

ESCOLA POLITÉCNICA  
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA E TECNOLOGIA DE MATERIAIS  
MESTRADO EM ENGENHARIA E TECNOLOGIA DE MATERIAIS

TIAGO LUIS POSSEBON ORTOLAN

**ESTUDO DAS PROPRIEDADES MECÂNICAS E PENETRAÇÃO DE CLORETOS EM  
CONCRETOS COM AGREGADOS RECICLADOS DE CONSTRUÇÃO COM ALTA  
SUBSTITUIÇÃO DE CINZA VOLANTE**

Porto Alegre  
Janeiro/2023

PÓS-GRADUAÇÃO - *STRICTO SENSU*



Pontifícia Universidade Católica  
do Rio Grande do Sul



**ESTUDO DAS PROPRIEDADES MECÂNICAS E PENETRAÇÃO DE  
CLORETOS EM CONCRETOS COM AGREGADOS RECICLADOS DE  
CONSTRUÇÃO COM ALTA SUBSTITUIÇÃO DE CINZA VOLANTE**

**TIAGO LUIS POSSEBON ORTOLAN**  
ENGENHEIRO CIVIL

**DISSERTAÇÃO PARA A OBTENÇÃO DO TÍTULO DE MESTRE EM  
ENGENHARIA E TECNOLOGIA DE MATERIAIS**

**Porto Alegre**  
**Janeiro, 2023**



# **ESTUDO DAS PROPRIEDADES MECÂNICAS E PENETRAÇÃO DE CLORETOS EM CONCRETOS COM AGREGADOS RECICLADOS DE CONSTRUÇÃO COM ALTA SUBSTITUIÇÃO DE CINZA VOLANTE**

**TIAGO LUIS POSSEBON ORTOLAN**

Engenheiro Civil

ORIENTADOR: PROF. DR. JAIRO JOSÉ DE OLIVEIRA ANDRADE

Dissertação realizada no Programa de Pós-Graduação em Engenharia e Tecnologia de Materiais (PGETEMA) da Pontifícia Universidade Católica do Rio Grande do Sul, como parte dos requisitos para a obtenção do título de Mestre em Engenharia e Tecnologia de Materiais.

**Porto Alegre  
Janeiro, 2023**

*“A verdadeira viagem de descobrimento não consiste em procurar novas paisagens, e sim ter novos olhos”*

*(Marcel Proust)*

## **DEDICATÓRIA**

Dedico este trabalho aos meus pais Ana Maria e Dorival e a minha irmã Mariana que me incentivaram e me apoiaram durante essa jornada.

Dedico também a Gabriela, minha namorada e parceira de vida, obrigado por estar sempre comigo em todas as horas.

## AGRADECIMENTOS

Este trabalho é fruto da colaboração de muitas pessoas, que ao longo do mestrado contribuíram de alguma forma para que ele saísse do chão.

Agradeço primeiramente ao meu orientador, Prof. Dr. Jairo José de Oliveira Andrade, por ter aberto as portas da pesquisa para mim, ainda como bolsista de IC, obrigado pelos valiosos ensinamentos e pela orientação ao longo destes anos.

À Pietra, obrigado pela ajuda inestimável nessa reta final de jornada, tua disponibilidade e paciência para dúvidas e sempre pronta para discutirmos os resultados e debatermos soluções, sem a tua presença esse último mês teria sido impossível.

Ao Sérgio, obrigado pela parceria e pela ajuda em todas as horas de aperto no desenvolvimento do projeto e do programa experimental.

Às Prof<sup>as</sup>. Dras. Denise Carpena Coitinho Dal Molin e Angela Borges Masuero, agradeço imensamente pela parceria na utilização do equipamento do LAMTAC, parte fundamental da análise feita neste trabalho. Assim como ao pessoal do NORIE que me recebeu muito bem no período que estive UFRGS.

Deixo meus agradecimentos também aos funcionários do LAMAT da PUCRS, José Eduardo R. da Cruz, Douglas Tischner Rodeghiero e Nikollas Silveira da Silva, sem o trabalho de vocês esse trabalho não ficaria pronto.

Por fim, agradeço aos professores, funcionário e colegas do PGETEMA pelo apoio e ensinamentos ao longo dessa caminhada.

O presente trabalho foi realizado com apoio da Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal Nível Superior – Brasil (CAPES) – Código de Financiamento 001.

## SUMÁRIO

<b>DEDICATÓRIA .....</b>	<b>4</b>
<b>AGRADECIMENTOS.....</b>	<b>5</b>
<b>SUMÁRIO .....</b>	<b>6</b>
<b>LISTA DE FIGURAS .....</b>	<b>8</b>
<b>LISTA DE TABELAS.....</b>	<b>11</b>
<b>LISTA DE QUADROS .....</b>	<b>12</b>
<b>LISTA DE SÍMBOLOS.....</b>	<b>13</b>
<b>RESUMO.....</b>	<b>15</b>
<b>ABSTRACT.....</b>	<b>16</b>
<b>1. INTRODUÇÃO .....</b>	<b>17</b>
<b>2. OBJETIVOS .....</b>	<b>21</b>
2.1. Objetivos Específicos .....	21
2.2. Delimitação da Pesquisa .....	21
2.3. Estrutura do trabalho .....	22
<b>3. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA.....</b>	<b>23</b>
3.1. Conceitos de durabilidade e vida útil das estruturas.....	23
3.2. Fundamentos da corrosão de armaduras em estruturas de concreto .....	27
3.2.1. Carbonatação .....	29
3.2.2. Penetração de Cloretos .....	39
3.3. Concretos com a utilização de agregado reciclado (AR).....	46
3.3.1. Propriedades físico mecânicas de concretos com AR.....	48
3.3.2. Efeito dos cloretos em concretos com AR .....	51
3.4. Concretos com a utilização de CV .....	52
3.4.1. Propriedades físico-mecânicas de concretos com CV.....	54
3.4.2. Durabilidade de concretos com CV.....	56
<b>4. MATERIAIS E MÉTODOS .....</b>	<b>60</b>
4.1. Materiais.....	60
4.2. Métodos.....	64
4.2.1. Estudo de dosagem .....	64

4.2.2. Microtomografia de raios X .....	67
4.2.3. Penetração de cloretos .....	67
4.2.4. Carbonatação Acelerada .....	73
<b>5. RESULTADOS E DISCUSSÕES .....</b>	<b>75</b>
5.1. Propriedades Físicas .....	75
5.2. Propriedades Mecânicas .....	78
5.3. Profundidade de Carbonatação .....	87
5.4. Microtomografia de raios X .....	91
5.5. Penetração de Cloretos .....	95
5.5.1. Coeficiente de difusão de cloretos (D) .....	100
5.5.2. Concentração superficial de cloretos ( $C_s$ ) .....	103
5.5.3. Previsão da vida útil dos concretos analisados.....	105
<b>6. CONCLUSÕES .....</b>	<b>113</b>
6.1. Considerações finais .....	113
6.2. Sugestões para trabalhos futuros .....	115
<b>7. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....</b>	<b>117</b>

## LISTA DE FIGURAS

Figura 3.1 - Formação do pite de corrosão pela ação dos íons cloreto.....	28
Figura 3.2 - Representação diagramática dos danos induzidos pela corrosão. ....	28
Figura 3.3 Avanço da frente de carbonatação.....	30
Figura 3.4 - Influência da concentração de CO <sub>2</sub> na profundidade de carbonatação. 31	
Figura 3.5 - Processo de carbonatação nos poros do concreto. ....	33
Figura 3.6 - Efeito de matrizes cimentícias diferentes em relação à umidade relativa do ambiente.....	33
Figura 3.7 - a) Fracionamento do volume dos poros em função da relação a/c do concreto (b) Efeito da relação a/c na carbonatação dos concretos.....	35
Figura 3.8 - Efeito do C3A no tempo de início da corrosão em armaduras e na concentração de cloretos livres no concreto .....	40
Figura 3.9 - Efeito da carbonatação na estabilidade dos íons cloreto no concreto. ...	42
Figura 3.10 – Relação entre risco de corrosão e umidade relativa. ....	43
Figura 3.11 - Análise morfológica do AR graúdo.....	49
Figura 3.12 - Efeito da influência dos agregados reciclados graúdo e miúdo no módulo de elasticidade.....	50
Figura 3.13 - Efeito do tratamento com CO <sub>2</sub> dos agregados reciclados.....	52
Figura 3.14 - Efeito da CV no ganho de resistência em idades avançadas. ....	54
Figura 3.15 - Efeito da CV no volume de vazios permeáveis do concreto. ....	55
Figura 3.16 - Efeito da CV na trabalhabilidade do concreto. ....	56
Figura 3.17 - Efeito da CV na permeabilidade de íons cloreto. ....	57
Figura 4.1 - Composição gravimétrica do agregado graúdo reciclado. ....	63
Figura 4.2 - Difração de Raios X dos materiais utilizados. ....	64

Figura 4.3 - Corpo de prova para ensaio de penetração de cloretos. ....	68
Figura 4.4 - Corpo de prova após execução de furo para coleta de material pulverulento.....	68
Figura 4.5 - Amostra analisada no eletrodo seletivo. ....	70
Figura 4.6 - Amostra no agitador magnético. ....	70
Figura 4.7 - Leitura da amostra com o eletrodo seletivo. ....	71
Figura 4.8 - Câmara de carbonatação acelerada do laboratório. ....	73
Figura 4.9 – Carbonatação no concreto 75-0 aos 28 dias (a), aos 91 dias (b) e aos 150 dias (c).....	74
Figura 4.10 - Leitura da carbonatação no software <i>ImageJ</i> . ....	74
Figura 5.1 – Influência da % de substituição de AR e teor de CV na absorção de água dos concretos aos 28 dias.....	76
Figura 5.2 - Influência da % de substituição de AR e teor de CV na porosidade dos concretos aos 28 dias. ....	76
Figura 5.3 - Influência da % de substituição de AR e teor de CV na massa específica dos concretos aos 28 dias.....	77
Figura 5.4 – ANOVA para a resistência à compressão dos concretos analisados....	79
Figura 5.5 - ANOVA para o módulo de elasticidade dos concretos analisados. ....	83
Figura 5.6 - Relação entre as propriedades físico-mecânicas dos concretos: sem CV (a) e com 40% de CV (b).....	86
Figura 5.7 - Carbonatação dos concretos com e sem CV.....	87
Figura 5.8 - Profundidade de carbonatação aos 63, 120, 150 e 180 dias nos concretos –.....	88
Figura 5.9 - Profundidade de carbonatação aos 63, 91 e 120 dias nos concretos –.	89
Figura 5.10 - Concreto REF - Imagem reconstruída (a); Poros do concreto (b).....	91
Figura 5.11 - Concreto 0-40 - Imagem reconstruída (a); Poros do concreto (b).....	92

Figura 5.12 - Concreto 75-0 - Imagem reconstruída (a); Poros do concreto (b).....	92
Figura 5.13 - Concreto 75-40 - Imagem reconstruída (a); Poros do concreto (b).....	93
Figura 5.14 Relação entre resistência à compressão, porosidade e absorção por imersão .....	95
Figura 5.15 – Perfis de concentração de cloretos por profundidade dos concretos REF (a) e 0-40 (b).....	97
Figura 5.16 - Perfis de concentração de cloretos por profundidade dos concretos 25-0 (a) e 25-40 (b).....	97
Figura 5.17 – Perfis de concentração de cloretos por profundidade dos concretos 50-0 (a) e 50-40 (b).....	98
Figura 5.18 – Perfis de concentração de cloretos por profundidade dos concretos 75-0 (a) e 75-40 (b).....	98
Figura 5.19 - Coeficiente de difusão concretos sem CV (a) e com CV (b) considerando os percentuais de AR.....	101
Figura 5.20 – Comparação do coeficiente de difusão em diferentes traços em diferentes idades.....	103
Figura 5.21 – Evolução da concentração superficial nos concretos sem CV e com CV.....	103
Figura 5.22 – Estimativa vida útil concretos sem substituição de CV primeiro cenário.....	106
Figura 5.23 – Estimativa vida útil concretos sem substituição de CV segundo cenário.....	107
Figura 5.24 - Estimativa vida útil concretos com substituição de CV primeiro cenário.....	107
Figura 5.25 - Estimativa vida útil concretos com substituição de CV segundo cenário.....	108
Figura 5.26 – Influência da concentração superficial na estimativa da vida útil das estruturas .....	109
Figura 5.27 – Profundidade da concentração crítica de cloretos – Cenário 1.....	110
Figura 5.28 – Profundidade da concentração crítica de cloretos – Cenário 2.....	110
Figura 5.29 - Relação entre as propriedades de durabilidade dos concretos e a porosidade.....	112

## LISTA DE TABELAS

Tabela 3.1 - VUP mínima nas diversas normas disponíveis. ....	26
Tabela 4.1 - Características do cimento CP-V ARI. ....	60
Tabela 4.2 - Fluorescência de raios X do concreto, CV e do AR. ....	60
Tabela 4.3 - Ensaio de caracterização do agregado miúdo. ....	61
Tabela 4.4 - Ensaio de caracterização do AN. ....	61
Tabela 4.5 - Composição gravimétrica do agregado graúdo reciclado. ....	62
Tabela 4.6 - Ensaio de caracterização do agregado graúdo reciclado.....	63
Tabela 4.7 – Quantidades de materiais por m <sup>3</sup> empregadas para cada concreto. ....	66
Tabela 5.1 - ANOVA para as propriedades físicas aos 28 dias.....	75
Tabela 5.2 - Tabela ANOVA para a resistência à compressão. ....	78
Tabela 5.3 - Tabela ANOVA para o módulo de elasticidade. ....	82
Tabela 5.4 – Comparativo dos valores de coeficiente $\alpha E$ da literatura.....	85
Tabela 5.5 - Comparação entre coeficientes de carbonatação encontrados na literatura. ....	90
Tabela 5.6 – Porosidade dos concretos observada na microtomografia de Raios X.	93
Tabela 5.7 - ANOVA para a penetração de cloretos. ....	96

## LISTA DE QUADROS

Quadro 3.1 - Classes de agressividade ambiental de acordo com a NBR 6118.....	23
Quadro 3.2 - Cobrimento mínimo de acordo com a NBR 6118.....	24
Quadro 3.3 - Principais documentos a respeito de durabilidade e vida útil.....	25
Quadro 3.4 - Classificação da agressividade ambiental dos macro-climas.....	31
Quadro 3.5 - Classificação de classes de resíduo. ....	46
Quadro 3.6 – Valores do parâmetro natural dos agregados usados na equação 10.51	
Quadro 4.1 - Ensaios executados e número de corpos de prova utilizados.....	66

## LISTA DE SÍMBOLOS

AN	Agregado graúdo natural	
AR	Agregado graúdo reciclado	
CaCO <sub>3</sub>	Carbonato de cálcio	
Ca(OH) <sub>2</sub>	Hidróxido de cálcio	
CaO	Óxido de cálcio	
Cc	Consumo de cimento	kg/m <sup>3</sup>
Clconcreto	Concentração de cloretos em relação à massa de concreto	%
Clcimento	Concentração de cloretos em relação à massa de cimento	%
Cl-	Íons cloreto	
CO <sub>2</sub>	Dióxido de carbono	
Cs	Concentração superficial	%
C-S-H	Silicatos de cálcio hidratados	
C3A	Aluminato tricálcico	
C4AF	Ferroaluminato tetracálcico	
C3S	Silicato tricálcico	
D	Coefficiente de difusão	cm <sup>2</sup> /ano
e-	Elétrons	
Erfc	Função complementar de erro de Gauss	mm
Fe(OH) <sub>2</sub>	Hidróxido de ferro	
GHG	Greenhouse gas	
MAN	Massa de agregado graúdo natural	kg
MAR	Massa de agregado graúdo reciclado	kg

PIB	Produto interno bruto	
x	Profundidade de carbonatação	cm
T	Tempo de exposição	Anos
$\gamma_{AN}$	Massa específica do agregado graúdo natural	kg/dm <sup>3</sup>
$\gamma_{AR}$	Massa específica do agregado graúdo reciclado	kg/dm <sup>3</sup>
$\gamma_C$	Massa específica do concreto	kg/m <sup>3</sup>

## RESUMO

ORTOLAN, Tiago. **Estudo das propriedades mecânicas e penetração de cloretos em concretos com agregados reciclados de construção com alta substituição de cinza volante**. Porto Alegre. 2023. Dissertação de Mestrado. Programa de Pós-Graduação em Engenharia e Tecnologia de Materiais, PONTIFÍCIA UNIVERSIDADE CATÓLICA DO RIO GRANDE DO SUL.

Atualmente, as indústrias da cadeia da construção civil no Brasil e no mundo estão diretamente envolvidas na discussão acerca dos desafios enfrentados para atingir as metas de redução das emissões de gases de efeito estufa (GEE) até 2050. A cadeia produtiva do cimento sozinha produz aproximadamente 8% das emissões de GEE no mundo. Além disso, deve-se considerar a geração de milhões de toneladas de resíduos sólidos urbanos provenientes de construção e demolição, pois somente no Brasil foram 47 milhões de toneladas em 2020. Nesse contexto, uma alternativa visando minimizar tais efeitos consiste no emprego do resíduo de construção e demolição (RCD) como substituto do agregado natural (AN) em conjunto com a substituição do cimento Portland convencional por cinza volante (CV). Com isso, o presente trabalho tem como objetivo investigar os efeitos do uso do agregado reciclado (AR) e da CV nas propriedades mecânicas e de durabilidade dos concretos, principalmente no que tange à penetração de íons cloreto. Para tanto, foram empregados três teores de substituição (25%, 50% e 75%) de AN por AR e a substituição de 40% de cimento por CV para a produção dos concretos. Os concretos foram analisados quanto a sua resistência à compressão, módulo de elasticidade, carbonatação e resistência ao ingresso de íons cloreto. Os resultados demonstraram que o uso do AR pode ser empregado em até 50% de substituição, considerando uma resistência desejada de 30 MPa. O emprego da CV em elevados teores resultou em perda de resistência mecânica e aumento da carbonatação, mas no que diz respeito ao ingresso de íons cloreto os concretos tiveram resultados semelhantes ao concreto de referência.

Palavras-Chaves: Concreto; Agregado Reciclado; Cinza Volante; Cloret

## ABSTRACT

ORTOLAN, Tiago. **Study of the mechanical properties and chloride ion ingress of concrete with recycled construction aggregates with high replacement of fly ash.** Porto Alegre. 2023. Master. Graduation Program in Materials Engineering and Technology, PONTIFICAL CATHOLIC UNIVERSITY OF RIO GRANDE DO SUL.

Currently, the civil construction industry chain in Brazil and in the world are increasingly at the heart of discussion about challenges faced to achieve greenhouse gas (GHG) reduction goals by 2050. The cement production chain produces approximately 8% of the world's GHG emissions. Another point of alert is the generation of millions of tons of urban solid waste from construction and demolition, in Brazil, there were 47 million tons in 2020. Seeking to address these two serious problems, construction and demolition waste (CDW) was applied as recycled aggregate (RA) in this research as a substitute for natural coarse aggregate (NA) in conjunction with the replacement of conventional Portland cement by fly ash (FA). With this, the present work aims to observe the effects of RA and FA on the mechanical properties and durability of concrete, mainly regarding the penetration of chloride ions. For this purpose, 8 mix proportions of concrete were cast, two for each RA replacement level, respectively 25%, 50% and 75%, and two for concrete with AN, four of these were made with conventional CPV-ARI cement and the other four with 40% replacement of cement by fly ash. The concretes were analyzed for their compressive strength, elastic modulus, carbonation and resistance to chloride ion ingress. The results showed that the use of AR harmed the concretes mechanical and durability properties, mainly in the contents of 50% and 75%. The replacement of CV resulted in loss of mechanical strength and increase in carbonation, but about the chloride ions entry, the concretes had similar results to the reference one.

Key-words: Concrete; Recycled Aggregate; Fly Ash; Chlorides.

## 1. INTRODUÇÃO

O desafio que atualmente a sociedade enfrenta para controlar as emissões de gases de efeito estufa se tornou uma agenda obrigatória a todas as cadeias produtivas da indústria. As bases desse compromisso foram firmadas no tratado de Paris em 2015. Especificamente na Europa, o *European Green Deal* [1] estabelece 2050 como uma data crítica para que seja atingida a neutralidade nas emissões dos gases de efeito estufa (GEE), compromisso semelhante também firmado pelo governo da China, estabelecendo a mesma meta para 2060. Segundo o relatório do *World Population Prospects* apresentado pela Organização das Nações Unidas [2], a população mundial em 2050 será de 9,7 bilhões, um crescimento de 21,25% do registro feito em 2022, e aproximadamente 68% dessas pessoas viverão em áreas urbanas. Esse aumento constante da urbanização ocasionará o incremento proporcional da demanda por infraestrutura de transportes e logística, assim como de moradias e áreas de lazer nos grandes centros urbanos [2].

Por outro lado, tem-se que o concreto é, atualmente, o segundo material mais utilizado pela humanidade, ficando atrás somente da água, e sua cadeia produtiva responde por aproximadamente 8% das emissões de dióxido de carbono na atmosfera. A literatura afirma que a cada tonelada de cimento produzida no mundo são emitidas de 0,73 a 0,90 toneladas de CO<sub>2</sub> a depender da quantidade de clínquer no produto [3–5]. O processo de produção do cimento consiste basicamente na moagem de rocha calcária e argila e na posterior queima desses materiais em um forno giratório a 1450°C, na etapa de clínquerização da matéria prima. Segundo relatório do CEMCAP (*CO<sub>2</sub> capture from cement production*), grupo de pesquisa que aborda a captura de CO<sub>2</sub> na produção de cimento [5,6] o processo de calcinação do CaCO<sub>3</sub> (convertido em CaO) representa 60% das emissões de CO<sub>2</sub> do processo de produção do cimento, enquanto os 40% restantes são devidos à queima do

combustível utilizado para aquecer o forno giratório às altas temperaturas de trabalho necessárias.

Uma das formas de minimizar tal impacto diz respeito ao emprego de materiais cimentícios suplementares (MCS). Muitos deles são conhecidos, como a escória granulada de alto-forno, a cinza de casca de arroz e a CV, que podem ser utilizadas durante o processo de fabricação do cimento, em substituição ao clínquer, e como substituição durante a fabricação do concreto [7] Tais materiais, em geral, são subprodutos de outras indústrias e podem ser encontrados em abundância no Brasil. Além disso, tem atividade pozolânica, ou seja, atuam não só como materiais em enchimento (filler) mas também complementam a resistência, principalmente a longas idades [8].

Deve-se considerar também que a Construção Civil é uma grande consumidora de agregados, que são empregados para a fabricação dos concretos e argamassas. Mehta e Monteiro (1994) citam que aproximadamente entre 80-85% do volume total dos concretos são referentes aos agregados. Os processos de extração e beneficiamento dos agregados causam um grande impacto ambiental, cujo emprego de agregados reciclados (AR) de resíduo de construção e demolição (RCD) se mostra uma alternativa interessante. De acordo com a resolução nº 307 do Conselho Nacional de Meio Ambiente [9] e com a NBR 15116 [10], tais resíduos são caracterizados como os provenientes de todas as atividades da construção e podem ser classificados de acordo com a sua composição gravimétrica. Resíduos Classe A, compostos de materiais cimentícios e cerâmicos, podem ser reaplicados em materiais a base de cimento na forma de agregados reciclados segundo a NBR 15116 [10]. No Brasil, segundo a Associação Brasileira de Empresas de Limpeza Pública e Resíduos Especiais, o volume coletado foi de 47 milhões de toneladas em 2020, 5,5% maior que o ano anterior. De acordo com Huang *et al.* [11] esse volume significativo de resíduos é por muitas vezes disposto em aterros sanitários, ocasionando impacto ambiental por meio do uso extensivo da terra e do transporte desses resíduos para fora dos centros urbanos.

Muitas pesquisas vêm sendo realizadas atualmente sobre o emprego de AR em concretos e argamassas, cujos resultados são bastante promissores, demonstrando que a utilização do AR é viável até um determinado teor de substituição [12–15]. Porém, o emprego desses materiais pode causar impactos

negativos em determinadas propriedades dos concretos, no que concerne às propriedades físico-mecânicas e relacionadas com a durabilidade, principalmente devido à elevada probabilidade da ocorrência da corrosão das armaduras desencadeada tanto pela carbonatação quanto pela penetração dos íons cloreto [12,16,17,18]. A penetração de íons cloreto não é tão prejudicial quando estes íons são encontrados de forma combinada com o  $C_3A$  do concreto; porém, quando encontram-se livres na solução dos poros do concreto, podem ocasionar a despassivação [19,20]. Sua penetração ocorre, majoritariamente, por meio do processo de difusão entre soluções aquosas. Já a carbonatação ocorre de maneira natural em qualquer ambiente em que haja a presença de  $CO_2$ . Os hidróxidos de cálcio presentes na matriz cimentícia reagem com o dióxido de carbono atmosférico formando carbonatos de cálcio quimicamente estáveis [21]. Entretanto, a reação gera a diminuição do pH do concreto possibilitando a despassivação das armaduras, tornando-as susceptíveis à corrosão [22]. O processo corrosivo ocorre a partir da formação de pilhas eletroquímicas onde há uma zona anódica e outra catódica. Por meio desse processo gera-se uma corrente elétrica que transporta os elétrons em direção ao cátodo, formando hidroxilas que futuramente reagem com o ferro e tem como principais problemas a perda da seção transversal das armaduras e o deslocamento do concreto de cobertura ocasionado pela característica expansiva dos produtos de corrosão [8,23].

Nesse contexto, a previsão da vida útil das estruturas é de fundamental importância para assegurar que elas permaneçam em níveis adequados de desempenho [24]. Para tanto, a modelagem da penetração de cloretos em concretos com RCD e CV é de extrema relevância para verificar se a vida útil de projeto deles será atingida. Na maioria dos casos a modelagem da penetração de cloretos fundamenta-se na 2ª Lei de Fick e nas suas derivações [20,25]. Devido às diversas variáveis que influenciam o processo de penetração de íons cloreto, existem diversos modelos que se propõe a explicar o fenômeno.

O trabalho, neste contexto, tem potencial de contribuir para os objetivos 9 (indústria, inovação e infraestrutura), 11 (cidades e comunidades sustentáveis), 12 (consumo e produção responsáveis) e 13 (ação contra a mudança global do clima) dos “Objetivos para o Desenvolvimento Sustentável” observados pela Organização das Nações Unidas [12–15]. Os pontos são considerados meios para atingir

patamares econômicos satisfatórios ao mesmo tempo que em preserva-se a qualidade de vida da população e o meio ambiente.

## **2. OBJETIVOS**

O objetivo geral deste trabalho é avaliar o efeito dos agregados reciclados e da cinza volante nas propriedades físico-mecânicas, na penetração de cloretos e na carbonatação dos concretos.

### **2.1. Objetivos Específicos**

Como objetivos específicos podem ser citados:

- a) investigar o efeito da substituição da cinza volante e do agregado graúdo reciclado nas propriedades físico-mecânicas dos concretos;
- b) avaliar a influência da substituição da cinza volante e do AR na velocidade de carbonatação e na penetração de íons cloreto.
- c) analisar a influência da presença da cinza volante no coeficiente de difusão de íons cloreto ao longo do tempo.
- d) realizar análise da previsão de vida útil de projeto dos concretos com AR quando submetidos a ação de íons cloreto.

### **2.2. Delimitação da Pesquisa**

Este trabalho se restringe a análise de concretos com agregados reciclados graúdos em substituição aos agregados graúdos naturais e com cinza volante em substituição ao cimento Portland convencional. Não foram consideradas a influência da heterogeneidade e nem a variabilidade dos agregados reciclados nos resultados. Os resultados encontrados são restritos às condições experimentais estabelecidas.

### **2.3. Estrutura do trabalho**

Esta dissertação está dividida em 7 capítulos denominados: introdução, objetivos, revisão bibliográfica, materiais e métodos, resultados e discussões, conclusões e referências bibliográficas. O capítulo de revisão bibliográfica subdivide-se em 4 subtópicos: Conceitos de durabilidade e vida útil, fundamentos da corrosão de armaduras, concretos com uso de agregado reciclado e concretos com uso de cinza volante. Os resultados foram divididos entre propriedades físicas, mecânicas, profundidade de carbonatação, microtomografia de Raios X e penetração de cloretos.

### 3. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

#### 3.1. Conceitos de durabilidade e vida útil das estruturas

A durabilidade das estruturas, assim como as características intrínsecas do concreto e seus constituintes, são objeto de intensa pesquisa da comunidade científica [26–31], visando a compreensão das variáveis que ocasionam as principais manifestações patológicas responsáveis pela perda de desempenho do concreto ao longo da vida útil da estrutura. Em tratando de estruturas de concreto, dentre os fenômenos mais nocivos à vida útil das edificações, chamados de agentes de degradação, estão a corrosão ocasionada pela despassivação da armadura via carbonatação e a corrosão de armaduras de aço por meio da penetração de cloretos [32].

Tais agentes são vetores que contribuem para a perda de durabilidade e podem estar mais ou menos presentes de acordo com o ambiente em que a edificação está submetida. A NBR 6118 [33] apresenta quatro classes de agressividade (Quadro 3.1) que estão relacionadas com agentes físicos e químicos presentes nestes ambientes.

Quadro 3.1 - Classes de agressividade ambiental de acordo com a NBR 6118.

Classe de agressividade ambiental	Agressividade	Classificação geral do tipo de ambiente para efeito de projeto	Risco de deterioração da estrutura
I	Fraca	Rural	Insignificante
		Submersa	
II	Moderada	Urbana	Pequeno
III	Forte	Marinha	Grande
		Industrial	
IV	Muito forte	Industrial	Elevado
		Respingos de maré	

Essas classes são importantes pois, a partir dessa classificação, é que se definem parâmetros máximos de relação água-cimento (a/c) e mínimos de qualidade do concreto e espessura de cobrimento (Quadro 3.2). Estas espessuras de cobrimento foram estabelecidas de forma progressiva para que, conforme aumentasse a presença e intensidade de agentes agressivos, também se aumente a proteção física do concreto, sob o ponto de vista da proteção às armaduras.

Quadro 3.2 - Cobrimento mínimo de acordo com a NBR 6118 [33].

Tipo de estrutura	Componente ou elemento	Classe de agressividade ambiental			
		I	II	III	IV
		Cobrimento nominal (mm)			
Concreto armado	Laje	20	25	35	45
	Viga / Pilar	25	30	40	50
	Elementos estruturais em contato com o solo	30		40	50
Concreto protendido	Laje	25	30	40	50
	Viga / Pilar	30	35	45	55

Além disso, no Brasil entrou em vigor em 2013 a Norma de Desempenho NBR 15575 [24], na qual constam parâmetros de desempenho para sistemas construtivos e habitações. A norma tem como objetivo propiciar o atendimento das exigências e necessidades dos usuários ao longo do ciclo de vida da edificação, citando a durabilidade como um dos 12 critérios de desempenho necessários para manter a qualidade e a segurança das estruturas. Outro conceito estabelecido pela norma é a vida útil de projeto (VUP), que corresponde ao período compreendido entre o início da operação e uso da edificação até o ponto em que ela deixa de atender às necessidades dos usuários. Tal tempo está intimamente ligado com a agressividade do ambiente de exposição e com os processos de reparo e manutenção. O sistema estrutural, devido à sua complexidade e importância, é o que opera com VUP mais alta (mínimo de 50 anos), e boa parte dos artigos que tratam sobre previsão de vida útil utilizam a VUP estrutural como parâmetro, visto que a estrutura é de difícil substituição [34–36]. Além da norma brasileira, o *American Concrete Institute* (ACI) e a Federação Internacional de Concreto Estrutural (*Fédération Internationale Du Béton - fib*) também desenvolveram relatórios e manuais de boas práticas a respeito deste tema. Tais documentos englobam conceitos de Avaliação de Ciclo de Vida (ACV) e estão relacionados à

concepção, projeto, execução, uso, manutenção e dados de origem econômica. Além deste, a *International Organization of Standardization* e o EUROCODE também tem documentos a respeito do tema. As principais normas que tratam diretamente sobre o tema encontram-se apresentadas no Quadro 3.3.

Quadro 3.3 - Principais documentos a respeito de durabilidade e vida útil.

<b>Norma</b>	<b>Organizador</b>	<b>Título</b>	<b>Ano</b>
ACI 201 [37]	<i>American Concrete Institute</i>	<i>Guide to Durable Concrete</i>	1992
CEB 183 [38]	<i>Fédération Internationale Du Béton</i>	<i>Durable Concrete Structures</i>	1992
CEB 238 [39]	<i>Fédération Internationale Du Béton</i>	<i>New Approach to Durability Design: An Example for Carbonation Induced Corrosion</i>	1997
ACI 365	<i>American Concrete Institute</i>	<i>Service Life Prediction: State-of-the-art Report</i>	2000
EUROCODE 2 [40]	<i>European Commission</i>	<i>Design of Concrete Structures</i>	2004
fib 34 [41]	<i>Fédération Internationale Du Béton</i>	<i>Model Code for Service Life Design</i>	2006
ACMC [42]	<i>International Committee on Concrete Model Code for Asian</i>	<i>Asian Concrete Model Code</i>	2006
ISO 13823 [43]	<i>International Organization of Standardization</i>	<i>General Principles on the Design of Structures for Durability</i>	2008
ISO 15686 [44]	<i>International Organization of Standardization</i>	<i>Buildings and Constructed Assets: Service Life Planning</i>	2011
NBR 15575 [24]	Associação Brasileira de Normas Técnicas	Desempenho de edificações habitacionais	2021

Entretanto, as normas divergem a respeito do tempo determinado como VUP. A NBR 15575 [24] classifica as VUP entre os níveis de desempenho estabelecidos: mínimo, intermediário e superior, salientando que todas as edificações a partir de 2013 [43] tem obrigação de seguir ao menos o limite mínimo. Na Tabela 3.1, estão

apresentados os valores para VUP mínima, considerando as normas e/ou códigos de práticas vigentes. *et al.*

Tabela 3.1 - VUP mínima nas diversas normas disponíveis.

Tipo de Estrutura	Vida útil de projeto mínima (VUP)				
	BS 7543 [45]	ISO 2394	FIB 34 [41] e EN 206-1 [46]	NBR 15575 [24]	FIB 53 [47]
Temporária	>10 anos	1 a 5 anos	> 10 anos	-	-
Partes estruturais (Ex.: apoios)	>10 anos	>25 anos	10 a 25 anos	23 a 20 anos	24 a 30 anos
Estrutura para agricultura e semelhantes	-	-	15 a 30 anos	-	-
Estruturas Offshore	-	-	-	-	>35 anos
Edifícios industriais e reformas	> 30 anos	-	-	-	-
Edifícios e outras estruturas comuns	-	> 50 anos	> 50 anos	> 50 anos	> 50 anos
Edifícios novos e reformas de edifícios públicos	> 60 anos	-	-	-	-
Edifícios monumentais, pontes e outras estruturas de engenharia civil	> 120 anos	> 100 anos	> 100 anos	-	> 100 anos
Edifícios monumentais	-	-	-	-	> 200 anos

Fonte: Dal Molin *et al.* [36]

Observa-se que, para estruturas comuns e edificações, a VUP tem um valor mínimo de referência de 50 anos. Ou seja, ao avaliar uma unidade habitacional é necessário que a estrutura de concreto mantenha seu nível de desempenho por, no mínimo, 50 anos. Por outro lado, tem-se que as estruturas se encontram expostas em diferentes níveis de agressividade ambiental, o que pode levar à ocorrência de diversas manifestações patológicas, principalmente a corrosão das armaduras. A ocorrência dessas manifestações patológicas ocasiona, em todo o mundo, diariamente, um gasto financeiro significativo com manutenção preventiva e corretiva. Segundo estudo conduzido pela IZA (*International Zinc Association*) em 2015 [48], cerca de 4% do PIB do Brasil seria gasto com custos relativos à corrosão dos materiais. Um estudo mais abrangente foi desenvolvido na China por Hou *et al.* [49], cujos autores observaram a influência da corrosão nos diversos setores da sociedade, e verificaram que a corrosão direta e indireta representa o equivalente a

3,34% do PIB chinês. Esses valores se aproximam do observado no estudo feito pela AMPP (*Association for Materials Protection and Performance*) em 2016 [50], cujos autores afirmam que a média global de custo da corrosão é de 3,4% do PIB mundial, o equivalente a 2,5 trilhões de dólares à época. Nesse contexto, considerando que o fenômeno corrosivo é uma das causas preponderantes de degradação das estruturas de concreto armado [18,51,52], uma breve contextualização sobre o tema será apresentada nas próximas seções.

### 3.2. Fundamentos da corrosão de armaduras em estruturas de concreto

Cascudo [23] conceitua o mecanismo de deterioração do concreto pela corrosão da armadura como sendo um processo eletroquímico. O autor explica que, necessariamente, ocorrerá no substrato do concreto a formação de pilhas eletroquímicas. Esse processo se evidencia pela ocorrência de uma zona anódica (onde ocorre a oxidação e a perda de seção) e uma zona catódica (onde ocorre a redução do oxigênio). A co-dependência do processo sugere que é necessário que existam essas duas condições na armadura para que o processo completo ocorra. Neville [8] complementa, explicando que a existência da diferença de potencial entre as duas zonas na armadura cria uma corrente elétrica no aço que transporta elétrons carregados negativamente ( $2e^-$ ) na direção do cátodo, reagindo com a água ( $H_2O$ ) e o oxigênio ( $O_2$ ) para formar hidroxilas ( $OH^-$ ). Essa reação pode ser observada na equação 1.



Na sequência os íons de ferro positivamente carregados se combinam através dos poros do concreto com as hidroxilas ( $OH^-$ ) para formar o hidróxido ferroso ( $Fe(OH)_2$ ), produto de 3 a 10 vezes mais volumoso que a armadura, cuja reação é apresentada pela equação 2.



A dinâmica de formação da corrosão pode ser observada na Figura 3.1.

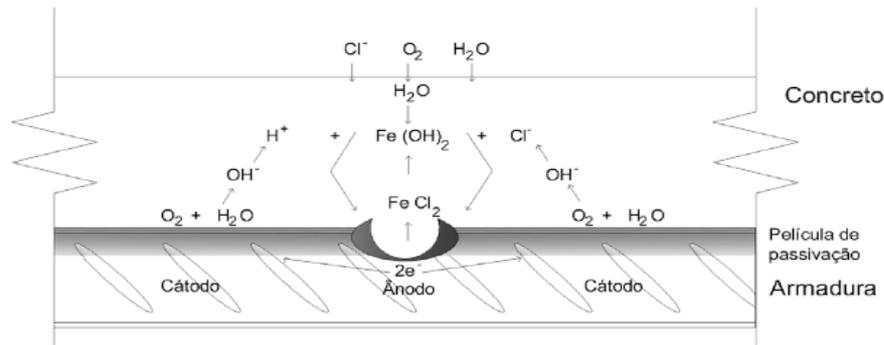


Figura 3.1 - Formação do pite de corrosão pela ação dos íons cloreto.

Fonte: Meira, Ferreira e Andrade [53]

A ocorrência da corrosão é uma manifestação patológica extremamente nociva ao concreto armado, pois os danos são ocasionados pela expansão da zona corroída, ocasionando esforços radiais de expansão na pasta endurecida do concreto. Esse processo, que leva invariavelmente à fissuração e, em casos mais avançados, deslocamento da camada de cobrimento (Figura 3.2), acelera a velocidade do processo de corrosão. A continuidade do processo ocasiona a perda de aderência entre o aço e o concreto, assim como redução da seção transversal de armadura, o que reduz a eficiência da estrutura e pode levar em casos avançados ao colapso [7,8,23].

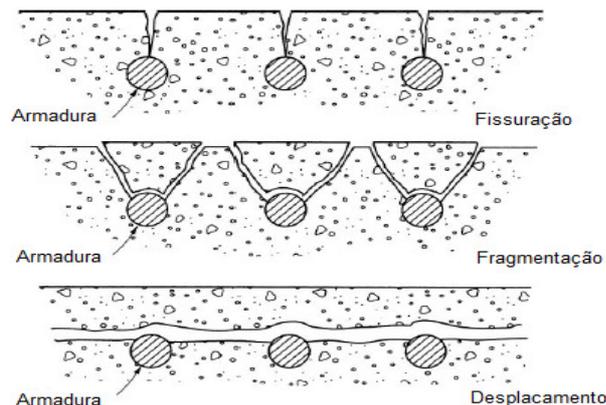


Figura 3.2 - Representação diagramática dos danos induzidos pela corrosão.

Fonte: Neville [8]

Cascudo [23] salienta, no entanto, que o início do mecanismo de corrosão só ocorre após a despassivação do filme de óxido de ferro presente na superfície da

armadura. Portanto, as características físicas do concreto têm uma grande influência no que diz respeito à proteção física das armaduras contra a corrosão. O autor também explica que enquanto a natureza alcalina do concreto for mantida (acima de 11,5) o filme passivante da armadura é considerado estável, impedindo o início do processo eletroquímico [23]. É por essa razão que a carbonatação do concreto é um fenômeno que deve ser observado em conjunto com a penetração de íons cloreto, uma vez que a carbonatação total do concreto esgota sua reserva alcalina e permite que, na presença de água e oxigênio, o processo de corrosão tenha início [8,54].

Desta forma, tem-se que tanto a carbonatação quanto a presença dos íons cloreto são os principais agentes responsáveis pela despassivação das armaduras. Desta forma, nos próximos itens tais fenômenos serão apresentados, bem como os principais fatores intervenientes em cada um dos processos.

### 3.2.1. Carbonatação

O processo de carbonatação em materiais cimentícios é um fenômeno físico-químico natural que se dá entre o  $\text{Ca(OH)}_2$ , produto da hidratação do cimento presente no concreto, e o  $\text{CO}_2$  da atmosfera [55,56]. Alexandridou, Angelopoulos e Coutelieiris [13] conceituam a carbonatação como o resultado da neutralização dos poros do concreto, cujo processo ocasiona a diminuição do pH do substrato para valores abaixo de 9, criando duas zonas de alcalinidades distintas no concreto. Quando à frente de carbonatação chega à armadura ocorre a despassivação, tornando as armaduras suscetíveis ao processo de corrosão, como apresentado na Figura 3.3.

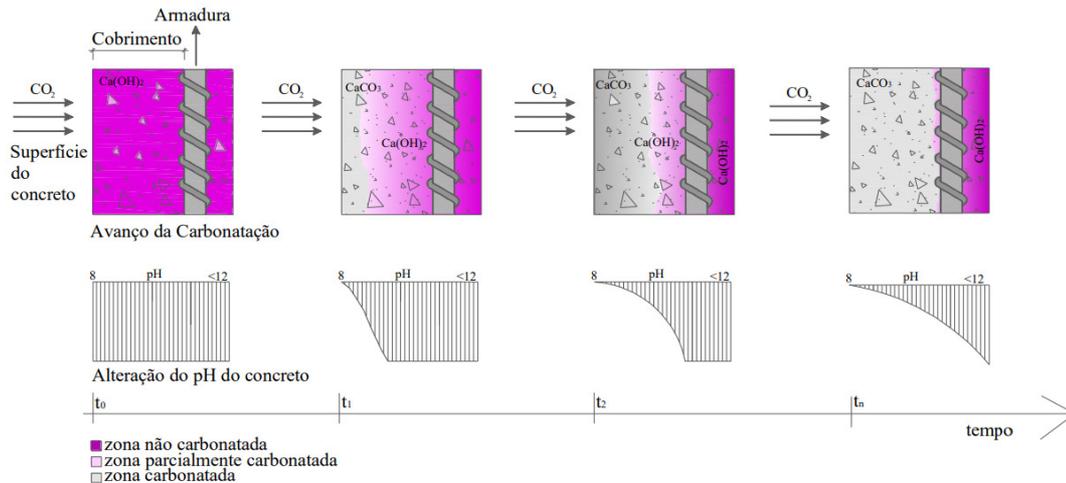


Figura 3.3 Avanço da frente de carbonatação

Fonte: Possan [35]

Por outro lado, em função do  $\text{CaCO}_3$  ser aproximadamente 12% mais volumoso que o  $\text{Ca(OH)}_2$  a carbonatação promove o tamponamento dos poros do concreto no longo prazo, deixando-o mais denso, menos permeável e mais resistente, sendo um processo benéfico para concretos sem presença de armaduras [57]. O progresso da frente de carbonatação é influenciado pelas características do concreto e do ambiente no qual ele está exposto. Os principais fatores que influenciam na carbonatação serão apresentados sumariamente nos próximos itens.

#### 3.2.1.1. Concentração de $\text{CO}_2$ no ambiente

Segundo Kellouche *et al.* [58], o fator ambiental de maior relevância na carbonatação de concretos é a concentração de  $\text{CO}_2$  no ambiente. De acordo com Leemann e Moro [59], essa importância se acentua principalmente em concretos com alta relação água-cimento ( $a/c$ ) e expostos à ambientes com maior concentração de  $\text{CO}_2$  como, por exemplo, lugares fechados, túneis e áreas próximas a avenidas com grande tráfego de veículos, aumentando diretamente a velocidade do avanço da frente de carbonatação [60]. No Quadro 3.4 é possível verificar a classificação da agressividade dos macro-climas pela concentração de gás carbônico no ambiente.

Quadro 3.4 - Classificação da agressividade ambiental dos macro-climas.

Classificação da agressividade do ambiente				
Classe de Agressividade	Macro clima	% CO <sub>2</sub>	Agressividade	Risco de deterioração da estrutura
I	Atmosfera Rural	≤0,3%	Fraca	Insignificante
	Submersa			
II	Urbana	≤0,3%	Média	Pequeno
III	Marinha	≥0,3%	Forte	Grande
	Industrial			
IV	Industrial	>0,3%	Muito Forte	Elevado
	Respingos de Maré			

Fonte: Figueiredo [60]

Ekolu [61] estudou o efeito da concentração de CO<sub>2</sub> na carbonatação natural dos concretos e concluiu que, conforme a resistência à compressão aumenta, a interferência da concentração de CO<sub>2</sub> no ambiente ao qual o concreto estava exposto diminui, a tal ponto que em concretos com 60 MPa de resistência à compressão a diferença de concentração é negligenciável, conforme apresentado na Figura 3.4.

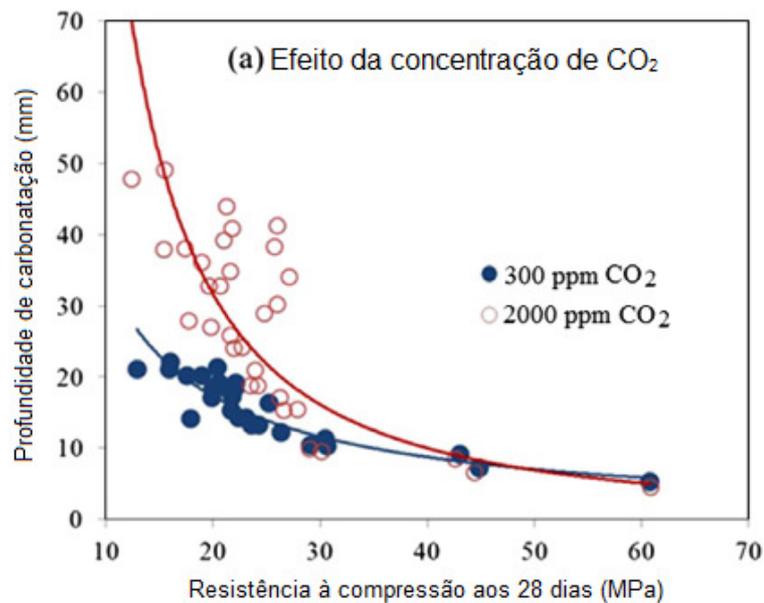


Figura 3.4 - Influência da concentração de CO<sub>2</sub> na profundidade de carbonatação.

Fonte: Adaptado de Ekolu [61]

Kellouche *et al.* [58] analisaram a influência da concentração de CO<sub>2</sub> na carbonatação de concretos com e sem CV em vários teores (0%, 20%, 40% e 50%) nos intervalos de 7, 28, 91, 120, 240 e 360 dias para concentrações de CO<sub>2</sub> de 0%, 5%, 10%, 15%, 20% e 50%. Os autores observaram que de 0% a 20%, a profundidade de carbonatação cresce proporcionalmente à medida que aumenta a concentração de CO<sub>2</sub>. No entanto, no intervalo entre 20% e 50% de CV, a carbonatação apresenta um comportamento constante, cujo efeito da concentração do CO<sub>2</sub> na profundidade de carbonatação não se mostrou significativo. Castellote *et al.* [62] analisaram o efeito das mudanças químicas de pastas de cimento Portland convencional em diferentes concentrações de CO<sub>2</sub> (3%, 10% e 100%). Os autores concluíram que até 3% a microestrutura das pastas não foi significativamente alterada, uma vez que a quantidade de C-S-H gel se manteve muito semelhante à condição de exposição natural.

#### 3.2.1.2. *Umidade relativa do ambiente*

A umidade ambiental é condicionante preponderante na ocorrência do processo de carbonatação, de tal forma que o ingresso do CO<sub>2</sub> na matriz do concreto ocorre em função da existência ou não de água nos poros do material (Figura 3.5). Em ambientes com baixa umidade, a difusão do CO<sub>2</sub> ocorre normalmente no concreto; no entanto, sem a presença de água o CO<sub>2</sub> permanece na forma de gás e a reação de carbonatação não ocorre, assim como em ambientes com alta taxa de umidade ambiental devido à baixa velocidade de difusão do CO<sub>2</sub> na água. Ekolu [61], Elsalamawy, Mohamed e Kamal [63] e Leemann e Moro [59] observaram esse fenômeno e constataram que a carbonatação nos concretos ocorre com mais facilidade em ambientes com umidade ambiental entre 50% e 65%. Segundo Neville [8], a difusão do gás através da água ocorre 4 ordens de magnitude mais lentamente do que pelo ar, reduzindo a velocidade do processo. [60]

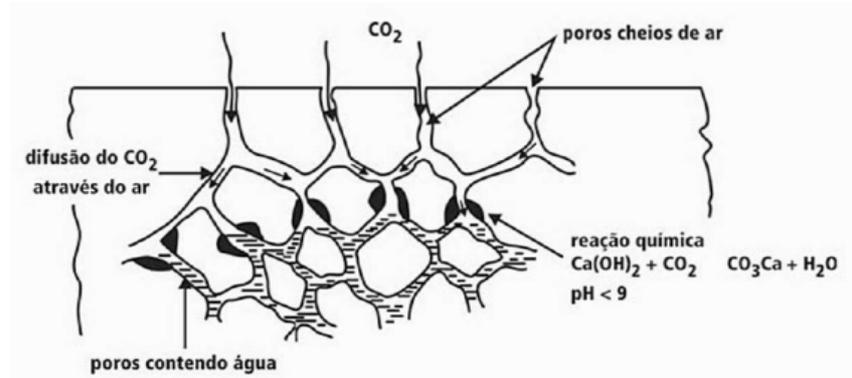


Figura 3.5 - Processo de carbonatação nos poros do concreto.

Fonte: Fusco [64]

Elsalamawy, Mohamed e Kamal [63] analisaram esse efeito utilizando dados experimentais de 3 tipos de matrizes cimentícias diferentes: um concreto com cimento Portland convencional (95% taxa de clínquer), um concreto com alta taxa de escória de alto forno (cimento com 60% de escória em substituição ao clínquer), um concreto com alta taxa de escória e com 10% de adição de sílica ativa. Os resultados da Figura 3.6 mostram o comportamento da profundidade de carbonatação em relação à umidade relativa do ambiente.

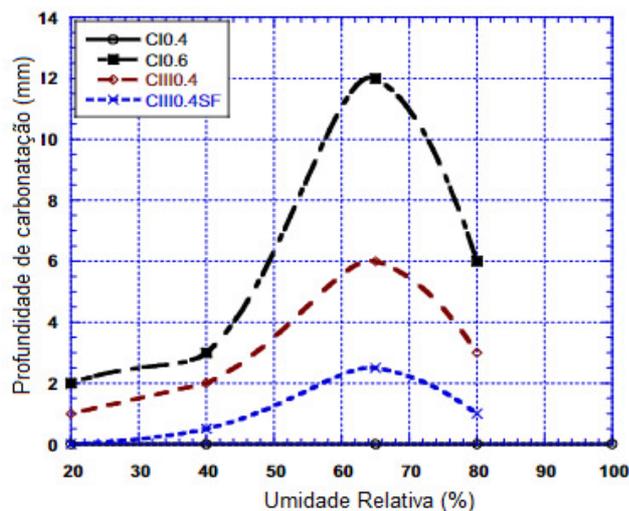


Figura 3.6 - Efeito de matrizes cimentícias diferentes em relação à umidade relativa do ambiente.

Fonte: Adaptado de Elsalamawy, Mohamed e Kamal [63]

Percebe-se que os concretos analisados apresentam o pico de carbonatação na umidade ambiental de 65%, independentemente do cimento utilizado. Segundo

os autores, as diferenças observadas na profundidade de carbonatação têm relação com as propriedades físicas dos concretos, uma vez que os concretos com escória apresentaram menores resultados de absorção de água que o concreto com cimento Portland convencional.

### 3.2.1.3. *Características físicas do concreto*

A porosidade do concreto, assim como o tipo de cimento, é muito importante para a velocidade de propagação da frente de carbonatação. Segundo Leemann e Moro [59] a relação  $a/c$  do concreto está intrinsecamente ligada à porosidade do substrato, Wang *et al.* [65] corroboram essa afirmação comparando a porosidade de concretos com relações  $a/c$  de 0,3 e 0,5, cujos resultados apresentaram respectivamente porosidade de 10,58% e 22,07%. Os autores complementam, citando que, além da porosidade total inferior, o volume de poros prejudiciais maiores que 200nm são significativamente menores no concreto com relação  $a/c$  de 0,3. Devido a maior porosidade total e a distribuição com elevado volume de poros maiores (Figura 3.7) a difusão de  $CO_2$  no interior da amostra ocorre de forma facilitada e, portanto, aumenta a velocidade de avanço da carbonatação. Wang *et al.* [65] concluem por afirmar que as condições de cura do concreto assim como a existência ou não de fissuras no mesmo também são fatores que facilitam ou não a difusão do  $CO_2$  e regulam a velocidade de carbonatação do substrato.

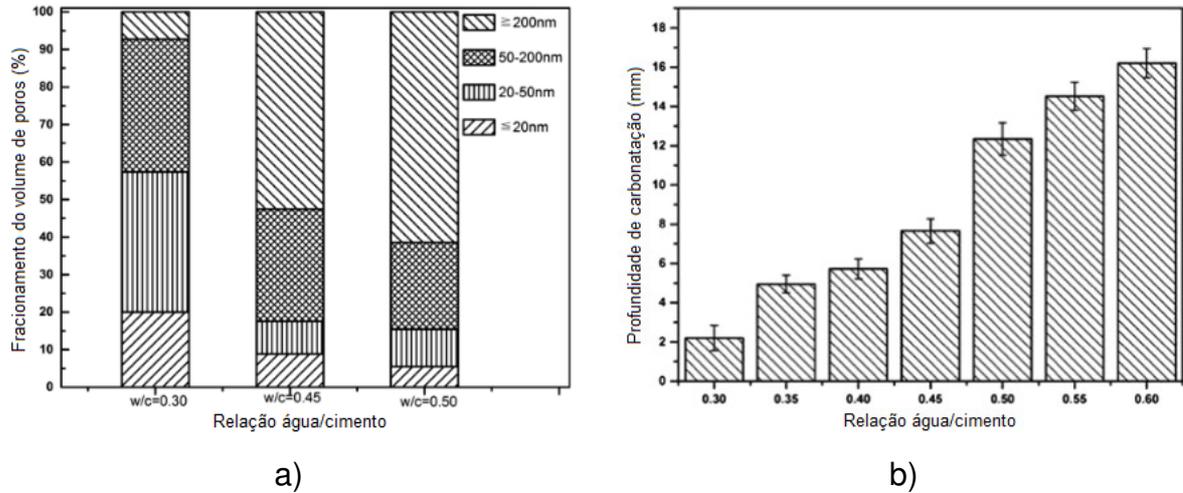


Figura 3.7 - a) Fracionamento do volume dos poros em função da relação a/c do concreto (b) Efeito da relação a/c na carbonatação dos concretos.

Fonte: Adaptado de Wang *et al.* [65]

#### 3.2.1.4. Tipo de cimento

Sobre a influência do tipo de cimento utilizado no concreto, Eklou [61] define como um dos principais fatores que influenciam o processo de carbonatação. Neville [8] aborda a utilização crescente de cimentos com materiais pozolânicos. Segundo o autor, a CV e a escória de alto forno, quando presentes no cimento, reagem principalmente com o  $\text{Ca(OH)}_2$  resultante do processo de hidratação. Desta forma, os concretos de cimento com pozolana apresentam menores quantidades de  $\text{Ca(OH)}_2$  na matriz do material. Em função disso, quanto maior a quantidade de pozolana no traço menor é o teor de  $\text{Ca(OH)}_2$ , ocasionando no aumento da velocidade de carbonatação no concreto pela redução significativa da reserva alcalina [60]. Elsalamawy, Mohamed e Kamal [63] corroboram com esse pensamento e afirmam que o tipo de cimento utilizado no concreto influencia direta e decisivamente no processo de carbonatação, salientando que cimentos com adições de pozolanas ou escórias apresentam normalmente maiores profundidades de carbonatação em comparação a cimentos Portland convencionais com alto teor de clínquer.

### 3.2.1.5. Modelos de previsão do avanço da carbonatação

A carbonatação é um dos fenômenos mais importantes para se prever a vida útil de uma estrutura de concreto, principalmente quando inserida em ambiente urbano. Desta forma, estabelecer modelos que possam prever o comportamento do fenômeno é de grande importância. Recentemente diversos autores vem apresentando novas metodologias para modelar o avanço da profundidade de carbonatação. Zhang *et al.* [66] utilizaram um modelo de *Machine Learning* e algoritmos metaheurísticos para prever o avanço da frente de carbonatação em concretos com substituição de cimento por CV. Os autores salientam que o modelo leva em consideração dados estatísticos de fatores importantes para a carbonatação, tais como: percentual de incorporação de CV, quantidade de cimento, relação água/cimento, concentração de CO<sub>2</sub> ambiental, umidade relativa e tempo de exposição. Liu *et al.* [67] também propuseram o uso de *Machine Learning* com um modelo de redes neurais artificiais para prever matematicamente o avanço da carbonatação em concretos com AR. Foram coletadas 625 dados da literatura, sendo analisada a influência dos seguintes fatores: quantidade de cimento do traço, quantidade de água do traço, volume de substituição de AR, absorção de água do AR, temperatura de exposição, umidade relativa ambiental, concentração de CO<sub>2</sub> ambiental, tempo de cura e tempo de exposição na frente de carbonatação. Segundo os autores, o modelo se mostrou aderente aos dados experimentais analisados, superando modelos estatísticos.

No entanto, apesar dos avanços na área de análise de dados e do uso da inteligência artificial, um dos modelos mais utilizados para prever o comportamento da carbonatação através da equação 3 proposta por Tuutti [68], que define a profundidade de carbonatação através do produto entre o coeficiente de carbonatação daquele concreto e a raiz quadrada do tempo de exposição. Diversos autores [69–73], utilizaram o modelo e reportaram boa aderência com os valores experimentais observados em seus trabalhos.

$$X_c = k_c \times \sqrt{t} \quad (3)$$

Onde,

$X_c$  = Profundidade de penetração da carbonatação (mm)

$k_c$  = Coeficiente de carbonatação (mm/mês<sup>0,5</sup>)

$t$  = tempo de exposição (meses)

Todavia, deve-se considerar que tal modelo é adequado para se determinar o valor de  $k$  em um determinado momento do tempo  $t$ , não se mostrando adequado para a previsão de vida útil das estruturas. Visando contribuir nessa área, Possan [35] desenvolveu um modelo que estima a profundidade de carbonatação considerando que existem 8 variáveis que influenciam diretamente no fenômeno da carbonatação. A autora propôs a equação 4 para o cálculo da profundidade de carbonatação em função dos diversos fatores intervenientes na penetração de  $CO_2$ .

$$y = k_c \left(\frac{20}{f_c}\right)^{k_{fc}} \times \left(\frac{t}{20}\right)^{\frac{1}{2}} \times \exp \left[ \left( \frac{k_{ad} \cdot ad^{\frac{3}{2}}}{40 + f_c} \right) + \left( \frac{k_{CO_2} \cdot CO_2^{\frac{1}{2}}}{60 + f_c} \right) - \left( \frac{k_{UR} \cdot (UR - 0,58)^2}{100 + f_c} \right) \right] \cdot k_{ce} \quad (4)$$

Onde,

$y$  = Profundidade de carbonatação média do concreto (mm)

$k_c$  = fator variável referente ao tipo de cimento empregado (tabelado)

$f_c$  = Resistência característica à compressão (MPa)

$k_{fc}$  = Fator variável referente à resistência à compressão do concreto em função do tipo de cimento utilizado (tabelado)

$t$  = Idade do concreto (anos)

$ad$  = Teor de adição pozolânica no concreto (% relativa à massa de cimento)

$k_{ad}$  = Fator variável referente às adições pozolânicas do concreto em função do tipo de cimento utilizado (tabelado).

$UR$  = Umidade relativa média (%)

$k_{UR}$  = Fator variável referente à umidade relativa em função do tipo de cimento utilizado (tabelado)

$CO_2$  = Teor de  $CO_2$  da atmosfera (%)

$k_{CO_2}$  = Fator variável referente ao teor de CO<sub>2</sub> do ambiente, em função do tipo de cimento utilizado (tabelado)

$k_{ce}$  = Fator variável referente à exposição a chuva, em função das condições de exposição da estrutura (tabelado)

Papadakis, Vayenas e Fardis [74] propôs um modelo de previsão de carbonatação levando em consideração diversos fatores importantes para a ocorrência do fenômeno ao longo do tempo, esse modelo é representado pela equação 5.

$$e_c = \sqrt{\frac{2D_{CO_2}[CO_2]^0}{[Ca(OH)_2]^0 + 3[CSH]^0 + 3[C_3S]^0 + 2[C_2S]^0}} t \quad (5)$$

Onde,

$e_c$  = Profundidade de carbonatação média do concreto (m)

$D_{CO_2}$  = Coeficiente de difusão efetivo do CO<sub>2</sub> no material carbonatado (m<sup>2</sup>/s)

$CO_2$  = Concentração molar do CO<sub>2</sub> (mol/m<sup>3</sup>)

$t$  = Tempo (s)

$Ca(OH)_2$  e  $CSH$  = Concentração molar dos hidratos (mol/m<sup>3</sup>)

$C_3S$  e  $C_2S$  = Concentração molar dos anidros (mol/m<sup>3</sup>)

Possan [35] salienta, no entanto, que alguns modelos complexos, como o apresentado por Papadakis, Vayenas e Fardis [74] dependem de variáveis de difícil obtenção fora de laboratório, como a concentração molar dos hidratos e dos anidros. Sendo assim, atualmente o modelo de Possan [35] se mostra como o mais promissor para prever a vida útil das estruturas inseridas em ambientes urbanos, cuja aderência com resultados obtidos se mostrou satisfatória.

### 3.2.2. Penetração de Cloretos

Assim como a carbonatação, a penetração de íons cloro também tem o potencial de ocasionar a despassivação das armaduras. A presença de cloretos combinados ao  $C_3A$  (formando cloroaluminatos de cálcio hidratado) não prejudica a proteção das armaduras pois o cloreto não está disponível para promover despassivação [8]. O processo ocorre quando os cloretos são encontrados livres na solução dos poros do concreto.

A penetração pode ocorrer em situações em que o cloreto está dissolvido em água e esta solução penetra no concreto por meio da absorção capilar. Neste caso, quanto maior o diâmetro dos poros capilares, menor será a profundidade do concreto impactada pela água absorvida. Outra maneira de penetração de cloretos é quando ocorre a existência de um gradiente de pressão como é o caso de estruturas de tratamento de água e esgoto, tanques e reservatórios. Neste caso, quanto menor for a permeabilidade do concreto, melhor [75]. Entretanto, o objeto de análise da maior parte dos trabalhos que tratam sobre íons cloro diz respeito à difusão. Tal processo ocorre por meio da diferença de concentração entre dois meios aquosos, onde os íons movimentam-se do meio de maior concentração em direção ao de menor na tentativa de buscar o equilíbrio [34].

#### 3.2.2.1. *Tipo e composição do cimento*

O tipo de cimento utilizado em concretos expostos à ação de cloretos tem relação direta com o início do processo de corrosão nas armaduras. Segundo Sakr [76], a quantidade de  $C_3A$  no concreto é um fator importante no comportamento do concreto em condição de exposição. Em um experimento proposto pelo autor foi observada a diferença de tempo até o início da corrosão entre tipos de cimento com 2% e 10% de  $C_3A$ . O autor observou que o maior teor de  $C_3A$  provocou um aumento de 3,45 vezes no tempo para o início do processo de corrosão, assim como verificou que os concretos com teores menores de  $C_3A$  são mais suscetíveis ao avanço da concentração de íons cloreto por possuírem maior quantidade de íons não combinados na matriz do material. Rasheeduzzafar [77] explica que esse comportamento decorre da atuação do  $C_3A$  como um estabilizador dos íons cloreto nos poros do concreto. O autor afirma que quanto maior a quantidade de  $C_3A$  no

cimento menor a quantidade de íons livres (Figura 3.8). Isso se explica pois o  $C_3A$  reage com os íons cloreto e formam o cloroaluminato de cálcio hidratado, conhecido como Sal de Friedel. Esse sal complexo é insolúvel, diminuindo, portanto, a quantidade de cloretos livres e consequentemente a velocidade de início do processo de corrosão. O  $C_4AF$  também atua de maneira semelhante, estabilizando os íons cloretos em cloroferratos de cálcio hidratado. Portanto, percebe-se que concretos com maiores concentrações de  $C_3A$  e  $C_4AF$  minimizam os efeitos nocivos da penetração dos íons cloreto no substrato do concreto e a combinação desses íons em sais insolúveis e estáveis atrasa o início do processo de corrosão prolongando a vida útil do concreto e da armadura [8,78,79];

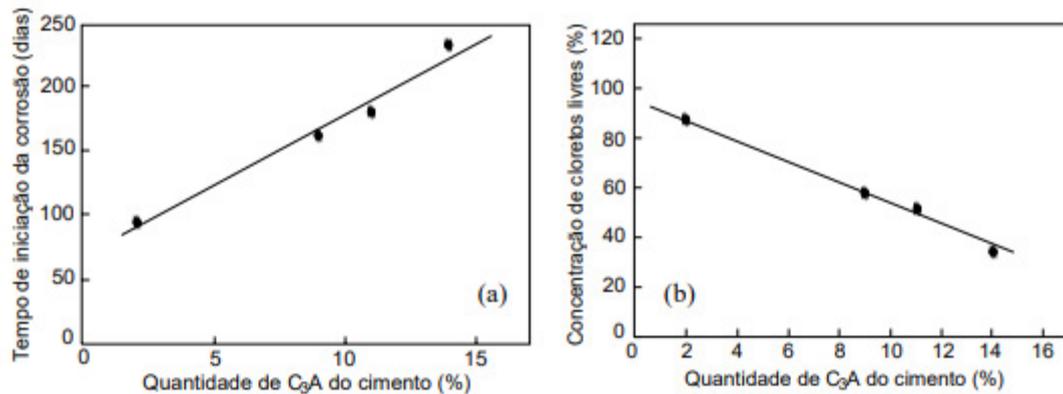


Figura 3.8 - Efeito do  $C_3A$  no tempo de início da corrosão em armaduras e na concentração de cloretos livres no concreto

Fonte: Rasheeduzzafar [77]

Os principais fatores que influenciam na penetração dos íons cloretos no concreto serão apresentados nos itens subsequentes.

### 3.2.2.2. Características físicas do concreto

Assim como em relação à frente de carbonatação, as características físicas do concreto submetido à ação de cloretos interferem diretamente na capacidade de difusão dos sais ao longo da matriz. De acordo com Al-Ameeri, Rafiq e Tsioulou [80] e Zhang, Yang e Ye [81], a utilização de relações a/c altas acarreta uma maior

porosidade, menor massa específica e maior permeabilidade do concreto, permitindo que os íons cloreto avancem com maior facilidade até a armadura. Isso ocorre pois aumenta o coeficiente de difusão dos íons no material. Entretanto, o concreto está em constante mudança de suas características físicas devido ao incessante processo de fechamento de vazios ocasionados pela hidratação do cimento e de materiais cimentícios suplementares utilizados na produção de concretos. Ou seja, o coeficiente de difusão dos cloretos tende a diminuir com o avanço da idade [82].

Sobre o processo de cura do concreto fresco e a ocorrência de fissuras Ye *et al.* [83] afirmam que existe uma grande interferência no avanço dos íons cloreto ao longo do cobrimento. Concretos com curtos períodos de cura apresentam maior permeabilidade e maior difusibilidade através da ocorrência de fissuras do que concretos com maior tempo de cura, corroborando com o aumento da penetração de íons cloreto em função disso [8].

### 3.2.2.3. Carbonatação

O processo de carbonatação no concreto tem um papel importante no que diz respeito ao avanço de íons cloreto em sua matriz. Conforme salientado previamente, a capacidade do concreto de fixar os íons cloreto é uma característica muito importante para reduzir a quantidade de cloretos livres na matriz. Desta forma, é fundamental que os sais de Friedel produzidos na hidratação do cimento se mantenham estáveis. No entanto, ao longo do tempo, esses compostos são expostos a mudanças na microestrutura e na alcalinidade do concreto. Segundo Suryavanshi e Swamy [84], a estabilidade do sal de Friedel é diretamente dependente do pH do substrato, ou seja, com o avanço da frente de carbonatação e a neutralização do concreto a solubilidade desses sais aumentam proporcionalmente, ocasionando a liberação de íons cloreto que estavam estabilizados em ligações químicas nos poros do concreto, acelerando o início do processo de corrosão. Esse comportamento pode ser observado na Figura 3.9, na qual percebe-se o efeito da carbonatação ao longo do tempo tornando os cloretos ligados em cloretos livres nos poros do concreto. [20,78,85–87].

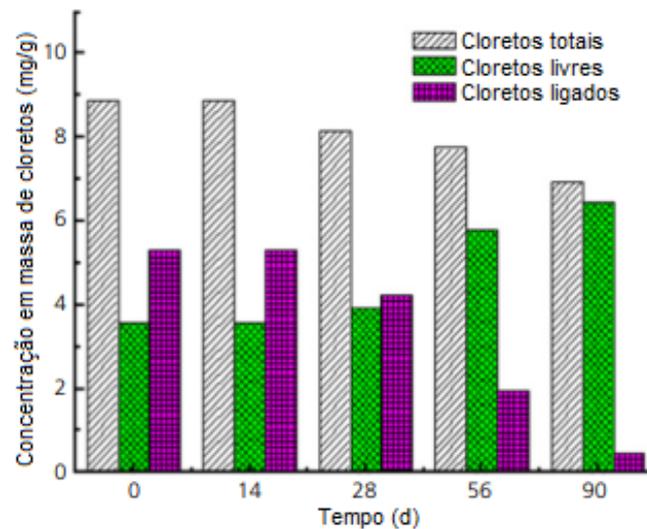


Figura 3.9 - Efeito da carbonatação na estabilidade dos íons cloreto no concreto.

Fonte: Geng *et al.* [20]

#### 3.2.2.4. Condições ambientais

As características físicas e químicas dos concretos tem fundamental influência no nível de dificuldade de penetração de cloretos na matriz e na intensidade das manifestações patológicas que podem surgir por meio desse fenômeno. Entretanto, as condições de exposição também têm grande influência no processo. Como na maioria dos processos de natureza química, a temperatura age de modo a aumentar a cinética da reação com a elevação da temperatura ambiente [8]. Contudo, pode-se considerar que o aumento de temperatura também funciona de maneira a acelerar as reações de hidratação do cimento, diminuindo a porosidade e dificultando a difusão de íons cloreto na matriz. Pesquisa realizada por Hussain e Rasheeduzzafar [77] apontou para a diminuição da penetração quando aumentada de 20Cº para 70Cº a temperatura de suas amostras. A exposição ao sol, ao vento e as características térmicas do material são alguns condicionantes para a variação de temperatura do concreto, variável de difícil controle e medição. A temperatura, além de acelerar ou frear a cinéticas das reações químicas, também pode causar efeitos físicos devido à retração ou dilatação ocasionadas pela sua variação [88].

Assim como na carbonatação, a umidade relativa também tem relação direta com a intensidade da penetração de íons cloreto. A maior presença de água nos poros interfere no eletrólito, alterando a difusão de gases e a penetração de cloretos.

A Figura 3.10 mostra a relação entre o fator de corrosão e a umidade ambiente, demonstrando que a umidade que proporciona a maior propensão a corrosão é de aproximadamente 90% e que em situações em que ocorre a saturação dos poros há uma limitação da difusão de  $O_2$  dificultando o prosseguimento das reações de corrosão.

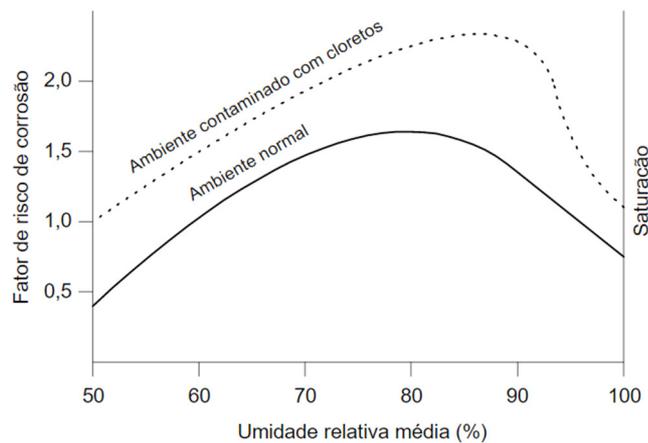


Figura 3.10 – Relação entre risco de corrosão e umidade relativa.

Fonte: CEB [39]

Outro fator ambiental que também modifica significativamente o processo é justamente o teor de cloretos presente no ambiente. Quanto maior for a sua concentração superficial maior será o efeito no concreto, por esse motivo a NBR 6118 classifica regiões de respingo de maré como as mais agressivas aos materiais à base de cimento.

#### 3.2.2.5. Principais modelos para previsão de vida útil devido à ação dos cloretos

Em função da importância de se prever a penetração de cloretos em concretos quando submetidos à ambientes salinos, este tópico vêm sendo objeto de estudo por vários pesquisadores ao longo dos últimos 50 anos. Várias formulações foram apresentadas durante esse período, que consideram na sua maioria tanto as características do concreto quanto ambientais como variáveis de entrada para se obter uma estimativa relacionada com o tempo (t) associado com a despassivação

das armaduras. A maioria desses modelos considera o fenômeno da difusão de substâncias em materiais porosos, cujo primeiro modelo foi baseado da solução da 2ª Lei de Fick, conforme a Equação 6 [89]:

$$C(x, t) = C_s \left[ 1 - \operatorname{erf} \left( \frac{x}{2\sqrt{Dt}} \right) \right] \quad (6)$$

Onde,

$C_x$  = concentração à uma profundidade  $x$  em um tempo  $t$  (% ao peso de cimento)

$C_s$  = concentração superficial (% da massa de cimento)

$x$  = profundidade (cm)

$\operatorname{erf}$  = função de erro de Gauss

$D$  = coeficiente de difusão (cm<sup>2</sup>/ano)

$t$  = tempo (anos)

Todavia, a solução da função de erro de Fick se mostra adequada para realização de ajustes de perfis de cloretos obtidos através de resultados de análises experimentais (sejam em laboratório ou em campo), não considerando a variação de  $C_s$  e de  $D$  ao longo do tempo. Para tanto, algumas alterações foram realizadas na expressão original ao longo do tempo, visando incorporar tal premissa. Para considerar a diminuição do  $D$  ao longo do tempo, em função da contínua densificação microestrutural oriunda dos processos de hidratação, Mangat e Molloy [90] propuseram o uso da equação 7.

$$D(t) = D_{ref} \times \left( \frac{t_{ref}}{t} \right)^m \quad (7)$$

Onde:

$D(t)$  = Coeficiente de difusão no tempo  $t$  (cm<sup>2</sup>/ano);

$D_{ref}$  = Coeficiente de difusão na data referência (cm<sup>2</sup>/ano);

$t_{ref}$  = Tempo associado ao  $D_{ref}$  (anos);

$t$  = Tempo (anos);

$m$  = Coeficiente empírico em função do tempo.

Em relação ao comportamento da  $C_s$ , Costa e Appleton [91] propuseram o uso da equação 8, assumindo uma tendência de aumento rápido da concentração nas primeiras idades e de estabilização de tal parâmetro ao longo da vida útil da estrutura. Essa metodologia foi utilizada pelos autores na análise de 3 traços diferentes de concretos expostos por 3 a 5 anos em ambiente marinho cujos resultados mostraram-se satisfatórios, com coeficientes de determinação superiores a 92%.

$$C_s(t) = C_{S_{ref}} \times t^n \quad (8)$$

Onde:

$C_s(t)$  = Concentração superficial no tempo  $t$  (% massa de cimento)

$C_{S_{ref}}$  = Concentração superficial na data referência (% massa de cimento)

$t$  = Tempo (anos)

$n$  = Coeficiente empírico em função do tempo

De forma similar, Petcherdchoo e Chindaprasirt [92] propuseram o uso da equação 9 para simular o comportamento de estabilização da concentração superficial ao longo dos anos de exposição dos concretos aos cloretos.

$$C_s(t) = C_{S_{ref}} + k\sqrt{t} \quad (9)$$

Onde:

$C_s(t)$  = Concentração superficial no tempo  $t$  (% peso de cimento)

$C_{S_{ref}}$  = Concentração superficial na data referência (% peso de cimento)

$t$  = Tempo (anos)

$k$  = Coeficiente empírico em função do tempo

Mais recentemente outros autores utilizaram variações da 2ª lei de Fick para simular o comportamento de concretos expostos em ambientes marinhos. Wu, Li e Yu [93] fizeram uso dessa metodologia para determinar o tempo necessário para iniciar o processo de corrosão nas armaduras de concretos expostos em ambiente atmosférico, respingos de maré e em área de maré. Os autores ignoraram o efeito

do tempo na concentração superficial. Attari, McNally e Richardson [94] também empregaram o método ignorando o efeito do tempo na concentração superficial. Os autores analisaram concretos com substituição de cimento por escória granulada de alto forno em teores de 30%, 50% e 70% e os efeitos observados no que diz respeito ao tempo para início do processo de corrosão. Balestra *et al.* [95] e Hino Junior, Balestra e Medeiros Junior [96] propuseram a utilização da 2ª lei de Fick em conjunto com a equação de Holliday para representar o comportamento de concretos expostos a ambientes marinhos, descrevendo tanto a zona de convecção quanto a zona de difusão no que diz respeito à penetração dos íons cloreto nos concretos.

Em um artigo recente, Lopes, Oliveira e Cascudo [25] fizeram uma revisão sistemática da literatura sobre os modelos de previsão de vida útil referentes à despassivação por cloretos. Após a análise de 60 artigos que versaram sobre o assunto, os autores ratificaram que os modelos mais utilizados foram o da Segunda lei de Fick, através da solução proposta por Crank [89]. Na sequência o modelo mais empregado foi o proposto por Maage, Helland e Carlsen [97], cujo mesmo contempla a variação do coeficiente de difusão ao longo do tempo de exposição dos concretos. Essa metodologia de predição do coeficiente de difusão foi empregada por muitos autores, como Song *et al.* [98], Attari, McNally e Richardson [94] Pack *et al.* [99], Ann, Ahn e Ryou [52], Moradllo, Sadati e Shekarchi [100], Zhang *et al.* [101], tendo o método uma boa aderência aos dados reais observados.

### **3.3. Concretos com a utilização de agregado reciclado (AR)**

De acordo com a resolução Nº 307 do Conselho Nacional do Meio Ambiente [9,39], são considerados resíduos de construção e demolição (RCD) todos os provenientes de todas as etapas construtivas e de reformas e manutenções. Os RCD podem conter solos, concreto, argamassa, gesso, tintas, acabamentos, entre outros. Porém, somente o resíduo classificado na classe A (Quadro 3.5) pode ser utilizado como AR. Essa classificação está apresentada também na NBR 15116 [10] que trata entre outros tópicos, do uso de agregados reciclados (AR) para emprego em concretos estruturais.

<b>Classes de Resíduos</b>	<b>Descrições</b>
A	Reutilizáveis ou recicláveis como agregados oriundo de construções, demolições, reformas ou reparos tais como resíduos de concreto, cerâmicas, argamassa, pavimentação e terraplanagem
B	Resíduos recicláveis ou reutilizáveis para outras destinações como plásticos, papéis, metais, vidros, madeiras e gesso
C	Resíduos para os quais não foram desenvolvidas tecnologias que tornem viável sua reutilização ou reciclagem
D	Resíduos perigosos tais como tintas, solventes, óleos e materiais oriundos de demolições de área radiológicas, instalações industriais ou materiais com a presença de amianto ou qualquer outro produto nocivo à saúde

Fonte: (CONAMA, 2002)

Além das classes, a norma 15116 [10] também classifica os agregados de acordo com sua natureza entre agregado cimentício (composto por mais de um material cimentício como, por exemplo, concreto e argamassa), de concreto, misto (materiais cimentícios em conjunto com materiais cerâmicos) e composto (mistura de AN com reciclado). Além disso, recomenda-se sempre a pré-molhagem do AR ou a compensação da água que possivelmente será absorvida de modo a não prejudicar a trabalhabilidade do material.

A utilização de AR como uma alternativa viável na substituição dos agregados naturais em concretos e argamassas vem sendo estudada pela comunidade acadêmica [12–14,102,103]. Em função das características intrínsecas dos AR, o emprego deles em substituição aos agregados naturais ocasiona o decréscimo das propriedades físico-mecânicas e das propriedades relacionadas com a durabilidade. Segundo Li *et al.* [104] e Tam, Soomro e Evangelista [105] a quantificação dos efeitos prejudiciais da substituição do agregado, bem como o entendimento dos mecanismos que desencadeiam esse comportamento, são imprescindíveis para avaliar a potencialidade de uso dos AR em compósitos de matrizes cimentícias.

No entanto, outros pesquisadores Saravanukar, Abhiram e Manoj [106], Shi *et al.* [17], Wang *et al.* [55] estudaram a utilização do AR sob uma outra ótica, empregando diferentes tipos de beneficiamento do agregado para verificar a viabilidade ambiental e econômica, associadas com o incremento nas propriedades

mecânicas e de durabilidade. Segundo a literatura tratamentos envolvendo a carbonatação do agregado, por exemplo, permitem um incremento significativo na zona de transição do agregado com a pasta antiga, assim como do agregado com a pasta nova. Outros tratamentos utilizando emulsão de polímeros, biodeposição de carbonato de cálcio também são apontados como potenciais viabilizadores do concreto com AR para usos estruturais [12,17,107].

Outras formas de utilização do AR também vêm sendo discutidas, Cantero *et al.* [103], Wu *et al.*[108], Moreno-Juez *et al.* [109] e Silva e Delvasto [110], observaram a utilização da fração fina do AR como material cimentício suplementar, servindo como um substituto ao cimento Portland convencional. Os autores concluíram que a substituição do cimento Portland pela fração fina de AR reduziu a resistência mecânica dos concretos a medida que houve o incremento da substituição. No entanto, em idades avançadas, a diferença entre as propriedades mecânicas entre o concreto de referência e aqueles com substituição da fração fina foram reduzidas, segundo os autores isso ocorreu em função da reação pozolânica da fração do AR.

No tocante à durabilidade, os autores demonstraram que os concretos com substituição de cimento pela fração fina do AR apresentaram desempenho inferior em relação à frente de carbonatação. Silva e Delvasto [110] concluíram que a redução da oferta de  $\text{Ca(OH)}_2$  reduziu a reserva alcalina do concreto, sendo esse fator apontado como o responsável pelo rápido avanço do  $\text{CO}_2$ . Rigo [111] também avaliou a carbonatação de concretos com uso de AR misto de resíduo de construção e demolição e concluiu que o incremento nos teores de substituição de material natural pelo reciclado (tanto para agregados graúdos quanto para miúdos) aumenta a velocidade de carbonatação e aumenta a quantidade de  $\text{CO}_2$  capturado ao longo tempo. O autor explica que isso ocorre devido à alta porosidade e heterogeneidade do agregado além da presença de grãos de cimento não hidratados no material reciclado.

### 3.3.1. Propriedades físico mecânicas de concretos com AR

Os concretos com utilização de AR têm as propriedades mecânicas fortemente influenciadas pela natureza física dos agregados reciclados, pois sua

composição intrinsecamente mais porosa que o AN lhes confere características indesejadas ao que se refere à absorção de água e massa específica [12,112] Essas características prejudiciais ocorrem em função de dois fatores: o volume significativo de material cerâmico presente no AR, que é de aproximadamente 28% [113] e a existência de pasta antiga aderida ao agregado, acrescentando mais porosidade à matriz do material [20,114], conforme apresentado esquematicamente na Figura 3.11.

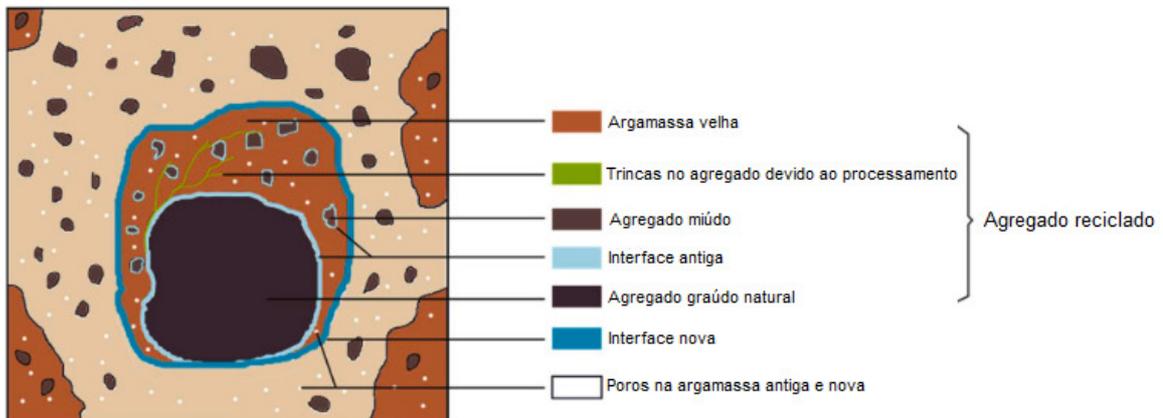


Figura 3.11 - Análise morfológica do AR graúdo.

Fonte: Adaptado de Geng *et al.* [20]

Alexandridou, Angelopoulos e Coutelieris [13] analisaram as propriedades mecânicas de concretos provenientes de três usinas de processamento de resíduos na Grécia. Para proceder com as análises referentes às propriedades mecânicas foram moldados oito traços de concreto: o concreto de referência, utilizando AN e outros três traços para cada taxa de substituição de AR (25%, 50% e 75%). Após a moldagem, os corpos de prova foram curados e realizaram-se ensaios de resistência à compressão, absorção por imersão e por capilaridade e carbonatação. Os autores concluíram que a substituição do AR por AN ocasionou no decréscimo linear das propriedades do concreto, cuja absorção por capilaridade e porosidade aumentaram, e por consequência, a resistência à compressão diminuiu de maneira inversamente proporcional.

Analisando os trabalhos de Cantero *et al.* [103] e Çakir e Dibas [28], observou-se que o módulo de elasticidade do concreto é outra propriedade afetada pela substituição de AR nos concretos. De acordo com Adessina *et al.* [115], os resultados inferiores do módulo de elasticidade dos concretos com AR se devem

principalmente às propriedades da pasta antiga incorporada ao agregado, assim como ao alto número de zonas de transição. Wang *et al.* [116], analisaram a influência da substituição do AR graúdo e miúdo no módulo de elasticidade do concreto. Para isso os autores moldaram quinze traços: o traço de referência empregando agregado graúdo e miúdo natural e os traços com substituição de 50% e 100% para o AR graúdo e miúdo. Também se observou a influência da absorção d'água no agregado miúdo, utilizando para fins de comparação um agregado de origem diferente. Conforme observa-se na Figura 3.12, os resultados apontaram para uma diminuição do módulo de elasticidade à medida que as taxas de substituição eram incrementadas. O concreto com 100% de substituição de AR graúdo obteve resultado 23,6% menor que o referência; já para o concreto com 100% de AR miúdo apresentou um resultado 16% inferior.

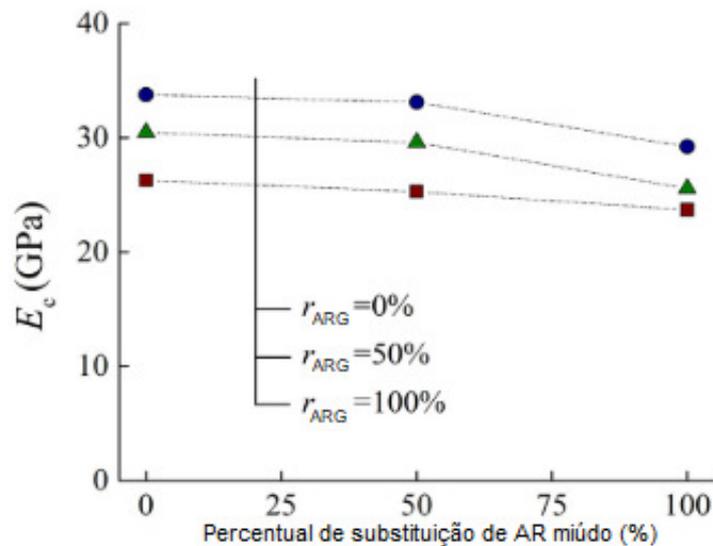


Figura 3.12 - Efeito da influência dos agregados reciclados graúdo e miúdo no módulo de elasticidade.

Fonte: Adaptado de Wang *et al.* [116]

A NBR 6118 [33] recomenda o uso da equação 10 para estimar o módulo de elasticidade de um concreto com  $f_{ck}$  variando de 20 MPa a 50 MPa aos 28 dias. Essa formulação é sugerida para quando não houver dados experimentais acerca do módulo do concreto usado para o projeto. Um dos parâmetros que influencia o cálculo estimativo do módulo é o  $\alpha_E$ , cujo mesmo é um dependente da natureza do

agregado graúdo utilizado no traço. Observa-se no Quadro 3.6 os valores de  $\alpha_E$  para os agregados comumente usados.

$$E_{ci} = \alpha_E \times 5600 \sqrt{f_{ck}} \quad (10)$$

Onde:

$E_{ci}$  = Módulo de elasticidade aos 28 dias (MPa)

$\alpha_E$  = Parâmetro da natureza do agregado

$f_{ck}$  = Resistência à compressão aos 28 dias (MPa)

Quadro 3.6 – Valores do parâmetro natural dos agregados usados na equação 10.

$\alpha_E$	Agregado
1,2	Basalto e Diabásio
1,0	Granito e Gnaisse
0,9	Calcário
0,7	Arenito

### 3.3.2. Efeito dos cloretos em concretos com AR

Os conceitos de durabilidade na indústria da construção vêm sendo amplamente estudados ao longo dos anos, cuja compreensão da ação de agentes nocivos ao concreto é fundamental para obter previsibilidade e segurança na tomada de decisão quanto a que tipo de material usar em uma estrutura. Para os concretos com AR esse entendimento se torna ainda mais importante, pois sua natureza mais porosa lhe confere maior vulnerabilidade às ações prejudiciais naturais ou químicas [102,114].

O desempenho dos concretos com AR com relação a resistência à penetração dos íons cloretos é afetado pelas características da matriz e do próprio AR, conforme apresentado anteriormente. Essas características intrínsecas do AR conferem ao concreto um desempenho inferior na penetração de íons cloreto e na

difusibilidade deles no interior do substrato [114,117,118]. Liang *et al.* [16] fizeram uma revisão detalhada dos mecanismos de penetração de cloretos no concreto com AR e concluiu que o teor de substituição, a qualidade do AR, a quantidade de pasta antiga aderida, a preparação e o método de cura adotado são fatores que impactam significativamente no ingresso de cloretos no concreto com AR. Os autores ressaltam ainda sobre a possibilidade de cura prévia dos AR utilizando CO<sub>2</sub> (cura carbônica) que, segundo os autores, auxilia no preenchimento das fissuras da interface e refinamento dos poros do AR. Percebe-se esse comportamento agregado através da formação do CaCO<sub>3</sub> através do processo de cura carbônica, conforme apresentado na Figura 3.13.

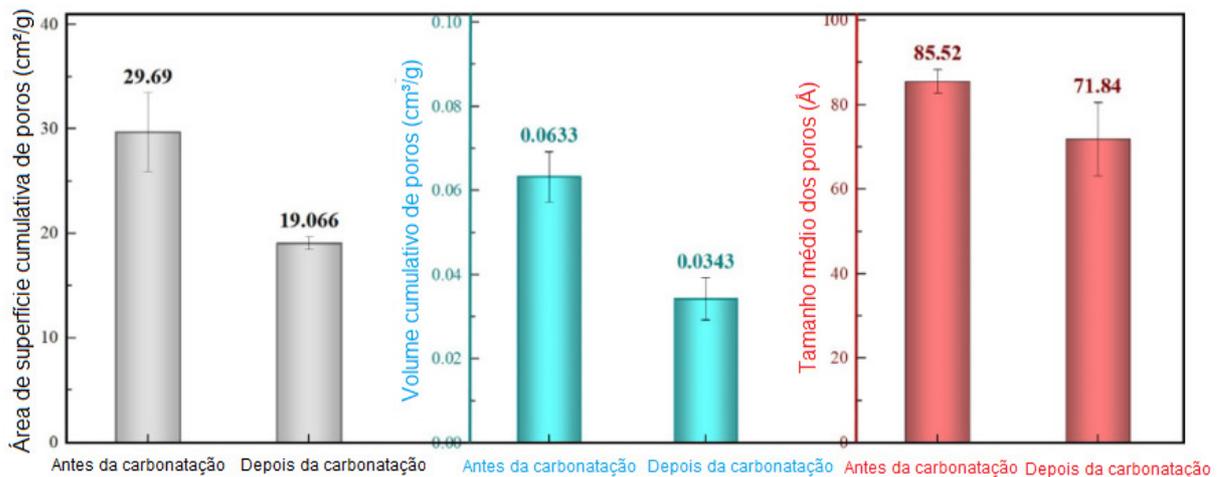


Figura 3.13 - Efeito do tratamento com CO<sub>2</sub> dos agregados reciclados.

Fonte: Adaptado de Liang *et al.* [119]

### 3.4. Concretos com a utilização de CV

Concretos com uso de adições minerais são utilizados há muito tempo pela humanidade. Segundo Mehta e Monteiro [7], os gregos já utilizavam as cinzas vulcânicas como material aglutinante em 1500 a.C. Com o passar do tempo, outros materiais foram sendo incorporados ao cimento, e atualmente utiliza-se em grande maioria resíduos industriais como a CV e a escória de alto forno. O uso dessas adições minerais, além de reduzir o consumo de cimento no concreto e conseqüentemente a emissão de CO<sub>2</sub>, produzem concretos com melhores propriedades microestruturais [120].

A CV consiste em um subproduto industrial da queima do carvão em usinas termoelétricas. Durante o processo de queima do carbono no carvão a maior parte das impurezas minerais são fundidas e em seguida transportadas para zonas de menor temperatura, solidificando-se em partículas vítreas esféricas. Essas esferas apresentam partículas tão finas que somente são captados por filtros de ar. Tal material se constitui em um resíduo com ampla aplicação na produção de cimento. No entanto, assim como são inúmeras as fontes de carvão no mundo, suas características também são, fazendo com que esse subproduto mineral possua características diversas em lugares diferentes do mundo [7,121]. Sobre as diferenças existentes entre as adições minerais, Dal Molin [120] as classifica nas três seguintes categorias:

- Material Pozolânico: Material rico em silício que em seu estado natural não possui propriedades aglutinantes, porém quando fracionado em partículas pequenas e na presença de água reage com o  $\text{Ca(OH)}_2$  formando produtos com propriedades cimentantes. A CV com baixo teor de cálcio ( $\text{CaO} < 10\%$ ) a cinza de casca de arroz e o metacaulim são alguns exemplos desses materiais.

- Material Cimentante: Material que forma produtos cimentantes sem a necessidade da presença do hidróxido de cálcio. A escória de alto forno e a CV com alto teor de cálcio ( $\text{CaO} > 10\%$ ) são exemplos desses materiais.

- Fíler: Material finamente fracionado que não apresenta atividade química, sua função é primordialmente física, promove o empacotamento do concreto. Pó de pedra e material calcário são exemplos de fíler.

O uso da CV no concreto acarreta uma série de alterações microestruturais na matriz do material. Os efeitos benéficos ao concreto dependem de muitos fatores, incluindo a composição química diversa da cinza, que, a depender da origem, apresenta maior ou menor reatividade pozolânica. Dentre os efeitos químicos positivos ocasionados pelo emprego de CV evidencia-se a redução no calor de hidratação e a melhora das propriedades mecânicas dos materiais cimentícios, especialmente em altas idades. No entanto, em contrapartida, o ganho de resistência mecânica é significativamente mais lento do que o observado em concretos com cimento convencional, só equiparando aos valores de referência em idades maiores que 28 dias [122,123].

Por outro lado, os efeitos físicos proporcionados pela CV são conferidos somente em função da morfologia do material. O tamanho das partículas, assim como a esfericidade do material garantem aos concretos com uso de CV uma trabalhabilidade melhor para as mesmas relações a/c em comparação com os concretos convencionais. Além disso, as partículas menores que o cimento ( $<1\mu\text{m}$  até  $150\mu\text{m}$ ) possibilitam o refinamento dos poros do substrato. Isso ocorre, devido à deposição das partículas nos vazios da matriz e podem servir de pontos de nucleação para os produtos de hidratação [120,124].

### 3.4.1. Propriedades físico-mecânicas de concretos com CV

O uso de CV como adição em concretos ocasiona diversas alterações químicas e físicas na matriz do material. A CV é um material de origem mineral rico em aluminossilicatos que, em contato com o  $\text{Ca}(\text{OH})_2$ , produzem C-S-H secundário através da chamada reação pozolânica. Mehta e Monteiro [7] explicam a reação como sendo um processo de lento desenvolvimento, ocasionando baixa liberação de calor de hidratação e conseqüentemente baixa resistência mecânica nas primeiras idades. Isso se dá nos cimentos pozolânicos em função do teor reduzido de clínquer o que ocasiona uma oferta reduzida de  $\text{C}_3\text{S}$  e  $\text{C}_3\text{A}$ . Esse comportamento foi estudado por Yu *et al.* [125], Silva e Andrade [126] e Limbachiya, Meddah e Ouchagour [72], cujos autores concluíram que a cinza teve papel preponderante na obtenção de resistência mecânica em idades avançadas, tanto para resistência a compressão como para resistência à flexão, cuja tendência está exemplificada na Figura 3.14.

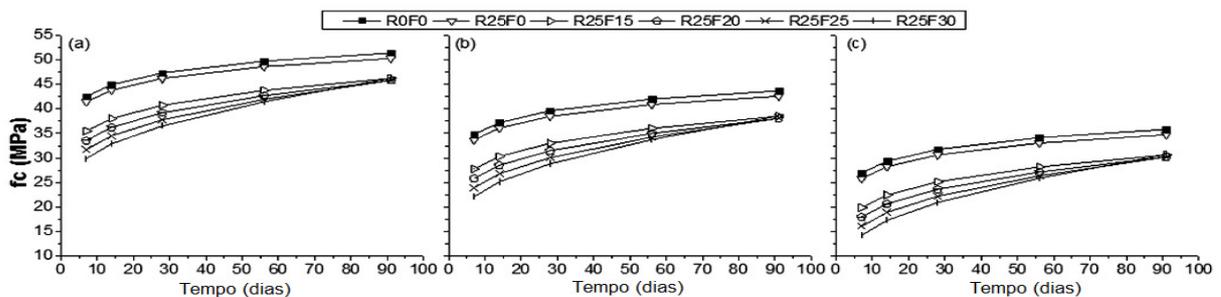


Figura 3.14 - Efeito da CV no ganho de resistência em idades avançadas.

Fonte: Adaptado de Silva e Andrade [126]

Segundo Saha [29] e Pejovnik *et al.* [127] os efeitos físicos do uso da cinza atuam principalmente na matriz do substrato, refinando os poros e reduzindo o volume de vazios permeáveis do concreto, conforme pode ser observado na Figura 3.15.

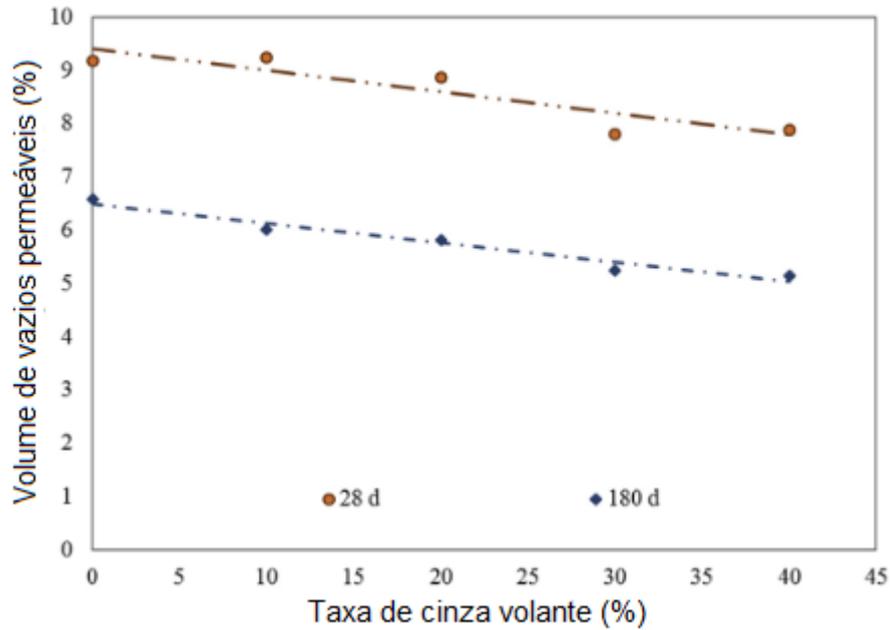


Figura 3.15 - Efeito da CV no volume de vazios permeáveis do concreto.

Fonte: Saha [30]

Visando observar a influência ocasionada pelos diferentes tipos de CV, Cho, Jung e Choi [121] analisaram o efeito 16 tipos de cinzas volantes na resistência à compressão dos concretos. Os autores concluíram que as diferenças químicas das composições das cinzas foram relevantes somente em idades avançadas, não apresentando alteração aos 28 dias. Esse comportamento foi explicado pela diferença de reatividade pozolânica entre as cinzas analisadas. Os autores complementam afirmando que os parâmetros químicos do material possuem uma correlação maior com os resultados de compressão aos 91 dias, evidenciando o efeito direto das propriedades químicas do material com a reatividade pozolânica.

Shaikuthali *et al.* [128] observaram o efeito da CV na trabalhabilidade de concretos. Os autores moldaram 7 traços, 1 de referência e outros 6 traços substituindo cimento por CV em taxas de 10%, até atingir a taxa máxima de substituição de 60%. Observando os resultados na Figura 3.16 é possível concluir que a CV influenciou de maneira preponderante na trabalhabilidade dos concretos,

apresentando um comportamento diretamente proporcional à taxa de incremento da cinza.

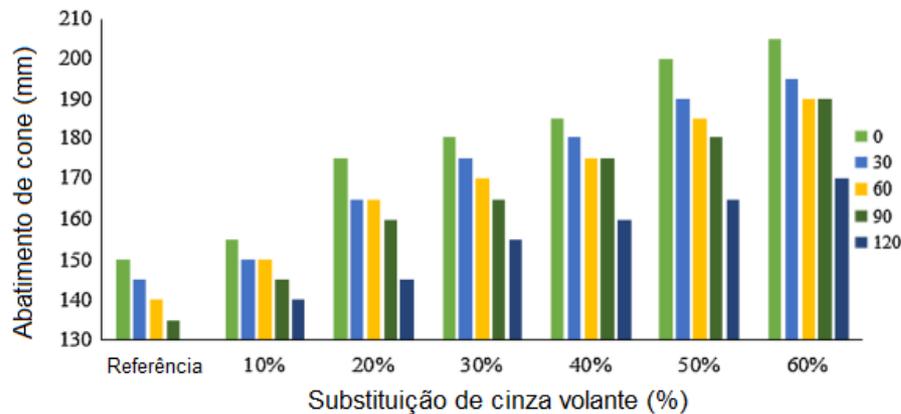


Figura 3.16 - Efeito da CV na trabalhabilidade do concreto.

Fonte: Shaikuthali *et al.* [128]

Limbachiya, Meddah e Ouchagour [72] e Siddique [129] também obtiveram resultados positivos em decorrência do incremento de CV no que tange ao módulo de elasticidade dos concretos com substituição de CV, no entanto, Kou, Poon, e Chan [130] analisando concretos com substituição de agregados naturais por reciclados, observaram uma influência negativa da utilização da cinza nas propriedades mecânicas dos concretos estudados.

#### 3.4.2. Durabilidade de concretos com CV

No que tange a durabilidade, a CV confere melhorias significativas nos concretos, principalmente em função da reação pozolânica, influenciando na porosidade e permeabilidade do material. A redução da porosidade da matriz cimentícia é uma característica extremamente importante para as propriedades de durabilidade do concreto, uma vez que é através de mecanismos de absorção que íons prejudiciais ao concreto ingressam no interior do material [131–133].

### 3.4.2.1. Penetração de Cloretos

Diversos estudos acerca da utilização da CV como material substituinte do cimento contemplam a avaliação da difusão dos íons cloretos na matriz do concreto. Segundo Moffat, Thomas, Fahim [122], Pejovnik *et al.* [127], Cheewaket, Jaturapitakkul e Chalee [134], a utilização da CV promove o incremento da resistência à penetração de cloretos. Segundo os autores, a modificação da microestrutura da matriz do concreto com o refinamento dos poros e a consequente diminuição da interconexão entre os mesmos dificulta a difusão dos íons cloreto no substrato. Saha [29] testou a influência progressiva da substituição de cimento Portland por CV em 10%, 20%, 30% e 40%, fixando a relação a/c em 0,35 e utilizando superplastificante, conforme apresentado na Figura 3.17, é possível perceber que com o incremento da substituição de CV houve o incremento da resistência á permeabilidade de íons cloreto no concreto. Os autores atribuíram tal comportamento à maior densificação da matriz, com a diminuição do volume de vazios permeáveis e a menor quantidade de poros interconectados.

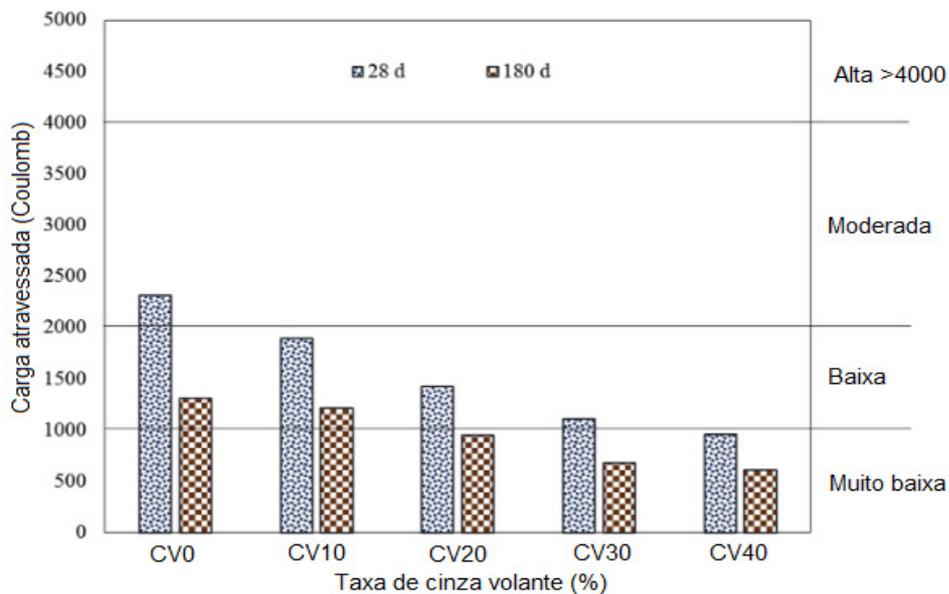


Figura 3.17 - Efeito da CV na permeabilidade de íons cloreto.

Fonte: Saha [30]

Ali *et al.* [135] afirmam que a adição de 20% de CV no concreto aumentou a resistência à penetração de íons cloreto, tanto isoladamente quanto em uso conjunto

com AR, bem como acarretou na minimização da absorção de água, reduzindo a permeabilidade. Junior, Balestra e Medeiros-Junior [96] obtiveram resultados semelhantes utilizando cimentos com até 27% de CV em sua composição. Os autores concluíram que a penetração de cloretos foi menor naqueles concretos com maiores teores de CV no concreto, e explicaram que esse comportamento foi ocasionado por duas razões. A primeira se dá na maior capacidade de estabilização dos íons cloreto na matriz dos concretos que contêm maiores taxas de CV. E a segunda hipótese trata sobre a redução efetiva da porosidade e da absorção de água nos concretos com cinza, principalmente observando essa tendência em idades avançadas.

#### 3.4.2.2. Carbonatação

A carbonatação em concretos com substituição de CV vem sendo um assunto amplamente estudado há décadas e não existe um consenso plenamente estabelecido sobre o comportamento claro da performance de concretos com CV. Alguns autores Kellouche *et al.* [58] e Sisomphon e Franke [73] e Papadakis [51], concluíram que a substituição de CV tem uma relação diretamente proporcional com o aumento da carbonatação em concretos, principalmente em concentrações que superam os 25%, enquanto Khunthongkeaw, Tangtermsirikul, Leelawat [70], afirmaram que até determinadas porcentagens de substituição, o efeito da CV é desprezível sobre a carbonatação.

Apesar da falta de consenso, resultados mais recentes apontam para um desempenho inferior do concreto com substituição de CV. Isso decorre em virtude da menor oferta de cimento na composição desses concretos. Durante a hidratação do cimento a falta de CaO ocasiona em uma formação reduzida de  $\text{Ca(OH)}_2$  na pasta do concreto, diminuindo a fixação do  $\text{CO}_2$  nos poros do substrato. Esse efeito ainda é acentuado pela reação pozolânica gerada pela adição mineral, a qual consome o  $\text{Ca(OH)}_2$  disponível gerando C-S-H secundário, cujo resultado desse processos é o rápido aumento da profundidade de carbonatação. Carevic, Ignatovic e Dragas [69] observaram esse efeito, cujos autores moldaram três tipos de concretos: um traço de referência, um traço com 100% de substituição do NA por AR e o terceiro substituindo 50% em massa de cimento por CV. Os exemplares foram então

dispostos em uma câmara de carbonatação e submetidos a quatro diferentes concentrações de CO<sub>2</sub> (1%, 2%, 4% e 16%). Os resultados mostraram que os concretos com adição pozolânica carbonataram até 175% a mais que os concretos com AN. Faella *et al.* [14] também obtiveram resultados semelhantes testando concretos com alta taxa de substituição de CV.

Segundo Carevic, Ignjatovic e Dragaš [69] e Sisomphon e Franke [73], a presença de altos volumes de CV reduz a oferta de Ca(OH)<sub>2</sub> na hidratação, tornando o substrato mais suscetível ao avanço da frente de carbonatação.

## 4. MATERIAIS E MÉTODOS

### 4.1. Materiais

Para elaboração deste trabalho, foi utilizado o cimento CPV-ARI, que segue as prescrições da NBR 16697 [136]. Sua escolha se deu em função da alta taxa de clínquer (>95%) e disponibilidade na região. As características físicas e químicas fornecidas pelo fabricante do cimento, assim como os limites da norma estão apresentadas na Tabela 4.1, e os seus compostos, determinados através da fluorescência de Raios X, bem como do AR e da CV, estão apresentados na Tabela 4.2.

Tabela 4.1 - Características do cimento CP-V ARI.

Diâmetro médio da partícula	14,16 $\mu\text{m}$	
Massa específica	3,05 $\text{kg}/\text{dm}^3$	
Massa unitária	0,98 $\text{kg}/\text{dm}^3$	
Compressão média aos 7 dias	42,1 MPa	$\geq 34$ MPa
Perda ao Fogo	5,42	$\leq 6,5$
Resíduo Insolúvel	2,50	$\leq 3,5$
Óxido de Magnésio	4,08	$\leq 6,5$
Sulfatos	3,28	$\leq 4,5$
Anidrido Carbônico	4,10	$\leq 5,5$

Tabela 4.2 - Fluorescência de raios X do concreto, CV e do AR.

Material	SiO <sub>2</sub> (%)	TiO <sub>2</sub> (%)	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> (%)	Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub> (%)	MgO (%)	CaO (%)	K <sub>2</sub> O (%)	SO <sub>3</sub> (%)	Perda ao fogo
Cinza Volante	66,95	0,76	20,28	5,92	0,79	2,69	1,89	<LQ	0,22
Cimento CP V ARI	17,78	0,18	3,92	2,91	4,08	61,96	0,78	3,28	5,42
Agregado Reciclado	58,11	0,64	10,01	3,57	2,1	11,57	1,67	0,38	10,78

LQ = Limite quantificável

A CV utilizada foi obtida na Usina Termelétrica Presidente Médici em Candiota/RS. Segundo a classificação utilizada por Dal Molin [120], a CV utilizada é considerada um material pozolânico, por apresentar baixo teor de cálcio na sua composição. O material tem uma massa específica de 1,52  $\text{kg}/\text{dm}^3$  e uma massa unitária de 0,98  $\text{kg}/\text{dm}^3$ , assim como diâmetro médio de 45,12  $\mu\text{m}$ . A areia natural é procedente da bacia do lago Guaíba, Porto Alegre/RS e foi empregada como agregado miúdo, cujas composições granulométricas e físicas foram obtidas

seguindo os procedimentos das normas NBR 9776 [137] e NBR 7251 [138] e estão apresentadas na Tabela 4.3.

Tabela 4.3 - Ensaio de caracterização do agregado miúdo.

Ensaio	Abertura da Peneira (mm)	Porcentagem retida (massa)		Método de Ensaio
		Individual	Acumulada	
Composição Granulométrica	4,8	0	0	NBR NM 248 [139]
	2,4	4	4	
	1,2	9	13	
	0,6	18	31	
	0,3	36	67	
	0,15	30	97	
	<0,15	3	100	
Dimensão máxima característica			2,40	
Módulo de finura			2,12	
Massa específica			2,62 kg/dm <sup>3</sup>	NBR NM 52 [140]
Massa unitária			1,61 kg/dm <sup>3</sup>	

Para a moldagem dos concretos foi empregado o uso de agregado graúdo natural (AN) de origem basáltica. A análise granulométrica foi realizada conforme prescrito pela NBR 7211 [141] assim como os procedimentos especificados na NBR 9776 [137] e na NBR 7251 [138] foram adotados para determinar, respectivamente, a massa específica e a massa unitária do material, cujos resultados estão apresentados na Tabela 4.4.

Tabela 4.4 - Ensaio de caracterização do AN.

Ensaio	Abertura da Peneira (mm)	Porcentagem retida (massa)		Método de Ensaio
		Individual	Acumulada	
Composição Granulométrica	25	0	0	NBR NM 248 [139]
	19	4	4	
	12,5	66	70	
	9,5	27	97	
	6,3	3	100	
	< 4,75	0	100	
Dimensão máxima característica			19mm	
Módulo de finura			7,01	
Massa específica			2,94 kg/dm <sup>3</sup>	NBR NM 53 [142]
Massa unitária			1,55 kg/dm <sup>3</sup>	NBR NM 45 [143]

O agregado graúdo reciclado (AR) utilizado neste trabalho é proveniente do processamento de um resíduo de construção e demolição (RCD) da cidade de Porto Alegre e é composto de material misto. A fim de determinar a composição do material foi coletada uma amostra de 1 kg e realizada uma separação manual visando estimar o percentual aproximado de materiais que o compõe, cujo resultado pode ser observado na Tabela 4.5.

Tabela 4.5 - Composição gravimétrica do agregado graúdo reciclado.

Material	Composição	Legenda	(%)
Cerâmico	Resíduo de tijolo	1	29%
	Resíduo de revestimento cerâmico	2	6%
Argamassa	Argamassa sem presença de agregado graúdo	3	42%
Agregado Natural	Agregado granítico	4	5%
	Agregados diversos	5	5%
Concreto	Argamassa com a presença de agregado graúdo	6	10%
	Concreto com presença de agregado graúdo	7	4%
Total			100%

Conforme pode-se observar na Figura 4.1, se trata de um material heterogêneo, contendo grandes quantidades de material cimentício como argamassa e concreto e material cerâmico, como tijolos, na sua composição.



Figura 4.1 - Composição gravimétrica do agregado graúdo reciclado.

Após o recebimento do RCD, foi feita uma separação de materiais contaminantes como plásticos, vidros, metais, matéria orgânica, restos de tinta e borracha. Na sequência, o material foi acondicionado de maneira a ficar protegido das intempéries e de possíveis contaminantes naturais. Em seguida, foi realizada a britagem em um britador modelo Queixada 400, cujo equipamento permite o processamento em 3 diferentes granulometrias. A granulometria de interesse deste trabalho foi o AR graúdo, com dimensão máxima característica de 19 mm. Na sequência empregou-se o ensaio da NBR 7211 [141] para a determinação da granulometria e os ensaios da NBR 9776 [137] e NBR 7251 [138] para determinar respectivamente a massa específica e a massa unitária do material, cujos resultados estão apresentados na Tabela 4.6.

Tabela 4.6 - Ensaio de caracterização do agregado graúdo reciclado.

Ensaio	Abertura da Peneira (mm)	Porcentagem retida (massa)		Método de Ensaio
		Individual	Acumulada	
Composição Granulométrica	25	0	0	NBR NM 248 [139]
	19	8	8	
	12,5	42	50	
	9,5	22	72	
	6,3	27	99	
	4,75	1	100	
Dimensão máxima característica			25mm	
Módulo de finura			6,80	
Massa específica			2,46 kg/dm <sup>3</sup>	NBR NM 53 [142]
Massa unitária			0,98 kg/dm <sup>3</sup>	NBR NM 45 [143]

Os resultados de difração de raios X dos materiais utilizados estão apresentados na Figura 4.2. Pode-se notar as presenças marcantes de picos de quartzo tanto no AN quanto no reciclado, comportamento esperado para esse tipo de material.

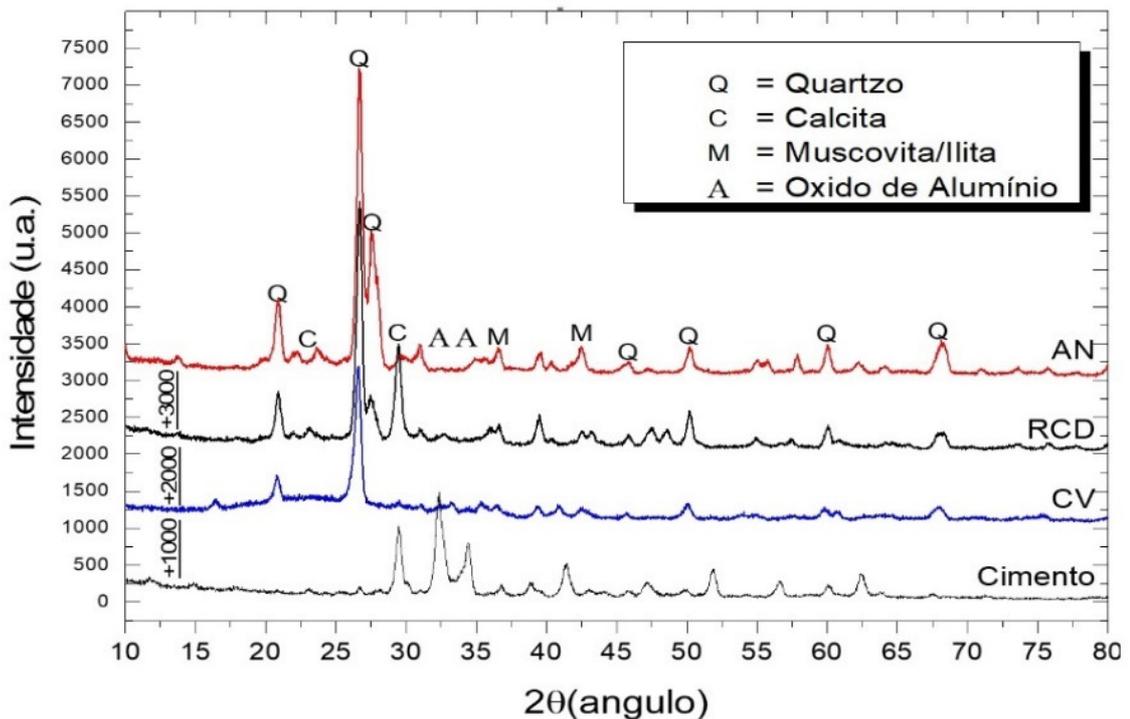


Figura 4.2 - Difração de Raios X dos materiais utilizados.

## 4.2. Métodos

### 4.2.1. Estudo de dosagem

O estudo de dosagem do traço se deu pelo método ABCP/ACI [144], no qual especificou-se um concreto com resistência à compressão aos 28 dias de 30 MPa, abatimento de  $90 \pm 10$  mm, e dimensão máxima de agregado igual a 19 mm. Em seguida determinou-se o cálculo das proporções do concreto e o cálculo do volume de sólidos. Por fim, foi realizada a compensação da diferença entre a massa específica do AR e a massa específica do AN, esse processo é feito para uniformizar o volume dos materiais do concreto. Essa compensação é feita através da utilização da equação 11.

$$M_{AR} = M_{AN} \times \frac{\gamma_{AR}}{\gamma_{AN}} \quad (11)$$

Onde:

$M_{AR}$  = Massa de AR (kg)

$M_{AN}$  = Massa de AN (kg)

$\gamma_{AR}$  = Massa específica do AR (kg/dm<sup>3</sup>).

$\gamma_{AN}$  = Massa específica do AN (kg/dm<sup>3</sup>).

Para a moldagem dos concretos o AR foi imerso em balde com água com um dia de antecedência. No dia da moldagem, o AR foi retirado da água e secado superficialmente, a fim de impedir a absorção da água de amassamento do concreto devido à porosidade do mesmo.

Empregou-se a nomenclatura do tipo “25-0”, onde “25” representa o teor de substituição de AN por AR (em %), enquanto “0” corresponde ao teor de CV substituída ao cimento, que foi fixada em 40% da massa do cimento. Esse percentual é considerado o limítrofe para não ser considerado concreto com alta substituição de cimento por CV (CASCV). De acordo com Li, Wu e Wang [145], acima de 40% devem ser considerados métodos de dosagem específicos para CASCV.

Na Tabela 4.7 estão apresentadas as quantidades de materiais empregadas para os diversos traços estudados.

Tabela 4.7 – Quantidades de materiais por m<sup>3</sup> empregadas para cada concreto.

Traço	Quantidades (kg/m <sup>3</sup> )								
	a/c	% AR	Cimento	CV	Agregado miúdo	AN	AR	Água	Abatimento (mm)
REF	0,5	0%	390,00	0	768,30	1131,00	0	195,00	165
25-0	0,5	25%	390,00	0	768,30	850,20	237,90	195,00	135
50-0	0,5	50%	390,00	0	768,30	565,50	471,90	195,00	155
75-0	0,5	75%	390,00	0	768,30	284,70	709,80	195,00	155
0-40	0,5	0%	234,00	156	768,30	1131,00	0	195,00	90
25-40	0,5	25%	234,00	156	768,30	850,20	237,90	195,00	100
50-40	0,5	50%	234,00	156	768,30	565,50	471,90	195,00	90
75-40	0,5	75%	234,00	156	768,30	284,70	709,80	195,00	80

Os corpos de prova foram desmoldados após 24 horas e colocados em cura submersa em água até a idade dos ensaios, conforme apresentado no Quadro 4.1.

Quadro 4.1 - Ensaios executados e número de corpos de prova utilizados

Ensaio	Exemplares	Norma Aplicada	Idades de ensaio
Resistência à compressão	8 corpos de prova	NBR 5739 [146]	7, 28, 63 e 91
	Cilíndricos 10x20		
Módulo de elasticidade	9 corpos de prova	NBR 8522 [147]	28, 63 e 91
	Cilíndricos 10x20		
Carbonatação acelerada	1 corpo de prova	Procedimento de laboratório	63, 91, 120, 150, 180 e 210
	Prismático 10x10x30		
Resistência à penetração de cloretos	2 corpos de prova	Procedimento de laboratório	28, 56, 84, 112 e 140
	Prismático 10x10x30		
Absorção por imersão, porosidade e massa específica	2 corpos de prova	NBR 9778 [148]	28
	Cilíndricos 10x20		
Microtomografia de raios X	Amostras cilíndricas 25mm	Procedimento de laboratório	210

#### 4.2.2. Microtomografia de raios X

Com o intuito de avaliar a influência do AR e sobretudo da CV na porosidade e na distribuição dos poros, foram realizadas análises de microtomografia de Raios X. Para isso foram coletadas amostras cilíndricas de aproximadamente 2,5cm x 5cm dos concretos REF, 0-40, 75-0 e 75-40 na idade de 210 dias. A análise foi realizada em um equipamento modelo Bruker SkyScan 1173 com uma energia de operação de 50kV e corrente elétrica de 0,3 mA. Esta técnica consiste em fatiar a amostra em centenas de imagens 2D, em seguida utiliza-se o software Data Viewer para definir uma área de interesse de 1cm x 1cm x 1cm para observar um modelo tridimensional da estrutura da amostra, isolando e destacando os vazios da argamassa, assim como nos agregados reciclados. Zhang [149] utilizou a técnica para analisar o avanço da microestrutura dos concretos, verificou a diminuição dos grãos anidros de cimento e o aumento da presença de produtos de hidratação conforme o avanço da idade. Essa mesma metodologia também foi utilizada por Nunes *et al.* [150] para observar a influência do uso do AR na microestrutura do concreto.

#### 4.2.3. Penetração de cloretos

Para avaliar a penetração de cloretos nos concretos foram analisados 2 corpos de prova (CP) prismáticos por traço. Após os 28 dias de cura úmida, os CPs foram retirados da água e deixados em ambiente coberto e protegido por 7 dias, para que ficassem secos. Durante esse período os corpos de prova foram impermeabilizados nas faces menores, conforme a Figura 4.3, garantindo que a frente de penetração de cloretos fosse analisada unidirecionalmente através das faces maiores. Tal método foi utilizado por Romano [151], Silvestro, Romano e Dal Molin [152] e Villagrán-Zaccardi e Andrade [153], Anastasiou, Filikas e Stefanidou [118]. Ao final dos 7 dias, os exemplares foram imersos em um tanque com água e cloreto de sódio em concentração de 3,5%, similar à encontrada nos oceanos. Após 28 dias o corpo de prova foi retirado da água.

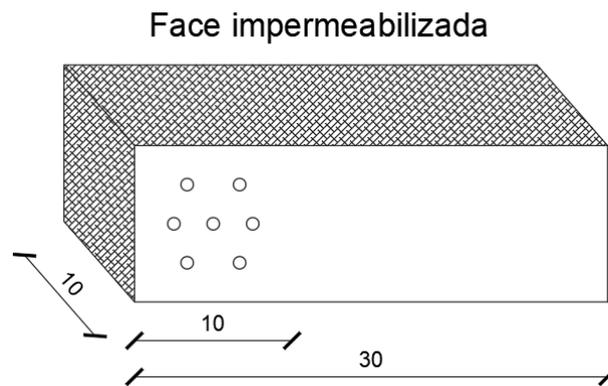


Figura 4.3 - Corpo de prova para ensaio de penetração de cloretos.

Ao término do período de 7 dias fora da água, os corpos de prova foram separados em 3 regiões distintas para determinação dos teores de cloreto nas idades pré-determinadas (28, 56, 84, 112 e 140 dias). Na sequência, foram feitos 7 furos com uma furadeira de impacto BOSCH GBH 2-24D, utilizando uma broca para concreto com diâmetro 8 mm, sendo executados a cada 1 cm até a profundidade de 5 cm, caracterizando a metade do corpo de prova (Figura 4.4). Após cada coleta de material pulverulento foi realizada uma limpeza do furo empregando-se uma pistola de ar comprimido para fazer a dispersão de material sólido no furo, na broca e na mesa, evitando que a amostra fosse contaminada. O material pulverulento foi coletado em sacos seláveis e identificado imediatamente, a fim de evitar alterações por umidade ou qualquer outro agente externo. Após atingir a profundidade limite as aberturas foram preenchidas com pasta de cimento para que se mantivesse a condição unilateral da difusão de cloretos no corpo de prova.



Figura 4.4 - Corpo de prova após execução de furo para coleta de material pulverulento.

Seguindo o proposto por Haque e Kayyali [154] Limbachiya, Meddah e Ouchagour [72] e Silvestro, Romano e Dal Molin [152] realizou-se o ensaio para determinação do teor de cloretos livres nas amostras coletadas utilizando o método de potenciometria direta. Optou-se pela determinação de cloretos livres, pois são esses os responsáveis diretos pelo início do processo de corrosão no concreto. O ensaio de potenciometria direta foi definido pela praticidade na obtenção dos resultados e pelo acesso aos insumos necessários para a execução do mesmo, assim como o roteiro discricionário do procedimento executado em Romano [156]. A metodologia de coleta de material está apresentada nas normas ASTM C 1152 [155] e RILEM TC 178-TMC [156]. Para tanto empregou-se o aparelho CL – 3000 da NDT James Instruments. A técnica de análise exige que o mesmo seja previamente calibrado com 5 soluções aquosas de concentrações de cloreto conhecidas, permitindo que se crie uma curva padrão de leituras em relação à concentração do líquido analisado. Importante salientar a necessidade de limpeza constante do eletrodo com água deionizada após todas as leituras, uma vez que pode haver contaminação dos padrões ou das amostras analisadas caso não esteja limpo. Após a calibração do material o seguinte procedimento foi adotado:

- 1) limpeza do eletrodo com água deionizada, a fim de evitar quaisquer inconsistências na medição ocasionadas por impurezas na ponta do eletrodo.
- 2) pesagem de 3 g das amostras a serem analisadas, respectivamente identificadas e na ordem, conforme a amostra da Figura 4.5.



Figura 4.5 – Amostra de pó de concreto analisada no eletrodo seletivo.

- 3) diluição das 3 g de material pulverulento em 20 ml de água deionizada.
- 4) utilizando agitador magnético modelo 752A da Fisatom, foi realizada a homogeneização da amostra por 1 minuto, estabelecendo um padrão de velocidade para todas as amostras, conforme a Figura 4.6.



Figura 4.6 - Amostra de pó de concreto no agitador magnético.

- 5) espera de 1 minuto para que a solução estabilize e as partículas sólidas decantem no fundo do recipiente.
- 6) imersão do eletrodo na solução aquosa, com 1 minuto para estabilização da leitura do aparelho evitando sempre o contato da ponta do eletrodo com as partículas sólidas presentes no fundo do recipiente (Figura 4.7).

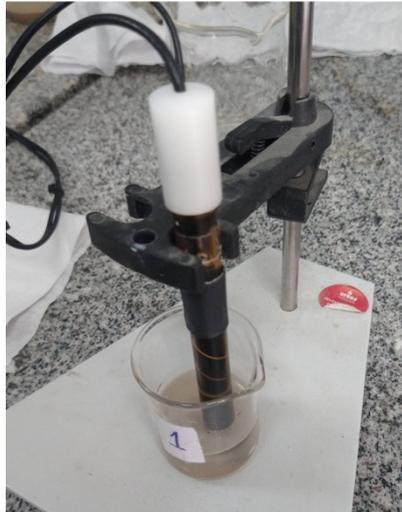


Figura 4.7 - Leitura do teor de cloreto dissolvido com o eletrodo seletivo.

- 7) após a retirada da solução deve-se lavar bem o aparelho para não haver contaminação entre as amostras e em seguida prosseguir com as outras medições.

#### 4.2.3.1. *Determinação do Coeficiente de Difusão e da Concentração Superficial*

Subsequente à obtenção dos valores percentuais de íons cloreto nas amostras, procedeu-se o cálculo do coeficiente de difusão e da concentração superficial. O primeiro passo dado foi a transformação dos dados obtidos de concentração por massa de concreto para concentração por massa de cimento, a fim de obter valores que pudessem ser comparados com outros autores da literatura, como Backus *et al.* [85], Haque e Kayyali [154] e Ahmed *et al.* [157] e com as normas NBR 12655 [158] e ACI 201 [37]. Para fazer essa conversão utilizou-se a equação 12, retirada de Helene [75].

$$Cl_{\text{concreto}} = \frac{(Cl_{\text{cimento}} \times \gamma_c)}{\gamma_c} \quad (12)$$

Onde:

$Cl_{\text{concreto}}$  = Concentração de cloretos em relação à massa de concreto (%);

$Cl_{\text{cimento}}$  = Concentração de cloretos em relação à massa de cimento (%);

$\gamma_c$  = Massa específica do concreto (kg/m<sup>3</sup>);

$C_c$  = Consumo de cimento (kg/m<sup>3</sup>)

Após a conversão dos valores de concentração os mesmos foram utilizados para calcular o coeficiente de difusão e a concentração superficial nos concretos. Tal processo foi executado por meio de um ajuste dos valores obtidos experimentalmente junto à equação 13 da 2ª lei de Fick [97]. Esse ajuste foi feito através de uma regressão não linear juntamente com o uso do método dos mínimos quadrados usando a ferramenta Solver do software Excel. Esse método matemático também foi empregado por Villagrán-Zaccardi e Andrade [153], Nath, Sarker e Biswas [159] e Ahmed *et al.* [157]. Os dados de entrada utilizados foram a profundidade em centímetros, o tempo de exposição decorrido e a concentração de íons cloreto observada experimentalmente em cada um dos 5 pontos de profundidade do material recolhido. Em seguida foram aplicadas restrições no software para que os resultados fossem no máximo 5% divergentes para mais ou menos daqueles obtidos experimentalmente, de tal forma que obtivesse um resultado adequado para a concentração superficial e do coeficiente de difusão.

$$C(x, t) = C_s \times \left[ 1 - \operatorname{erf} \left( \frac{x}{\sqrt{4 \cdot t \cdot D}} \right) \right] \quad (13)$$

Onde:

$C_s$  = Concentração Superficial (%)

$\operatorname{erf}$  = Função de erro de Gauss (mm);

$x$  = profundidade (cm).

$t$  = tempo (anos)

$D$  = Coeficiente de Difusão (cm<sup>2</sup>/ano)

A escolha do método se deu pela aplicabilidade para a determinação do coeficiente de difusão ( $D$ ) e da concentração superficial ( $C_s$ ) para um dado tempo “ $t$ ”, que são preponderantes para a construção dos perfis de ingresso de íons cloreto. O modelo também foi escolhido pela facilidade na utilização do software e pela extensa referência ao mesmo na literatura através dos trabalhos de Moffat, Thomas e Fahim [122], Andrade [153] e por Silvestro, Romano e Dal Molin [152].

#### 4.2.4. Carbonatação Acelerada

O ensaio para determinação do avanço da profundidade de carbonatação foi realizado em câmara de carbonatação acelerada no laboratório de materiais de construção civil da PUCRS. Para a realização do ensaio proposto foi utilizado 1 corpo de prova prismático para cada traço realizado. Após a cura úmida dos corpos de prova eles foram armazenados na câmara de carbonatação (Figura 4.8) com concentração de 3% de CO<sub>2</sub>, conforme o observado por Castellote *et al.*, [62] a microestrutura do concreto é preservada nessa condição de exposição, e mantidos em uma umidade relativa interna de 60±10%, conforme descrito por Neville [8] como uma umidade ótima para a ocorrência da carbonatação.



Figura 4.8 - Câmara de carbonatação acelerada.

Foi estabelecido o período de 28 dias para fazer a coleta de cada amostra para determinação da profundidade de carbonatação. O ensaio consistiu na ruptura de fatias de 5 cm de espessura longitudinalmente ao corpo de prova e imediatamente foi realizada a aspersão de uma solução de fenolftaleína a 1% na face interna do pedaço rompido, indicando a diferença entre a área carbonatada e a não carbonatada. Isso ocorre em função da diferença de pH entre as duas áreas, pois a alta alcalinidade da área não carbonatada apresenta uma tonalidade

vermelho-carmim, enquanto a área carbonatada, apresenta a cor natural do material. É possível verificar a diferença na Figura 4.9.

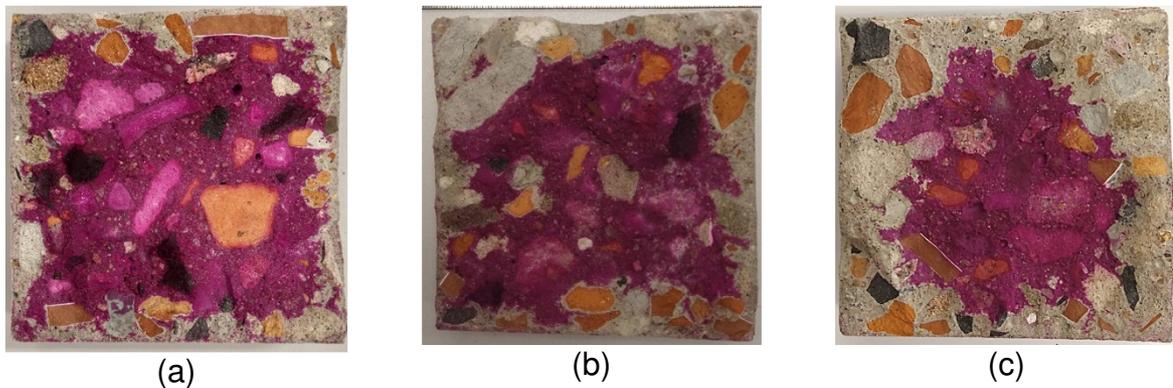


Figura 4.9 – Carbonatação no concreto 75-0 aos 28 dias (a), aos 91 dias (b) e aos 150 dias (c).

Subsequente à aplicação da fenolftaleína foi necessário fotografar o corpo de prova junto a uma régua para fazer as medições das profundidades digitalmente através do software *ImageJ* (Figura 4.10). Foram feitas 5 medidas de cada uma das faces laterais para se obter a profundidade de carbonatação média de cada um dos corpos de prova.

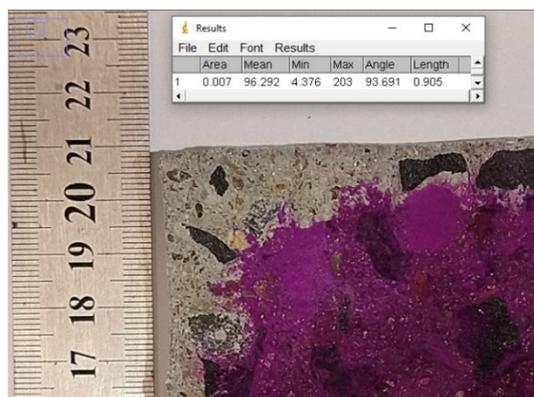


Figura 4.10 – Medida da profundidade de carbonatação no software *ImageJ*.

## 5. RESULTADOS E DISCUSSÕES

### 5.1. Propriedades Físicas

Após a cura úmida por 28 dias, procedeu-se a realização dos ensaios para determinação da massa específica, absorção de água por imersão e porosidade dos traços moldados. Inicialmente realizou-se uma ANOVA para verificar a influência estatística dos parâmetros controláveis nas propriedades analisadas, cujos resultados encontram-se apresentados na Tabela 5.1.

Tabela 5.1 - ANOVA para as propriedades físicas aos 28 dias.

Propriedade	Fonte de variação	SQ	GL	QM	Teste F	p-value	Significância
Porosidade	Cinza	1,256	1	1,256	7,724	0,013405	Sim
	AR	33,198	3	11,066	68,058	0,000000	Sim
	Cinza × AR	3,189	3	1,063	6,537	0,004293	Sim
	Erro	2,602	16	0,163			
Absorção d'água	Cinza	0,0888	1	0,0888	2,348	0,144990	Não
	AR	10,7077	3	3,5692	94,351	0,000000	Sim
	Cinza × AR	0,6972	3	0,2324	6,144	0,005557	Sim
	Erro	0,6053	16	0,0378			
Massa específica	Cinza	0,0117	1	0,0117	156	0,000000	Sim
	AR	0,2314	3	0,0771	1029	0,000000	Sim
	Cinza × AR	0,0009	3	0,0003	4	0,022613	Sim
	Erro	0,0012	16	0,0001			

SQ: Soma de Quadrados; GL: Graus de Liberdade; QM: Quadrado Médio

Os resultados mostraram que todos os fatores, bem como as interações, foram significativos para todas as propriedades analisadas. Observando-se o valor obtido no teste F verifica-se que o teor de AR exerceu uma maior influência nos resultados, salientando-se que o teor de cinza não foi considerado significativo para a absorção d'água aos 28 dias, conforme citado na literatura [31,104,125].

Nas Figuras 5.1, 5.2 e 5.3 estão apresentados os efeitos do AR e da CV na absorção d'água, porosidade e massa específica, respectivamente.

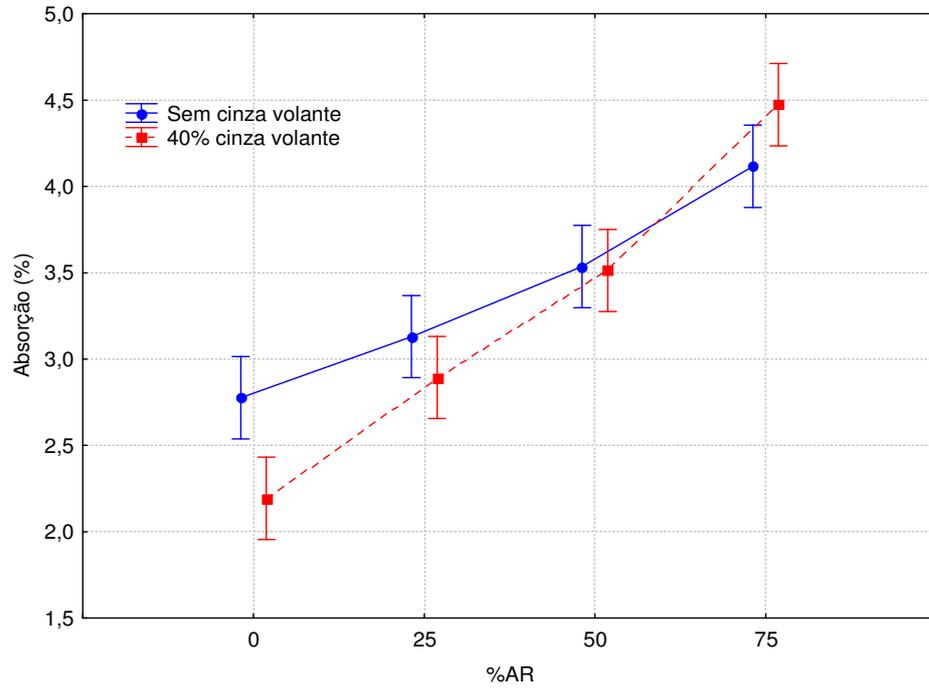


Figura 5.1 – Influência da % de substituição de AR e teor de CV na absorção de água dos concretos aos 28 dias.

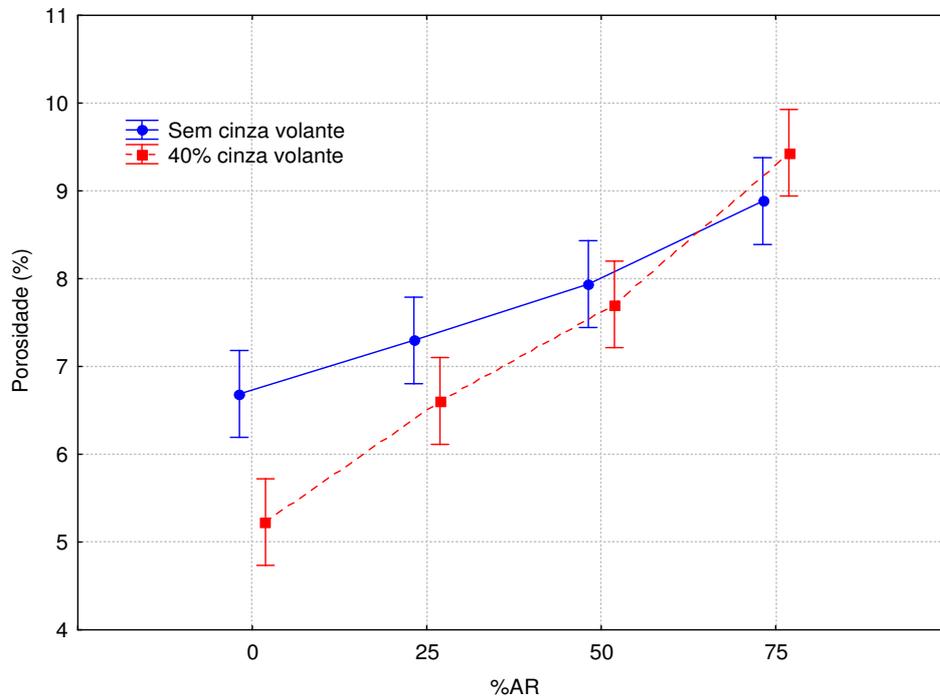


Figura 5.2 - Influência da % de substituição de AR e teor de CV na porosidade dos concretos aos 28 dias.

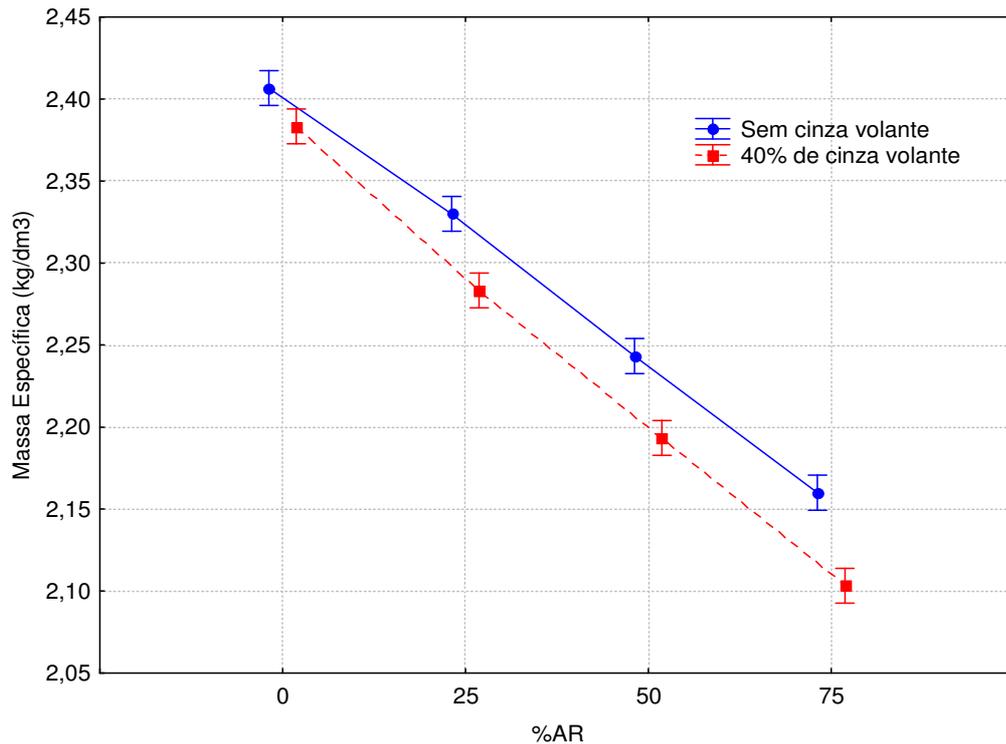


Figura 5.3 - Influência da % de substituição de AR e teor de CV na massa específica dos concretos aos 28 dias.

É possível notar nas Figuras 5.1 e 5.2 que a porosidade e a absorção de água dos concretos seguem uma tendência de crescimento em função do incremento do teor de AR. As amostras 75-0 e 75-40 apresentaram valores de porosidade 28% e 85% maiores do que os concretos REF e 0-40. Os valores de absorção de água seguiram padrão semelhante, sendo para 75-0 e 75-40, 43% e 109 % maiores que REF e 0-40. A massa específica por sua vez apresenta o comportamento inverso, quanto maior o teor de AR, menor é o valor da mesma. Segundo Wang [12] e Bravo *et al.* [114] essa tendência decorre fundamentalmente da maior porosidade intrínseca do AR e a presença de argamassa antiga com alta relação água/cimento, agregados de cerâmicas porosos contribuem para essa característica. Por essa mesma razão o aumento da porosidade induz a diminuição da massa específica do concreto.

Em função da redução da quantidade de cimento no traço, a porosidade, principalmente nas primeiras idades, aumenta com a substituição de CV. Segundo Filho *et al.* [160] a hidratação do cimento preenche os poros inicialmente ocupados pela água, com isso reduz a porosidade da matriz. Com a retirada do cimento, esse processo não ocorre com a mesma intensidade. Herath *et al.* [161] também

corroborar com esse entendimento e completa afirmando que a geração de  $\text{Ca}(\text{OH})_2$  durante a hidratação do cimento não é suficiente para a reação pozolânica da CV, deixando parte do material inativado. Os resultados encontrados divergem da literatura, porém dentro do desvio padrão dos resultados, Younsi *et al.* [162] também obtiveram porosidades muito próximas aos valores de referência, o autor citou o efeito filler da CV para a porosidade aos 28 dias.

Nos traços sem CV os produtos da hidratação podem atuar como agentes promotores do preenchimento dos poros dos agregados, principalmente os de argamassa e cerâmicos. Esse mesmo comportamento não se percebe nos concretos com CV, uma vez que a reação pozolânica ocorre somente em maiores idades, refletindo assim na porosidade e na absorção de água aos 28 dias.

## 5.2. Propriedades Mecânicas

As propriedades mecânicas dos concretos moldados foram analisadas por meio dos ensaios de resistência à compressão ( $f_c$ ) e módulo de elasticidade ( $E_c$ ). Inicialmente realizou-se uma ANOVA para verificar a influência estatística das variáveis na resistência à compressão, cujos valores encontrados estão apresentados na Tabela 5.2.

Tabela 5.2 - Tabela ANOVA para a resistência à compressão.

Fonte de variação	SQ	GL	QM	Teste F	p-value	Significância
Idade	2999,6	5	599,9	261,88	0,000000	Sim
Cinza	7468,2	1	7468,2	3259,95	0,000000	Sim
AR	2323,7	3	774,6	338,11	0,000000	Sim
Idade × cinza	313,5	5	62,7	27,37	0,000000	Sim
Idade × AR	75,2	15	5,0	2,19	0,008322	Sim
Cinza × AR	113,0	3	37,7	16,45	0,000000	Sim
Idade × cinza × AR	101,1	15	6,7	2,43	0,000347	Sim
Erro	398,6	174	2,3			

SQ: Soma de Quadrados; GL: Graus de Liberdade; QM: Quadrado Médio

Pode-se verificar que todas as variáveis possuem influência significativa na resistência à compressão dos concretos analisados. Verificando-se o resultado do Teste F, tem-se que o teor de CV, a quantidade de AR e a idade exerceram os

maiores efeitos, nessa ordem. Em função do elevado teor de cinza em substituição ao cimento (40%) era de se esperar que tal fato apresentasse uma maior influência nos resultados encontrados. Na Figura 5.4 está apresentado o comportamento da interação de 3ª ordem para a resistência à compressão.

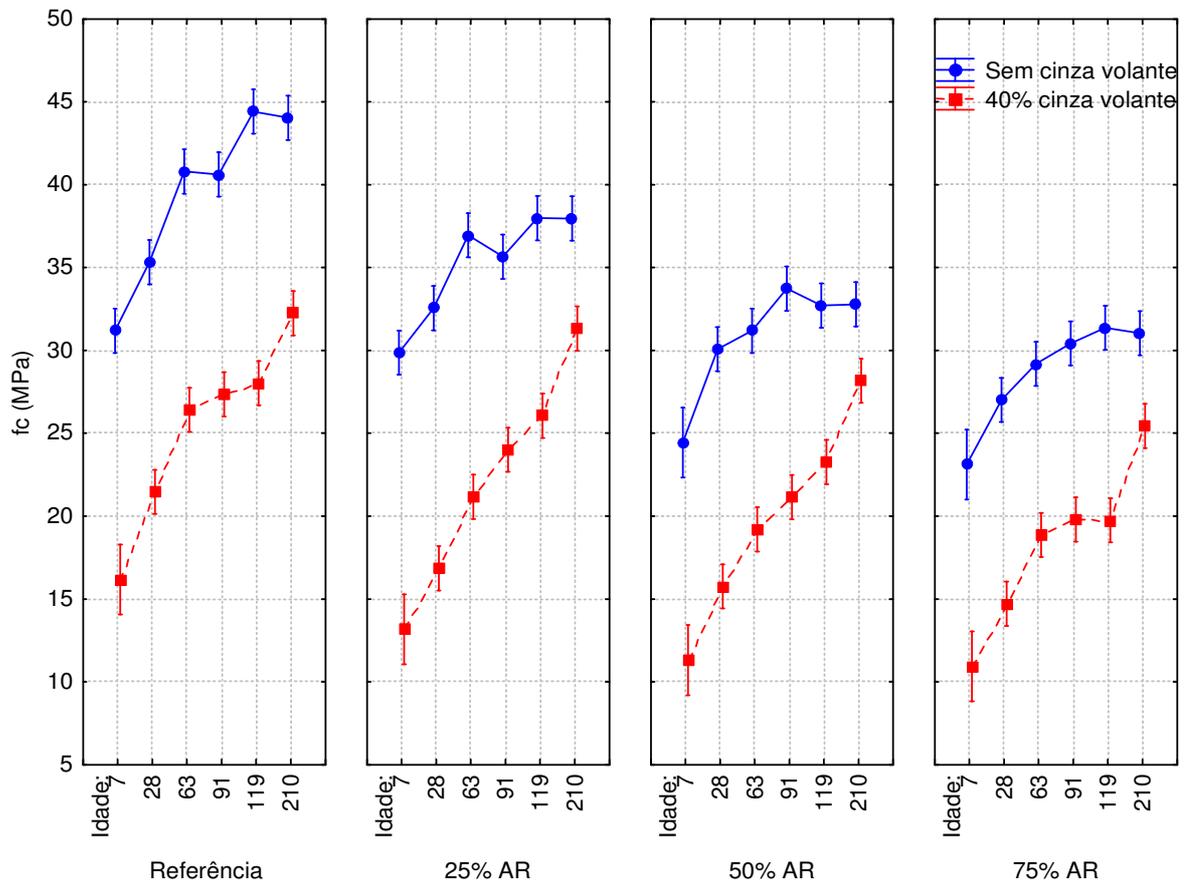


Figura 5.4 – ANOVA para a resistência à compressão dos concretos analisados.

É importante notar que, considerando o concreto de referência, o emprego do método de dosagem ABCP/ACI [144] foi adequado para concretos com teores de AR até 50% de substituição, cuja resistência média aos 28 dias foi maior do que 30 MPa. Já para os concretos com 75% de substituição tal premissa não foi atendida. Considerando os concretos com CV, aos 28 dias não se obteve a resistência desejada, em função do elevado teor de substituição adotado.

Os resultados obtidos com o ensaio de resistência à compressão seguem um comportamento amplamente descrito na literatura [14,104,120,163], onde os concretos apresentam diminuição da resistência à compressão na medida que

ocorre o incremento do teor de AR. Conforme observado na Figura 5.4, os concretos 50-0 e 75-0 apresentaram os menores resultados, com resistências 14,9% e 23,5% menores do que o concreto de referência aos 28 dias e 25,6% e 29,5% menores aos 210 dias. Já o concreto com 25% de AR apresentou um desempenho 7,9% inferior aos 28 dias e 13,8% aos 210 dias. Observa-se que, de maneira geral, os concretos com AR não apresentaram um padrão de redução da diferença da resistência à compressão para o concreto de referência ao longo do tempo, ou seja, o efeito do AR se mostrou prejudicial ao ganho de resistência com relação ao concreto de referência. Tal comportamento ocorreu de forma mais pronunciada nos concretos com maiores teores de substituição.

Também é possível observar que nos concretos com AR a tendência de estabilização do ganho de resistência ocorreu a partir dos 63 dias já no de referência percebe-se que ainda existe incremento na resistência a compressão aos 91 dias. Pode-se observar na Figura 5.4 que esse padrão é mais claro nos concretos com maior teor de AR, e é percebido quando se compara, por exemplo, o ganho percentual de resistência à compressão dos 91 dias até os 210 dias. Os concretos REF e 25-0 apresentaram respectivamente, 7,8% e 5,6% de incremento na resistência, já os concretos 50-0 e 75-0 alcançaram respectivamente aumentos de 0,9% e 0,8% para o mesmo período. Leite [164] observou a interação entre o teor de AR e a idade e constatou que para concretos com relação a/c 0,5, o teor de AR influencia negativamente no ganho de resistência ao longo do tempo, a diferença percentual, principalmente para maiores teores de AR, é maior aos 91 dias do que aos 28 dias.

Cantero *et al.* [103] obtiveram resultados semelhantes quando analisaram o comportamento mecânico de concretos com 50% de substituição de AN por AR misto, cuja resistência à compressão foi 25% menor do que o concreto de referência aos 28 dias. Os autores justificaram os resultados pela porosidade intrínseca do material e existência associada de argilas cerâmicas e argamassa de assentamento na composição do agregado. Também seguindo padrão semelhante, Bravo *et al.* [165] analisaram diversos concretos feitos com AR misto proveniente de várias centrais de reciclagem em teores de 10%, 25%, 50% e 100% de substituição. Os autores observaram que, aos 28 dias, com 100% de AR o desempenho do concreto foi entre 21,5% e 31,6% inferior ao concreto de referência, por outro lado os

concretos com 10% não apresentaram diferença significativa e os concretos com 25% se restringiram a um decréscimo de 9% a 13% da resistência.

Essa tendência com relação à adição de AR ocorre de maneira semelhante nos concretos com substituição de cimento por CV, cuja resistência à compressão diminui com o aumento do teor de AR. No entanto, no que tange a influência da pozolana isoladamente, deve-se considerar que a redução de teor de cimento nos concretos acarreta perda significativa da resistência dos concretos nas primeiras idades. Aos 28 dias os concretos com CV obtiveram resistências em média 45,2% inferiores do que os sem CV. Resultados variáveis são encontrados na literatura acerca da perda de resistência nas primeiras idades, decorrente principalmente em função da variabilidade da CV utilizada. Barbuta *et al.* [166], analisaram concretos com 10%, 15%, 20%, 30% e 40% de substituição de CV e observaram que aos 28 dias o resultado de  $f_c$  do concreto com 40% de CV foi 60% inferior ao de referência. Siddique *et al.* [167] constataram tendência semelhante aos dados experimentais analisados, para 40% de substituição de CV a resistência à compressão aos 28 dias foi 34,5% inferior do que o concreto de referência. Saha [30] e Barbuta [166] observaram esse mesmo comportamento em concretos com 40% de CV em substituição e concluíram que essa redução ocorreu em função da substituição do cimento, que é um material altamente reativo, pela CV que é um material pouco reativo, principalmente nas primeiras idades. Outro ponto observado por Moghaddam, Sirivivatnanon e Vessalas [168] e Rashad [169] em trabalho de revisão bibliográfica é que nos concretos com CV o calor de hidratação é reduzido à medida que a cinza é incorporada ao traço. Esse processo também colabora para o retardamento do ganho de resistência. A reação pozolânica, assim como descrito na literatura [7,8], é um processo lento e que tem o seu potencial de ação a partir dos 63-91 dias.

Outro ponto a se observar é o efeito da reação pozolânica principalmente nos concretos com alta substituição de AR. Pode-se inferir que os concretos 50-40 e 75-40 apresentaram uma tendência de crescimento da resistência à compressão maior do que aquela apresentada pelos concretos 0-40 e 25-40. Esse comportamento pode ser verificado quando se observa que a diferença entre o concreto de referência e o 75-0 que era de 23,5% aos 28 dias aumentou para 29,5% aos 210 dias e que para 0-40 e 75-40, a diferença de 31,5% aos 28 dias reduziu para 21,1%

aos 210 dias, demonstrando que houve um fator a mais que superou o efeito prejudicial do AR.

Investigando o ganho de resistência à compressão em função do tempo de cura, Yu *et al.* [125] observaram concretos com 40% de substituição em massa de cimento por CV. Os autores observaram em seus resultados experimentais um incremento respectivo de 14% da resistência à compressão entre os 90 e 360 dias de cura dos concretos. Amram *et al.* [170] obtiveram 5% de incremento da resistência nas mesmas condições analisadas.

No que concerne o módulo de elasticidade ( $E_c$ ), inicialmente foi feita uma ANOVA para observar a significância estatística do teor de AR e de CV em tal propriedade, os resultados estão apresentados na Tabela 5.3.

Tabela 5.3 - Tabela ANOVA para o módulo de elasticidade.

Fonte de variação	SQ	GL	MQ	Teste F	p-value	Significância
Idade	694	4	173,5	77,73	0,000000	Sim
Cinza	39	1	39	17,47	0,000074	Sim
AR	2969	3	989,7	443,35	0,000000	Sim
Idade × cinza	39,5	4	9,9	4,42	0,002800	Sim
Idade × AR	30,6	12	2,5	1,14	0,339214	Não
Cinza × AR	37,8	3	12,6	5,65	0,001455	Sim
Idade × cinza × AR	27,6	12	2,3	1,03	0,430598	Não
Erro	178,6	80	2,2			

SQ: Soma de Quadrados; GL: Graus de Liberdade; QM: Quadrado Médio

Também considerando os resultados obtidos no teste F, tem-se que o fator que apresenta influência mais significativa no módulo de elasticidade é o teor de substituição de AR, seguido pela idade e pelo teor de cinza, respectivamente. Na Figura 5.5 está apresentado o comportamento do módulo de elasticidade em função dos parâmetros de controle analisados. Apesar da interação de 3ª ordem não ter se mostrado significativa, a realização de uma análise considerando os fatores em conjunto pode subsidiar algumas discussões.

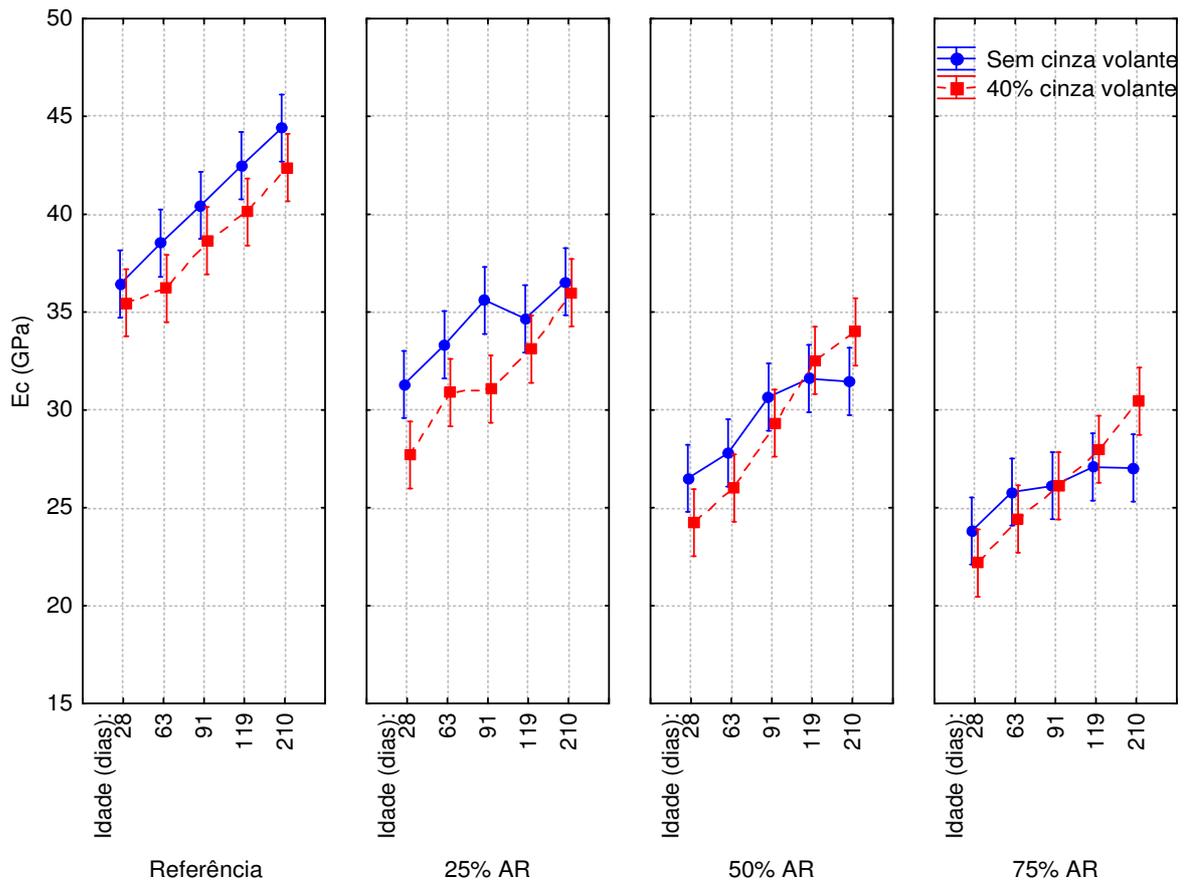


Figura 5.5 - ANOVA para o módulo de elasticidade dos concretos analisados.

No que tange os efeitos da CV isoladamente, é possível perceber um comportamento diferente daquele notado no ensaio de resistência à compressão, pois o módulo foi pouco influenciado pela substituição do cimento pela CV. Na Figura 5.5 pode-se verificar que a diferença é menor do que aquela observada nos valores de resistência à compressão. Resultados semelhantes foram observadas por Hashmi, Shariq [171], onde aos 28 dias os exemplares com 40% de CV tiveram resultados de resistência à compressão 22% inferiores do que o concreto de referência. Já para o módulo de elasticidade, o valor foi 13% inferior. Aos 180 dias, o valor de  $f_c$  foi 16% inferior ao concreto de referência, enquanto o valor de módulo foi 9% menor.

Considerando a influência do AR, os resultados obtidos seguem a mesma tendência observada nos resultados de resistência à compressão. Com o aumento do teor de substituição do AN pelo AR o módulo de elasticidade decai. Os concretos com 75% de substituição apresentam os menores resultados para os concretos com e sem CV. O concreto 75-0 apresentou, aos 28 dias, resultados 34,6% inferiores ao

concreto de referência e aos 210 dias tal diferença aumentou para o 39,1%, tal comportamento também foi verificado em outros trabalhos [12,116,172]. Adessina *et al.* [115] investigaram o efeito da microestrutura do AR e a zona de transição para compreender melhor a relação com o módulo de elasticidade dos concretos. Os autores observaram que a argamassa aderida aos agregados reciclados possui baixa resistência mecânica, criando zonas fracas na interface do AR com a pasta nova, influenciando negativamente no módulo de elasticidade do concreto.

Pode-se destacar o efeito benéfico da CV nos concretos com elevados teores de AR (50% e 75%), nos quais a reação pozolânica se torna mais evidente nas maiores idades. Esse comportamento se evidencia pela diferença percentual entre os resultados do módulo de elasticidade dos concretos com e sem CV. Os concretos 50-40 e 75-40 apresentaram resultados 8,6% e 6,9% inferiores aos 28 dias com relação aos seus equivalentes sem CV; já aos 210 dias os mesmos concretos tiveram resultados 8% e 12,6% superiores aos seus equivalentes sem CV.

Conforme discutido no item 3.4.1, a NBR 6118 [33] sugere uma equação 10 para a determinação estimada do módulo de elasticidade aos 28 dias. Para isso é necessário o uso do  $\alpha_E$ , que é um fator dependente da natureza do agregado graúdo. A Tabela 5.4 apresenta os resultados obtidos experimentalmente, comparando os mesmos com outros trabalhos com o uso de AR em diferentes taxas de substituição. Os dados dos concretos com CV foram suprimidos para que seja observada somente a influência do AR no  $\alpha_E$ , cujos valores foram calculados em relação ao agregado do concreto de referência dos estudos analisados.

Tabela 5.4 – Comparativo dos valores de coeficiente  $\alpha_E$  da literatura.

Autor	Agregado Natural	a/c	$\alpha_E$						
			% de substituição						
			NBR 6118	20%	25%	50%	70%	75%	100%
Resultados obtidos	Agregado basáltico	0,5	1,20		1,07	0,95		0,90	
Choi e Park [173]	Agregado basáltico	0,43	1,20			1,22			
	Agregado basáltico	0,43	1,20			1,07			
Zhou e Chen [172]	Agregado basáltico	0,49	1,20	0,99		0,96	1,00		0,97
	Agregado granítico	0,47	1,00	0,85		0,89	0,74		0,71
Soares <i>et al.</i> [174]	Agregado calcário	0,54	0,90		0,91				0,95
Pacheco <i>et al.</i> [175]	Agregado calcário	0,54	0,90		0,87	0,82			0,84
Cantero <i>et al.</i> [103]	Agregado calcário	0,68	0,90			0,78			
Pedro, Brito e Evangelista [176]	Agregado calcário	0,43	0,90		0,78	0,77			

Observa-se nos valores obtidos na literatura que existe uma tendência de comportamento onde o incremento do teor de AR ocasiona o decaimento do  $\alpha_E$ . Isso ocorre em função das propriedades mecânicas inferiores dos AR [114]. Nota-se também uma variação significativa entre os  $\alpha_E$  considerando concretos com mesmos teores de substituição. Tal fato ocorre devido à variabilidade existente (tanto temporal quanto espacial) entre os tipos de AR empregados em cada estudo. Tam *et al.* [105] pontuam que esse fator existente é uma importante barreira para o seu uso em substituição ao AN. A autora cita que esse problema pode ser resolvido pelo desenvolvimento das plantas de reciclagem de RCD, também pontua sobre a importância do estabelecimento de normas que definam a qualidade mínima do AR para fins estruturais, assim como sua composição gravimétrica.

Nota-se que o uso do AR tem influência negativa nas propriedades mecânicas. No entanto, aos 28 dias tem-se os concretos 25-0 e 50-0 atingiram valores de  $f_c$  iguais a 32,55 MPa e 30,07 MPa, respectivamente, cujos mesmos estão próximos ao valor estabelecido na dosagem para o concreto de referência (30 MPa). Desta forma, é possível inferir que o emprego do AR é viável sob algumas condições, a depender do  $f_c$  necessário e da zona de agressividade a qual o concreto estará exposto. A CV por outro lado, com o teor de 40% de substituição,

apresentou resultados aos 28 dias que inviabilizam o seu uso para concretos que poderiam ser empregados nas estruturas, considerando o programa experimental apresentado.

A Figura 5.6 apresenta uma correlação entre as propriedades mecânicas e a porosidade dos concretos avaliados. Salienta-se que, por uma questão de visualização, os dados de porosidade foram apresentados de maneira invertida.

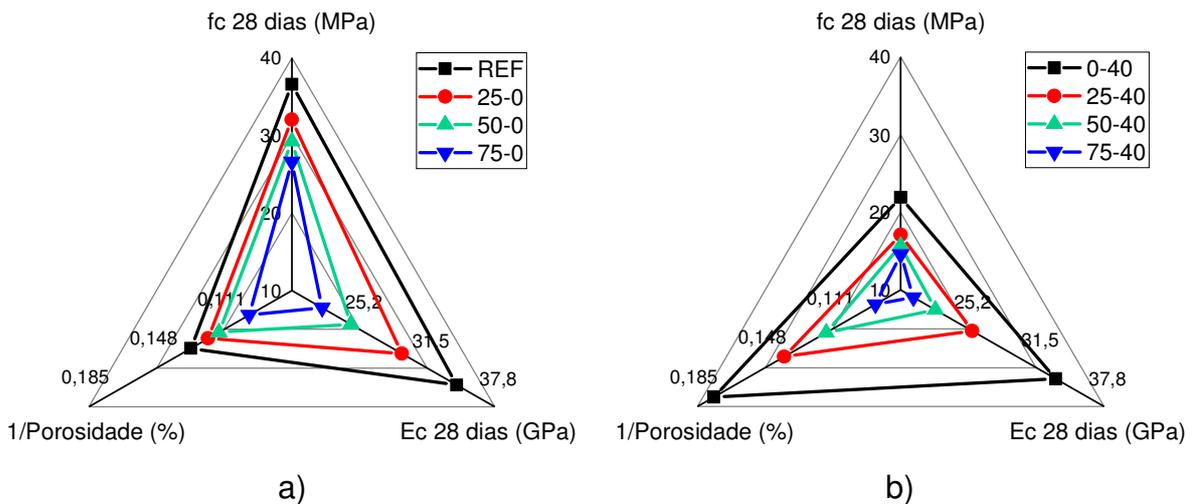


Figura 5.6 - Relação entre as propriedades físico-mecânicas dos concretos: sem CV (a) e com 40% de CV (b).

Pode-se observar na Figura 5.6 que as propriedades mecânicas dos concretos têm uma relação diretamente proporcional com o teor de substituição de AR e inversamente proporcional à porosidade da matriz do concreto. Avila Jacintho e Giongo [177] salientam que como os agregados naturais são densos e resistentes, a capacidade de resistência mecânica do concreto ocorre em função da porosidade da matriz, sendo a zona de transição entre o agregado e a pasta a área mais vulnerável. Portanto, a interação entre o AR e a resistência mecânica do concreto sem CV é regida pelo efeito físico da porosidade e das diferentes zonas de transição do AR. Com isso, a redução do teor de substituição minimiza proporcionalmente os seus efeitos prejudiciais no concreto.

No entanto, quando se analisa a influência da CV, essa tendência não se prova verdadeira, uma vez que os concretos com 50% e 75% de AR apresentaram porosidade igual ou inferior do que o concreto de referência, porém apresentam resultados mecânicos inferiores. As propriedades mecânicas, no entanto, não são

sempre regidas unicamente pelo efeito físico da porosidade. Quando se observa a influência da CV nos concretos com porosidades iguais e inferiores, como é o caso do 50-40 e do 75-40, eles não apresentam resistências mecânicas superiores aos 28 dias. Nesse caso, o efeito relacionado com a redução do teor de cimento no concreto é prevalente na determinação do comportamento do material. Li *et al.* [82] em estudo de revisão bibliográfica concluíram que o uso da CV em substituição ao cimento promove efeito benéfico para as propriedades mecânicas em teores de até 20%. Os autores complementam afirmando que para altos teores de substituição seu efeito é negativo, e citam, o baixo desenvolvimento de resistência nas primeiras idades como um dos fatores afetados pela alta substituição. Saha [30] apresentou resultados semelhantes trabalhando com altas taxas de substituição de cimento por CV, aos 28 dias o concreto com 40% de CV apresentou resistência à compressão 47,5% menor do que o concreto de referência.

### 5.3. Profundidade de Carbonatação

Os resultados do ensaio de profundidade de carbonatação para os concretos com e sem CV estão apresentados na Figura 5.7.

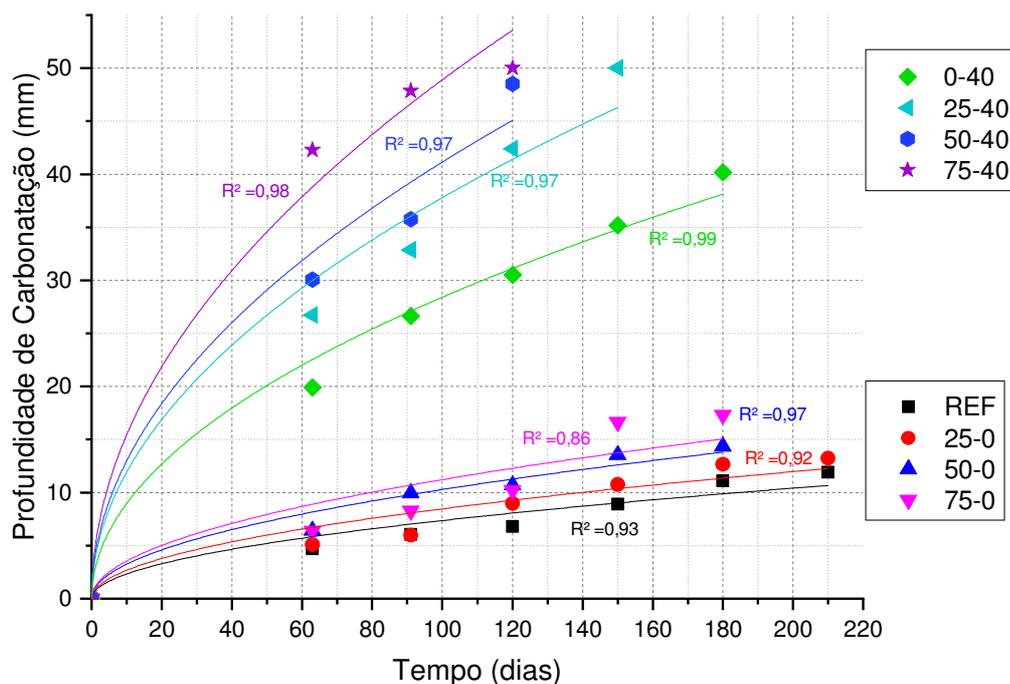


Figura 5.7 - Carbonatação dos concretos com e sem CV.

Da mesma forma que observado para as propriedades mecânicas, à medida que o teor de substituição de AR aumenta também aumenta a profundidade de carbonatação ao longo do tempo. Os concretos com 75% de AR com CV e sem CV foram os que carbonataram mais rapidamente, cujo exemplar com CV já se encontrava totalmente carbonatado aos 120 dias. Já os concretos sem CV apresentaram, aos 180 dias, uma profundidade da frente de carbonatação 56% maiores do que o concreto de referência. Esse comportamento em relação à carbonatação dos concretos com AR fica evidente na Figura 5.8.

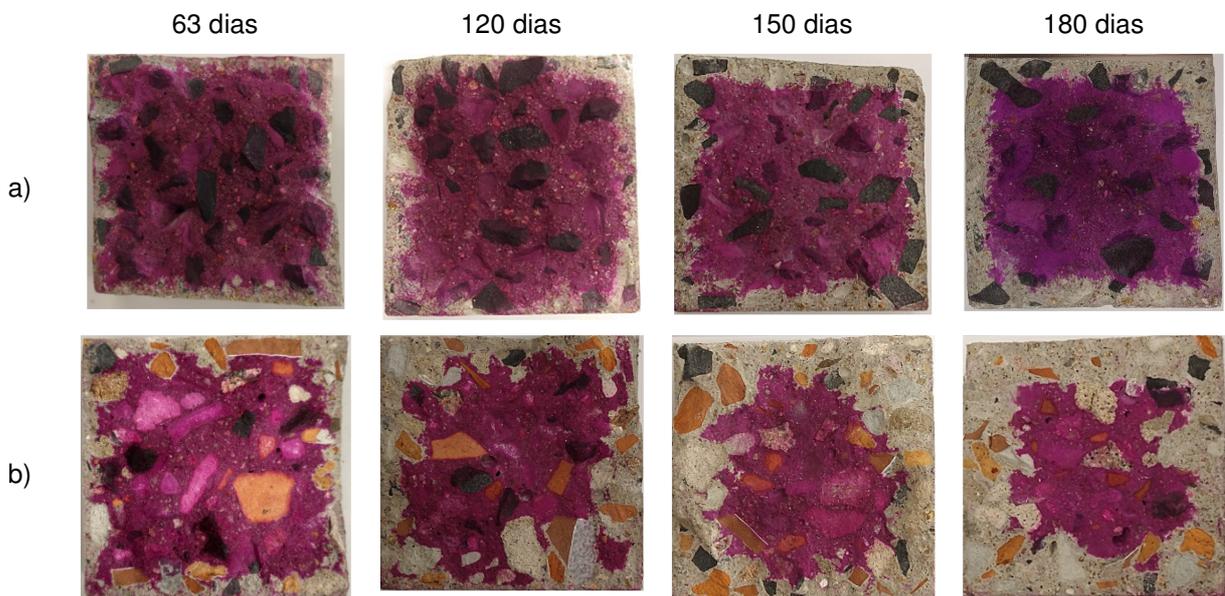


Figura 5.8 - Profundidade de carbonatação aos 63, 120, 150 e 180 dias nos concretos –  
a) Referência e b) 75-0.

Esse comportamento decorre da maior porosidade e permeabilidade dos concretos com AR, devido à interconexão da rede de poros – tanto da argamassa antiga quanto das partículas de agregado antigo – de tal material. O  $\text{CO}_2$  encontra um ambiente propício para a difusão nos vazios da pasta e avança com maior rapidez para o interior do concreto. Essa tendência está de acordo com outros trabalhos realizados [13,120,178].

Visando a viabilização do uso de AR em concretos estruturais, diversos autores vêm buscando alternativas para mitigar os efeitos nocivos da porosidade do agregado. Russo e Lollini [30] observaram o efeito do tratamento de carbonatação prévia dos AR e concluíram que o processo gerou redução da porosidade da matriz

do concreto. Pu *et al.* [179], em uma revisão sobre o estado da arte acerca de carbonatação acelerada, relataram que o uso da carbonatação como tratamento para o AR reduziu a porosidade dos concretos e conseqüentemente o seu coeficiente de carbonatação.

Outro ponto observado nos resultados obtidos é a influência negativa que a CV apresentou na carbonatação dos concretos. Conforme observado na Figura 5.9, é possível notar a diferença no avanço da frente de carbonatação entre os concretos com e sem CV.

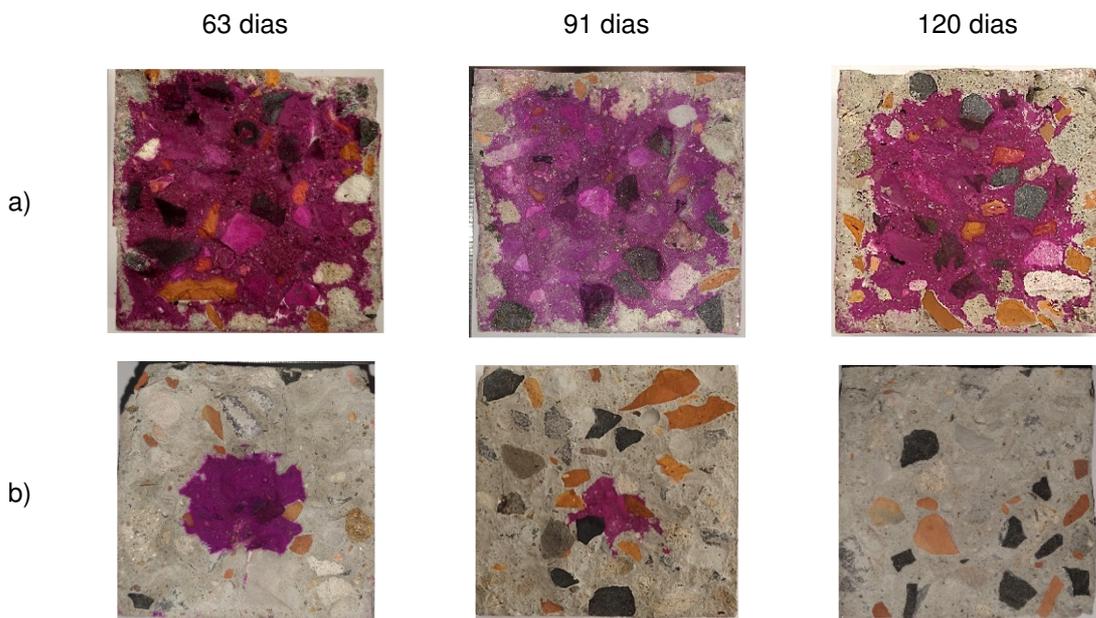


Figura 5.9 - Profundidade de carbonatação aos 63, 91 e 120 dias nos concretos –

a) 50-0 e b) 50-40.

Esse fenômeno é discutido por Papadakis [51] e ocorre em virtude da oferta reduzida de cimento e a conseqüente redução na produção de  $\text{Ca}(\text{OH})_2$ , diminuindo a fixação do  $\text{CO}_2$  na matriz do substrato, possibilitando o avanço à maiores profundidades em um período de tempo reduzido. Esse efeito é ainda acentuado pela reação pozolânica da CV, cuja mesma consome a reserva de  $\text{Ca}(\text{OH})_2$  para a produção de C-S-H secundário. Carevic, Ignjatovic e Dragaš [69] analisaram a carbonatação de concretos com substituição de 50% do cimento por CV, cujos autores concluíram que o coeficiente de carbonatação dos concretos com CV foi 3,36 maior do que o concreto de referência. Da mesma forma, Teixeira *et al.* [180] estudaram os efeitos da substituição de 50% do cimento por CV em argamassas e

concluíram que a razão para o aumento da carbonatação se deve em função do consumo do  $\text{Ca}(\text{OH})_2$  na reação pozolânica. Tal tendência foi ratificada por outros pesquisadores [58,73].

A fim de verificar se os valores do coeficiente de carbonatação ( $k$ ) obtidos nos concretos com AR seguem um comportamento similar com outras pesquisas realizadas, foram compilados os resultados de outros trabalhos, considerando relações a/c e percentuais de  $\text{CO}_2$  similares. Os valores de  $k$  dos concretos com CV foram suprimidos dessa análise, cujos resultados podem ser observados na Tabela 5.5.

Tabela 5.5 - Comparação entre coeficientes de carbonatação encontrados na literatura.

Autor	a/c	Idades de análise (dias)	%CO <sub>2</sub>	k (coeficiente de carbonatação)						
				% de substituição						
				0%	10%	25%	30%	50%	75%	100%
Resultados obtidos	0,5	63, 91, 120, 150, 180, 210	0,50	1,95		2,24		2,72	2,97	
Limbachyia <i>et al.</i> [72]	0,52	14, 28, 56, 84, 112, 140	0,43	3,33			4,18	3,66		3,75
Soares <i>et al.</i> [174]	0,54	7, 28, 56, 91	0,43	2,82		3,08				2,98
Alexandridou, Angelopoulos e Coutelieris [13]	0,57	56, 90, 182, 272	0,49	1,85		2,84		2,89		3,40
Nunes <i>et al.</i> [150]	0,5	45-150	0,47	3,37				3,98		4,66
Bravo <i>et al.</i> [114] Valnor	0,52	28, 91	0,54		2,22	2,56		2,42		4,24
Bravo <i>et al.</i> [114] Retria	0,55	28, 91	0,54		2,17	2,86		2,85		3,79

Analisando os valores da Tabela 5.5 pode-se verificar que o  $k$  segue uma tendência clara de crescimento conforme ocorre o aumento do teor de AR, esse comportamento segue uma a lógica observada por Leeman e Moro [59] e Wang *et al.* [65] na qual concretos com maior porosidade, como é o caso daqueles com maior teor de AR, tendem a apresentar aumento nas profundidades de carbonatação ao longo do tempo. Outro ponto a ser observado é a diferença existente entre os valores de  $k$  para o mesmo teor, ou teores muito próximos, de substituição de AR. Essa variabilidade se explica em parte pelos muitos fatores que condicionam a

carbonatação nos concretos, tais como: tipo de cimento do concreto, temperatura do ambiente de exposição, umidade relativa do ambiente de exposição, concentração de CO<sub>2</sub> do ambiente de exposição entre outros fatores [61]. Outra variante importante é a composição dos AR utilizados, pois a depender do material suas características físicas, como porosidade e absorção d'água são diferentes entre os trabalhos analisados. Bravo *et al.* [165] observaram o desempenho das propriedades mecânicas de concretos moldados com AR provenientes de 4 centrais de reciclagem distintas. Os autores analisaram a composição dos materiais e notaram que em um determinado agregado havia 24,4% a mais de material cerâmico do que o outro agregado alterando, portanto, a sua porosidade em função do resíduo cerâmico ser mais poroso que o resíduo de concreto.

#### 5.4. Microtomografia de raios X

As imagens obtidas no ensaio de microtomografia de raios X estão apresentadas nas Figuras 5.10, 5.11, 5.12 e 5.13, respectivamente, para os concretos REF, 0-40, 75-0 e 75-40. As amostras apresentadas na letra a) retratam a área de interesse reconstruída, apresentando em cinza claro o agregado graúdo, em cinza escuro a argamassa do concreto e em preto os poros seccionados pela área de interesse. As amostras apresentadas na letra b) retratam os poros da amostra, sejam eles da argamassa ou dos agregados graúdos.

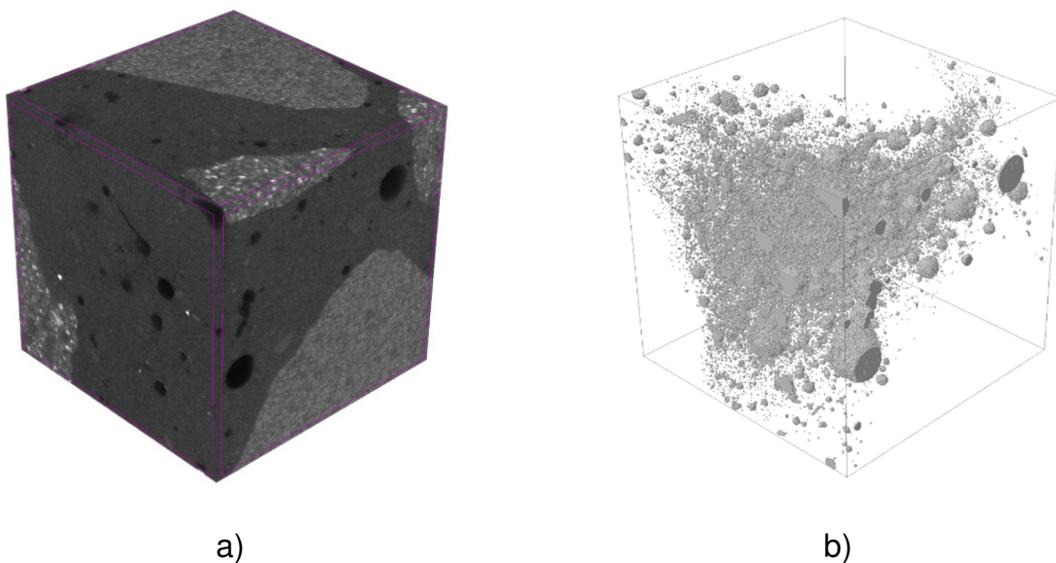


Figura 5.10 - Concreto REF - Imagem reconstruída (a); Poros do concreto (b)

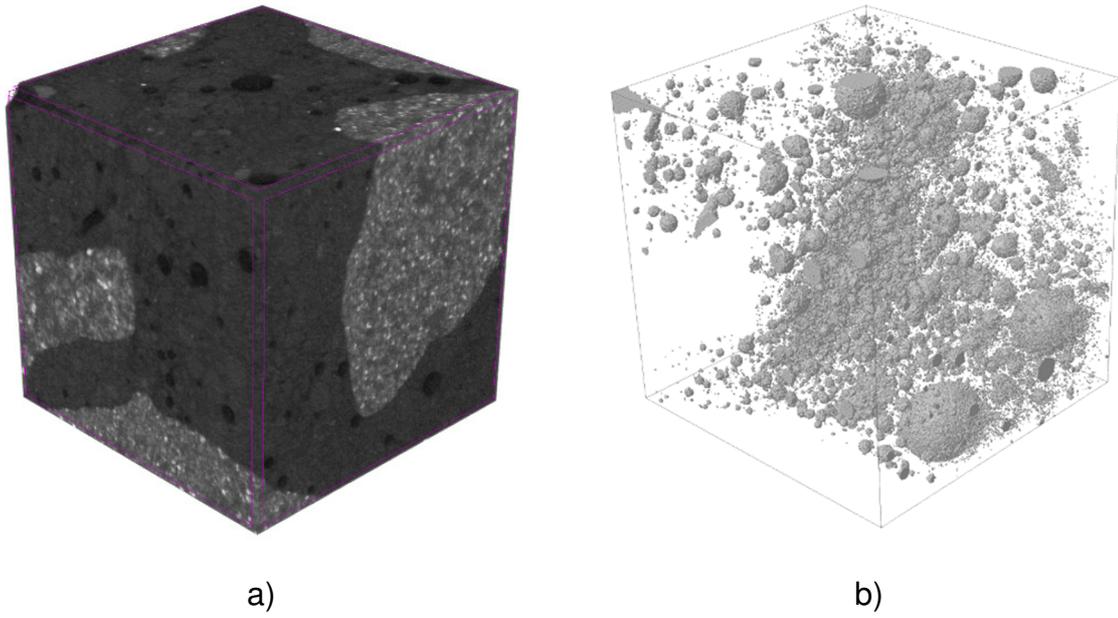


Figura 5.11 - Concreto 0-40 - Imagem reconstruída (a); Poros do concreto (b)

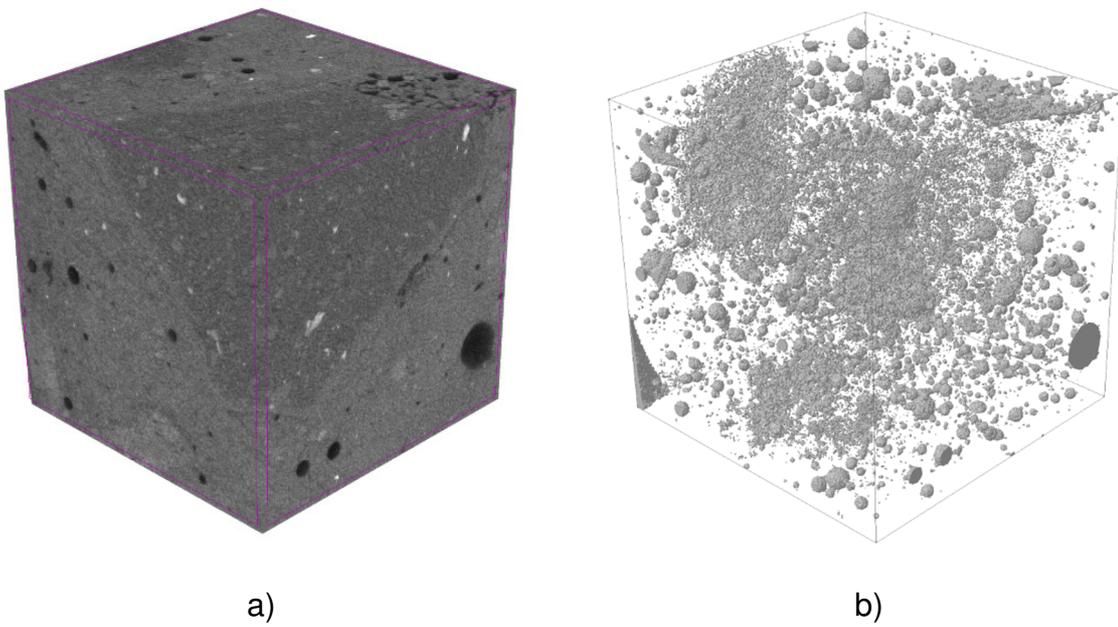


Figura 5.12 - Concreto 75-0 - Imagem reconstruída (a); Poros do concreto (b)

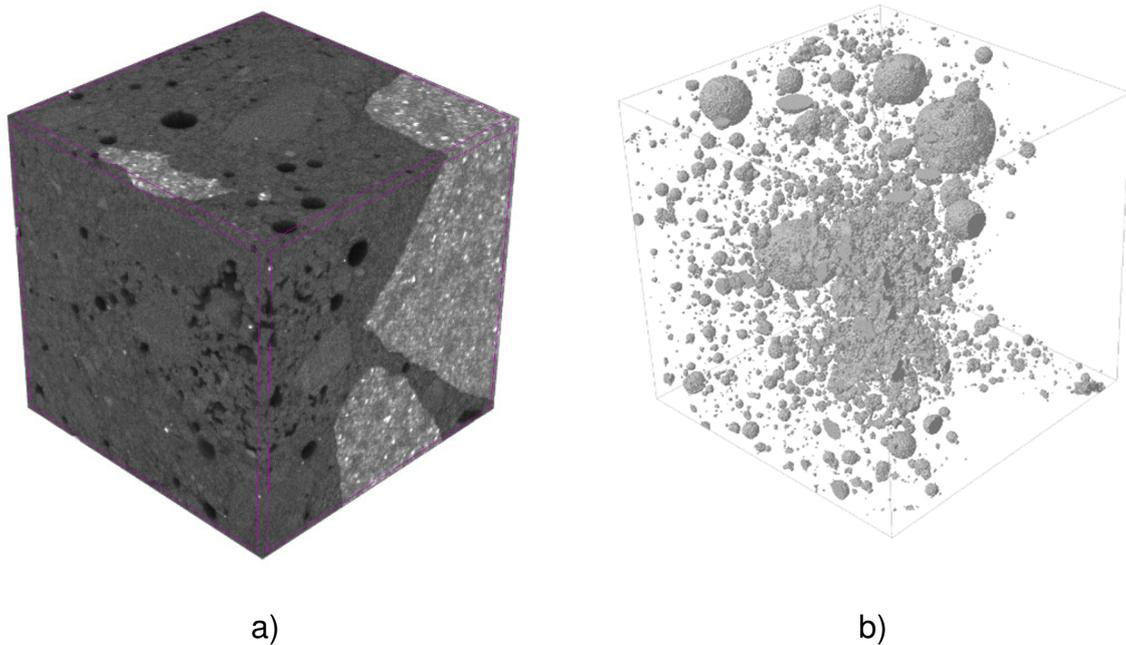


Figura 5.13 - Concreto 75-40 - Imagem reconstruída (a); Poros do concreto (b)

A tabela 5.6 apresenta os dados quantitativos de porosidade, volume dos poros e volume das amostras. Para comparações visuais foram utilizadas áreas de interesse de mesmo tamanho, já para o cálculo da porosidade total foram consideradas as amostras completas (visto que a porosidade percentual é calculada considerando o volume de cada amostra individualmente e poderia retratar melhor o comportamento do todo considerando que quanto maior a área analisada maior a representatividade).

Tabela 5.6 – Porosidade dos concretos observada na microtomografia de Raios X.

<b>Concretos</b>	<b>Volume da amostra (mm<sup>3</sup>)</b>	<b>Volume dos poros (mm<sup>3</sup>)</b>	<b>Porosidade (%)</b>
REF	18827,02	529,19	1,51
0-40	17293,86	301,87	1,75
75-0	11244,63	221,12	1,97
75-40	19875,67	415,34	2,09

O primeiro ponto a ser notado na análise é que o 0-40 apresenta a menor porosidade dentre os analisados. Tal comportamento é esperado devido à maior densidade proporcionada pelo AN (onde há pouco ou nenhum vazio) e pelo cimento

Portland. Resultados semelhantes foram encontrados por Copetti *et al.* [181], Lazzari *et al.* [182] e Schiavon *et al.* [183].

Acerca da diferença dos concretos com e sem CV é possível notar que o concreto 0-40 apresentou não somente uma maior quantidade de poros como também poros maiores que o concreto de referência. É importante, entretanto, que seja feita uma ponderação em relação à representatividade da amostra, pois nas reconstituições são apresentados volumes pequenos para demonstração do formato e distribuição dos poros. Já os dados quantitativos de porosidade foram calculados a partir do volume total da amostra escaneada pelo microtomógrafo. Quando observados os dados da porosidade na Tabela 5.6 do concreto 0-40, que retrata a amostra completa, percebe-se que a porosidade total é maior do que a do concreto de referência. Esse comportamento explica-se pela substituição de um material de alta reatividade por um material cimentício suplementar (MCS) que necessita de reações pozolânicas secundárias para promover o aumento da densidade. A tendência é que, à menores idades, os concretos com maior percentual de MCS tenha maior porosidade que o concreto de referência, mas conforme ocorram as reações de hidratação ao longo do tempo tal diferença vá minimizando. Resultados semelhantes foram obtidos por Yousi *et al.* [162] e Filho *et al.* [160].

No que tange a influência do AR na microestrutura do concreto, fica claro na imagem reconstruída dos dois concretos com 75% de substituição (Figuras 5.12 e 5.13) a presença de poros maiores e em maior quantidade do que os concretos sem substituição, essa diferença pode ser percebida tanto na argamassa quanto no AR em si. Segundo Thomas *et al.* [184] a porosidade do AR é de 12 a 16 vezes maior que a do AN. Essa percepção visual é confirmada pelos dados de porosidade da amostra, aonde os concretos com 75% de AR apresentam um valor 30,4% maior para o concreto sem CV e 19,4% maior para o concreto com CV. Essa mesma conclusão foi observada por Nunes *et al.* [150] e Leite e Monteiro [185].

Quanto à ação da CV combinada com o AR é possível notar que é a combinação que acarreta a maior porosidade dentre as analisadas. Isso ocorre devido ao efeito combinado das duas substituições que aumentam os vazios no material para pequenas idades [12,169]. Entretanto, pode-se notar tanto na microtomografia quanto na ANOVA realizada (Tabela 5.1) que o AR é o maior responsável pelo aumento da porosidade, ou seja, ambos incrementam o volume de vazios, mas o AR tem maior influência do que a CV. Na Figura 5.14 é possível a

relação entre a resistência à compressão, a porosidade e a absorção nos concretos com e sem CV.

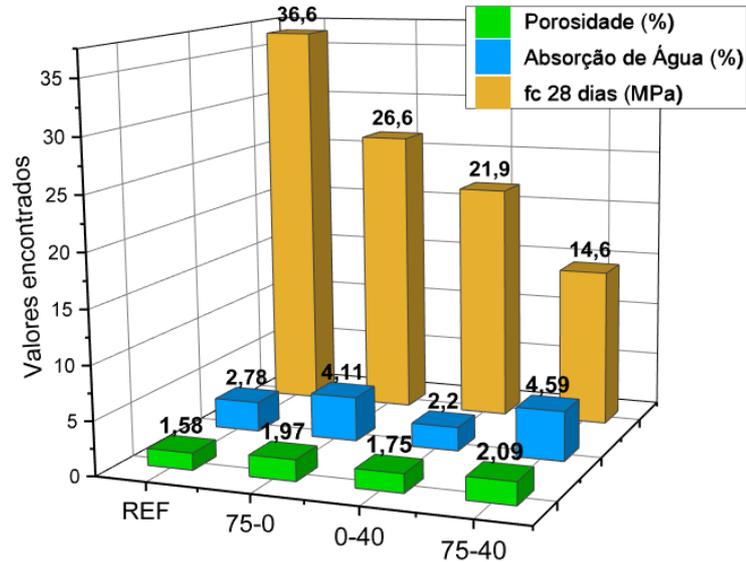


Figura 5.14 Relação entre resistência à compressão, porosidade e absorção por imersão.

Nota-se que, como encontrado por Silva e de Oliveira Andrade [126] e Cantero *et al.* [103], existe uma relação inversamente proporcional entre porosidade e resistência à compressão, ou seja, quanto maior a porosidade do material menor será sua resistência. Também é notável o quanto a presença de 75% de AR impacta em todas as propriedades avaliadas. De acordo com a NBR 15116 [10], o percentual de substituição ideal para concretos de fins estruturais seria de, no máximo, 20% dos agregados. A microtomografia de raios X, nesse contexto, encontra-se alinhada com os demais resultados obtidos.

### 5.5. Penetração de Cloretos

Conforme apresentado anteriormente, a penetração de íons cloreto nos concretos ensaiados foi determinada em cada um dos dois corpos de prova para cada traço aos 28, 56, 84, 112 e 140 dias de imersão. Inicialmente realizou-se uma ANOVA para verificar a significância de cada um dos parâmetros de controle estudados, considerando os dados experimentais, cujos resultados encontram-se apresentados na Tabela 5.7.

Tabela 5.7 - ANOVA para a penetração de cloretos.

Fonte de variação	SQ	GL	QM	Teste F	p-value	Significância
Idade	4,37986	4	1,09497	130,031	0,000000	Sim
Cinza	0,02520	1	0,02520	2,993	0,085180	Não
AR	0,18416	3	0,06139	7,290	0,000116	Sim
Profundidade	95,51967	4	23,87992	2835,814	0,000000	Sim
Idade × cinza	0,26719	4	0,06680	7,932	0,000006	Sim
Idade × AR	0,43935	12	0,03661	4,348	0,000004	Sim
Cinza × AR	0,01156	3	0,00385	0,458	0,712236	Não
Idade × profundidade	4,05719	16	0,25357	30,113	0,000000	Sim
Cinza × profundidade	0,21773	4	0,05443	6,464	0,000065	Sim
AR × profundidade	1,50438	12	0,12537	14,887	0,000000	Sim
Idade × cinza × AR	0,21598	12	0,01800	2,137	0,016174	Sim
Idade × cinza × profundidade	0,24421	16	0,01526	1,813	0,031513	Sim
Idade × AR × profundidade	0,61480	48	0,01281	1,521	0,024751	Sim
AR × cinza × profundidade	0,10704	12	0,00892	1,059	0,396610	Não
Idade × AR × cinza × profundidade	0,35388	48	0,00737	0,875	0,701600	Não
Erro	1,68417	200	0,00842			

SQ: Soma de Quadrados; GL: Graus de Liberdade; QM: Quadrado Médio

Pode-se verificar que, dentre os fatores principais, a profundidade de penetração, a idade e o teor de AR apresentaram-se significativos, nessa ordem. Já o teor de CV adotado não se mostrou significativo. Dentre os efeitos de maior ordem, apenas a interação entre a presença de CV e o teor de AR, juntamente com a profundidade, não se mostraram significativos.

Em seguida foram feitos os perfis de penetração de cloretos, os quais foram traçados utilizando os valores ajustados através do método de regressão não linear em conjunto com a equação 13 da 2ª lei de Fick. Esse processo foi realizado para cada um dos concretos ao longo da profundidade dos corpos de prova ao longo do tempo, cujos resultados estão apresentados nas Figuras 5.15, 5.16, 5.17 e 5.18.

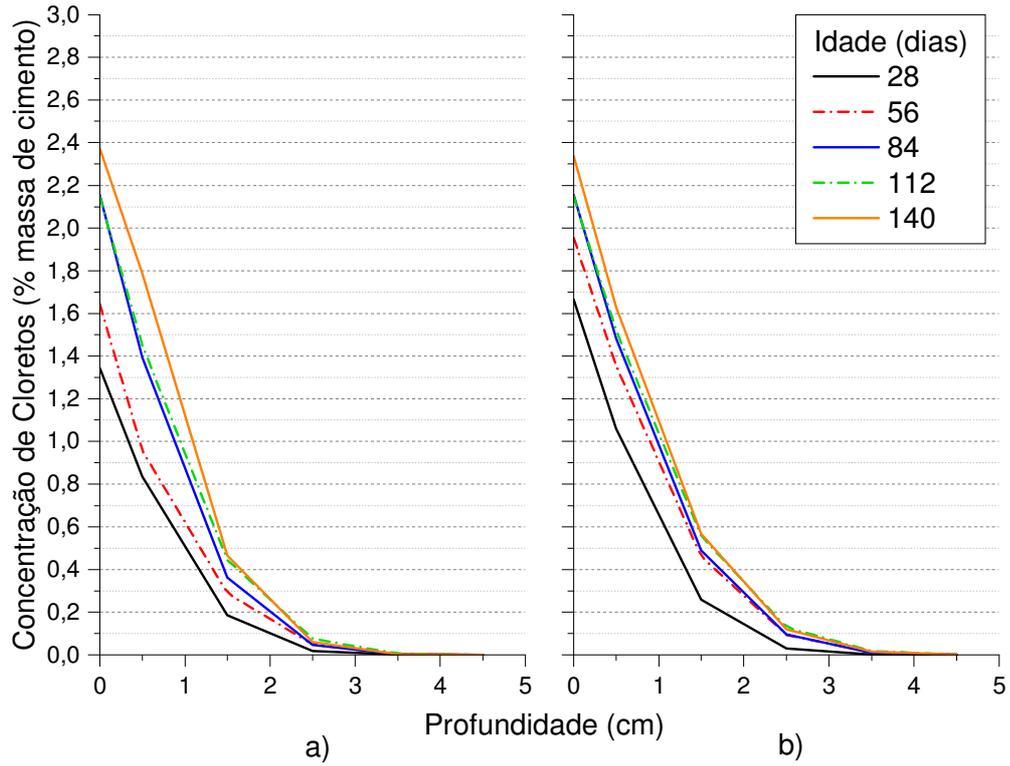


Figura 5.15 – Perfis de concentração de cloretos por profundidade dos concretos REF (a) e 0-40 (b).

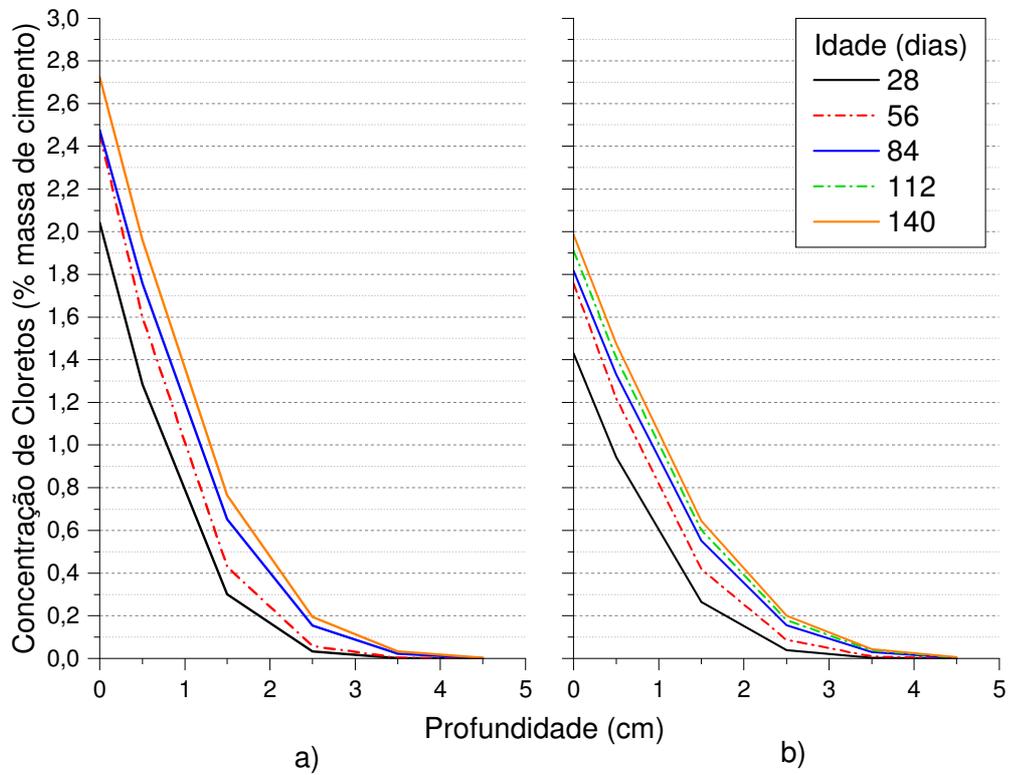


Figura 5.16 - Perfis de concentração de cloretos por profundidade dos concretos 25-0 (a) e 25-40 (b).

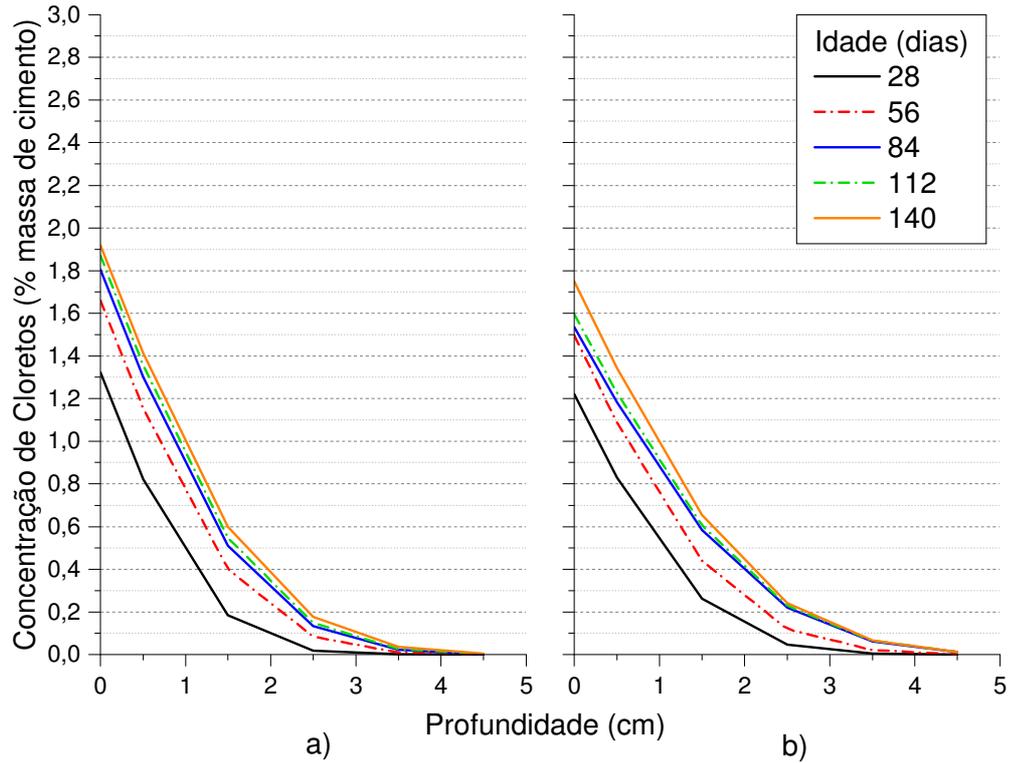


Figura 5.17 – Perfis de concentração de cloretos por profundidade dos concretos 50-0 (a) e 50-40 (b).

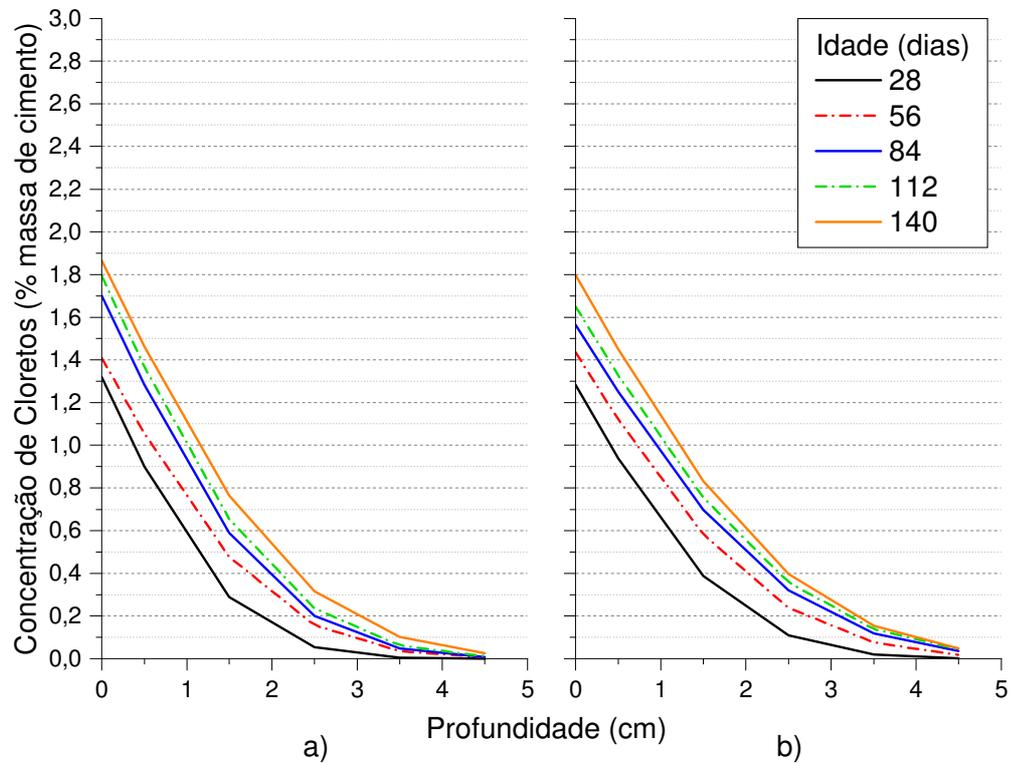


Figura 5.18 – Perfis de concentração de cloretos por profundidade dos concretos 75-0 (a) e 75-40 (b).

Observa-se que à medida que ocorre o incremento da quantidade de AR os teores de íons cloreto vão aumentando com a profundidade do concreto. Pode-se

tomar como exemplo que, na profundidade de 2,5 cm aos 140 dias, o concreto de referência apresenta concentração de cloretos de 0,06% por massa de cimento; já o exemplar com 75-0 o valor é de 0,31% para a mesma idade. Essa tendência é explicada pela maior porosidade do concreto com AR, cuja permeabilidade do concreto permite que os íons de cloreto penetrem no concreto com maior facilidade. Fjendbo *et al.* [186] realizaram experimento semelhante e observaram a relação da porosidade com o ingresso de íons cloreto no concreto. Os autores concluíram que conforme aumenta a porosidade do concreto, também aumenta a concentração de íons cloreto em maiores profundidades assim como o coeficiente de difusão. Costa e Appleton [91] conceituam  $D$  como sendo significativamente influenciado pela qualidade da estrutura de poros dos concretos assim como pelas condições de exposição às quais o concreto está exposto.

Outro ponto observado diz respeito à diferença de concentração no primeiro centímetro do corpo de prova, principalmente nos concretos com menores teores de substituição de AR, cujos mesmos apresentaram altas concentrações em tal profundidade. Isso decorre da menor porosidade e permeabilidade desses concretos, o que dificulta a penetração de cloretos. Moradllo, Sadati e Shekarchi [100] analisaram concretos com sílica ativa em substituição ao cimento em 5%, 7,5%, 10% e 12,5% expostos em área de maré por cinco anos. Os autores traçaram os perfis de penetração de cloretos usando o ajuste da 2ª lei de Fick e observaram que os concretos com menores valores dos coeficientes de difusão ( $D$ ) possuíam também as maiores concentrações superficiais ( $C_s$ ). Song, Lee e Ann [98] fizeram uma revisão bibliográfica acerca dos fatores influentes no transporte de cloretos em concretos expostos a ambientes marinhos de 1 a 64 anos. Para tanto, empregou-se a 2ª lei de Fick para ajustar os perfis de ingresso de cloretos e determinar o  $D$  e a  $C_s$ . Os autores concluíram que tanto  $D$  como  $C_s$  eram variáveis dependentes do tempo, onde  $D$  assume um comportamento de decaimento e  $C_s$  um de crescimento, em função do refinamento da microestrutura do concreto.

Outro ponto a se observar na análise dos perfis é que com o avanço do período de exposição as linhas de concentração dos perfis vão se aproximando, tornando a diferença do ingresso de íons de uma idade para a próxima cada vez menor. Esse comportamento observado é resultado direto da diminuição do coeficiente de difusão ao longo do tempo. Ann, Ahn e Ryou [52] explicam que esse processo decorre do desenvolvimento da hidratação do cimento, que com o passar

do tempo promovem o refinamento da microestrutura e promovem o tamponamento dos poros e a densificação da matriz. Além disso os autores citam que produtos da hidratação do cimento reagem com íons de cloreto livres na matriz do concreto para formar o sal de Friedel, contribuindo assim com a redução da velocidade do transporte de cloretos no concreto.

Acerca da influência da CV, os resultados observados nos perfis de concentração não demonstraram um incremento da resistência ao ingresso dos íons de cloreto até a última data analisada. O comportamento observado na literatura sugere que o incremento do teor de CV diminui o  $D$  dos concretos e, por consequência, a penetração dos íons cloreto. Esse padrão foi observado por Pejovnik *et al.* [127], para substituições de 20% e 50% de cimento por CV, cujos concretos com CV obtiveram tendência de aumento do refino dos poros e, portanto, menor permeabilidade e menor coeficiente de difusão. Também foi destacado que com o aumento do tempo de exposição a diferença do  $D$  dos concretos com CV e sem CV foi crescendo.

Na sequência serão comparados os valores de  $D$  e da  $C_s$  para cada concreto estudado, cujos valores foram obtidos através do melhor ajuste dos perfis obtidos pela 2ª Lei de Fick.

#### 5.5.1. Coeficiente de difusão de cloretos ( $D$ )

Os resultados do  $D$  para todos os concretos analisados ao longo do tempo estão apresentados na Figura 5.19.

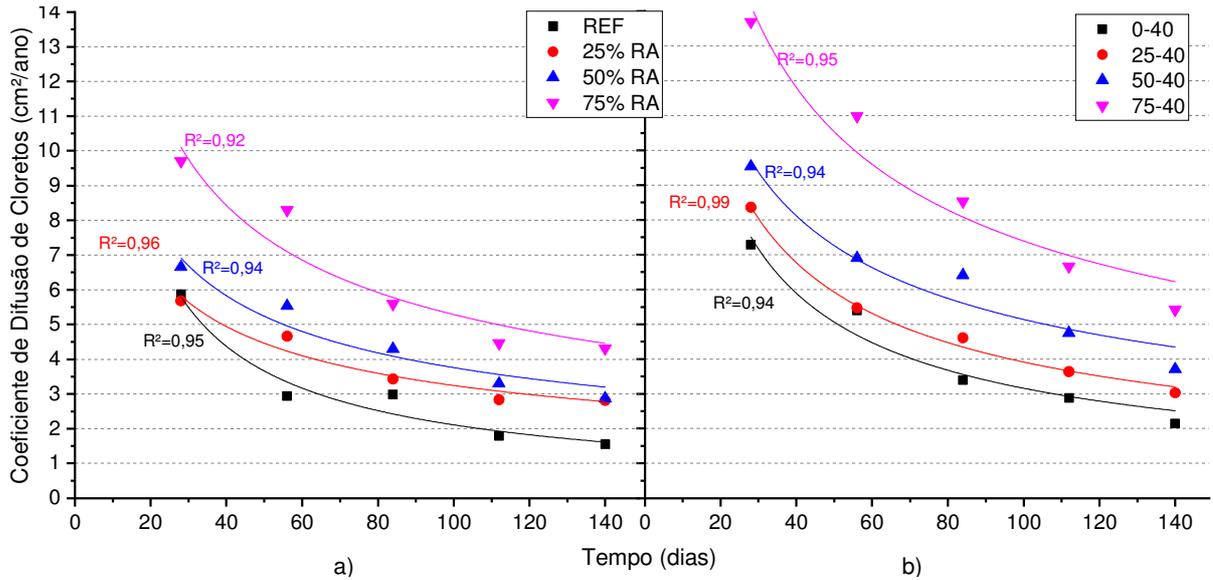


Figura 5.19 - Coeficiente de difusão concretos sem CV (a) e com CV (b) considerando os percentuais de AR.

Observando a Figura 5.19 o primeiro ponto a se observar é a tendência de diminuição do  $D$  em função do tempo de exposição. Esse comportamento pode ser explicado pelo contínuo processo de hidratação do cimento e o conseqüente refinamento dos poros, reduzindo a permeabilidade, o que por sua vez dificulta a penetração dos íons cloreto, conforme observado na literatura [119,187,188].

Acerca do uso do AR pode-se inferir que, quanto maior o teor de AR nos concretos, maior o valor de  $D$ . Essa tendência se explica em decorrência da maior porosidade do AR, o que reflete diretamente na difusibilidade dos íons cloreto na matriz do concreto, em coerência com resultados encontrados na literatura [53,93,99,189]. Pode-se observar essa diferença na Figura 5.19, onde aos 140 dias o concreto 75-0 apresentou um valor de  $D$  igual a  $4,31 \text{ cm}^2/\text{ano}$ , valor esse quase três vezes superior ao de referência ( $1,53 \text{ cm}^2/\text{ano}$ ).

Zhang e Zhao [190] explicam esse comportamento analisando a influência das diversas zonas de transição dos agregados reciclados e a influência nas propriedades mecânicas dos concretos, assim como no coeficiente de difusão. Os autores verificaram que a zona de transição entre o AN e a pasta nova e a zona de transição entre a pasta nova e a pasta antiga do AR tiveram suas espessuras aumentadas conforme o teor de AR foi incrementado. Concluíram, portanto, que o aumento do teor de AR incorreu no aumento do  $D$  dos concretos analisados.

Amorim Júnior *et al.* [191] observaram essa mesma tendência analisando concretos com relação a/c 0,35, 0,45 e 0,55 e teores de substituição de 50% e 100% de AN por AR. Os autores analisaram a porosidade e fizeram um teste de migração de cloretos aos 28 dias e concluíram que o incremento do teor de AR provocou o aumento da porosidade e do coeficiente de absorção capilar dos concretos. Com isso, o D também aumentou conforme o aumento do AR. Os autores complementam salientado que o uso do AR resultou em um decréscimo da VUP em 22% e 40% para os concretos com 50% e 100% de AR; no entanto, cabe ressaltar que os efeitos da substituição do AR se mostraram menores nos concretos com relação água/cimento menor.

Analisando isoladamente o efeito da CV sobre o D na Figura 5.19, nota-se uma tendência de valores de D maiores para as mesmas taxas de substituição de AR. Observa-se também que a diferença entre o D do concreto 25-40 para seu equivalente sem CV é menor do que a diferença entre 50-40 e 75-40 e seus equivalentes.

Outro ponto a ser discutido refere-se ao potencial de decréscimo de D ao longo do tempo. Observando os resultados obtidos no item 5.2 referentes às propriedades mecânicas, percebe-se que os concretos com CV seguiram adquirindo resistência até os 210 dias de cura. Esses resultados podem indicar que os concretos com CV teriam ainda potencial para redução do coeficiente de difusão para valores talvez menores do que os concretos sem CV. Conforme observado na Figura 5.20 de Nath, Sarker e Biswas [159] concretos com altas taxas de pozolana apresentam redução do coeficiente de difusão em idades avançadas. Essa lógica também é apontada por Vasco *et al.* [192], os autores promoveram uma revisão bibliográfica acerca do assunto e analisando dados de 1, 3, 5 e 10 anos concluíram que o uso da CV contribuiu com o decaimento do D dos concretos analisados. De acordo com os autores, esse comportamento decorre da reação pozolânica e da formação do C-S-H secundário promovendo o tamponamento da rede de poros do concreto.

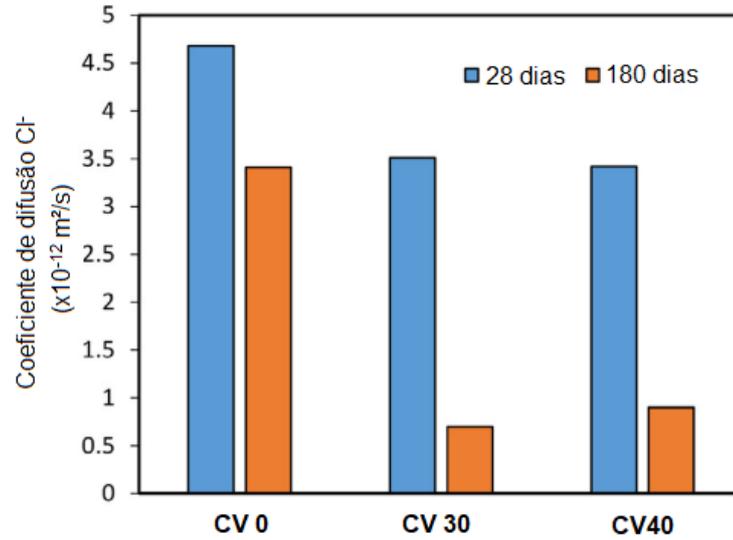


Figura 5.20 – Comparação do coeficiente de difusão em diferentes traços em diferentes idades.

### 5.5.2. Concentração superficial de cloretos ( $C_s$ )

Os resultados referentes ao comportamento da concentração superficial de cloretos nos concretos estão apresentados na Figura 5.21.

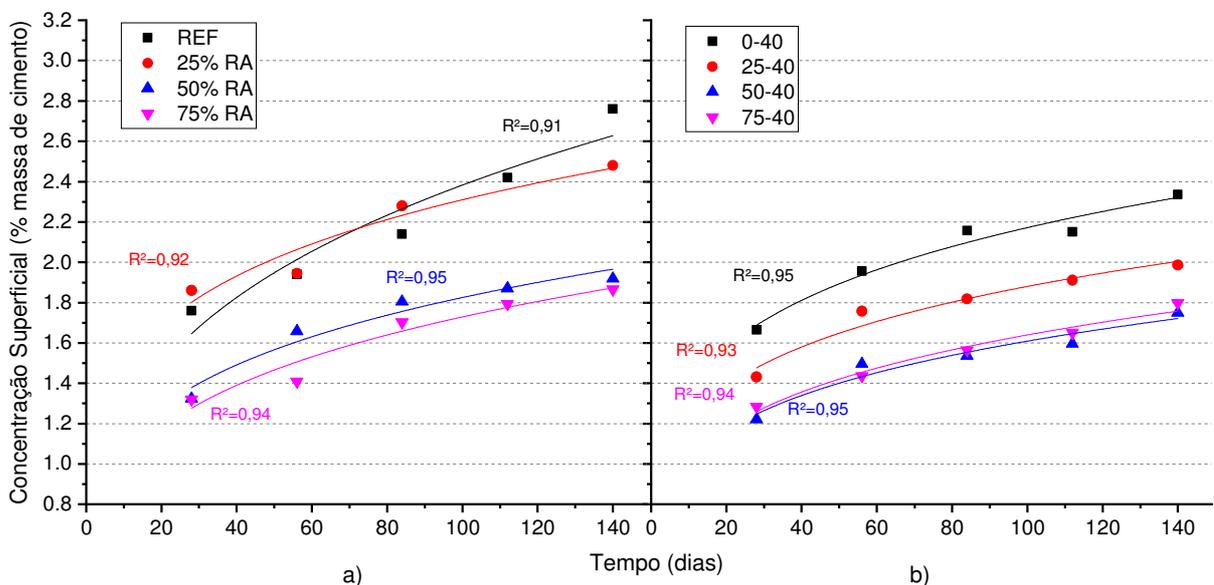


Figura 5.21 – Evolução da concentração superficial nos concretos sem CV e com CV.

Pode-se verificar que existe um padrão de crescimento da  $C_s$  dos concretos analisados ao longo do tempo, conforme encontrado na literatura [53,93,99,189]. É possível observar na Figura 5.21 que o crescimento da  $C_s$  foi mais significativo no concreto de referência. Já para os concretos com AR a tendência de crescimento

diminuiu conforme se aumentou o teor de substituição, tendo os concretos 75-0 e 75-40 as menores  $C_s$  observadas. Isso decorre diretamente da diminuição efetiva da difusão dos íons cloreto na matriz dos concretos, dificultando o ingresso dos íons que ficam concentrados em maior quantidade na camada superficial do concreto. Silvestro, Romano e Dal Molin [152] observaram esse efeito e concluíram que a concentração superficial é maior em concretos menos permeáveis. Vásquez *et al.* [193] também fazem essa relação com a característica dos concretos com maiores teores de AR, por consequência mais permeáveis.

Nota-se que os concretos com CV apresentaram tendência semelhante ao concreto sem CV, os exemplares com maior teor de AR tiveram  $C_s$  menor do que o valor de referência. No entanto, no que tange o efeito da CV percebe-se que aos 140 dias os valores de  $C_s$  dos concretos são no geral ligeiramente inferiores, a única exceção sendo o concreto 25-40, que apresenta um valor de  $C_s$  bem inferior ao exemplar sem CV. Esse comportamento pode ser atribuído ao período relativamente curto de análise, uma vez que a reação pozolânica é um processo que começa a maiores idades, sendo assim o processo de refinamento dos poros e densificação da matriz do concreto podem ser incipientes. No entanto, é possível encontrar na literatura trabalhos que demonstram que, para maiores teores de substituição de cimento por CV, a  $C_s$  tende a ser inferior do que a de concretos sem CV. Cai *et al.* [189] utilizaram modelos de *Machine Learning* para prever a  $C_s$  em diferentes tipos de concretos. Os autores observaram que a  $C_s$  de um concreto com 35% de substituição de CV foi menor do que a de um concreto referência ao longo de 10 anos de projeção. Os autores salientam, no entanto, que são necessários mais estudos para definir um comportamento claro da CV, uma vez que o material possui alta variabilidade.

Dessa forma, percebe-se que há uma relação conjunta entre D e  $C_s$  nos concretos. À medida que o tempo vai passando, os efeitos da hidratação do cimento e do refinamento da matriz do concreto vão se tornando mais presentes e dificultando a penetração dos íons cloretos, diminuindo o D em função do tempo [93,102]. A  $C_s$ , por sua vez, funciona de maneira inversa, pois conforme o tempo passa e o D diminui, menos íons cloreto ingressam no concreto e com isso os mesmos acabam se concentrando nas camadas mais superficiais da amostra, aumentando, por consequência a  $C_s$  [52,157]. Essa tendência pode ser observada

nos perfis de ingresso de cloretos de Fjendbo *et al.* [186], onde concretos nos quais  $D$  é menor apresentam concentração maior nos primeiros centímetros da amostra.

### 5.5.3. Previsão da vida útil dos concretos analisados

Foi realizada uma estimativa para a previsão de vida útil visando comparar o desempenho dos concretos estudados em relação à penetração de cloretos, considerando as especificações preconizadas pela norma de desempenho (NBR 15575 [24] e pela NBR 6118 [33] no que tange a vida útil de projeto (VUP) das estruturas de concreto armado.

Observando as diferentes metodologias abordadas na literatura e apresentadas no item 3.3.3, optou-se por verificar a VUP em dois cenários distintos: o primeiro utilizando a equação 8 que preconiza a variação da  $C_s$  ao longo da VUP até os 50 anos e o segundo cenário adotando um comportamento que segue o proposto pela equação 8, mas considerando que após o 10<sup>o</sup> ano de exposição a  $C_s$  assume um valor constante até o fim da VUP. Essa escolha se deu com base na experiência de outros trabalhos da bibliografia acerca do comportamento da  $C_s$  ao longo do tempo. De acordo com Andrade, Sagrera e Sanjuán [194] a  $C_s$  nos concretos expostos em ambientes marinhos assume um valor constante a partir dos 10 anos de exposição. Tang [195] analisou dados coletados de 10 anos de exposição de concretos com relação água/aglomerante 0,3 a 0,75 e concluiu que, de uma forma geral, até os 5 anos de exposição houve o aumento da  $C_s$ . Porém, após esse período, os valores para tal propriedade se mantiveram inalterados. Lee e Chisolm [196], analisando concretos com resistência à compressão aos 28 dias de 31 a 69,5 MPa em ambientes de agressividade marinha durante 5 anos de exposição natural, concluíram que a  $C_s$  dos concretos apresentou uma rápida estabilização e se manteve constante a partir do período.

Meira, Ferreira e Andrade [53] monitoraram a penetração de cloretos em concretos com três relações água/aglomerante (0,5, 0,57 e 0,65) em ambiente de exposição natural por um período de 12 anos e meio. Os autores observaram que a  $C_s$  teve valores muito variáveis nas primeiras idades, não sendo possível determinar um padrão de comportamento com base nos dados. Em seguida, até os 6 anos de exposição a  $C_s$  teve um período de crescimento acelerado e por fim, até os 12 anos e meio de exposição a concentração também cresceu, porém em taxas menores. Os

autores salientam, no entanto, que ao final do período da análise, a inclinação da curva do crescimento da  $C_s$  sugeriria que o valor máximo ainda não teria sido atingido.

Analisando os relatos observados na literatura e a boa aderência da metodologia para modelagem de  $D$ , definiu-se, portanto, o uso da equação 7 para fazer a simulação do comportamento do  $D$  ao longo do tempo de exposição.

Obtidos os valores de  $C_s$  e de  $D$  foi possível prever a concentração de íons cloreto em uma profundidade  $x$  num tempo  $t$  [ $C(x,t)$ ], possibilitando um cálculo estimativo do tempo de início do processo de corrosão nos concretos, quando a concentração crítica for igual 0,4% de  $Cl^-$  por massa de cimento na profundidade da armadura. Com o tempo de início da corrosão é possível estimar se os concretos analisados satisfazem ou não a VUP, estipulada em 50 anos pela NBR 15575 [24].

As estimativas de vida útil foram simuladas em três situações que representam o comportamento em zonas de agressividade ambiental diferentes: as zonas II, III e IV, diferenciando-se pelo cobrimento mínimo observado pela NBR 6118 [33], correspondente a 25, 35 e 45 mm, respectivamente. Nas Figuras apresentadas na sequência estão destacadas a concentração crítica de 0,4% da massa de cimento, definida pela NBR 6118 [33] como a concentração mínima para início do processo de corrosão. As simulações para os concretos sem CV estão apresentadas na Figura 5.22 para o primeiro cenário e na Figura 5.23 para o segundo cenário.

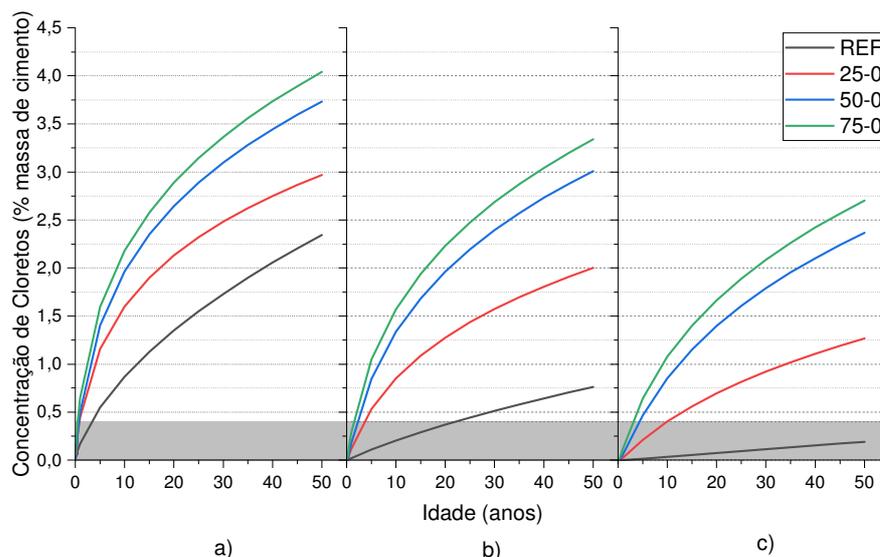


Figura 5.22 – Estimativa vida útil concretos sem substituição de CV primeiro cenário.

a) Zona II; b) Zona III; c) Zona IV.

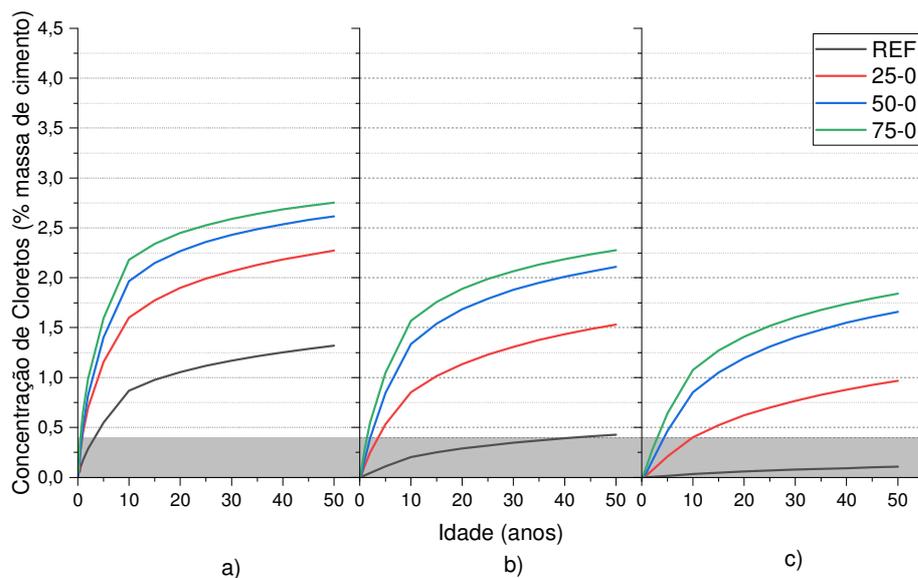


Figura 5.23 – Estimativa vida útil concretos sem substituição de CV segundo cenário.

a) Zona II; b) Zona III; c) Zona IV.

Análise similar foi realizada para os concretos com CV, cujos resultados estão apresentados na Figura 5.24 para o primeiro cenário e 5.25 para o segundo cenário.

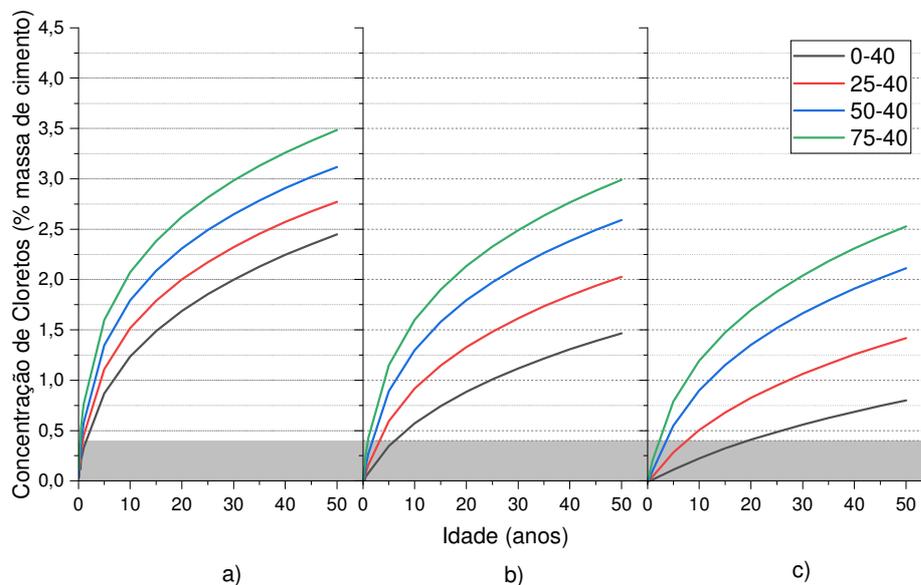


Figura 5.24 - Estimativa vida útil concretos com substituição de CV primeiro cenário.

a) Zona II; b) Zona III; c) Zona IV.

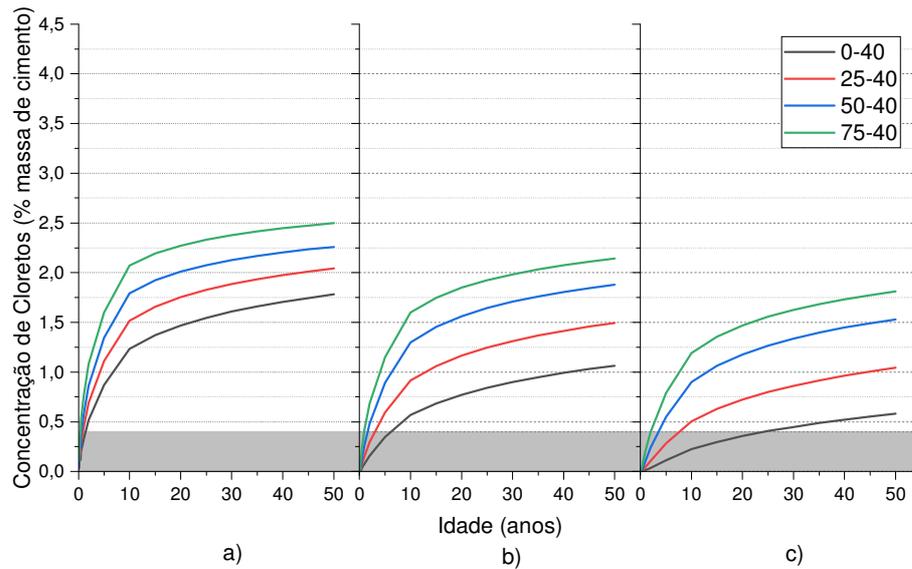


Figura 5.25 - Estimativa vida útil concretos com substituição de CV segundo cenário.

b) Zona II; b) Zona III; c) Zona IV.

Analisando as estimativas, duas situações podem ser destacadas. Inicialmente observa-se um decréscimo da vida útil com o incremento do teor de substituição de AR, cujo comportamento se torna mais evidente com os teores de substituição superiores aos 25%, principalmente devido ao aumento da porosidade dos concretos, acarretando um incremento do D e com isso, maior ingresso de íons cloreto ao longo do tempo. Essa mesma tendência foi observada por Stambaugh, Bergman e Srubar [197] e Silva *et al.* [192], cujos autores utilizaram o AR em teores de substituição de 20%, 30%, 50%, 70% e 100% e verificaram que o incremento do teor de substituição acarreta na redução da VUP dos concretos com AR. No entanto, os autores também salientam que para concretos expostos em zonas de agressividade menos severas a utilização de teores de substituição mais baixos pode ser empregada em conjunto com uma análise das condições ambientais de exposição.

Outro ponto a ser observado é a diferença encontrada entre os resultados nas duas metodologias utilizadas. É possível observar na Figura 5.23 que os concretos que apresentaram maior  $C_s$  nos dados experimentais (REF e 25-0) sofreram a maior redução da concentração na estimativa da vida útil. Por exemplo, no concreto de referência exposto na classe de agressividade III o tempo necessário para o início do processo de corrosão na armadura passou de 22 anos no primeiro cenário para 48 anos no segundo cenário. Porém na Figura 5.25 essa tendência não foi observada

nos concretos com CV, pois os valores de  $C_s$  foram mais próximos e apresentaram um comportamento semelhante nos ajustes realizados pela 2ª Lei de Fick.

Conforme observado na Figura 5.26, a influência da  $C_s$  nos concretos tem um impacto relevante na estimativa da VUP.

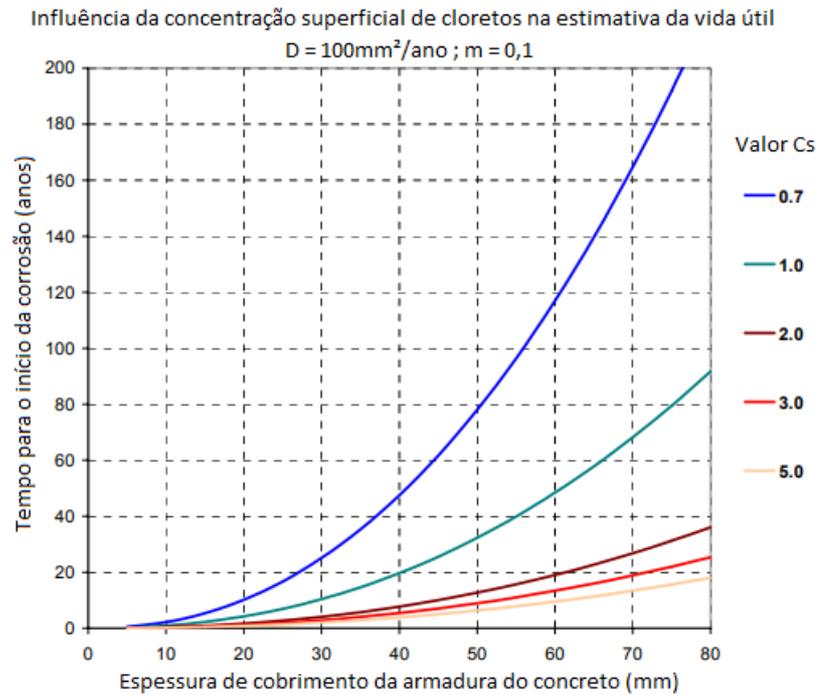


Figura 5.26 – Influência da concentração superficial na estimativa da vida útil das estruturas

Fonte: Lee e Chisolm [196]

Ampliando a discussão acerca da utilização dos concretos com AR e CV utilizou-se a equação da 2ª Lei de Fick para fixar o valor da concentração crítica de 0,4% de Cl<sup>-</sup> e descobrir o cobrimento mínimo ( $x$ ) necessário para que o processo de início da corrosão não aconteça dentro do período mínimo de 50 anos nos concretos. Para isso, empregou-se os mesmos  $D$  e  $C_s$  estimados pelas metodologias apresentadas anteriormente. Na Figura 5.27 tem-se os valores dos concretos com e sem CV para o cenário 1, onde  $D$  e  $C_s$  variam ao longo do tempo e na Figura 5.28 temos os valores dos concretos com e sem CV para o cenário 2, onde  $D$  varia ao longo do tempo e o  $C_s$  assume um valor constante após 10 anos de exposição.

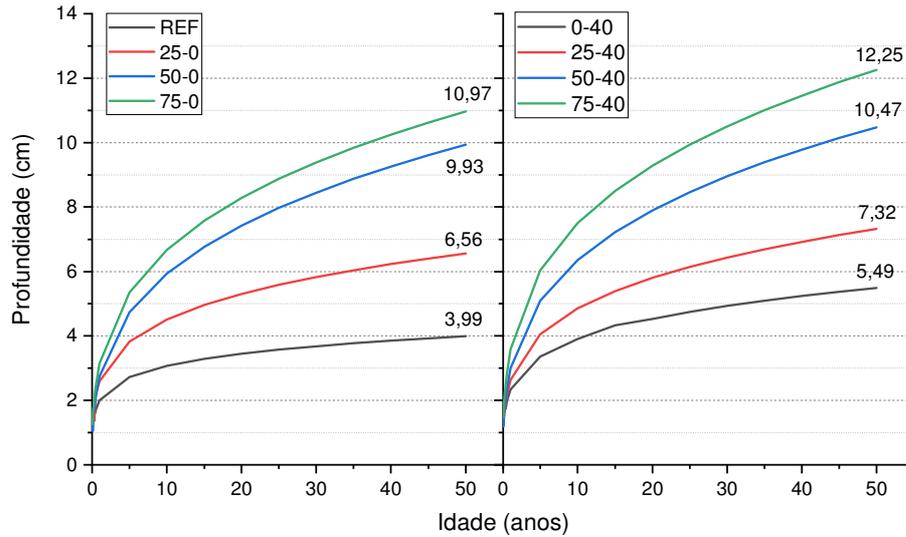


Figura 5.27 – Profundidade da concentração crítica de cloretos – Cenário 1.

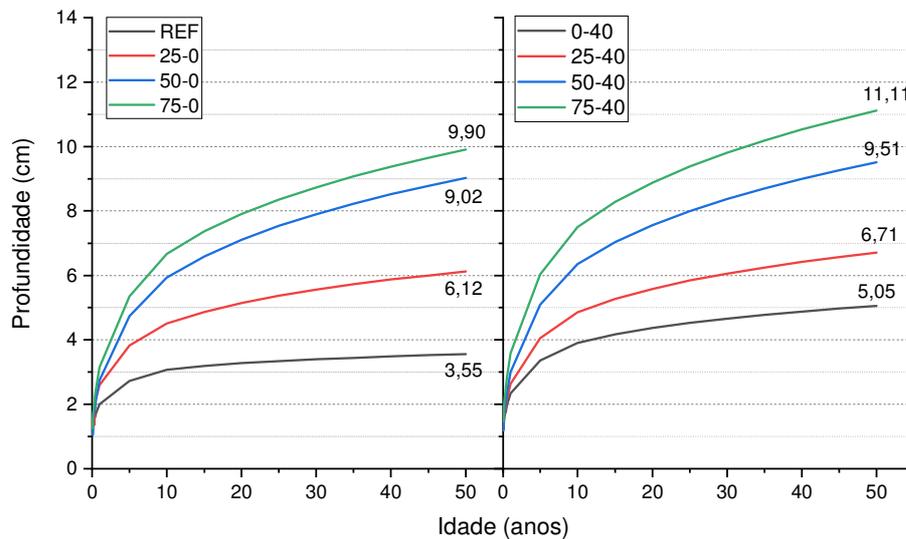


Figura 5.28 – Profundidade da concentração crítica de cloretos – Cenário 2.

O estudo da profundidade crítica é uma estimativa feita com base nos modelos de projeção da VUP dos concretos analisados. Desta forma, vale salientar que os resultados obtidos são aproximações válidas somente para os concretos executados nesse trabalho nas condições de exposição determinadas. Com isso, observando os valores das Figuras 5.27 e 5.28 observa-se que o único concreto que fica dentro dos valores mínimos estipulados pela NBR 6118 é o de referência, cujos concretos com AR apresentaram valores superiores para todos os teores de substituição. Esses resultados sugerem que para viabilizar o uso dos concretos com AR outras medidas devem ser empregadas para promover o aumento da VUP, tais

como: Emprego de inibidores de corrosão na superfície do concreto endurecido, método de extração eletroquímica de cloretos [198,199]. Medeiros e Helene [200] observaram a influência no coeficiente de difusão e na absorção por capilaridade de tratamentos superficiais em concreto. Os autores observaram que o revestimento com poliuretano obteve a maior eficiência, reduzindo em 86% o coeficiente de difusão de cloretos no concreto e estendendo a VUP em 7,8 vezes.

Wang *et al.* [12] em trabalho de revisão bibliográfica acerca do uso do AR sugere sejam estudados processos para melhorar as características intrínsecas do agregado, tais como: Biodeposição, adição de pozolana no traço, remoção da pasta antiga e o uso de fibras naturais. Verian *et al.* [202] sugere o uso de superplastificantes para diminuir a relação a/c do traço dos concretos, assim como a remoção da pasta antiga do AR. Saravanakumar, Abhiram e Manoj [106] estudaram o efeito da pré-imersão do AR em 3 soluções ácidas: Ácido hidrocloreídico, ácido nítrico e ácido sulfúrico. Os autores analisaram a porosidade e a absorção de água antes e depois do tratamento e a resistência à compressão aos 28 dias e concluíram que, o tratamento com ácido sulfúrico reduziu em 31,4% a absorção de água do AR e aumentou em 20% o desempenho da resistência à compressão do concreto.

Aprofundar o conhecimento nos tipos de tratamentos para aprimorar as características dos AR são fundamentais para a sua viabilidade, uma vez que, observando a Figura 5.27 e 5.28, observa-se que, para os padrões atuais de uso do concreto para fins estruturais, o aumento da espessura de cobrimento conforme a Figura seria inviável para o uso em larga escala do concreto com AR.

A Figura 5.29 sumariza a relação existente entre as propriedades ligadas à durabilidade e a influência da CV e do teor de AR nas mesmas. Pode-se verificar que o incremento do teor de AR implica no aumento da porosidade e conseqüentemente no aumento do coeficiente de difusão (D) e do coeficiente de carbonatação (k). No entanto, deve-se fazer uma ressalva acerca da representação do k: o valor determinado tem função comparativa entre os concretos analisados neste trabalho, uma vez que os dados foram obtidos através de um ensaio de carbonatação acelerada. Seu valor não pode ser empregado em análises de VUP por não representar fatores importantes como: local de exposição, concentração de CO<sub>2</sub>, temperatura e umidade ambientais, entre outras variáveis.

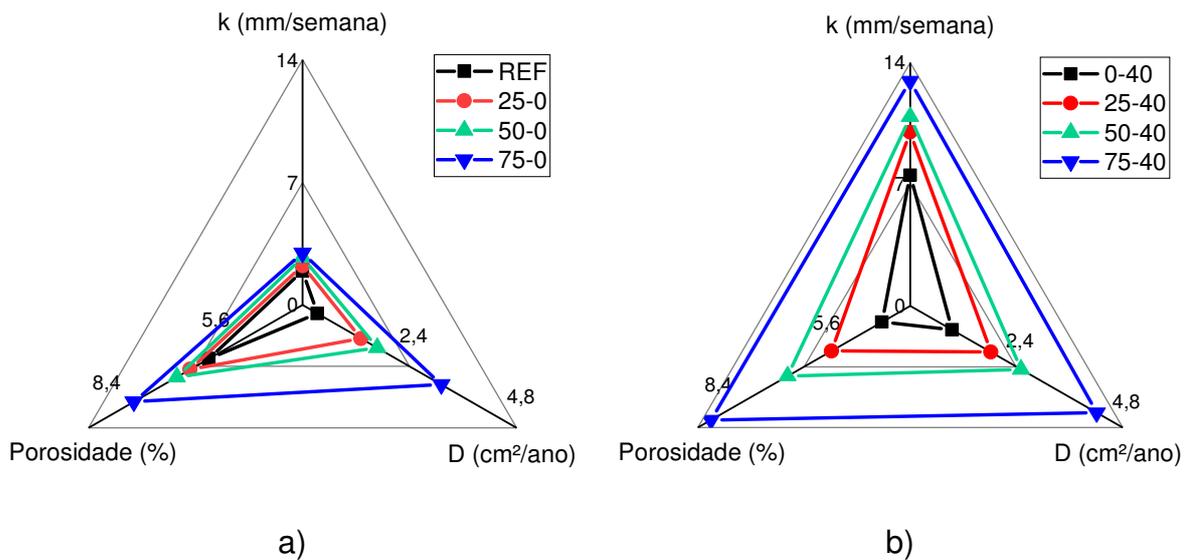


Figura 5.29 - Relação entre as propriedades de durabilidade dos concretos e a porosidade sem CV (b) com 40% de CV.

Considerando a influência da CV no comportamento dos concretos, percebe-se que para todos os teores de substituição o efeito da cinza foi prejudicial, mesmo apresentando porosidade inferior para alguns concretos, como o 0-40 e o 25-40. Conforme explicado anteriormente, a CV tem papel preponderante na velocidade de carbonatação, aumentando, por consequência, o coeficiente de carbonatação do concreto. O coeficiente de difusão também foi afetado negativamente, pois até os 140 dias de análise não se observou o efeito esperado da CV na redução da permeabilidade, apresentando resultados ligeiramente inferiores aos dos concretos sem CV, provavelmente em função do teor de substituição adotado.

## 6. CONCLUSÕES

### 6.1. Considerações finais

Com os resultados obtidos neste trabalho pode-se inferir que a utilização do AR em substituição ao AN e a utilização de CV em substituição ao cimento Portland, acarretam significativas alterações no comportamento do concreto. Salienta-se que os resultados observados neste trabalho são válidos para os materiais e os métodos empregados, alterações na composição do AR assim como alterações químicas na CV devem ser observadas para trabalhos futuros.

De forma geral, observou-se uma relação entre o aumento do teor de AR e o decréscimo das propriedades físico-mecânicas dos concretos. Os concretos com AR apresentaram resultados inferiores com relação aos concretos para todos os teores de substituição analisados e para todas as idades. O concreto com 75% de AR, por exemplo, apresentou valores de  $f_c$  e  $E_c$  inferiores ao concreto de referência iguais a 23,5% e 34,6% aos 28 dias, respectivamente. Esse comportamento é explicado pelo aumento da porosidade e da permeabilidade conferida pela presença do AR.

Sobre as propriedades mecânicas dos concretos com CV, pode-se afirmar que para 40% de substituição de CV os valores de resistência à compressão e módulo de elasticidade foram inferiores aos concretos sem a presença do material. Essa tendência se apresenta principalmente nas primeiras idades de análise, devido ao baixo teor de cimento, cujo mesmo é reativo desde as primeiras idades (CP V-ARI). Além disso, o valor de 40% de substituição é considerado limítrofe para que o concreto seja considerado de alto teor de CV. Todavia, a maiores idades a reação pozolânica foi mais pronunciada nos concretos com CV para ambas as propriedades analisadas. Tanto para o módulo quanto para resistência à compressão ocorre uma tendência de estabilização nos concretos sem CV, enquanto que para concretos

com CV observou-se um aumento dos valores tanto de  $f_c$  quanto de  $E_c$  para maiores idades.

Acerca do efeito observado na velocidade de carbonatação dos concretos pode-se constatar que a influência da substituição do AN por AR provou-se prejudicial. O aumento do teor de AR incorreu diretamente no aumento da profundidade da frente carbonatada. Esse efeito é decorrente da porosidade dos AR, o que permite que o  $\text{CO}_2$  ingresse com maior velocidade. A profundidade de carbonatação do concreto 75-0 foi, aos 210 dias, 2,2 vezes maior do que o concreto referência. Com relação ao efeito da CV observa-se que a substituição do cimento ocasionou em um aumento expressivo da velocidade de carbonatação. Aos 180 dias o concreto 0-40 apresentou profundidade de carbonatação 3,6 vezes maior do que o concreto de referência. Esse comportamento é explicado pela diminuição da oferta de cimento nos concretos, reduzindo a sua reserva alcalina, provocando o aumento da velocidade de carbonatação nos concretos com CV.

No que diz respeito à resistência a penetração de íons cloreto, o AR teve um comportamento semelhante àquele apresentado para as propriedades mecânicas e para a carbonatação. A maior porosidade e permeabilidade dos concretos favoreceram o ingresso dos íons cloreto ao longo do tempo. À medida que houve o incremento do teor de AR aumentou também o valor de D do concreto. No que tange o uso da CV verificou-se um aumento do D para os mesmos teores de substituição de AR aos 140 dias. Nota-se, no entanto, que a tendência de redução do D ao longo do tempo é coerente com a reação pozolânica nos concretos com CV. Levando em consideração o ganho de resistência observado nas propriedades mecânicas até os 210 dias, presume-se que ainda existe potencial para a redução do D ao longo do tempo.

Os resultados obtidos na análise de vida útil dos concretos demonstraram a influência que a  $C_s$  e o D têm na determinação do início do processo de corrosão em função do tempo de exposição dos concretos. Como observado, independentemente da metodologia utilizada, os concretos com AR e com CV apresentaram um menor período para o início da corrosão, com maior redução nos concretos com maiores teores de substituição de AR. Deve-se ressaltar, no entanto, que o período de análise de D e  $C_s$  no trabalho foram curtos, o efeito da variação no médio e longo

prazo desses parâmetros é fundamental para a observação do comportamento do concreto.

Apesar dos efeitos prejudiciais apresentados é importante salientar que existe amplo espaço para potencializar a utilização desse material. Observando os ensaios realizados percebe-se que os concretos com 25% de AR obtiveram resultados muito semelhantes aos do concreto de referência. Esses resultados corroboram aquilo que outros autores já comprovaram [203–205]. Ao se empregar o AR deve-se ajustar o teor de substituição para uma condição de projeto e/ou exposição requeridas. Além disso, os efeitos negativos podem ser minimizados com o auxílio de outros materiais ou técnicas de valorização do agregado. Em função da cultura da indústria de construção no Brasil trabalhar com a idade de 28 dias para estabelecimento das propriedades mecânicas do concreto, o emprego de teores elevados substituição de CV se mostra como inexecutável. No entanto, em menores teores de substituição resultados promissores são observados na literatura [29,178], tanto na redução no impacto das perdas das propriedades mecânicas quanto no incremento das propriedades relacionadas a durabilidade, como menor porosidade e permeabilidade.

## **6.2. Sugestões para trabalhos futuros**

Com o objetivo de colaborar com o aprofundamento da pesquisa nesta área, são sugeridos os seguintes temas para futuros trabalhos:

- investigar o comportamento dos concretos com AR em situação de exposição à ambientes marinhos em condição natural.
- investigar o comportamento dos concretos com AR no que se refere a penetração de cloretos no longo prazo.
- analisar o emprego de tratamentos de valorização do AR a fim de aprimorar as propriedades intrínsecas do material.
- investigar a influência da temperatura, das fissuras e da umidade em concretos com AR em exposição natural a cloretos.

- observar a influência de diferentes tipos de tratamentos superficiais e revestimento em concretos com AR em exposição natural à penetração de íons cloreto.
- observar a interação entre AR e CV no que tange as propriedades físicas com foco específico na microestrutura dos concretos.
- investigar o comportamento de concretos com AR e com menores teores de CV.

## 7. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- [1] European Commission, European Green Deal, (2021).
- [2] United Nations Department of Economic and Social Affairs, Population Division (2022). **World Population Prospects 2022: Summary of Results**. UN DESA/POP/2022/TR/NO. 3.
- [3] HILLS, T.; FLORIN, N.; FENNELL, P. Decarbonising the cement sector: A bottom-up model for optimising carbon capture application in the UK. **Journal of Cleaner Production**. 139 (2016) 1351–1361. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2016.08.129>.
- [4] HASANBEIGI, A.; PRICE, M L.; LIN, E. Emerging energy-efficiency and CO<sub>2</sub> emission-reduction technologies for cement and concrete production: A technical review. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**. 16 (2012) 6220–6238. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2012.07.019>.
- [5] HE, Z.; ZHU, X.; WANG, J.; MU, M.; WANG, Y. Comparison of CO<sub>2</sub> emissions from OPC and recycled cement production. **Construction and Building Materials**. 211 (2019) 965–973. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2019.03.289>.
- [6] JORDAL, K.; VOLDSUND, M.; STØRSET, S.; FLEIGER, K.; RUPPERT, J.; SPÖRL, R.; HORNBERGER, M.; CINTI, G. CEMCAP – making CO<sub>2</sub> capture retrofittable to cement plants. **Energy Procedia**. 114 (2017) 6175–6180. <https://doi.org/10.1016/j.egypro.2017.03.1755>.
- [7] MEHTA, K.; MONTEIRO, P. Concreto: microestrutura, propriedades e materiais. **IBRACON**. 2 ed. São (2014).

- [8] NEVILLE, A. **Propriedades do Concreto**. 1981.
- [9] BRASIL. Conselho Nacional de Meio Ambiente. (2002) **Resolução CONAMA nº. 307**, de 5 de julho de 2002. Estabelece diretrizes, critérios e procedimentos para a gestão de resíduos da construção civil. Ministério do Meio Ambiente: CONAMA, 2002. Diário Oficial da União. Brasília, DF: Imprensa Oficial.
- [10] \_\_\_\_\_. NBR 15116: Agregados reciclados para uso em argamassas e concretos de cimento Portland - Requisitos e métodos de ensaios, Rio de Janeiro, ABNT, 2021.
- [11] HUANG, B.; WANG, X.; KUA, H.; GENG, Y.; BLEISCHWITZ, R. Construction and demolition waste management in China through the 3R principle. **Resources, Conservation and Recycling**. 129 (2018) 36–44. <https://doi.org/10.1016/j.resconrec.2017.09.029>.
- [12] WANG, L.; YAN, Q.; FU, B.; KASAL, A. A Comprehensive Review on Recycled Aggregate and Recycled Aggregate Concrete. **Resources, Conservation and Recycling**. 171 (2021). <https://doi.org/10.1016/j.resconrec.2021.105565>
- [13] ALEXANDRIDOU, C.; ANGELOPOULOS, G.; COUTELIERIS, F. Mechanical and durability performance of concrete produced with recycled aggregates from Greek construction and demolition waste plants. **Journal of Cleaner Production**. 176 (2018) 745–757. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2017.12.081>.
- [14] FAELLA, C.; LIMA, C.; MARTINELLI, E.; PEPE, M.; REALFONZO, R. Mechanical and durability performance of sustainable structural concretes : An experimental study. **Cement and Concrete Composites**. 71 (2016) 85–96. <https://doi.org/10.1016/j.cemconcomp.2016.05.009>.
- [15] ALI, B.; QURESHI, L.; SHAH, S.; REHMAN, S.; HUSSAIN, I.; IQBAL, M. A step towards durable, ductile and sustainable concrete: Simultaneous incorporation of recycled aggregates, glass fiber and fly ash. **Construction and Building Materials**. 251 (2020) 118980. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2020.118980>.

- [16] LIANG, C.; CAI, Z.; WU, H.; XIAO, J.; ZHANG, Y.; MA, Z. Chloride transport and induced steel corrosion in recycled aggregate concrete: A review. **Construction and Building Materials**. 282 (2021) 122547. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2021.122547>.
- [17] SHI, Y.; LI, J.; ZHANG, J.; LI, W.; CHONG, L.; XIE, Z. Performance enhancement of recycled concrete aggregate - A review. **Journal of Cleaner Production**. 112 (2016) 466–472. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2015.08.057>.
- [18] ZHAO, Y.; DONG, J.; WU, Y.; WANG, H.; LI, X.; XU, Q. Steel corrosion and corrosion-induced cracking in recycled aggregate concrete. **Corrosion Science**. 85 (2014) 241–250. <https://doi.org/10.1016/j.corsci.2014.04.028>.
- [19] RASHEEDUZZAFAR.; AL-SAADOUN, S.; AL-GAHTANI, A.; DAKHIL, F. Effect of tricalcium aluminate content of cement on corrosion of reinforcing steel in concrete. **Cement and Concrete Research**. 20 (1990) 723–738. [https://doi.org/10.1016/0008-8846\(90\)90006-J](https://doi.org/10.1016/0008-8846(90)90006-J).
- [20] GENG, J.; EASTERBROOK, D.; LIU, Q.; LI, L. Effect of carbonation on release of bound chlorides in chloride-contaminated concrete. **Magazine of Concrete Research**. 68 (2016) 353–363. <https://doi.org/10.1680/jmacr.15.00234>.
- [21] MAZURANA, L. Captura de CO<sub>2</sub> em argamassas de revestimento através da carbonatação. 2019. Dissertação (Mestrado em Tecnologias Ambientais) - Universidade Tecnológica Federal do Paraná, Medianeira, 2019.
- [22] POSSAN, E.; FELIX, E.; THOMAZ, W. CO<sub>2</sub> uptake by carbonation of concrete during life cycle of building structures. **Journal of Building Pathology and Rehabilitation**. 1 (2016) 1–9. <https://doi.org/10.1007/s41024-016-0010-9>.
- [23] CASCUDO, O. Inspeção e Diagnóstico de Estrutura de Concreto com Problemas de Corrosão de Armadura. **Concreto: Ensino, Pesquisa e Realizações**. (2005).

- [24] \_\_\_\_\_. NBR 15575: Edificações habitacionais: desempenho. Rio de Janeiro, ABNT, 2020.
- [25] LOPES, R.; OLIVEIRA, A.; CASCUDO, O. Service life prediction models of concrete structures subjected to the initiation of reinforcing steel corrosion by chloride ions: contribution to the state of the art through systematic literature review – Part 1. **Revista Materia**. 27 (2022). <https://doi.org/10.1590/1517-7076-RMAT-2022-44821>.
- [26] CHOUSIDIS, N.; RAKANTA, E.; IOANNOU, I.; BATIS, G. Mechanical properties and durability performance of reinforced concrete containing fly ash. **Construction and Building Materials**. 101 (2015) 810–817. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2015.10.127>.
- [27] CHEN, X.; ZHANG, D.; CHENG, S.; XU, X.; ZHAO, C. Sustainable reuse of ceramic waste powder as a supplementary cementitious material in recycled aggregate concrete: Mechanical properties , durability and microstructure assessment. **Journal of Building Engineering**. 52 (2022).
- [28] ÇAKIR, Ö.; DILBAS, H. Durability properties of treated recycled aggregate concrete : Effect of optimized ball mill method. **Construction and Building Materials**. 268 (2021). <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2020.121776>.
- [29] SAHA, A. Effect of class F fly ash on the durability properties of concrete. **Sustainable Environment Research**. 28 (2018) 25–31. <https://doi.org/10.1016/j.serj.2017.09.001>.
- [30] RUSSO, N.; LOLLINI, F. Effect of carbonated recycled coarse aggregates on the mechanical and durability properties of concrete. **Journal of Building Engineering**. 51 (2022) 104290. <https://doi.org/10.1016/j.job.2022.104290>.
- [31] KARA, P.; MAEIJER, D.; CRAEYE, B.; SNELLINGS, R.; KAZEMI-KAMYAB, H.; LOOTS, M.; JANSSENS, K.; NUYTS, G. Effect of ultra-fine fly ash on concrete performance and durability. **Construction and Building Materials**. 263 (2020) 120493. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2020.120493>.

- [32] TORGAL, F.; MIRALDO, S.; LABRINCHA, J.; BRITO, J. An overview on concrete carbonation in the context of eco-efficient construction: Evaluation, use of SCMs and / or RAC. **Construction and Building Materials**. 36 (2012) 141–150. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2012.04.066>.
- [33] \_\_\_\_\_. NBR 6118: Projeto de estruturas de concreto – procedimento. Rio de Janeiro, ABNT, 2014.
- [34] ANDRADE, J. J. O. Contribuição da vida útil das estruturas de concreto armado atacadas pela corrosão de armaduras: iniciação por cloretos. 2001, 256f. Tese (Doutorado em Engenharia) – Curso de Pós-graduação em Engenharia Civil, Universidade Federal do Rio grande do Sul, Porto Alegre, 2001.
- [35] POSSAN, E. Modelagem da carbonatação e previsão de vida útil de estruturas de concreto em ambiente urbano. 2010. 263 f. Tese (Doutorado) - Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2010.
- [36] DAL MOLIN, D.; MASUERO, A.; ANDRADE, J.; POSSAN, E.; MASUERO, J.; MENNUCCI, M. Contribuição à Previsão da Vida Útil de Estruturas de Concreto, in: **Avaliação de Desempenho de Tecnologias Construtivas Inovadoras: Materiais e Sustentabilidade**, Editora Scienza, 2016: pp. 223–270. <https://doi.org/10.5935/978-85-5953-005-6.2016c008>.
- [37] AMERICAN CONCRETE INSTITUTE. ACI 201: guide to durable concrete. ACI manual of concrete practice, Detroit, 1992, part 1, 39p.
- [38] COMITE EURO-INTERNATIONAL DU BETON. CEB 183: durable concrete structures. Bulletin d' Information, Suecis, n. 183, may 1992, 112p.
- [39] COMITE EURO-INTERNATIONAL DU BETON. CEB 238: new approach to durability design: an example for carbonation induced corrosion. Bulletin d'Information, Suecis, n. 238, may 1997, 138p.
- [40] EUROPEAN COMMITTEE FOR STANDARDIZATION - EUROCODE 2. Design of concrete structures: General rules and rules for buildings - BS EN 1992-1 1:2004. British-Adopted European Standard, 23-Dec-2004, 230p.

- [41] Fédération Internationale Du Béton (FIB), FIB 34: Model code for service life design , (2006).
- [42] ASIAN CONCRETE MODEL CODE – ACCM. International Committee on Concrete Model Code for Asia, 2006. Disponível em: <<http://www.iccm.org/index.htm>>.
- [43] INTERNATIONAL ORGANIZATION FOR STANDARDIZATION. General Principles on the Design of Structures for Durability. ISO 13823. Geneva: ISO/TC, 2008.
- [44] INTERNATIONAL ORGANIZATION FOR STANDARDIZATION. Buildings and constructed assets - Service life planning: General principles. International Organization for Standardization - General principles and framework . ISO 15686: Part 1. jun, 2011, 51p.
- [45] BRITISH STANDARD INSTITUTION. BS 7543: Guide to Durability of Buildings and Building Element, Products and Components. London, 2003.
- [46] European Standards, EN 206-1: Concrete. Specification, performance, production and conformity, (2013).
- [47] Fédération Internationale Du Béton (FIB), FIB 53: Model Code for Structural Concrete Textbook on behaviour, design and performance, (2010).
- [48] International Zinc Association (IZA), O custo da corrosão no Brasil, (2015).
- [49] HOU, B.; LI, X.; MA, X.; DU, C.; ZHANG, D.; ZHENG, M.; XU, W.; LU, D.; MA, F. The cost of corrosion in China. **Npj Materials Degradation**. (2017). <https://doi.org/10.1038/s41529-017-0005-2>.
- [50] Association for Materials Protection and Performance (AMPP), Assessment of the global cost of corrosion , (2016).
- [51] PAPADAKIS, V. Effect of supplementary cementing materials on concrete resistance against carbonation and chloride ingress. **Cement and Concrete Reserach**. 30 (2000) 291–299.

- [52] ANN, K.; AHN, J.; RYOU, J. The importance of chloride content at the concrete surface in assessing the time to corrosion of steel in concrete structures. **Construction and Building Materials**. 23 (2009) 239–245. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2007.12.014>.
- [53] MEIRA, G.; FERREIRA, P.; ANDRADE, C. Long-Term Chloride Accumulation on Concrete Surface in Marine Atmosphere Zone-Modelling the Influence of Exposure Time and Chloride Availability in Atmosphere. **Corrosion and Materials Degradation**. 3 (2022) 349–362. <https://doi.org/10.3390/cmd3030021>.
- [54] BERTOLINI, L.; ELSENER, B.; PEDEFERRI, P.; POLDER, R. **Corrosion Handbook: Corrosive Agents and Their Interaction with Materials**, 2004.
- [55] WANG, J.; ZHANG, J.; CAO, D.; DANG, H. ; DING, B. Comparison of recycled aggregate treatment methods on the performance for recycled concrete. **Construction and Building Materials**. 234 (2020) 117366. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2019.117366>.
- [56] SILVA, R.; NEVES, R.; BRITO, J.; DHIR, R. Carbonation behaviour of recycled aggregate concrete. **Cement & Concrete Composites**. 62 (2015) 22–32. <https://doi.org/10.1016/j.cemconcomp.2015.04.017>
- [57] SHAH, V.; SCRIVENER, K.; BHATTACHARJEE, B.; BISHNOI, S. Cement and Concrete Research Changes in microstructure characteristics of cement paste on carbonation. **Cement and Concrete Research**. 109 (2018) 184–197. <https://doi.org/10.1016/j.cemconres.2018.04.016>.
- [58] KELLOUCHE, Y.; BOUKHATEM, B.; TAGNIT-HAMOU, M. Exploring the major factors affecting fly-ash concrete carbonation using artificial neural network. **Neural Computing and Applications**. 31 (2019) 969–988. <https://doi.org/10.1007/s00521-017-3052-2>.
- [59] LEEMANN, A.; MORO, F. Carbonation of concrete: the role of CO<sub>2</sub> concentration , relative humidity and CO<sub>2</sub> buffer capacity. **Materials and Structures**. 50 (2017) 1–14. <https://doi.org/10.1617/s11527-016-0917-2>.

- [60] FIGUEIREDO, E. Efeitos da Carbonatação e de Cloretos no Concreto. **Concreto: Ensino, Pesquisa e Realizações**. 2 (2005).
- [61] EKOLU, S. A review on effects of curing, sheltering, and CO<sub>2</sub> concentration upon natural carbonation of concrete. **Construction and Building Materials**. 127 (2016) 306–320. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2016.09.056>.
- [62] CASTELLOTE, M.; FERNANDEZ, L.; ANDRADE, C.; ALONSO, C. Chemical changes and phase analysis of OPC pastes carbonated at different CO<sub>2</sub> concentrations, **Materials and Structures** 42 (2009) 515–525, <https://doi.org/10.1617/s11527-008-9399-1>.
- [63] ELSALAMAWY, M.; MOHAMED, A.; KAMAL, E. The role of relative humidity and cement type on carbonation resistance of concrete. **Alexandria Engineering Journal**. 58 (2019) 1257–1264. <https://doi.org/10.1016/j.aej.2019.10.008>.
- [64] FUSCO, P. **Tecnologia do Concreto Estrutural: Tópicos Aplicados**. São Paulo: Pini, 2008.
- [65] WANG, J.; XU, H.; XU, D.; DU, P.; ZHOU, Z.; YUAN, L. Accelerated carbonation of hardened cement pastes : Influence of porosity. **Construction and Building Materials**. 225 (2019) 159–169. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2019.07.088>.
- [66] ZHANG, K.; ZHANK, K.; BAO, R.; LIU, X. A framework for predicting the carbonation depth of concrete incorporating fly ash based on a least squares support vector machine and metaheuristic algorithms. **Journal of Building Engineering**. 65 (2023) 105772. <https://doi.org/10.1016/j.job.2022.105772>.
- [67] LIU, K.; ALAM, M. ZHU, J.; ZHENG, J.; CHI, L. Prediction of carbonation depth for recycled aggregate concrete using ANN hybridized with swarm intelligence algorithms. **Construction and Building Materials**. 301 (2021) 124382. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2021.124382>.
- [68] TUUTTI, K. **Corrosion of Steel in Concrete**. Swedish Cement and Concrete Research Institute. Stockholm, Suecis, 1982. 30p.

- [69] IGNJATOVIC, I.; DRAGAS, J. Model for practical carbonation depth prediction for high volume fly ash concrete and **recycled aggregate concrete**. *Construction and Building Materials*. 213 (2019) 194–208. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2019.03.267>
- [70] KHUNTHONGKEAW, J.; TANGTERMSIRIKUL, S.; LEELAWAT, T. A study on carbonation depth prediction for fly ash concrete. **Construction and Building Materials**. 20 (2006) 744–753. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2005.01.052>.
- [71] SULAPHA, P.; WONG, S.; WEE, T.; SWADDIWUDHIPONG, S. Carbonation of Concrete Containing Mineral Admixtures. **Journal of Materials in Civil Engineering**. 15 (2003) 134–143.
- [72] LIMBACHIYA, M.; MEDDAH, M.; OUCHAGOUR, Y. Use of recycled concrete aggregate in fly-ash concrete. **Construction and Building Materials**. 27 (2012) 439–449. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2011.07.023>.
- [73] SISOMPHON, K.; FRANKE, L. Carbonation rates of concretes containing high volume of pozzolanic materials. **Cement and Concrete Research**. 37 (2007) 1647–1653. <https://doi.org/10.1016/j.cemconres.2007.08.014>.
- [74] PAPADAKIS, V.; VAYENAS, C.; FARDIS, M. Experimental investigation and mathematical modeling of the concrete carbonation problem. **Chemical Engineering Science**. 46 (1991) 1333–1338. [https://doi.org/10.1016/0009-2509\(91\)85060-B](https://doi.org/10.1016/0009-2509(91)85060-B).
- [75] HELENE, P. **Contribuição ao Estudo da Corrosão em Armaduras de Concreto Armado**. São Paulo, 1993, 231p. Tese (Livre Docência) – Escola Politécnica, Universidade de São Paulo. (1993).
- [76] SAKR, K. Effect of cement type on the corrosion of reinforcing steel bars exposed to acidic media using electrochemical techniques. **Cement and Concrete Research**. 35 (2005) 1820–1826. <https://doi.org/10.1016/j.cemconres.2004.10.015>.

- [77] HUSSAIN, S.; RASHEEDUZAFAR, S.; AL-MUSALLAM, A.; AL-GAHTANI, A. Factors affecting threshold chloride for reinforcement corrosion in concrete, **Cement and Concrete Research**. 25 (1995) 1543–1555, [https://doi.org/10.1016/0008-8846\(95\)00148-6](https://doi.org/10.1016/0008-8846(95)00148-6).
- [78] SAEKI, T. Effect of Carbonation on Chloride, **Third RILEM Workshop on Testing and Modelling the Chloride Ingress into Concrete**. (2002).
- [79] KAMINSKAS, R.; BARAUSKAS, I. The influence of pozzolana to the tricalcium aluminate hydration and the effects of chloride ions to formed hydrates. **Journal Ceramics-Silikáty**. (2009) 47–52.
- [80] AL-AMEERI, A., RAFIQ, I.; TSILOULOU, O. Influence of carbonation on the resistance of concrete structures to chloride penetration and corrosion. **MATEC Web of Conferences** 289 (2019): 08001. <http://dx.doi.org/10.1051/mateconf/201928908001>.
- [81] ZHANG, Y.; YANG, Z.; YE, G. Cement and Concrete Research Dependence of unsaturated chloride diffusion on the pore structure in cementitious materials. **Cement and Concrete Research**. 127 (2020) 105919. <https://doi.org/10.1016/j.cemconres.2019.105919>.
- [82] LI, G.; ZHOU, C.; AHMAD, W.; USANOVA, K.; KARELINA, M.; MOHAMED, M.; KHALLAF, R. Fly ash application as supplementary cementitious material: A review. **Materials**. 2022, 15, 2664.
- [83] YE, H.; JIN, N.; JIN, X.; FU, C. Model of chloride penetration into cracked concrete subject to drying – wetting cycles. **Construction and Building Materials**. 36 (2012) 259–269. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2012.05.027>.
- [84] SURYAVANSHI, A.; Swamy, R. Carbonated concrete structural elements. **Cement and Concrete Research**. 26 (1996) 729–741.
- [85] BACKUS, J.; MCPOLIN, D.; BASHEER, M.; LONG, A.; HOLMES, N. Exposure of mortars to cyclic chloride ingress and carbonation. **Advances in Cement Research**. 25 (2013) 3–11. <https://doi.org/10.1680/adcr.12.00029>.

- [86] CHANG, H. Chloride binding capacity of pastes influenced by carbonation under three conditions. **Cement and Concrete Composites**. 84 (2017) 1–9. <https://doi.org/10.1016/j.cemconcomp.2017.08.011>.
- [87] OLLIVIER, J.; TORRENTI, J.; CARCASSES, M. **Physical Properties of Concrete and Concrete Constituents**, 2013. <https://doi.org/10.1002/9781118562734>.
- [88] ASHTON, H.; SEREDA, P. **Environment, Microenvironment and Durability of Building Materials, Durability of Building Materials**. Vol. 1, No. 1, (1982).
- [89] CRANK, J. The Mathematics of Diffusion. **Journal of the American Chemical Society**. 79 (1975) 1267–1268. <https://doi.org/10.1021/ja01562a072>.
- [90] MANGAT, P.; MOLLOY, B. Prediction of long term chloride concentration in concrete. **Materials and Structures**. 1994.
- [91] COSTA, A.; APPLETON, A. Chloride penetration into concrete in marine environment-Part I: Main parameters affecting chloride penetration. **Materials and Structures**. 1999.
- [92] PETCHERDCHOO, A.; CHINDAPRASIRT, P. Exponentially aging functions coupled with time-dependent chloride transport model for predicting service life of surface-treated concrete in tidal zone. **Cement and Concrete Research**. 120 (2019) 1–12. <https://doi.org/10.1016/j.cemconres.2019.03.009>.
- [93] WU, L.; LI, W.; YU, X. Time-dependent chloride penetration in concrete in marine environments. **Construction and Building Materials**. 152 (2017) 406–413. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2017.07.016>.
- [94] ATTARI, A.; MCNALLY, C.; RICHARDSON, M. A probabilistic assessment of the influence of age factor on the service life of concretes with limestone cement/GGBS binders. **Construction and Building Materials**. 111 (2016) 488–494. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2016.02.113>.
- [95] BALESTRA, C.; REICHERT, T.; PANSERA, W.; SAVARIS, G. Chloride profile modeling contemplating the convection zone based on concrete structures

- present for more than 40 years in different marine aggressive zones. **Construction and Building Materials**. 198 (2019) 345–358. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2018.11.271>.
- [96] JUNIOR, J.; BALESTRA, C.; JUNIOR, R. Comparison of test methods to determine resistance to chloride penetration in concrete: Sensitivity to the effect of fly ash. **Construction and Building Materials**. 277 (2021). <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2021.122265>.
- [97] MAAGE, M.; HELLAND, S.; CARLSEN, J. Chloride penetration in high performance concrete exposed to marine environment. **International RILEM Workshop on Durability of High Performance Concrete**. (1994) 194–207.
- [98] SONG, H.; LEE, C.; ANN, K. Factors influencing chloride transport in concrete structures exposed to marine environments. **Cement and Concrete Composites**. 30 (2008) 113–121. <https://doi.org/10.1016/j.cemconcomp.2007.09.005>.
- [99] PACK, S.; JUNG, M.; SONG, H.; KIM, S.; ANN, K. Prediction of time dependent chloride transport in concrete structures exposed to a marine environment. **Cement and Concrete Research**. 40 (2010) 302–312. <https://doi.org/10.1016/j.cemconres.2009.09.023>.
- [100] MORADLLO, M.; SADATI, S.; SHEKARCHI, M. Quantifying maximum phenomenon in chloride ion profiles and its influence on service-life prediction of concrete structures exposed to seawater tidal zone – A field oriented study. **Construction and Building Materials**. 180 (2018) 109–116. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2018.05.284>.
- [101] ZHANG, J.; ZHAO, J.; ZHANG, Y.; GAO, Y.; ZHENG, Y. Instantaneous chloride diffusion coefficient and its time dependency of concrete exposed to a marine tidal environment. **Construction and Building Materials**. 167 (2018) 225–234. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2018.01.107>.
- [102] BAO, J.; LI, S.; ZHANG, P.; DING, X.; XUE, S.; CUI, Y.; ZHAO, T. Influence of the incorporation of recycled coarse aggregate on water absorption and

- chloride penetration into concrete. **Construction and Building Materials**. 239 (2020) 117845. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2019.117845>.
- [103] CANTERO, B.; BRAVO, M.; Brito, J.; Bosque, I.; Medina, C. Mechanical behaviour of structural concrete with ground recycled concrete cement and mixed recycled aggregate. **Journal of Cleaner Production**. 275 (2020). <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2020.122913>.
- [105] LI, S.; GAO, J.; LI, Q.; ZHAO, X. Investigation of using recycled powder from the preparation of recycled aggregate as a supplementary cementitious material, **Construction and Building Materials**. 267 (2021) 120976. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2020.120976>.
- [105] TAM, V.; SOOMRO, M.; EVANGELISTA, A. A review of recycled aggregate in concrete applications (2000–2017). **Construction and Building Materials**. 172 (2018) 272–292. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2018.03.240>.
- [106] SARAVANAKUMAR, P.; ABHIRAM, K.; MANOJ, B., Properties of treated recycled aggregates and its influence on concrete strength characteristics. **Construction and Building Materials**. 111 (2016) 611–617. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2016.02.064>.
- [107] ASLAM, M.; HUANG, B.; CUI, L. Review of construction and demolition waste management in China and USA. **Journal of Environmental Management**. 264 (2020) 110445. <https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2020.110445>.
- [108] WU, H.; LIANG, C.; XIAO, J.; MA, Z. Properties and CO<sub>2</sub>-curing enhancement of cement-based materials containing various sources of waste hardened cement paste powder. **Journal of Building Engineering**. 44 (2021) 102677. <https://doi.org/10.1016/j.jobee.2021.102677>.
- [109] MORENO-JUEZ, J.; VEGAS, I.; ROJAS, M.; GUEDE-VAZQUEZ, E. Laboratory-scale study and semi-industrial validation of viability of inorganic CDW fine fractions as SCMs in blended cements. **Construction and Building Materials**. 271 (2021) 121823. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2020.121823>.

- [110] SILVA, Y.; DELVASTO, S. Durability of self-compacting concrete with addition of residue of masonry when exposed to carbonation and chlorides mediums. **Construction and Building Materials.** 297 (2021) 123817. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2021.123817>.
- [111] RIGO, E. Avaliação do potencial de captura de CO<sub>2</sub> de concretos com resíduos de construção e demolição devido à carbonatação, Programa de Pós-Graduação Em Engenharia Civil. 8 (2019) 55.
- [112] ULSEN, C.; ANTONIASSI, J.; MARTINS, I.; KAHN, H. High quality recycled sand from mixed CDW e is that possible? **Journal of Materials Research and Technology.** (2021). <https://doi.org/10.1016/j.jmrt.2021.02.057>.
- [113] CABRAL, A.; SCHALCH, V.; DAL MOLIN, D.; LUIS, J.; RIBEIRO, D. Performance Estimation for Concretes Made with Recycled Aggregates of Construction and Demolition Waste of Some Brazilian Cities. **Materials Research.** 15 (2012) 1037–1044. <https://doi.org/10.1590/S1516-14392012005000119>.
- [114] BRAVO, M.; de BRITO, J.; EVANGELISTA, L; PACHECO, J., Durability and shrinkage of concrete with CDW as recycled aggregates: Benefits from superplasticizer's incorporation and influence of CDW composition. **Construction and Building Materials.** 168 (2018) 818–830. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2018.02.176>.
- [115] ADESSINA, A.; BEN, A.; BARTHÉLÉMY, J.; CHATEAU, C.; GARNIER, D. Experimental and micromechanical investigation on the mechanical and durability properties of recycled aggregates concrete. **Cement and Concrete Research.** 126 (2019) 105900. <https://doi.org/10.1016/j.cemconres.2019.105900>
- [116] WANG, Y.; ZHANG, H.; GENG, Y.; WANG, Q.; ZHANG, S. Prediction of the elastic modulus and the splitting tensile strength of concrete incorporating both fine and coarse recycled aggregate. **Construction and Building Materials.** 215 (2019) 332–346. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2019.04.212>.

- [117] LIU, H.; LIU, C.; BAI, G.; ZHU, C. Study on the effect of chloride ion ingress on the pore structure of the attached mortar of recycled concrete coarse aggregate. **Construction and Building Materials**. 263 (2020) 120123. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2020.120123>.
- [118] ANASTASIOU, E.; FILIKAS, K.; STEFANIDOU, M. Utilization of fine recycled aggregates in concrete with fly ash and steel slag. **Construction and Building Materials**. 50 (2014) 154–161. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2013.09.037>.
- [119] LIANG, C.; MA, H.; PAN, Y.; MA, Z.; DUAN, Z.; HE, Z.; Chloride permeability and the caused steel corrosion in the concrete with carbonated recycled aggregate. **Construction and Building Materials**. 218 (2019) 506–518. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2019.05.136>.
- [120] DAL MOLIN, D. Adições Minerais. **Concreto: Ensino, Pesquisa e Realizações**. (2005).
- [121] CHO, Y.; JUNG, S.; CHOI, Y. Effects of chemical composition of fly ash on compressive strength of fly ash cement mortar. **Construction and Building Materials**. 204 (2019) 255–264. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2019.01.208>.
- [122] MO, E.; THOMAS, M.; FAHIM, A. Performance of high-volume fly ash concrete in marine environment. **Cement and Concrete Research**. 102 (2017) 127–135. <https://doi.org/10.1016/j.cemconres.2017.09.008>.
- [123] LIN, H.; TAKASU, K.; SUYAMA, H.; KOYAMADA, H.; LIU, S. A study on properties, static and dynamic elastic modulus of recycled concrete under the influence of modified fly ash. **Construction and Building Materials**. 347 (2022) 128585. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2022.128585>.
- [124] BERODIER, E.; SCRIVENER, K. Understanding the Filler Effect on the Nucleation and Growth of C-S-H. **Journal of the American Ceramic Society**. 3773 (2014) 3764–3773. <https://doi.org/10.1111/jace.13177>.

- [125] YU, J.; LU, C.; LEUNG, C.; LI, G. Mechanical properties of green structural concrete with ultrahigh- volume fly ash. **Construction and Building Materials**. 147 (2017) 510–518. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2017.04.188>.
- [126] SILVA, S.; ANDRADE, J.; Investigation of mechanical properties and carbonation of concretes with construction and demolition waste and fly ash. **Construction and Building Materials**. 153 (2017) 704–715. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2017.07.143>.
- [127] PEJOVNIK, S.; DE SCHUTTER, G.; BOKAN, V.; SIMC, T. Chloride ion penetration into fly ash modified concrete during wetting – drying cycles. **Construction and Building Materials**. 93 (2015) 1216–1223. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2015.04.033>.
- [128] SHAIKUTHALI, S.; MANNAN, M.; DAWOOD, E.; TEO, D.; AHMADI, R.; ISMAIL, I. Workability and compressive strength properties of normal weight concrete using high dosage of fly ash as cement replacement. **Journal of Building Pathology and Rehabilitation**. 4 (2019) 1–7. <https://doi.org/10.1007/s41024-019-0065-5>.
- [129] SIDDIQUE, R. Effect of fine aggregate replacement with Class F fly ash on the mechanical properties of concrete. **Cement and Concrete Research**. 33 (2003) 539–547.
- [130] KOU, S.; POON, C.; CHAN, D. Influence of Fly Ash as Cement Replacement. **Journal of Materials in Civil Engineering**. 19 (2007) 709–717. [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)0899-1561\(2007\)19](https://doi.org/10.1061/(ASCE)0899-1561(2007)19).
- [131] KUMAR, S.; RAI, B.; BISWAS, R.; SAMUI, P.; KIM, D. Prediction of rapid chloride permeability of self-compacting concrete using Multivariate Adaptive Regression Spline and Minimax Probability Machine Regression. **Journal of Building Engineering**. 32 (2020) 101490. <https://doi.org/10.1016/j.jobbe.2020.101490>.
- [132] XIE, X.; FENG, Q.; CHEN, Z.; JIANG, L.; LU, W. Diffusion and distribution of chloride ions in carbonated concrete with fly ash **Construction and Building**

- Materials.** 218 (2019) 119–125.  
<https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2019.05.041>.
- [133] HEMALATHA, T.; RAMASWAMY. A. A review on fly ash characteristics – Towards promoting high volume utilization in developing sustainable concrete. **Journal of Cleaner Production.** 147 (2017) 546–559.  
<https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2017.01.114>.
- [134] CHEEWAKET, T.; JATURAPITAKKUL, C.; CHALEE, W. Initial corrosion presented by chloride threshold penetration of concrete up to 10 year-results under marine site. **Construction and Building Materials.** 37 (2012) 693–698.  
<https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2012.07.061>.
- [135] ALI, L.; ALI, B.; ALI, A. Combined effects of supplementary cementitious materials (silica fume, GGBS, fly ash and rice husk ash) and steel fiber on the hardened properties of recycled aggregate concrete. **Construction and Building Materials.** 263 (2020) 120636.  
<https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2020.120636>.
- [136] \_\_\_\_\_. NBR 16697: Cimento Portland – Requisitos, Rio de Janeiro, ABNT (2018).
- [137] \_\_\_\_\_. NBR 9776: Agregados - Determinação da massa específica de agregados miúdos por meio do frasco Chapman, Rio de Janeiro, ABNT (2003).
- [138] \_\_\_\_\_. NBR 7251: Agregado em estado solto - Determinação da massa unitária, Rio de Janeiro, ABNT (2008)
- [139] \_\_\_\_\_. NBR NM 248: Agregados – Determinação da composição granulométrica. Rio de Janeiro, ABNT, 2003
- [140] \_\_\_\_\_. NBR NM 52: Agregado miúdo – Determinação da massa específica e massa específica aparente. Rio de Janeiro, ABNT, 2009.
- [141] \_\_\_\_\_. NBR 7211: Agregados para concreto – Especificação. Rio de Janeiro, ABNT, 2009.

- [142] \_\_\_\_\_. NBR NM 53: Agregado graúdo – Determinação da massa específica, massa específica aparente e absorção de água. Rio de Janeiro, ABNT, 2009.
- [143] \_\_\_\_\_. NBR NM 45: Agregados – Determinação da massa unitária e do volume de vazios. Rio de Janeiro, ABNT, 2006.
- [144] RODRIGUES, P. **Parâmetros de dosagem do concreto**. ET – 67. São Paulo: ABCP, 1990.
- [145] LI, Y.; WU, B.; WANG, R. Critical review and gap analysis on the use of high-volume fly ash as a substitute constituent in concrete. **Construction and Building Materials**. 341 (2022). <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2022.127889>.
- [146] \_\_\_\_\_. NBR 5739: Concreto – Ensaio de compressão de corpos de prova cilíndricos. Rio de Janeiro, ABNT, 2007.
- [147] \_\_\_\_\_. NBR 8522: Concreto: Determinação dos módulos estáticos de elasticidade e de deformação à compressão, Rio de Janeiro. (2017).
- [148] \_\_\_\_\_. NBR 9778 : Argamassa e concreto endurecidos – Determinação da absorção de água, índice de vazios e massa específica, Rio de Janeiro. (2009).
- [149] ZHANG, M. Pore-scale modelling of relative permeability of cementitious materials using X-ray computed microtomography images. **Cement and Concrete Research**. 95 (2017) 18–29. <https://doi.org/10.1016/j.cemconres.2017.02.005>.
- [150] NUNES, F.; MORAES, P.; SCHIAVON, J.; POSSAN, E.; ANDRADE, J. Materials Relationship between the mechanical properties and carbonation of concretes with construction and demolition waste. **Case Studies in Construction**. 16 (2022). <https://doi.org/10.1016/j.cscm.2021.e00860>.
- [151] ROMANO, F. **Estudo do ingresso de cloretos em estruturas de concreto no Litoral Norte do Rio Grande do Sul**. Porto Alegre, 2009. 153 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) – Programa de Pós-Graduação

em Engenharia Civil, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2009.

- [152] SILVESTRO, L.; ROMANO, F.; DAL MOLIN, D. Penetração de cloretos em concretos expostos em zona de atmosfera marinha por um período de 9 anos. **Ambiente Construído**. 21 (2021) 101–118.
- [153] VILLAGRÁN-ZACCARD, Y.; ANDRADE, C. Chloride ingress rate and threshold content, as determined by the ‘Integral’ test method, in concrete with several w / c ratios in saturated and unsaturated conditions. **Developments in the Built Environment**. 8 (2021). <https://doi.org/10.1016/j.dibe.2021.100062>.
- [154] HAQUE, M.; KAYYALI, O. Free and water soluble chloride in concrete. **Cement and Concrete Research**. 25 (1995) 531–542. [https://doi.org/10.1016/0008-8846\(95\)00042-B](https://doi.org/10.1016/0008-8846(95)00042-B).
- [155] American Society for Testing and Materials (ASTM), ASTM C1152: Standard Test Method For Acid-Soluble Chloride In Mortar And Concrete, (2020).
- [156] RILEM, 178-TMC: Testing and modelling chloride penetration in concrete, (2002).
- [157] AHMED, T.; ELCHALAKANI, M.; KARRECH, A.; AL-AMERI, R.; YANG, B. Mechanical properties and chloride penetration resistances of very-low-C3A cement based SC-UHP-SFRCs incorporating metakaolin and slag. **Construction and Building Materials**. 341 (2022) 127854. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2022.127854>.
- [158] \_\_\_\_\_. NBR 12655 : Argamassa e concreto endurecidos – concreto de cimento Portland: preparo, controle, recebimento e aceitação: procedimento, Rio de Janeiro. (2022).
- [159] NATH, P.; SARKER, P.; BISWAS, W. Effect of fly ash on the service life, carbon footprint and embodied energy of high strength concrete in the marine environment. **Energy and Buildings**. 158 (2018) 1694–1702. <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2017.12.011>.

- [160] FILHO, J.; MEDEIROS, M.; PEREIRA, E.; HELENE, P.; ISAIA, G. High-Volume Fly Ash Concrete with and without Hydrated Lime: Chloride Diffusion Coefficient from Accelerated Test. **Journal of Materials in Civil Engineering**. 25 (2013) 411–418. [https://doi.org/10.1061/\(asce\)mt.1943-5533.0000596](https://doi.org/10.1061/(asce)mt.1943-5533.0000596).
- [161] HERATH, C.; GUNASEKARA, C.; LAW, D.; SETUNGE, S. Performance of high volume fly ash concrete incorporating additives: A systematic literature review. **Construction and Building Materials**. 258 (2020) 120606. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2020.120606>.
- [162] YOUNSI, A.; TURCRY, P.; ROZIRE, E.; AÏT-MOKHTAR, A.; LOUKILI, A. Performance-based design and carbonation of concrete with high fly ash content. **Cement and Concrete Composites**. 33 (2011) 993–1000. <https://doi.org/10.1016/j.cemconcomp.2011.07.005>.
- [163] TOŠIĆ, N.; MARINKOVIĆ, S.; PEČIĆ, N.; IGNJATOVIĆ, I.; DRAGAŠ, J. Long-term behaviour of reinforced beams made with natural or recycled aggregate concrete and high-volume fly ash concrete. **Construction and Building Materials**. 176 (2018) 344–358. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2018.05.002>.
- [164] LEITE, M. **Avaliação de Propriedades Mecânicas de Concretos Produzidos com Agregados Reciclados de Resíduos de Construção e Demolição**. Porto Alegre, 2001. 270p. Tese (Doutorado em Engenharia Civil) – Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2001.
- [165] BRAVO, M.; de BRITO, J.; PONTES, J.; EVANGELISTA, L. Durability performance of concrete with recycled aggregates from construction and demolition waste plants. **Construction and Building Materials**. 77 (2015) 357–369 <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2014.12.103>
- [166] BARBUTA, M.; BUCUR, R.; SERBANOIU, A.; SCUTARASU, S.; BURLACU, A. Combined Effect of Fly Ash and Fibers on Properties of Cement Concrete. **Procedia Engineering**. 181 (2017) 280–284. <https://doi.org/10.1016/j.proeng.2017.02.390>.

- [167] SIDDIQUE, R.; KAPOOR, K.; KADRI, E.; BENNACER, R. Effect of polyester fibres on the compressive strength and abrasion resistance of HVFA concrete. **Construction and Building Materials**. 29 (2012) 270–278. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2011.09.011>.
- [168] MOGHADDAM, F.; SIRIVIVATNANON, V.; VESSALAS, K. The effect of fly ash fineness on heat of hydration, microstructure, flow and compressive strength of blended cement pastes. **Case Studies in Construction Materials**. 10 (2019) e00218. <https://doi.org/10.1016/j.cscm.2019.e00218>.
- [169] RASHAD, A. A brief on high-volume Class F fly ash as cement replacement – A guide for Civil Engineer. **International Journal of Sustainable Built Environment**. 4 (2015) 278–306. <https://doi.org/10.1016/j.ijbsbe.2015.10.002>.
- [170] AMRAN, M.; FEDIUK, R.; MURALI, G.; AVUDAIAPPAN, S.; OZBAKKALOGLU, T. Fly Ash-Based Eco-Efficient Concretes: A Comprehensive Review of the Short-Term Properties. (2021) 1–41.
- [171] HASHMI, A.; SHARIQ, M.; BAQI, A. An investigation into age-dependent strength, elastic modulus and deflection of low calcium fly ash concrete for sustainable construction. **Construction and Building Materials**. 283 (2021) 122772. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2021.122772>.
- [172] ZHOU, C. ; CHEN, Z. Mechanical properties of recycled concrete made with different types of coarse aggregate. **Construction and Building Materials**. 134 (2017) 497–506. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2016.12.163>.
- [173] CHOI, H.; PARK, J. Study on Mechanical Properties of Concrete Using Basalt-Based Recycled Aggregate and Varying Curing Conditions. **Materials**. 15 (2022). <https://doi.org/10.3390/ma15134563>.
- [174] SOARES, D.; BRITO, J.; FERREIRA, J.; PACHECO, J. Use of coarse recycled aggregates from precast concrete rejects: Mechanical and durability performance. **Construction and Building Materials**. 71 (2014) 263–272. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2014.08.034>.

- [175] PACHECO, J.; BRITO, J.; CHASTRE, C.; EVANGELISTA, L. Experimental investigation on the variability of the main mechanical properties of concrete produced with coarse recycled concrete aggregates. **Construction and Building Materials**. 201 (2019) 110–120. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2018.12.200>.
- [176] PEDRO, D.; BRITO, J.; EVANGELISTA, L. Structural concrete with simultaneous incorporation of fine and coarse recycled concrete aggregates: Mechanical, durability and long-term properties. **Construction and Building Materials**. 154 (2017) 294–309. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2017.07.215>.
- [177] JACINTHO, A.; GIONGO, J. Resistência Mecânica do Concreto. **Concreto: Ensino, Pesquisa e Realizações**. 2 (2005).
- [178] AKHTAR, A.; SARMAH, A. Construction and demolition waste generation and properties of recycled aggregate concrete : A global perspective. **Journal of Cleaner Production**. 186 (2018) 262–281. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2018.03.085>.
- [179] PU, Y.; LI, L.; WANG, Q.; SHI, X.; LUAN, C.; ZHANG, G. Accelerated carbonation technology for enhanced treatment of recycled concrete aggregates : A state-of-the-art review. **Construction and Building Materials**. 282 (2021) 122671. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2021.122671>.
- [180] TEIXEIRA, E.; MATEUS, R.; CAMÕES, A.; BRANCO, F. Quality and durability properties and life-cycle assessment of high volume biomass fly ash mortar. **Construction and Building Materials**. 197 (2019) 195–207. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2018.11.173>.
- [181] COPETTI, C.; BORGES, P.; SCHIAVON, J.; SILVA, S.; ANDRADE, J. Evaluation of tire rubber surface pre-treatment and silica fume on physical-mechanical behavior and microstructural properties of concrete. **Journal of Cleaner Production**. 256 (2020). <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2020.120670>.

- [182] VIEIRA, G.; SCHIAVON, J.; BORGES, P.; SILVA, S.; ANDRADE, J. Influence of recycled aggregate replacement and fly ash content in performance of pervious concrete mixtures. **Journal of Cleaner Production**. 271 (2020). <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2020.122665>.
- [183] SCHIAVON, J.; BORGES, P.; SILVA, S.; ANDRADE, J. Analysis of mechanical and microstructural properties of high performance concretes containing nanosilica and silica fume. **Revista Materia**. 26 (2021).
- [184] THOMAS, C.; BRITO, J.; GIL, V.; SAINZ-AJA, J.; CIMENTADA, A. Multiple recycled aggregate properties analysed by X-ray microtomography. **Construction and Building Materials**. 166 (2018) 171–180. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2018.01.130>.
- [185] LEITE, M.; MONTEIRO, P. Microstructural analysis of recycled concrete using X-ray microtomography. **Cement and Concrete Research**. 81 (2016) 38–48. <https://doi.org/10.1016/j.cemconres.2015.11.010>.
- [186] FJENDBO, S.; SØRENSEN, H.; WEERDT, K.; JAKOBSEN, U.; GEIKER, M. Correlating the development of chloride profiles and microstructural changes in marine concrete up to ten years. **Cement and Concrete Composites**. 131 (2022). <https://doi.org/10.1016/j.cemconcomp.2022.104590>.
- [187] KURDA, R.; SILVESTRE, J.; BRITO, J. Life cycle assessment of concrete made with high volume of recycled concrete aggregates and fly ash. **Resources, Conservation and Recycling**. 139 (2018) 407–417. <https://doi.org/10.1016/j.resconrec.2018.07.004>.
- [188] YU, Y.; LIN, L. Modeling and predicting chloride diffusion in recycled aggregate concrete. **Construction and Building Materials**. 264 (2020) 120620. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2020.120620>.
- [189] CAI, R.; HAN, T.; LIAO, W.; HUANG, J.; LI, D.; KUMAR, A.; MA, H. Cement and Concrete Research Prediction of surface chloride concentration of marine concrete using ensemble machine learning, **Cement and Concrete Research**. 136 (2020) 106164. <https://doi.org/10.1016/j.cemconres.2020.106164>.

- [190] ZHANG, H.; ZHAO, Y. Integrated interface parameters of recycled aggregate concrete, **Construction and Building Materials**. 101 (2015) 861–877. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2015.10.084>.
- [191] AMORIM JUNIOR, N.; SILVA, G.; DIAS, C.; RIBEIRO, D. Concrete containing recycled aggregates: Estimated lifetime using chloride migration test, **Construction and Building Materials**. 222 (2019) 108–118. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2019.06.136>.
- [192] VASCO, R.; BRITO, J.; NEVES, R.; DHIR, R. Prediction of Chloride Ion Penetration of Recycled Aggregate Concrete. **Materials Research**. 18 (2015) 427–440.
- [193] VAZQUEZ, E.; BARRA, M.; APONTE, D.; JIMENEZ, C.; VALLS, S. Improvement of the durability of concrete with recycled aggregates in chloride exposed environment. **Construction and Building Materials** 67 (2014) 61–67. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2013.11.028>.
- [194] ANDRADE, C.; SAGRERA, J.L.; SANJUAN, M.A. Several years study on chloride ion penetration into concrete exposed to Atlantic Ocean water. **Proceedings of the Second International RILEM Workshop on Testing and Modelling Chloride Ingress into Concrete**. (2000).
- [195] LUPING, T. Chloride ingress in concrete exposed to marine environment : field data up to 10 years exposure. **Sveriges provnings - och forskningsinstitut (SP)**, 2003.
- [196] LEE, N.P.; CHISOLM, D.H. Study report No. 145 - Durability of Reinforced Concrete Structures under Marine Exposure in New Zealand, (2005).
- [197] STAMBAUGH, N.D.; BERGMAN, T.L.; SRUBAR, W. Numerical service-life modeling of chloride-induced corrosion in recycled-aggregate concrete, **Construction and Building Materials**. 161 (2018) 236–245. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2017.11.084>.
- [198] TIWARI, A.K.; PURNIMA, D.; GOYAL, S.; LUXAMI, V. Influence of corrosion inhibitors on two different concrete systems under combined chloride and

- carbonated environment. **Structures**. 48 (2023) 717–735.  
<https://doi.org/10.1016/j.istruc.2022.12.093>.
- [199] BOUTEILLER, V.; TISSIER, Y.; MARIE-VICTOIRE, E.; CHAUSSADENT, T.; JOIRET, S. The application of electrochemical chloride extraction to reinforced concrete – A review. **Construction and Building Materials**. 351 (2022).  
<https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2022.128931>.
- [200] MEDEIROS, M.H.F.; HELENE, P. Surface treatment of reinforced concrete in marine environment: Influence on chloride diffusion coefficient and capillary water absorption, **Construction and Building Materials**. 23 (2009) 1476–1484. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2008.06.013>.
- [202] VERIAN, K.P.; ASHRAF, W.; CAO, Y. Properties of recycled concrete aggregate and their influence in new concrete production. **Resources, Conservation and Recycling**. 133 (2018) 30–49.  
<https://doi.org/10.1016/j.resconrec.2018.02.005>.
- [203] PLAZA, P. ; SÁEZ, I.F.; FRIAS, M.; SÁNCHEZ, M.I. ; MEDINA, C. Use of recycled coarse and fine aggregates in structural eco-concretes. Physical and mechanical properties and CO<sub>2</sub> emissions. **Construction and Building Materials**. 285 (2021) 122926.  
<https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2021.122926>.
- [204] SAJAN, K.; ADHIKARI, R.; MANDAL, B.; GAUTAM, D. Mechanical characterization of recycled concrete under various aggregate replacement scenarios. **Cleaner Engineering and Technology**. 7 (2022) 100428.  
<https://doi.org/10.1016/j.clet.2022.100428>.
- [205] KIM, J. Influence of quality of recycled aggregates on the mechanical properties of recycled aggregate concretes: An overview. **Construction and Building Materials**. 328 (2022).



Pontifícia Universidade Católica do Rio Grande do Sul  
Pró-Reitoria de Pesquisa e Pós-Graduação  
Av. Ipiranga, 6681 – Prédio 1 – Térreo  
Porto Alegre – RS – Brasil  
Fone: (51) 3320-3513  
E-mail: [propesq@pucrs.br](mailto:propesq@pucrs.br)  
Site: [www.pucrs.br](http://www.pucrs.br)