se valores intermédios esperados para 50CRAR.

4.1.6 Ensaios de aderência por Pull-OFF, envelhecimento por Calor

Na Tabela 17 apresentam-se os resultados de tensão de aderência após envelhecimento por calor, de acordo com o procedimento descrito em 3.6.4. Os resultados da tensão de aderência correspondem à média de 4 amostras. Na Figura 38 comparam-se os resultados obtidos neste ensaio com os apresentados em 4.1.4, para 28 dias de idade sem envelhecimento.

Tabela 17 - Tensão de aderência e modo de rotura após envelhecimento por calor (valores médios de tensão de aderência e área de rotura)

Composição	σ_m (MPa)	CV _{28d}	Modo de Rotura
CPNAN	1,25	2%	90 CFA 10 AFT
CPNAR	0,96	1%	80 CFA 20 AFT
CRAN	0,44	5%	80 AFT 20 CFA
CRAR	0,35	3%	80 AFT 20 CFA
50CRAR	0,50	5%	80 AFT 20 CFA

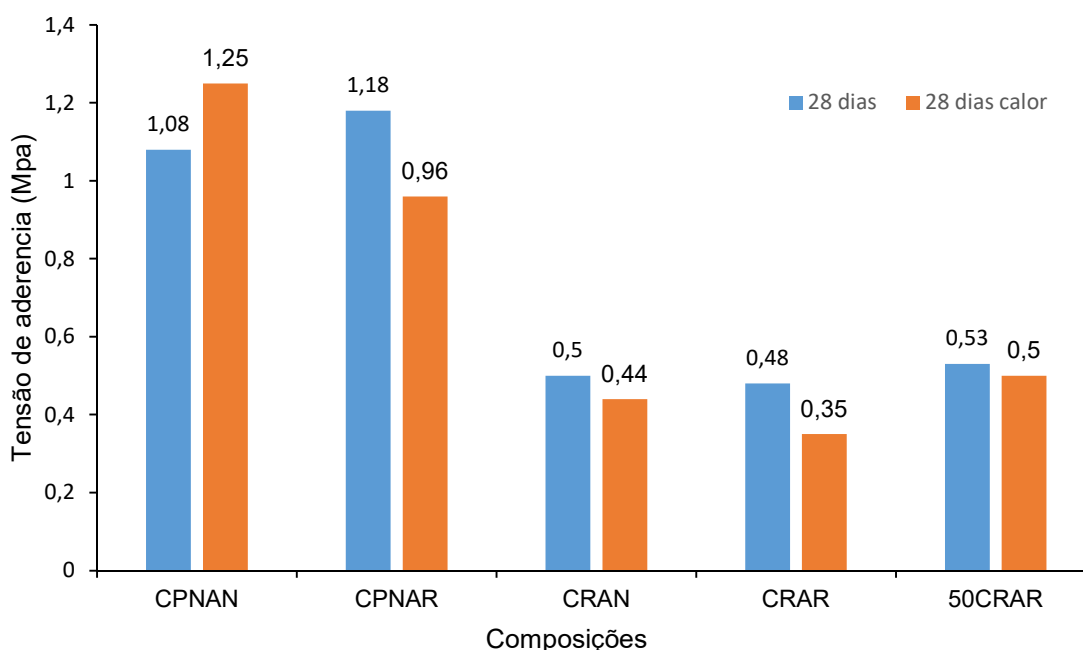


Figura 38 - Aderência aos 28 dias versus aderência com envelhecimento ao calor

A ação do calor pode afetar negativamente a tensão de aderência, essencialmente por duas vias. Por um lado, o ensaio promove a criação de variações volumétricas diferenciais entre o cimento-cola e o suporte ou o ladrilho, devido ao diferente coeficiente de expansão térmica destes materiais. Por outro lado, o calor gerado acelera a evaporação de água e retração do cimento-cola, aumentando a suscetibilidade à fissuração.

Exceto na mistura de referência com CPN (CPNAN) verificou-se uma ligeira redução da tensão de aderência face aos ensaios sem envelhecimento. A redução foi de 19 %, 12 %, 27% e 6% para as misturas CPNAR, CRAN, CRAR e 50CRAR, respetivamente (Figura 38). O aumento verificado na tensão de aderência do CPNAN pode resultar da variabilidade do próprio ensaio, mas pode-se concluir que esta mistura foi insensível à ação do calor. A melhoria observada pode também estar relacionada com o amolecimento da resina a 70°C, melhorando a sua capacidade de deformação. A muito reduzida perda de aderência em 50CRAR sugere uma vez mais que o resultado obtido aos 28 dias para estas misturas sem envelhecimento poderá ter sido anormalmente baixo. Isto demonstra também, mais uma vez, que as aderências após calor são muito dependentes da ação do polímero que por sua vez é mais eficiente quando “emparelha” bem com a hidratação da parte mineral, o que não se constatou pelos resultados apresentados.

4.2 Resultados obtidos na segunda fase – Cimentos-cola de Aplicabilidade melhorada

Na segunda fase teve-se em consideração as composições definidas em 3.3, em que face a 4.1 eliminou-se a mistura CRAN e incluíram-se as misturas com FC (50FCAN e 50CRFCAR). Como referido, nesta fase os cimentos-cola foram formulados de modo a apresentarem condições adequadas de aplicabilidade, avaliado de forma qualitativa, tendo em consideração ensaios experimentais de espalhamento e avaliação visual da aderência numa parede de alvenaria. Para tal, foi ajustado a relação a/l e o teor de EC face às misturas da primeira fase. Foram assim consideradas 6 composições, nomeadamente CPNAN, CPNAR, CRAR, 50 CRAR, 50FCAN e 50CRFCAR.

Durante a fase 1, nas misturas com CR, verificou-se uma aparente ineficiência e incompatibilidade do EC1. Tal poderá estar relacionado com a perda de estabilidade deste aditivo a temperaturas elevadas. Desse modo, para as misturas com CR, optou-se por considerar um outro tipo de éter de celulose, EC2, cujo domínio de estabilidade a elevada temperatura é mais alargado (3.2.5). Assim, é expectável que o novo EC seja menos afetado pela elevada temperatura inicial desenvolvida durante a hidratação do CR. Adicionalmente, tem uma viscosidade superior, que pode resultar em maior poder de retenção de água e contribuir para uma pasta com maior adesividade no estado fresco.

4.2.1 Poder molhante e transferência

Na Tabela 18 apresentam-se os resultados relativos à aplicabilidade das várias misturas produzidas na segunda-fase, tendo em consideração os ensaios de transferência e poder molhante definidos em 3.5.5. Os resultados são apresentados para diferentes períodos de medição entre 5 e 30 minutos, permitindo monitorizar o seu comportamento ao longo do tempo. Para cada composição foram ensaiadas 4 amostras a cada idade. Dessa forma permite-se avaliar o tempo de aplicação e a suscetibilidade à perda de trabalhabilidade das várias misturas. Embora a norma (EN 12004-1 2017) não imponha valores limite para o poder molhante, considera-se recomendável, tendo em consideração a experiência do fabricante, que a percentagem de área seja superior a 80% aos 20 minutos. Isso sugere a possibilidade de um tempo de aplicação superior a 20 minutos. Para a transferência considerou-se razoável atingir valores superiores a 50% após 20 minutos.

Tabela 18 - Poder molhante e transferência (valores médios % de área total transferida ao cerâmico)

Mistura	a/l	%EC	Poder molhante (%)				Transferência (%)			
			5 min	10 min	20 min	30 min	5 min	10 min	20 min	30 min
CPNAN	0.68	0.27	100	100	90	>75	70	>70	>70	>60
CPNAR	0.74	0.29	100	95	>80	>70	>50	>70	>65	20
CRAR	1.20	0.32	95	>80	50	30	<40	<10	0	0
50CRAR	1.03	0.31	100	90	50	50	90	80	50	0
50FCAN	0.75	0.27	100	100	100	>90	80	70	>75	>60
50CRFCAR	1.05	0.29	100	100	100	90	100	100	95	0
CRARgel	1.3	0.34	100	95	90	50	100	90	10	0

Face à fase 1, o ligeiro aumento da relação a/l e do teor de EC na mistura de referência CPNAN permitiu garantir um elevado poder molhante e uma adequada capacidade de transferência para períodos de aplicação superiores a 20 minutos. A substituição de AN por AR (CPNAR) aumentou a exigência da quantidade de água total devido à absorção e geometria do AR (4.1.1). Desse modo, foi necessário impor um maior incremento na relação a/l total e no teor de EC para se atingir condições razoáveis de aplicabilidade. Conforme analisado por (Marques 2020) o aumento da concentração de EC aumenta a retenção de água e, conseqüentemente, o poder molhante. Um fator que também contribui para o pior desempenho das misturas com AR relaciona-se também com o facto de, conforme ilustrado em 3.2.3 a AN apresentar maior teor em finos do que a AR. Neste caso, cerca de 37% das partículas de AN situa-se abaixo de 250 µm, enquanto a AR possui toda a sua granulometria superior a 250 µm. Areias com d₅₀ mais próximas de 0.2 a 0.3 mm seriam favoráveis, dado que incrementam a coesão e retenção de água das misturas.

A substituição de 100% CPN por 100% CR teve uma influência significativa na redução da transferência e do poder molhante (CRAR). O aumento imposto na relação a/l e no teor de EC permitiu apenas condições aceitáveis de aplicação até cerca de 10 minutos. Em geral, observa-se um bom comportamento durante os primeiros 5 minutos, que é rapidamente alterado após esse período. Como referido, o CR apresenta elevada exigência de água e perda de trabalhabilidade ao longo do tempo, motivado pela sua grande área superficial e porosidade, bem como o sobreaquecimento resultante da rápida hidratação. A rápida perda de água livre durante os primeiros minutos, por absorção e hidratação do CR, e por evaporação superficial resultante do aquecimento, refletiu-se no seu comportamento após 5 minutos. Existe também uma elevada adsorção do EC no CR, que como referido reduz a eficiência deste aditivo.

A rápida secagem e hidratação inicial do CR, promove um aumento da sua coesão interna e uma redução da sua capacidade de molhagem e aderência com a placa de vidro. De facto, na Tabela 14 constata-se que existe uma elevada redução da capacidade de transferência de CRAR, logo após os primeiros minutos, que é acompanhado por uma perda menos significativa do poder molhante. Isso resulta do facto da transferência depender da relação entre as forças de coesão e as forças de aderência do cimento-cola. Quando as forças de coesão interna prevalecem sobre as de aderência ao vidro, a capacidade de transferência diminui. Apesar da pasta apresentar alguma deformabilidade que

permite a sua molhabilidade, a capacidade de aderência não vence as suas forças de coesão resultantes do rápido ressequeir do cimento-cola.

De modo a contrariar a rápida perda de trabalhabilidade nesta mistura, foi ainda experimentada uma nova composição em que se promoveu um aumento adicional da relação a/l (1.3) e do teor de EC (0.34%), bem como a utilização de água gelada por forma a contrariar a rápida subida de temperatura do cimento-cola (CRARgel). Para a produção da água gelada, foram produzidos cubos de gelo fora do IST e trazidos para o Laboratório de civil no dia da produção desta mistura. Durante a preparação dos restantes constituintes da mistura os cubos foram deixados num recipiente ao ar de modo a derreterem. Quando o recipiente já continha água suficiente para realizar a mistura esta foi medida de modo a obter uma temperatura de $5^{\circ}\text{C} \pm 1^{\circ}\text{C}$. Esta foi incorporada na mistura da mesma forma que a água à temperatura ambiente. Na Tabela 15 apresenta-se também os resultados do poder molhante e de transferência para CRARgel. Estas alterações permitiram aumentar ambas as características de transferência e poder molhante, nomeadamente até 20 minutos de espera na aplicação. Observou-se uma maior capacidade de retenção de água da mistura, conduzindo ao aumento da sua molhabilidade e à diminuição da sua secagem ao longo do tempo. De qualquer forma, conclui-se que para as composições analisadas, a utilização de 100% de CR não permite condições de aplicabilidade viável com a sua utilização do ponto de vista comercial.

Na situação intermédia relativa à substituição parcial de 50% de CPN por CR e incorporação de 100% AR (50CRAR) foi possível atingir valores razoáveis de poder molhante e transferência até pelo menos 20 minutos. No entanto, para tal, foi necessário aumentar a relação a/l e o teor de EC. Isso é motivado pela influência da AR e do CR, discutido nos parágrafos anteriores. De qualquer forma, os resultados indicados sugerem que para substituições até 50% CR é viável a produção e aplicação de cimentos-cola. De referir que neste trabalho não foram alteradas as dosagens de resina RDP e EA, embora estas também possam ter de ser otimizadas em face da elevada superfície específica do CR (aumento da área de contacto entre a resina e as partículas de cimento).

A substituição parcial de 50% CPN por 50% FC melhorou ligeiramente a aplicabilidade da mistura, aumentando o seu poder molhante e a capacidade de transferência face à mistura de referência CPNAN. Por um lado a relação a/l foi aumentada em 9%. Por outro lado, dado que grande parte do FC não participa na hidratação da matriz, a relação água/cimento equivalente é muito elevada. Isso retarda a taxa e o volume de produtos hidratados desenvolvidos no cimento-cola, aumentando a quantidade de água livre no sistema durante mais tempo. Assim, o poder molhante e a capacidade de transferência foi mantida elevada durante os 30 minutos de análise. Naturalmente, esta menor atividade do ligante poderá ter depois repercussão no tempo de presa, endurecimento e aderência do cimento-cola. Acrescente-se ainda que a inclusão de FC inerte, aumenta a quantidade de pasta na mistura (devido à sua menor massa volúmica), incrementando o teor de finos abaixo de $100\ \mu\text{m}$, o que melhora as propriedades de molhagem e adesão ao material cerâmico.

Finalmente, a consideração de 50% RC e 50% FC (50CRFCAR), conduziu a soluções igualmente viáveis em termos de aplicabilidade. Comparando com a mistura com 50% RC e 50% CPN (50CRAR), existiu uma ligeira melhoria da aplicabilidade, pelas razões referidas anteriormente. Neste caso, apesar

do ligeiro incremento na relação a/l, o teor de EC foi menor. Em suma, conclui-se que apenas a mistura com 100% CR foi inviável em termos de aplicabilidade.

4.2.2 Tempo de presa

Na Tabela 19 apresenta-se os valores dos tempos de presa medidos nos cimentos-cola testados na segunda fase. Os ensaios foram realizados conforme indicado em 3.5.4 e discutido em 4.1.2.

Tabela 19 - Tempo de início e fim de presa - fase 2

Mistura	a/l	%EC	Presa (h)	Observações
CPNAN	0,68	0,27	<12	-
CPNAR	0,74	0,29	<24	-
CRAR	1,20	0,32	>24-96	96 horas presa concluída
50CRAR	1,03	0,31	24	Presa concluída
50FCAN	0,75	0,27	<24	-
50CRFCAR	1,05	0,29	>24-48	48 horas presa concluída
CRARgel	1,3	0,34	>24-48	48 horas presa concluída

Tendo em consideração os resultados da Tabela 15, apenas as misturas com até 50%CR desenvolveram presa até 24h. Em geral, face ao discutido em 4.1.2, procedeu-se ao aumento da relação a/l e do teor de EC, o que tende a retardar o tempo de presa. Assim, a tendência foi de aumento do tempo de presa nas várias misturas. Apenas a CPNAN viu reduzido o seu tempo de presa, dado que o teor de EC foi diminuído em 4%. Isso corrobora o estudo apresentado por investigadores que afirmam que o EC tende a estender o tempo de indução e a atrasar o tempo de presa (Ou 2012). Esta diminuição no tempo de presa de CPNAN leva à conclusão de que o teor de EC é mais importante do que a relação a/l. Em sentido oposto, o tempo de presa de CPNAR aumentou devido ao incremento de a/l e teor de EC (aumento de 3%).

A mistura com 100% CR sofreu o maior atraso no tempo de presa, verificando-se que esta foi apenas concluída após 4 dias. Confirma-se assim a penalização das reações de hidratação do CR, sendo atribuído os mesmos motivos discutidos e 4.1.2. Neste caso, o aumento de 21% no teor de EC terá contribuído para um atraso significativo nas reações do CR, que não é compatível com a sua utilização a 100% em cimentos-cola. Note-se que este atraso não é característico do CR, visto que trabalhos anteriores demonstram uma maior reatividade deste cimento do que do CPN até 3 dias de idade (Bogas, 2020; Real et al. 2020). Destaca-se ainda assim o facto da mistura com até 50% CR e 100% AR ter cumprido no limite o fim de presa. Isso significa que misturas com AN e até 50% de substituição de CPN por CR deverão cumprir o limite de 24 horas.

A substituição de 50%CPN por 50%FC nas misturas com cimento ou com CR fez aumentar o tempo de presa, mesmo quando essa incorporação implicou uma redução do teor de EC, como é o caso de 50CRFCAR face a 50CRAR. Este fenómeno está relacionado com a diluição do teor de clínquer na mistura, aumentando o a/c equivalente da mesma e reduzindo a sua velocidade de reação e desenvolvimento de produtos hidratados. Assim, apesar de FC facilitar a aplicabilidade e molhabilidade do cimento-cola, reduz a sua reatividade. Neste caso, a mistura de 50%FC e 50%CR não permite atingir condições de endurecimento viáveis para a sua utilização em cimentos-cola.

Curioso é o facto da mistura CRARgel ter apresentado um tempo de presa inferior ao de CRAR, apesar de ter sido produzida com maior a/l e maior teor de Ec. Tal poderá estar associado ao menor desenvolvimento de calor de hidratação inicial de CRARgel, permitindo uma menor dessecação da mistura. Poderá também afetar de forma distinta o comportamento dos aditivos adicionados à mistura. De acordo com (Marques 2020) a retardação do tempo de presa depende essencialmente da interação dos aditivos com a parte mineralógica do cimento-cola, assumindo menos importância o teor e a retenção de água da mistura.

4.2.3 Ensaio de aderência por Pull-OFF, sem envelhecimento

Na Tabela 20 e 21 apresentam-se os resultados da segunda fase referentes ao ensaio de aderência por pull-OFF de provetes não sujeitos a envelhecimento. Nesta tabela indica-se, tal como em 4.1.4, a tensão média de aderência aos 7, 14 e 28 dias, tendo em conta o ensaio de 4 provetes a cada idade. Segue-se novamente o critério definido em 2.8.

Tabela 20 - Modo de rotura de provetes não sujeitos a envelhecimento (valores médios de área de rotura - fase 2)

Composição	Modo de Rotura (7 dias)	Modo de Rotura (14 dias)	Modo de Rotura (28 dias)
CPNAN	80 CFA 20 AFT	95 CFA 5 AFT	95 CFA 5 AFT
CPNAR	90 CFA 10 AFT	90 CFA 10 AFT	90 CFA 10 AFT
CRAR	40 AFT 60 CFA	60 CFA 40 AFT	60 CFA 40 AFT
50CRAR	CFA	CFA	CFA
50FCAN	40 AFT 60 CFA	90 CFA 10 AFT	80 CFA 20 AFT
50CRFCAR	100 CFA	100 CFA	100 CFA
CRARgel	50 CFA, 50 AFT	50 CFA, 50 AFT	50 CFA, 50 AFT

Tabela 21 - Tensão de aderência de provetes não sujeitos a envelhecimento (valores médios de tensão de aderência – fase 2)

Composição	σ_m (MPa)	CV _{7d}	σ_m (MPa)	CV _{14d}	σ_m (MPa)	CV _{28d}
CPNAN	1,29	2%	1,25	1%	1,29	1%
CPNAR	1,03	1%	0,95	1%	1,19	2%
CRAR	0,5	5%	0,51	5%	0,4	4%
50CRAR	0,90	1%	1,04	2%	0,88	4%
50FCAN	0,645	5%	0,83	2%	0,90	2%
50CRFCAR	0,76	2%	0,58	4%	0,81	1%
CRARgel	0,52	3%	0,58	4%	0,65	2%

Na segunda fase, a formulação dos vários cimentos-cola foi ajustada de modo a que estes apresentassem melhor aplicabilidade, em especial no caso das misturas com CR. Isso promoveu uma melhor capacidade de transferência e de molhagem, que se refletiu no incremento geral das tensões médias de aderência face ao observado em 4.1.4.

Para as várias misturas analisadas voltou a ocorrer rotura coesiva no cimento-cola (CFA) ou adesiva entre o ladrilho e a cola (AFT). Como referido em 4.1.4 a rotura por AFT indica fraca capacidade de molhagem e transferência do cimento-cola. Por sua vez, valores inferiores de tensão de aderência em modos de rotura por CFA, indicam uma menor capacidade resistente da mistura ligante.

Ao contrário do observado em 4.1.4, exceto em CRAR aos 28 dias, todas as misturas atingiram valores de aderência superiores a 0,5 MPa, conforme recomendado na (EN 1348 , 2007). Conforme abordado em 4.2.1, apesar do ajuste de a/l e do teor de EC ter melhorado a aplicabilidade de CRAR, esta ainda apresentou uma capacidade pouco satisfatória de transferência imediatamente após os primeiros minutos de aplicação. Mais uma vez, isso refletiu-se na maior percentagem de rotura por AFT observada nestas misturas. Note-se que conforme referido em 3.6.3, os ladrilhos foram aplicados 5 minutos após a colocação do cimento-cola, situação em que a mistura já se apresentava ressequida. Ainda assim, com as novas alterações, apenas aos 28 dias se obteve um valor inferior a 0,5 MPa. Esta redução aos 28 dias não era esperada, e deverá estar ligada à variabilidade do próprio ensaio e/ou eventuais fenómenos de retração. Por sua vez, a utilização de água gelada e a correção adicional da relação a/l e do teor de EC (maior retenção de água) na mistura CRARgel, permitiu aumentar a capacidade de transferência (4.2.1), refletindo-se na redução da percentagem de rotura por AFT e no aumento da tensão média de aderência. Ocorreu uma maior ligação ao cerâmico devido à redução da perda rápida de água intersticial pela elevada temperatura de hidratação do CR, como referido em 4.1.4.

Mesmo após ajuste da composição e do teor de EC, a incorporação de AR conduziu a uma ligeira redução da tensão média de aderência (8% aos 28 dias). Neste caso, a rotura em ambos os casos ocorreu por coesão (CFA), o que indica uma menor capacidade resistente de CPNAR. Isso justifica-se pelo facto do a/l total ter sido 9% superior em CPNAR do que em CPNAN. Mesmo admitindo absorção até à saturação no AR (2.3%), o a/l efetivo seria 8% inferior (4.1.1), passando a cerca de 0.67, ainda assim superior ao a/l efetivo de CPNAN. De qualquer forma, demonstra-se que a utilização de areia fina reciclada é viável para a produção de cimentos-cola mais eco eficientes, tendo-se atingido soluções com tensões média de aderência superiores a 1 MPa a partir dos 7 dias de idade. Face a 4.1.4., os ajustes promovidos na mistura permitiram garantir uma maior percentagem de rotura por CFA. Em relação ao CPNAN, ocorreu um aumento da percentagem de rotura por AFT face à mistura da fase 1, o que se justifica pela ligeira redução no teor de EC e da capacidade de redução de água, conforme discutido em 4.1.1.

Na situação intermédia de substituição de 50% de CPN por 50% CR, foi possível atingir uma solução equilibrada com boa capacidade de aderência e elevada taxa de incorporação de material reciclado (100% AR e 50%CR). Neste caso, os ajustes impostos à mistura, com melhoria considerável da sua aplicabilidade até 20 minutos (alteração do teor e tipo de EC, mais estável a alta temperatura), permitiu que a rotura ocorresse por CFA, para tensões médias de rotura próximas de 1 MPa, mesmo tendo em conta o incremento de 50% na relação a/l face a CPNAN.

Em 4.2.1 verificou-se que a substituição de 50% de CPN ou CR por FC melhorou a aplicabilidade das misturas. Neste caso, os vários provetes ensaiados apresentaram rotura por coesão (CFA). Por um

lado, a capacidade de molhagem é elevada e por outro lado estas misturas ligantes apresentam menor capacidade de hidratação e, como tal, menor resistência. Desse modo, a substituição de 50% de CPN por 50% FC conduziu a uma diluição do teor de clínquer e da redução do a/c equivalente, obtendo-se uma redução de 50% na tensão de aderência aos 7 dias e 30% aos 28 dias. Ainda assim, foi possível atingir soluções muito razoáveis, com tensão superior a 0,8 MPa aos 28 dias. Conclui-se assim que faz sentido explorar a utilização de cimentos compostos com FC na produção de cimentos-cola, de modo a atingir soluções mais eco eficientes. Nos cimentos-cola com CR a substituição de CPN por FC, atingindo-se uma solução muito mais eficiente, conduziu a reduções pouco significativas na tensão média de aderência aos 28 dias, face a 50CRAR. No entanto, verificaram-se reduções de até 44% em idades mais jovens. Por um lado, apesar das características inertes de FC face a CPN, a inclusão desta adição melhorou a capacidade de retenção de água e poder molhante da mistura (Tabela 18). Por outro lado, a introdução de FC, que funciona como microagregado, reduz a fonte de retração, o que torna menos significativo a influência deste efeito na degradação da aderência ao longo do tempo. Este fenómeno permite explicar a menor redução da tensão de aderência observada aos 28 dias quando se promove a substituição de CPN por CR em 50FCAN e 50CRFCAR.

Uma vez mais, não se observou uma tendência clara de evolução da tensão de aderência entre 7 e 28 dias de idade (Figura 39). Ainda assim, a resistência tende a ser superior aos 28 dias. Apenas nas misturas com CR, ocorreu redução de tensão aos 28 dias, conforme já tinha sido observado na fase 1 (4.1.2), eventualmente resultante de fenómenos de retração.

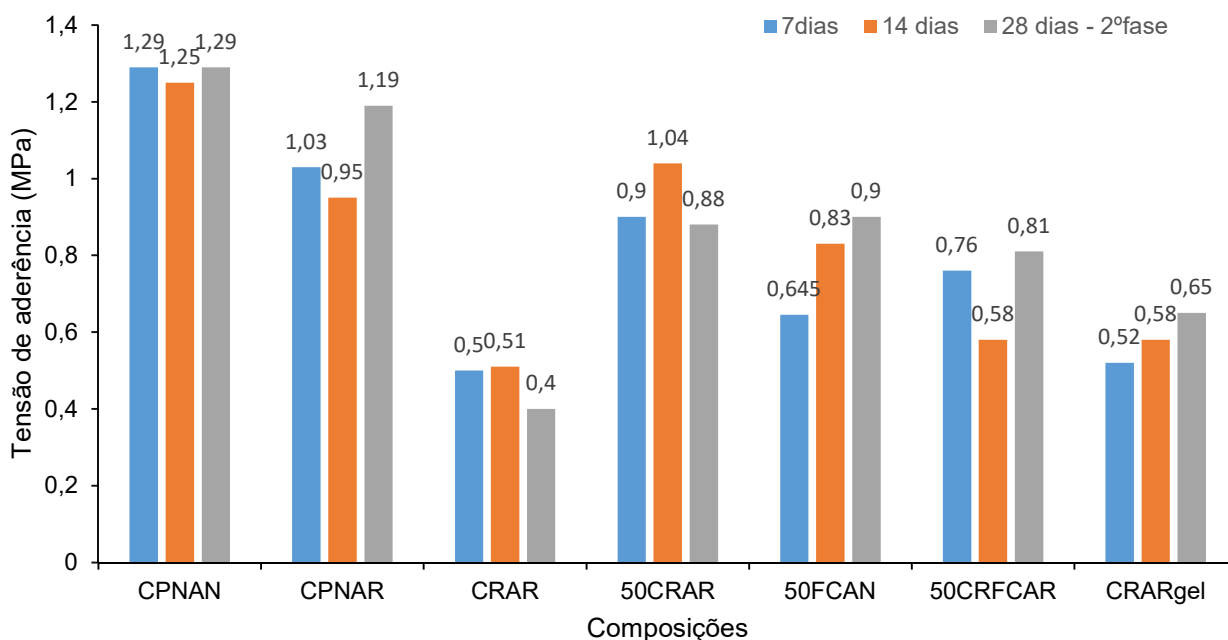


Figura 39 - Tensão de aderência por Pull-off entre 7 e 28 dias - resultados da segunda fase

4.2.4 Ensaios de aderência por Pull-OFF, envelhecimento por imersão em água

Na Tabela 22 apresentam-se os resultados de tensão de aderência após imersão em água, para os cimentos-cola desenvolvidos na segunda fase. Os resultados da tensão de aderência correspondem à média de 4 amostras. Na Figura 41 confrontam-se os resultados obtidos neste ensaio com os apresentados em 4.2.2, envolvendo ensaios sensivelmente à mesma idade (28 dias), mas sem envelhecimento.

Tabela 22 - Tensão de aderência e modo de rotura após imersão em água (alores médios de tensão de aderência e área de rotura - fase 2)

Composição	σ_m (MPa)	CV _{28d}	Modo de Rotura (28 dias)
CPNAN	0,96	1%	90 CFA 10 AFT
CPNAR	0,95	2%	90 CFA 10 AFT
CRAR	0,38	5%	95 AFT 5 CFA
50CRAR	0,63	2%	CFA
50FCAN	0,52	2%	85 CFA 15 AFT
50CRFCAR	0,17	3%	100 AFT
CRARgel	0,13	0%	50 AFT, 50 CFA

Tal como referido em 4.1.5, o principal motivo para a perda de aderência após imersão deve-se à saponificação da resina, passando a aderência a ser essencialmente controlada pela componente cimentícia do ligante.

Tal como observado na primeira fase, todas as misturas testadas nesta fase apresentaram perda de capacidade de aderência após imersão em água. Esta redução foi de 26%, 20%, 5%, 28%, 43%, 79% e 80% nas misturas com CPNAN, CPNAR, CRAR, 50CRAR, 50FCAN, 50CRFCAR e CRARgel, respetivamente (Figura 40). Tal como verificado na primeira fase em 4.1.5, esta redução da aderência foi, em geral, acompanhada pelo aumento da percentagem de rotura por AFT, em especial nas misturas em que a percentagem de redução foi superior a 40% (Tabela 14 VS Tabela 19). Isso demonstra a importante contribuição da resina para a adesão entre o cimento-cola e o ladrilho. No entanto, face às misturas testadas na primeira fase, verificou-se um incremento das tensões de aderência após imersão para as composições corrigidas na segunda fase (Figura 40).

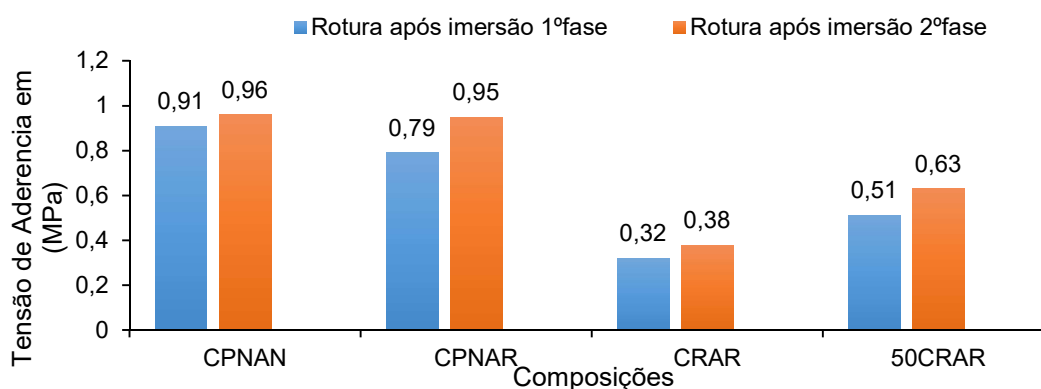


Figura 40 - Aderência após imersão 1ª fase versus aderência após imersão 2ª fase

Assim, conclui-se que o aumento do poder molhante e transferência contribui para o aumento da capacidade de aderência da fração cimentícia, independentemente do tipo de ligante (CR ou CPN).

As misturas mais afetadas pelo envelhecimento por imersão foram aquelas em que se incorporou 50%FC ou 100% CRAR. Em especial, nas misturas com CR, a rotura desenvolveu-se predominantemente pela interface adesivo-ladrilho, sem mobilização da coesão do cimento-cola. Logo, confirma-se que a resina tem uma contribuição relevante na capacidade de aderência destas misturas. Mesmo em sistemas em que o poder molhante e a capacidade de transferência foi elevado (CRARgel e misturas com FC), a perda de aderência foi elevada. Após imersão, as misturas CRAR (100%CR) e 50CRFCAR apresentaram tensão de aderência inferior a 0.5 MPa, sendo inviável a sua utilização em soluções comerciais. Na mistura CRARgel, a melhor capacidade de transferência permitiu melhorar o contacto e efetivação da resina entre o cimento-cola e o ladrilho, que se perdeu quando a resina foi atacada por saponificação. Recorda-se que as misturas com 100% CR apresentam elevada alcalinidade, devido ao elevado teor de cal livre no ligante.

Apesar de 50FCAN ter apresentado tensão média de aderência de 0.5 MPa após imersão, a perda verificada na sua capacidade de adesão, salienta a fraca contribuição da sua fração cimentícia para esta propriedade. Desse modo, é recomendado explorar soluções intermédias em que se considerem menores percentagens de substituição de CPN por FC.

Destaca-se o facto da mistura com 50%CR e 50%CPN (50CRAR) ter apresentado um valor adequado da tensão de aderência, superior a 0,6 MPa, mesmo após o envelhecimento por imersão. O modo de rotura ocorreu por CFA, o que significa que a adesão entre o cimento-cola e o cerâmico foi menos influenciada pela resina. A perda de aderência face à mistura de referência CPNAN foi de 34%, próximo dos 32% obtidos sem imersão. Desse modo, modo conclui-se que CPNAN e CRAR foram afetadas de forma semelhante pelo envelhecimento por imersão. Conclui-se assim, que cimentos-cola com substituições de até 50% de CPN por CR são soluções viáveis para o desenvolvimento de produtos industriais mais eco eficientes. Comparando a mistura 50CRAR com a solução 50FCAN, de menor a/l (27%), conclui-se que o CR apresenta maior reatividade e participação na hidratação da mistura do que o FC.

Finalmente, a substituição de AN por AR teve pouca influência na perda de aderência por imersão, atingindo-se tensões de aderência idênticas nas misturas CPNAN e CPNAR. Os vários resultados obtidos ao longo do presente trabalho apontam para a utilização plausível de AR, com vantagens relevantes em termos de ecoeficiência e circularidade, para alterações não significativas do seu desempenho.

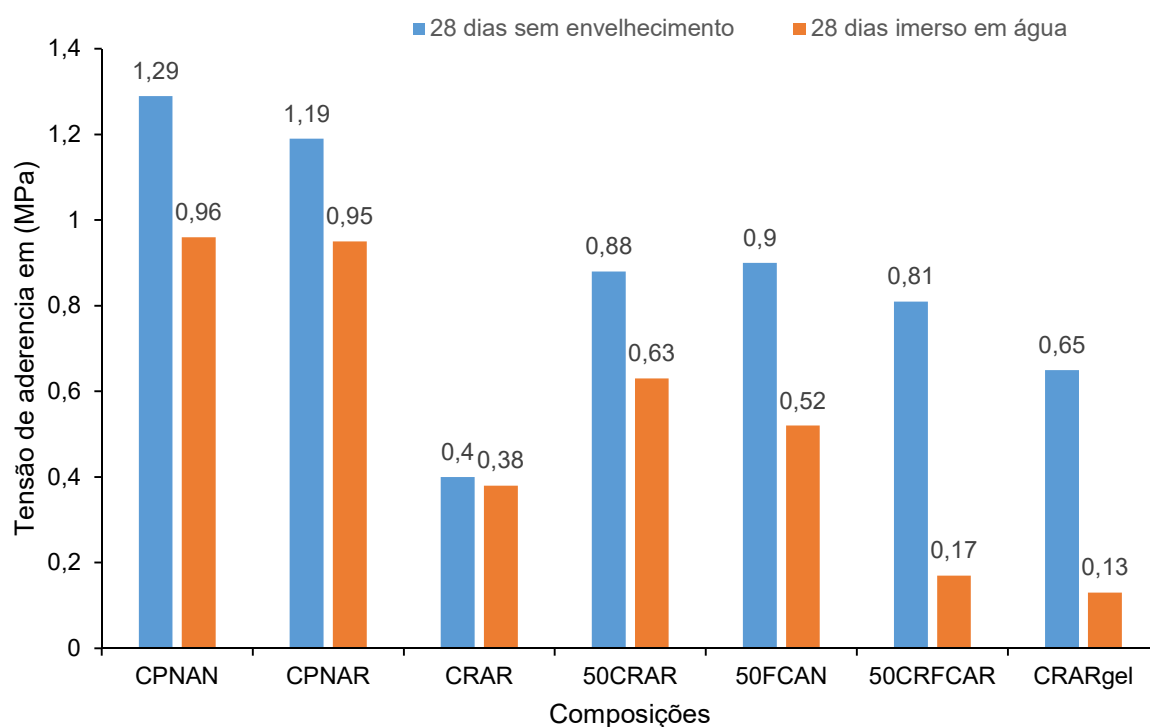


Figura 41 - Tensão de aderência por Pull-off aos 28 dias sem envelhecimento após imersão em água - resultados da segunda fase.

4.2.5 Ensaios de aderência por Pull-OFF, envelhecimento por Calor

Na Tabela 23 apresentam-se os resultados de tensão de aderência após envelhecimento por calor, tendo em consideração as composições da segunda fase. Os resultados da tensão de aderência correspondem à média de 4 amostras. Na Figura 42 comparam-se os resultados obtidos neste ensaio com os apresentados em 4.1.4, para 28 dias de idade sem envelhecimento.

Tabela 23 - Tensão de aderência e modo de rotura após envelhecimento por calor (valores médios de tensão de aderência e área de rotura - fase 2)

Composição	σ_m (MPa)	Cv_{28d}	Modo de Rotura (28 dias)
CPNAN	1,23	1%	100 CFA
CPNAR	0,99	2%	95 CFA 5 AFT
CRAR	0,43	2%	45 CFA 55 AFT
50CRAR	0,79	1%	CFA
50FCAN	0,79	2%	70 CFA 30 AFT
50CRFCAR	0,21	3%	50 CFA, 50AFT
CRARgel	0,22	5%	50 AFT, 50 CFA

As várias misturas ensaiadas sofreram uma redução da tensão de aderência após o envelhecimento por calor. Estas reduções foram de 5%, 17%, 10%, 12%, 74% e 66% para as misturas CPNAN, CPNAR, 50CRAR, 50FCAN, 50CRFCAR E CRARgel, respetivamente (Figura 41). Na mistura CRAR a tensão

manteve-se praticamente inalterada. Destaca-se a elevada sensibilidade das misturas 50CRFCAR e CRARgel a este ensaio, observando-se perdas significativas da tensão de aderência. Conforme referido, a ação do calor promove essencialmente variações volumétricas entre o cimento-cola e o ladrilho cerâmico, aumentando a suscetibilidade à fissuração e consequente a perda de aderência do conjunto. De facto, nestes dois casos, o modo de rotura passou de CFA para maioritariamente AFT. A rápida secagem deverá ter promovido uma contração violenta do cimento-cola, afetando a sua aderência. Para tal, contribui o elevado teor em água inicial destas misturas e a sua reduzida rigidez. No entanto, nas restantes misturas ensaiadas no trabalho, a ação do envelhecimento por calor foi pouco importante, afetando de forma pouco significativa a tensão de aderência. Em particular, verifica-se que a mistura 50CRAR voltou a demonstrar um comportamento bastante satisfatório, justificando a sua viabilidade e escalabilidade para a indústria.

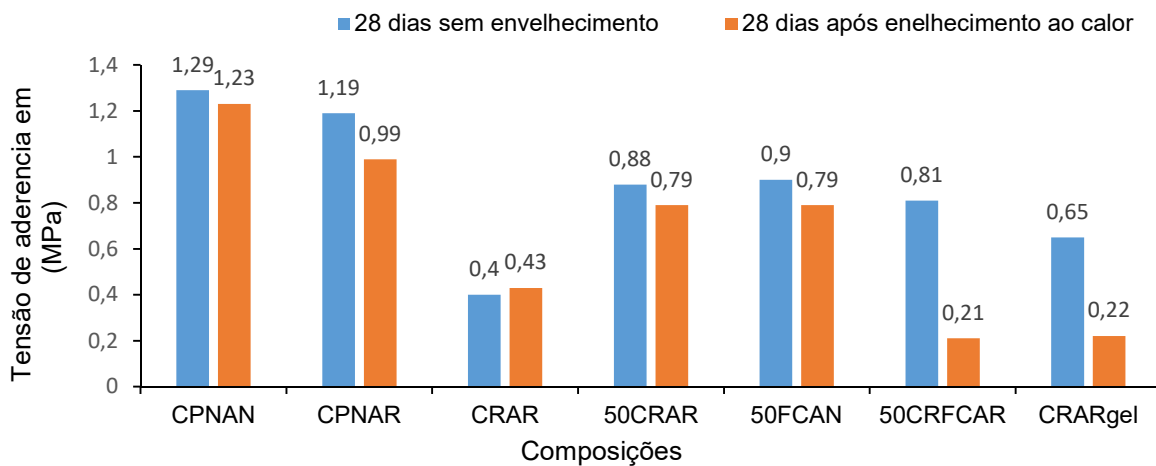


Figura 42 - Tensão de aderência por Pull-off aos 28 dias, sem envelhecimento e após envelhecimento por calor - resultados da segunda fase

(página intencionalmente deixada em branco)

5. Conclusões

No presente capítulo apresentam-se as conclusões gerais obtidas no trabalho desenvolvido, cujo objetivo tinha por base analisar a viabilidade de se produzirem cimento-cola mais eco eficientes, a partir da incorporação de elevadas taxas de cimento reciclado (CR) e areia reciclada (AR).

Tendo por base uma vasta campanha experimental, diferentes tipos de cimento-cola, com substituição parcial a total de cimento normal (CPN) por CR e de areia normal (AN) por AR, foram caracterizados em termos da sua aplicabilidade, resistência mecânica e aderência sobre condições variáveis de envelhecimento. O trabalho foi realizado em duas fases, em que numa primeira etapa foram caracterizadas diferentes misturas tendo em consideração idênticas condições de trabalhabilidade e numa segunda etapa, as misturas foram ajustadas de modo a apresentar condições razoáveis de aplicabilidade (poder molhante e transferência). No total foram consideradas 7 tipos de cimentos-cola: 100% CPN e 100% AN (CPNAN); 100% CPN e 100% AR (CPNAR); 100% CR e 100% AN (CRAN); 100% CR e 100% AR (CRAR); 50% CPN, 50% CR e 100% AR (50CRAR); 50% CR, 50% FC e 100% AR (50CRFCAR). Este trabalho foi realizado no âmbito do projeto FCT, EcoHydB - PTDC/ECI-CON/28308/2017, tendo sido realizado em colaboração com a empresa Weber, no sentido de se caminhar para o desenvolvimento de produtos de construção mais verdes, de viabilidade técnica e económica.

Nos próximos pontos resumem-se as principais conclusões obtidas no trabalho e são sugeridas algumas propostas de desenvolvimento futuro, tendo em consideração o carácter pioneiro e inovador do estudo que foi realizado ao longo do presente trabalho de mestrado.

5.1 Conclusões finais

No presente trabalho foi produzido CR a partir da Termoativação de pastas e betões com a/c de 0,55 tratados a 650 °C. A sua elevada capacidade de reidratação foi demonstrada em trabalhos anteriores inseridos no âmbito projeto EcoHydB. A areia reciclada foi obtida a partir de um método de separação patenteado no IST, tendo sido possível atingir níveis de contaminação de pasta inferiores a 5% em peso. Isso permitiu atingir areias de elevada qualidade com apenas cerca de 2% de absorção em massa. A AR e a AN possuíram a sua granulometria maioritariamente inferior a 500 µm, conforme desejado em cimentos-cola.

A substituição de areia natural por AR teve reduzida influência na exigência de água e tempo de presa da mistura. O aumento do teor de água total da mistura foi essencialmente utilizado na absorção da AR, não afetando as características da matriz ligante. A incorporação de éter de celulose (EC) fez aumentar o teor de ar e o tempo de presa das misturas. A resistência mecânica à compressão e flexão foi pouco afetada pelo tipo de areia, constatando-se inclusivamente uma ligeira melhoria após a incorporação de AR, provavelmente resultante da diminuição do seu a/l efetivo. Quando as misturas foram corrigidas de modo a melhorar a sua aplicabilidade, para a relação a/l e teor de Ec apropriado, obtiveram-se tensões de aderência semelhantes independentemente do tipo de areia utilizada. O comportamento relativo entre misturas foi também pouco afetado pelo tipo de envelhecimento imposto no presente estudo (calor e imersão). As misturas com CPN e diferentes tipos de agregado

apresentaram adequado poder molhante e capacidade de transferência durante pelo menos 20 minutos, satisfazendo os requisitos inicialmente definidos. Apesar das misturas com AR apresentarem uma granulometria mais desfavorável do que AN, o ajuste da composição permitiu que estas apresentassem desempenho semelhante ao das misturas de referência com AN nas várias propriedades analisadas (poder molhante, transferência, tempo de presa, aderência). Foi possível atingir soluções muito satisfatórias com tensão média de aderência entre 7 e 28 dias superiores a 1 MPa, utilizando AN ou AR. Fica demonstrado a viabilidade e o elevado potencial de se utilizar AR em substituição de AN, quando esta é obtida a partir de métodos eficientes de separação, como é o caso do utilizado no presente trabalho e que foi idealizado no âmbito do projeto EcoHydB.

Para consistência semelhante, os cimentos-cola com CR exigiram maiores quantidades de água de mistura, aumentando significativamente a sua relação a/l, tornando-se superior a 40%. No entanto, o teor de vazios foi cerca de metade da dos cimentos-cola com CPN, sugerindo uma maior ineficiência do EC. Isso foi atribuído à elevada adsorção nas partículas de CR de elevada superfície específica e instabilidade do EC utilizado em face das elevadas temperaturas iniciais do CR. A incorporação de CR conduziu a um atraso proporcional do início e fim de presa, resultante das características particulares do próprio CR, do aumento de a/l e da maior adsorção de EC. O aumento de a/l e o menor desenvolvimento a longo prazo de produtos de hidratação no CR, conduziu a reduções na resistência mecânica face às misturas com CPN de cerca de 30%. Essa perda de resistência é menos significativa em idades iniciais.

O desenvolvimento de cimentos-cola 100% reciclados conduziu a soluções com elevada exigência de água e rápida dessecação, tornando difícil a sua aplicabilidade. Para tal, contribui também a menor eficiência do EC. Nestas misturas com 100% CR foi necessário corrigir significativamente a relação a/l e o teor de EC para se alcançar condições razoáveis de aplicabilidade, atingindo-se soluções em que estes fatores foram aumentados em até 76% e 17%, respetivamente, face a CPNAR. Ainda assim, apresentaram sempre os menores valores de aderência, bem como maiores percentagens de rotura por adesão (AFT). Estes cimentos-cola caracterizam-se por ressequecer de forma rápida, perdendo plasticidade ao fim de poucos minutos. Garantiu-se apenas condições aceitáveis de poder molhante e transferência até 10 minutos de tempo de espera e o tempo de presa foi superior a 24 horas. A tensão de aderência, mesmo em condições de não envelhecimento, foi ligeiramente inferior a 0,5 MPa. A elevada exigência de água e perda de trabalhabilidade do CR torna inviável a sua utilização a 100% em cimentos-cola.

Apesar de se ter verificado uma perda generalizada de aderência em todas as misturas após envelhecimento por imersão, que está associado à saponificação das resinas, este fenómeno foi mais relevante nas misturas com 100% CR. Neste caso, o modo de rotura ocorreu praticamente por AFT, indicando que a aderência é essencialmente garantida pela resina.

Experimentando o aumento adicional da relação a/l e teor de Ec, bem como a utilização de água gelada, para contrariar o elevado desenvolvimento de calor de hidratação inicial do CR, foi possível atingir um cimento-cola com características melhoradas de poder molhante, capacidade de transferência e aderência. Entre 7 e 28 dias, foi possível atingir tensões médias de aderência superiores a 0,5 MPa.

No entanto, observaram-se reduções elevadas na tensão de aderência após envelhecimento, conduzindo a tensões de aderência inferiores a 0,25 MPa. Conclui-se assim que a reciclagem total do ligante com 100%CR não é compatível com o desenvolvimento de cimentos-cola comerciais.

Em algumas misturas verificou-se perda de aderência ao longo do tempo, o que poderá estar relacionado com eventuais fenômenos de retração e variações diferenciais entre o cimento-cola e o ladrilho. Neste particular, as misturas com CR, associada a maior a/l e menor rigidez das suas partículas, desenvolvem maiores retrações, tornando-se mais suscetíveis de fissuração.

A incorporação parcial de 50% CR em substituição de CPN aliado à utilização de 100% CR conduziu à solução mais equilibrada em termos de desempenho técnico e de ecoeficiência. Nestas condições, não se confirmou a incompatibilidade e perda de eficiência do EC, permitindo atingir soluções de massa volumica semelhante às misturas de referência com CPN. As resistências à compressão e tração foram pouco afetadas pela incorporação de 50% CR, estando em linha com os resultados obtidos em outros trabalhos anteriores com misturas de base cimenticia constituídas por até 40% de CR.

Para as composições de referência inicialmente sugeridas pela empresa Weber, e que correspondem a cimentos-cola comerciais, apenas as misturas com até 50% CR respeitam os valores mínimos de tensão de aderência indicados na EN 1348 (2007), para condições não envelhecidas, entre 7 e 28 dias.

Após o ajuste de a/l e do teor e tipo de Ec, a aplicabilidade de 50CRAR foi satisfatória até 20 minutos de espera (poder molhante e transferência). Por sua vez, verificou-se que apenas até 50% CR é possível garantir tempos de presa superiores a 24 horas. Nestas condições, a tensão média de aderência foi apenas ligeiramente inferior a 1 MPa, entre 7 e 28 dias de idade. Estes cimentos-cola apresentam ainda um comportamento satisfatório após envelhecimento por imersão e calor, verificando-se perdas relativas semelhantes ao observado nas misturas de referência com CPN.

Conclui-se assim que até 50% de substituição de CR por CPN é viável o desenvolvimento de cimentos-cola comerciais de elevada ecoeficiência, associados as elevadas percentagens de incorporação de material reciclado (50% de ligante mais 100% do agregado).

A substituição de CPN ou CR por 50% FC permitiu melhorar as condições de aplicabilidade, após o devido ajuste de a/l e Ec. A sua utilização promove uma redução no teor de clínquer e na relação a/c equivalente, reduzindo a reatividade da matriz cimenticia. Isso reflete-se no aumento do tempo de presa e na redução da tensão de aderência. A utilização sinérgica de FC e CR permite compensar parte da exigência de água e fraca aplicabilidade proporcionado pelo CR, bem como a fraca reatividade do FC. Isso conduziu a soluções melhoradas face a 100% CR, com tensões de aderência superiores a 0,8 MPa aos 28 dias. No entanto, as misturas com 50%FC e 50%CR não foram capazes de atingir condições de endurecimento viáveis, apresentando tempos de presa superiores a 24 horas. Por outro lado, a incorporação de 50% FC conduziu a reduções elevadas da tensão de aderência após envelhecimento, mostrando a sua elevada dependência da capacidade de adesão e integridade da resina. No futuro deverá ser explorada uma solução ternária com menores percentagens de incorporação de FC e CR em substituição de CPN. Conclui-se ainda, que mesmo em misturas com

CPN, faz sentido explorar a sua substituição parcial por teores de FC inferiores, visto que é possível atingir soluções mais sustentáveis de desempenho adequado.

Na Tabela 24 resumem-se as tendências de evolução dos vários parâmetros analisados em cada uma das composições testadas, face à composição de referência.

Tabela 24 – Tensão de aderência relativa face ao CPNAN

Mistura	1º Fase			2º Fase		
	S/ envelhecimento	C/ envelhecimento		S/ envelhecimento	C/envelhecimento	
		Imersão	Calor		Imersão	Calor
CPNAN	1	1	1	1	1	1
CPNAR	1,09	0,87	0,77	0,80	0,99	0,80
CRAN	0,46	0,19	0,35	-	-	-
CRAR	0,44	0,35	0,28	0,31	0,40	0,35
50CRAR	0,49	0,56	0,40	0,68	0,66	0,64
50FCAN	-	-	-	0,70	0,54	0,64
50CRFCAR	-	-	-	0,63	0,18	0,17
CRARgel	-	-	-	0,50	0,14	0,18

5.2 Desenvolvimentos futuros

Dado que a pesquisa neste campo está numa fase embrionária e sendo este trabalho um dos primeiros estudos realizados no âmbito da incorporação de CR em cimentos-cola, são ainda vários os assuntos a explorar e que justificam a sua investigação. Entre outros possíveis assuntos sugerem-se os seguintes desenvolvimentos possíveis no domínio deste trabalho:

- Análise de alternativas que visem a redução dos aspetos negativos associados à elevada exigência de água dos CR.
- Estudo de diferentes percentagens de incorporação de CR, inferiores a 50%, de modo a obter composições otimizadas de cimentos cola.
- Análise de outras propriedades dos cimentos cola com CR, como é exemplo do deslizamento, tempo aberto, deformabilidade, aderência à tração após ciclos de gelo-degelo.
- Análise de vida útil dos cimentos cola com CR e aferição dos modelos existentes para cimentos cola correntes produzidos com CEM I.
- Aplicação à indústria da produção laboratorial de CR.

6. Bibliografia

- Al-Bayati, H., Das, P., Tighe, S., Baaj, H. Evaluation of Various Treatment Methods for Enhancing the Physical and Morphological Properties of Coarse Recycled Concrete Aggregate. *Construction and Building Materials* 112: 284–98. 2016;
- RNC2050. Roteiro Para a Neutralidade Carbónica. República Portuguesa 2050: 9– 24. 2018;
- ATIC. Roteiro nacional para a descarbonização da indústria cimenteira. Associação técnica da indústria do Cimento. 53(3): 285– 96. 2019;
- Baldusco, R., Nobre, T., Angulo, S., Quarcioni, V., Cincotto, M., Dehydration and Rehydration of Blast Furnace Slag Cement. *Journal of Materials in Civil Engineering* 31(8): 04019132. 2019;
- Baldusco, R., Nobre, T., Angulo, S., Quarcioni, V. Reatividade E Resistência Mecânica De Pastas Reidratadas De Cimento De Alto Forno (2). 2017;
- Bayer, R., Lutz H. DryMortar. *Master Builders* 1: 74–94. 2006;
- Bogas, J. A., Carriço, A., Pereira, M. Mechanical Characterization of Thermal Activated Low-Carbon Recycled Cement Mortars. *Journal of Cleaner Production* 218: 377–89. 2019;
- Bogas, J. A., Carriço, A., Tenza-Abril, A. Microstructure of Thermoactivated Recycled Cement Pastes. *Cement and Concrete Research* 138 (September): 106226. 2022;
- Bogas, J. A., Carriço, A., Hu, S., Real, S., Pereira, M. Novel Separation Process for Obtaining Recycled Cement and High-Quality Recycled Sand from Waste Hardened Concrete. *Journal of Cleaner Production* 309: 127375. 2021;
- Bogas, J. A., Carriço, A., Guedes, M. Thermoactivated Cementitious Materials – A Review. *Construction and Building Materials* 250. 2020;
- Bogas, J. A., Carriço, A., Real, S., Pereira, M. Mortars with Thermo Activated Recycled Cement: Fresh and Mechanical Characterisation. *Construction and Building Materials* 256. 2020;
- Carvalho, M. Caracterização de Pastas Produzidas Com Cimento Reciclado Sujeito a Diferentes Temperaturas de Termoativação. Miguel Alexandre Filipe Caetano de Carvalho. 2020;
- Mendes. C. Análise Mecânica De Argamassas De Ligante Orgânico. 1– 135. 2017;
- Domone, P., Soutsos. M. *Construction Materials - Their Nature and Behaviour*. Fifth edit. 2018;
- The European Green Deal. 2019;
- F.Birol. *Technology Roadmap for Cement*. International Energy Agency. 66. 2018;
- Leal, F. Durabilidade de Betões Produzidos Com Cimento Reciclado *Engenharia Civil*. 2021;
- Flores-Colen, I., Brito, J. *Materials for Construction and Civil Engineering: Science, Processing, and Design Renders*. 2015;

Fragoso, S. Estudo de adjuvantes orgânicos no impacto de aderências em argamassas-cola. Tese de dissertação em Engenharia Química. Universidade de Aveiro. 2020;

Glatthor, A. Performance of Starch Ethers in Drymix Mortars Performance of Starch Ethers in DrymixMortars. (December): 1–3. 2016;

Heikal, M. Effect of Calcium Formate as an Accelerator on the Physicochemical and Mechanical Properties of Pozzolanic Cement Pastes. *Cement and Concrete Research* 34 (6): 1051– 56. 2004;

Henriques, M., A. Apontamentos Das Aulas de Materiais de Construção II. Faculdade de Ciências e Tecnologias, Universidade Nova de Lisboa. 2014;

Hu, S. Separação de Constituintes Do Betão Visando a Obtenção de Cimentos Reciclados. Tese de mestrado em Engenharia Civil. Instituto Superior Técnico. Universidade de Lisboa. 2019;

Bogas, J. A., Carriço, A., Real, S. Thermoactivated Recycled Cement. *We Are Intech Open, the World's Leading Publisher of Open Access Books Built by Scientists, for Scientists* 13. 2021;

Jiang, T., Duan, Q., Zhu, J., Liu, H., Yu, L. Starch-Based Biodegradable Materials: Challenges and Opportunities. *Advanced Industrial and Engineering Polymer Research* 3(1): 8–18. 2020;

Kaliyavaradhan, S., Ling, T. Potential of CO₂ Sequestration through Construction and Demolition (C&D) Waste - An Overview. *Journal of CO₂ Utilization* 20(May): 234–42. 2017;

Ramachandran, K. Feldman, R. Preface to the Second Edition. *Quantum Information Processing: Second Edition*. 2005;

Li, G, Hu, Y., Zang, X. Design and Analysis of Offset Printing Press Plate Cylinder Using Finite Element-Method. *Proceedings of the 2nd International Conference on Modelling and Simulation, ICMS2009* 7: 537–40. 2009;

Lin, D., Wambersie, L., Wackernagel, M. Estimating the Date of Earth Overshoot Day 2021. (May): 12. 2021;

Baoguo, M., Lei, S., Shouwei, j., Song, X. Early Stage Hydration Mechanism of Cellulose Ether Modified Thin Layer Cement Pastes.” *Journal Wuhan University of Technology, Materials Science Edition* 27(6):1172–76. 2012;

Tattersall, G., Banfill, P. The Rheology of Fresh Concrete. *Canadian Journal of Civil Engineering* 11(1):135–135.1984;

Mansur, A., Nascimento, O., Mansur, H. Physico-Chemical Characterization of EVA-Modified Mortar and Porcelain Tiles Interfaces. *Cement and Concrete Research* 39(12): 1199–1208. 2009;

Mazurana, L., Bittencourt, P., Scremin, F., Junoir, A., Possan, E. Determination of Co₂ Capture in Rendering Mortars Produced with Recycled Construction and Demolition Waste by Thermogravimetry. *Journal of Thermal Analysis and Calorimetry* 147(2): 1071–80. 2022;

Hua, O., Guo, M., Wei, J. Influence of Cellulose Ethers Molecular Parameters on Hydration Kinetics of Portland Cement at Early Ages. *Construction and Building Materials* 33: 78–83. 2012;

- Patural, L., Marchal, P., Govin, A., Grosseau, P., Ruot, B., Devès, O. Cellulose Ethers Influence on Water Retention and Consistency in Cement-Based Mortars. *Cement and Concrete Research* 41(1): 46–55. 2011;
- Phan, V. Relationship between the Adhesive Properties and the Rheological Behavior of Fresh Mortar. 2013;
- Pichniarczyk, P., Niziurska, M. Properties of Ceramic Tile Adhesives Modified by Different Viscosity Hydroxypropyl Methylcellulose. *Construction and Building Materials* 77: 227–32. 2015;
- Bogas, J. A., Carriço, A., Hu, S., Real, S. Mechanical Characterisation and Shrinkage of Thermoactivated Recycled Cement Concrete. *Applied Sciences (Switzerland)* 11(6). 2021;
- Bogas, J. A., Carriço, A., Guedes, M., Real, S. Influence of the Treatment Temperature on the Microstructure and Hydration Behavior of Thermoactivated Recycled Cement. *Materials* 13(18). 2020;
- Scrivener, K. Eco-Efficient Cements: No Magic Bullet Needed. *Global Cement Magazine (September)*: 10–14. 2019;
- Serpell, R., Lopez, M. Properties of Mortars Produced with Reactivated Cementitious Materials. *Cement and Concrete Composites* 64: 16–26. 2015;
- Shui, Z., Xuan, D., Chen, W., Yu, R., Zhang, R. Cementitious Characteristics of Hydrated Cement Paste Subjected to Various Dehydration Temperatures. *Construction and Building Materials* 23(1): 531–37. 2009;
- Zhonghe, S., Xuan, D., Wan, H., Cao, B., 2008. Rehydration Reactivity of Recycled Mortar from Concrete Waste Experienced to Thermal Treatment. *Construction and Building Materials* 22(8): 1723–29. 2008;
- Sousa, V., Bogas, J. A. Comparison of Energy Consumption and Carbon Emissions from Clinker and Recycled Cement Production. *Journal of Cleaner Production* 306. 2021;
- Tam, C., Taylor, M., Gielen, D., Twigg, C., Klee, H., Rocha, P., Der, M. Cement Technology Roadmap. Carbon Emissions Reductions up to 2050. 2009;
- Vyšvarčil, M., Bayer, P., Chromá, M., Rovnaníková, P. Physico-Mechanical and Microstructural Properties of Rehydrated Blended Cement Pastes. *Construction and Building Materials* 54: 413– 20. 2014;
- Wang, J., Mu, M., Liu, Y. Recycled Cement. *Construction and Building Materials* 190: 1124– 32. 2018;
- Zhang, Li., Ji, Y., Huang, G., Li, J., Hu, Y. Modification and Enhancement of Mechanical Properties of Dehydrated Cement Paste Using Ground Granulated Blast-Furnace Slag. *Construction and Building Materials* 164: 525– 34. 2018;

Documentos normativos

- NP EN 196-1. Métodos de ensaio de cimentos. Parte 1: Determinação das resistências mecânicas , 2006;

EN 1097-6. Ensaio das propriedades mecânicas e físicas dos agregados. Parte 6: Determinação da massa volúmica e da absorção de água, 2003;

EN 12004-2. *Adhesives for ceramic tiles - Part 2: Test methods*, 2017;

EN 1348. *Adhesives for tiles - Determination of wetting capability*, 2007;

NP EN 1015-3. *Métodos de testagem de argamassas de assentamento, Determinação da consistência de argamassas no estado fresco*, 2006;

NP EN 1015-6. *Métodos de testagem de argamassas de assentamento - Parte 6 - Densidade aparente de argamassa fresca*, 2006;

NP EN 12004. *Colas para ladrilhos - Requisitos, avaliação de conformidade, classificação e designação*, 2008;

NP EN 12620. *Agregados para betão*, 2003;

NP EN 1348. *Colas para ladrilhos, Determinação da resistência à tração de cimentos-cola*, 2000;

NP EN 196-1. *Métodos de ensaio de cimentos. Parte 1: Determinação das resistências mecânicas*, 2006;

NP EN 196-3. *Métodos de ensaio de cimentos. Parte 3: Determinação de tempos de presa e da expansibilidade*, 2005;

Patentes

WO2021173022. Processo de separação dos componentes de resíduos do betão endurecido para obtenção de cimento reciclado-PAMPH-20210902-6354

7. Anexos

Anexos I – Fichas técnicas

HEAD 赫达

SHANDONG HEAD CO.,LTD.
ZHOUJUN,ZIBO,SHANDONG
P.R.CHINA

T:+865333190661
F:+865333190551

sale@sdhead.com
www.sdhead.com

Technical Data Sheet

Product Description

HEAD CF98 Calcium Formate is one functional additive, which can be used as acceleration concreting for cement in winter time. For dry-mix system, it can accelerate the cement hardening rate, shorten the coagulation time to avoid condensation at low temperatures.

Key properties

It can make the tile adhesive:
secures superior all around performance,
Prolongs open time,
Accelerates hardening
increases adhesion strenght

Appearance	White or little yellow crystal material
Purity	≥98%
Total calcium content	≥30%
Molsture	≤0.5%
pH (10% solu.)	6.5-7.5
Water insoluble	≤0.2%

Packaging and Storage

Standard Packing: In 25kg paper bags inner with plastic woven bag.
Store it in dry condition, and storage time should not exceed twelve months.

Safety notes

The above date is in accordance with our knowledge, but don't absolve the clients carefully checking it all immediately on receipt. To avoid the different formulation and different raw materials, please do more testing before using it. We reserve the right to alter our product and without informing in advance.

The information supplied is presented in good faith and has been derived from sources believed to be reliable. Since conditions of use are beyond our control, all risks are assumed by the user. No representation is expressed or implied, and nothing herein shall be construed as permission or recommendation to practice a patented invention without license.

Figura A.1 - Acelerador de presa



WALOCEL™ MKX 20000 PP 10
Modified Hydroxyethyl Methyl Cellulose

Introduction

WALOCEL™ MKX 20000 PP 10 modified hydroxyethyl methyl cellulose is designed for cement-based applications, such as skim coats, repair mortars, cement-based tile adhesives and the cementitious parts of an exterior insulation and finish system (EIFS). It imparts well-balanced properties, including open time, slip resistance, adhesion, good impact resistance and shear strength according to different storage conditions. WALOCEL™ MKX 20000 PP 10 also adds good workability and enhances water retention. The selected particle size distribution offers quick, lump-free dissolution. It is compatible with all conventional mineral and organic binders.

Typical Physical Properties

These properties are typical but should not be considered specifications.

Form	Powder
Solubility	Water soluble
Viscosity ⁽¹⁾ , mPa·s	15,000 - 25,000
pH (2% solution)	Neutral
Moisture content, %, max.	7

⁽¹⁾2% solution in water, Hsake Rotovisko RV 100, shear rate 2.55s⁻¹, 20°C

Health and Safety Considerations

WALOCEL™ products have had extensive evaluation in both acute and long-term studies in a number of species, including humans. Their many years of use attest to their safety in a wide variety of applications. While the dust may cause mechanical irritation to the skin and eyes under extreme conditions, the products are considered to present no significant health hazard under normal handling conditions.

Flammability

Cellulose ether products are organic polymers that will burn when exposed to heat and a sufficient oxygen supply. Fires can be extinguished by conventional means avoiding any raising of dust by strong water jets. Dow recommends the use of water spray, carbon dioxide or powder extinguishers.

Handling

During use or storage, safe handling is required to prevent dust with air from reaching explosive levels as is true with other organic materials of similar particle size. When handling large quantities, local applicable regulations concerning the prevention of dust explosions or those outlined in the National Fire Protection Association (NFPA) Standard: "Prevention of Dust Explosions in Industrial Plants" should be followed. With cellulose ethers, the critical level may be reached at about 28 grams dust/m³. Additionally, WALOCEL™ products, like other organic chemicals, should not be stored next to peroxides or other oxidizing agents.

Spills/ Housekeeping

Solutions of WALOCEL™ products are slippery. To prevent accidents, floor spills of dry powder should be swept up dry. If the spill is a viscous solution, it should be removed by further diluting with water before disposal.

Disposal

WALOCEL™ cellulose ether products present no significant ecological problems. Typically, they can be disposed of by industrial incineration or in an approved landfill, providing regulations are observed. Customers are advised to review their local, state, provincial or national regulations governing the disposal of waste materials to confirm the appropriate means of disposal in their area.

Figura A.2 - Éter de celulose 20000 - Página 1

Product Stewardship

Dow has a fundamental concern for all who make, distribute and use its products, and for the environment in which we live. This concern is the basis for our product stewardship philosophy by which we assess the safety, health and environmental information on our products and then take appropriate steps to protect employee and public health and our environment. The success of our product stewardship program rests with each and every individual involved with Dow products – from the initial concept and research to manufacture, use, sale, disposal and recycle of each product.

Customer Notice

Dow strongly encourages its customers to review both their manufacturing processes and their applications of Dow products from the standpoint of human health and environmental quality to ensure that Dow products are not used in ways for which they are not intended or tested. Dow personnel are available to answer your questions and to provide reasonable technical support. Dow product literature, including safety data sheets, should be consulted prior to use of Dow products. Current safety data sheets are available from Dow.

Disclaimer

NOTICE: No freedom from infringement of any patent owned by Dow or others is to be inferred. Because use conditions and applicable laws may differ from one location to another and may change with time, the Customer is responsible for determining whether products and the information in this document are appropriate for the Customer's use and for ensuring that the Customer's workplace and disposal practices are in compliance with applicable laws and other governmental enactments. The product shown in this literature may not be available for sale and/or available in all geographies where Dow is represented. The claims made may not have been approved for use in all countries. Dow assumes no obligation or liability for the information in this document. References to "Dow" or the "Company" mean the Dow legal entity selling the products to Customer unless otherwise expressly noted.

NO WARRANTIES ARE GIVEN; ALL IMPLIED WARRANTIES OF MERCHANTABILITY OR FITNESS FOR A PARTICULAR PURPOSE ARE EXPRESSLY EXCLUDED.

The Dow Chemical Company
www.dowconstructionchemicals.com
215-592-3000



Figura A.343 - Éter de celulose 20000 – Página 2



Technical Data Sheet

WALOCEL™ MKX 60000 PF 01

Hydroxyethyl Methyl Cellulose

Description

WALOCEL™ MKX 60000 PF 01 hydroxyethyl methyl cellulose offers excellent water retention at low dosage rates and imparts lubricity in cement-based applications such as fiber cement, thin bed mortars and cement-based tile adhesives. It imparts well-balanced properties, including open time, adhesion and shear strength. WALOCEL™ MKX 60000 PF 01 also adds good workability and enhances water retention. The selected particle size distribution provides quick, lump-free dissolution. It is compatible with all conventional mineral and organic binders.

Applications

- Fiber cement
- Thin bed mortars
- Cement-based tile adhesives

Benefits

- Quick or lump-free dissolution
- Open time
- Excellent adhesion and shear strength
- Compatible with all conventional mineral and organic binders
- Easy workability
- Excellent water retention at low dosages rates
- Imparts lubricity in fiber cement extrusion applications

Physical properties

Appearance	White powder
Solubility	Water soluble
Viscosity (1%, mPars)	50000
pH (2% solution)	Neutral
Moisture content, % max.	7

(1.0% solution in water, Haake Rotovisko RV 100, shear rate 2.55e+1, 20°C
These properties are typical but should not be considered specifications. For detailed specification rates please consult the product Certificate of Analysis.

Health & safety considerations

Safety Data Sheets (SDS) is available from The Dow Chemical Company. SDS is provided to help customers satisfy their own handling, safety and disposal needs and those that may be required by locally applicable health and safety regulations. SDS is updated regularly, therefore, please request and review the most current SDS before handling or using any product.

WALOCEL™ products have had extensive evaluation in both acute and long-term studies in a number of species, including humans. Their many years of use attest to their safety in a wide variety of applications. While the dust may cause mechanical irritation to the skin and eyes under extreme conditions, the products are considered to present no significant health hazard under normal handling conditions.

- May be shared with anyone

Figura 44 - Éter de celulose 60000 – Página 1

Handling & storage

Cellulose ether products are organic polymers that will burn when exposed to heat and a sufficient oxygen supply. Fires can be extinguished by conventional means, avoiding any raising of dust by strong water jets. Dow recommends the use of water spray, carbon dioxide or powder extinguishers.

During use or storage, safe handling is required to prevent dust with air from reaching explosive levels, as is true with other organic materials of similar particle size. When handling large quantities, local applicable regulations concerning the prevention of dust explosions should be followed. With cellulose ethers, the critical level may be reached at about 28 grams dust/m³. Additionally, WALOCEL™ products, like other organic chemicals, should not be stored next to peroxides or other oxidizing agents.

Solutions of WALOCEL™ products are slippery. To prevent accidents, floor spills of dry powder should be swept up dry. If the spill is a viscous solution, it should be removed by further diluting with water before disposal.

WALOCEL™ cellulose ether products present no significant ecological problems. Typically, they can be disposed of by industrial incineration or in an approved landfill, providing regulations are observed. Customers are advised to review their local, state, provincial, or national regulations governing the disposal of waste materials to confirm the appropriate means of disposal in their area.

Product stewardship

Dow has a fundamental concern for all who make, distribute and use its products, and for the environment in which we live. This concern is the basis for our product stewardship philosophy by which we assess the safety, health and environmental information on our products and then take appropriate steps to protect employee and public health and our environment. The success of our product stewardship program rests with each and every individual involved with Dow products – from the initial concept and research to manufacture, use, sale, disposal and recycle of each product.

Customer notice

Dow strongly encourages its customers to review both their manufacturing processes and their applications of Dow products from the standpoint of human health and environmental quality to ensure that Dow products are not used in ways for which they are not intended or tested. Dow personnel are available to answer your questions and to provide reasonable technical support. Dow product literature, including safety data sheets, should be consulted prior to use of Dow products. Current safety data sheets are available from Dow.

For further information contact:
North America: +800-753-825 (free)
Europe, India, Africa, Middle East:
+800-5-494-0367 (free)
America Latina: +55-11-5189-6800
Pacific: +800-7776-7776 (free)

<http://www.dow.com>

Disclaimer: No freedom from infringement of any patent owned by Dow or others is to be inferred. Because use conditions and applicable laws may differ from one location to another and may change with time, the Customer is responsible for determining whether products and the information in this document are appropriate for the Customer's use and for ensuring that the Customer's workplace and disposal practices are in compliance with applicable laws and other governmental enactments. The product shown in this literature may not be available for sale and/or available in all geographies where Dow is represented. The claims made may not have been approved for use in all countries. Dow assumes no obligation or liability for the information in this document. References to "Dow" or the "Company" mean the Dow legal entity selling the products to Customer unless otherwise expressly noted.

NO WARRANTIES ARE GIVEN. ALL IMPLIED WARRANTIES OF MERCHANTABILITY OR FITNESS FOR A PARTICULAR PURPOSE ARE EXPRESSLY EXCLUDED.



*Trademark of The Dow Chemical Company.

Form No. 832-00071

Figura 45 - Éter de celulose 60000 – Página 2

Tylovis SE 7

Starch ether

Product Specification

<u>Item</u>	<u>Specification</u>	<u>Unit</u>	<u>Method</u>
Texture/Physical form	powder		
Solubility	soluble in water		
Ionicity	nonionic		
Moisture, as packed	max. 6	%	13130
Particle size			
<0.300 mm (through 50 mesh)	min. 95	%	13010
<0.100 mm (through 140 mesh)	min. 50	%	13010
Viscosity	150 - 300	mPas	13483
5% as is, 20°C, tap-water (approx. 18°GH), Brookfield RV, 100 rpm, sp. 3			

Remarks: PACKAGING AND STORAGE

Tylovis SE 7 is supplied in multi-ply paper bags with polyethylene intermediate layer, containing 25 kg; shrink packaging is available by ordering a minimum quantity of 1000 kg.
If stored in closed bags under dry conditions, Tylovis SE 7 has a long shelf life.

Product Code : 109117

Version : 1
Date of Issue : 20.06.2002

This product specification would cease to be binding if the customer has not purchased the product during the preceding 12 months. This information is based on our present state of knowledge and is intended to provide general notes on our products and their uses. It should therefore not be construed as guaranteeing specific properties of the products described or their suitability for a particular application. Any existing industrial rights must be observed. This Product Specification is not signed. If you have any questions, please contact SE Tylose GmbH & Co. KG, Quality Assurance, D-60174 Wiesbaden, Germany, email: frank.kittling@se-tylose.de

Tylovis SE 7 - 109117 Revision: 1

Page 1

Figura A.6 - Éter de amido

VINNAPAS® 4023 N

Product description

VINNAPAS® 4023 N is a copolymer powder of vinyl acetate and ethylene. It is dispersible in water and has good saponification resistance.

Properties

Compounds modified with VINNAPAS® 4023 N exhibit improved adhesion and cohesion strength, flexural strength, abrasion resistance and workability. VINNAPAS® 4023 N contains fine mineral additives as anti blocking agent. It is free of solvents, plasticizers and film-forming agents.

Special features

VINNAPAS® 4023 N is a general-purpose powder with neutral rheological properties. The powder has low emissions with relative high flexibility. It has good adhesion strength on inorganic or organic substrate, which is suitable for formulating compounds of good flexibility and high adhesion strength with organic or inorganic materials.

Application

Typical applications for VINNAPAS® 4023 N are: as an organic binder which can be blended with inorganic binders, such as cement, gypsum and/or hydrated lime, fillers and additives for manufacture of new building materials, such as adhesive and embedding mortar for EIFS, tile adhesives, internal and external skim coats, self leveling compounds, repair mortar, etc.

Application	Sub-application	Suitability
EIFS	Adhesive mortars	●●●
	Embedding mortars	●●●
Revelation mortars	Organic light material	●●●
	Organic light material free	●●●
Tile adhesives EN12004/EN2002 C1/C2	Thin bed mortars	●●●
	Thin bed mortars, flexible	●●●
Skim Coats	Indoor	●●●
	Outdoor	●●●
Thin bed adhesives	Heavy substrate	●●●
	Light substrate (astro concrete)	●●●
Grout mortars	Tile grout	●●
	Wall grout	●●●
Gypsum applications	Plaster	●●
	Joint filler	●●
	Adhesive mortars	●●
Floor / wall leveling compounds	Fine leveling compounds	●●
	Coarse leveling compounds	●●
Joint mortars	Indoor	●●
	Outdoor	●●
Concrete repair mortars	Key coat / Middle layer / Finish coat	●●
	Plasters	Thin bed plasters
Decorative mortars		●
Self leveling compounds	cement based	●●
	Gypsum based	●●
Sealing slurry	Right sealing slurry	●
Powder paint	Polymer modified cement based powder paint	●

● Suitable ●● recommended ●●● highly recommended

Processing

For producing ready-mixed compounds, such as dry-mix mortars, VINNAPAS® 4023 N is blended with other dry ingredients in appropriate equipment. Excessive temperatures should be avoided during mixing. The ready-mixed dry mortar can be applied by hand or machine after mixing with right amount of mortar.

Storage

VINNAPAS® 4023 N should be stored under cool and dry area. Storage time should not exceed 6 months

Figura A.7 – Resina – Página 1

from the receipt of delivery. Since the product is thermoplastic, double stack of pallets should be avoided during storage. In order to avoid caking problem, it should avoid high temperature, humidity and pressure during storage for long-term. When slight caking happens under poor storage or transportation conditions, the powder can be used as usual if the blocks can be crushed into original powder easily.

Packaging

25 kg paper bags.
Big Bags (1 Ton).

Additional Information

If VINNAPAS® 4023 N is used in applications other

than those mentioned, the choice, processing and use of VINNAPAS® 4023 N is the sole responsibility of the purchaser. All legal and other regulations must be complied with.

Slight discoloration may occur without impairing the product's functionality.

Safety notes

Comprehensive instructions are given in the corresponding Material Safety Data Sheets. They are available on request from WACKER sales offices or may be printed via WACKER web site www.wacker.com/vinnapas.

Product data		
Specification data	Inspection Method	Value
Solids content	EN ISO 3251	98 - 100 %
Ash Content	WACKER method	8 - 13 %
Bulk density	DIN EN ISO 60	470 - 670 kg/m ³
Typical general characteristics		
	Inspection Method	Value
Appearance	Visual	white to pale yellow powder
Protective colloid / emulsifier system	WACKER method	polyvinyl alcohol
Particle size	DIN EN ISO 4810	Max. 4 % over 400 µm
Predominant particle size redispersion	WACKER method	0.5 - 8 µm
Minimum film forming temperature	DIN ISO 2115	1 °C
Film properties of the redispersion	WACKER method	cloudy, tough-elastic

These figures are only intended as a guide and should not be used in preparing specifications.

The data presented in this leaflet are in accordance with the present state of our knowledge, but do not absolve the user from carefully checking all supplies immediately on receipt. We reserve the right to alter product constants within the scope of technical progress or new developments. The recommendations made in this leaflet should be checked by preliminary trials because of conditions during processing over which we have no control, especially where other companies' raw materials are also being used. The recommendations do not absolve the user from the obligation of investigating the suitability of infringement of third parties' rights and, if necessary, clarifying the position. Recommendations for use do not constitute a warranty, either express or implied, of the fitness or suitability of the products for a particular purpose.

The management system has been certified according to DIN EN ISO 9001 and DIN EN ISO 14001

WACKER is a trademark of Wacker Chemie AG.
VINNAPAS® is a trademark of Wacker Chemie AG.

For technical, quality or product safety questions, please contact

Wacker Chemie AG
Hans-Joachim Post 4
81737 München, Germany

Anexos II – Resultados 1ª fase:

Anexo II.1 - Resistência à flexão e compressão

Compressão

Tabela A.1 - Resistência à compressão aos 7 dias – Diferentes amostras

Misturas	a/l	F _{cm} (7 dias)			F _{c,amostras} (7dias)			
CPNAN	0,66	2,3	2,3	2,1	2,0	2,4	-	-
CPNAR	0,68	3,76	3,76	3,74	3,78	-	-	-
CRAN	0,95	1,92	3,22	2,92	2,00	-	-	-
CRAR	1	3,04	5,14	6,24	4,45	4,74	4,28	4,34
50CRAR	0,8	3,09	5,04	4,98	4,55	5,22	4,49	5,34

Tabela A.2 - Anexo amostras de resistência à compressão aos 28 dias

Misturas	a/l	F _{cm} (28 dias)			F _{c,amostras} (28dias)			
CPNAN	0,66	4,3	4,09	4,69	4,25	-	-	-
CPNAR	0,68	5,5	4,9	5,79	5,76	5,45	-	-
CRAN	0,95	3,3	3,21	3,41	3,26	3,26	-	-
CRAR	1	3,9	3,58	3,58	4,03	4,18	4,81	3,43
50CRAR	0,8	4,2	3,16	4,19	4,76	4,26	4,12	4,84

Flexão

Tabela A.3 - Resistência à flexão aos 7 dias – Diferentes amostras

Misturas	a/l	F _{cm} (7 dias)			F _{c,amostras} (7dias)			
CPNAN	0,66	1,69	1,69	-	-	-	-	-
CPNAR	0,68	1,62	1,62	-	-	-	-	-
CRAN	0,95	0,43	0,43	-	-	-	-	-
CRAR	1	1,4	0,62	0,61	0,56	-	-	-
50CRAR	0,8	1,43	0,58	0,61	0,65	-	-	-

Tabela A.4 - Resistência à flexão aos 28 dias – Diferentes amostras

Misturas	a/l	F _{cm} (7 dias)			F _{c,amostras} (28dias)			
CPNAN	0,66	1,97	2,08	1,84	1,99	-	-	-
CPNAR	0,68	2,39	2,43	2,34	2,40	-	-	-
CRAN	0,95	1,47	1,41	1,52	1,49	-	-	-
CRAR	1	1,77	1,72	1,92	1,65	-	-	-
50CRAR	0,8	2,12	2,14	2,27	1,93	-	-	-

Anexos II.2 - Aderência por Pull-off sem envelhecimento

7 Dias

Tabela A.5 - Tensão de aderência e modo de rotura sem envelhecimento aos 7 dias (Valores médios - 1ªfase)

Pull-off sem envelhecimento 1ªfase			
Mistura	σ_m (Mpa)	Tipo de rotura	Dias
CPNAN	1,31	85 CFA 15 AFT	7
CPNAR	1,24	70 CFA 30 AFT	7
CRAN	0,48	70 AFT 30 CFA	7
CRAR	0,29	80 AFT 20 CFA	7
50CRAR	0,73	60 AFT 40 CFA	7

Tabela A.6 - Tensão de aderência e modo de rotura sem envelhecimento aos 7 dias (1ªfase – Diferentes amostras)

Mistura	1ªamostra			2ªamostra		
	Tipo de rotura		σ_m (MPa)	Tipo de rotura		σ_m (MPa)
CPNAN	80 CFA	20 AFT	1,31	85 CFA	15 AFT	1,28
CPNAR	75 CFA	25 AFT	1,23	70 CFA	30 AFT	1,26
CRAN	65 AFT	35 CFA	0,45	70 AFT	30 CFA	0,51
CRAR	75 AFT	25 CFA	0,28	75 AFT	25 CFA	0,28
50CRAR	60 AFT	40 CFA	0,7	60 AFT	40 CFA	0,76

Mistura	3ªamostra			4ªamostra		
	Tipo de rotura		σ_m (MPa)	Tipo de rotura		σ_m (MPa)
CPNAN	85 CFA	15 AFT	1,33	85 CFA	15 AFT	1,31
CPNAR	65 CFA	25 AFT	1,25	70 CFA	30 AFT	1,23
CRAN	70 AFT	30 CFA	0,47	65 AFT	35 CFA	0,48
CRAR	85 AFT	15 CFA	0,31	80 AFT	20 CFA	0,3
50CRAR	60 AFT	40 CFA	0,74	60 AFT	40 CFA	0,72

14 Dias

Tabela A.7 - Tensão de aderência e modo de rotura sem envelhecimento aos 14 dias (Valores médios - 1ª fase)

Pull-off sem envelhecimento 1ª fase			
Mistura	σ_m (Mpa)	Tipo de rotura	Dias
CPNAN	1,31	90 CFA 10 AFT	14
CPNAR	1,07	80 CFA 20 AFT	14
CRAN	0,39	60 AFT 40 CFA	14
CRAR	0,47	60 AFT 40 CFA	14
50CRAR	0,62	55 AFT 45 CFA	14

Tabela A.8 - Tensão de aderência e modo de rotura sem envelhecimento aos 14 dias (1ª fase – Diferentes amostras)

Mistura	1ª amostra			2ª amostra		
	Tipo de rotura		σ_m (MPa)	Tipo de rotura		σ_m (MPa)
CPNAN	90 CFA	10 AFT	1,32	90 CFA	10 AFT	1,33
CPNAR	80 CFA	20 AFT	1,07	80 CFA	15 AFT	1,05
CRAN	55 AFT	45 CFA	0,35	65 AFT	35 CFA	0,41
CRAR	60 AFT	40 CFA	0,45	55 AFT	40 CFA	0,47
50CRAR	55 AFT	45 CFA	0,6	60 AFT	40 CFA	0,61

Mistura	3ª amostra			4ª amostra		
	Tipo de rotura		σ_m (MPa)	Tipo de rotura		σ_m (MPa)
CPNAN	85 CFA	15 AFT	1,29	90 CFA	10 AFT	1,3
CPNAR	75 CFA	20 AFT	1,1	85 CFA	20 AFT	1,04
CRAN	60 AFT	40 CFA	0,38	60 AFT	40 CFA	0,4
CRAR	65 AFT	40 CFA	0,46	60 AFT	35 CFA	0,49
50CRAR	55 AFT	45 CFA	0,62	55 AFT	45 CFA	0,64

28 Dias

Tabela A.9 - Tensão de aderência e modo de rotura sem envelhecimento aos 28 dias (Valores médios - 1ª fase)

Pull-off sem envelhecimento 1ª fase			
Mistura	σ_m (Mpa)	Tipo de rotura	Dias
CPNAN	1,08	90 CFA 10 AFT	28
CPNAR	1,18	80 CFA 20 AFT	28
CRAN	0,5	80 CFA 20 AFT	28
CRAR	0,48	80 CFA 20 AFT	28
50CRAR	0,53	55 AFT 45 CFA	28

Tabela A.10 - Tensão de aderência e modo de rotura sem envelhecimento aos 14 dias (1ª fase – Diferentes amostras)

Mistura	1ª amostra			2ª amostra		
	Tipo de rotura		σ_m (MPa)	Tipo de rotura		σ_m (MPa)
CPNAN	90 CFA	10 AFT	1,04	90 CFA	10 AFT	1,09
CPNAR	80 CFA	20 AFT	1,15	75 CFA	25 AFT	1,16
CRAN	80 CFA	20 AFT	0,48	80 CFA	20 AFT	0,51
CRAR	75 CFA	25 AFT	0,47	80 CFA	20 AFT	0,49
50CRAR	55 AFT	45 CFA	0,53	60 AFT	40 CFA	0,55
Mistura	3ª amostra			4ª amostra		
	Tipo de rotura		σ_m (MPa)	Tipo de rotura		σ_m (MPa)
CPNAN	95 CFA	5 AFT	1,1	90 CFA	10 AFT	1,1
CPNAR	85CFA	15 AFT	1,2	80 CFA	20 AFT	1,19
CRAN	85CFA	15 AFT	0,5	75 CFA	25 AFT	0,51
CRAR	80CFA	20 AFT	0,51	75 CFA	25 AFT	0,45
50CRAR	55 AFT	45 CFA	0,51	55 AFT	45 CFA	0,52

Anexos II.3 - Aderência por Pull-off com envelhecimento após imersão

28 Dias

Tabela A.11 - Tensão de aderência e modo de rotura com envelhecimento após imersão aos 28 dias
(Valores médios - 1ªfase)

Pull OFF com envelhecimento à imersão 1ªfase			
Mistura	σ_m (Mpa)	Tipo de rotura	Dias
CPNAN	0,91	65 CFA 35 AFT	28
CPNAR	0,79	70 CFA 30 AFT	28
CRAN	0,17	100 AFT	28
CRAR	0,32	98 AFT 2 CFA	28
50CRAR	0,51	60 CFA 40 AFT	28

Tabela A.12 - Tensão de aderência e modo de rotura com envelhecimento após imersão aos 28 dias
(1ªfase – Diferentes amostras)

Mistura	1ªamostra			2ªamostra		
	Tipo de rotura		σ_m (MPa)	Tipo de rotura		σ_m (MPa)
CPNAN	65 CFA	35 AFT	0,9	60 CFA	35 AFT	0,92
CPNAR	70 CFA	30 AFT	0,78	65 CFA	35 AFT	0,73
CRAN	100 AFT	0	0,15	100 AFT	0	0,17
CRAR	100 AFT	0	0,31	95 AFT	5 CFA	0,3
50CRAR	60 CFA	40 AFT	0,51	55 CFA	45 AFT	0,55

Mistura	3ªamostra			4ªamostra		
	Tipo de rotura		σ_m (MPa)	Tipo de rotura		σ_m (MPa)
CPNAN	55 CFA	45 AFT	0,91	65 CFA	35 AFT	0,91
CPNAR	75 CFA	25 AFT	0,82	70 CFA	30 AFT	0,81
CRAN	95 AFT	5 CFA	0,18	100 AFT	0	0,18
CRAR	100 AFT	0	0,35	100 AFT	0	0,32
50CRAR	60 CFA	40 AFT	0,48	60 CFA	40 AFT	0,48

Anexos II.4 - Aderência por Pull-off com envelhecimento após calor

28 Dias

Tabela A.13 - Tensão de aderência e modo de rotura com envelhecimento após calor aos 28 dias
(Valores médios - 1ª fase)

Pull OFF com envelhecimento ao calor 1ª fase			
Mistura	σ_m (Mpa)	Tipo de rotura	Dias
CPNAN	1,25	90 CFA 10 AFT	28
CPNAR	0,96	80 CFA 20 AFT	28
CRAN	0,44	80 AFT 20 CFA	28
CRAR	0,35	80 AFT 20 CFA	28
50CRAR	0,5	80 AFT 20 CFA	28

Tabela A.14 - Tensão de aderência e modo de rotura com envelhecimento após calor aos 28 dias
(1ª fase – Diferentes amostras)

Mistura	1ª amostra			2ª amostra		
	Tipo de rotura		σ_m (MPa)	Tipo de rotura		σ_m (MPa)
CPNAN	65 CFA	35 AFT	1,23	60 CFA	35 AFT	1,21
CPNAR	70 CFA	30 AFT	0,95	65 CFA	35 AFT	0,95
CRAN	100 AFT	0 CFA	0,43	100 AFT	0	0,44
CRAR	100 AFT	0 CFA	0,34	95 AFT	5 CFA	0,35
50CRAR	60 AFT	40 CFA	0,48	55 AFT	45 CFA	0,51

Mistura	3ª amostra			4ª amostra		
	Tipo de rotura		σ_m (MPa)	Tipo de rotura		σ_m (MPa)
CPNAN	55 CFA	45	1,28	65 CFA	35 AFT	1,27
CPNAR	75 CFA	25	0,97	70 CFA	30 AFT	0,97
CRAN	95 AFT	5	0,47	100 AFT	0	0,4
CRAR	100 AFT	0	0,36	100 AFT	0	0,36
50CRAR	60 AFT	40	0,53	60 AFT	40 CFA	0,46

Anexos III – Resultados 2º fase:

Anexos III .1 – Tensão de aderência sem envelhecimento

7 Dias

Tabela A.15 - Tensão de aderência e modo de rotura sem envelhecimento aos 7 dias (Valores médios - 2ºfase)

Pull-off sem envelhecimento 2ºfase			
Mistura	σ_m (Mpa)	Tipo de rotura	Dias
CPNAN	1,29	80 CFA 20 AFT	7
CPNAR	1,03	90 CFA 10 AFT	7
CRAR	0,5	40 AFT 60 CFA	7
50CRAR	0,9	CFA	7
50FCAN	0,65	40 AFT 60 CFA	7
50CRFCAR	0,76	CFA	7
CRARgel	0,52	CFA, AFT	7

Tabela A.16 - Tensão de aderência e modo de rotura sem envelhecimento aos 7 dias (2ºfase – Diferentes amostras)

Mistura	1ªamostra			2ªamostra		
	Tipo de rotura		σ_m (MPa)	Tipo de rotura		σ_m (MPa)
CPNAN	80 CFA	20 AFT	1,28	75 CFA	25 AFT	1,27
CPNAR	90 CFA	10 AFT	1,04	85 CFA	15 AFT	1,01
CRAR	40 AFT	60 CFA	0,55	40 AFT	60 CFA	0,51
50CRAR	100 CFA	0 AFT	0,89	100 CFA	0 AFT	0,91
50FCAN	40 AFT	60 CFA	0,6	45 AFT	55 CFA	0,7
50CRFCAR	100 CFA	0 AFT	0,78	100 CFA	0 AFT	0,76
CRARgel	50 CFA	50 AFT	0,52	50 CFA	50 AFT	0,49
Mistura	3ªamostra			4ªamostra		
	Tipo de rotura		σ_m (MPa)	Tipo de rotura		σ_m (MPa)
CPNAN	80 CFA	20 AFT	1,3	80 CFA	20 AFT	1,31
CPNAR	90 CFA	10 AFT	1,05	90 CFA	10 AFT	1,03
CRAR	45 AFT	55 CFA	0,49	40 AFT	60 CFA	0,46
50CRAR	100 CFA	0 AFT	0,89	95 CFA	5 AFT	0,91
50FCAN	40 AFT	60 CFA	0,66	40 AFT	60 CFA	0,64
50CRFCAR	100 CFA	0 AFT	0,75	95 CFA	5 AFT	0,74
CRARgel	50 CFA	50 AFT	0,51	50 CFA	50 AFT	0,54

14 Dias

Tabela A.17 - Tensão de aderência e modo de rotura sem envelhecimento aos 14 dias (Valores médios - 2ªfase)

Pull-off sem envelhecimento 2ªfase			
Mistura	σ_m (Mpa)	Tipo de rotura	Dias
CPNAN	1,25	95 CFA 5 AFT	14
CPNAR	0,95	90 CFA 10 AFT	14
CRAR	0,51	60 CFA 40 AFT	14
50CRAR	1,04	CFA	14
50FCAN	0,83	90 CFA 10 AFT	14
50CRFCAR	0,58	CFA	14
CRARgel	0,58	CFA, AFT	14

Tabela A.18 - Tensão de aderência e modo de rotura sem envelhecimento aos 14 dias (2ªfase – Diferentes amostras)

Mistura	1ªamostra			2ªamostra		
	Tipo de rotura		σ_m (MPa)	Tipo de rotura		σ_m (MPa)
CPNAN	95 CFA	5 AFT	1,23	90 CFA	10 AFT	1,24
CPNAR	90 CFA	10 AFT	0,95	90 CFA	10 AFT	0,91
CRAR	60 CFA	40 AFT	0,5	55 CFA	45 AFT	0,49
50CRAR	100 CFA	0 AFT	1,05	100 CFA	0 AFT	1,06
50FCAN	90 CFA	10 AFT	0,83	90 CFA	10 AFT	0,85
50CRFCAR	100 CFA	0 AFT	0,55	100 CFA	0 AFT	0,58
CRARgel	50 CFA	50 AFT	0,6	50 CFA	50 AFT	0,56

Mistura	3ªamostra			4ªamostra		
	Tipo de rotura		σ_m (MPa)	Tipo de rotura		σ_m (MPa)
CPNAN	95 CFA	5 AFT	1,27	95 CFA	5 AFT	1,25
CPNAR	90 CFA	10 AFT	0,96	95 CFA	5 AFT	0,96
CRAR	60 CFA	40 AFT	0,54	60 CFA	40 AFT	0,52
50CRAR	95 CFA	5 AFT	1,04	100 CFA	0 AFT	1,02
50FCAN	95 CFA	5 AFT	0,87	90 CFA	10 AFT	0,78
50CRFCAR	100 CFA	0 AFT	0,6	95 CFA	5 AFT	0,6
CRARgel	50 CFA	50 AFT	0,57	50 CFA	50 AFT	0,59

28 Dias

Tabela A.19 - Tensão de aderência e modo de rotura sem envelhecimento aos 28 dias (Valores médios - 2ª fase)

Pull-off sem envelhecimento 2ª fase			
Mistura	σ_m (Mpa)	Tipo de rotura	Dias
CPNAN	1,29	95 CFA 5 AFT	28
CPNAR	1,19	90 CFA 10 AFT	28
CRAR	0,4	60 CFA 40 AFT	28
50CRAR	0,88	CFA	28
50FCAN	0,90	80 CFA 20 AFT	28
50CRFCAR	0,81	CFA	28
CRARgel	0,65	CFA, AFT	28

Tabela A.20 - Tensão de aderência e modo de rotura sem envelhecimento aos 28 dias (2ª fase – Diferentes amostras)

Mistura	1ª amostra			2ª amostra		
	Tipo de rotura		σ_m (MPa)	Tipo de rotura		σ_m (MPa)
CPNAN	95 CFA	5 AFT	1,28	95 CFA	5 AFT	1,3
CPNAR	90 CFA	10 AFT	1,17	95 CFA	5 AFT	1,2
CRAR	55 CFA	45 AFT	0,41	60 CFA	40 AFT	0,42
50CRAR	100 CFA	0 AFT	0,8	100 CFA	0 AFT	0,9
50FCAN	80 CFA	20 AFT	0,9	75 CFA	25 AFT	0,92
50CRFCAR	100 CFA	0 AFT	0,8	100 CFA	0 AFT	0,81
CRARgel	50 CFA	50 AFT	0,64	50 CFA	50 AFT	0,66
Mistura	3ª amostra			4ª amostra		
	Tipo de rotura		σ_m (MPa)	Tipo de rotura		σ_m (MPa)
CPNAN	100 CFA	0 AFT	1,31	95 CFA	5 AFT	1,27
CPNAR	90 CFA	10 AFT	1,21	90 CFA	10 AFT	1,19
CRAR	60 CFA	40 AFT	0,44	60 CFA	40 AFT	0,34
50CRAR	100 CFA	0 AFT	0,95	95 CFA	5 AFT	0,88
50FCAN	80 CFA	20 AFT	0,94	80 CFA	20 AFT	0,85
50CRFCAR	100 CFA	0 AFT	0,81	95 CFA	5 AFT	0,82
CRARgel	50 CFA	50 AFT	0,67	50 CFA	50 AFT	0,62

Anexo III.2 - Aderência por Pull-off com envelhecimento após imersão

28 Dias

Tabela A.20 - Tensão de aderência e modo de rotura com envelhecimento após imersão aos 28 dias
(Valores médios - 2ª fase)

Pull-off com envelhecimento após água 2º fase			
Mistura	σ_m (Mpa)	Tipo de rotura	Dias
CPNAN	0,96	90 CFA 10 AFT	28
CPNAR	0,95	90 CFA 10 AFT	28
CRAR	0,38	95 AFT 5 CFA	28
50CRAR	0,63	CFA	28
50FCAN	0,52	85 CFA 15 AFT	28
50CRFCAR	0,17	AFT	28
CRARgel	0,13	AFT, CFA	28

Tabela A.21 - Tensão de aderência e modo de rotura com envelhecimento após imersão aos 28 dias
(2ª fase – Diferentes amostras)

1ª amostra			2ª amostra		
Tipo de rotura		σ_m (MPa)	Tipo de rotura		σ_m (MPa)
90 CFA	10 AFT	0,94	95 CFA	5 AFT	0,96
90 CFA	10 AFT	0,94	90 CFA	10 AFT	0,94
95 AFT	5 CFA	0,36	90 AFT	10 CFA	0,38
100 CFA	0 AFT	0,61	100 CFA	0 AFT	0,63
85 CFA	15 AFT	0,52	90 CFA	10 AFT	0,51
100 AFT	0 CFA	0,16	100 AFT	0 CFA	0,17
50 AFT	50 CFA	0,13	50 AFT	50 CFA	0,11
3ª amostra			4ª amostra		
Tipo de rotura		σ_m (MPa)	Tipo de rotura		σ_m (MPa)
90 CFA	10 AFT	0,98	90 CFA	10 AFT	0,96
85 CFA	15 AFT	0,96	90 CFA	10 AFT	0,97
95 AFT	5 CFA	0,4	95 AFT	5 CFA	0,38
95 CFA	5 AFT	0,65	100 CFA	0 AFT	0,64
85 CFA	15 AFT	0,53	85 CFA	15 AFT	0,52
100 AFT	0 CFA	0,19	95 AFT	5 CFA	0,16
50 AFT	50 CFA	0,13	50 AFT	50 CFA	0,13

Anexos III.3 - Aderência por Pull-off com envelhecimento após calor

28 Dias

Tabela A.22 - Tensão de aderência e modo de rotura com envelhecimento após calor aos 28 dias
(Valores médios - 2ª fase)

Pull-off com envelhecimento após calor 2º fase			
Mistura	σ_m (Mpa)	Tipo de rotura	Dias
CPNAN	1,23	100 CFA	28
CPNAR	0,99	95 CFA 5 AFT	28
CRAR	0,43	45 CFA 55 AFT	28
50CRAR	0,79	CFA	28
50FCAN	0,79	70 CFA 30 AFT	28
50CRFCAR	0,21	CFA, AFT	28
CRARgel	0,22	AFT, CFA	28

Tabela A.23 - Tensão de aderência e modo de rotura com envelhecimento após calor aos 28 dias
(2ª fase – Diferentes amostras)

1ª amostra			2ª amostra		
Tipo de rotura		σ_m (MPa)	Tipo de rotura		σ_m (MPa)
100 CFA	0 AFT	1,25	100 CFA	0 AFT	1,22
95 CFA	5 AFT	0,99	90 CFA	10 AFT	0,98
45 CFA	55 AFT	0,44	40 CFA	60 AFT	0,43
100 CFA	0 AFT	0,78	95 CFA	5 AFT	0,79
65 CFA	35 AFT	0,78	70 CFA	30 AFT	0,77
50 CFA	50 AFT	0,2	50 CFA	50 AFT	0,21
50 AFT	50 CFA	0,21	50 AFT	50 CFA	0,22
3ª amostra			4ª amostra		
Tipo de rotura		σ_m (MPa)	Tipo de rotura		σ_m (MPa)
100 CFA	0 AFT	1,23	95 CFA	5 AFT	1,22
95 CFA	5 AFT	0,97	95 CFA	5 AFT	1
45 CFA	55 AFT	0,42	45 CFA	55 AFT	0,43
100 CFA	0 AFT	0,8	100 CFA	0 AFT	0,79
70 CFA	30 AFT	0,8	70 CFA	30 AFT	0,8
50 CFA	50 AFT	0,23	50 CFA	50 AFT	0,21
50 AFT	50 CFA	0,2	50 AFT	50 CFA	0,23