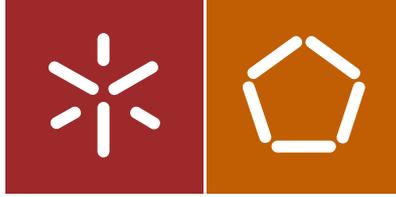




Universidade do Minho
Escola de Engenharia

Alexandre José de Teiga Mano Mendes Leal

Influência das condições de
cura no desempenho do betão.



Universidade do Minho
Escola de Engenharia

Alexandre José de Teiga Mano Mendes Leal

Influência das condições de
cura no desempenho do betão.

Dissertação de Mestrado
Ciclo de Estudos Integrados Conducentes ao
Grau de Mestre em Engenharia Civil

Trabalho efetuado sob a orientação do
Professor Doutor Aires Camões

e coorientação do
Engenheiro Rui Reis

DEDICATÓRIA

AOS MEUS PAIS.

AGRADECIMENTOS

No decurso desta dissertação, apesar do processo solitário a que qualquer investigador está destinado, tive a possibilidade de reunir contributos de diferentes pessoas. Desta forma, não poderia também de deixar de agradecer às inúmeras pessoas que tive a oportunidade de conhecer durante este período. Sem estes contributos, esta investigação não teria sido possível. Assim deixo apenas algumas palavras, poucas, mas com um sentido e profundo sentimento de reconhecido agradecimento.

Ao Professor Doutor Aires Camões, orientador da dissertação, agradeço o apoio, a partilha do saber e as valiosas contribuições, conhecimentos e sugestões para o trabalho. Acima de tudo, obrigado por me a acompanhar nesta jornada.

Ao coorientador Engenheiro Rui Reis, por todo o conhecimento e aconselhamento transmitidos. Pela sua amizade, sem nunca esquecer a paciência inesgotável ao longo da realização da dissertação. O meu muito obrigado.

Ao Engenheiro Carlos Jesus, pela sua amizade, disponibilidade e imprescindível ajuda. Nunca esquecendo o seu companheirismo e por tornar o Laboratório de Materiais de Engenharia Civil um meio de trabalho tão bom.

Aos Meus Pais e Irmã, um enorme obrigada por acreditarem sempre em mim e naquilo que faço. Espero que esta etapa, que agora termino, possa, de alguma forma, retribuir e compensar por toda a paciência, perseverança e apoio incondicional, que constantemente me oferecem. A eles, dedico toda esta dissertação.

O meu agradecimento profundo à Natasha, por todo o tempo ao meu lado, nos momentos mais difíceis, que não foram raros. Pela sua enorme paciência, fazendo-me acreditar que chegaria ao final desta difícil, porém gratificante etapa. Um enorme obrigado.

Aos Meus Amigos, em especial ao Cousin, Álvaro, Edo, Suíça, André, João, entre outros, o meu profundo e sentido agradecimento pela colaboraram da realização desta dissertação, estimulando-me intelectual e emocionalmente.

Influência das condições de cura no desempenho do betão.

RESUMO

Nos últimos anos, os problemas provocados pelo homem no meio ambiente, têm vindo a ser, cada vez mais, tidos em consideração e debatidos por todo o mundo. Preservar o meio ambiente é preservar a vida. Se não tivermos essa preocupação, a tendência será para piorar, podendo provocar graves problemas no futuro. Podendo mesmo fazer com que o ser humano passe dificuldades, que podem até causar uma crise mundial. Devido a este fato, é importante que se continue a realizar campanhas ambientais que alertem e sensibilizem as pessoas, de que é preciso dar valor ao ecossistema, do qual fazem parte a nossa qualidade de vida e dos próximos.

De forma a diminuir esse impacto, nas últimas décadas do século XX, começou a desenvolver-se o conceito de construção sustentável. Deste modo, as obras passaram a ser mais sustentáveis, os engenheiros fizeram um esforço por usar os últimos avanços tecnológicos em seu auxílio, contribuindo assim para uma mudança no setor da construção. Neste sentido, nas últimas décadas, verificou-se um crescimento na incorporação de elevado volume de adições, na composição do betão. Mas também poderá ser possível contribuir com mais sustentabilidade na indústria do betão, aumentando a eficiência da sua cura. São conhecidas algumas vantagens da cura do betão quando submersa em água saturada de hidróxido de cálcio, mas não existem ainda estudos suficientes sobre os seus efeitos, principalmente nos betões modernos e ecológicos, com elevado volume de adições.

Realizaram-se duas misturas de betão, uma constituída apenas por cimento e uma segunda composta por cimento CEM I 42.5 R e um elevado volume de cinzas volantes. De maneira a poder observar-se a eficiência do tipo de cura, foram realizadas duas curas distintas: uma cura submersa em água e outra, submersa em água saturada de hidróxido de cálcio. Realizaram-se ensaios constantes, ao longo de vários períodos de cura, até um ano de maturidade, conseguindo observar-se a influência do tipo de cura no desempenho do betão.

PALAVRAS-CHAVE:

Cura; hidróxido de cálcio; cimento; cinzas volantes;

Influence of curing conditions on concrete performance.

ABSTRACT

In recent years, man-made problems in the environment, have increasingly been taken into account and discussed throughout the world. Preserving the environment is preserving life. If we do not have this concern, the trend will be to worsen and may cause serious problems in the future. It can even cause the human being to experience difficulties, which can even cause a global crisis. Due to this fact, it is important to continue to carry out environmental campaigns that alert and sensitize people that the ecosystem needs to be valued, which are part of our quality of life and our lives.

In order to reduce this impact, in the last decades of the twentieth century, the concept of sustainable construction began to develop. In this way, the works became more sustainable, the engineers made an effort to use the latest technological advances to their aid, thus contributing to a change in the construction sector. In this sense, in the last decades, there was a growth in the incorporation of a high volume of additions, in the composition of the concrete. But it may also be possible to contribute more sustainability in the concrete industry, increasing the efficiency of its cure. Some advantages of curing concrete when submerged in water saturated with calcium hydroxide are known, but there are still insufficient studies on their effects, especially on modern and ecological concrete with a high volume of additions.

Two concrete mixtures were made, one consisting only of cement and one composed of cement CEM I 42.5 R and one high volume of fly ash. In order to be able to observe the efficiency of the type of cure, two different cures were performed: a cure submerged in water and another, submerged in water saturated with calcium hydroxide. Constant tests were carried out over several curing periods up to one year of maturity, and the influence of the curing type on the performance of the concrete was observed.

KEYWORDS:

Cure; Calcium hydroxide; Cement; Fly ashes;

ÍNDICE

1. INTRODUÇÃO	1
1.1. Enquadramento Temático.....	1
1.2. Objetivos e motivação	2
1.3. Organização e estruturação da dissertação	4
2. ESTADO DO CONHECIMENTO	5
2.1. Enquadramento	5
2.2. Adições	6
2.3. Cinzas volantes	7
2.4. Cal hidratada.....	8
2.5. Cura do betão.....	9
2.6. Tipos de cura	11
2.7. Investigações sobre cura realizadas	13
3. MATERIAIS E PROCEDIMENTOS DE ENSAIO.....	15
3.1. Introdução	15
3.2. Materiais	15
3.2.1. Cimento	15
3.2.2. Cinzas volantes.....	17
3.2.3. Agregados.....	18
3.2.4. Cal hidratada.....	19
3.2.5. Água	20
3.3. Vista geral da investigação	20
3.4. Procedimentos efetuados no fabrico do betão	21
3.5. Cura do betão.....	25
3.5.1. Perfil do pH do betão.....	27
3.5.2. Resistência à compressão	28
3.5.3. Esclerómetro	29
3.5.4. Evolução da massa	30
3.5.5. Resistividade elétrica.....	31
3.5.6. Ultrassons	32
3.5.7. Carbonatação acelerada	33

3.5.8. CTH.....	34
4. RESULTADOS.....	37
4.1. Introdução	37
4.2. Ensaio em betão fresco	37
4.2.1. Abaixamento	37
4.3. Ensaio em betão endurecido	38
4.3.1. Perfil de pH do betão	38
4.3.2. Resistência à compressão.....	41
4.3.3. Esclerómetro	44
4.3.4. Evolução de massas	47
4.3.5. Resistividade elétrica	50
4.3.6. Ultrassons.....	53
4.3.7. CTH.....	56
4.3.8. Profundidade de carbonatação	59
5. CONCLUSÕES E INVESTIGAÇÕES FUTURAS A DESENVOLVER.....	61
5.1. Análise conjunta de resultados.....	61
5.2. Investigações Futuras a Desenvolver	63
6. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	65

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 2-1 - Influência do período de cura inicial sobre a profundidade de carbonatação após 16 anos; CPC = Cimento Portland comum; AF = Cimento Portland de Alto-Forno com 70% de escória granulada (Polito [27]).	10
Figura 2-2 - Resistência à compressão de provetes cilíndricos 150x300mm em função da idade e do tipo de cura ACI 308R-16 [31].	11
Figura 3-1 - Granulometria CEM I 42.5 R (Reis [10]).	16
Figura 3-2 - Granulometria das Cinzas Volantes (Reis, 2015).	18
Figura 3-3 - Granulometria da cal hidratada (Reis [10]).	19
Figura 3-4 - Calendário de trabalho experimental.	21
Figura 3-5 - Desmoldagem do provete e respetiva medição de abaixamento.	23
Figura 3-6 – Preparação dos provetes.	24
Figura 3-7 – Número de provetes realizados por mistura	25
Figura 3-8 – Descofragem dos provetes.	26
Figura 3-9 – Tanques com cura H (esq.) e cura CH (dir.).	27
Figura 3-10 - Extração de pó de varias profundidades.	28
Figura 3-11 - Ensaio de resistência à compressão.	29
Figura 3-12 - Ensaio Esclerométrico.	30
Figura 3-13 – Resistivímetro utilizado para medição da resistividade elétrica	32
Figura 3-14 - Medição de Ultrassons.	33
Figura 3-15 - Fratura de porções com cerca de 50 mm de espessura.	33
Figura 3-16 - Medição da profundidade de carbonatação.	34

Influência das condições de cura no desempenho do Betão.

Figura 3-17 – Provetes cilíndricos.	35
Figura 3-18 - Camara de vácuo, antes e depois da a dissão de Ca(OH)_2	35
Figura 3-19 – Ensaio de Migração de cloretos.	36
Figura 4-1 – Resultados do ensaio de abaixamento das diferentes misturas.	37
Figura 4-2 - Evolução de pH.....	38
Figura 4-3 - Esquema de resultante de gradientes	39
Figura 4-4 - Evolução da resistência à compressão.	42
Figura 4-5 - Resistência à compressão: 7d, 28d, 365d, 365d-c e Carb. Vs Norm.	43
Figura 4-6 - Evolução do Índice esclerométrico.	45
Figura 4-7 - Índice esclerométrico: 7d, 28d, 365d, 365d-c e Carb. Vs Norm.	46
Figura 4-8 - Evolução da massa.	48
Figura 4-9 - Evolução de massas: 28d, 365d, 365d-c e Carb. Vs Norm.....	49
Figura 4-10 - Evolução da resistividade elétrica.....	51
Figura 4-11 – Evolução da resistividade elétrica: 28d, 365d, 365d-c e Carb. Vs Norm.	52
Figura 4-12 - Evolução dos ultrassons.....	54
Figura 4-13 - Evolução dos ultrassons: 28d, 365d, 365d-c e Carb. Vs Norm.	55
Figura 4-14 – Evolução do CTH durante a sua cura.....	57
Figura 4-15 - Evolução do CTH 28, 90, 365 e 356c dias.	58
Figura 4-16 - Profundidade de carbonatação consoante a cura.	59

ÍNDICE DE QUADROS

Quadro 3-1 - Propriedades do CEM I 42,5 R ,Secil[41].	16
Quadro 3-2 - Propriedade químicas e físicas das cinzas volantes (Reis [10]).....	17
Quadro 3-3 - Caraterísticas dos agregados (Reis [10]).....	19
Quadro 3-4 - Características da cal hidratada Lusical[43].	20
Quadro 3-5 - Composição das amassaduras.	22
Quadro 3-6 - Taxa de corrosão (Proceq,1998).	31
Quadro 4-1 - Evolução da resistência à compressão [MPa].....	41
Quadro 4-2 - Evolução da resistência à compressão – coeficiente de variação [%].	41
Quadro 4-3 – Diferença entre cura CH e cura H [%].	42
Quadro 4-4 - Índice esclerométrico [MPa].....	44
Quadro 4-5 - Evolução da massa [%].	47
Quadro 4-6 - Evolução da resistividade elétrica [Ω .m].....	50
Quadro 4-7 - Evolução dos ultrassons [μ s].	53
Quadro 4-8 – Evolução da difusão por migração de cloretos [$\times 10^{-12}$ (m ² /s)].....	56
Quadro 4-9 - Evolução da profundidade de carbonatação.	59

ÍNDICE DE SÍMBOLOS

- C – Cimento
- CV – Cinzas volantes
- H – Água
- CEM – Cimento
- A/L – Razão água ligante
- CH – Hidróxido de cálcio/ cal hidratada
- ASTM – American Society for Testing and Materials
- CEN – Comité Européen de Normalisation
- E – Especificação
- EFNAC – European Federation of National Associations Representing (producers and applicators of specialist building products for Concrete)
- EN – Norma Europeia
- NP – Norma Portuguesa
- LMC – Laboratório Materiais de Construção
- LNEC – Laboratório Nacional de Engenharia Civil

1. INTRODUÇÃO

1.1. Enquadramento Temático

Há a previsão que a indústria da construção enfrentará um grande desafio, ao construir nos próximos quarenta anos tanto o que já se construiu desde o início da humanidade [1]. Uma das causas neste grande desenvolvimento da indústria deve-se ao crescente aumento populacional no planeta, constando também um aumento significativo na esperança média de vida, criando assim a necessidade de se construir mais e melhor. Esta necessidade gera um paradigma no setor da construção, que, de alguma forma, procura cada vez mais promover a sustentabilidade. Um dos acordos mais famosos no que diz respeito ao controlo e sustentabilidade do planeta é o acordo de Paris.

Um dos grandes problemas da construção em termos ambientais é a elevada parcela de produção de CO₂, proveniente do fabrico de alguns materiais. Este é o caso do cimento CEM I 42.5 R, sendo responsável por um alto consumo de energia primária, bem como libertação de grandes quantidades de dióxido de carbono para atmosfera, que por diferentes razões, provoca efeitos devastadores na atmosfera do nosso Planeta. A solução para a redução dessas emissões, poderá estar na reutilização de matérias-primas, que seriam prejudiciais para o ambiente, caso fossem libertadas para a atmosfera terrestre. Assim, a reutilização quando utilizada em alguns setores da construção, ajuda duplamente a reduzir a poluição. Um desses exemplos é o reaproveitamento das cinzas volantes, que provêm da captura em chaminés das centrais termoelétricas, podendo ser usadas na incorporação do betão.

Sendo o cimento um dos materiais mais usados em todo o mundo, e estando ciente dos seus efeitos nefastos para com o ambiente, a sua substituição, de forma parcial, por cinzas volantes, permite uma menor utilização do mesmo, ajudando assim a uma melhoria ambiental considerável. Desta forma, o uso destas adições traz vantagens, tais como, acarretar um menor custo, melhor viabilidade e menor poluição, trás também desvantagens, como o caso das adições pozolânicas. Sendo que se estas adições não forem efetuadas de forma cuidada, poderão causar um descontrolo e originar ou até agravar vários problemas, um deles é a corrosão das armaduras.

Como durante a hidratação do cimento, existe a produção de hidróxido de cálcio, um dos principais focos desta campanha experimental, está em saber qual o efeito das diferentes curas

Influência das condições de cura no desempenho do Betão.

no desempenho do betão. Sabe-se que a alcalinidade está presente, e que quanto mais alta esta se mantiver, maior é a produção de uma camada de óxidos nas armaduras, na qual pratica um efeito passivo de protetor.

Desta forma, com o efeito da cura, pode-se criar um meio ótimo para isto ocorrer, sabendo que em água o provete de betão, durante a sua cura tende a lixiviar os seus sais (podendo criar fracturação/vazios no seu interior) causando desta forma uma menor resistência do betão. Este caso não deve ser tão agravante se esse mesmo provete se encontrar em cura de água saturada em hidróxido de cálcio, à qual a lixiviação não se dever manifestar tanto devido ao menor gradiente de alcalinidade entre a solução de cura e o próprio provete.

É deste modo, que esta campanha experimental, se debruçará com a especial atenção ao efeito das condições de cura no desempenho do betão.

1.2. Objetivos e motivação

O objetivo principal deste trabalho é avaliar as condições de cura dos provetes de betão e a sua influência nos indicadores de desempenho do betão (em água e em solução saturada de hidróxido de cálcio). Avaliando também da reação pozolânica das cinzas volantes, na presença de cimento e de hidróxido de cálcio adicionado na composição inicial. Interessa estudar também, a reação estrita entre as cinzas volantes e o hidróxido de cálcio adicionado no início da composição, sem a presença de cimento. Estes dois casos poderão ocorrer com uma cinética e resultados diferenciados, produzindo materiais com comportamento distintos. Também objeto deste trabalho, avaliar o comportamento destas misturas quando submetidas a um ensaio de carbonatação acelerado, evidenciando as diferenças, caso se verifiquem. Finalmente, é fundamental comparar os resultados de carbonatação e de evolução da reação pozolânica com os resultados do trabalho paralelo em betões, de forma a complementarem-se os dois trabalhos.

Para concretizar da melhor forma os objetivos gerais, idealizou-se uma campanha experimental em betões com apenas cimento (composição I). Para estudo da reação das cinzas volantes com a cal hidratada, foi realizada uma mistura com dois elementos, cimento e cinzas volantes (composição II) (Reis [2]).

Um dos aspetos primordiais desta dissertação, estudar a influência da cura em hidróxido de cálcio na evolução da hidratação dos betões e na profundidade de carbonatação em ensaios de carbonatação acelerada. Por fim, haverá uma avaliação qualitativa das misturas, ao longo de todas as maturidades, recorrendo a ensaios não-destrutivos, nomeadamente resistividade elétrica, ultrassons e de evolução da massa. Assim, será possível avaliar:

- Misturas simples, com 100% de cimento, equivalente a um betão de elevado desempenho, com razão $A/L = 0.50$;
- Misturas composta, de 60% cimento e 40% cinzas volantes, equivalentes a um betão de qualidade média, com razão $A/L = 0,50$;
- Influência da cura em hidróxido de cálcio, na evolução da hidratação e na profundidade de carbonatação das misturas anteriormente referidas;
- Avaliação qualitativa por resistividade elétrica, ultrassons e de evolução de massas, antes e após carbonatação, das duas misturas anteriores;

Cada mistura será alvo de ensaios para avaliar as propriedades mecânicas e de durabilidade. As propriedades mecânicas permitirão determinar a resistência à compressão e à flexão ao longo do tempo. Mas também serão importantes para estudar a lei da hidratação das cinzas volantes. Os ensaios de durabilidade são fundamentais para compreender melhor as propriedades da microestrutura do material, nomeadamente a resistência à carbonatação, compacidade, a porosidade e a capilaridade. Todos estes ensaios serão realizados antes e após carbonatação, de forma a estudar os seus efeitos nas várias misturas.

O principal intuito desta campanha experimental é a análise e avaliação de betões com 100C e 60C+40CV, tendo em vista dois tipos de cura distinta. Uma cura em água, e outra em água com cal hidratada. Desta forma, nesta dissertação realizou-se uma experiência com duas misturas (referidas anteriormente). As misturas efetuadas neste projeto são as seguintes:

Mistura I – composta na sua totalidade por cimento (100% cimento).

Mistura II – composta por 60% de cimento e 40% de cinzas volantes.

Relativamente às curas realizadas, estiveram expressas da seguinte forma:

Cura N – Recipiente aberto com água e sem qualquer renovação de água;

Cura CH – Recipiente aberto com água saturada em cal hidratada.

Com efeito, de forma a investigar as composições, realizaram-se diferentes experiências das quais a mais importante é a resistência mecânica. Por outro lado, foram efetuados alguns ensaios não destrutivos.

Resumindo, de forma a avaliar a influência da cal hidratada na cura das duas misturas e de forma a perceber como a carbonatação interage com as misturas também foram efetuados ensaios relativos à profundidade de carbonatação e de cloretos.

1.3. Organização e estruturação da dissertação

Esta dissertação encontra-se constituída por cinco capítulos:

1º Capítulo – O primeiro, e atual, capítulo incide na apresentação do tema, permitindo desta forma fazer um enquadramento global do mesmo, tal como a devida definição objetiva e estruturação do plano de trabalho.

2º Capítulo – Este segundo capítulo, é fundamentalmente dedicado à procura do saber, realçando as investigações presentes, tendo em conta os materiais usados, os fenómenos relacionados com as diversas curas e outros fatores relevantes deste tema de estudo.

3º Capítulo – Neste grupo, podemos relacionar os materiais utilizados durante a campanha experimental, fazendo singularmente, uma descrição discriminada relativa a cada ensaio experimental, tendo em conta uma detalhada explicação dos materiais.

4º Capítulo – Durante este capítulo, são apresentados os produtos dos ensaios experimentais realizados, tendo em conta o seu comentário, sempre com a merecida análise. De forma a melhorar esta observação e desenvolver de uma forma mais fácil a ponderação futura, estabelecendo assim as devidas comparações entre amostras. De forma a apresentar os mesmos resultados procedeu-se à utilização de diferentes gráficos.

5º Capítulo – No ultimo capitulo, são expostas as apreciações finais de toda a campanha experimental. Tirando as ultimas conclusões, podemos assim realizar várias sugestões para futuros trabalhos, que se debrucem sobre a mesma causa de estudo.

2. ESTADO DO CONHECIMENTO

2.1. Enquadramento

O betão é um dos materiais mais antigos usados na construção, há milhares de anos, sendo então produzido pela mistura de argila, areia, cascalho e água. Há registos de que os materiais eram, transportados a distâncias de centenas de quilómetros, como é o exemplo de um pavimento de betão simples datado de 5600 AC em LepenskiVin. Nas antigas civilizações estes materiais eram usados, fundamentalmente, em pavimentos, muros e fundações. Os Romanos investigaram as ínfimas possibilidades deste material em construções arrojadas, das quais muitas chegaram aos nossos dias e são exemplos do elevado nível atingido pelos construtores Romanos da altura, dos quais se destacam o “Panteão de Roma”, Pont du Gard, Aqueduto de Segóvia e o Coliseu de Roma, respetivamente, Mehta and Monteiro [3].

Foi com o desenvolvimento da produção e estudo das propriedades do cimento, que culminou com a aprovação da patente do cimento Portland (nome dado por a cor dos cimentos ser parecida com a da rocha Portland). O uso do betão de cimento inicia-se no princípio do séc. XIX, devido às suas características, tornou-se o material mais empregue na construção, oferecendo uma maior segurança e propriedade a quem habita as construções. Contudo, nada dura para sempre, e por isso é inevitável ocorrerem reparações ou melhorias durante a vida útil das construções (Rincón et al [4]).

Em Portugal, a indústria do cimento, inicia-se em 1894 com a fábrica de cimento Tejo em Alhandra.

Um dos principais objetivos hoje em dia são os cuidados ambientais, que com os avanços tecnológicos, colaboraram entre si, para que o cenário da construção investigue, cada vez mais, opções eficazes e inovadoras para uma maior sustentabilidade. Camões [5], defende que por cada tonelada de cimento Portland produzida, outra tonelada de dióxido de carbono é libertada para a atmosfera, o que mostra o choque desta indústria no meio ambiente.

Desta forma, esta indústria está constantemente atenta às últimas investigações, de modo a combater a poluição, garantindo as novas adições em prol do cimento, criando materiais cada vez mais duradouros e resistentes. Tendo em conta que o betão fornece características importantes, torna-se célebre no último século. Inicialmente, estas adições já tinham sido usadas

Influência das condições de cura no desempenho do Betão.

pelos Gregos e mesmo pelos já referidos Romanos, com resultados bastante significativos, mesmo impressionantes.

Atendendo aos avanços tecnológicos dos últimos anos, consegue-se usar maiores quantidades de adições minerais e substituir maiores quantidades de cimento.

Na atualidade, uma das adições que mais sucesso têm, são as cinzas volantes. Como estão disponíveis mundialmente em grandes quantidades, reduzem substancialmente o impacto ambiental e têm a capacidade de alterar algumas características do betão, podem ser usadas para reduzir o consumo de cimento nas misturas.

2.2. Adições

A utilização de adições nos betões pode ser muito benéfica não só sob o ponto de vista económico e ambiental, mas também pelo aumento de desempenho [6].

Sendo que estas adições têm a finalidade de melhorar e alcançar propriedades superiores, são ainda conhecidas pela vantagem do aumento da compacidade e da resistência ao ataque por cloretos e, diminuição do calor de hidratação. No entanto, é preciso ter em conta que no que diz respeito ao ataque por carbonatação, as cinzas volantes podem ser bastante desfavoráveis, aumentando o risco de corrosão das armaduras [7].

Como já foi referido, as adições são materiais que estão a ser usados em prol da preservação do ambiente e do aumento do desempenho do betão. Desta forma, com a junção de adições, é praticável aperfeiçoar as particulares do betão e, de certa forma, realizar betões com desempenhos iguais ou mesmo superiores.

Estas podem ser agrupadas em duas classes, conforme as suas características pozolânicas: sendo as do tipo I, inertes e as do tipo II, adições pozolânicas ou hidráulicas latentes.

Conforme as adições, as que pertencem ao primeiro grupo, são constituídas por partículas finas, das quais a maior parte passa pelo peneiro 0,063mm e que podem também ser adicionadas aos materiais de construção para conceder distintas qualidades aos mesmos. Como esta granulometria está na curva da zona de finos, faz com que a mistura fique mais compacta.

Relativamente ao segundo grupo, estas destacam-se por ter propriedades que quando sujeitos a temperaturas habituais reagem com o hidróxido de cálcio resultando em maiores quantidades de silicatos de cálcio hidratado (CSH). Desta forma resultam compostos de uma enorme firmeza na água e com melhores características aglomerantes. Neste sentido concluímos que as cinzas volantes, não só são uma excelente adição tipo II para o betão, como são um dos materiais mais usados como tal.

2.3. Cinzas volantes

Os efeitos das cinzas volantes são variáveis e dependem das suas características físicas e da sua composição química.

As cinzas volantes foram inicialmente utilizadas na década de 40, tendo desde então vindo a ser cada vez mais utilizadas. Inicialmente eram utilizadas entre 15 a 20% por massa de cimento. Após variados estudos, adquirindo informações sobre estes novos compostos, criados a partir da adições, permitem-nos hoje em dia, um menor uso de cimento (Thomas) [8].

Cinzas volantes é a designação dada ao material obtido por precipitação eletrostática, ou mesmo por captura mecânica em filtros, que provêm do fumo produzido pela queima de combustível em centrais termoelétricas a carvão. A designação de volantes ("que voam") resulta da leveza destas partículas, que, na ausência de dispositivos de filtragem, seriam arrastados pelos gases para a atmosfera por forma de fumo. A cinza volante não é nada mais que é um pó mineral fino, constituído basicamente por pequenas partículas esféricas com dimensões variando de 0,5 μm a 100 μm , resultantes da fusão e calcinação das impurezas minerais incombustíveis contidas no carvão que foi queimado a altas temperaturas e pressões.

Existem duas destas centrais em Portugal, a mais importante situa-se em Sines e outra no Pego.

Estas são classificadas pela NP EN 450-1 [9], que obedece à legislação em vigor em Portugal, definindo-se como um pó fino. De acordo com Camões [5], podemos utilizar as cinzas volantes, se estas tiverem um teor total de cal (CaO), em massa, inferior a 10 % e provirem da queima de carvões.

Influência das condições de cura no desempenho do Betão.

As cinzas volantes possuem diversas características que tornam o seu emprego vantajoso. Assim, adiante apresentam-se as semelhantes, a partir de um quadro elaborado por Reis [10]:

- Evita o armazenamento e tratamento deste produto, dando-lhe uma nova vida;
- Minoração da energia incorporada;
- Minoração da poluição incorporada;
- Inferior custo dos betões;
- Melhor durabilidade;
- Melhor compacidade;
- Menor capilaridade;
- Menor calor de hidratação;
- Menor exsudação e segregação;
- Melhor acabamento superficial;
- Aumenta a trabalhabilidade;
- Resistências altas a longo prazo;

2.4. Cal hidratada

A cal é um dos materiais de construção mais antigos que há memória, usado em todos os tipos de construção, cujos primeiros sinais de uso remontam à era do Fogo (ICCS16-1-3 [11] e [12]). Os primeiros usos da cal hidratada podem ser encontrados na cidade de Katal Huyuk no Sul da Anatólia, Turquia, datada a 6000 AC (Yo,Seja [13]). Nos dias de hoje este material é ainda muito usado principalmente para a reabilitação de edifícios antigos. Também são conhecidos usos de cal hidratada em argamassas e no betão, para obter determinados tipos de desempenho melhorados [7].

A cal hidratada possui na sua composição essencialmente hidróxido de cálcio e carbonato de cálcio Filho2002 e 2008 ([14] e [15]). Dependendo da quantidade de hidróxido de cálcio disponível na cal hidratada (pureza) maior será a sua alcalinidade. Esta esta propriedade poderá ser uma forma de dotar o betão de maior alcalinidade para fazer face a requisitos de durabilidade tais como aumentar a resistência à carbonatação RR ([16] e [10]). Também pode ser utilizado para fornecer alcalinidade de modo a aumentar o pH da solução de cura do betão por Herdeiro [17].

A cal hidratada em contacto com a água pode auxiliar a hidratação do cimento quer seja por processos químicos ou físicos [14] [15] [18]. Tal pode ser benéfico na cinética da hidratação aumentando o desempenho do betão tanto a sua durabilidade como a resistência mecânica.

Por este motivo, e dado que existe no mercado cal hidratada de elevada pureza [19], logo com muito hidróxido de cálcio, foi o material adotado para utilizar nas curas alcalinas desta dissertação.

2.5. Cura do betão

A cura do betão é um dos elementos fundamentais da produção de um bom material de matriz cimentícia. É um termo utilizado nos processos que têm com objetivos evitar a perda de água necessária à hidratação do cimento, reduzir ao máximo a retração do betão como Nerycarlos ([20]) demonstrou e conseqüente desenvolvimento da resistência por Petrucci [21] e Bresolin [22]. No entanto a cura não se esgota no processo de resistência, pois também é importante no desempenho de durabilidade. A cura deve ser realizada logo após a hidratação do cimento Nerycarlos [20]. Se a cura não for eficiente, podem verificar-se problemas de desempenho tais como: elevada porosidade e permeabilidade por Herdeiro [17] e Fernanda [23], com conseqüências no desempenho mecânico e de durabilidade. Além disso, a cura tem uma forte influência no desenvolvimento das resistências, a sua permeabilidade e durabilidade Mark Bediako [24], Nerycarlos [20] e Ariosvaldo [25].

Zemajetis [26] e Mark Bediako [24], diz-nos que a variação no tipo de cura pode provocar efeitos dramáticos nas propriedades do betão. Este refere que até a uns anos atrás, os conhecimentos científicos em muitos países, não era o que deveria ser, e deste modo, deriva para o fato de se usar extremamente o cimento.

Um dos fatores que pode alterar a cura do betão são as alterações climáticas: o frio, o calor e a baixa humidade. Estes fatores podem ser potenciados pela ação do vento Ariosvaldo [25]. Outros dos fatores impeditivos de uma boa cura do betão é a falta de preparação dos vários intervenientes (Bresolin [22]).

A Figura 2-1, mostra a influência do tempo de cura na profundidade de carbonatação, podendo verificar-se que quanto maior período de cura menor será o ataque. Desta forma, com o tempo,

Influência das condições de cura no desempenho do Betão.

o betão melhora o seu desempenho, quer no que respeita à resistência mecânica, quer à sua durabilidade.

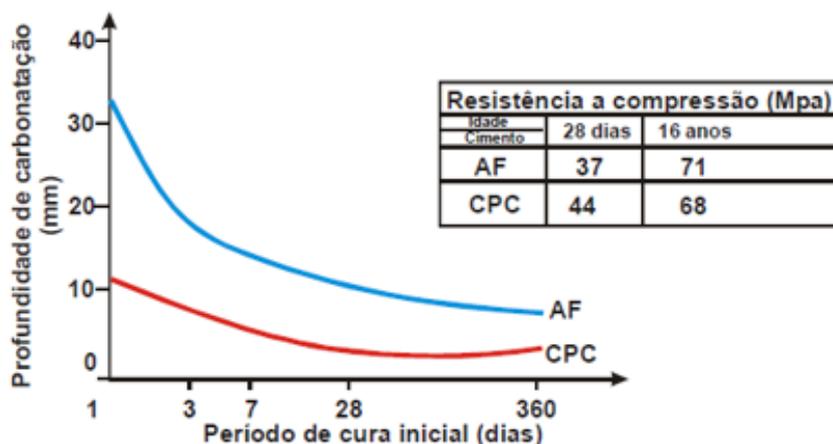


Figura 2-1 - Influência do período de cura inicial sobre a profundidade de carbonatação após 16 anos; CPC = Cimento Portland comum; AF = Cimento Portland de Alto-Forno com 70% de escória granulada (Polito [27]).

A cura poderá ser afetada pela humidade tempo e temperatura. No que respeita à humidade, é fundamental que esta seja elevada, seja saturada ou não. Caso se verifique que a humidade relativa seja inferior a 80% o processo de cura cessa Nevil [28] e Mehta [29]. Caso se verifique a situação de cura irá verificar-se uma perda excessiva da água do betão aumentando assim o número de vazios e a sua porosidade, comprometendo a resistência e a porosidade Helene, Levy e Betolini [30]. Um betão mal curado poderá ter uma resistência até 30% mais baixa, além de ser vulnerável a agentes agressivos. A importância da humidade pode ser comprovada pela Figura 2-2 ACI 308R-16 [31].

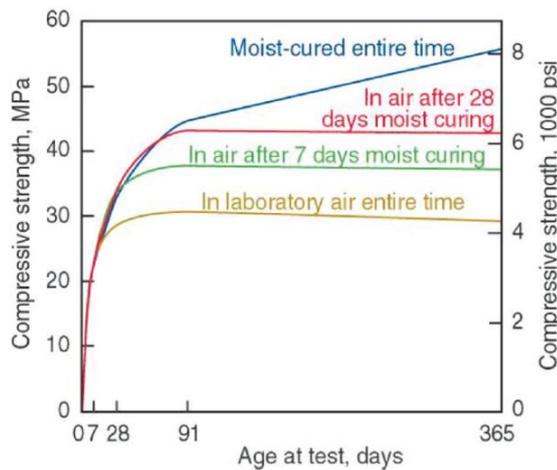


Figura 2-2 - Resistência à compressão de provetes cilíndricos 150x300mm em função da idade e do tipo de cura ACI 308R-16 [31].

2.6. Tipos de cura

De acordo com os autores Mark Bediako [24], infelizmente em muitas partes do mundo a cura em água significa apenas cura em água corrente. Segundo os autores, tal fato acontece por existir uma grande ignorância no papel do hidróxido de cálcio relativamente à cura.

Também para Helene, Levy e Betolini [30] e Gustavo Bresolin [22], as curas em obras são limitadas a colocar o betão várias vezes ao dia em água, ocasionando perdas de resistência e de durabilidade do betão.

Durante uma cura não alcalina, poderá gerar-se um gradiente de alcalinidade entre a pasta de cimento e a solução de cura, o que pode levar a uma lixiviação (Mark Bediako [24]) dos compostos do betão, principalmente do hidróxido de cálcio. No entanto, os outros compostos do betão, tais como o CSH, são passíveis de lixiviação. Kun Liu [32]. Além disso, se a pureza da água for muito elevada, pode-se verificar a dissolução ou descalcificação de CSH e ettringite.

As curas de betão podem ser realizadas de muitas formas: ao ar, cura húmida, por imersão em água, por imersão em água saturada em cal, por aspersão com água, aspersão com água saturada em hidróxido de cálcio, cura a vapor, cura elétrica, cura térmica, cura em água salgada, entre outras.

Influência das condições de cura no desempenho do Betão.

A presença de cal hidratada na composição do betão pode originar alterações importantes nas primeiras idades: aumento do calor de hidratação em função da maior área específica BET da cal; aumento do período de indução; imediata saturação de iões de cálcio, aumento do calor libertado em função da maior precipitação de ettringite e de aluminato de cálcio hidratado; redução do tempo de presa e até aceleração da hidratação de cimento nas primeiras horas, tanto por efeito químico como por efeito físico [18]. Algumas destas alterações de propriedades pela cal hidratada podem eventualmente acontecer.

Visto existirem diferentes normas, com diversas curas, neste seguimento é importante rever as diferentes normas existentes e compará-las com os seus efeitos fundamentais na obtenção dos provetes, originando assim resultados díspares e incomparáveis.

Algumas normas definem que uma cura adequada para efeitos de ensaios laboratoriais deve ser efetuada em água saturada de hidróxido de cálcio. A ASTM C511-03 [33] define que os provetes, quer sejam de betão, argamassa ou pasta devem ser curados em água saturada de hidróxido de cálcio. O objetivo da norma é prever a lixiviação do hidróxido de cálcio. A norma vai mais longe ao dizer que água não saturada em hidróxido de cálcio, água fresca corrente ou desmineralizada não deve ser usada em tanques de armazenamento de provetes.

No mesmo sentido, a norma brasileira NBR 5738 [34], define dois tipos de cura como referência: cura húmida com temperatura 23 ± 2 °C e humidade relativa de 95%; ou cura com imersão em água saturada com hidróxido de cálcio.

A presente Norma Europeia NP EN 206-1[35] e NP EN 12390-2 [36], esta última, foi elaborada pelo Comité Técnico CEN/TC 104 “Betão e produtos correlacionados”, na qual são referenciados todos os utensílios e aparelhos a utilizar, o seu procedimento, que vai desde a preparação e enchimento dos moldes, compactação do betão, vibração mecânica através do uso da mesa vibratória, ao qual se deve ter atenção a vibração excessiva. Tendo em conta o nivelamento da superfície, marcação dos provetes consoante o seu tipo de cura e mistura associada. Após a betonagem dos provetes, na qual se deve deixar o mesmo em molde pelo menos 16h, mas nunca mais de três dias, sempre protegido contra choques, vibrações e desidratação, mantendo sempre uma temperatura de $20 \text{ °C} \pm 5 \text{ °C}$. Após remoção do molde, a sua cura deve ser feita de imediato, utilizando água a uma temperatura de $20 \text{ °C} \pm 2 \text{ °C}$. É importante que durante o transporte, os provetes evitem perdas de humidade e desta forma evitando desvios da temperatura requerida.

Em conclusão, verifica-se que existem algumas diferenças nas normas e, sendo a cura um dos aspectos fundamentais na produção dos provetes, investigações apresentando curas diferenciadas, podem originar resultados variados e incomparáveis entre si.

2.7. Investigações sobre cura realizadas

Herdeiro [17] estudou a diferença do efeito da cura em água e cura em água saturada em hidróxido de cálcio em pastas de cimento e pastas com adições de cinzas volantes incorporadas na massa de cimento. Ao contrário do espectável, Herdeiro observou que a cura em água saturada em hidróxido de cálcio originou provetes com menor resistência mecânica.

Reis [7] realizou ensaios em argamassas de cimento e com adições de cinzas volantes e cal hidratada na sua composição, sujeitas também a cura em água e cura em água saturada em hidróxido de cálcio. Verificou-se que os ensaios de durabilidade à carbonatação acelerada foram piores nas curas com água saturada em cal hidratada.

Mark Bediako [24] estudaram o efeito da cura saturada em hidróxido de cálcio em argamassas de cimento composto, com e sem adições de resíduos do pote de tijolo (ASTM classe N [33]). Concluiu que a cura em água saturada em hidróxido de cálcio foi melhor para a resistência à compressão que a cura apenas em água. Infelizmente o autor não referiu qual o pH da solução de cura inicial em água.

Gustavo Bresolin [22], estudou a influência de vários tipos de cura na resistência à compressão incluindo cura com água saturada com hidróxido de cálcio em betões pozolânicos com ou sem escórias granuladas de alto-forno. Concluiu que a melhor cura foi a cura com água saturada em hidróxido de cálcio, no entanto a investigação apresentou algumas fragilidades que podem ter mascarado os resultados: só utilizou dois provetes por ensaio, não realizou uma cura submersa em água para comparação e os resultados obtidos das várias curas foram muito próximos uns dos outros, podendo ser considerados idênticos.

Bruno Silva [37] também avaliou a influência de vários tipos de cura na resistência à compressão abrangendo a cura com água impregnada com hidróxido de cálcio, em betões com cimento composto com escória granulada de alto-forno. Concluiu-se que aos 7 dias os melhores resultados foram obtidos com a cura submersa em água. Aos 28 dias, o melhor resultado foi

Influência das condições de cura no desempenho do Betão.

obtido nos provetes com cura submersa em água saturada em hidróxido de cálcio. Sendo que as fragilidades observadas, apenas foram utilizados dois provetes por ensaio e os resultados obtidos aos 28 dias foram muito aproximados, podendo ser considerados iguais.

Wegian [38] realizou ensaios de resistência à compressão em betões com cimentos e cimentos resistentes aos sulfatos, com misturas e curas com água do mar e água corrente, estas tendo um papel importante para os efeitos do sal na estrutura molecular do betão. Verificando que os melhores resultados até aos 14 dias de maturidade, foram para os betões realizados com água do mar. A partir dos 14 dias foi verificado um decréscimo de resistências das misturas submetidas a esta cura, devido à cristalização de sais.

Kun Liu [32] estudaram a microestrutura do betão colocados em imersão em água ultrapura. Verificaram que após 30 dias de imersão a permeabilidade superficial do betão aumentou e após 150 dias de imersão diminuiu. Os autores responsabilizaram o aumento da porosidade inicial do betão devido à lixiviação e à diminuição da permeabilidade a longo prazo, devido à hidratação.

Ariosvaldo [25] realizou pesquisas bibliográficas sobre os fatores que intevêm na cura, concluindo que o mais importante é promover uma ação do betão consoante a sua cura específica. Melhorando assim as suas capacidades de resistência.

Contudo, mesmo com as pesquisas realizadas neste estado de conhecimento sobre o efeito da cura no aumento da resistência do betão, as referências bibliográficas que incidem no tema, são escassas. No entanto, parece ser um dado adquirido que a cura em solução saturada de cal é, em teoria, melhor para o betão, pois evita a ocorrência de lixiviação.

3. MATERIAIS E PROCEDIMENTOS DE ENSAIO

3.1. Introdução

Neste capítulo, encontram-se expostos e descritos os materiais usados nos ensaios realizados. Os equipamentos experimentados e as características relevantes para a investigação também estão relatadas abaixo.

No início desta dissertação foi descrito que esta investigação seria introduzida num estudo mais alargado, que conta com os mesmos materiais e metodologias, conforme Reis [10]. No entanto, como seria de esperar, todas as decisões relativamente a materiais e metodologias, também tiveram em conta fatores intrínsecos para esta dissertação, tais como, a facilidade de aquisição dos materiais e meios, a sua quantidade e ao mesmo tempo os prazos disponíveis. Seguidamente, serão descritas as opções tomadas e os argumentos mais relevantes.

3.2. Materiais

3.2.1. Cimento

O cimento utilizado foi do tipo CEM I 42,5 R, originário da firma Secil, proveniente do centro de fabrico de Maceira - Liz em Leiria, com a referência C856-CPR-0124 de 02/julho/2015. O cimento, sendo do tipo I, é composto essencialmente por clínquer (NP EN 206-1 [35]; NP EN 197-1, [40]), revelou-se ideal para ser utilizado, porque previu-se que após hidratação, seria libertada elevada quantidade de hidróxido de cálcio, fornecendo grande alcalinidade. A escolha da classe 42.5 R deveu-se ao facto de ser o mais presente no mercado Nacional, tendo desta forma um menor valor comercial (Camões [5]). Durante esta experiência, teve-se o cuidado de usar o mesmo lote de cimento para todas as misturas.

Expõe-se assim, no Quadro 3-1, as características do cimento CEM I 42.5 R fornecidas pelo fornecedor Secil [41], bem como resultado do estudo da análise granulométrica a laser Reis [10].

Quadro 3-1 - Propriedades do CEM I 42,5 R ,Secil [41].

	Idade	Rf [MPa]	Rc [MPa]	
Propriedades Mecânicas	2 dias	5.9	34	
	7 dias	7.8	46.1	
	28 dias	8.9	58.4	
Propriedades Físicas	Peso Específico (kg/m ³)		3.13	
	Resíduo de Peneiração (%) 45µm		3.02	
	Superfície Específica de Blaine (m ² /kg)		4133	
	Água na Pasta Normal (%)		29.1	
	Tempo de Presa (min)	Início		178
		Fim		232
	Expansibilidade (mm)			1.06
Composição Química	Perda ao Fogo (%)	-	2.15	
	Resíduo Insolúvel (%)	-	0.99	
	Óxido de Silício (%)	SiO ₂	17.85	
	Óxido de Alumínio (%)	Al ₂ O ₃	4.15	
	Óxido de Ferro (%)	Fe ₂ O ₃	3.71	
	Óxido de Cálcio (%)	CaO	65.06	
	Óxido de Magnésio (%)	MgO	1.85	
	Sulfatos (%)	SO ₃	3.44	
	Óxido de Potássio (%)	K ₂ O	0.91	
	Óxido de Sódio (%)	Na ₂ O	0.28	
	Cloretos (%)	Cr	0.06	

Focando na Figura 3-1, de acordo com curva granulométrica do cimento, foi possível observar que o diâmetro no qual se alcançou 90% de valores acumulados foi 24.16 µm (D90). Com significado idêntico, o D50 foi 9.30 µm.

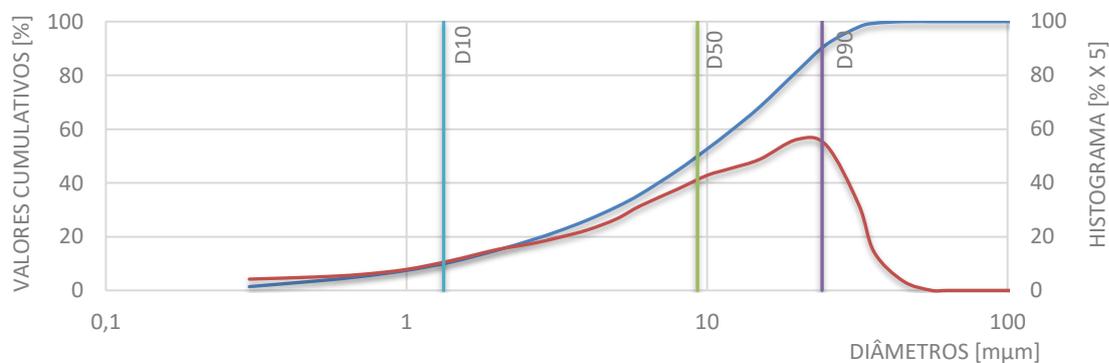


Figura 3-1 - Granulometria CEM I 42.5 R (Reis [10]).

3.2.2. Cinzas volantes

Conforme se pode verificar em capítulos anteriores, o uso de cinzas volantes exhibe uma panóplia de benefícios. Em Portugal, estas são produzidas em apenas duas centrais termoelétricas: a central Sines e a central do Pego. A sua composição depende do tipo de carvão que é queimado nas caldeiras, sendo capturadas através de filtros especiais colocados no topo das chaminés (Camões[5]). Neste caso as cinzas volantes escolhidas, foram da classe F (Reis [10]), provenientes da central termoelétrica do Pego.

Devido ao facto de estas cinzas já terem sido utilizadas previamente em estudos na Universidade do Minho, particularmente por Camões [5], Reis [10] e mais recentemente por Herdeiro [17], sendo que estas já se encontravam corretamente classificadas, tal como apresentado no Quadro 3-2 (Reis [10]). Verificou-se que a perda ao fogo foi reduzida, 3.07%, podendo significar que estas possuam um défice em matéria orgânica, o que é benéfico.

Quadro 3-2 - Propriedade químicas e físicas das cinzas volantes (Reis [10]).

Composição química	Perda ao fogo (%)	5.60 - 9.28
	Óxido de silício – SiO ₂ (%)	42.16 – 58.46
	Óxido de alumínio – Al ₂ O ₃ (%)	21.04 – 32.65
	Óxido de ferro – Fe ₂ O ₃ (%)	3.51 – 9.13
	Óxido de cálcio total – CaO (%)	1.67 – 9.18
	Óxido de magnésio – MgO (%)	0.65 – 2.69
	Sulfatos – SO ₃ (%)	0.22 – 1.04
	Clorretos – Cl ⁻ (%)	0.00 – 0.06
	CaO livre (%)	0.00 – 0.12
	Óxido de sódio – Na ₂ O (%)	0.18 – 0.91
	Óxido de potássio – K ₂ O (%)	0.72 – 3.11
	Óxido de fósforo – P ₂ O ₅ (%)	0.15 – 2.14
	Óxido de titânio – TiO ₂ (%)	0.69 – 1.89
	Total SiO ₂ +Al ₂ O ₃ +Fe ₂ O ₃ (%)	74.55 – 92.16
Propriedades físicas	Massa volúmica (kg/m ³) ¹	2360
	Superfície específica de Blaine (m ² /kg)	387.9
	Granulometria > 45 µm (%)	14.10 – 31.55
	Granulometria > 75 µm (%)	5.60 – 18.85
	Humidade (%)	0.01 – 0.32
	Exigência de água ³	0.297

Influência das condições de cura no desempenho do Betão.

De acordo com a Figura 3-2, o D90 foi 20.19 μm , o D50 foi 8.55 μm e o valor do D10 foi 1.53 μm . Sendo assim, os valores de D50 e de D90 foram mais reduzidos que os do cimento, concluindo-se que as cinzas volantes eram mais finas do que o cimento.

No entanto, apesar de mais finas que o cimento, podem ser consideradas como da ordem de grandeza e, assim, de tamanho semelhante.

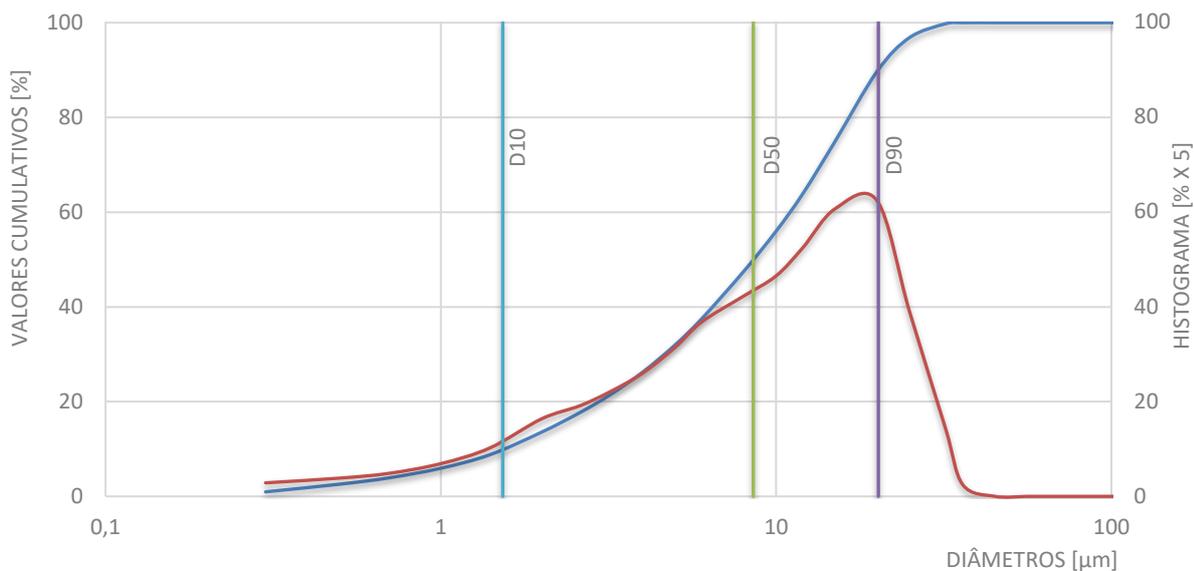


Figura 3-2 - Granulometria das Cinzas Volantes (Reis, 2015).

3.2.3. Agregados

Para a realização da amassadura foi utilizada uma meia-areia rolada, proveniente do rio Douro, designada comercialmente por areia 0/4. duas britas da provenientes da pedreira “Sorte do mato do monte das Lagedas”, do distrito de Guimarães, designação comercial brita 4/8 e brita 6/12.

No Quadro 3-3 estão patentes as características dos agregados utilizados (Reis [10]) e (Britaminho [42]).

Quadro 3-3 - Características dos agregados (Reis [10]).

Origem		Areia Rolada de rio	Brita Fina Pedreira	Brita Grossa Pedreira
Massa volúmica	Material impermeável	2.55 kg/m ³	2.67 kg/m ³	2.67 kg/m ³
	Partículas secas em estufa	2.50 kg/m ³	2.58 kg/m ³	2.61 kg/m ³
	Partículas saturadas e superfície seca	2.52 kg/m ³	2.61 kg/m ³	2.63 kg/m ³
Baridade seca sem compactação		1.48 kg/m ³	1.31 kg/m ³	1.34 kg/m ³
Volume de vazios		40.60%	49.30%	48.80%
Absorção de água		0.70%	1.20%	0.90%
Teor humidade		17.80%	0.80%	0.60%
Teor de finos		0.20%	0.40%	0.30%
<u>Dimensão máxima</u>	ASTM	2.0 mm	12.7 mm	12.7 mm
	Faury	4.2 mm	10.3 mm	13.1 mm
<u>Dimensão mínima</u>	ASTM	0.25	4	8
Módulo de finura		4.2	7.53	9.01

3.2.4. Cal hidratada

A cal hidratada foi fornecida pela empresa Lusical [43]. Sabendo que a cal hidratada é responsável por prover uma reserva de alcalinidade adicional às misturas com cinzas volantes, prevê-se que estas adquiram maiores resistências mecânicas, melhor desempenho e durabilidade superior [16].

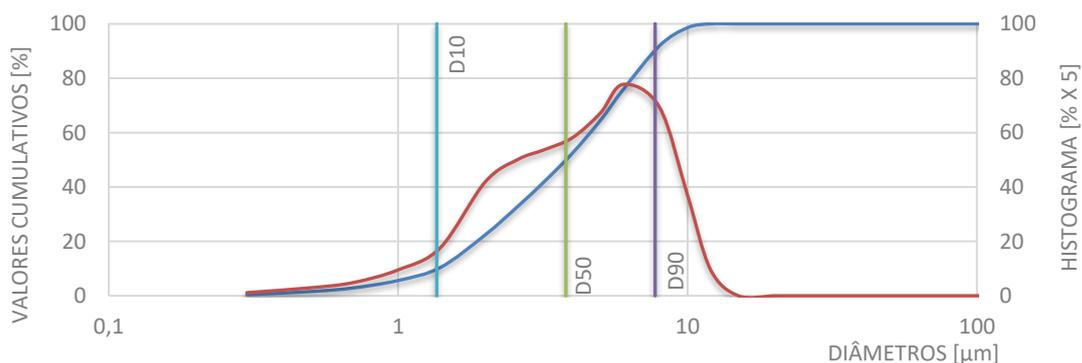


Figura 3-3 - Granulometria da cal hidratada (Reis [10]).

Analisando a Figura 3-3, verificou-se que a cal apresentava um D90 de 7.73 μm e D50 de 3.8 μm, pelo que foi possível concluir que a cal hidratada era muito mais fina do que as cinzas volantes e o próprio cimento.

Quadro 3-4 - Características da cal hidratada Lusical [43].

Análise Química	CaO	≥ 80 %
	Ca(OH) ₂	≥ 93 %
	CaO	≥ 70 %
	CO ₂	≤ 1.8 %
	H ₂ O livre	≤ 1.0 %
	MgO	≤ 5.0 %
	SO ₃	≤ 2 %
	SiO ₂	≤ 0.35 %
	Fe ₂ O ₃	≤ 0.20 %
	Al ₂ O ₃	≤ 0.20 %
	CaO +MgO	≥ 90 %
	Antimónio	≤ 0.033 mg/g
	Arsénico	≤ 0.166 mg/g
	Cádmio	≤ 0.016 mg/g
Chumbo	≤ 0.166 mg/g	
Crómio	≤ 0.166 mg/g	
Níquel	≤ 0.166 mg/g	
Selénio	≤ 0.033 mg/g	
Densidade	0.3 a 0.6	
Expansibilidade	≤ 2mm	
Penetração	>10 e < 50mm	
Teor de Ar	< 12 %	

No Quadro 3-4, são apresentadas as características facultadas pelo produtor Lusical [43]. Ficou patente, através da sua análise química, que a cal hidratada era constituída principalmente por hidróxido de cálcio (Ca(OH)₂), com um teor superior a 93%. Isto significa que este material cumpria o objetivo de fornecer elevada alcalinidade no processo de cura.

3.2.5. Água

De acordo com a norma NP EN 1008 [44], para o produção de betão a água usada nas amassaduras não foi submetida a qualquer tipo de teste, visto que esta foi proveniente da rede de abastecimento público de Guimarães e, portanto, reúne todos os requisitos citados na norma.

3.3. Vista geral da investigação

Pretende-se estudar os efeitos que uma cura saturada com hidróxido de cálcio terá nas propriedades do betão. Para isso irão avaliar-se os efeitos ao longo do tempo da resistência à compressão, resistividade elétrica, evolução de massas, penetração de cloretos (CTH) e a

profundidade de carbonatação. Também serão avaliados nos diversos ensaios referidos, os resultados após carbonatação acelerada do betão. Para tal, os provetes ficarão sujeitos a dois tipos de cura (uma em água e outra em água saturada em hidróxido de cálcio) até aos 365 dias. Durante este período, serão realizados ensaios de resistência à compressão, resistividade elétrica, ultrassons e evolução de massas, nas maturidades de 7, 14, 28, 56, 90, 120, 241, 365 dias e 365 dias após carbonatação acelerada. No que concerne aos ensaios de penetração de cloretos, estes serão realizados aos 28, 90, 365 dias e 365 dias após carbonatação acelerada.

Entretanto, aos 120 dias, também serão encaminhados provetes para um pré-condicionamento de 7 dias, seguido de um período de 120 dias em câmara climática, de forma a estudar os efeitos das duas curas nos ensaios de resistência à compressão, resistividade elétrica, ultrassons, CTH e evolução de massas, perante um cenário de carbonatação acelerada. Com este mesmo procedimento, também será avaliada a profundidade de carbonatação.

Finalmente, também será estudada a evolução de pH dos provetes de betão. Para tal, realizaram-se ensaios de medição de pH ao longo de um perfil dos provetes, desde a superfície até ao seu interior. Estes ensaios realizaram-se aos 35 dias (28+7), 127 dias (120+7) e aos 247 dias (após ensaio de carbonatação acelerada).

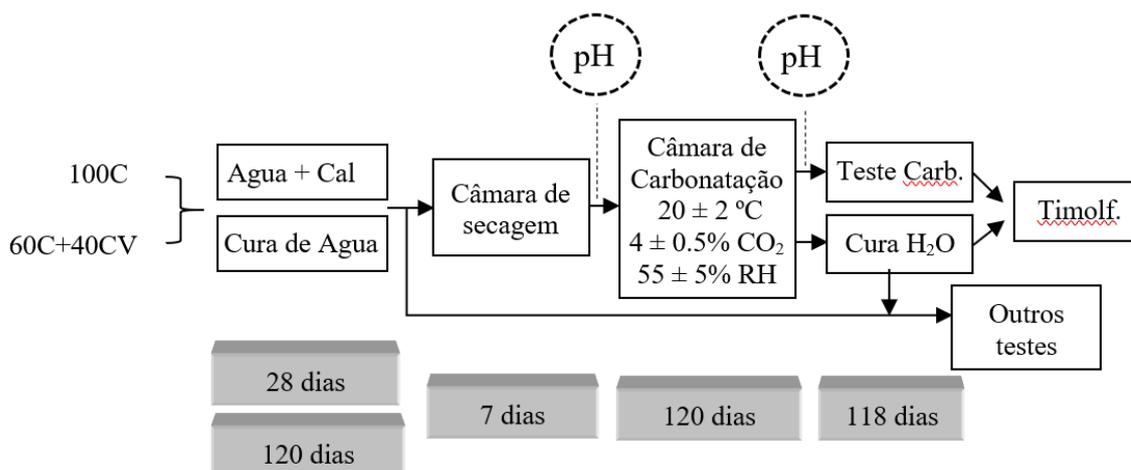


Figura 3-4 - Calendário de trabalho experimental.

3.4. Procedimentos efetuados no fabrico do betão

De maneira a determinar as dosagens dos betões, foram seguidos alguns critérios, tendo sempre em devida conta que esta pesquisa se encaixa num projeto com maiores dimensões Reis [10].

Influência das condições de cura no desempenho do Betão.

Sendo que esta dissertação comparara 2 tipos de betões, uma amassadura composta por 100% de cimento (C) e uma segunda composta por 60% de cimento e 40% de cinzas volantes (CV). Desta forma teve-se em conta as devidas desigualdades referentes aos seus ligantes.

No Quadro 3-5 apresentam-se as quantidades utilizadas nas duas misturas.

Quadro 3-5 - Composição das amassaduras.

Composições	A/L	L [kg]	C [kg]	CV [kg]	M [kg]	B4-8 [kg]	B6-12 [kg]	A [kg]
I 100C	0.50	380	380	0	989.8	261.3	492.6	178.8
II 60C+40CV	0.50	380	228	152	989.8	261.3	492.6	178.8

L – Ligante, C – cimento, CV – cinzas volantes, M – areia, B – brita, A – água

O fabrico das amassaduras foi idêntico em ambas as misturas, sendo concebidas da mesma forma que a realizada por Reis [10]. Desta forma, viabiliza-se a mesma energia de mistura. De seguida são citados todos os passos efetuados no decorrer das misturas:

1. Humedecimento da betoneira de modo a evitar absorção inicial de água;
2. Remoção da água em excesso durante 5 minutos;
3. Entrada dos agregados;
4. Mistura dos agregados durante 5 minutos;
5. Retirada de amostras dos agregados para contabilização da água;
6. Colocação e mistura do cimento, cinzas volantes durante um minuto e meio;
7. Colocação de 5/6 da água durante um minuto;
8. Continuação da mistura durante dois minutos;
9. Colocação da restante água (1/6) durante trinta segundos;
10. Finalização da mistura durante dois minutos.

De forma a minimizar qualquer erro no início das amassaduras, antes de acrescentar água à mistura, procedeu-se a uma quantificação de água existente nos agregados. Neste sentido, no *passo 5*, foram retiradas 3 amostras da mistura de agregados, correspondentes a cada amassadura. Estas foram pesadas e devidamente marcadas para obter-se a massa húmida de cada amostra. Seguiu-se uma secagem através de um forno a 200 °C durante 15 minutos. Por

fim, a diferença de massa final e inicial, entre cada uma das amostras, correspondeu à massa húmida da amostra. A água de amassadura foi corrigida tendo em atenção esta humidade.

Terminada a amassadura, efetuou-se o ensaio de consistência, através do ensaio de *slump*, estipulado na norma NP EN 12350-2 [45]. Para tal, utilizaram-se uma placa, uma forma e um varão completamente limpos. Efetuou-se o enchimento da forma do seguinte modo: 3 camadas de betão, cada uma com sensivelmente um terço da altura da forma. No intervalo de cada camada foi realizado a compactação com auxílio a um varão de compactação, com 25 pancadas. Após a compactação da ultima camada, foi removido o excesso de betão, utilizando uma colher. Logo após remover o molde, registou-se o abaixamento, determinando pela diferença entre a altura do molde e o ponto mais alto do provete que abaixou. Para que o ensaio seja válido, ao verificar-se o abaixamento o betão este teria de permanecer essencialmente intacto e simétrico. Foi o caso, validando-se o ensaio.



Figura 3-5 - Desmoldagem do provete e respetiva medição de abaixamento.

Após a verificação da consistência, procedeu-se à realização dos provetes. Para o enchimento dos moldes. Foram utilizados os procedimentos descritos na (NP EN 12390-2 [46]). Antes do enchimento, a superfície interior do molde foi pincelada com uma fina camada de produto descofrante, para precaver a possível aderência do betão à cofragem a quando da descofragem.

Para os ensaios de resistências mecânicas, ultrassons, resistividade elétrica e evolução de massas, utilizaram-se moldes com $100 \times 100 \times 100 \text{ mm}^3$. Para os ensaios de carbonatação

Influência das condições de cura no desempenho do Betão.

acelerada, utilizaram-se moldes com 100x100mx850 mm³. Para o ensaio de CTH, utilizaram-se moldes cilíndricos com Ø100x200 mm³.

Com vista à obtenção da melhor agregação e compactação do betão, o enchimento dos moldes foi efetuado em duas camadas, conforme a norma NP EN 12390-2 [46], na qual indica que nenhuma destas camadas deveria ser superior a 100 mm. Após a colocação do betão no molde, este foi imediatamente compactado, em cada camada, de forma a obter-se uma compactação completa sem existir segregação. Foi utilizada uma mesa vibratória, de forma a que a compactação seguisse um tempo mínimo, até que se atingisse a compactação completa do betão. Um dos pontos que foram tidos em atenção foi o caso de ser evitada a vibração excessiva, sendo que esta provocaria segregação dos componentes do betão.



Figura 3-6 – Preparação dos provetes.

A descofragem foi efetuada após 24 horas do enchimento dos moldes. No decorrer deste período, os mesmos permaneceram no laboratório à temperatura ambiente do mesmo. Após a descofragem os provetes, estes foram respetivamente marcados de forma a minimizar qualquer erro futuro relativo ao tipo de mistura e tipo de cura.

Seguidamente, os mesmos foram colocados em tanques individuais, por tipo de cura: um tanque com cura em água com os provetes da mistura I e da mistura II (cura H); um tanque com cura em água saturada com cal hidratada, com provetes da mistura I e da mistura II (cura CH). Estes tanques permaneceram na câmara húmida do Laboratório de Materiais de Construção, com uma temperatura de 20 °C e humidade relativa de $\pm 65\%$.

Sendo que existem 2 curas diferentes estas vão ser explicadas isoladamente.

3.5. Cura do betão

Na Figura 3-7, está representado o número de provetes realizados pela mistura I e II, mostrando o seu percurso durante esta campanha experimental. São apresentados também as diferentes curas (em água, e água saturada em hidróxido de cálcio) e a forma pela qual foi efetuada a divisão dos provetes, para a realização do ensaio de carbonatação.

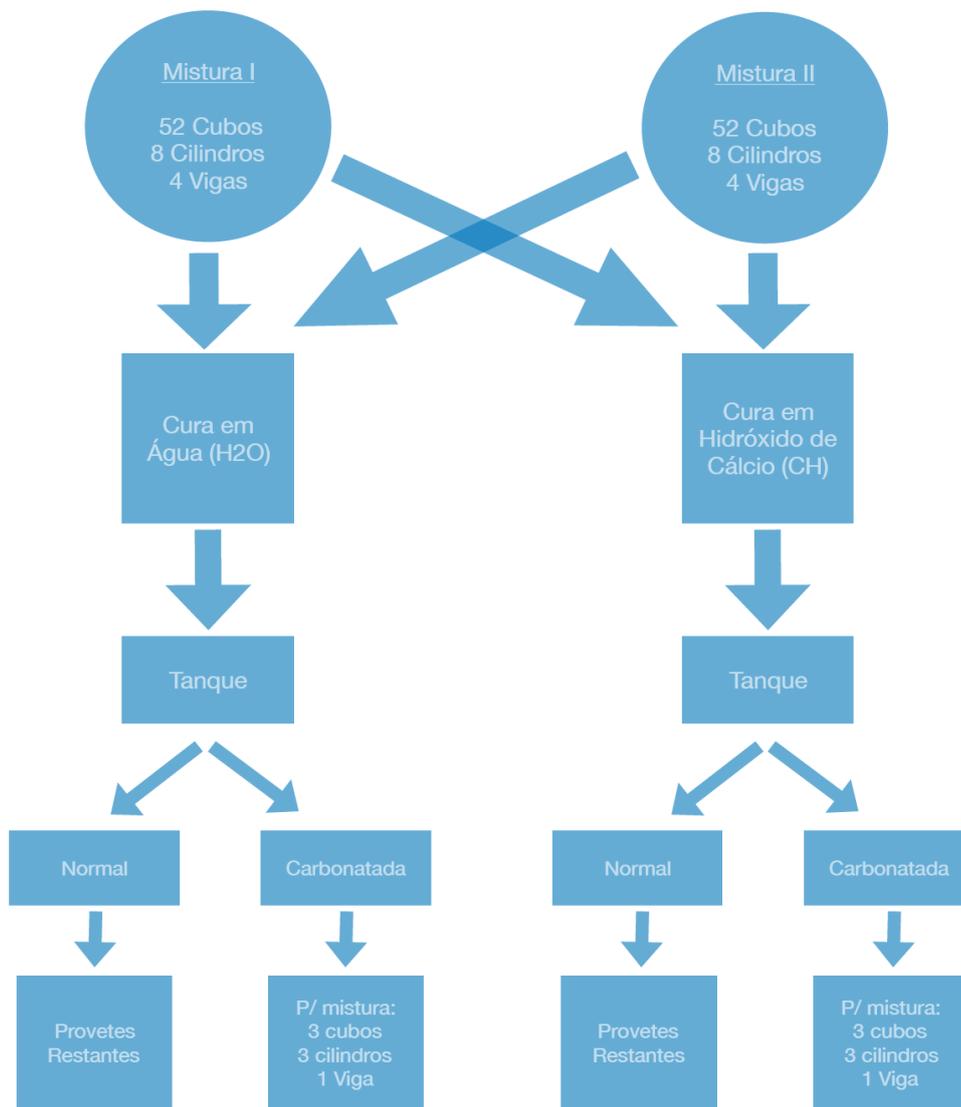


Figura 3-7 – Número de provetes realizados por mistura

Cura H

A cura em água é a mais comum, sendo que irá ser a cura de referência no decorrer de toda a dissertação. Foi utilizada para os provetes sujeitos a testes de resistividade elétrica, evolução de massas e ultrassons, utilizando os mesmos provetes (três) durante todo o decorrer da experimentação. Dois destes provetes estiveram em câmara de carbonatação a partir dos 35 e 127 dias (Figura 3-4 - Calendário de trabalho experimental.Figura 3-4); um dos provetes permaneceu no respetivo recipiente, para funcionar como referência. Relativamente aos ensaios de resistências mecânicas, usaram-se 3 provetes para cada maturidade: 7, 14, 28, 56, 90, 120, 241, 365 dias e 365 dias após carbonatação acelerada, no total de 54 provetes.

Para os ensaios de CTH, utilizaram-se provetes cilíndricos com $\text{Ø}100 \times 200 \text{ mm}^3$. Quatro para cada cura e cada mistura, pois seriam ensaiados aos 28, 90, 365 dias e após carbonatação acelerada. No total utilizaram-se 8 provetes cilíndricos.

Por fim, para os ensaios de carbonatação acelerada (medição da profundidade de carbonatação), foram utilizadas metades do molde $100 \times 100 \times 850 \text{ mm}^3$, para cada mistura e cada cura, obtendo-se 4 provetes com cerca de $100 \times 100 \times 425 \text{ mm}^3$. Os provetes só foram submetidos à câmara climática aos 127 dias de maturidade. Na Figura 3-9 (esq.) poderá ver-se o tanque de cura com os respetivos provetes.



Figura 3-8 – Descofragem dos provetes.

Cura CH

No que diz respeito à cura em cal hidratada, foi colocado no tanque água, que por sua vez foi saturada em hidróxido de cálcio. Com ajuda de uma colher, adicionou-se cal hidratada na água, mexendo sempre. Quando já não fosse possível dissolver mais cal hidratada, ainda se adicionaram mais 500 g. Este procedimento está de acordo com a filosofia da ASTM C511-03 [33], que impõe a adição de cal em excesso à necessária para saturação. O número de provetes e os procedimentos foram iguais aos referidos na cura H. Também para cumprir o procedimento da ASTM C511-03 [33], a solução de cura foi agitada quinzenalmente. Na Figura 3-9 (dir.) poderá ver-se o tanque de cura com os respectivos provetes.



Figura 3-9 – Tanques com cura H (esq.) e cura CH (dir.).

3.5.1. Perfil do pH do betão

Realizaram-se perfis de pH nos provetes aos 35 dias, 127 dias e aos 247 dias após ensaio de carbonatação acelerada, de acordo com a Figura 3-10. O procedimento de ensaio foi o mesmo utilizado por Reis [47] e pode ser descrito da seguinte forma: com o berbequim foram retiradas duas amostras de pó a várias profundidades das vigas $100 \times 100 \times 425 \text{ mm}^3$. Após a recolha de pó, em cada profundidade, os furos foram limpos com o auxílio de jato de ar, sendo depois as amostras colocadas em recipiente hermético. Seguidamente, cada amostra de pó foi dissolvida em água destilada, na proporção em massa de pó/líquido de 1/20, mantendo-se em recipiente fechado durante 24 horas. Após esse período, as amostras foram filtradas com recurso a filtro de papel e com a solução resultante, mediu-se o pH com um medidor HI 5222-02.

As profundidades adotadas foram: para o perfil de 35 dias, 2.5, 5.0, 7.5 e 20.0 mm; para os restantes perfis: 2.5, 5.0, 7.5, 10.0, 12.5, 15, 20.0, 22.5, 25.0, e 30.0.



Figura 3-10 - Extração de pó de varias profundidades.

3.5.2. Resistência à compressão

Este teste foi realizado numa prensa, da marca ELE, que detém uma capacidade de carga desde os 50 até 3000 kN. No seguimento deste ensaio foram utilizados 3 provetes de cada mistura e cada cura, com $100 \times 100 \times 100 \text{ mm}^3$, de acordo com a Figura 3-11. Os ensaios foram realizados aos 7, 14, 28, 56, 90, 120, 241, 365 dias, tendo em atenção que no último ensaio se comparou provetes carbonatados e não carbonatados. Foi selecionada uma velocidade constante de aplicação de carga igual a $7 \text{ N/mm}^2\text{s}$.

Tendo em conta que os provetes tiveram a sua cura em água ou água saturada com cal hidratada, para garantir que estes não contivessem humidade excessiva na superfície, foram retirados de água 1h antes do ensaio.

Seguindo a norma NP EN 12390-3 [48], a qual aponta uma série de cuidados a ter antes de qualquer tipo de ensaio à compressão, foi impreterível limpar as superfícies da máquina antes de cada ensaio de forma a retirar qualquer tipo de resíduos. Outro cuidado a ter foi o próprio posicionamento dos provetes, os quais foram solicitados perpendicularmente à direção de moldagem, para, desta forma, garantir que a carga fosse aplicada em duas faces paralelas e lisas, que estiveram em contacto com o molde antes da respetiva desmoldagem.



Figura 3-11 - Ensaio de resistência à compressão.

3.5.3. Esclerómetro

O esclerómetro é um equipamento normalmente usado para situações “in situ” e que mede a dureza superficial de betões, de forma simples, eficaz e não destrutiva.

Os resultados deste ensaio ajudam a obter informações válidas sobre a homogeneidade do betão [49]. Como era de esperar este teste apenas nos dá a capacidade de resistência do provete à superfície.

O funcionamento simples deste equipamento conta com um veio que, aquando de uma compressão contra a superfície do provete, a mola no interior do aparelho atinge o fim de curso e liberta o mesmo, que por sua vez com quase instantânea extensão da mola, atinge o provete e por sua vez provoca um ressalto que é registado pelo aparelho numa escala com um ponteiro, registando assim o ponto máximo do ressalto da massa.

Este ressalto é tanto maior quanto mais dura for a superfície de impacto do betão.



Figura 3-12 - Ensaio Esclerométrico.

Os ensaios foram realizados imediatamente antes dos ensaios de resistência à compressão. Assim, foram ensaiadas às mesmas maturidades e com a mesma quantidade de provetes. Em cada provete, quando a prensa já estava a realizar pressão (50kN) sobre o provete, efetuaram-se um mínimo de 8 leituras de esclerómetro, em locais diferentes (Figura 3-12). Caso fosse atingido um poro grande, ou uma descontinuidade, realizava-se outra leitura de substituição. O resultado final resulta da média de todas as medições.

3.5.4. Evolução da massa

De forma criar maior controlo da experiência e de modo a estabelecer uma relação entre a variação da massa e o resto das atividades experimentais, estudou-se a evolução de massas dos provetes de dimensão $100 \times 100 \times 100 \text{ mm}^3$, durante toda a cura: 7, 14, 28, 56, 90, 120, 241 e 365 dias, sendo que nesta última se realizou para os provetes normais e para os carbonatados. Foram utilizados sempre os mesmos 3 provetes para as leituras. Os resultados referem-se à média dos provetes. Para avaliar os efeitos da carbonatação acelerada, dois provetes foram para a câmara climática e um permaneceu na solução de cura, utilizando-se a média dos dois provetes carbonatados e o resultado singular do provete que ficou em solução.

3.5.5. Resistividade elétrica

O Ensaio da resistividade elétrica teve como objetivo fundamental a medição elétrica de uma superfície de um provete de betão, através de um resistivímetro linear de quatro eléctrodos. Este ensaio seguiu a especificação LMC PE-002, ‘Medição Da Resistividade Eléctrica de Uma Superfície de Um Elemento de Betão’, 2005..

O referido ensaio foi realizado aos 7, 14, 28, 56, 90, 120, 241 e 365 dias. Mais uma vez, nesta última data deu-se a duplicação do ensaio realizando-se também para os provetes carbonatados. Usando 3 provetes com dimensões de $100 \times 100 \times 100 \text{ mm}^3$, para cada cura e tipo de betão, através deste ensaio, são conseguidas informações relevantes ao nível do risco da corrosão, visto que a corrosão está diretamente ligada à condutividade eletrolítica (Ferreira) [50]. Desta forma pode-se concluir que para uma baixa resistividade implica uma altíssima intensidade de corrosão, sendo assim importantíssimo determinar a resistividade elétrica. A resistividade elétrica é associada à permeabilidade de fluidos e à difusidade de iões através de materiais como o betão.

Concluindo, pretende-se betões com elevada resistência de forma a minimizar as correntes de corrosão, tornando assim menor a velocidade de corrosão.

Quadro 3-6 - Taxa de corrosão (Proceq,1998).

Taxa de corrosão	
> 20 kΩ cm	Taxa de corrosão baixa
10-20 kΩ cm	Taxa de corrosão de baixa a moderada
5-10 kΩ cm	Taxa de corrosão alta
< 5 kΩ cm	Taxa de corrosão muito alta

A respetiva medição realizou-se medindo diagonalmente, todas as faces de cada provete, nos dois sentidos. Foi usado o equipamento *RESIPOD* da marca *PROCEQ*, sendo este equipamento caracterizado por ter uma sonda com 4 eléctrodos equidistantes distanciados de xyz mm.

Durante a realização deste ensaio houve o cuidado de garantir que todos os provetes fossem sujeitos durante 10 minutos a uma secagem prévia em ambiente de laboratório, efetuando uma limpeza superficial de forma a garantir que as superfícies ficavam secas.

Influência das condições de cura no desempenho do Betão.

Durante os intervalos da execução do teste de resistividade, as pontas do aparelho encontravam-se saturadas em água de forma a garantir contato elétrico entre o mesmo e a superfície do provete. De forma a garantir um resultado sem qualquer tipo de interferência, os provetes foram colocados sobre uma placa de XPS trabalhando assim com isolante.

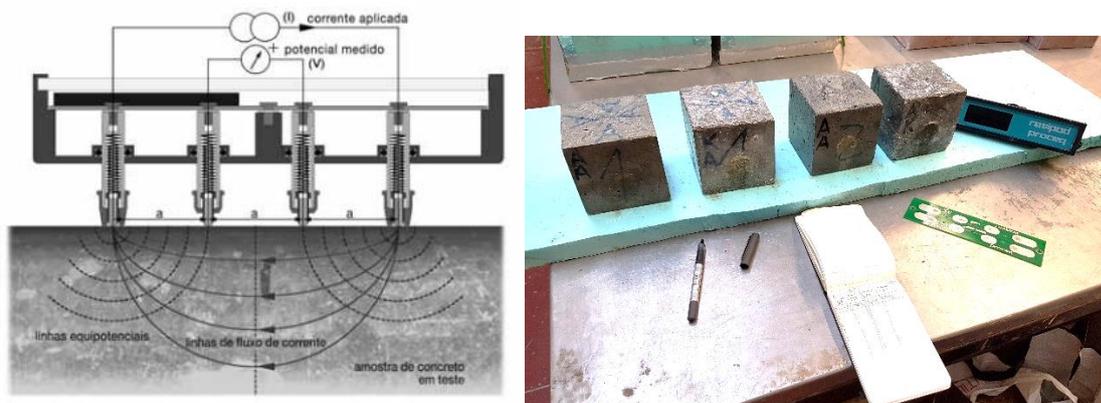


Figura 3-13 – Resistivímetro utilizado para medição da resistividade elétrica

3.5.6. Ultrassons

Esta experiência foi realizada seguindo o método indicado por Naik, Malhotra e Popovics [51] sendo realizado dentro dos mesmos períodos sugeridos, utilizando provetes com as dimensões $100 \times 100 \times 100 \text{ mm}^3$. Esta campanha decorreu segundo os dias de cura de 7 a 365 dias. Seguindo a norma Naik, Malhotra and Popovics [52], o respetivo ensaio consistiu em aplicar uma força eletroacústico que em contato com a superfície do provete de betão produziu um conjunto de ondas longitudinais.

Tal como podemos observar na Figura 3-14, o equipamento utilizado foi da marca *PROCEQ*, através do qual, a cada idade, se realizaram 3 medições por provete. Deste modo, o valor final obtido resultou da respetiva média. De salientar, também, que antes de cada medição, colocou-se um electrogel (gel viscoso de base aquosa com elevada condutividade elétrica, indicado para garantir contato íntimo entre a sonda e o provete) em cada sensor, para promover um contacto eficaz e tornar as leituras mais rigorosas. Em sintonia com a experiência anterior também se utilizou uma placa de XPS sob os provetes, aquando da realização das devidas medições para não haver contaminação das mesmas.



Figura 3-14 - Medição de Ultrassons.

3.5.7. Carbonatação acelerada

No que diz respeito ao ensaio de carbonatação, não existe norma europeia nem portuguesa. Desta forma deve ser seguida uma pré-norma NP EN 12504-4 [53] e, desta forma, basear a nossa experiência. Os provetes com dimensões de aproximadamente $215 \times 100 \times 100 \text{ mm}^3$ antes de terem sido colocados na câmara de carbonatação acelerada, foram condicionados 7 dias dentro de uma caixa isolada com uma temperatura constante, de forma a realizar um pré-condicionamento. Após este procedimento, foram envoltos em parafina nas faces que não iriam sofrer carbonatação (topos e duas faces opostas). Depois de toda esta preparação, os provetes seguiram para uma câmara climática com uma humidade relativa de $55 \pm 5\%$, uma quantidade dióxido de carbono de $4 \pm 0.5\%$ e temperatura de $20 \pm 2 \text{ }^\circ\text{C}$. Após 120 dias de permanência neste ambiente, as amostras foram retiradas, sendo que as vigas foram fraturadas em porções de aproximadamente 50 mm de espessura, de forma a possibilitar o estudo da profundidade da carbonatação, conforme está representado na Figura 3-15.



Figura 3-15 - Fratura de porções com cerca de 50 mm de espessura.

Uma das principais consequências da carbonatação é a descida do pH para valores mais inferiores a 9. A timolftaleína muda de cor para valores de pH entre 9,3 a 10,5 [54]. Assim, a partir de um indicador de timolftaleína, procedeu-se à avaliação da profundidade de carbonatação, de acordo com CEN [27], tal como observado na Figura 3-16. Este tipo de indicador fornece a profundidade de carbonatação de forma indireta. Depois dos provetes serem aspergidos, destacaram-se os locais carbonatados. De seguida, deixou-se que a cor se propagasse por todo o provete (cerca de 5 a 10 min) e, seguidamente, realizou-se a medição da profundidade de carbonatação. Esta medição é tida em conta a partir de 5 pontos equidistantes. A medida é feita na perpendicular, desde a parte superior do betão até à interceção da zona carbonatada. Deste modo, o resultado final foi a média de cada medição dos provetes de cada mistura.



Figura 3-16 - Medição da profundidade de carbonatação.

3.5.8. CTH

Este ensaio permite de a determinação do coeficiente de difusão dos cloretos no betão por meio do ensaio de migração em regime não estacionário. Neste sentido vão ser utilizados os provetes cilíndricos, ao qual corta-se a camada mais externa com uma espessura aproximada de 10-20 mm, utilizando o restante, cortando-o em três provetes com 50mm de espessura. Desta forma, a extremidade mais próxima do primeiro corte (a superfície do meio) será exposta à solução de cloretos (solução catódica) Figura 3-17.



Figura 3-17 – Provetes cilíndricos.

Após o corte dos provetes, estes são limpos, retirando o excesso de água nas suas superfícies e deixados a secar. Quando os mesmos tiverem secos superficialmente, são colocados na câmara de vácuo, procedendo-se ao tratamento por vácuo, reduzindo-se a pressão de 10 - 50mbar. Este vácuo é mantido durante 3 horas, e ainda com a bomba em funcionamento, vai se introduzir a solução saturada de $\text{Ca}(\text{OH})_2$, de modo a que todos os provetes fiquem submersos. Mantém-se o vácuo por mais uma hora antes de deixar o ar entrar no recipiente. Mantém-se os provetes na solução durante 18 ± 2 horas (Figura 3-18)

Figura 3-18 - Câmara de vácuo, antes e depois da dissolução de $\text{Ca}(\text{OH})_2$.

Seguidamente este período, é preparada uma solução de 10% em massa de NaCl em água da torneira (100g de NaCl em 900g de água, aproximadamente 2N) e a solução anódica é uma solução de NaOH 0,3 N em água destilada, com sensivelmente 12g NaOH num litro de água. É importante manter a temperatura da solução e dos provetes entre os 20-25°C durante este procedimento.

Os provetes são colocados dentro de uma manga de silicone, e é apertado com auxílio de duas abraçadeiras metálicas. A manga sobre o provete é colocada 300ml de solução anódica (NaOH

Influência das condições de cura no desempenho do Betão.

0.3M), imergindo-se no ânodo na solução anódica. Conectando o cátodo ao pólo negativo da fonte de alimentação e o ânodo ao pólo positivo. O ensaio de migração recorre a uma fonte a alimentação de 30V, registando a intensidade de corrente inicial que passa em cada provete. Ajustando a voltagem (se necessário), é registada a temperatura inicial em cada solução. Posteriormente é escolhida a duração do ensaio consoante a intensidade de corrente inicial registada (Figura 3-19).



Figura 3-19 – Ensaio de Migração de cloretos.

Findo o ensaio experimental de migração, os provetes são retirados das mangas de silicone, este e lavado com água, e posteriormente é por compressão diametral em 2 partes. Pulveriza-se a secção recentemente separada com uma solução de nitrato de prata, na qual vai ser visível a camada separada (passados cerca de 15 minutos), mede-se a profundidade de penetração.

Com a ajuda de um Paquímetro digital de 10mm em 10 mm com a exatidão de 0,1 mm, até obter sete profundidades.

4. RESULTADOS

4.1. Introdução

O objetivo deste capítulo é apresentar os resultados dos vários testes realizados e, desta forma, destacar as diferenças obtidas recorrendo aos dois tipos de cura diferentes das duas composições de betão produzidas. A primeira (mistura I) foi constituída com 100% de cimento (100%C) e a segunda (mistura II), por 60% de cimento e 40% de cinzas volantes (60C+40CV). Estas foram sujeitas a dois tipos diferentes de cura. A cura H (água) e a cura CH (hidróxido de cálcio), em que foram considerados dois tanques abertos, um com água e o outro com água saturada com hidróxido de cálcio, respetivamente.

4.2. Ensaio em betão fresco

4.2.1. Abaixamento

Na Figura 4-1 apresentam-se os resultados obtidos no ensaio de abaixamento dos betões produzidos. Através da análise da Figura 4-1 verificou-se um abaixamento de 45 mm, permitindo classificar a mistura I (100% cimento) como pertencendo à classe S1; um resultado de 160 mm (classe de abaixamento S4) foi obtido para a segunda mistura (60% cimento e 40% cinzas). Os dois resultados estiveram, dentro do esperado inicialmente, revelando a melhor trabalhabilidade das misturas com incorporação de cinzas volantes.

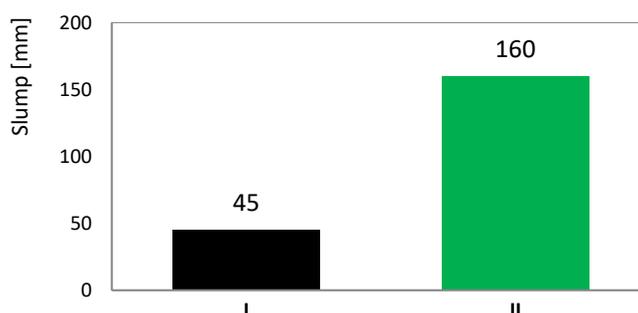


Figura 4-1 – Resultados do ensaio de abaixamento das diferentes misturas.

4.3. Ensaio em betão endurecido

4.3.1. Perfil de pH do betão

Na Figura 4-2, encontram-se os perfis de pH dos provetes com maturidades de 35 dias (28+7), 127 dias (120+7), e 365 dias após ensaio de carbonatação acelerada. Os 7 dias adicionais indicados em parenteses, referem-se ao período de pré-condicionamento.

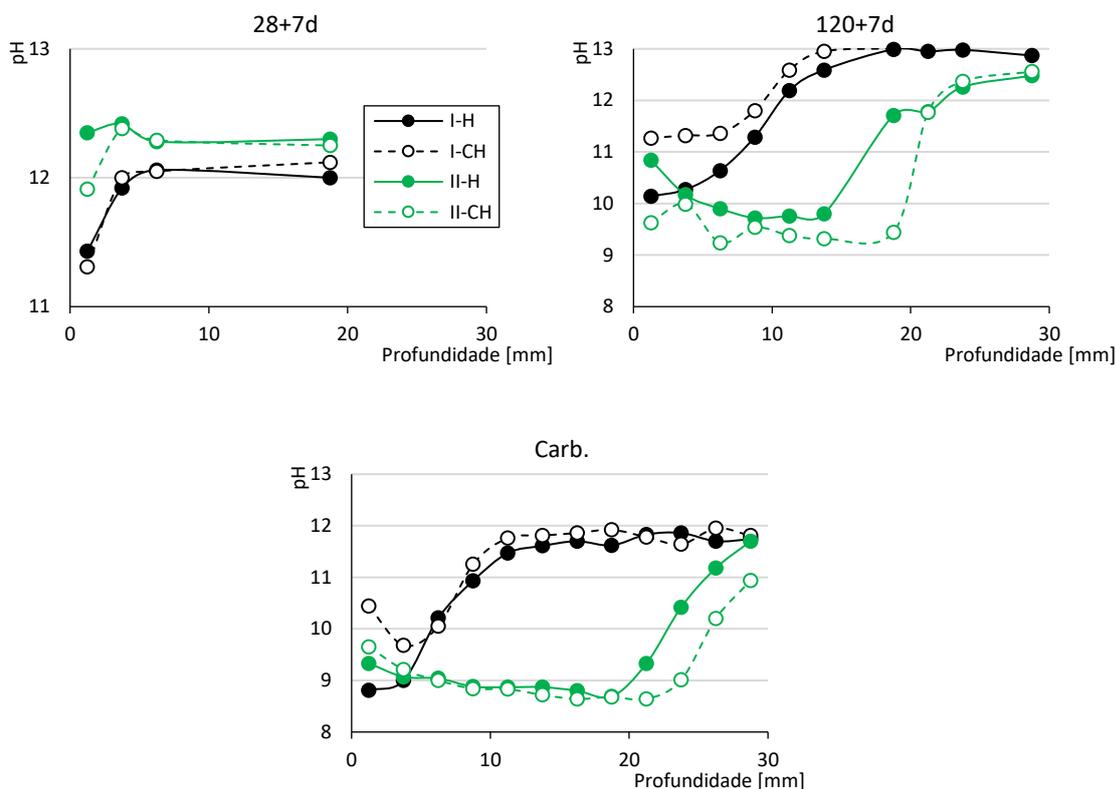


Figura 4-2 - Evolução de pH.

Por observação da Figura 4-2 verificou-se que, aos 35 dias de idade, a mistura II (com cinzas volantes), apresentava um pH ligeiramente superior ao da mistura I: no interior do betão o pH da mistura I foi de 12.00 e na mistura II foi de 12.30. Tal poderá ser explicado pelo fato das cinzas volantes anidras apresentarem um pH elevado. Foi observado, também, que junto à superfície dos provetes, houve um decréscimo de pH. Isto poderá ser explicado pela carbonatação das faces dos provetes expostas à atmosfera. Note-se que na superfície dos mesmos, pelo efeito de parede, a porosidade da superfície dos provetes, é mais elevada. Para

além disso, caso tenha ocorrido fenômenos de lixiviação, este processo iria afetar precisamente a superfície dos provetes. A cura em CH aparentemente não mostrou ter vantagens pois os valores são muito semelhantes.

Deverá ter-se em atenção da possibilidade do excesso de alcalinidade na solução de cura ser prejudicial, tal como podemos observar na Figura 4-3. Neste aspeto, há que considerar, que a solução de cura e o provete tendem a uniformizar a sua alcalinidade com o tempo.

Tal deve-se à tendência natural de equilíbrio de um gradiente de concentrações. Sendo assim, poderá considerar-se que aos 127 dias, o gradiente entre a cura tipo H e a superfície do betão foi provavelmente maior do que na cura de tipo CH, podendo ser a explicação para os piores resultados da cura tipo CH a partir dos 28 dias.

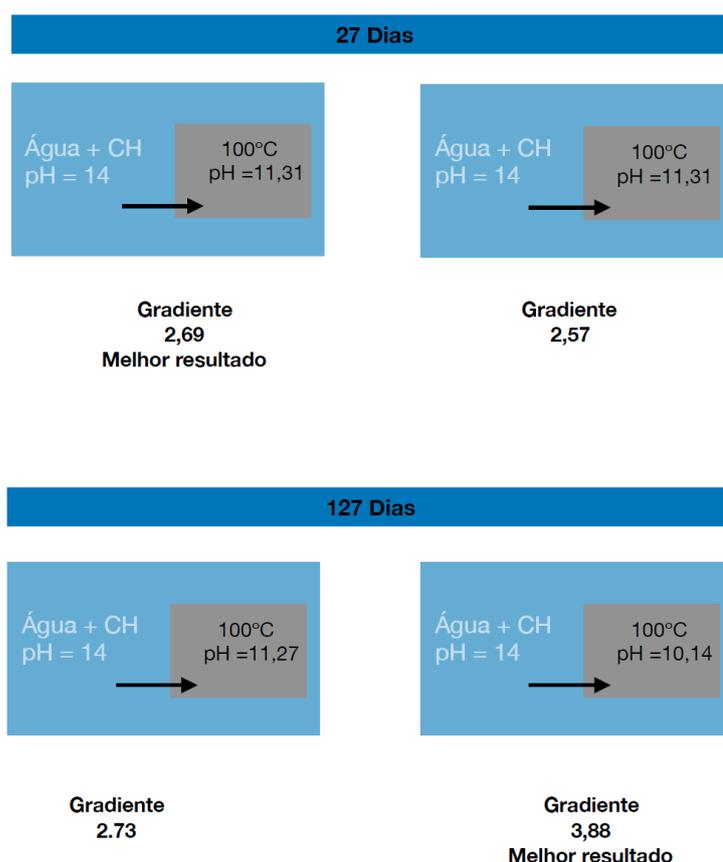


Figura 4-3 - Esquema de resultante de gradientes

Influência das condições de cura no desempenho do Betão.

O perfil aos 127 dias já demonstrou que a mistura I apresentava um pH mais elevado que a mistura II, conforme o que seria de esperar. A esta idade, a reação pozolânica já teve tempo para se desenvolver e, portanto, houve consumo de CH proveniente da reação do cimento com a água, assim, o pH baixou. Após 4 meses de maturidade seria o esperado, porque de um lado, o cimento da mistura I já produziu quase todo o CH possível (aumentando a alcalinidade do betão); por outro lado a mistura II, durante a reação pozolânica, começou a consumir o pH (diminuindo a alcalinidade).

A maior diferença entre a mistura I e II foi verificada entre os 10 e os 20 mm de profundidade. Uma explicação, poderá dever-se ao fato do grau da reação pozolânica a partir dos 22.5mm de profundidade, ter sido inferior que junto a superfície. Também foram observadas alterações da superfície do pH do betão, com as mesmas explicações já referidas anteriormente no perfil de 35 dias. Relativamente à cura em cal hidratada, na mistura I produziu uma boa melhoria do pH até aos 20 mm de profundidade, sendo a diferença na zona da superfície do betão de 1.13.

Na mistura II observou-se que a cura em pH foi prejudicial, sensivelmente também até aos 20 mm de profundidade. Talvez tenha ocorrido entrada de cal hidratada da cura CH para os poros do betão, dificultado a reação de hidratação do cimento.

No perfil dos provetes carbonatados continuaram-se a observar que o pH da mistura I foi superior à mistura II, mas com uma diferença maior. Tal poderá ser justificado pelo fato de os provetes terem sido sujeitos ao ensaio de carbonatação acelerada e, dessa forma, foram mais atacados os provetes da mistura II.

Na mistura II, a queda de pH até a profundidade de 20 mm situou-se genericamente abaixo dos 9, aumentando gradualmente até aos 30 mm. Relativamente à cura, manteve-se a tendência verificada aos 127 dias, na qual foi benéfica para a mistura I e prejudicial para a mistura II.

4.3.2. Resistência à compressão

Nos Quadro 4-1 e Quadro 4-2 estão registados o resumo das resistências à compressão e os coeficientes de variação nas várias maturidades, no que diz respeito à cura H e CH, dos 7 aos 365 dias de idade. Também são apresentados os valores carbonatados aos 365 dias (365-C).

Quadro 4-1 - Evolução da resistência à compressão [MPa].

Nome	A/L	Maturidade [dias]								
		7	14	28	56	90	120	241	365	365-C
I	H	30.8	35.9	49.8	55.0	55.4	55.5	57.3	60.7	69.1
	CH	40.6	43.2	48.4	50.7	50.9	51.0	51.6	51.9	60.2
II	H	19.9	21.2	27.6	32.6	36.0	37.5	46.8	57.1	50.6
	CH	19.2	22.6	28.7	32.4	35.6	35.4	44.3	50.4	33.8

Quadro 4-2 - Evolução da resistência à compressão – coeficiente de variação [%].

Nome	A/L	Maturidade [dias]								
		7	14	28	56	90	120	241	365	365-C
I	H	1.3%	1.9%	1.4%	2.0%	2.5%	4.1%	2.9%	3.8%	4.8%
	CH	3.1%	7.2%	4.6%	6.8%	3.3%	2.0%	0.0%	5.1%	7.0%
II	H	1.0%	4.1%	4.6%	6.4%	5.7%	6.0%	0.8%	3.7%	0.8%
	CH	0.9%	2.2%	5.0%	12.0%	6.2%	2.0%	0.0%	9.0%	7.6%

Para facilitar a interpretação dos resultados, realizaram-se ainda os gráficos com a lei de evolução da resistência a compressão no tempo (Figura 4-4). A cheio, estão patentes os provetes com cura H, a tracejado estão representados os provetes com cura CH e finalmente, a pontilhado e com a letra “C”, delimitaram-se os crescimentos dos provetes carbonatados. Verificou-se que a resistência a compressão cresceu no tempo. Para a mistura I, o maior crescimento obteve-se até aos 56 dias, enquanto na mistura II, o seu crescimento foi mais prolongado durante todo o seu tempo de ensaio, 365 dias. Tal deveu-se muito provavelmente devido ao efeito pozolânico das cinzas volantes: à medida que se deu a reação de hidratação do cimento foi produzido hidróxido de cálcio, que, por sua vez, reagiu lentamente com as cinzas volantes durante a reação pozolânica.

Verificou-se também que os coeficientes de variação da cura CH da mistura I, são genericamente superiores. Na mistura II este caso não foi observado. No Quadro 4-3, elaborou-se os ganhos e perdas que a cura em CH promoveu, face a cura em H. Na cura I os ganhos e perdas (Quadro 4-2) são na sua maioria superiores que os coeficientes de variação (Quadro

Influência das condições de cura no desempenho do Betão.

4-3), validando as os resultados obtidos. No que se refere a mistura II tal já não se verificou, pois, a ordem de grandezas foi semelhante.

Quadro 4-3 – Diferença entre cura CH e cura H [%].

Nome	Cura CH Vs Cura H [%]								
	7	14	28	56	90	120	241	365	365-C
I	31,7%	20,6%	-2,8%	-7,9%	-8,1%	-14,6%	-16,4%	-22,8%	-12,2%
II	-3,8%	6,8%	3,9%	-0,1%	-1,1%	-5,1%	3,6%	-12,2%	-11,6%

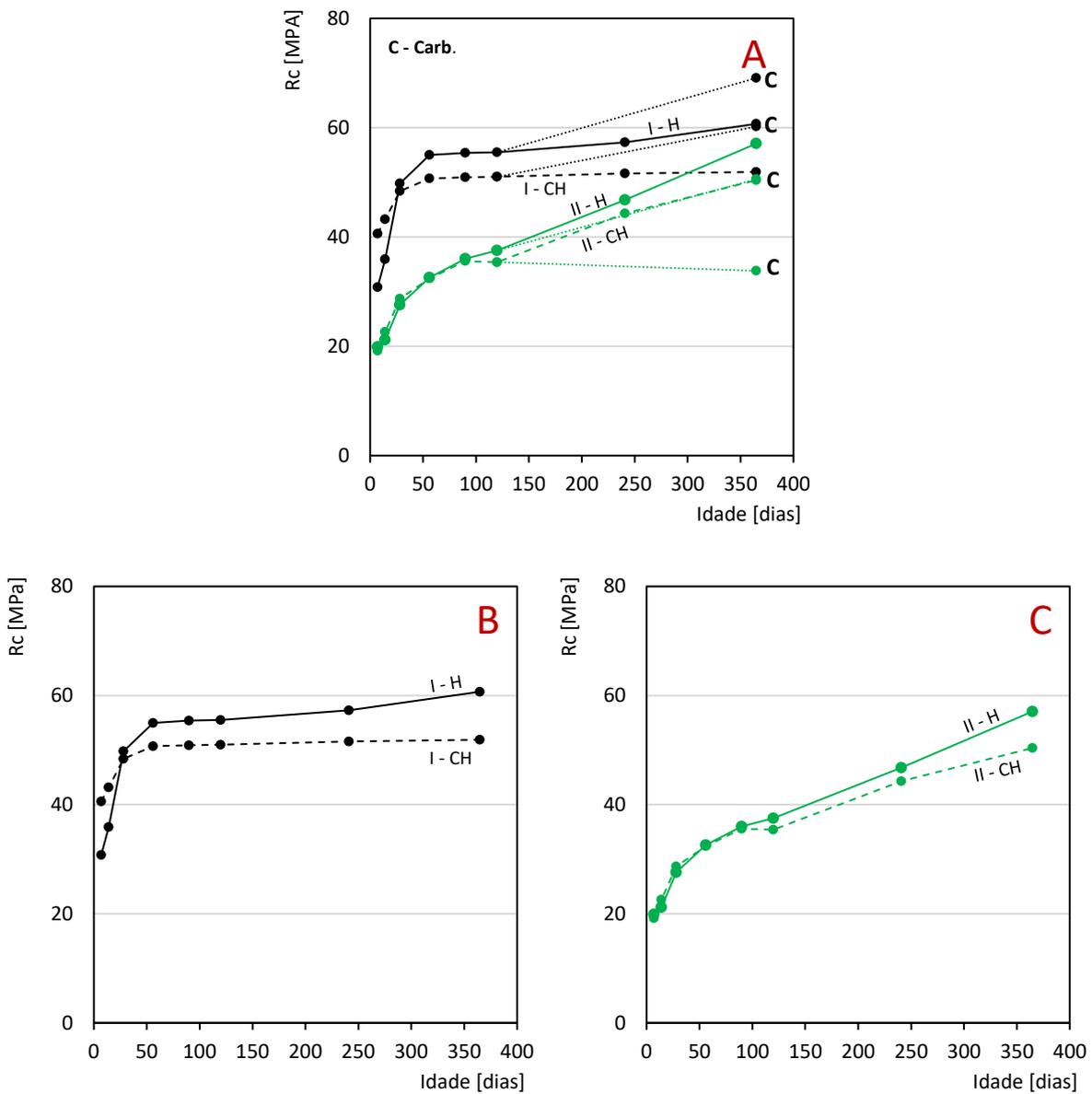


Figura 4-4 - Evolução da resistência à compressão.

Realizaram-se também gráficos comparativos nas idades: 7, 28, 365, 365-C e um resumo dos provetes carbonatados vs não-carbonatados (Carb. Vs Normal) expostos na Figura 4-5.

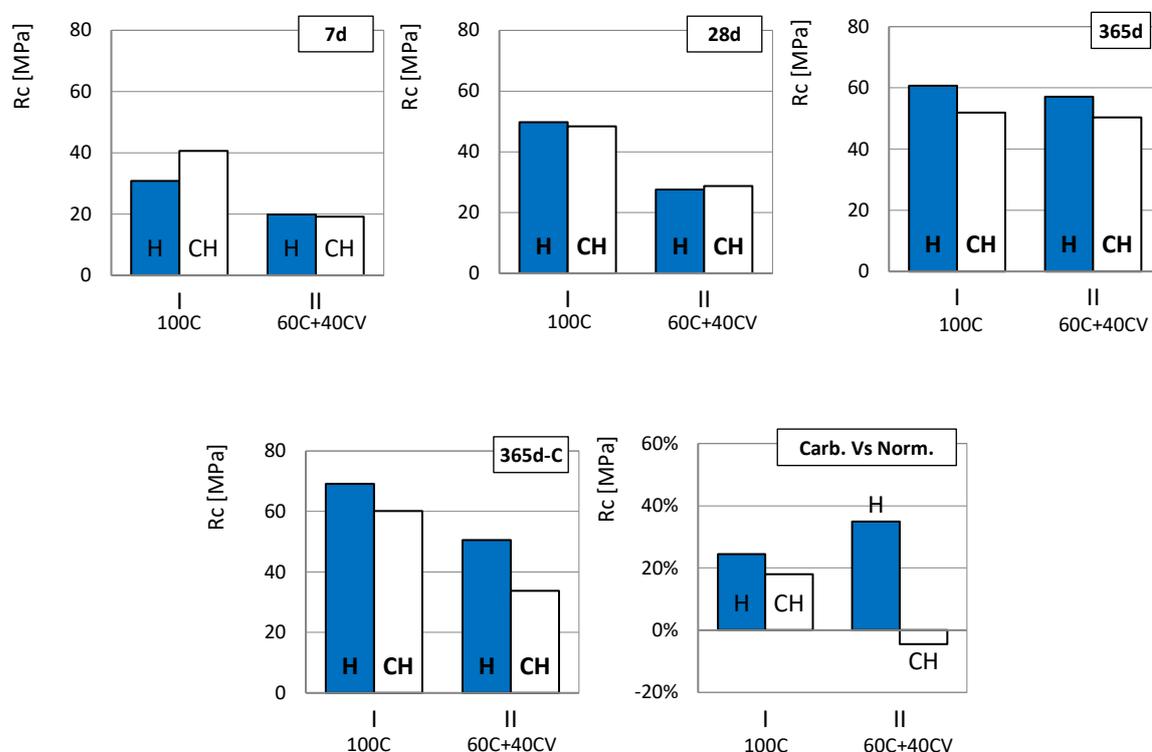


Figura 4-5 - Resistência à compressão: 7d, 28d, 365d, 365d-c e Carb. Vs Norm.

Comparativamente ao efeito da cura, verificaram-se dois períodos distintos. O primeiro, nas maturidades até aos 28 dias, onde se verificou que as misturas em cura CH mostraram ter uma muito ligeira maior capacidade resistente, principalmente na mistura I (apenas com cimento). Nas restantes misturas, as diferenças foram praticamente inexistentes. No que respeita à mistura I, tal seria o esperado nesta dissertação porque a cura em CH, supostamente equilibrou as concentrações de hidróxido de cálcio, impedindo a lixiviação de compostos do betão para a solução de cura. No entanto, na mistura II (60C+40CV), este acréscimo foi pouco notório, o que poderá levar a supor que na cura H desta mistura, como havia menos quantidade de cimento, logo produziu menor quantidade de CH durante a sua hidratação e consequentemente obteve-se uma menor diferença de concentração entre os provetes e a cura de H. Como a concentração foi menor, os seus efeitos revelaram-se também menores. No segundo período, a partir dos 28 dias, foi verificado que todos os provetes com cura CH produziram menores resistências, agravando-se com a idade, o que, pelos motivos referidos anteriormente, tal não seria o esperado. Por algum motivo, a cura CH diminuiu a velocidade de reação: ou o pH elevado da

cura inibiu as reações ou a presença de cal hidratada da cura CH impediu parcialmente a hidratação do cimento, tendo sido mais agravado na mistura II devido a esta ter menos cimento. Também poderia ter ocorrido algum tipo de lixiviação do betão, ou outro fenómeno que não foi possível determinar nesta campanha experimental. Um dos efeitos se pode chamar de ativação alcalina, devido a aceleração nos primeiros dias e redução nos seguintes, tal como ocorreu com o tempo

No que diz respeito aos provetes carbonatados, os provetes da mistura I, aumentaram de resistência, enquanto os da mistura II diminuiram. Tal pode ter acontecido porque a carbonatação em misturas com cimento preencheu os vazios aumentando a sua resistência também, porque a carbonatação dos provetes da mistura I foi em menor grau, devido à formação de carbonato de cálcio, como se verá mais adiante. Nas misturas com cinzas volantes, a carbonatação foi mais intensa e pode-se ter verificado que o dióxido de carbono reagiu com os silicatos de cálcio hidratado, ou outros compostos, aumentando a sua porosidade. Um outro facto relevante foi o facto dos provetes carbonatados da mistura II, em cura CH, diminuiram drasticamente de resistência. Uma vez que houve maior carbonatação poderá ter ocorrido uma consequente retração por carbonatação, diminuindo assim a sua resistência Herdeiro [17].

4.3.3. Esclerómetro

No Quadro 4-4 estão registados, em síntese, os valores referentes ao índice esclerométrico, nas diferentes maturidades, no que diz respeito à cura H e CH, dos 7 aos 365 dias. Também são apresentados os valores, carbonatados aos 365 dias (365-C).

Quadro 4-4 - Índice esclerométrico [MPa].

Nome	A/L	Maturidade [dias]								
		7	14	28	56	90	120	241	365	365-C
I	H	28.5	31.1	32.3	51.7	51.9	51.5	52.1	52.7	60.4
	CH	31.2	34.2	34.3	49.9	50.2	50.3	50.9	51.1	55.8
II	H	22.4	24.4	41.8	43.6	44.9	45.3	46.3	47.1	52.4
	CH	21.8	23.3	42.5	45.1	45.6	45.7	45.8	45.9	48.9

De forma a facilitar a interpretação de resultados, realizaram-se ainda os gráficos com a lei de evolução do índice esclerométrico no tempo (Figura 4-6). A cheio, estão patentes os provetes com cura H, a tracejado estão representados os provetes com cura CH e finalmente, a pontilhado e com a letra “C”, delimitaram-se os crescimentos dos provetes carbonatados. Verificou-se que

o índice esclerométrico cresceu muito até aos 56 dias em ambas as misturas, tendo a partir desta maturidade um crescimento muito modesto até ao término do seu tempo de ensaio, aos 365 dias. Este ensaio reflete essencialmente a resistência superficial do betão Joao [56]. Ao contrário do que foi verificado no ensaio da resistência à compressão, o ensaio com esclerómetro não foi sensível ao efeito pozolânico. À exceção dos 28 dias o índice da mistura I foi mais elevado do que a mistura II, conforme o esperado devido à mistura I ter mais cimento.

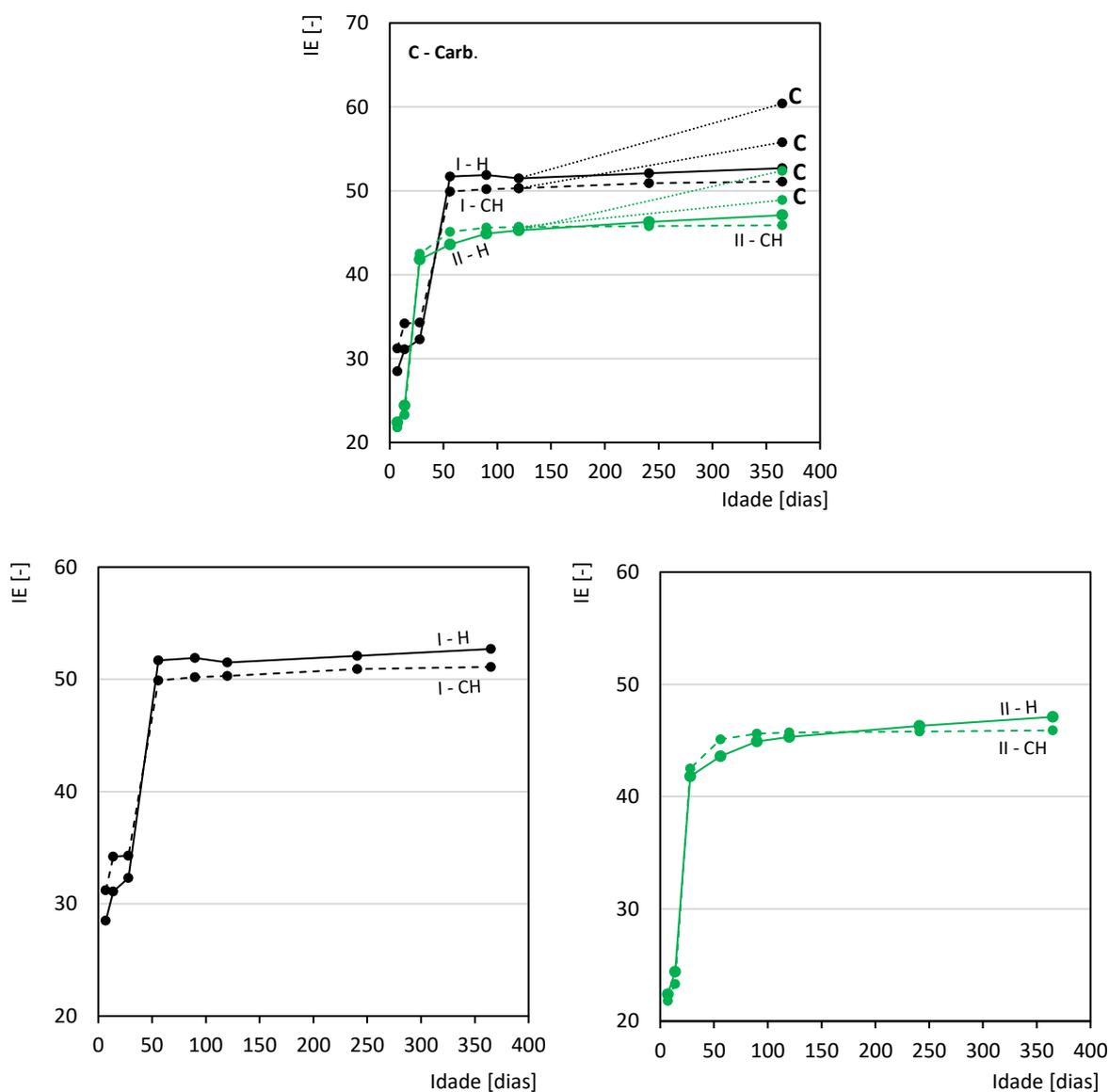


Figura 4-6 - Evolução do Índice esclerométrico.

Influência das condições de cura no desempenho do Betão.

Foram executados também gráficos comparativos realizados aos 7, 28, 365, 365-C e resumo de provetes carbonatados vs não-carbonatados (Carb.Vs Normal) expostos na Figura 4-7.

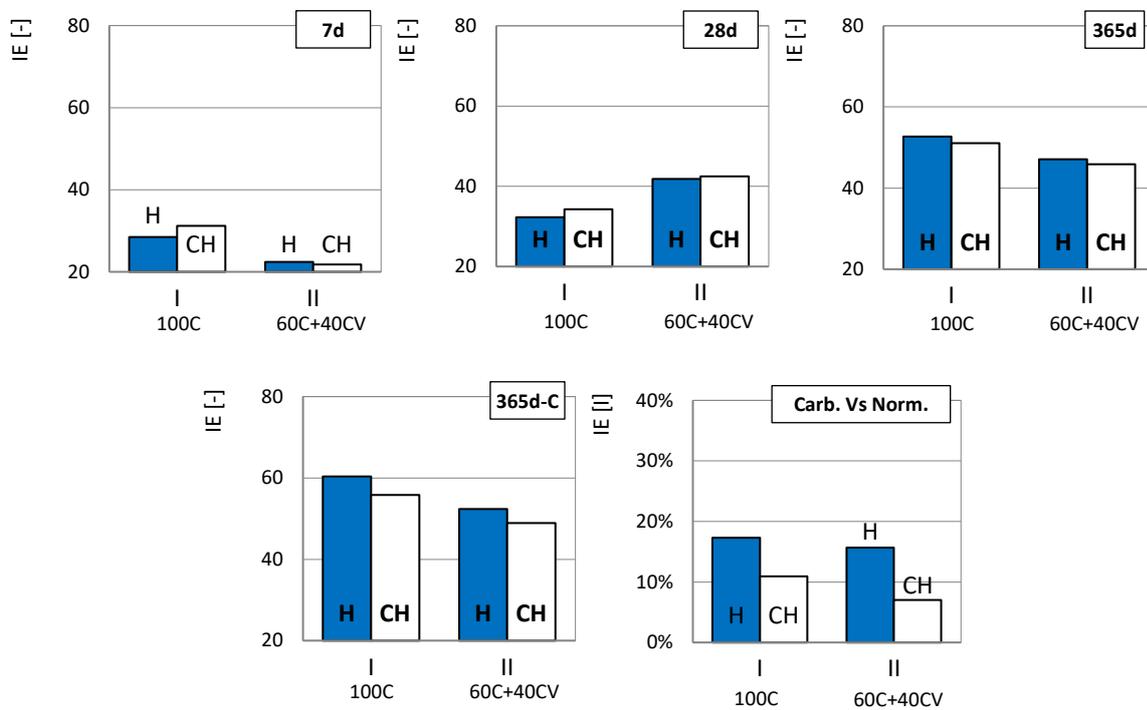


Figura 4-7 - Índice esclerométrico: 7d, 28d, 365d, 365d-c e Carb. Vs Norm.

De acordo com o efeito da cura, existem dois períodos distintos para cada mistura. Na mistura I, até aos 28 dias, o índice foi mais elevado na cura de CH, período a partir do qual foi sempre inferior. Na mistura II, entre os 28 e os 128 dias a cura CH produziu um índice mais elevado, período a partir do qual foi sempre inferior. Desta forma, o índice esclerométrico confirmou, em geral, os resultados do ensaio de resistência à compressão, com algumas diferenças relativamente à mistura II. De salientar que os resultados obtidos são muito próximos, sendo o erro (coeficiente de variação) maior do que a diferença percentual entre curas.

No que toca aos provetes carbonatados, verificou-se que o índice esclerométrico foi sempre superior nos provetes carbonatados. Ao contrário do ensaio de resistência à compressão, a mistura II em cura em CH não registou valores inferiores em provetes carbonatados. Tal foi como esperado porque, provavelmente, a superfície dos provetes carbonatou, ficando mais densa, logo mais resistente. O ensaio de resistência à compressão foi, aparentemente, mais sensível a fenómenos de lixiviação, isto porque o ensaio esclerométrico, regista características

superficiais do betão enquanto a ensaio de resistência à compressão avalia o material como um todo. Pode ser que tenha havido apenas degradação no interior e não à superfície.

4.3.4. Evolução de massas

No Quadro 4-5 seguinte apresenta-se um resumo da evolução do aumento das massas das distintas misturas, nas diferentes maturidades, no que diz respeito à cura H e CH, dos 7 aos 365. Também são apresentados os valores, carbonatados aos 365 dias (365-C).

Quadro 4-5 - Evolução da massa [%].

Nome	A/L	Maturidade [dias]								
		7	14	28	56	90	120	241	365	365-C
I	H	0.00%	0.03%	0.09%	0.18%	0.24%	0.26%	0.28%	0.30%	1.39%
	CH	0.00%	0.09%	0.17%	0.27%	0.34%	0.36%	0.40%	0.41%	1.43%
II	H	0.00%	0.11%	0.19%	0.34%	0.36%	0.37%	0.40%	0.44%	1.76%
	CH	0.00%	0.11%	0.18%	0.27%	0.35%	0.38%	0.40%	0.41%	1.89%

Para simplificar a interpretação e análise dos resultados realizaram-se três gráficos de forma a comparar as diferentes misturas Figura 4-8. A cheio, estão patentes os provetes com cura H, a tracejado estão representados os provetes com cura CH e finalmente, a pontilhado e com a letra “C”, delimitaram-se os crescimentos dos provetes carbonatados.

Confirmou-se que a massa cresceu muito até aos 128 dias em ambas as misturas, sendo que a partir desta, verificou-se um crescimento bastante subtil até ao término do tempo de ensaio, aos 365 dias. Outro facto que foi observado foi que a mistura II teve um crescimento de massas mais acentuado que a mistura I. Tal deve-se, provavelmente, ao efeito pozolânico, estando estes resultados coerentes com os resultados da evolução do efeito à compressão, já referidos anteriormente (Figura 4-4).

Como os coeficientes de variação relativos a estes resultados, foram muito baixos: Na cura H foram genericamente inferiores a 1,8% e na cura CH genericamente inferiores a 0,8%.

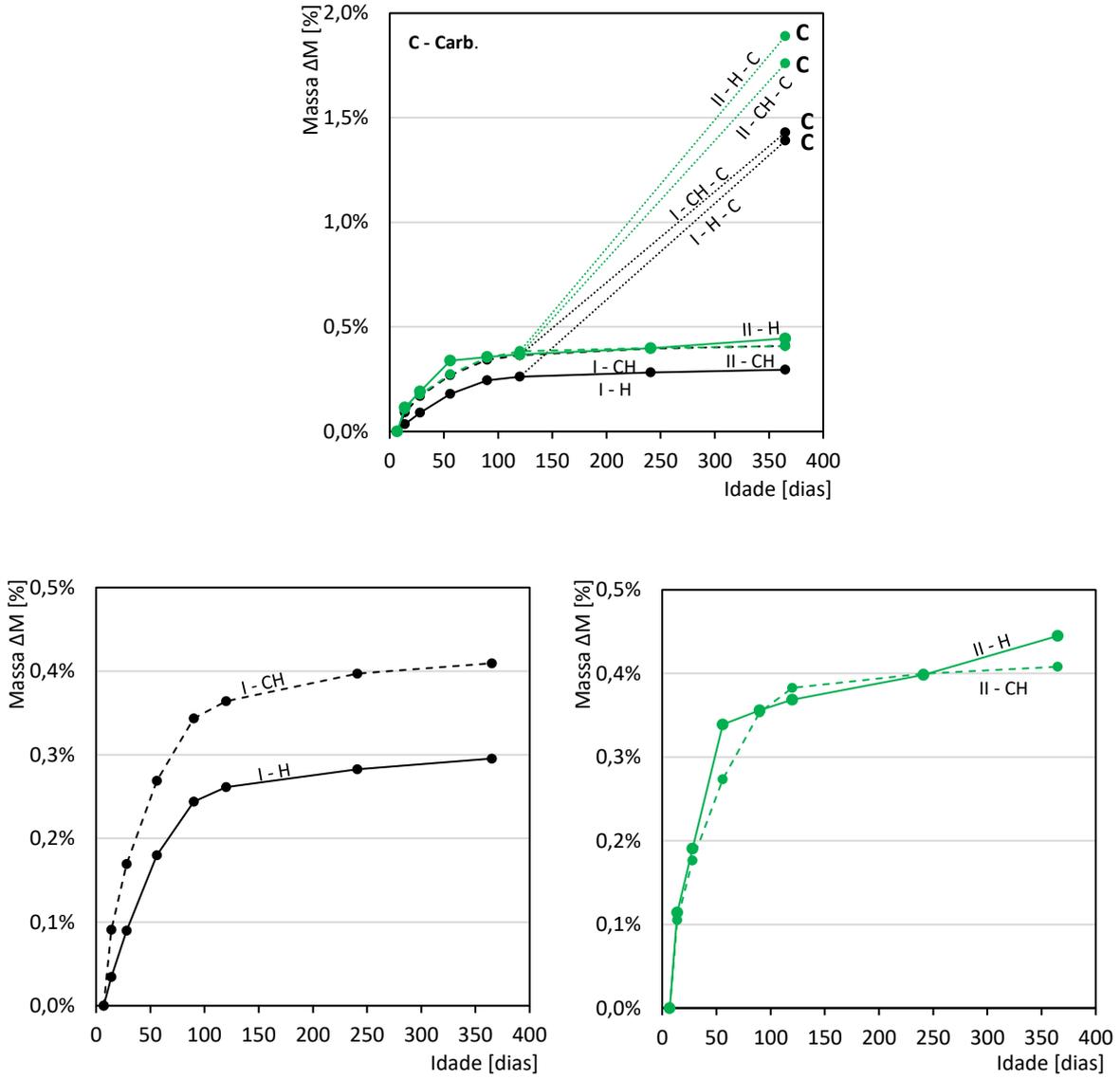


Figura 4-8 - Evolução da massa.

Para comparar melhor estes resultados temos os gráficos comparativos realizados aos 7, 28, 365, 365-C e resumo de provetes carbonatados vs não-carbonatados (Carb.Vs Normal) expostos na Figura 4-9.

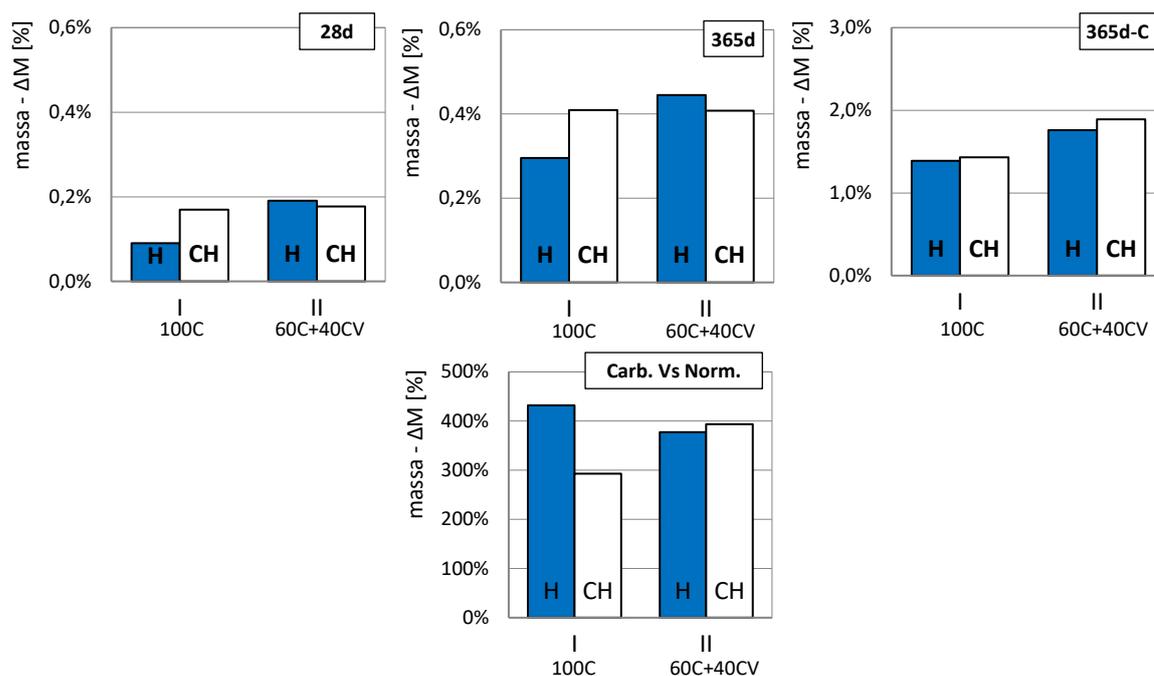


Figura 4-9 - Evolução de massas: 28d, 365d, 365d-c e Carb. Vs Norm.

Conforme o esperado, o efeito da cura em CH foi muito benéfica na mistura I, refletindo-se em todas as idades. Tal foi o esperado porque em cura H, provavelmente houve lixiviação do betão, devido ao gradiente de pH. Pelo contrário, na cura CH, constatou-se que talvez devido ao equilíbrio de pH, não se verificou a saída de compostos do betão para a cura, logo o crescimento da massa foi superior. Relativo à mistura II não foram verificadas alterações tem em conta a sua cura. Estes resultados estão de acordo com os obtidos no ensaio de resistência à compressão explicação para não se ter verificado tanta diferença entre as curas, poderá estar no volume das cinzas: como as cinzas volantes consomem o hidróxido de cálcio produzido durante a hidratação de cimento e dado que o seu volume na mistura foi elevado (40%), os provetes apresentaram um pH mais baixo, comparativamente à mistura I. Assim o gradiente entre a mistura II com cura H, foi menor do que o gradiente da mistura I com cura H. Desta forma, as possíveis lixiviações na mistura II fizeram-se sentir com menor intensidade, ou mesmo não se fazendo sentir. O hidróxido de cálcio penetra nos provetes desde as primeiras idades, daí o efeito de ativação alcalina.

Após o ensaio de carbonatação acelerada, as massas dos provetes de ambas as misturas aumentaram significativamente, tal como seria esperado. Uma das explicações possíveis é o

facto da massa do produto da reação de carbonatação (carbonato de cálcio) apresentar uma massa superior à do composto original. Outra explicação possível seria o facto de o carbonato de cálcio preencher os espaços vazios do betão, diminuindo a sua porosidade e, desta forma, ficando mais denso. No que respeita ao efeito da cura em provetes carbonatados, é difícil de retirar conclusões visto que os resultados são muito próximos.

4.3.5. Resistividade elétrica

De acordo com o Quadro 4-6 apresenta-se um resumo global da evolução do ensaio da resistividade elétrica, nas diferentes maturidades, e nas diferentes misturas, no que diz respeito à cura H e CH, dos 7 aos 365 dias. São ainda expostos os valores carbonatados aos 365 dias (365-C).

Quadro 4-6 - Evolução da resistividade elétrica [$\Omega.m$].

Nome	A/L	Maturidade [dias]								
		7	14	28	56	90	120	241	365	365-C
I	H	7.7	9.9	11.5	12.5	13.5	14.2	16.3	17.4	60.8
	CH	7.2	9.7	11.6	12.5	13.6	14.5	17.6	18.5	62.3
II	H	6.8	8.9	16.4	43	80.1	99.7	172	182.5	34.5
	CH	5.9	8	15.5	40.8	68.1	89.1	156.8	164.8	26.8

De maneira a permitir uma análise dos resultados realizaram-se os gráficos apresentados na Figura 4-10 de forma a comparar as distintas misturas. A cheio, estão patentes os provetes com cura H, a tracejado estão representados os provetes com cura CH e finalmente, a pontilhado e com a letra “C”, delimitaram-se os crescimentos dos provetes carbonatados. De acordo com o gráfico, pode-se concluir que em ambas as misturas a resistividade elétrica cresceu muito, mas este crescimento fez-se notar mais na mistura II. Tal comportamento era o esperado de acordo com a bibliografia Herdeiro [17] e João [56]. O maior crescimento deu-se até aos 241 dias, sendo mais subtil até ao término do tempo de ensaio, aos 365 dias.

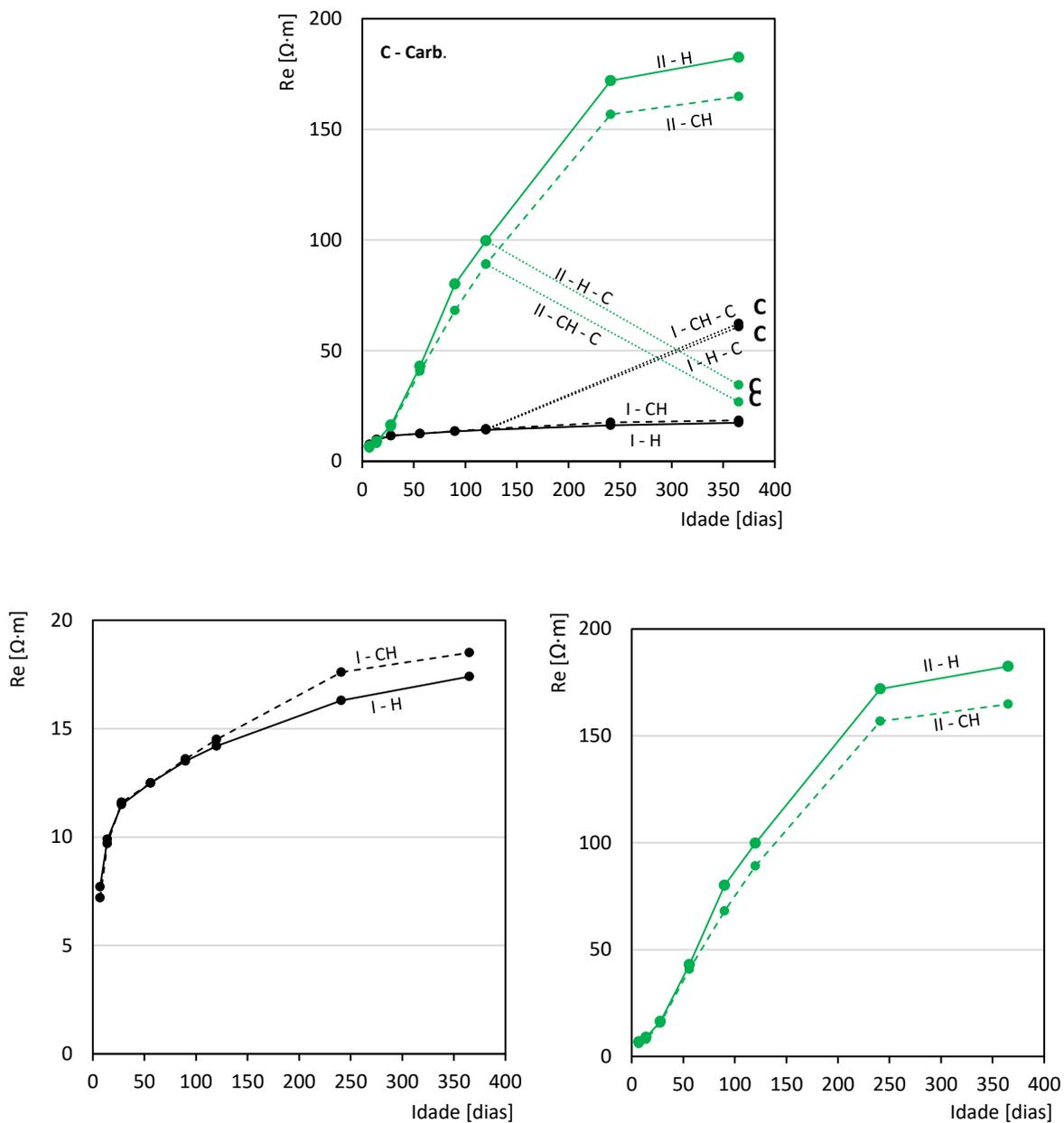


Figura 4-10 - Evolução da resistividade elétrica.

De forma a reter uma melhor comparação entre estes resultados temos os gráficos comparativos realizados aos 28, 365, 365-C e resumo de provetes carbonatados vs. não-carbonatados (Carb. Vs Normal) expostos na Figura 4-11.

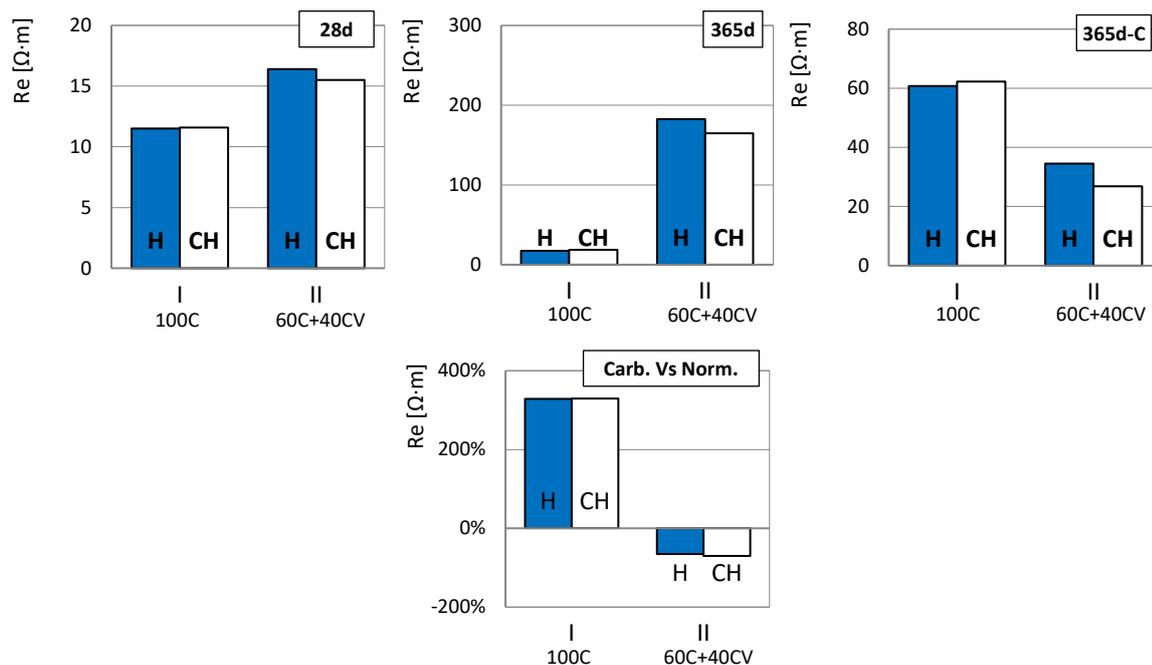


Figura 4-11 – Evolução da resistividade elétrica: 28d, 365d, 365d-c e Carb. Vs Norm.

Conforme o esperado, a cura em CH melhorou a resistividade elétrica da mistura I, a partir dos 120 dias. A explicação poderá ser semelhante à referida na evolução de massas: essencialmente devido aos gradientes de pH. Sendo a única diferença em relação à evolução das massas, o efeito da cura só foi visível com notoriedade, em idades mais avançadas. Relativamente à mistura II, a cura CH revelou ser inferior em todas as idades, contrariamente ao ensaio de evolução das massas. No ensaio de evolução de massas os valores ficaram muito aproximados, pelo que talvez a resistividade elétrica, tenha sido um ensaio mais sensível e com a mesma tendência. Isto sugere a possibilidade de a cura CH ser prejudicial em betões com elevado volume de cinzas. Talvez pelo facto de o pH da cura ser muito superior ao pH dos provetes da mistura II. De salientar que os resultados obtidos são muito próximos, sendo o erro (coeficiente de variação) maior do que a diferença percentual entre curas.

Com efeito da carbonatação acelerada, na mistura I, os provetes provenientes da camara de carbonatação obtiveram uma elevada subida de valores de resistividade elétrica. Pelo contrário, na mistura II, o mesmo não aconteceu, obtendo-se uma queda abrupta dos mesmos valores, pois a carbonatação é diferente na mistura II. O CO₂ penetra mas não reage, mantendo a densidade. Tirando isto, podemos concluir que na mistura I os resultados foram o esperado, pelos mesmos motivos referidos anteriormente (a carbonatação fez diminuir a porosidade dos provetes). Na

mistura II, os resultados sugerem que o processo de carbonatação possa ter destruído a microestrutura do betão ou mesmo ter criado fissuração do mesmo Herdeiro [17]. Quanto ao efeito da cura nos provetes carbonatados, verificou-se a mesma tendência, tendo sido muito penalizador na mistura II.

4.3.6. Ultrassons

No seguinte Quadro 4-7 apresenta-se o resumo do progresso dos ultrassons nas duas misturas, no que diz respeito à cura H e CH, dos 7 aos 365 dias. São ainda expostos os valores carbonatados aos 365 dias (365-C).

Quadro 4-7 - Evolução dos ultrassons [μ s].

Nome	A/L	Maturidade [dias]								
		7	14	28	56	90	120	241	365	365-C
I	H	23	22.5	21.8	21.5	21.3	21.2	20.6	20.2	20.4
	CH	22.7	22.3	21.5	21.1	20.9	20.8	20.3	19.9	20.2
II	H	23.6	23.3	22.8	21.8	21.5	21.4	21.2	21	20.6
	CH	23.9	23.5	22.8	21.7	21.4	21.3	20.7	20.3	21.4

De forma a obter uma melhor interpretação e estudo dos resultados realizou-se o gráfico constante na Figura 4-12 de forma a comparar as diferentes misturas. A cheio, estão patentes os provetes com cura H, a tracejado estão representados os provetes com cura CH e finalmente, a pontilhado e com a letra “C”, delimitaram-se os crescimentos dos provetes carbonatados. Desta forma pode-se constatar que ao longo do tempo a evolução dos ultrassons veio sempre a diminuir, sendo o valor obtido mais baixo na mistura I.

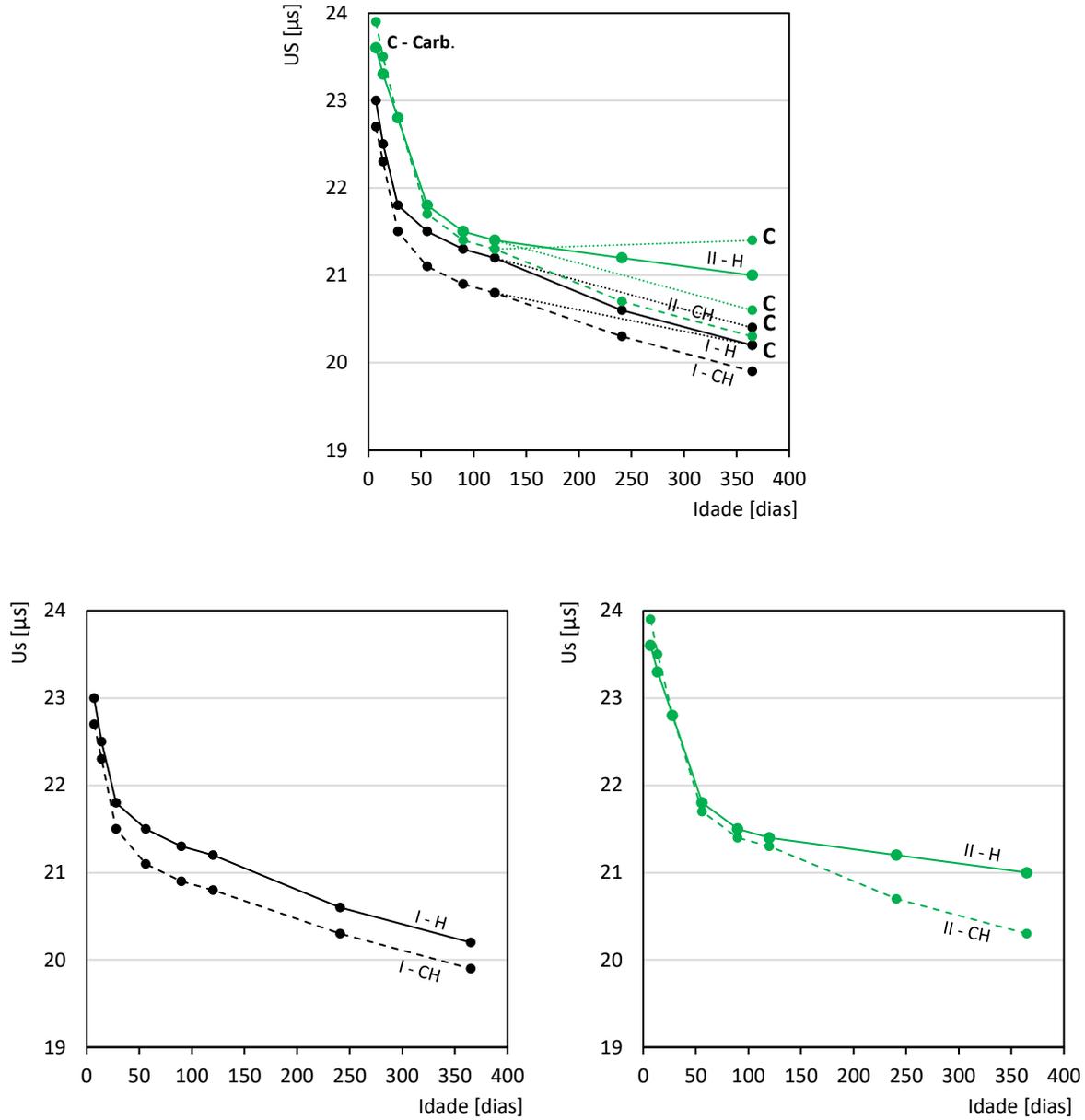


Figura 4-12 - Evolução dos ultrassons.

Mais uma vez, para facilitar a análise destes resultados temos os gráficos comparativos realizados aos 28, 365, 365-C e resumo de provetes carbonatados vs não-carbonatados (Carb.Vs Normal) expostos na Figura 4-13.

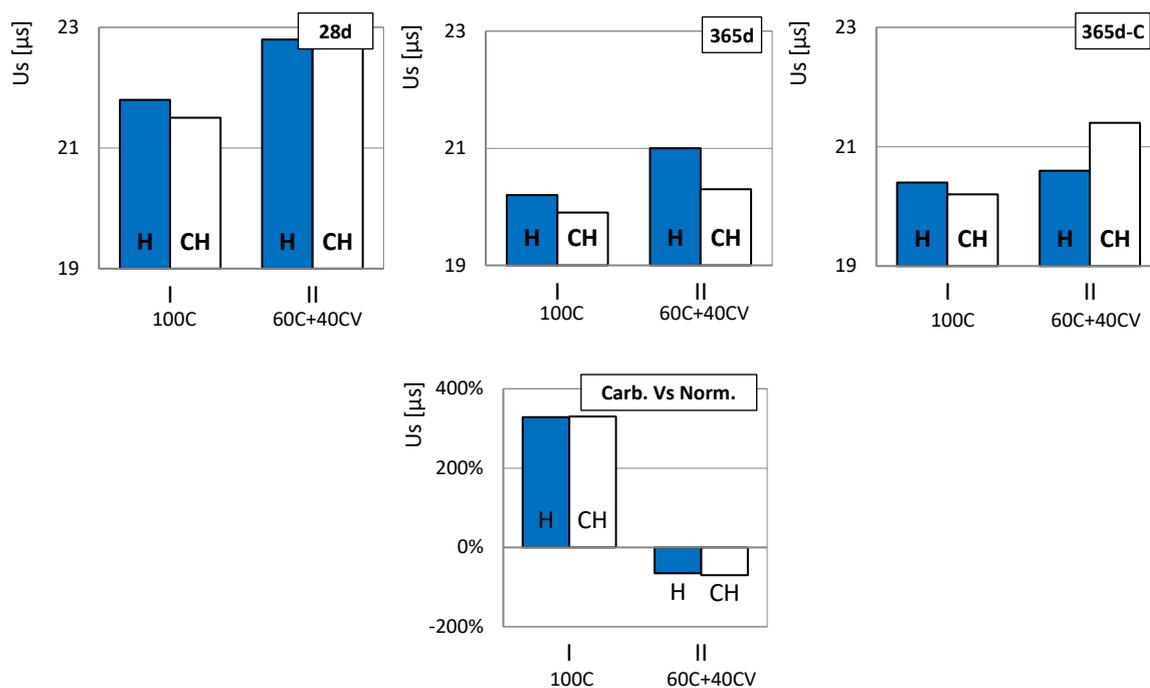


Figura 4-13 - Evolução dos ultrassons: 28d, 365d, 365d-c e Carb. Vs Norm.

Como se pôde constatar, os valores apresentados na Figura 4-13, os valores são decrescentes com o tempo, o que era o esperado: à medida que avançam as maturidades, os betões ficam mais densos. Na mistura I em cura CH, a velocidade dos ultrassons foi sempre melhor, em todas as idades. Na mistura II, a cura em CH foi pior até aos 28 dias, período a partir do qual foi sempre melhor, podendo esta diferença de comportamento ser explicada pelo efeito pozolânico. Este ensaio sugere que a cura em CH foi bastante benéfico para as duas misturas. De salientar que os resultados obtidos são muito próximos, sendo o erro (coeficiente de variação) ligeiramente inferior ao percentual entre curas.

Relativamente à carbonatação, os provetes carbonatados da mistura I obtiveram resultados piores (mais altos) e os da mistura II, melhores (mais baixos). Poderá ser explicado por fissuração por carbonatação (Herdeiro [17]). Quanto à cura com provetes carbonatados, não foram obtidos grandes desvios de destaque, mas aparentemente a cura CH foi prejudicial para ambas as misturas, principalmente para a mistura com cinzas volantes.

4.3.7. CTH

De acordo com Quadro 4-8, são apresentados os resultados dos ensaios de difusão por migração de cloretos nas duas misturas, em relação à cura H e CH, dos 28, 90, 365 dias sendo neste último também com resultados de provetes vindos da câmara de carbonatação.

Quadro 4-8 – Evolução da difusão por migração de cloretos [$\times 10^{-12}$ (m^2/s)].

Nome	A/L	Maturidade [dias]			
		28	90	365	365-C
I	H	13.7	9.2	6.6	8.8
	CH	12.0	10.4	6.4	8.4
II	H	12.2	2.8	2.9	3.3
	CH	10.9	3.6	1.0	2.3

O estudo dos resultados está apresentado na forma de um gráfico relativo a cada idade de cura, de forma a comparar as diferentes misturas (Figura 4-14). A cheio, estão patentes os provetes com cura H, a tracejado estão representados os provetes com cura CH e finalmente, a pontilhado e com a letra “C”, delimitaram-se os crescimentos dos provetes carbonatados. Conforme o esperado, a mistura II obteve resultados inferiores (melhores) do que a mistura I, isto porque as cinzas volantes aprisionam os cloretos livres Camões [5].

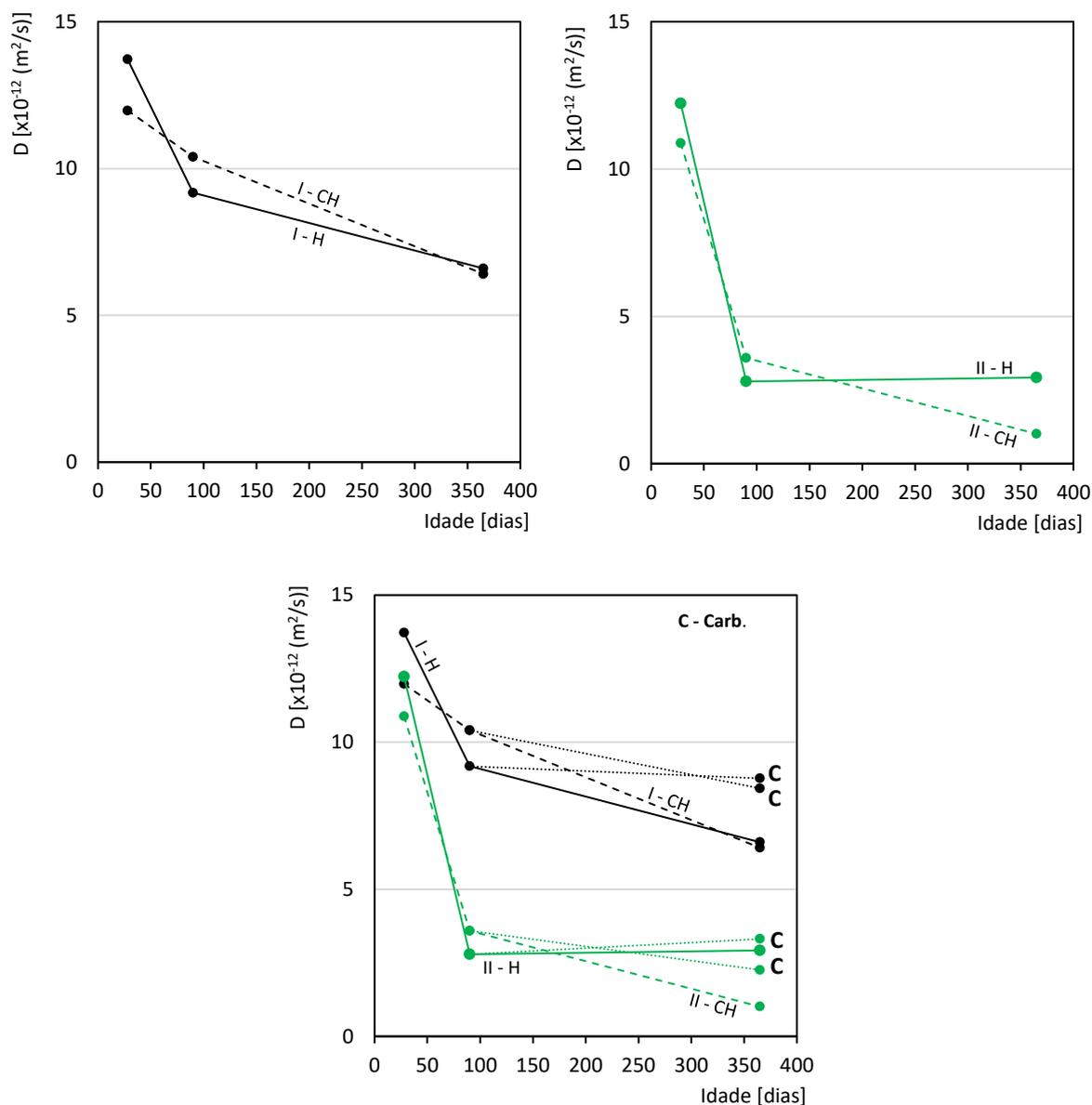


Figura 4-14 – Evolução do CTH durante a sua cura.

De forma a melhor a leitura destes resultados, elaboraram-se gráficos comparativos realizados aos 28, 90, 365, 365-C e resumo de provetes carbonatados vs. não-carbonatados (Carb.Vs Normal) expostos na Figura 4-15.

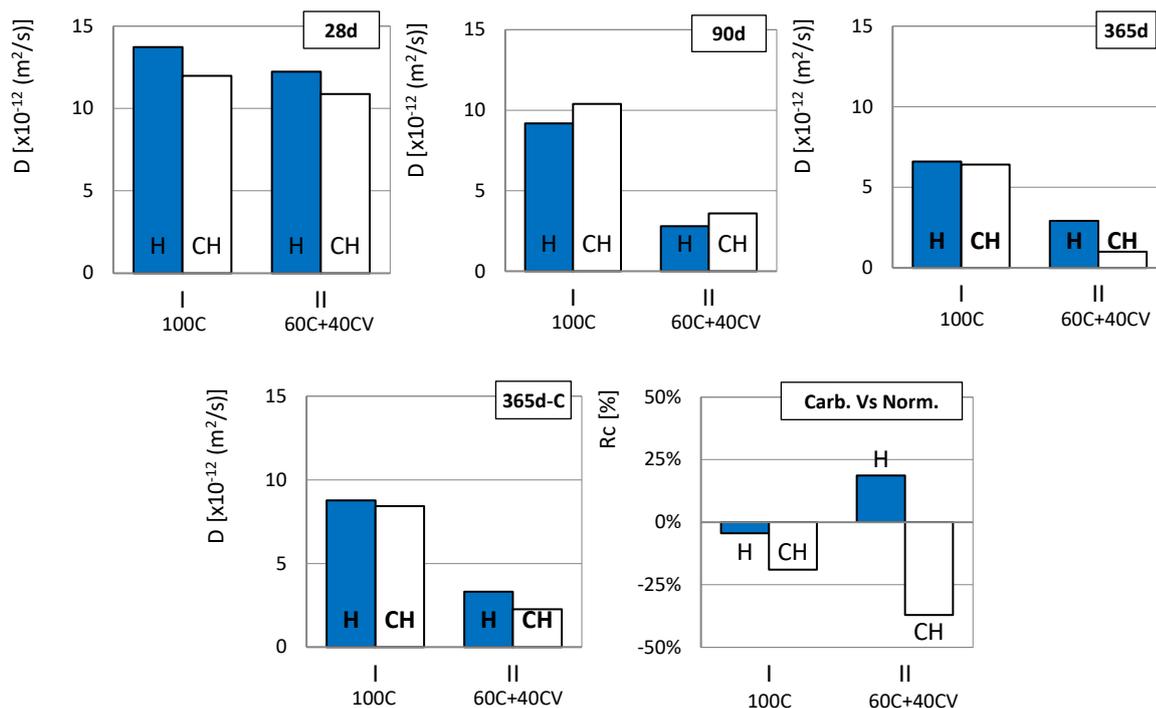


Figura 4-15 - Evolução do CTH 28, 90, 365 e 356c dias.

Embora se tenha verificado discrepâncias de resultados aos 90 dias, observou-se que a difusão de cloretos aos 28 e 365 dias foi ligeiramente inferior quando os provetes foram submetidos a cura CH. Estes resultados sugerem que ou a cura CH proporcionou uma menor porosidade nos provetes ou a cura CH proporcionou condições ambientais nos provetes, dificultando a difusão de cloretos. Os resultados obtidos são semelhantes, mas revelam uma tendência para a diminuição de D em cura C, admitindo que os poros são parcialmente preenchidos na cura CH é possível que a difusão tenha diminuído.

Os provetes carbonatados apresentaram resultado superiores, independentemente da mistura ou cura. Os provetes carbonatados tiveram um D superior, o que é benéfico, dificultando a penetração de cloretos. Tal pode ter sido devido ao preenchimento parcial dos poros devido à carbonatação Reis [16].

4.3.8. Profundidade de carbonatação

Depois de sujeitar os provetes provenientes das duas curas, ao ensaio de carbonatação acelerada, conseguiu determinar-se a respetiva profundidade de carbonatação com a ajuda de um indicador ácido-base, timolftaleína (Quadro 4-9).

Quadro 4-9 - Evolução da profundidade de carbonatação.

Matur.	Nome	Pontos superiores					Pontos inferiores					dk [mm]	cv [%]	
		1	2	3	4	5	1	2	3	4	5			
28d	I	H	10.72	12.73	11.26	12.64	11.82	10.74	9.00	9.75	10.96	11.01	11.1	9.9%
		CH	9.23	11.50	9.41	8.50	7.77	5.65	9.00	9.28	8.12	10.73	8.6	15.4%
120d	I	H	9.90	8.86	6.28	9.92	9.04	7.46	7.98	7.78	7.79	8.49	8.4	12.8%
		CH	10.34	11.49	9.82	7.42	7.97	10.74	11.11	10.25	10.05	11.77	10.1	13.3%
28d	II	H	24.75	20.90	20.45	23.50	27.26	25.51	26.49	24.17	20.75	23.88	23.8	9.6%
		CH	25.02	24.84	23.74	23.54	24.59	22.77	22.20	22.50	20.70	21.56	23.1	5.9%
120d	II	H	21.54	23.01	23.68	22.44	22.40	23.26	25.36	22.91	21.78	20.03	22.6	5.9%
		CH	19.91	24.17	22.46	20.49	19.87	23.44	23.96	24.19	23.77	23.96	22.6	7.6%

Na Figura 4-16, temos o resumo global dos resultados relativos a cada cura estudada.

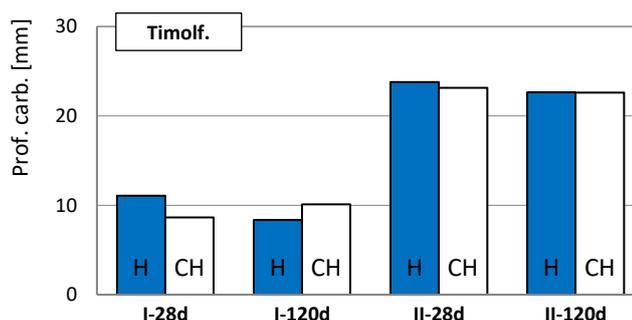


Figura 4-16 - Profundidade de carbonatação consoante a cura.

A profundidade de carbonatação diminuiu com a idade em quase todos os casos. Além disso, a mistura II, com cinzas volantes, obteve profundidades de carbonatação muito superiores às da mistura I. Estes resultados foram de acordo com o esperado, porque à medida que os provetes

Influência das condições de cura no desempenho do Betão.

ficam mais maduros, estes tornam-se mais densos (dificultando a penetração do CO_2). Além disso, as misturas com elevado volume de cinzas são mais suscetíveis ao ataque por carbonatação. O hidróxido de cálcio é consumido mais rapidamente porque está em menor quantidade, desta forma existe ativação alcalina e grande consumo de hidróxido de cálcio.

Face aos resultados obtidos não foi possível observar diferenças significativas associadas aos dois tipos de cura, pode ser concluído ensaio à carbonatação não foi sensível ao tipo de cura.

5. CONCLUSÕES E INVESTIGAÇÕES FUTURAS A DESENVOLVER

5.1. Análise conjunta de resultados

De acordo com esta análise experimental, verificou-se que na generalidade dos ensaios foi possível avaliar as diferenças entre a mistura I e II. De uma forma geral, a mistura I obteve melhores valores de resistência mecânica, resistência à carbonatação e ultrassons. Já a mistura II obteve melhores resultados relativo aos ensaios de resistividade elétrica e CTH. Estes resultados foram de acordo com os esperados na bibliografia, de acordo com Reis [2], João [56], e mais recentemente Herdeiro [17].

Mas no que toca ao tipo de cura, ocorre desta dissertação que nem todos os ensaios mostraram dados diferenciadores. Nos ensaios de índice esclerométrico, CTH e carbonatação acelerada, não foi possível extrair informação de forma a avaliar diferenças nas diferentes curas. Isto pode ter sido devido ao fato de estes ensaios terem sido completamente insensíveis ao tipo de cura. Relativo ao ensaio de resistividade elétrica foi possível observar uma tendência, ao tipo de cura, ao longo do tempo, embora estes valores tenham sido muito aproximados, e inferiores ao erro inerente de ensaio. Por fim, os ensaios de ultrassons, evolução de massas, resistência à compressão e perfil de pH, mostraram diferenças ao tipo de cura, superiores aos erros dos ensaios. Foi ainda possível observar que os ensaios mais significativos para avaliar o tipo de cura foram os ensaios de resistência à compressão e perfil de pH.

Posto isto, concluiu-se que a cura tipo CH, mostrou na mistura I (100CEM), ser vantajosa até aos 28 dias, mas com pior desempenho a partir desta maturidade. No que respeita à mistura II (60CEM+40CV), a cura tipo CH não mostrou qualquer vantagem. Tal não era o esperado, pois aguardava-se que a cura tipo CH (cal hidratada) fosse benéfica para as duas misturas em todas as maturidades.

No que respeita à mistura I os resultados sugerem que a cura tipo CH, numa fase inicial, equilibrou as concentrações de hidróxido de cálcio entre os provetes e a solução de cura, mitigando, ou mesmo impedindo, a lixiviação de compostos do betão.

Ao contrário do que supostamente aconteceu na cura tipo H, onde o gradiente de hidróxido de cálcio poderá ter provocado lixiviação. Isto explicaria o melhor desempenho até aos 28 dias de idade da cura do tipo CH. É sabido que a cal hidratada em contacto com o cimento pode acelerar a velocidade de hidratação nas primeiras horas, o que também poderia explicar o sucedido

Influência nas condições de cura no desempenho do Betão.

(Quarcioni [18]) A partir dos 28 dias de idade, observou-se um decréscimo do desempenho associado à cura de tipo CH que poderá ser explicado da seguinte forma: ou a presença de cal hidratada inibiu a reação do cimento; ou o elevado pH da cura impossibilitou parcialmente a hidratação de cimento; ou mesmo pode ter ocorrido lixiviação tardia do betão. Também poderá ter ocorrido um fenómeno de cristalização fissurando o betão e explicando, assim, a diminuição da resistência mecânica.

Deverá ter-se em atenção da possibilidade do excesso de alcalinidade na solução de cura ser prejudicial. Neste aspeto, há que considerar, que a solução de cura e o provete tendem a uniformizar a sua alcalinidade com o tempo.

Tal deve-se à tendência natural de equilíbrio de um gradiente de concentrações. Sendo assim, poderá considerar-se que aos 127 dias, o gradiente entre a cura tipo H e a superfície do betão foi provavelmente maior do que na cura de tipo CH, podendo ser a explicação para os piores resultados da cura tipo CH a partir dos 28 dias.

De um modo geral, a mistura II, em cura de tipo CH obteve resultados semelhantes e em alguns casos ligeiramente pior. No entanto, as diferenças no desempenho das duas curas são muito reduzidas e inferiores aos erros dos ensaios.

5.2. Investigações Futuras a Desenvolver

Finalizando esta campanha experimental, foram retidas muitas questões que deverão ser objeto de estudo no futuro. Adiante apresentam-se uma lista de várias propostas a serem seguidas em próximos trabalhos de investigação:

- Uma das medidas importantes para esclarecer a esta investigação seria complementar a experiência, submetendo provetes a várias condições de cura com diferentes alcalinidades e, deste ponto, poder-se-ia chegar a uma alcalinidade ótima para um dado tipo de mistura;
- Estudar se o nível de cloro existente na água de cura pode, ou não, influenciar os resultados. Para tal, realizar experiências com água destilada e com água desionizada;
- Realizar uma análise da evolução do pH não só dentro dos provetes, mas também na solução de cura, desde as primeiras idades às maturidades mais avançadas;
- Analisar a diferença de temperatura nas várias curas;
- Complementar esta campanha, com outro tipo de curas, tais como, cura húmida, cura com aspersão periódica com água e cura com aspersão periódica com água saturada de hidróxido de cálcio;
- Analisar a influência das curas na porosidade do betão, tanto na superfície como no interior;
- Estudar se existe lixiviação durante as curas, a sua cinética e quais os compostos que lixiviam;
- Avaliar se existe interferência da cal hidratada com a cinética da hidratação do cimento ou da reação pozolânica das cinzas volantes;
- Averiguar a possibilidade de existência de eventual fendilhação durante a cura;
- Concretizar um estudo sobre modulação numérica da evolução da resistência à compressão com os dois tipos de cura: em água e em água saturada em hidróxido de cálcio.

6. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- [1] 3XN & GXN Innovation, “Building A Circular Future,” 2016.
- [2] R. R., “Reis R., 2013-PhD, Projeto de tese-Resistência à carbonatação de betões de elevado volume de cinzas. Universidade do Minho,” Universidade do Minho, 2013.
- [3] P. K. Mehta and P. Monteiro, “Concreto: microestrutura, propriedades e materiais.” 2008.
- [4] O. Rincón, A. Carruyo, C. Andrade, P. Helene, and I. Díaz, “Manual de inspección y diagnóstico de corrosión en estructuras de hormigón armado.” CYTED, Habana, 1997.
- [5] A. Camões, “Betões de elevado desempenho com incorporação de cinzas volantes,” Universidade do Minho, 2002.
- [6] P.-C. Aïtcin, *High-Performance Concrete (Modern Concrete Technology)*. 1998.
- [7] R. Reis, A. Camões, M. Ribeiro, and R. Malheiro, “CALCIUM HYDROXIDE CURING FOR ACCELERATED CARBONATION TESTING OF HIGH VOLUME FLY ASH CEMENTITIOUS BLENDS,” pp. 482–490, 2016.
- [8] M. Thomas, “Optimizing the Use of Fly Ash in Concrete,” 2007.
- [9] NP EN 450-1, “Cinzas volantes para betão. Parte 1: Definição, especificações e critérios de conformidade.” 2006.
- [10] R. Reis, “Resistência à carbonatação de betões de elevado volume de cinzas volantes (Em fase de conclusão),” Universidade do Minho, 2015.
- [11] M. Margalha, “UNIVERSIDADE DE ÉVORA – ENGENHARIA CIVIL Conservação e Recuperação do Património Maria Goreti Margalha,” 2011.
- [12] A. Z. Coelho, T. F. Pacheco, and J. Said, *A Cal na Construção*. 2009.
- [13] S. Yo, “Desenvolvimento económico nos tempos antigos,” .
- [14] J. H. Filho, “Efeitos da adição de cal hidratada sobre a permeabilidade ao oxigênio e

absorção capilar de concreto com alto teores de adições minerais. (Effect of hydrate lime addition on the oxygen permeability and capilarity absorption on high volume additions concre,” 2002.

- [15] J. Hoppe Filho, “Sistemas cimento, cinza volante e cal hidratada: mecanismo de hidratação, microestrutura e carbonatação de concreto,” 2008.
- [16] R. Reis, R. Malheiro, A. Camões, and M. Ribeiro, “Carbonation Resistance of High Volume Fly Ash Concrete,” *Key Eng. Mater.*, vol. 634, pp. 288–299, 2014.
- [17] J. Herdeiro, “PASTAS DE MATRIZ CIMENTÍCIA,” universidade do Minho, 2017.
- [18] V. A. Quarcioni, “Influência da cal hidratada nas idades iniciais da hidratação do cimento Portland: estudo em pasta,” p. 172, 2008.
- [19] I. De, “Calcidrata, 2010. Ficha do produto: cal hidratada, class 1, Grau A, Tipo 1, de acordo com a EN 12518: 2008. Calcidrata-indústrias de cal SA.,” pp. 1–2, 2012.
- [20] A. Szeremeta and D. E. Cura, “Nerycarlos Loureiro Da Silva,” 2013.
- [21] E. G. R. PETRUCCI, “Concreto de cimento Portland. 13. ed. São Paulo: Globo, 1998. 307 p.,” 1998.
- [22] G. Bresolin, “Influência da temperatura de cura na resistência à compressão do concreto,” 2016.
- [23] F. W. Corr, D. E. Ara, and E. Polit, “Estudo da repassivação da armadura em concretos carbonatados através da técnica de realcalinização química,” 2009.
- [24] M. Bediako, J. T. Kevern, and E. O. Amankwah, “Effect of Curing Environment on the Strength Properties of Cement and Cement Extenders,” no. January, pp. 33–39, 2015.
- [25] S. Figueira and O. V. Jr, “Influências climáticas na cura do concreto,” 2013.
- [26] J. Z. Zemajtis, “Role of Concrete Curing. Portland Cement Association, Skokie.,” 2014.
- [27] G. Polito, “Corrosão em estruturas de concreto armado: causas, mecanismos, prevenção e recuperação.” pp. 1–191, 2006.
- [28] A. Neville, *Properties of concrete. 3rd ed. Singapore: Longman Scientific & Technical.*

- 1994.
- [29] P. Mehta, P.K. and Monteiro, “Concreto: microestrutura, propriedades e materiais. 3.^a ed. São Paulo: IBRACON (Instituto Brasileiro do Concreto).,” 2008.
- [30] H. e B. Levy, “Boletín técnico,” pp. 1–25, 2017.
- [31] ACI Committee 308, “Guide to external curing of concrete,” p. 36, 2016.
- [32] Q. Tri Phung, N. Maes, D. Jacques, J. Perko, G. De Schutter, and G. Ye, “Modelling the evolution of microstructure and transport properties of cement pastes under conditions of accelerated leaching,” *Constr. Build. Mater.*, vol. 115, pp. 179–192, 2016.
- [33] ASTM C511 - 03, *Standard Specification for Mixing Rooms, Moist Cabinets, Moist Rooms, and Water Storage Tanks Used in the Testing of Hydraulic Cements and Concretes*. USA: ASTM, 2003.
- [34] N. 5738/03, “NBR 5738/03 - Concreto: Procedimento para moldagem e cura de corpos-de-prova,” 2003.
- [35] NP EN 206-1, “Concrete. Part 1: Specification, performance, production and conformity.” 2007.
- [36] NP EN 12390-2, “Execução e cura dos provetos para ensaios de resistência mecânica.” 2003.
- [37] B. Araújo Silva, “Análise da influência do tipo de cura na resistência à compressão de corpos-de-prova de concreto,” p. 47, 2009.
- [38] F. M. Wegian, “Effect of seawater for mixing and curing on structural concrete,” 2010.
- [39] J. Liu, F. Xing, B. Dong, H. Ma, and D. Pan, “Study on surface permeability of concrete under immersion,” 2014.
- [40] NP EN 197-1, “Cement. Composition, specifications and conformity criteria for common cements.” 2011.
- [41] Secil, “CEM I 42,5 R,” 2013.
- [42] Britaminho, “Britaminho: Ficha de especificação do produto. Guimarães: Britaminho-

- granitos e britas do Minho Lda.” 2013.
- [43] Lusical, “Cal Hidratada H100.” 2012.
- [44] NP EN 1008, “Mixing water for concrete - Specification for sampling, testing and assessing the suitability of water, including water recovered from precesses in the concrete industry, as mixing water for concrete.” 2003.
- [45] NP EN 12350-2, “Ensaio de abaixamento.” 2002.
- [46] NP EN 12390-2, *NP EN 12390-2: Ensaios do betão endurecido - Parte 2: Execução e cura dos provetes para ensaios de resistência mecânica*. Europe, 2003, p. 11.
- [47] R. Reis, “Resistência à carbonatação de betões de elevado volume de cinzas volantes,” vol. d, pp. 49–59, 2015.
- [48] NP EN 12390-3, “Resistência à compressão dos provetes de ensaio.” 2003.
- [49] C. D. E. E. Civil, “Análise Do Ensaio Esclerométrico , Um Ensaio Não Destrutivo , Nas Estruturas De Concreto Análise Do Ensaio Esclerométrico , Um Ensaio Não Destrutivo , Nas Estruturas De Concreto,” 2010.
- [50] P. C. [74] Silva, R. M. Ferreira, and H. Figueiras, “Medições de resistividade eléctrica avaliada em provetes de betão: influência do método de ensaio e das condições de cura,” *Encontro Nac. BETÃO ESTRUTURAL - BE2012*, p. 10, 2012.
- [51] LMC PE-002, “Medição da resistividade eléctrica de uma superfície de um elemento de betão.” 2005.
- [52] T. R. Naik, V. M. Malhotra, and J. S. Popovics, “The Ultrasonic Pulse Velocity Method.” 2004.
- [53] NP EN 12504-4, “Determinação da velocidade de propagação dos ultra-sons.” pp. 1–58, 2007.
- [54] D. Rincón, O.;Aleida, C.;Carmen, A.;Paulo, H. and Isabel, “Manual for inspection, evaluation and diagnosis of corrosion in reinforced concrete structures (in Spanish).,” 1997.

- [55] CEN, “SPÉCIFICATION TECHNIQUE FprCEN / TS 12390-12 Testing hardened concrete - Part 12 : Determination of the potential carbonation resistance of concrete : Accelerated carbonation method,” 2010.
- [56] J. Maximino, “João Maximino Borges Soares BARRAMENTO DELGADO BARRAMENTO DELGADO,” Unniversidade do minho, 2015.