

UNIVERSIDADE FEDERAL DO PARANÁ
SETOR DE TECNOLOGIA
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA DE CONSTRUÇÃO
CIVIL – PPGECC

GIOVANA COSTA REUS

**REALCALINIZAÇÃO QUÍMICA COMO MEIO DE
RECUPERAÇÃO DE ESTRUTURAS DE CONCRETO ARMADO
CARBONATADAS**

CURITIBA
2017

GIOVANA COSTA RÉUS

**REALCALINIZAÇÃO QUÍMICA COMO MEIO DE RECUPERAÇÃO DE
ESTRUTURAS DE CONCRETO ARMADO CARBONATADAS**

Dissertação apresentada como requisito parcial à obtenção do grau de Mestre em Engenharia de Construção Civil, no Curso de Pós-Graduação em Engenharia de Construção Civil, Setor de Tecnologia, da Universidade Federal do Paraná

Orientador: Prof Dr Marcelo Henrique Farias de Medeiros

CURITIBA

2017

R445r

Réus, Giovana Costa

Realcalinização química como meio de recuperação de estruturas de concreto armado carbonatadas / Giovana Costa Réus. – Curitiba, 2017.

106 f. : il. color. ; 30 cm.

Dissertação - Universidade Federal do Paraná, Setor de Tecnologia,
Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Construção Civil, 2017.

Orientador: Marcelo Henrique Farias de Medeiros.

1. Realcalinização. 2. Soluções alcalinas. 3. Carbonatação. 4. Corrosão.
I. Universidade Federal do Paraná. II. Medeiros, Marcelo Henrique Farias de.
III. Título.

CDD: 624.18341

TERMO DE APROVAÇÃO

GIOVANA COSTA REUS

REALCALINIZAÇÃO QUÍMICA COMO MEIO DE RECUPERAÇÃO DE ESTRUTURAS DE CONCRETO ARMADO CARBONATADAS

Dissertação aprovada como requisito parcial para obtenção do grau de Mestre em Engenharia de Construção Civil, no Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Construção Civil da Universidade Federal do Paraná, pela banca examinadora formada pelos professores:



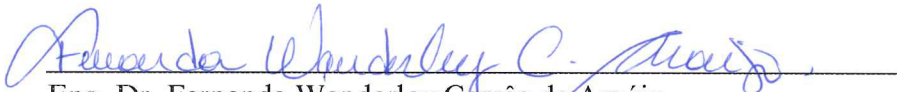
Prof. Dr. Marcelo Henrique Farias de Medeiros (Orientador)
Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Construção Civil da UFPR.



Prof. Dr. Ronaldo Alves de Medeiros Junior
Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Construção Civil da UFPR.



Prof. Dr. Eduardo Pereira
Departamento de Engenharia Civil da Universidade Estadual de Ponta Grossa.



Eng. Dr. Fernanda Wanderley Corrêa de Araújo
Departamento de Engenharia Civil da Universidade Federal Rural de Pernambuco.

Curitiba, 16 de fevereiro de 2017

AGRADECIMENTOS

Ao professor orientador Marcelo Medeiros que, além de orientador, considero também um amigo. Obrigada por estar sempre presente e por toda a ajuda durante a realização deste trabalho.

Aos professores Ronaldo Medeiros Jr., Eduardo Pereira e Fernanda W. C. de Araújo, pela valiosa contribuição ao melhoramento desta dissertação. Fico muito contente em tê-los como banca avaliadora. A todos os professores do PPGCEC pelo conhecimento transmitido.

Aos alunos de iniciação científica, Everton, Ana Carolina, Ariel e Gustavo, pela ajuda com a realização dos ensaios. À colega e amiga Ingrid, pela ajuda, nos momentos mais necessários. Ao Janderson, por toda ajuda e principalmente pelas amostras cedidas. À todos os integrantes do EMEA, pela amizade e pelo tempo que passamos juntos. Aos demais amigos e colegas que me ajudaram durante esse trabalho.

À grande amiga, irmã de coração, Andressa, companheira de laboratório, que mesmo longe me ajudou e incentivou. Te agradeço por todo apoio e companheirismo.

A minha mãe Marilane e ao meu pai Cláudio que sempre me incentivaram a estudar e a trabalhar com dedicação. Ao meu irmão Renan por sempre acreditar em mim. Amo vocês.

Em especial ao meu marido, Rodrigo, pelo amor, amizade, paciência, companheirismo e principalmente por todo incentivo.

Obrigada!

*"Sonhos determinam o que você quer. Ação determina o que você conquista."
(Aldo Novak)*

RÉUS, G. C. **Realcalinização química como meio de recuperação de estruturas de concreto armado carbonatadas** - Dissertação de Mestrado, Universidade Federal do Paraná, 2017.

RESUMO

Quanto mais agressivo o ambiente, mais rapidamente as estruturas de concreto armado podem apresentar manifestações patológicas provenientes da sua interação com o meio. A corrosão é um dos mecanismos de degradação que ocorre com maior frequência em estruturas de concreto armado, sendo a carbonatação um dos principais agentes iniciadores desse mecanismo. A realcalinização pode ser descrita como o processo inverso da carbonatação, ou seja, visa elevar o pH do concreto e repassivar as armaduras contidas em seu interior. No presente trabalho empregou-se algumas soluções alcalinas (KOH, NaOH, solução tripla, solução comercial, $\text{Ca}(\text{OH})_2$ e cal) e alguns métodos de aplicação (spray, trincha, manta e imersão) no tratamento de concretos carbonatados através da realcalinização química. Após a verificação do método de aplicação e soluções alcalinas mais eficazes, os mesmos foram testados em uma estrutura real. Avaliou-se também o comportamento da realcalinização perante amostras com diferentes adições minerais usadas como substituição parcial do cimento. Constatou-se que a solução alcalina mais eficaz é a solução de KOH, sendo a solução com maior velocidade de realcalinização em todos os casos aplicados. As soluções de $\text{Ca}(\text{OH})_2$ e cal não são capazes de realcalinizar concretos carbonatados, mesmo após 9 meses de tratamento. Além disso, os métodos de spray e trincha apresentaram baixa eficácia. Ao comparar o método de imersão com os métodos de spray, trincha e manta, a eficiência dos mesmos foi de 11,3%, 9,1% e 92,8%, respectivamente. Com o método da manta obteve-se bons resultados em laboratório, porém quando aplicou-se este método em campo, as espessuras realcalinizadas foram pequenas, sendo que a eficiência em campo foi 86% menor que em laboratório. Por fim, concluiu-se que a realcalinização química pode ser utilizada como um tratamento preventivo para a corrosão de armaduras porém, sua aplicação em campo precisa ser aprimorada.

Palavras-chaves: Realcalinização, Soluções alcalinas, Carbonatação, Corrosão.

ABSTRACT

The more aggressive the environment is, more quickly the reinforced concrete structures present pathological manifestations arising from their interaction with the environment. Corrosion is one of the mechanisms of degradation that occurs most frequently in reinforced concrete structures, with carbonation being one of the main mechanism initiators. The realkalisation can be described as the carbonation inverse process, that is, it aims to raise concrete's pH and to repassivate the reinforcement contained inside it. This research uses some alkaline solutions (KOH, NaOH, triple solution, commercial solution, $\text{Ca}(\text{OH})_2$ and lime) and some application methods (spray, brush, blanket and immersion) in treatment of concrete carbonation through chemical realkalisation. After checking application method and alkaline solutions effectiveness, they were tested in a real structure. The realkalisation behavior towards samples with different mineral additions used as partial replacement of the cement was also evaluated. It was verified that the most effective alkaline solution is KOH solution, being the solution with the highest rate of realkalisation in all cases applied. $\text{Ca}(\text{OH})_2$ and lime solutions are not able to realkalinise carbonated concrete, even after 9 months of treatment. In addition, spray and brush methods were poorly effective. When comparing the immersion method with the spray, brush and blanket methods the efficiency of the methods were 11.3 %, 9.1 % and 92.8 %, respectively. Good results were obtained in the laboratory by blanket method, but when this method was applied in the field, it was obtained the small thicknesses realkalinized, and field efficiency was 86% lower than the laboratory. Finally, it was concluded that the chemical realkalisation can be used as a preventive treatment to reinforcement corrosion, but this field application needs to be improved.

Key-words: Realkalisation, Alkaline solution, Carbonation, Corrosion.

LISTA DE ILUSTRAÇÕES

FIGURA 1 – Modelo de vida útil.	15
FIGURA 2 – Lei de Sitter.	17
FIGURA 3 – Desabamento parcial de laje no edifício Senador, em São Bernardo do Campo, na Grande São Paulo (ocorrido em 2012).	17
FIGURA 4 – Distribuição da incidência de manifestações patológicas em estruturas de concreto.	18
FIGURA 5 – Representação esquemática do mecanismo de carbonatação. . .	23
FIGURA 6 – Comparação entre concreto carbonatado e não carbonatado quanto a absorção por imersão e índice de vazios.	24
FIGURA 7 – Tipos de corrosão e fatores que as provocam.	26
FIGURA 8 – Processo eletroquímico de corrosão das armaduras no concreto.	27
FIGURA 9 – Sistema de reparo e proteção contra corrosão das armaduras. . .	28
FIGURA 10 – Sistema de proteção da corrosão das armaduras.	30
FIGURA 11 – Representação esquemática da realcalinização eletroquímica. . .	30
FIGURA 12 – Sistema anódico temporário aplicado no pilar de concreto.	31
FIGURA 13 – Evolução da realcalinização eletroquímica ao longo do tempo. . .	32
FIGURA 14 – Esquema de realcalinização química.	33
FIGURA 15 – Evolução da realcalinização química ao longo do tempo.	34
FIGURA 16 – Pilar envolto pela cinta de borracha com solução alcalina em seu interior.	37
FIGURA 17 – Gel aplicado em estrutura de tamanho real.	38
FIGURA 18 – Distribuição granulométrica do agregado miúdo.	41
FIGURA 19 – Distribuição granulométrica do agregado graúdo.	42
FIGURA 20 – Distribuição granulométrica das adições minerias.	43
FIGURA 21 – Estrutura selecionada para a realização.	45
FIGURA 22 – Croqui da estrutura e localização dos pilares selecionados para a realização.	46
FIGURA 23 – Câmara de carbonatação acelerada.	48
FIGURA 24 – Pontos de medição de carbonatação e realcalinização.	48
FIGURA 25 – Método de imersão das amostras em solução alcalina.	49
FIGURA 26 – Método envolvimento das amostras em manta embebida com solução alcalina.	49
FIGURA 27 – Método de aplicação de solução alcalina com spray.	50
FIGURA 28 – Método de aplicação de solução alcalina com trincha.	50
FIGURA 29 – Fluxograma dos ensaios realizados na pesquisa.	51

FIGURA 30 – Umedecimento do pilar com solução alcalina.	53
FIGURA 31 – Umedecimento da manta com solução alcalina.	53
FIGURA 32 – Pilar envolt com manta umedecida em solução alcalina.	54
FIGURA 33 – Pilar envoltos com lona plástica.	54
FIGURA 34 – Pilares envoltos com lona plástica e elásticos.	55
FIGURA 35 – pHmetro para medição do pH das soluções alcalinas.	57
FIGURA 36 – Profundidade de carbonatação das amostras ao longo do tempo.	59
FIGURA 37 – Amostra carbonatada para avaliação das soluções alcalinas.	59
FIGURA 38 – Profundidade de realcalinização das amostras ao longo do tempo.	61
FIGURA 39 – k_{realc} para as soluções de KOH, comercial, tripla e NaOH.	61
FIGURA 40 – Realcalinização das amostras com solução tripla após 10 dias de tratamento.	62
FIGURA 41 – Tentativa de realcalização com a solução de $Ca(OH)_2$ durante 9 meses.	63
FIGURA 42 – Tentativa de realcalização com a solução de cal durante 9 meses.	63
FIGURA 43 – Correlações entre as propriedades das soluções alcalinas e o coeficiente de realcalinização.	65
FIGURA 44 – Resistência à compressão das amostras a 28 dias de cura, após a carbonatação e após a realcalinização com as soluções testadas.	66
FIGURA 45 – Teste Tukey de resistência à compressão das amostras após o tratamento, em comparação com amostras carbonatadas.	66
FIGURA 46 – Absorção capilar das amostras carbonatadas e das amostras realcalinizadas com solução de KOH.	67
FIGURA 47 – Profundidade de carbonatação das amostras ao longo do tempo, para o substrato de concreto.	68
FIGURA 48 – Amostra parcialmente realcalinizada por solução de KOH aplicada por spray.	68
FIGURA 49 – Amostra parcialmente realcalinizada por solução de KOH aplicada por trincha.	69
FIGURA 50 – Realcalinização pela aplicação de soluções alcalinas com spray e com trincha.	69
FIGURA 51 – Amostra realcalinizada pelo método de imersão.	70
FIGURA 52 – Amostra realcalinizada pelo método da manta.	70
FIGURA 53 – Coeficiente de realcalinização para as soluções de KOH, comercial e NaOH aplicados por meio de imersão e método da manta.	72
FIGURA 54 – Teste Tukey com intervalo de 95% de confiança para o coeficiente de realcalinização para diferentes soluções alcalinas e métodos de aplicação.	72
FIGURA 55 – Amostra realcalinizada por 8 dias com manta e solução de KOH.	73

FIGURA 56 – Amostra após 8 dias imersa em solução de KOH.	73
FIGURA 57 – Amostra após carbonatação e após 8 dias imersa em solução de KOH.	74
FIGURA 58 – Resistência à compressão do concreto antes e depois do tratamento.	76
FIGURA 59 – Absorção de água por sucção capilar por 72h para o concreto antes e depois do tratamento de realcalinização.	76
FIGURA 60 – Teste Tukey, com intervalo de 95% de confiança, para ensaio de resistência à compressão.	77
FIGURA 61 – Teste Tukey, com intervalo de 95% de confiança, para ensaio de absorção de água por sucção capilar.	77
FIGURA 62 – Dureza superficial pelo método da esclerometria.	78
FIGURA 63 – Resultado da carbonatação e realcalinização dos pilares após 7 dias de tratamento.	79
FIGURA 64 – Realcalinização no pilar P17, tratado com manta embebida em solução de KOH.	79
FIGURA 65 – Realcalinização no pilar P19, tratado com manta embebida em solução de NaOH.	80
FIGURA 66 – Teste Tukey para profundidade de carbonatação dos pilares do objeto de estudo.	81
FIGURA 67 – Teste Tukey para profundidade de realcalinização dos pilares do objeto de estudo.	81
FIGURA 68 – Profundidade de realcalinização com aplicação de solução de KOH e NaOH em laboratório e em campo.	83
FIGURA 69 – Profundidade de carbonatação das amostras.	83
FIGURA 70 – Profundidade de realcalinização das amostras.	84
FIGURA 71 – Coeficiente de realcalinização para amostras com adição de sílica de casca de arroz, sílica ativa, fíler quartzoso e metacaulim. . . .	84
FIGURA 72 – Evolução da realcalinização das amostras com adição de fíler quartzoso.	85
FIGURA 73 – Resistência à compressão para amostras com adições minerais.	85
FIGURA 74 – Absorção de água por sucção capilar por 72h para amostras com adições minerais.	86
FIGURA 75 – Correlação entre o coeficiente de carbonatação, resistência à compressão, absorção capilar e coeficiente de realcalinização para amostras com adições minerais.	87
FIGURA 76 – Difratoograma da amostra de argamassa extraída do concreto de referência.	88
FIGURA 77 – Difratoograma das adições minerais (pico principal da portlandita localizado na região de $34,2^\circ 2\theta$).	89

FIGURA 78 – Correlação entre o coeficiente realcalinização e intensidade do pico de DRX para portlandita.	89
FIGURA 79 – Difração de raios X para as adições minerais.	90
FIGURA 80 – Correlação sem a amostra com fíler quartzoso.	90
FIGURA 81 – Correlação entre coeficiente de realcalinização e intensidade de pico de DRX para portlandita sem a amostra com fíler quartzoso.	91
FIGURA 82 – Correlação sem a amostra com fíler quartzoso e a amostra de referência.	92
FIGURA 83 – Correlação entre o coeficiente de carbonatação, resistência à compressão, absorção capilar e coeficiente de realcalinização para amostras todas as amostras realcalinizadas com KOH por meio de imersão.	93

LISTA DE QUADROS

QUADRO 1	– Levantamento dos principais estudos publicados sobre realcalinização do concreto.	20
QUADRO 2	– Resumo das soluções alcalinas para realcalinização química encontradas na bibliografia.	35
QUADRO 3	– Resumo das características e resultados obtidos por diversos autores para a realcalinização química.	36
QUADRO 4	– Resumo dos ensaios realizados.	56
QUADRO 5	– Resumo dos fenômenos encontrados na realcalinização química.	75

LISTA DE TABELAS

TABELA 1 – Gastos com manutenção e reparos em países desenvolvidos. . .	16
TABELA 2 – Propriedades químicas do cimento.	40
TABELA 3 – Propriedades físicas do cimento.	40
TABELA 4 – Propriedades mecânicas do cimento.	40
TABELA 5 – Propriedades do agregado miúdo.	41
TABELA 6 – Propriedades das adições minerais.	42
TABELA 7 – Concentração das soluções alcalinas.	44
TABELA 8 – Estimativa de tempo para realcalinização das amostras com 7 dias de cura, tratadas com solução de KOH, comercial, tripla e de NaOH.	62
TABELA 9 – Propriedades das soluções alcalinas.	64
TABELA 10 – Resumo dos resultados de realcalinização com o método de imersão e da manta.	71

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

C-H	- Hidróxido de cálcio
C-S-H	- Silicato de cálcio hidratado
Ca ²⁺	- Cálcio
Ca(OH) ₂	- Hidróxido de cálcio
CaCO ₃	- Carbonato de cálcio
CaO.Fe ₂ O ₃	- Ferrato de cálcio
CO ₂	- Dióxido de carbono
DRX	- Difração de raios-X
EPI	- Equipamento de proteção individual
Fe ₂ O ₃	- Óxido de ferro II
Fe ₃ O ₄	- Óxido de ferro III
Fe(OH) ₃	- Hidróxido de ferro (III)
K ⁺	- Potássio
K ₂ CO ₃	- Carbonato de potássio
KOH	- Hidróxido de potássio
k _{CO₂}	- Coeficiente de carbonatação
k _{realc}	- Coeficiente de realcalinização
OH ⁻	- Íon hidroxila
Na ⁺	- Sódio
Na ₂ CO ₃	- Carbonato de sódio
NaOH	- Hidróxido de sódio
PET	- Polietileno tereftalato
pH	- Potencial de hidrogênio
R ²	- Coeficiente de determinação
RCD	- Resíduo de construção e demolição

SUMÁRIO

1 INTRODUÇÃO	15
1.1 Objetivo	19
1.2 Justificativa	19
2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	21
2.1 Carbonatação	21
2.2 Corrosão de armaduras no concreto	25
2.3 Reparos em estruturas com corrosão	28
2.3.1 Realcalinização eletroquímica	30
2.3.2 Realcalinização química	33
3 PROGRAMA EXPERIMENTAL	39
3.1 Materiais	39
3.1.1 Cimento	39
3.1.2 Agregado miúdo	40
3.1.3 Agregado graúdo	41
3.1.4 Adições	42
3.1.5 Aditivo	43
3.1.6 Soluções alcalinas	43
3.2 Metodologia	44
3.2.1 Preparo das amostras	44
3.2.2 Medição da carbonatação	47
3.2.3 Métodos de aplicação das soluções alcalinas nas amostras	48
3.2.4 Resistência à compressão	57
3.2.5 Absorção de água por capilaridade	57
3.2.6 pH das soluções alcalinas	57
3.2.7 Difração de raios X	57
4 RESULTADOS	59
4.1 Análise das soluções alcalinas	59
4.2 Análise dos métodos de aplicação	67
4.3 Aplicação da realcalinização em estrutura real	78
4.4 Análise da influência das adições minerais	83
5 CONSIDERAÇÕES FINAIS	94
5.1 Conclusões	94

5.2 Sugestões para trabalhos futuros	95
5.3 Atuações em publicações	95
REFERÊNCIAS	98

1 INTRODUÇÃO

As estruturas de concreto armado estão, de modo geral, sujeitas a interações físico-químicas com o ambiente ao qual estão em contato. Um ambiente agressivo pode expor ainda mais as estruturas aos agentes de degradação, gerando manifestações patológicas que diminuem sua durabilidade. Estas manifestações podem, com o tempo, comprometer a utilização da estrutura e até a sua segurança estrutural.

A vida útil de uma estrutura de concreto armado pode ser dividida no tempo de iniciação e no tempo de propagação, como pode ser observado no modelo clássico proposto por Tuutti (1982 *apud* Helene (1993)) (FIGURA 1). O período de iniciação geralmente está ligado ao ataque por cloretos e a carbonatação, que propiciam um ambiente favorável ao aparecimento da corrosão. O período de propagação é o momento em que ocorre a corrosão, até que a vida útil da estrutura chegue ao fim.

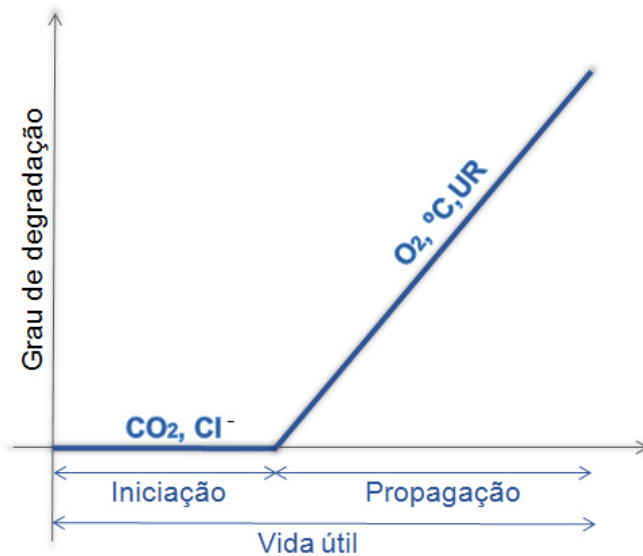


FIGURA 1 – Modelo de vida útil.

FONTE: A autora, adaptado de Helene (1993).

O aumento da vida útil das estruturas é uma forma indireta de reduzir o impacto ambiental gerado por demolições e retirada de matéria prima para repor as edificações desmobilizadas.

A indústria da construção civil é a maior consumidora de recursos naturais do mundo. Para a produção de concreto são consumidos anualmente 1,5 bilhões de toneladas de cimento, 9 bilhões de toneladas de areia e rocha e 1 bilhão de toneladas de água de amassamento em todo o mundo (dados avaliados em 2008). Além disso há

uma expectativa de crescimento do consumo de concreto até o ano de 2050, em cerca de 18 bilhões de toneladas por ano (MEHTA; MONTEIRO, 2008).

A construção civil é responsável pela parcela predominante de resíduos sólidos gerados no Brasil (SINDUSCON-SP, 2005). O trabalho de Pinto (1999) indicou que cerca de 50% em massa dos resíduos sólidos gerados no âmbito nacional é classificado como resíduo de construção e demolição (RCD). Uma pesquisa desenvolvida para o município de Curitiba corrobora este valor indicando que cerca de 48% dos resíduos sólidos gerados na cidade são provenientes da construção civil (NAGALLI, 2014). O menor consumo de matéria prima para reconstrução de estruturas, além de diminuir o impacto ambiental, reduz também custos com novas construções.

É ilustrado na TABELA 1 o impacto econômico que os serviços de manutenção e reparo podem ter na economia de um país, onde verifica-se que alguns países europeus gastam por volta de 50% do que investem em construções e serviços de manutenção e reparo (UEDA, TAKEWAKA, 2007 *apud* Medeiros e Helene (2008)).

TABELA 1 – Gastos com manutenção e reparos em países desenvolvidos.

País	Gastos com construções novas	Gastos com manutenção e reparo	Gastos totais com construção
França	85,6 Bilhões de Euros (52%)	79,6 Bilhões de Euros (48%)	165,2 Bilhões de Euros (100%)
Alemanha	99,7 Bilhões de Euros (50%)	99,0 Bilhões de Euros (50%)	198,7 Bilhões de Euros (100%)
Itália	58,6 Bilhões de Euros (43%)	76,8 Bilhões de Euros (57%)	135,4 Bilhões de Euros (100%)
Reino Unido	60,7 Bilhões de Libras (69,9 Bilhões de Euros) (50%)	61,2 Bilhões de Libras (70,5 Bilhões de Euros) (50%)	121,9 Bilhões de Libras (140,4 Bilhões de Euros) (100%)

Fonte: UEDA, TAKEWAKA, 2007 *apud* (MEDEIROS; HELENE, 2008)

Mehta e Monteiro (2008) estimam que em países desenvolvidos se gasta 60% do valor total dos recursos da indústria da construção civil em reparo e manutenção de estruturas. Por este motivo, há uma crescente preocupação, por parte dos engenheiros, com a durabilidade (MEHTA; MONTEIRO, 2008). Pode-se dizer que as correções serão mais econômicas quanto mais cedo forem executadas, como observado na FIGURA 2 que ilustra a Lei dos cinco de Sitter.

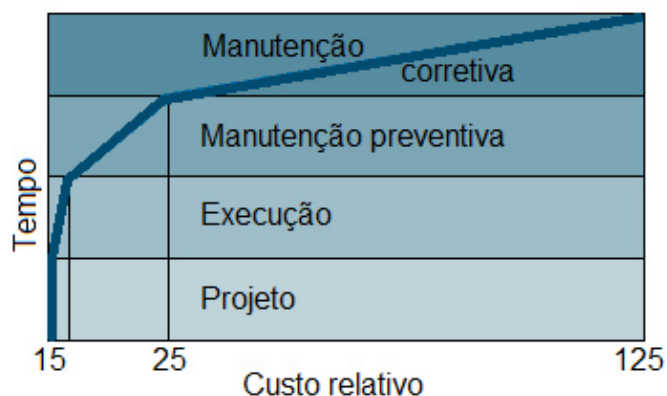


FIGURA 2 – Lei de Sitter.

FONTE: Adaptado de Helene (2003).

A área de inspeção e avaliação de estruturas de concreto armado é fundamental para a engenharia nacional e internacional, pois ela tem reflexo direto na capacidade do meio técnico de evitar acidentes como o que ocorreu em São Paulo em 2012 (FIGURA 3) (MEDEIROS, 2012).



FIGURA 3 – Desabamento parcial de laje no edifício Senador, em São Bernardo do Campo, na Grande São Paulo (ocorrido em 2012).

FONTE: (MEDEIROS, 2012).

Uma das manifestações patológicas mais frequentes no concreto armado é o deslocamento por corrosão de armaduras, como observado na FIGURA 4.

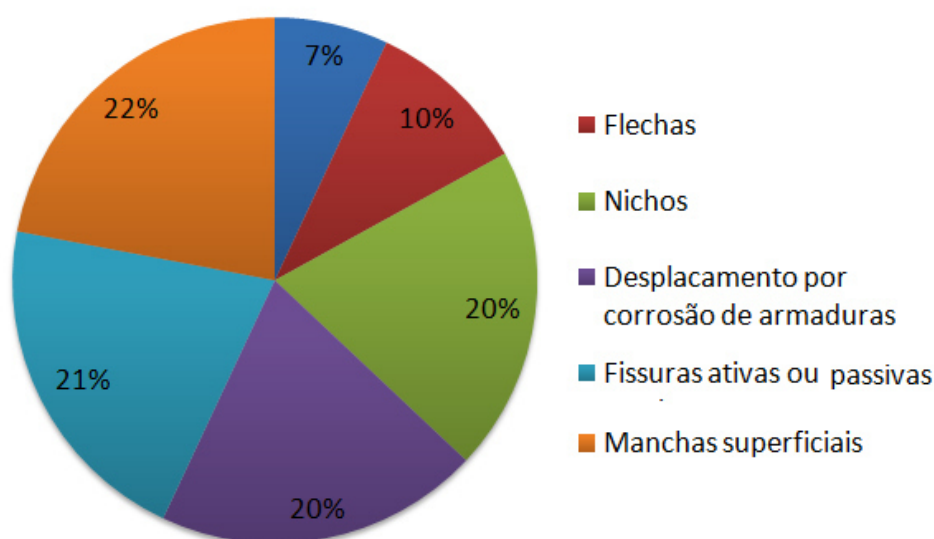


FIGURA 4 – Distribuição da incidência de manifestações patológicas em estruturas de concreto.

FONTE: A autora, adaptado de Helene (2003).

A corrosão pode ser definida como a interação entre o material e o ambiente, de forma destrutiva. Este processo pode ser definido também como a transformação do metal em íon metálico por meio da sua interação com o ambiente (HELENE, 1993).

Quando as armaduras estão envolvidas em um meio alcalino, como o concreto, há a formação da película de passivação, que protege as armaduras da corrosão. Quando a alcalinidade do concreto é reduzida, esta película pode ser desfeita e a corrosão tem seu início.

A carbonatação é um dos principais agentes iniciadores da corrosão do aço no concreto armado, sobretudo em ambientes urbanos, devido a alta concentração de dióxido de carbono (CO_2) no ambiente. A carbonatação dos materiais cimentícios envolve as reações de neutralização dos componentes básicos da pasta de cimento hidratada, principalmente o hidróxido de cálcio ($\text{Ca}(\text{OH})_2$) e o silicato de cálcio hidratado (C-S-H), pela reação com o ácido carbônico (HOUST; WITTMAN, 2002). Este processo reduz o pH do concreto, criando condições propícias para a corrosão.

A realcalinização é um método de tratamento para estruturas de concreto armado acometidas pela corrosão, cujo objetivo é estender o tempo de iniciação da corrosão, ou para estruturas com a frente de carbonatação em curso. Este tratamento é o processo inverso da carbonatação, ou seja, visa elevar o pH do concreto a fim de proteger da corrosão as armaduras contidas em seu interior. A realcalinização química e eletroquímica são exemplos dos poucos métodos não destrutivos existentes para recuperação de estruturas de concreto acometidas pela corrosão. Comparando a realcalinização química com a eletroquímica, destaca-se a vantagem da primeira não

necessitar de mão de obra altamente qualificada e nem de equipamentos sofisticados em sua aplicação (ARAUJO, 2009).

Dentro deste panorama de necessidade de inspeção e recuperação de edificações para evitar acidentes, pretende-se contribuir para a viabilidade técnica de um processo de recuperação de estruturas de concreto armado. Este pode representar um forte avanço para a manutenção de edificações submetidas à exposição ao ataque por CO_2 , elevando a vida útil das obras atualmente em uso.

1.1 OBJETIVO

Este estudo tem por objetivo avaliar a eficiência dos diferentes métodos de aplicação e tipos de soluções alcalinas na recuperação de concretos carbonatados por meio da realcalinização química, bem como testar sua aplicação em uma estrutura real. Objetiva-se também avaliar o comportamento da realcalinização química perante concretos confeccionados com diferentes adições minerais.

1.2 JUSTIFICATIVA

O QUADRO 1 mostra um levantamento dos estudos publicados sobre realcalinização. Verifica-se que a realcalinização eletroquímica tem sido mais estudada do que a realcalinização química, e que a aplicação da realcalinização em campo, para ambos os métodos, ainda é escassa. Cabe salientar que todas as pesquisas encontradas a respeito da realcalinização química foram realizadas no Brasil.

A realcalinização química pode envolver métodos de aplicação e soluções alcalinas distintas. As soluções empregadas por Araujo (2004), Sá (2006), Moreira (2006) e Araujo (2009) são hidróxido de sódio (NaOH), hidróxido de potássio (KOH), carbonato de sódio (Na_2CO_3), hidróxido de cálcio (Ca(OH)_2) e uma solução tripla contendo NaOH , KOH e Na_2CO_3 . Porém, cada autor selecionou uma ou mais soluções, e nenhum destes estudos comparou todas as soluções em um único experimento. No Brasil, existe atualmente um produto comercial específico para a realcalinização química porém, até o presente momento, este produto não foi mencionado em publicações científicas.

QUADRO 1 – Levantamento dos principais estudos publicados sobre realcalinização do concreto.

Fonte	Tipo de realcalinização	Experimental ou de campo	País
Xiong, Deng e Wu (2016)	Eletroquímica	Experimental	China
Ribeiro et al. (2013)	Eletroquímica	Experimental	Brasil
Tong et al. (2012)	Eletroquímica	Experimental	França
Araujo e Helene (2011)	Química	Experimental	Brasil
Redaelli e Bertolini (2011)	Eletroquímica	Experimental	Itália
González et al. (2011)	Eletroquímica	Experimental	México
Ribeiro et al. (2010)	Eletroquímica	Experimental	Brasil
Diaz (2010)	Eletroquímica	Experimental	México
Ribeiro (2009)	Eletroquímica	Experimental	Brasil
Jaśniok e Zybura (2009)	Eletroquímica	Experimental	Polônia
Martínez et al. (2009)	Eletroquímica	Experimental	Espanha
Araujo (2009)	Ambos	Ambos	Brasil
Bertolini, Carsana e Redaelli (2008)	Eletroquímica	Ambos	Itália
Araújo e Helene (2008)	Eletroquímica	Experimental	Brasil
Moreira (2006)	Química	Ambos	Brasil
Sá (2006)	Química	Experimental	Brasil
Castellote et al. (2006a)	Eletroquímica	Experimental	Espanha
Castellote et al. (2006b)	Eletroquímica	Experimental	Espanha
Yeh e Chang (2005)	Eletroquímica	Experimental	Japão
Araujo (2004)	Química	Experimental	Brasil
Teixeira (2002)	Química	Experimental	Brasil
Andrade et al. (1999)	Eletroquímica	Experimental	Espanha
Banfill (1997)	Eletroquímica	Experimental	Escócia

FONTE: A autora.

O único método aplicado em laboratório (ARAÚJO, 2004; SÁ, 2006; MOREIRA, 2006; ARAÚJO, 2009) é o método da imersão dos corpos de prova nas soluções alcalinas, porém este método não é aplicável em estruturas reais. O fabricante da solução comercial indica a aplicação da substância realcalinizadora por meio de uma trincha, vassoura de cerdas flexíveis ou por aspersão. Apesar da aplicação deste método ser viável em estruturas reais, não há publicações de trabalhos utilizando o mesmo.

A escolha do objetivo deste trabalho justifica-se em função da redução de custos gerada pela manutenção preventiva em estruturas de concreto e em função das poucas pesquisas científicas realizadas com a realcalinização química tanto em laboratório quanto em campo.

2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

O concreto é um material que possui elevada alcalinidade com pH próximo a 12,6 e isso se deve aos elementos solubilizados na solução existente na sua rede de poros (BLANCO; BAUTISTA; TAKENOUTI, 2006). De acordo com Moragues, Macias e Andrade (1987), Almusallam (2001), Neville (1997), os íons predominantes nos poros do concreto são Ca^{2+} , Na^+ e K^+ . Segundo Andersson et al. (1989) o íon predominante nos poros do concreto é o cálcio porém, no caso de concretos resistentes a sulfatos, com escória de alto forno, sílica ativa ou cinzas volantes, pode haver maior quantidade de sódio e potássio.

A elevada alcalinidade do concreto garante a proteção das armaduras contra a corrosão (GOÑI; ANDRADE, 1990). Esta elevada alcalinidade é responsável pela formação de uma película passivadora ao redor das armaduras, que é um filme fino de óxido de ferro extremamente aderente ao aço. De acordo com Ghods et al. (2009), os íons contidos nos poros do concreto podem afetar a película protetora da armadura, em especial o Ca^{2+} , o qual possui grande importância durante a formação dessa película. A combinação da ferrugem superficial ($\text{Fe}(\text{OH})_3$) com a portlandita ($\text{Ca}(\text{OH})_2$) presente na pasta hidratada de cimento, origina a película de passivação, ou seja, o ferrato de cálcio ($\text{CaO} \cdot \text{Fe}_2\text{O}_3$), como descrito na EQUAÇÃO (2.1) ((HELENE, 1993)).



Segundo Helene (1993) a camada que mantém a armadura passiva é formada por uma camada interna de Fe_3O_4 (óxido de ferro III) e uma camada externa de Fe_2O_3 (óxido de ferro II). Essa camada reduz a taxa de corrosão do aço a valores insignificantes. De acordo com ACI 222 (2001) e Helene (2003), estes valores de velocidade de corrosão do aço podem chegar a $1 \mu\text{m}/\text{ano}$ em condições de passividade, valor que é considerado desprezível. Portanto, enquanto a película passivadora estiver íntegra, o aço está protegido da corrosão.

A perda da proteção da armadura pode ocorrer principalmente por dois processos: a carbonatação, que gera a redução da alcalinidade do concreto, e o ataque por cloretos.

2.1 CARBONATAÇÃO

A carbonatação é o processo, onde o CO_2 presente na atmosfera reage com íons alcalinos presente na solução dos poros do concreto, formando carbonato de cálcio (CaCO_3).

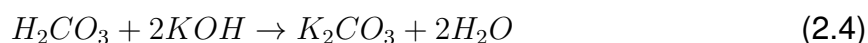
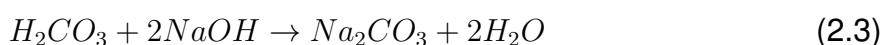
O mecanismo de carbonatação ocorre quando o CO_2 entra no interior do concreto por meio da difusão. Isso ocorre de forma lenta, visto que o CO_2 penetra nos poros do concreto e só então é diluído. É importante destacar que a penetração do CO_2 ocorre preponderantemente nos poros não saturados do concreto. Em algumas situações a diluição do CO_2 pode ser dificultada: 1- quando todos os poros estão saturados e a carbonatação fica condicionada a solubilização do CO_2 na água; 2- quando todos os poros estão completamente secos, pois sem a presença de água a reação de carbonatação não se concretiza, segundo Tutti, 1982, conforme citado por Carmona (2005).

Os compostos da pasta de cimento hidratada que geralmente participam do processo de carbonatação são o $\text{Ca}(\text{OH})_2$, o NaOH e o KOH , que são componentes com elevada alcalinidade. Quando a carbonatação ocorre, estes elementos se combinam resultando em compostos menos alcalinos, ou seja, este mecanismo diminui o pH do concreto (CARMONA, 2005).

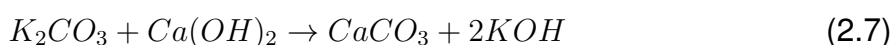
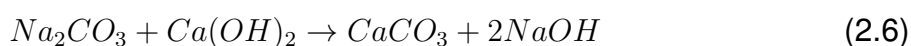
O processo de carbonatação se inicia quando o CO_2 reage com a água e forma o ácido carbônico (WOLF, 2010), conforme mostrado na EQUAÇÃO (2.2).



Segundo Hoppe Filho (2008), o ácido carbônico reage com os íons alcalinos dissolvidos na solução dos poros da pasta de cimento, ou seja, reage com o $\text{Ca}(\text{OH})_2$, KOH e NaOH . O resultado destas reações é a formação de carbonato de sódio, carbonato de potássio e bicarbonato de cálcio, conforme descrito nas EQUAÇÕES (2.3), (2.4) e (2.5) (WOLF, 2010).



Ainda de acordo com Hoppe Filho (2008), estas reações formam produtos mais estáveis, conforme as EQUAÇÕES (2.6), (2.7) e (2.8).





O NaOH e o KOH voltam a se combinar com o ácido carbônico, conforme descrito nas EQUAÇÕES (2.3) e (2.4) (Hoppe Filho, 2008). Esse ciclo se repete até que todo o CO₂ diluído no interior do concreto reaja com os elementos alcalinos da pasta de cimento.

As reações descritas ocorrem da face externa em direção ao interior do concreto. De acordo com Helene (1993) e Hoppe Filho (2008), a área que divide a região carbonatada e não carbonatada é chamada de frente de carbonatação. A FIGURA 5 ilustra a frente de carbonatação do concreto.

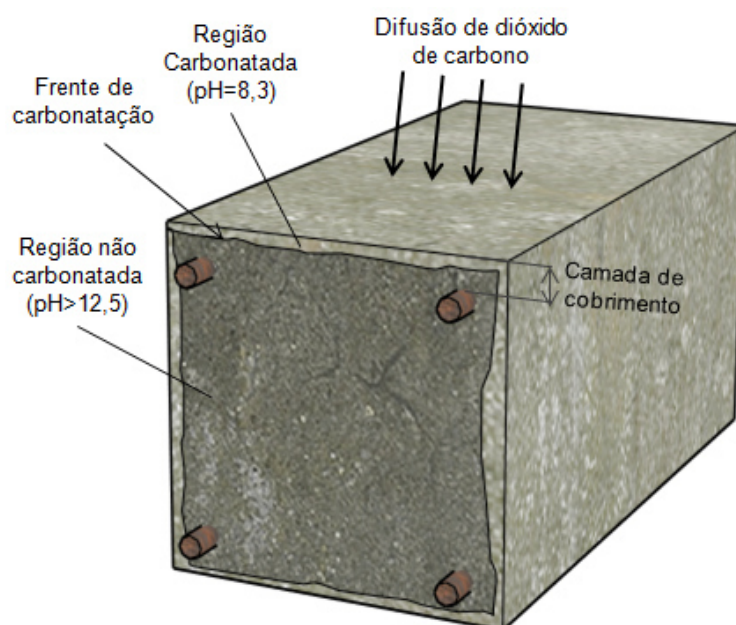


FIGURA 5 – Representação esquemática do mecanismo de carbonatação.

FONTE: A autora, adaptado de Medeiros e Helene (2001).

No caso de estruturas de concreto não armadas, a carbonatação não é um problema, pois este mecanismo de degradação não afeta de forma negativa o concreto. Há ainda um ganho de resistência mecânica, pois o produto gerado pela carbonatação possui maior volume do que os produtos que o originaram, deixando o concreto mais denso, e conseqüentemente menos permeável. Os dados experimentais publicados por Medeiros e Helene (2001) comprovam esta teoria da redução da porosidade indicando para três traços de concretos distintos a redução da absorção por imersão e do índice de vazios após a carbonatação do concreto, como é possível observar na FIGURA 6. Esse fenômeno é chamado de colmatação dos poros, e é responsável também pela diminuição da velocidade do avanço da frente de carbonatação no concreto (HELENE, 1986). Esta é a razão para a velocidade de carbonatação seguir uma tendência expo-

nencial, ou seja, com velocidade maior no início e redução exponencial com o passar do tempo.

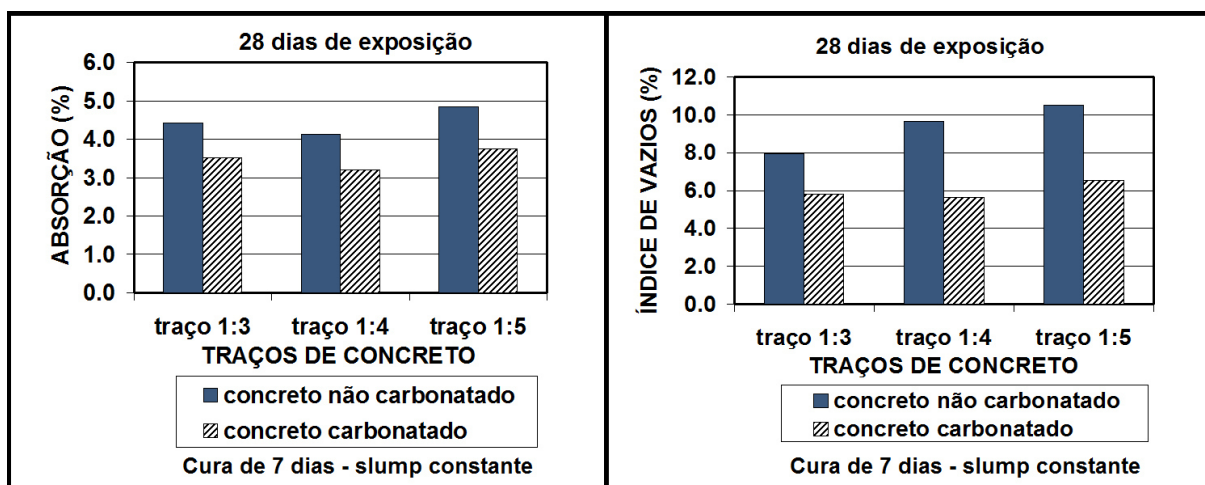


FIGURA 6 – Comparação entre concreto carbonatado e não carbonatado quanto a absorção por imersão e índice de vazios.

FONTE: A autora, adaptado de Medeiros e Helene (2001).

Os fatores que influenciam o avanço da frente de carbonatação podem ser inerentes ao concreto ou ao ambiente em que este é inserido. Como fatores ambientais podem ser citados a umidade, a temperatura e a concentração de CO_2 . Os fatores inerentes ao concreto são a porosidade, permeabilidade, relação água/cimento, consumo de cimento e a utilização de adições pozolânicas.

A umidade relativa afeta diretamente o avanço da frente de carbonatação, sendo que o maior avanço ocorre em valores de umidade entre 50% e 85% (POSSAN, 2007). Em condições de elevada umidade, a difusão do CO_2 nos poros do concreto é pequena. Já em situações de baixa umidade haverá facilidade do CO_2 adentrar ao concreto, porém não haverá água suficiente para dissolvê-lo.

A temperatura age, como em muitas reações químicas, como um catalisador, ou seja, quanto maior a temperatura do ambiente, maior velocidade de carbonatação (ROSTAM, 2004).

Em ambientes não controlados, quanto maior a porcentagem de CO_2 no ar, maior será a carbonatação do concreto. Segundo Neville (1997), a concentração de CO_2 no ambiente pode variar de 0,03% em ambientes rurais, 0,30% em ambientes urbanos e até 1,00% em ambientes urbano-industriais.

A porosidade e a permeabilidade tem influência direta na velocidade do avanço da frente de carbonatação. Quanto mais poroso e permeável for o concreto, mais rápido será o avanço da frente de carbonatação. A relação água/cimento também tem

influência na carbonatação, visto que concretos com maior resistência à compressão tendem a ser menos porosos e, portanto dificultam a entrada de CO_2 .

O consumo de cimento tem relação direta com a reserva alcalina, portanto concretos com menor consumo de cimento terão menor reserva alcalina e estarão sujeitos a carbonatação de forma mais rápida (MEHTA; MONTEIRO, 2008). Outro fator que pode influenciar a reserva alcalina do concreto são as adições pozolânicas. Contudo, neste caso, além da diminuição da reserva alcalina, que facilita a carbonatação, há também o efeito fíler, que diminui a porosidade do concreto, dificultando assim o ingresso do CO_2 . Assim, a carbonatação não é função apenas da reserva alcalina do concreto.

Segundo Thomas; Matthews; Haynes (2000), conforme citados por Hoppe Filho (2008), outro fator de influência de uma adição pozolânica é a alteração na microestrutura do concreto, que promove o refinamento dos poros, tendendo a reduzir a velocidade de carbonatação.

Raisdorfer (2015) conclui que algumas adições minerais, como sílica ativa, sílica de casca de arroz, cinza volante, fíler quartzoso e metacaulim tendem a elevar o coeficiente de carbonatação do concreto, devido ao consumo do $\text{Ca}(\text{OH})_2$ do cimento hidratado por essas adições. Apesar do fíler quartzoso não possuir atividade pozolânica, o aumento da velocidade de carbonatação em concretos com essa adição mineral podem ser justificadas pela redução da reserva alcalina, pois parte do cimento (que aumenta a reserva alcalina) é substituída por este material.

O problema em questão é que com a diminuição do pH do concreto, o avanço da frente de carbonatação pode atingir mais rapidamente a região das armaduras, tornando o aço desprotegido perante o processo de corrosão. Segundo Neville (1997), a corrosão de armaduras contidas em um concreto carbonatado pode ocorrer como se estivesse exposta à atmosfera. Sendo que a situação da armadura no interior do concreto carbonatado pode ser ainda pior, visto que o concreto mantém a umidade em contato com a armadura por mais tempo, se comparado a armaduras expostas ao ar.

2.2 CORROSÃO DE ARMADURAS NO CONCRETO

A corrosão das armaduras originadas pela carbonatação manifesta-se de forma generalizada, conforme ilustrado na FIGURA 7.

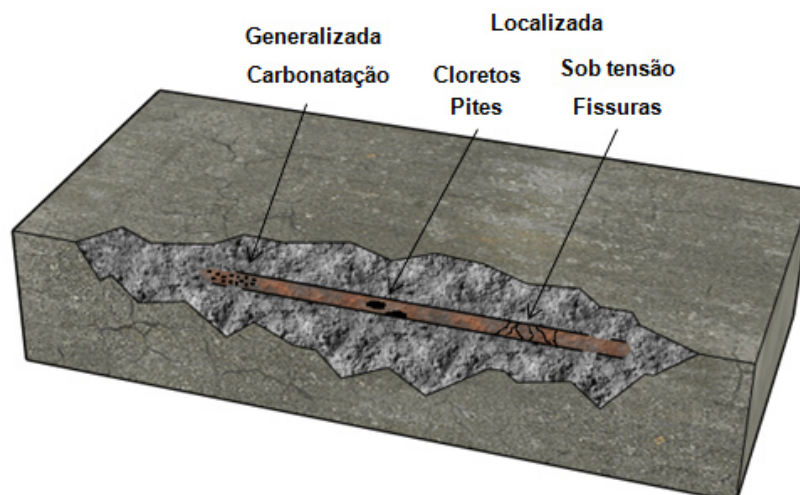


FIGURA 7 – Tipos de corrosão e fatores que as provocam.
 FONTE: A autora, adaptado de Cascudo (1997).

Segundo Gentil (1996) a corrosão do ferro é o processo inverso do processo metalúrgico que o dá origem. Ou seja, o produto gerado pela corrosão é semelhante ao minério do qual o ferro foi extraído.

A corrosão das armaduras no interior do concreto é um processo eletroquímico que ocorre na interface concreto/aço no qual a armadura é oxidada nas soluções dos poros do concreto (GHODS et al., 2009). Este processo eletroquímico ocorre como uma pilha, por isso, para que ocorra a corrosão é necessário que se tenha um eletrólito, um ânodo, um cátodo, e uma ligação entre eles.

A corrosão eletrolítica pode ocorrer em diferentes áreas de uma mesma armadura, devido à diferenças no ambiente em que ela está inserida, ou seja, desde a concentração de íons dissolvidos, como álcalis e cloretos, até mesmo a diferença de aeração do concreto em contato com a armadura. Outros fatores que podem levar a corrosão são concentrações de tensões distintas na armadura ou diferente composição deste material. Estes fatores tornam as partes da mesma armadura mais quimicamente ativas ou não e criam células de potenciais eletroquímicos (HELENE, 1993). Desse modo, uma região se torna o ânodo e outra se torna o cátodo e a solução presente nos poros do concreto age como o eletrólito, cuja função é possibilitar o fluxo de corrente elétrica. A própria armadura atua como condutor elétrico e, deste modo, a pilha eletroquímica é formada (HELENE, 1986).

Segundo Helene (1993), como os elétrons migram da região anódica para a região catódica, há a dissolução do metal, ou seja, a perda de seção da armadura ocorre na região do ânodo, conforme exemplificado na FIGURA 8 e na EQUAÇÃO (2.9). A EQUAÇÃO (2.10) mostra as reações catódicas ocorridas na armadura.

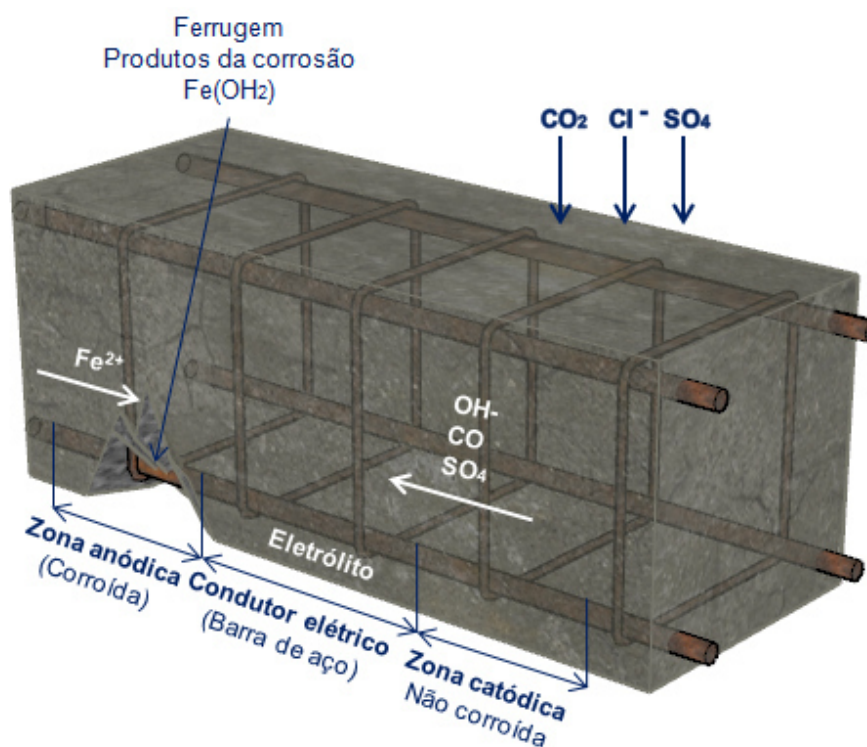
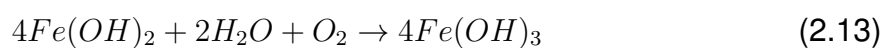
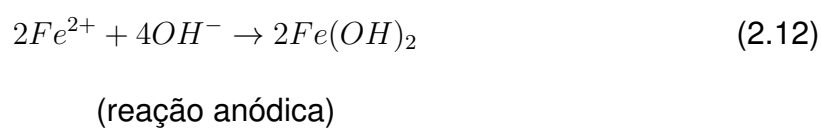
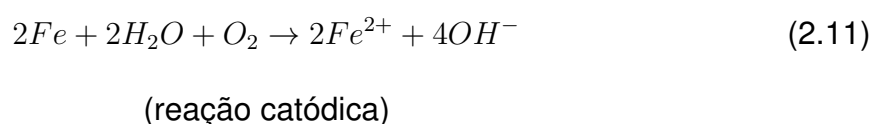


FIGURA 8 – Processo eletroquímico de corrosão das armaduras no concreto.
 FONTE: A autora, adaptado de Helene (1993).



O mecanismo de corrosão é descrito por Helene (1993) conforme as EQUAÇÕES (2.11), (2.12) e (2.13).



A ferrugem formada (EQUAÇÃO (2.13)) é expansiva, e pode se tornar de 2 e 6 vezes maior que o volume original do aço da armadura (HELENE, 1993). Como todo produto expansivo formado no interior do concreto, a corrosão pode gerar o aparecimento de fissuras. O produto expansivo gera tensões de tração interna, caso essas tensões não ultrapassem a resistência à tração do concreto, não haverá o aparecimento de fissuras. Porém, se os esforços internos de tração causados pelo material expansivo ultrapassem a resistência à tração do concreto, ocorrerá fissuração. A oxidação das armaduras pode criar fissuras a ponto de deslocar o cobrimento do concreto nas regiões onde as armaduras estão oxidadas.

2.3 REPAROS EM ESTRUTURAS COM CORROSÃO

Há vários tratamentos para recuperar as armaduras e impedir o avanço da corrosão, a FIGURA 9 mostra os principais tipos de recuperação e tratamento para corrosão de armaduras.

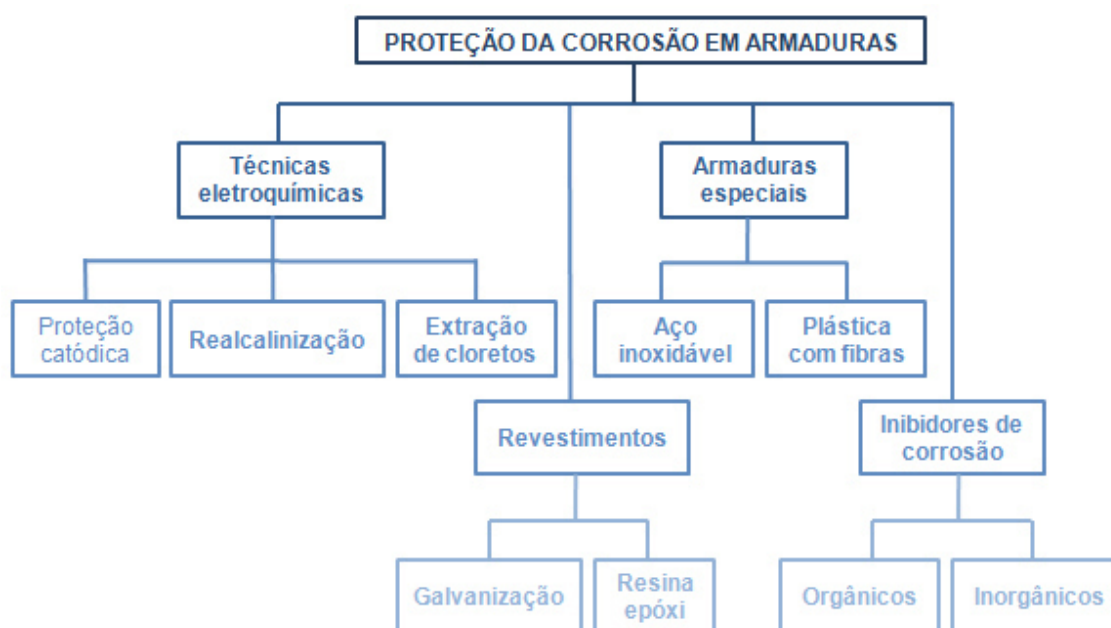


FIGURA 9 – Sistema de reparo e proteção contra corrosão das armaduras.

FONTE: A autora, adaptado de Helene (2003).

Algumas técnicas são possíveis de serem utilizadas apenas preventivamente, como a utilização de armaduras especiais. Outras, como o revestimento de armaduras também pode ser utilizado para a recuperação da armadura já corroída, porém é necessário que se remova parte do concreto na região afetada. Esta técnica, apesar de trabalhosa, é comumente utilizada em recuperação de estruturas de concreto armado com corrosão.

As técnicas eletroquímicas podem ser utilizadas para reparar armaduras já afetadas pela corrosão ou preventivamente ao processo de corrosão. Estas técnicas necessitam da prévia injeção de fissuras e remoção de parte do concreto danificado e execução de reparos localizados, restaurando a integridade e geometria da estrutura de concreto. Após a recuperação de danos localizados, as técnicas eletroquímicas podem ser aplicadas por meio de equipamentos especializados, tais como: fonte de energia, malha de titânio ativada, fibra de celulose, além dos equipamentos necessários para fraturar parte do concreto até que se alcance as armadura.

A FIGURA 9 pode ser considerada incompleta por não citar a proteção de superfície para concreto como uma alternativa de recuperação de estruturas de concreto armado, como exemplificado nos trabalhos de Medeiros e Helene (2008). Neste sentido, segundo Ho e Mark (2000), o processo de corrosão no concreto armado com proteção de superfície deve ser mais lento devido a menor umidade interna. Esta afirmação é correta visto que a cinética das reações de corrosão de armaduras é altamente dependente da quantidade de eletrólito no concreto armado. Contudo, outro efeito importante dos sistemas de proteção de superfície é a restrição ao ingresso de agentes agressivos para o interior do material, que também pode ser um motivo para a sua aplicação como técnica de recuperação. Desse modo, de acordo com Medeiros e Helene (2009), Diamanti et al. (2013) e Brenna et al. (2013), em uma estrutura em que o processo de corrosão já está instalado, a proteção de superfície apresenta efeito de redução da velocidade de corrosão devido a sua capacidade de reduzir a absorção de água do concreto armado. De acordo Medeiros e Helene (2008) e Medeiros et al. (2015), com a restrição do ingresso de água, a cinética do processo de corrosão pode ser reduzida drasticamente em função da magnitude da capacidade do sistema de proteção de superfície em reduzir a absorção de água.

A realcalinização química também não é citada na FIGURA 9, visto que a realcalinização em questão é a eletroquímica. Diante disto, a FIGURA 10 apresenta uma atualização dos principais tipos de recuperação e tratamento para corrosão de armaduras.

A realcalinização é uma técnica, cujo objetivo é elevar o pH do concreto, a fim de re-estabelecer sua alcalinidade. A realcalinização pode ser realizada por técnicas eletroquímicas ou químicas.

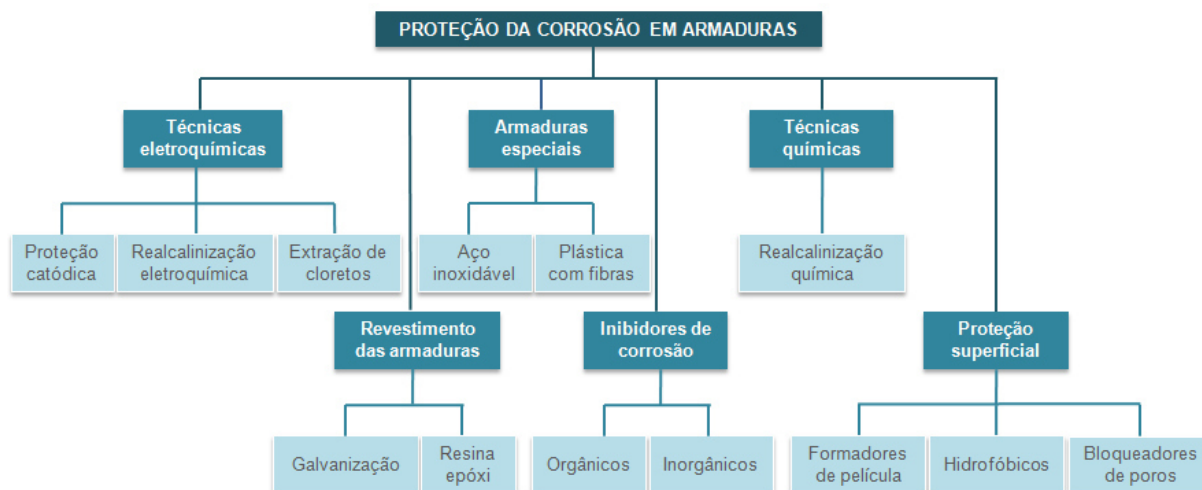


FIGURA 10 – Sistema de proteção da corrosão das armaduras.
FONTE: A autora.

2.3.1 Realcalinização eletroquímica

A realcalinização eletroquímica baseia-se em um sistema anódico temporário que fica em contato com a superfície do concreto. Este sistema consiste em uma malha de aço ou titânio ativado (ânodo) imerso em um eletrólito, que geralmente é um polpa de papel imersa em solução de carbonato de sódio (Na_2CO_3) ou carbonato de potássio (K_2CO_3) (BERTOLINI; CARSANA; REDAELLI, 2008), bem como a aplicação de uma corrente elétrica. Neste caso, as armaduras do concreto se tornam o cátodo. O processo da realcalinização eletroquímica é descrito na FIGURA 11.

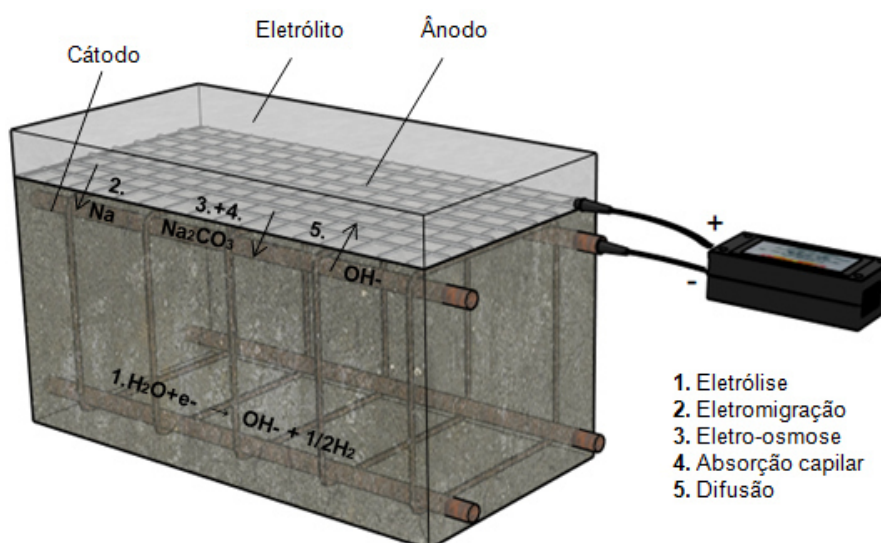
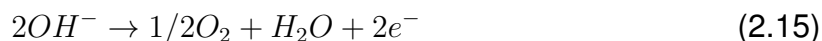


FIGURA 11 – Representação esquemática da realcalinização eletroquímica.
FONTE: A autora, adaptado de Yeih e Chang (2005).

Segundo Yeih e Chang (2005), primeiramente ocorre a eletrólise de moléculas

de água no interior dos poros do concreto na região catódica, conforme a EQUAÇÃO (2.14), onde são formados os íons hidroxila e moléculas de hidrogênio. Na região anódica (sistema temporário) ocorre a oxidação, conforme EQUAÇÃO (2.15)



Por meio da eletromigração os íons positivos (Na^+) migram para a região negativa (região das armaduras) e os íons negativos (OH^-) migram para a região do polo positivo (sistema anódico temporário). Pelo efeito da eletro-osmose o eletrólito (Na_2CO_3) move-se para a região catódica (armaduras). O eletrólito também penetra no concreto por meio da absorção capilar. Por fim, os íons hidroxila movem-se para a região anódica por difusão.

Na FIGURA 12 pode-se observar o sistema anódico temporário ao redor de um pilar.

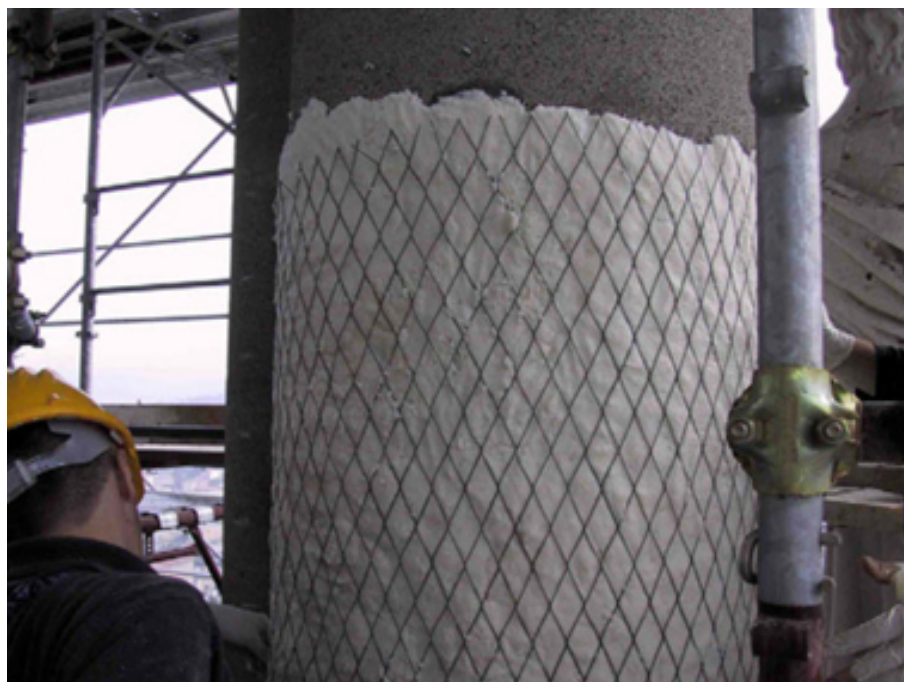


FIGURA 12 – Sistema anódico temporário aplicado no pilar de concreto.
 FONTE:(BERTOLINI; CARSANA; REDAELLI, 2008).

A elevação do pH ocorre primeiramente na superfície do concreto, pelo efeito da absorção e difusão das substâncias alcalinas e ao redor das armaduras, em função dos íons hidroxila formados nessa região. Posteriormente, essas regiões realcalinizadas

vão aumentando ao ponto em que se encontram no final do tratamento. Este processo de evolução do tratamento é apresentado na FIGURA 13.

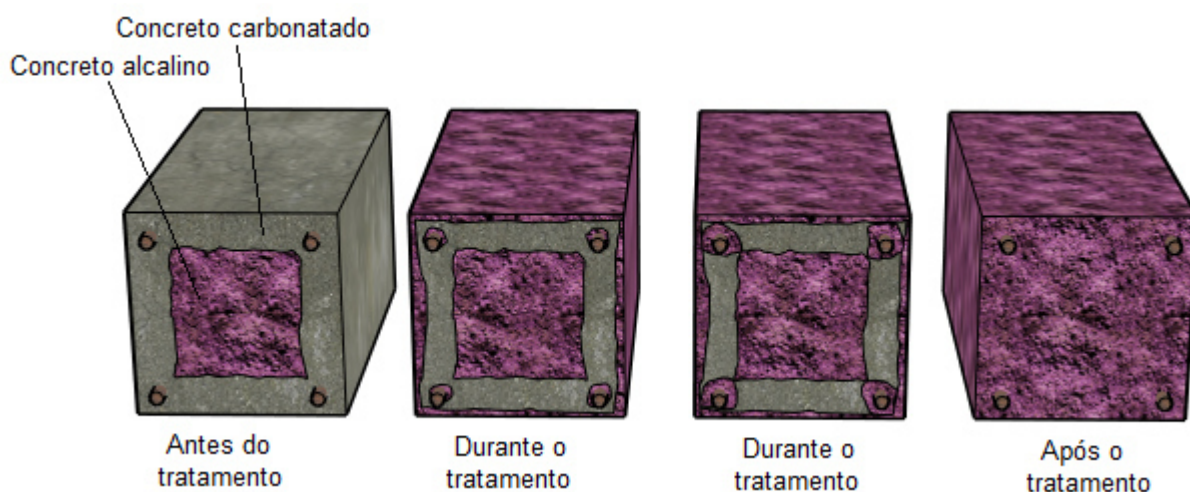


FIGURA 13 – Evolução da realcalinização eletroquímica ao longo do tempo.

FONTE: A autora, adaptado de Bertolini, Carsana e Redaelli (2008).

Como já descrito anteriormente, a solução comumente empregada é o carbonato de sódio (Na_2CO_3), como é possível observar nos trabalhos de Andrade et al. (1999), Yeih e Chang (2005), Bertolini, Carsana e Redaelli (2008), Diaz (2010) e Ribeiro et al. (2010). Diaz (2010) também utilizou uma solução de carbonato de potássio (K_2CO_3) como eletrólito. Todos os autores mencionados anteriormente relataram ter conseguido obter a realcalinização na região das armaduras.

A realcalinização eletroquímica pode apresentar alguns efeitos colaterais, como a perda de ductilidade das armaduras devido às reações de pontes de hidrogênio e a redução da aderência entre a armadura e o concreto. A fragilização por hidrogênio é a degradação das propriedades mecânicas de materiais metálicos, perda de ductilidade e resistência à tração, que geralmente resultam em uma diminuição da resistência à fissuras devido à presença de hidrogênio dissolvido no material (DJUKIC et al., 2015). As moléculas de hidrogênio conseguem adentrar ao aço em função do seu pequeno raio atômico (MOREIRA, 2006). Isso ocorre em função das moléculas de hidrogênio livre na região das armaduras (conforme EQUAÇÃO (2.14)). A coexistência de diferentes mecanismos de fragilização por hidrogênio e seus efeitos simultâneos no aço, ainda não estão bem documentada (KOYAMA et al., 2014).

A redução da aderência entre a armadura e o concreto ocorre devido a pressão gerada pelas moléculas de hidrogênio, que fazem com que o concreto dessa região se enfraqueça, diminuindo a aderência entre o concreto e o aço (MOREIRA, 2006).

Pelo fato destes efeitos colaterais serem inerentes a aplicação de corrente elétrica, eles não são observados na realcalinização química. Porém outros efeitos colaterais observados na realcalinização eletroquímica podem ocorrer também pelo método químico. São eles: o aumento da potencialização da reação álcali-agregado, dificuldade de aderência entre o revestimento e a superfície do concreto realcalinizado e alteração das propriedades físicas e mecânicas do concreto (MOREIRA, 2006).

Segundo Moreira (2006) e Sá (2006), a reação álcali-agregado pode ser potencializada devido ao aumento de substâncias alcalinas no interior do concreto. De acordo com Araujo (2004) e Moreira (2006), a dificuldade de aderência do revestimento pode ocorrer devido ao substrato úmido gerado pela realcalinização e aos cristais formados na superfície do concreto.

2.3.2 Realcalinização química

A realcalinização química baseia-se no transporte de íons por absorção e difusão de soluções alcalinas para o interior do concreto. Os íons alcalinos reagem com a fase líquida dos poros do concreto, resultando em novos produtos com o pH mais elevado (ARAUJO, 2009). A FIGURA 14 mostra o funcionamento da realcalinização química em condições de laboratório. Ao contrário da realcalinização eletroquímica, esta técnica não necessita de campo elétrico no seu emprego. Na realcalinização química, a elevação do pH do concreto ocorre de fora para dentro, como é possível observar na FIGURA 15.

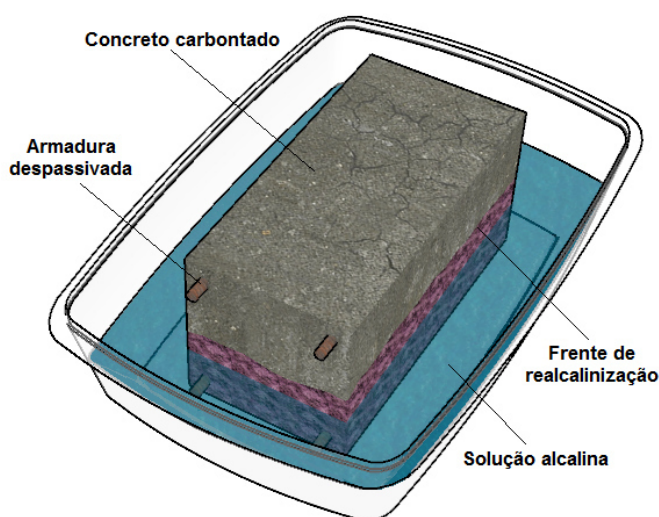


FIGURA 14 – Esquema de realcalinização química.
FONTE: A autora, adaptado de Araujo (2009).

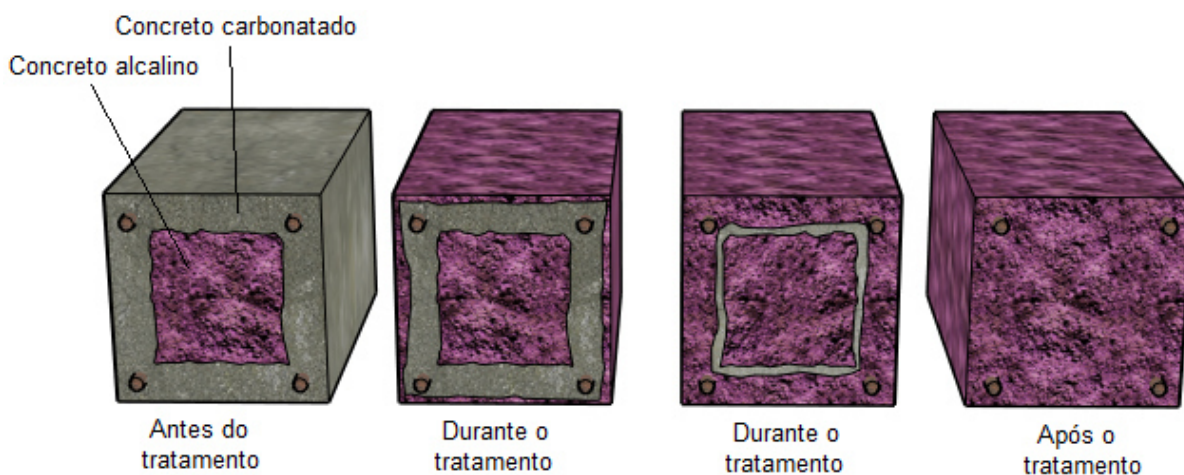


FIGURA 15 – Evolução da realcalinização química ao longo do tempo.

FONTE: A autora.

Há um tipo de realcalinização química denominada passiva, que ocorre com a aplicação de uma argamassa rica em álcalis na superfície do concreto carbonatado. O processo de absorção e difusão ocorre da mesma forma quando as soluções alcalinas são utilizadas. Porém, este processo é lento, podendo levar semanas ou meses para realcalinizar pequenas espessuras de concreto carbonatado.

As soluções comumente empregadas em estudos sobre a realcalinização química contém: NaOH, KOH, $\text{Ca}(\text{OH})_2$, Na_2CO_3 e solução tripla contendo NaOH, KOH e Na_2CO_3 .

A QUADRO 2 resume os tipos de soluções alcalinas e as suas respectivas concentrações que alguns autores utilizaram para aplicar a realcalinização química, bem como o método de aplicação utilizado.

Como é possível observar no QUADRO 3, Araujo (2004) e Sá (2006) utilizaram Na_2CO_3 , KOH e a solução tripla. Moreira (2006) utilizou apenas a solução tripla, sendo que este autor também empregou um gel, composto pelos mesmos elementos alcalinos. Araujo (2009) utilizou as Na_2CO_3 e KOH, e também preparou uma solução que não havia sido empregada anteriormente, a solução de $\text{Ca}(\text{OH})_2$.

A aplicação das soluções alcalinas por ciclos de molhagem e secagem foi empregada pela maioria dos autores. Araujo (2004) e Sá (2006) utilizaram ciclos de 2 dias de imersão e 5 dias de secagem com temperatura de 25°C e umidade relativa de 50%. Araujo (2009) utilizou o mesmo tempo de imersão (2 dias e secagem em estufa a 40°C por 3 dias). Moreira (2006) realizou apenas a imersão dos corpos de prova em solução alcalina, sem o uso de ciclos. Estes ciclos foram empregados com o intuito de potencializar a absorção da solução alcalina no interior das amostras de concreto.

QUADRO 2 – Resumo das soluções alcalinas para realcalinização química encontradas na bibliografia.

Autor	Solução alcalina	Concentração das soluções (mol/L)	Método de aplicação
Araujo (2004)	Na ₂ CO ₃	0,28M	Ciclo de molhagem e secagem (2 dias imerso e 5 dias secando a 25°C de temperatura e 50% de umidade)
	KOH	2,67M	
	Tripla (Na ₂ CO ₃ +NaOH+KOH)	0,09M de Na ₂ CO ₃ 0,38M de NaOH 0,89M de KOH	
Sá (2006)	Na ₂ CO ₃	0,28M	Ciclo de molhagem e secagem (2 dias imerso e 5 dias secando a 25°C de temperatura e 50% de umidade)
	KOH	0,27M	
	Tripla (Na ₂ CO ₃ +NaOH+KOH)	0,09M de Na ₂ CO ₃ 0,38M de NaOH 0,89M de KOH	
Moreira (2006)	Tripla (Na ₂ CO ₃ +NaOH+KOH)	0,09M de Na ₂ CO ₃ 0,38M de NaOH 0,89M de KOH	Imersão
Araujo (2009)	Na ₂ CO ₃	1M	Ciclo de molhagem e secagem (2 dias imerso e 3 dias secando a 40°C de temperatura e na estufa)
	KOH	2,5M	
	Ca(OH) ₂	Saturada	

FONTE: A autora.

Os resultados obtidos pelos autores variaram de acordo com a espessura do revestimento carbonatado. O resumo das características dos corpos de prova e os resultados obtidos são apresentados no QUADRO 3.

O tempo de realcalinização variou de 1 semana para a solução tripla para o revestimento de 15 mm com concreto com relação água/cimento de 0,70 e 10 semanas para a solução de carbonato de sódio em uma argamassa com revestimento de 25 mm e relação água/cimento de 0,50.

Alguns pesquisadores testaram também a realcalinização química em estruturas de tamanho real. Araujo (2004) testou a realcalinização química em um pilar de concreto envolvido por um plástico grosso e vedado com adesivo de base epóxi. A massa plástica foi utilizada apenas para vedação nas laterais do elemento. Como se formou uma pressão muito grande na base do pilar, proveniente da concentração de solução pelo efeito da gravidade, foram necessárias aplicações extras de adesivo epóxi a fim de manter o aparato estanque. Houve também o envolvimento da estrutura com uma cinta elástica a fim de diminuir a pressão hidrostática no pé do pilar. A solução alcalina de Na₂CO₃ utilizada esteve em contato direto com a superfície do pilar. A FIGURA 16 mostra a aplicação da solução *in loco*.

QUADRO 3 – Resumo das características e resultados obtidos por diversos autores para a realcalinização química.

Autor	Material da amostra	Relação a/c	Prof. de carb. (mm)*	Solução alcalina	Tempo para a realcalinização da profundidade carbonatada
Araujo (2004)	Argamassa de 5x10cm	0,50	25	Na ₂ CO ₃	9 semanas
				KOH	4 semanas
				Tripla***	7 semanas
Sá (2006)	Argamassa de 5x10cm	0,50	25	Na ₂ CO ₃	10 semanas
				KOH	5 semanas
				Tripla***	8 semanas
Moreira (2006)	Concreto 20x4x4cm	0,70	15	Tripla***	1 semana
Araujo (2009)	Argamassa de 5x10cm	0,65	15	Na ₂ CO ₃	9 semanas**
				KOH	7 semanas**
				Ca(OH) ₂	Não houve realcalinização**

* A profundidade de carbonatação foi medida com solução de fenolftaleína para todos os casos;

Araujo (2009) mediu a realcalinização com solução de fenolftaleína (8,3 < pH < 10,0), os demais autores utilizaram solução de timolftaleína (9,3 < pH < 10,5). * Tripla= (Na₂CO₃+NaOH+KOH)

FONTE: A autora.

O pilar em que foi realizado o experimento apresentou 19 mm de carbonatação antes da realização do ensaio. Após 10 dias de experimento, as regiões que estiveram em contato direto com a solução foram completamente realcalinizadas. As regiões onde eventualmente não houve o contato direto não apresentaram resultados satisfatórios de realcalinização.

Moreira (2006) utilizou a solução tripla, contendo Na₂CO₃, KOH e Ca(OH)₂. A solução foi empregada em estado líquido, como os demais trabalhos na área, e também em consistência de gel. O gel utilizado é uma mistura de vermiculita e massa a base de polímeros, sendo um material com aplicabilidade semelhante a uma argamassa de cimento e areia. O gel foi utilizado como um veículo e era saturado diariamente pela solução alcalina.

Primeiramente o gel foi aplicado em corpos de prova prismáticos e armazenado em local com ambiente controlado. Após a primeira experiência, outros corpos de prova foram ensaiados e expostos a intempéries para, por fim ser realizada uma aplicação



FIGURA 16 – Pilar envolto pela cinta de borracha com solução alcalina em seu interior.
FONTE: (ARAUJO, 2004).

em uma estrutura em tamanho real. Em todas as aplicações, a camada de gel sobre a superfície do concreto possuía espessura de aproximadamente 1 cm (FIGURA 17) e a solução alcalina era aspergida sobre o gel a cada 24h.

A aplicação do gel em estrutura de tamanho real foi realizada em uma viga de 20x30 cm de um pórtico de concreto armado que apresentou resistência à compressão de 15 MPa aos 28 dias. A profundidade de carbonatação medida no elemento foi de 9,9 mm em média e após 8 dias de ensaio houve completa realcalinização da estrutura.

Conclui-se que a aplicação da realcalinização química em uma estrutura real em operação ainda carece de estudos, visto que não foram encontrados estudos com esta finalidade. Os trabalhos de Araujo (2004) e Moreira (2006) tratam de estruturas de tamanho real, moldadas para fins de pesquisa, e não de estruturas reais em operação. A viabilidade de aplicação da técnica em condições de campo é uma questão a ser estudada com mais profundidade para inserir esta técnica de recuperação em casos práticos.



FIGURA 17 – Gel aplicado em estrutura de tamanho real.
FONTE: (MOREIRA, 2006).

3 PROGRAMA EXPERIMENTAL

O presente trabalho possui quatro fases de ensaios. A primeira fase visa avaliar a eficiência das soluções alcalinas, a segunda visa analisar a eficiência dos métodos de aplicação dessas soluções. As soluções alcalinas e métodos de aplicação são testados em uma estrutura real na fase três. A quarta fase visa analisar a influência das adições minerais na realcalinização química.

3.1 MATERIAIS

Os materiais utilizados foram cimento Portland, agregado miúdo e agregado graúdo. Utilizou-se também, em alguns casos, adições minerais, e para que se mantivesse a fluidez do concreto, foi adicionado superplastificante.

Neste capítulo são apresentados também os materiais utilizados na elaboração das soluções alcalinas produzidas para a realcalinização das amostras de concreto carbonatadas.

3.1.1 Cimento

Foi utilizado cimento Portland do tipo CP V-ARI, por ser um cimento sem adições minerais. Esta escolha foi realizada desta forma por que as adições minerais interferem no avanço da frente de carbonatação no interior do concreto.

A massa específica do cimento utilizado nas duas primeiras etapas deste trabalho é de $3,09 \text{ g/cm}^3$ (este ensaio foi realizado de acordo com a NBR NM 23 (ABNT, 2001)). A TABELA 2, TABELA 3 e TABELA 4 apresentam as propriedades químicas, físicas e mecânicas deste cimento, fornecidas pelo fabricante para o lote utilizado nesta pesquisa.

O cimento utilizado para o concreto com adições minerais foi do tipo CP V-ARI. A massa específica deste cimento é de $2,96 \text{ g/cm}^3$ (ensaio realizado de acordo com a NBR NM 23 (ABNT, 2001)).

TABELA 2 – Propriedades químicas do cimento.

Produto	(%)
CaO	60,00
SiO ₂	18,38
Al ₂ O ₃	4,22
Fe ₂ O ₃	2,65
MgO	4,37
SO ₃	2,82
CaO livre	0,67
Perda ao fogo	2,97
Resíduo insolúvel	0,68
Equivalente alcalino	0,58

FONTE: Itambé (2014).

TABELA 3 – Propriedades físicas do cimento.

Propriedade	Valor
Expansão quente	0,50mm
Início de pega	2h20min
Fim de pega	3h
Consistência normal	28%
Blaine	4.130cm ² /g
#200	0,40%
#350 livre	3,60%

FONTE: Itambé (2014).

TABELA 4 – Propriedades mecânicas do cimento.

Idade	Resistência (MPa)
1 dia	22,5
3 dias	34,8
7 dias	42,0
28 dias	48,8

FONTE: Itambé (2014).

3.1.2 Agregado miúdo

O agregado miúdo é uma areia natural quartzosa proveniente da São Luiz do Purunã, no estado do Paraná. A areia é considerada fina, pois possui módulo de finura de 1,76, seu diâmetro máximo é de 1,18 mm e a massa específica e unitária são 3,44 g/cm³ e 1,70 g/cm³, respectivamente, como apresentado na TABELA 5.

Sua distribuição granulométrica, realizada de acordo com a NBR NM 248 (ABNT, 2003). Este material encontra-se na zona utilizável inferior, como é possível observar na FIGURA 18.

TABELA 5 – Propriedades do agregado miúdo.

Propriedade	Resultado
Módulo de finura	1,76
Diâmetro máximo do agregado	1,18 mm
Massa específica	3,44 g/cm ³
Massa unitária	1,70 g/cm ³

FONTE: A autora (2017).

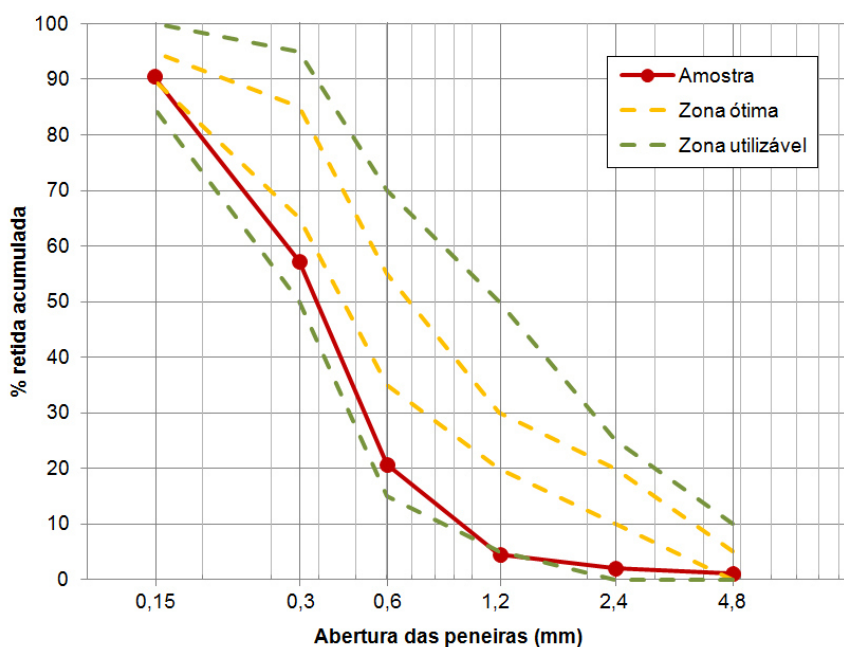


FIGURA 18 – Distribuição granulométrica do agregado miúdo.

FONTE: A autora.

3.1.3 Agregado graúdo

O agregado graúdo utilizado é de origem basáltica, proveniente da cidade de São Mateus do Sul, no estado do Paraná. Possui massa específica de 2,75 g/cm³, massa unitária de 1,63 g/cm³, diâmetro máximo de 25 mm e é considerado um agregado lamelar, pois possui índice de forma de 2,56. A distribuição granulométrica deste agregado é mostrado na FIGURA 19. Este ensaio foi realizado de acordo com a NBR 7211 (ABNT, 2003).

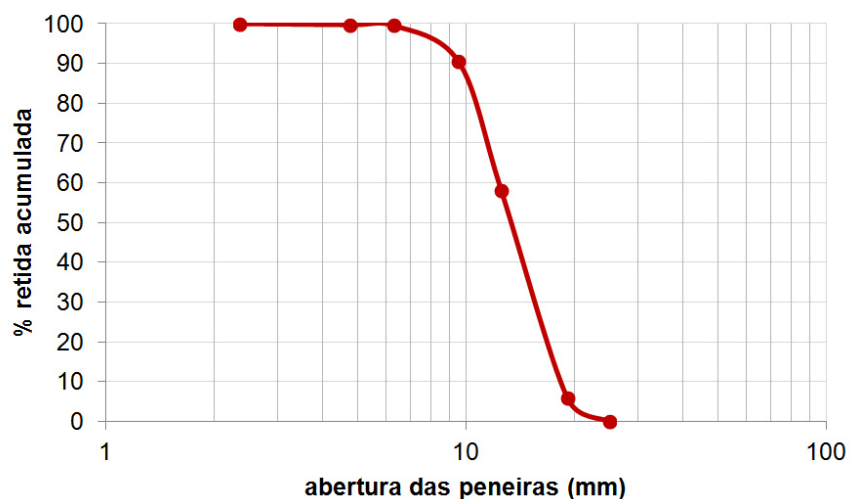


FIGURA 19 – Distribuição granulométrica do agregado graúdo.
FONTE: A autora.

3.1.4 Adições

As adições são as mesmas utilizadas nos trabalhos de Gobbi (2014) e Raisdorfer (2015). As propriedades destes materiais estão apresentadas na TABELA 6.

TABELA 6 – Propriedades das adições minerais.

Adição mineral	Massa específica (g/cm ³)	Área específica BET (m ² /kg)
Cimento CPV-ARI	3,09	1.070
Sílica de casca de arroz	2,12	14.692
Sílica ativa	2,18	20.238
Fíler quartzoso	2,60	1.227
Metacaulim	2,50	23.258

FONTE: A autora.

A distribuição granulométrica obtida por granulometria a laser dos materiais é apresentada na FIGURA 20.

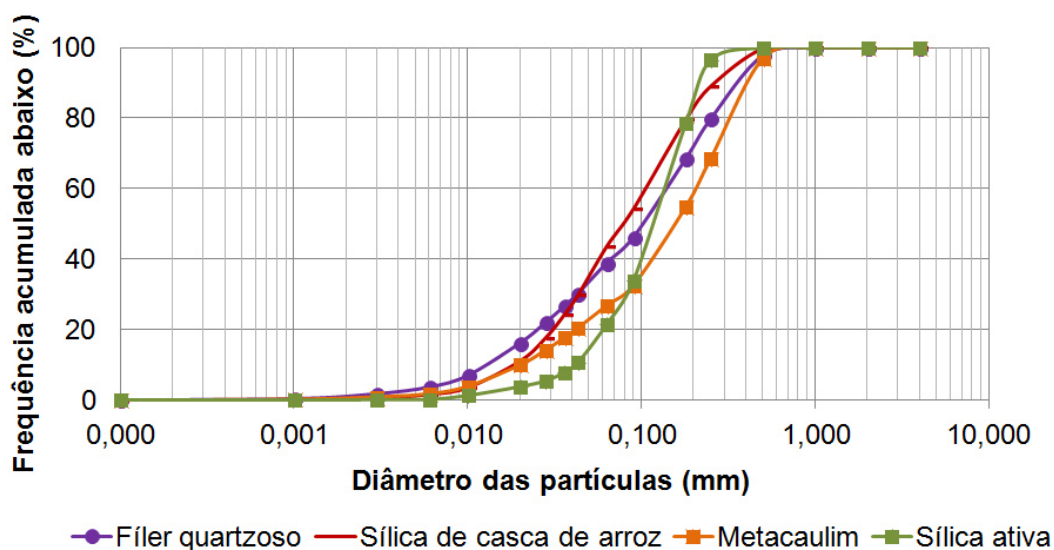


FIGURA 20 – Distribuição granulométrica das adições minerais.

FONTE: A autora.

3.1.5 Aditivo

O aditivo superplastificante utilizado nos concretos com adição mineral é de terceira geração, de pega normal e coloração castanha. Sua composição é a base de policarboxilato em meio aquoso. Este material possui pH $4,5 \pm 1,0$ e densidade de $1,07 \text{ g/cm}^3$. Nas demais etapas deste trabalho não utilizou-se aditivos.

3.1.6 Soluções alcalinas

As soluções alcalinas foram produzidas com água destilada. Os materiais utilizados foram KOH, NaOH, Ca(OH)_2 , Na_2CO_3 , cal CH III e solução comercial disponível no Brasil. A concentração de cada material na produção das soluções alcalinas é descrita na TABELA 7. Cabe observar que o NaOH e KOH foram utilizados de maneira isolada, para produção de soluções com apenas estes materiais, e também na produção da solução tripla, juntamente com o Na_2CO_3 . O Na_2CO_3 foi utilizado apenas na solução tripla. As concentrações das soluções alcalinas utilizadas foram baseadas nos trabalhos de Araujo (2004), Sá (2006), Moreira (2006) e Araujo (2009).

TABELA 7 – Concentração das soluções alcalinas.

Solução alcalina	Concentração (g/L)
KOH	150
NaOH	150
Ca(OH) ₂	Solução saturada (1,85)
Solução tripla	50 de KOH 15 de NaOH 30 de Na ₂ CO ₃
Cal CH III	Solução saturada
Solução comercial	Não disponível

FONTE: A autora.

3.2 METODOLOGIA

3.2.1 Preparo das amostras

As amostras moldadas para a verificação da eficiência das soluções alcalinas e dos métodos de aplicação são de concreto com traço 1:2,60:3,20. A relação água/cimento utilizada é de 0,70. Este valor é superior ao estabelecido pela NBR 6118 (ABNT, 2014) para ambientes urbanos, porém optou-se por esta relação, pois as estruturas tratadas frequentemente são antigas e possuem parâmetros estabelecidos pelas normas da época em que foram construídas. As amostras permaneceram por 7 dias em cura submersa e posteriormente foram submetidas a sazonalidade em estufa a 50°C por 4 dias.

Na etapa de verificação das soluções alcalinas, a carbonatação acelerada foi realizada até que a profundidade de carbonatação atingisse 15 mm. Optou-se por esta profundidade de carbonatação por se tratar do revestimento mínimo estabelecido pela NBR 6118 (ABNT, 2014), no caso de lajes e vigas com revestimento.

Na etapa de análise dos métodos de aplicação, as amostras foram submetidas a cura submersa por 28 dias, o sazonalidade foi realizado em câmara seca com temperatura e umidade controladas (23°C e 60% de umidade). Os corpos de prova permaneceram no sazonalidade por 28 dias. As amostras foram submetidas a carbonatação acelerada até que a profundidade de carbonatação atingisse 25 mm. Esta profundidade de carbonatação foi definida por se tratar do revestimento mínimo para lajes de concreto armado em ambiente urbano, estabelecido pela NBR 6118 (ABNT, 2014).

Na etapa em que se verificou a influência das adições minerais utilizou-se o traço base 1:2,25:3,00 com relação água/cimento de 0,5, variando apenas o tipo de adição mineral, sendo que estes materiais foram substituídos em 10% ao peso do cimento. Este traço é o mesmo utilizado por Raisdorfer (2015). Optou-se por manter os mesmos

traços destes autores a fim de dar continuidade a estes trabalhos. As adições minerais utilizadas foram, sílica de casca de arroz, fíler quartzoso, sílica ativa e metacaulim. Para que a consistência fosse a mesma independente das adições minerais, foi utilizado superplastificante. A cura foi feita em câmara úmida e o sazonalamento foi realizado na câmara seca. Após 70 dias de sazonalamento, as amostras foram levadas à câmara de carbonatação por 84 dias e a profundidade de carbonatação foi medida nesta idade.

Segundo Possan (2007) o processo de cura mais utilizado é o submerso entre 7 e 28 dias. Optou-se por diferentes tempos de cura e sazonalamento das amostras em função dos materiais e dos objetivos de análise de etapa cada . As amostras que contém adições pozolânicas permaneceram mais tempo na cura do que as amostras sem adições, uma vez que essas amostras necessitam de mais tempo para sua hidratação. O sazonalamento é a etapa entre a cura e a carbonatação acelerada das amostras e é utilizado para estabilizar a umidade dos corpos de prova. Segundo Possan (2007) a divergência no processo de sazonalamento é bastante elevada, e é necessário que se utilize um ambiente com temperatura e umidade constante para esse processo.

Para o teste em estrutura real foi selecionada uma edificação localizada no Centro Politécnico da Universidade Federal do Paraná, em Curitiba (FIGURA 21). A edificação foi projetada para servir ao curso de Educação Física da UFPR, e teve sua estrutura de concreto armado concluída em 2009. A vedação e acabamentos não foram executados e a obra está paralisada até os dias atuais. A laje de cobertura foi construída com vigas invertidas e, como o telhado não foi construído, há uma forte tendência de acúmulo de água e sua infiltração em muitos pontos da estrutura. Além disso, a estrutura está em processo de avanço da frente de carbonatação com valores de 10 mm em alguns pilares, como já constatado em inspeção preliminar realizada na obra (CAPRARO et al., 2016).



FIGURA 21 – Estrutura selecionada para a realização.

FONTE: A autora.

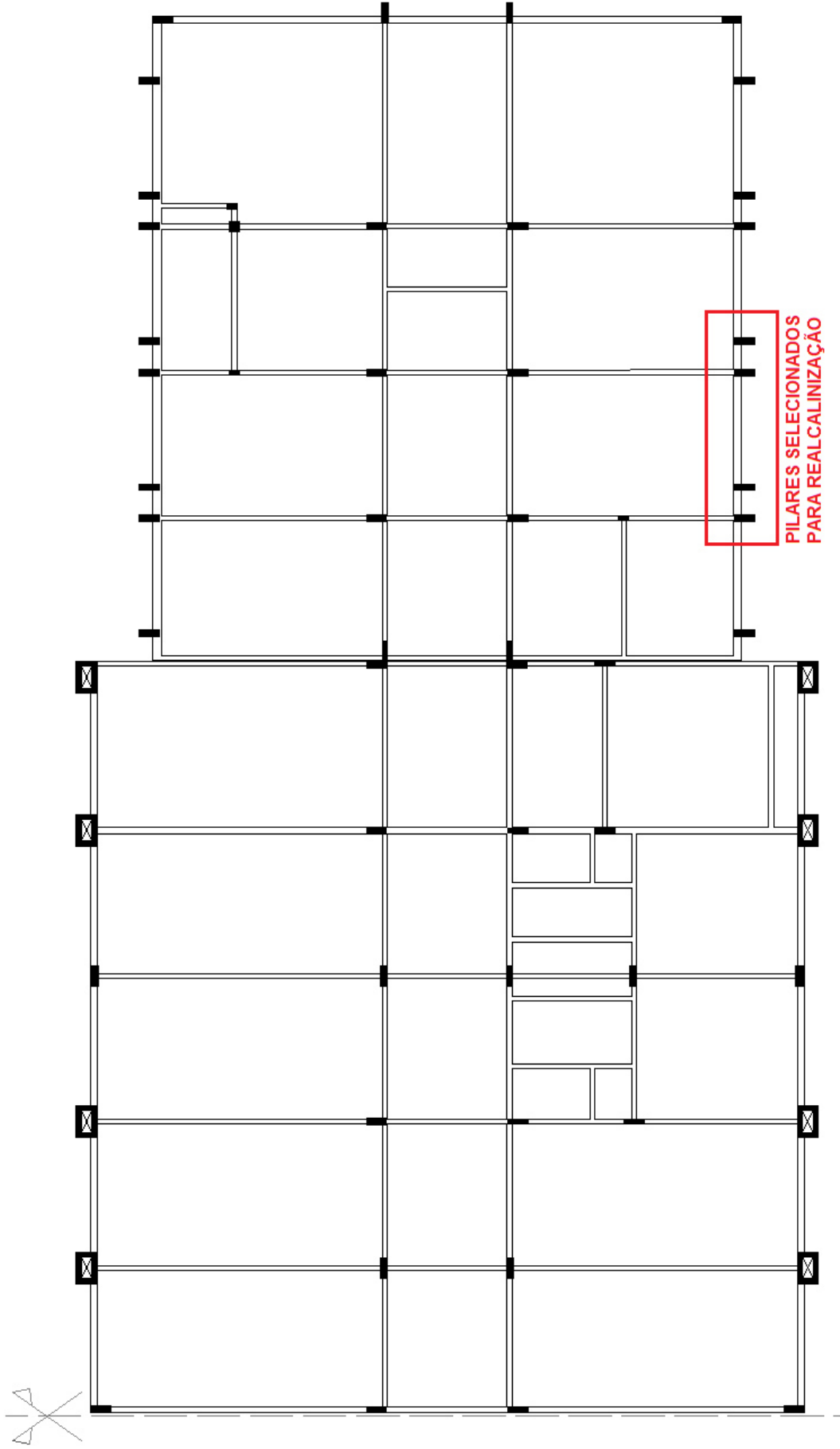


FIGURA 22 – Croqui da estrutura e localização dos pilares selecionados para a realização.

FONTE: A autora.

A estrutura é de concreto armado e possui três pavimentos. Os ensaios foram realizados em pilares do térreo (FIGURA 22). É importante ressaltar que a estrutura foi submetida ao processo de carbonatação natural, visto que os elementos não possuíam proteção frente a este mecanismo de degradação.

3.2.2 Medição da carbonatação

A carbonatação acelerada foi realizada em câmara de carbonatação com controle automatizado de temperatura, umidade e concentração de CO₂ (FIGURA 23). A umidade relativa e temperatura, são fatores que não possuem grande variação entre trabalhos acadêmicos (POSSAN, 2007), sendo que para esse trabalho adotou-se valores bastante comuns utilizados em ensaios de carbonatação acelerada (umidade de 60±5%, temperatura de 40±1°C). Adotou-se 5% de CO₂, pois segundo Pauletti (2004), utilizando-se valores próximos a este não há modificações acentuadas na microestrutura do concreto (como a carbonatação de compostos não hidratados do cimento), efeito que não ocorre na carbonatação natural.

As medições da profundidade de carbonatação e de profundidade de realcalinização foram realizadas com indicador químico, por meio de solução alcoólica de fenolftaleína. Quando aplicada a solução de fenolftaleína em um material com pH até 8,3, a solução se mantém incolor, se o pH for superior a 8,3, o material ficará com coloração de vermelho carmim.

Os corpos de prova mensurados foram fraturados, limpos com um pincel e a solução indicadora de pH foi aspergida na superfície recém fraturada da amostra. A solução de fenolftaleína foi preparada com 10 g de fenolftaleína para 700 ml de etanol puro, após realizada essa mistura, adiciona-se ainda 300 ml de água destilada, conforme as recomendações da RILEM 1988 CPC-18 (CASTRO, 2003). As leituras de profundidade de carbonatação foram realizadas, com o auxílio de um paquímetro, em 9 pontos do corpo de prova fraturado, conforme mostrado na FIGURA 24.



FIGURA 23 – Câmara de carbonatação acelerada.
FONTE: A autora.

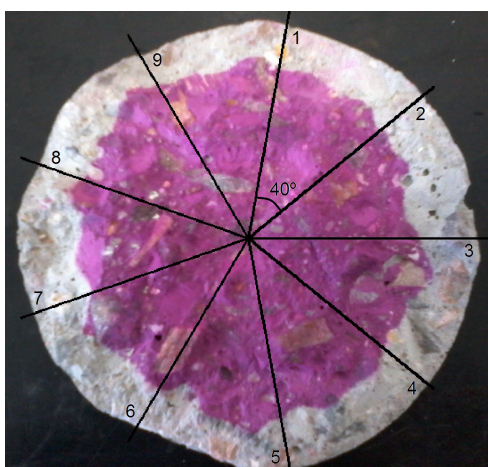


FIGURA 24 – Pontos de medição de carbonatação e realcalinização.
FONTE: A autora.

3.2.3 Métodos de aplicação das soluções alcalinas nas amostras

Foram utilizados quatro métodos de aplicação distintos. O método de total imersão, método da manta, spray e trincha.

O método de imersão consiste em deixar as amostras completamente submersas em solução alcalina (FIGURA 25). O método da manta consiste em envolver o corpo de prova em uma manta composta 100% por polietileno tereftalato (PET) reciclado, manta comumente utilizada em sistemas de drenagem, embebida em solução alcalina.

Este tipo de material foi utilizado para garantir que ela não fosse deteriorada, por se tratar de uma solução básica. As amostras foram envoltas com a manta e plástico filme, no caso da sua aplicação em laboratório (FIGURA 26). Para a aplicação em estrutura real, o objeto de estudo foi revestido com manta e lona plástica. O métodos de spray (FIGURA 27) e trincha (FIGURA 28) basearam-se nas instruções de aplicação do produto comercial, indicadas pelo fabricante. Em ambos os casos aplicou-se 5 camadas dos produtos com intervalo de 30 minutos entre elas. Antes da aplicação das soluções, as superfícies das amostras estavam limpas e secas.

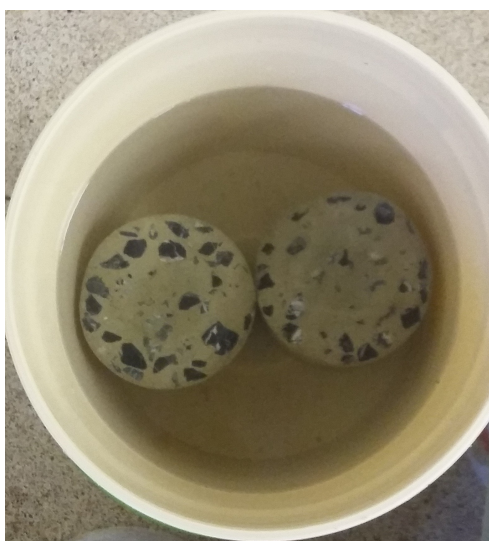


FIGURA 25 – Método de imersão das amostras em solução alcalina.

FONTE: A autora.



FIGURA 26 – Método envolvimento das amostras em manta embebida com solução alcalina.

FONTE: A autora.

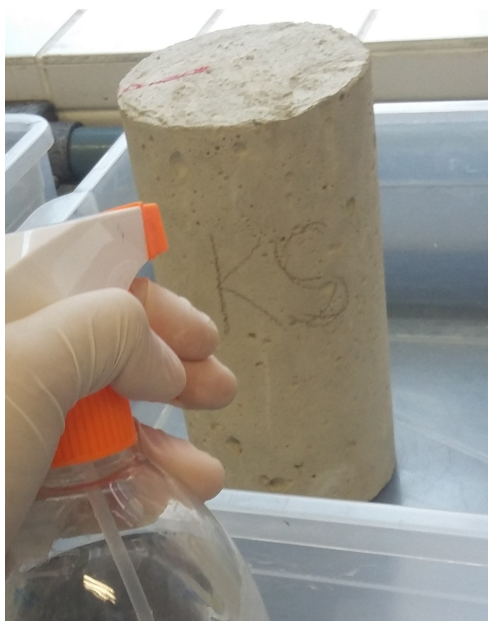


FIGURA 27 – Método de aplicação de solução alcalina com spray.
FONTE: A autora.



FIGURA 28 – Método de aplicação de solução alcalina com trincha.
FONTE: A autora.

É importante ressaltar a necessidade do uso de equipamento de proteção individual (EPIs), visto que os produtos aplicados são de elevada alcalinidade, ou seja, são produtos corrosivos. Em se tratando da aplicação dos produtos em estrutura real os cuidados devem ser redobrados. Neste caso há a necessidade de mais de uma pessoa para o manuseio das mantas e lonas, pois tratam-se de materiais de grandes dimensões. As luvas e vestuários devem resguardar ainda mais quem estiver aplicando

as soluções, visto que o produto é líquido e pode escorrer pela luva. Além disso há também o perigo de queimaduras durante a aplicação com o spray, principalmente durante dias com muito vento. Em algumas etapas de realização dos ensaios utilizou-se algumas das soluções alcalinas descritas neste capítulo, e alguns dos métodos de aplicação destas soluções, conforme exemplificado na FIGURA 29.



FIGURA 29 – Fluxograma dos ensaios realizados na pesquisa.

FONTE: A autora.

Primeiramente foram realizados ensaios da primeira e segunda etapas a fim de comparar as melhores soluções alcalinas e melhores métodos de aplicação dessas soluções. Esses ensaios serviram como base para tomada de decisão sobre soluções alcalinas e métodos de aplicação a serem utilizados na terceira e quarta etapas.

Na primeira etapa, onde se teve por objetivo investigar a eficiência das soluções alcalinas, apenas um método de aplicação foi utilizado e variaram-se as soluções alcalinas. O método de aplicação utilizado foi de total imersão das amostras nas soluções de KOH, NaOH, Ca(OH)₂, cal, tripla e comercial.

Na segunda etapa, onde o objetivo foi avaliar a eficiência dos métodos de

aplicação, utilizaram-se as duas melhores soluções alcalinas (NaOH e KOH) e a solução comercial. Os métodos de aplicação testados foram de total imersão das amostras, método da manta, spray e trincha. Nesta etapa visou-se avaliar métodos de aplicação que fosse possíveis serem aplicados em estruturas reais (manta, spray e trincha), e estes métodos foram comparados com o método de aplicação por imersão.

Na etapa de realcalinização de estrutura real (terceira etapa) foram utilizadas as soluções de NaOH e KOH, pois estas soluções alcalinas apresentaram bons resultados na primeira etapa de ensaios. O método de aplicação selecionado foi o método da manta, devido ao seu bom desempenho na segunda etapa de ensaios. Porém, foi necessário adaptar o método para a aplicação em grande escala. Primeiramente os pilares foram limpos e umedecidos pelas soluções alcalinas por meio de spray (FIGURA 30). Após o umedecimento dos pilares, os mesmos foram envoltos com mantas previamente embebidas em solução alcalina (FIGURA 31 e FIGURA 32). Para evitar a evaporação da solução alcalina, os elementos foram envoltos por lona plástica, conforme FIGURA 33 e FIGURA 34. Após o envolvimento dos pilares com manta e lona plástica, ainda houve a necessidade de amarrá-los com elásticos, para garantir que a manta embebida em solução alcalina ficasse em contato com o pilar.

Na etapa de verificação da influência das adições minerais na realcalinização (quarta etapa), utilizou-se apenas a soluções de KOH e o método de aplicação por imersão, visto que foram a solução alcalina e método de aplicação que apresentaram melhores resultados nas etapas anteriores. Nesse momento foram empregadas diferentes adições minerais (fíler quartzoso, sílica de casca de arroz, metacaulim e sílica ativa) na moldagem dos concretos, diferindo-se assim das etapas anteriores, onde utilizou-se apenas o CP V-ARI, sem nenhuma adição mineral. O objetivo nessa fase foi avaliar o comportamento da realcalinização em concretos com resistência à compressão e reserva alcalina distintas.



FIGURA 30 – Umedecimento do pilar com solução alcalina.
FONTE: A autora.



FIGURA 31 – Umedecimento da manta com solução alcalina.
FONTE: A autora.



FIGURA 32 – Pilar envolt com manta umedecida em solução alcalina.
FONTE: A autora.



FIGURA 33 – Pilar envoltos com lona plástica.
FONTE: A autora.



FIGURA 34 – Pilares envoltos com lona plástica e elásticos.

FONTE: A autora.

Foram realizados ensaios de caracterização dos materiais utilizados, também foram realizados ensaios de resistência à compressão, absorção capilar, pH das soluções alcalinas, profundidade de carbonatação e realcalinização e esclerometria. O QUADRO 4 apresenta um resumo geral dos ensaios realizados.

QUADRO 4 – Resumo dos ensaios realizados.

Etapas	Ensaio caracterização		Solução de fenolftaleína		Resistência à compressão e absorção			DRX
	Resistência compressão	Absorção capilar	Carbonatação	Realcalinização	Não carbonatado	Carbonatado	Realcalinizado	
Soluções	X		X	X		X	X	
Métodos	X	X	X	X	X	X	X	
Estrutura real	X*		X	X				
Adições	X	X	X	X				X

FONTE: A autora.

3.2.4 Resistência à compressão

Os ensaios de resistência à compressão foram realizados de acordo com a NBR 5739 (ABNT, 2007). Nos ensaios realizado em laboratório foram moldados três corpos de prova cilíndricos de dimensão 10 x 20 cm, conforme a NBR 5738 (ABNT, 2015) para cada ensaio realizado. Os ensaios de resistência à compressão foram realizados aos 28 dias, após a carbonatação e após a realcalinização das amostras.

No caso da avaliação da realcalinização em estrutura real, foi realizado o ensaios de avaliação da dureza superficial pelo esclerômetro de reflexão ((ABNT, 2012a)), como medida indireta da resistência do concreto.

3.2.5 Absorção de água por capilaridade

O ensaio de absorção capilar foi realizado em todas as etapas laboratoriais deste trabalho, por meio de três amostras cilíndricas de dimensão 10 x 20 cm para cada ensaio. Este ensaio foi realizado de acordo com a NBR 9779 (ABNT, 2012b).

3.2.6 pH das soluções alcalinas

Todas as soluções alcalinas utilizadas para realcalinizar quimicamente o concreto tiveram seu pH mensurado por meio de um pHmetro (FIGURA 35). Este equipamento possui um eletrodo de KCl/AgCl.



FIGURA 35 – pHmetro para medição do pH das soluções alcalinas.

FONTE: A autora.

3.2.7 Difração de raios X

O ensaio de difração de raios-X (DRX) permite uma análise qualitativa dos minerais presentes nas amostras ensaiadas, não sendo possível obter uma análise quantitativa dos dados. As amostras foram prensadas de forma manual no porta-amostra. A DRX foi executada por meio do equipamento RIGAKU Ultima IV X-ray

diffractometer. A medida foi realizada entre 5° e $75^\circ 2\theta$, com passo angular de $0,02^\circ 2\theta$ e tempo por passo de 1 segundo. A análise utilizou tubo com ânodo de cobre, 40 kV / 30 mA e fenda divergente de 1° .

Segundo Costa e Cincotto (2007), o resultado deste ensaio é dado por um difratograma que apresenta picos característicos das estrutura cristalinas de cada espécie química encontradas na amostra. Estes picos são gerados por meio da interação dos raios-X que difratam, caracterizando cada ângulo de incidência.

Este ensaio foi realizado na etapa em que utilizou-se adições minerais em substituição à parte do cimento, a fim de analisar os picos principais de portlandita de cada amostra ensaiada.

As amostras foram obtidas retirando-se parte da argamassa dos concretos previamente moldados. Moeu-se as argamassas e estas foram secas por 9 minutos em micro-ondas, para a paralisação das reações de hidratação do cimento.

4 RESULTADOS

4.1 ANÁLISE DAS SOLUÇÕES ALCALINAS

Nesta etapa variaram-se as soluções alcalinas utilizadas na realcalinização das amostras carbonatadas. Todas as soluções foram testadas por meio da total imersão das amostras.

É possível observar por meio da FIGURA 36 e da FIGURA 37 que as amostras apresentaram 16,25 mm de profundidade de carbonatação em média. O tempo necessário para que as amostras atingissem essa profundidade de carbonatação foi de 18 semanas na câmara de carbonatação com $5\pm 1\%$ de CO_2 . Cabe salientar que a amostra possui o traço 1:2,6:3,2, relação água/cimento de 0,70 e resistência à compressão aos 28 dias de 26,1 MPa.

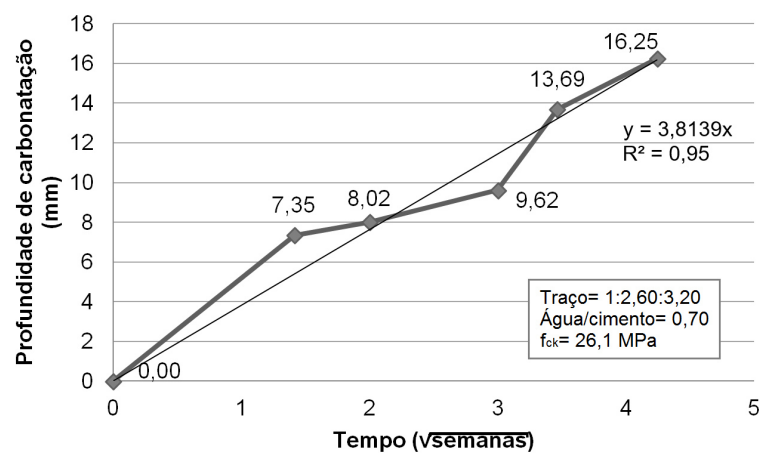


FIGURA 36 – Profundidade de carbonatação das amostras ao longo do tempo.



FIGURA 37 – Amostra carbonatada para avaliação das soluções alcalinas.

O modelo clássico de cálculo da profundidade de carbonatação é mostrado na EQUAÇÃO (4.1), onde e_c é a espessura carbonatada (em mm), k_{CO_2} é o coeficiente de carbonatação e t é o tempo (em semanas).

$$e_c = k_{CO_2} \cdot \sqrt{t} \quad (4.1)$$

O avanço da profundidade de carbonatação tem comportamento exponencial onde, nas primeiras idades, a frente de carbonatação avança de forma rápida, e ao passar do tempo, a velocidade de carbonatação diminui (NEVILLE, 1997). Uma das razões pela diminuição da velocidade de carbonatação com o tempo é a deposição do $CaCO_3$, que colmata os poros do concreto (HELENE, 1986), dificultando a entrada de CO_2 .

O comportamento da realcalinização e da carbonatação são semelhantes. Portanto, é possível calcular o coeficiente de realcalinização (k_{realc}), de maneira análoga ao coeficiente de carbonatação (k_{CO_2}), uma vez que os mecanismos de realcalinização, assim como de carbonatação, ocorrem por meio da difusão de substâncias no interior do concreto. A EQUAÇÃO (4.2) apresenta o modelo de cálculo para profundidade de realcalinização, onde e_r é a espessura realcalinizada (em mm), k_{realc} é o coeficiente de realcalinização e t é o tempo (em dias). Para o cálculo do k_{CO_2} , o tempo dá-se em semanas, enquanto para o cálculo do k_{realc} , o tempo é apresentado em dias. Essa diferença ocorre pois a realcalinização avança de maneira mais rápida que a carbonatação. Tanto o modelo proposto para o cálculo do avanço da profundidade de realcalinização como o modelo para o cálculo da profundidade de carbonatação são modelos simplificados não levando em conta muitos parâmetros de influência. Porém a utilização de poucos parâmetros pode ser considerada uma vantagem devido à fácil aplicação destes modelos.

$$e_r = k_{realc} \cdot \sqrt{t} \quad (4.2)$$

Para se obter o k_{realc} , no eixo X dos gráficos de profundidade de realcalinização apresenta-se a \sqrt{t} . Isso deu-se com o objetivo de linearizar o comportamento da realcalinização, obtendo assim o coeficiente angular da reta, que é justamente o k_{realc} .

A FIGURA 38 apresenta os resultados de profundidade de realcalinização para as amostras tratadas nesta etapa. E a FIGURA 39 apresenta os coeficientes de realcalinização para as soluções de KOH, comercial, tripla e de NaOH.

É possível observar na FIGURA 38 e na FIGURA 39 o avanço da profundidade de realcalinização e coeficiente de realcalinização, respectivamente. Observa-se na FIGURA 38 que as soluções de $Ca(OH)_2$ e cal não foram capazes de realcalinizar o concreto carbonatado. Os coeficientes angulares das retas das linhas de tendências

(k_{realc}) da profundidade de realcalinização (FIGURA 38) são 4,65 mm, 3,40 mm, 3,33 mm e 3,10 mm para as soluções de KOH, comercial, tripla e de NaOH, respectivamente.

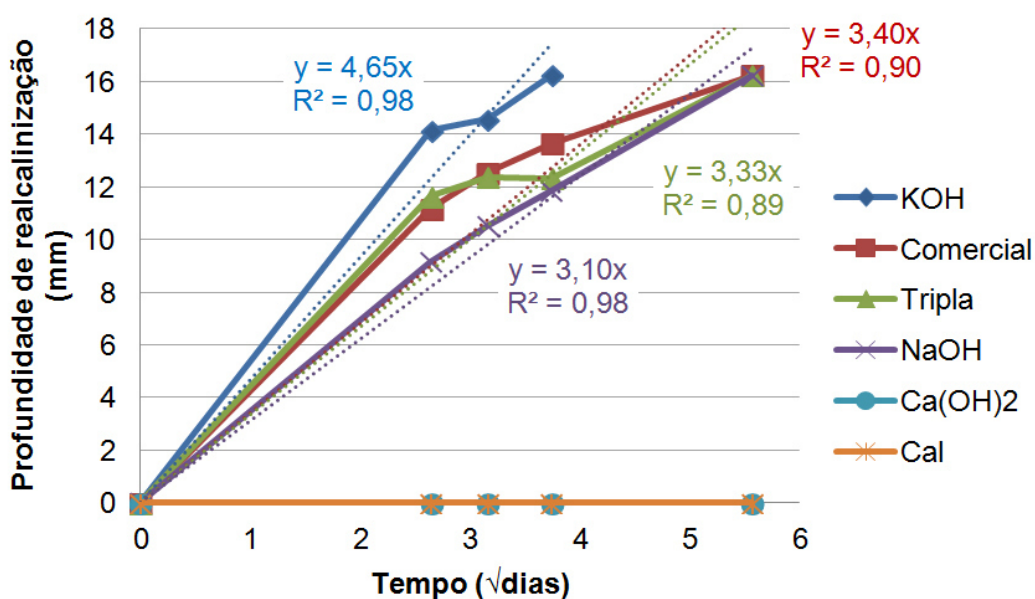


FIGURA 38 – Profundidade de realcalinização das amostras ao longo do tempo.

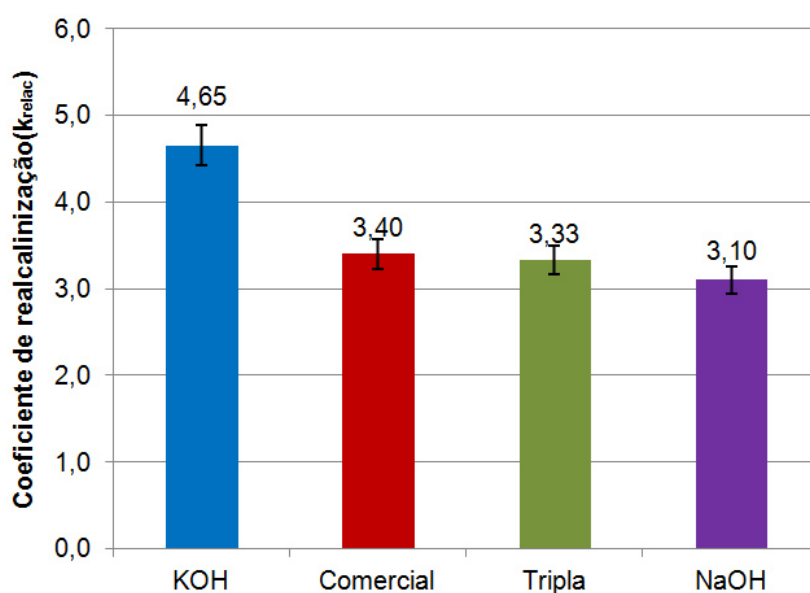


FIGURA 39 – k_{realc} para as soluções de KOH, comercial, tripla e NaOH.

Por meio da EQUAÇÃO (4.2) e dos coeficiente apresentados na FIGURA 39 é possível estimar o tempo necessário para que as soluções utilizadas nesta etapa realcalinizem espessuras maiores de carbonatação. A TABELA 8 apresenta a estimativa de tempo necessário para realcalinizar 20 mm, 25 mm e 30 mm, com as soluções alcalinas testadas por meio de imersão, para o concreto dessa pesquisa (relação água/cimento de 0,70 e resistência à compressão de 26,1 MPa aos 28 dias).

TABELA 8 – Estimativa de tempo para realcalinização das amostras com 7 dias de cura, tratadas com solução de KOH, comercial, tripla e de NaOH.

Solução alcalina	Tempo (dias)			
	14 mm	20 mm	25 mm	30 mm
KOH	16	93	116	140
Comercial	14	68	85	102
Tripla	12	67	83	100
NaOH	12	62	78	93

A solução de KOH levou 14 dias para realcalinizar completamente a espessura carbonatada das amostras, enquanto as demais soluções obtiveram os mesmos resultados após 31 dias de tratamento. Araujo (2004) e Sá (2006) também obtiveram maior velocidade de realcalinização com a solução de KOH, se comparada com Na_2CO_3 e solução tripla. A realcalinização com solução de KOH empregada em corpos de prova cilíndricos de 5 x 10 cm de argamassa com relação água/cimento de 0,50, foi de 25,0 mm em aproximadamente 36 dias para o trabalho de ambos os pesquisadores. Araujo (2009) obteve 20 mm de profundidade de realcalinização em corpos de prova de argamassa com relação água/cimento de 0,80 após 21 dias de tratamento com solução de KOH e 13 mm para argamassas com relação água/cimento de 0,65. Para Araujo (2009) a solução de KOH foi mais eficiente que a solução de Na_2CO_3 e de $\text{Ca}(\text{OH})_2$, sendo que a última não foi capaz de realcalinizar nenhuma das argamassas estudadas, mesmo após 9 semanas de tratamento. A FIGURA 40 ilustra a realcalinização com solução tripla após 10 dias de tratamento.



FIGURA 40 – Realcalinização das amostras com solução tripla após 10 dias de tratamento.

Assim como o constatado por Araujo (2009), neste estudo a solução $\text{Ca}(\text{OH})_2$ e cal não foram eficazes na realcalinização do revestimento de concretos carbonatados, como é possível observar na FIGURA 41 e na FIGURA 42. No presente trabalho a realcalinização química com soluções de cal e $\text{Ca}(\text{OH})_2$ foram aplicadas durante 9 meses. Araujo e Helene (2011) demonstram que apesar da solução de $\text{Ca}(\text{OH})_2$ não realcalinizar o revestimento dos corpos de prova, houve realcalinização no entorno das armaduras, fato não justificado pelos autores. A autora comprovou ainda a passivação das armaduras com essa solução. Uma vez que no presente estudo utilizaram-se apenas amostras sem armaduras no seu interior, a solução de $\text{Ca}(\text{OH})_2$ não foi utilizada nas etapas subsequentes desse trabalho, pois não haveria realcalinização para ser mensurada.



FIGURA 41 – Tentativa de realcalinização com a solução de $\text{Ca}(\text{OH})_2$ durante 9 meses.



FIGURA 42 – Tentativa de realcalinização com a solução de cal durante 9 meses.

A fim de verificar os fatores que podem ter levado a ineficiência da realcalinização com solução de cal e $\text{Ca}(\text{OH})_2$, elaborou-se a TABELA 9, onde constam algumas propriedades das soluções alcalinas utilizadas. As propriedades definidas para a análise foram a concentração (em g/L), massa molar das moléculas (mol) e pH das soluções.

TABELA 9 – Propriedades das soluções alcalinas.

Solução alcalina	Concentração (g/L)	Concentração molar (mol/L)	pH
KOH	150	2,67M	13,61
Solução comercial	Não disponível	Não disponível	13,43
Solução tripla	50 de KOH 15 de NaOH 30 de Na ₂ CO ₃	0,89M de KOH 0,38M de NaOH 0,23M de Na ₂ CO ₃	13,37
NaOH	150	3,75M	12,85
Ca(OH) ₂	Solução saturada (1,85)	Solução saturada (0,025M)	13,17
Cal CH III	Solução saturada	Solução saturada	12,78

A FIGURA 43 apresenta as correlações dessas propriedades com o k_{realc} . Primeiramente correlacionou-se o k_{realc} com o pH, pois poderia haver uma correlação entre a alcalinidade da solução e o aumento da alcalinidade (realcalinização) do concreto. Porém, verificou-se que essa propriedade não tem relação com o k_{realc} , uma vez que o valor de R^2 foi de 0,53. Correlacionou-se então o k_{realc} com a massa molar, visto que a massa molar é um indicativo do tamanho das moléculas, o que pode dificultar ou facilitar a difusão no interior dos poros do concreto. Verificou-se que esta propriedade também não possui correlação elevada com a velocidade de realcalinização das amostras, uma vez que apresentou R^2 de 0,66. Por fim, observou-se que a concentração em g/L das soluções pode ter influência nessa velocidade, sendo entre as três propriedades avaliadas a que melhor se relaciona com o coeficiente de realcalinização com R^2 igual a 0,89. Vale salientar que as correlações foram obtidas com base em pouco pontos, e devem ser analisada com parcimônia, ou seja, os resultados obtidos nessas correlações são um indicativo do comportamento citado.

Observando a TABELA 9 fica evidente a razão pela qual a solução de Ca(OH)₂ (e a solução de cal) não é capaz de realcalinizar concretos carbonatados. A concentração utilizada para o preparo das solução de KOH e NaOH em comparação com o Ca(OH)₂ é de 81 vezes maior. Essa diferença de concentração ocorre devido a baixa solubilidade do Ca(OH)₂, que é de 1,85 g/L, enquanto o KOH e o NaOH possuem solubilidade de 1120 g/L e 1110 g/L, respectivamente. Além da diferença entre as concentrações das soluções alcalinas, há também a hipótese das soluções de cal e Ca(OH)₂ tamponarem os poros próximos a superfície do concreto, evitando assim a entrada das soluções.

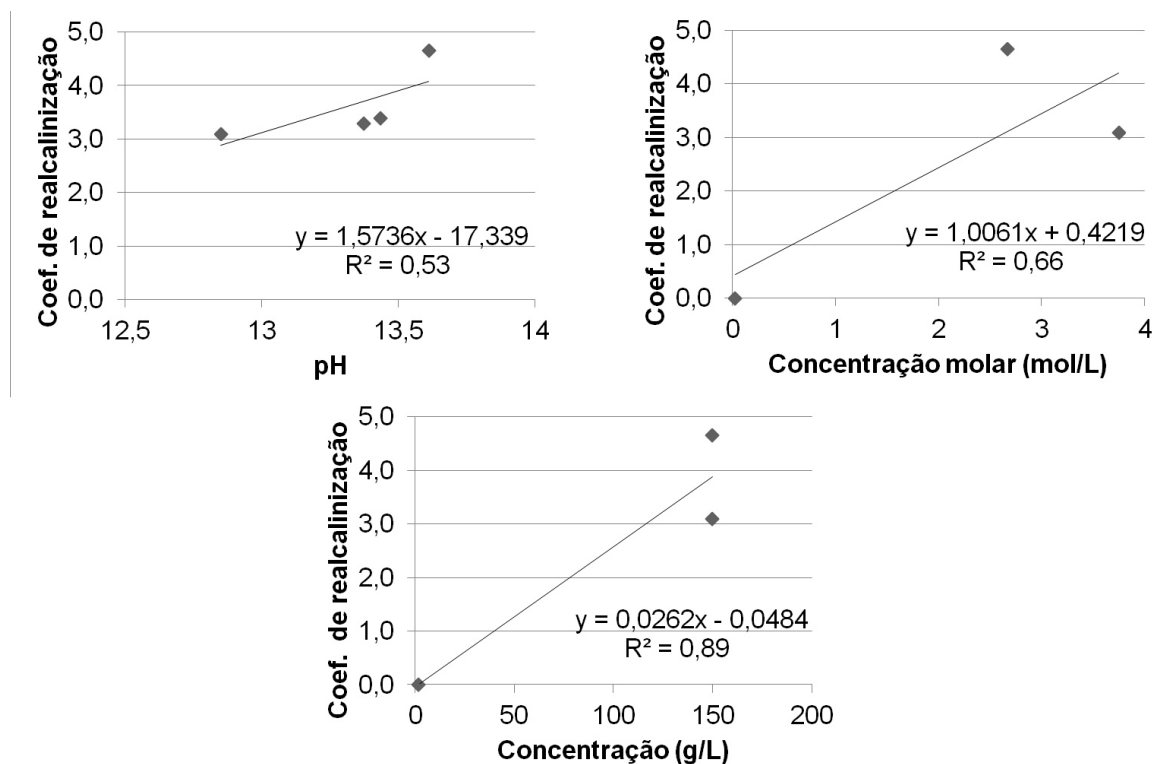


FIGURA 43 – Correlações entre as propriedades das soluções alcalinas e o coeficiente de realcalinização.

Além de ensaios para a avaliação da realcalinização, também realizaram-se ensaios a fim de detectar possíveis mudanças nas propriedades das amostras tratadas. O ensaio de resistência à compressão foi realizado aos 28 dias (apenas para caracterizar o material estudado), após a carbonatação do concreto e após a realcalinização, conforme FIGURA 44. O ensaio de absorção por capilaridade foi realizado após a carbonatação e após a realcalinização com a solução que obteve maior velocidade de realcalinização, ou seja, a solução de KOH. Este ensaio foi realizado de acordo com a NBR 9779 (ABNT, 2012b).

De acordo com o teste Tukey, com um intervalo de 95% de confiança, (FIGURA 45), a resistência à compressão após a realcalinização (com 164 dias após a moldagem) manteve-se estatisticamente igual as amostras carbonatadas que não passaram pela realcalinização.

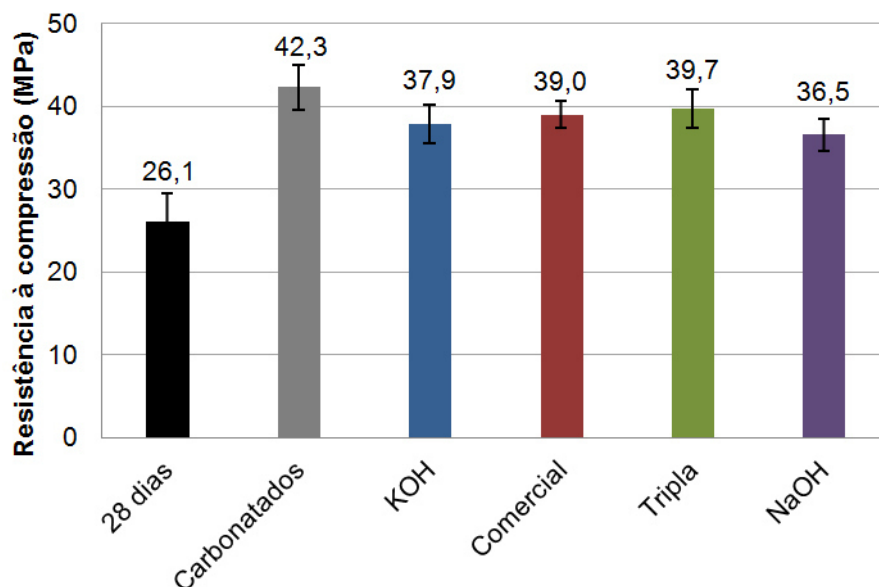


FIGURA 44 – Resistência à compressão das amostras a 28 dias de cura, após a carbonatação e após a realcalinização com as soluções testadas.

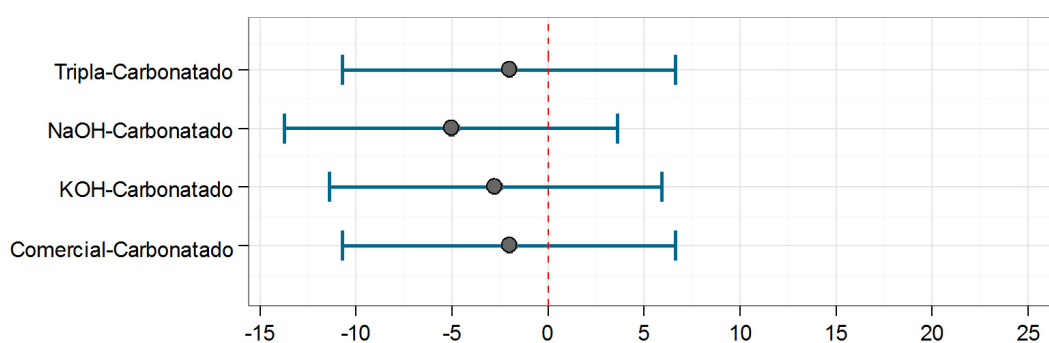


FIGURA 45 – Teste Tukey de resistência à compressão das amostras após o tratamento, em comparação com amostras carbonatadas.

É possível observar por meio da FIGURA 46 que a absorção capilar diminuiu após o tratamento com a solução de KOH se comparada com corpos de prova carbonatados. Essa redução foi de 2,61 vezes ao final dos ensaios de absorção capilar. Essa diferença é considerada significativa por meio do teste Tukey, com um intervalo de confiança de 95%.

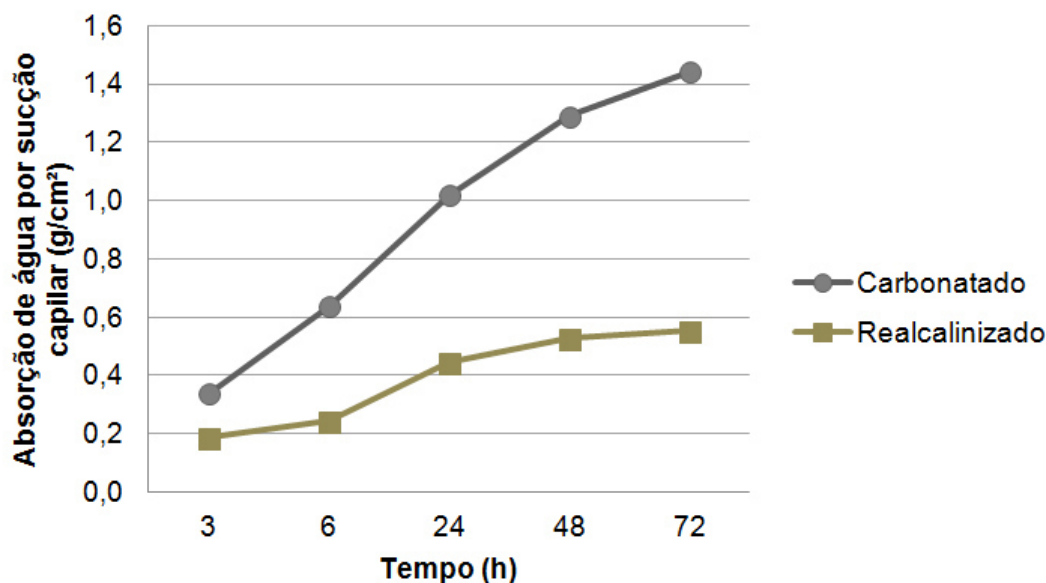


FIGURA 46 – Absorção capilar das amostras carbonatadas e das amostras realcalinizadas com solução de KOH.

A redução na absorção por sucção capilar pode ter ocorrido em função da entrada de novos materiais no interior do concreto que podem ter causado a dissolução do carbonato de cálcio e conseqüentemente, aumentado o diâmetro dos poros, fazendo com que as forças de sucção capilar diminuam.

Com as análises realizadas nesta etapa pode-se observar que a solução mais eficiente neste caso foi a solução de KOH, seguida pela solução comercial, tripla e de NaOH. As soluções de $\text{Ca}(\text{OH})_2$ foram ineficazes no tratamento de concretos carbonatados.

Apesar de ter obtido resultados satisfatório na realcalinização de concretos carbonatados, a solução tripla não será utilizada nas etapas subseqüentes deste trabalho. Pois a solução possui três materiais em conjunto, sendo difícil analisar os matérias separadamente.

4.2 ANÁLISE DOS MÉTODOS DE APLICAÇÃO

A FIGURA 47 ilustra a profundidade de carbonatação das amostras para esta parte do experimento. Após 53 semanas em carbonatação acelerada, observou-se 31,64 mm de profundidade de carbonatação média das amostras. Observa-se que o k_{CO_2} encontrado é 3,47, semelhante ao encontrado no item 4.1 deste trabalho ($k_{\text{CO}_2}=3,81$), pois ambas as etapas utilizaram os mesmos materiais, traços e relação água/cimento.

A realcalinização com soluções de KOH, NaOH e comercial foram testadas em aplicações por spray e por trincha. Todas as soluções foram aplicadas conforme

indicação do fabricante do produto comercial, ou seja, 5 aplicações com intervalos de 30 minutos entre as aplicações. Após a aplicação do tratamento realcalinizador, os corpos de prova foram fraturados e se aspergiu solução de fenolftaleína na superfície recém fraturada, conforme exposto na FIGURA 48 e na FIGURA 49. É possível observar que estes métodos de aplicação foram pouco eficientes na realcalinização do concreto carbonatado, não justificando o emprego desta técnica em estruturas reais.

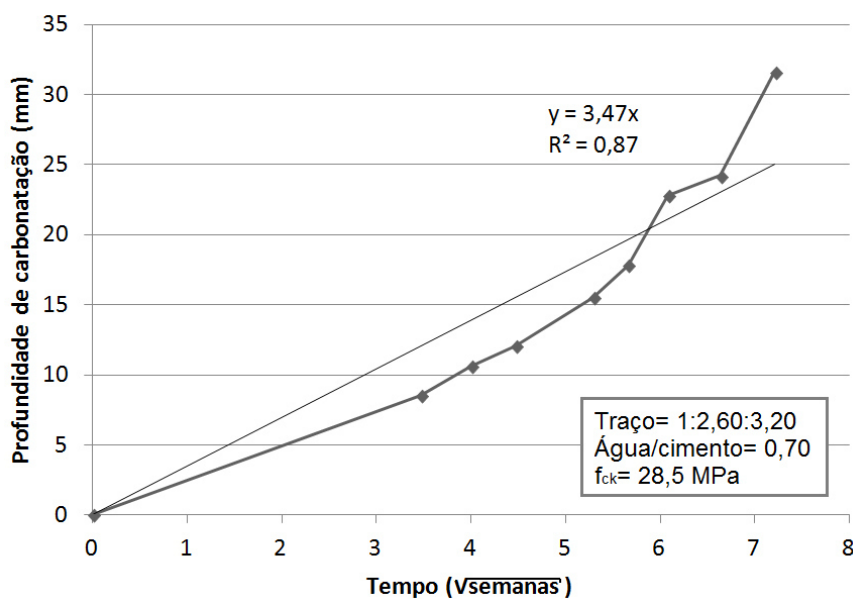


FIGURA 47 – Profundidade de carbonatação das amostras ao longo do tempo, para o substrato de concreto.

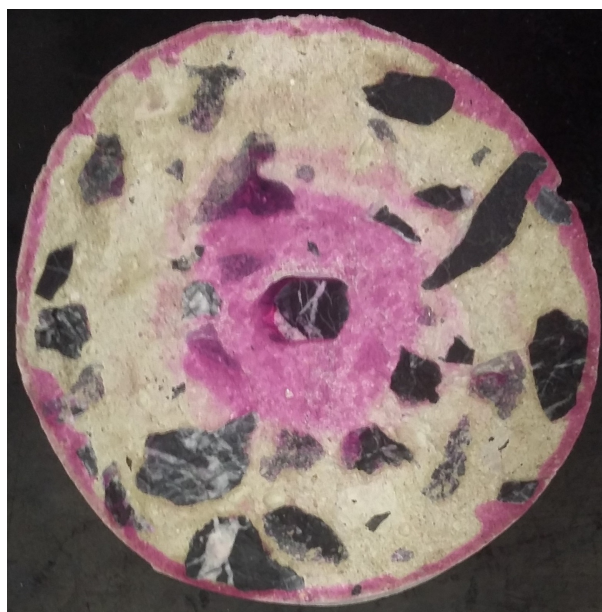


FIGURA 48 – Amostra parcialmente realcalinizada por solução de KOH aplicada por spray.



FIGURA 49 – Amostra parcialmente realcalinizada por solução de KOH aplicada por trincha.

A FIGURA 50 apresenta as profundidades de realcalinização (k_{realc}) obtidas com a aplicação das soluções alcalinas por meio dos métodos de spray, trincha, manta e imersão. A FIGURA 51 exibe os resultados de profundidade de realcalinização ao longo do tempo obtidos por meio de imersão, enquanto a FIGURA 52 apresenta os resultados alcançados através do método da manta.

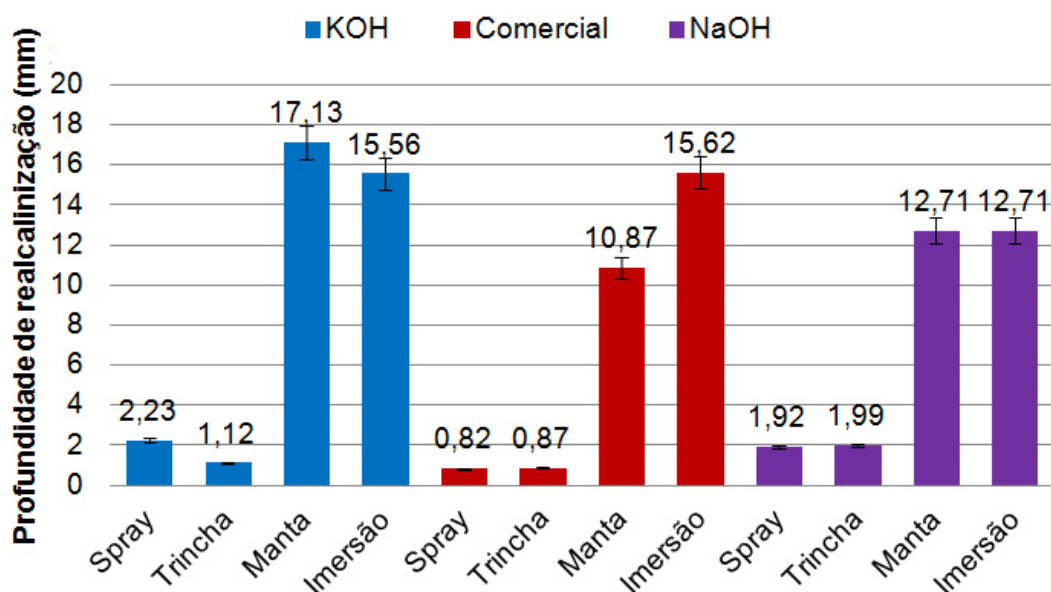


FIGURA 50 – Realcalinização pela aplicação de soluções alcalinas com spray e com trincha.

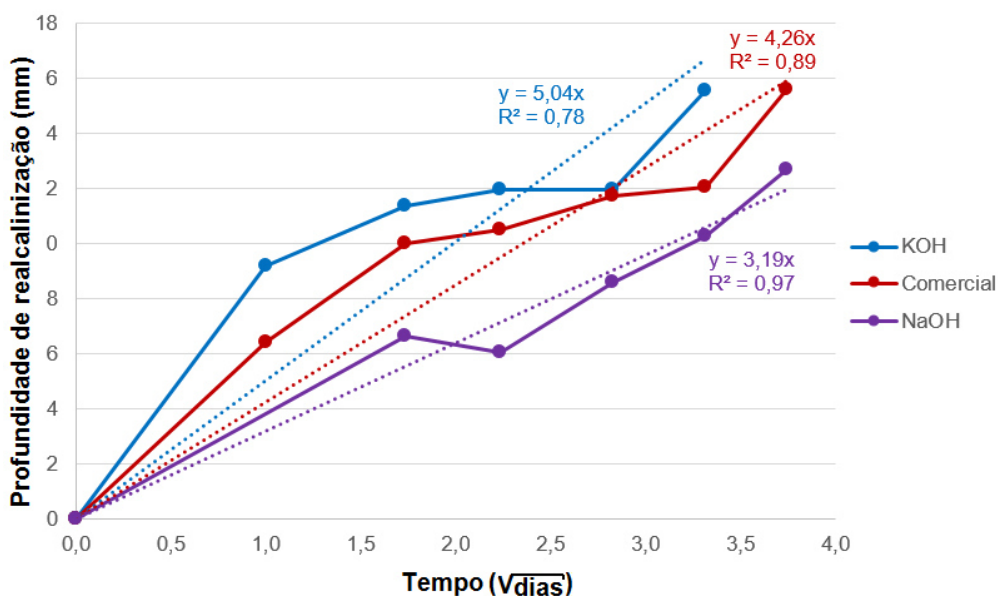


FIGURA 51 – Amostra realcalinizada pelo método de imersão.

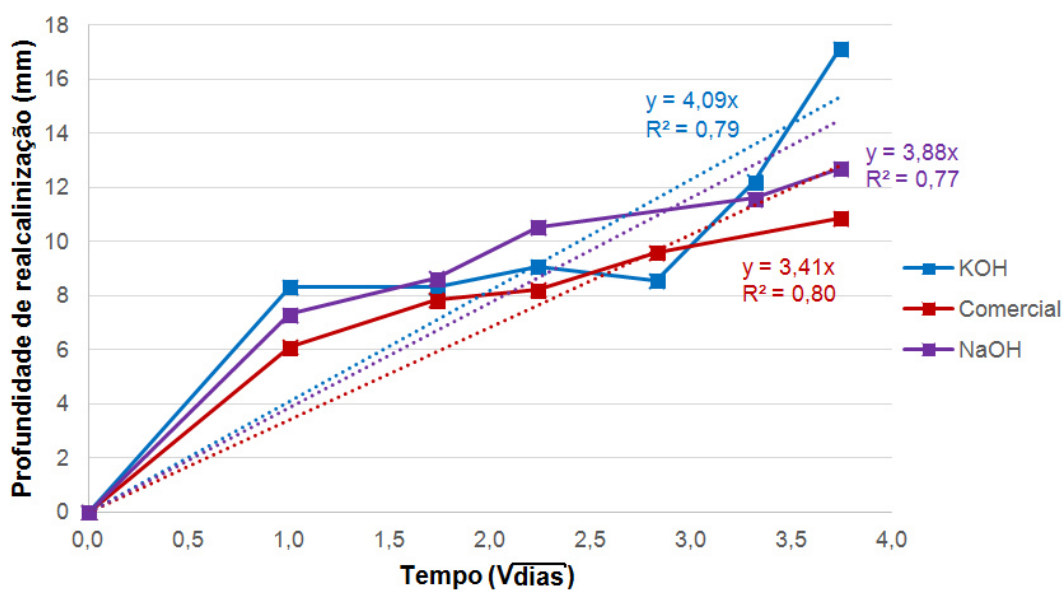


FIGURA 52 – Amostra realcalinizada pelo método da manta.

Verifica-se que o método de aplicação por spray e trincha não foi efetivo, não sendo suficiente para realcalinizar grandes espessuras, isso ocorre em função do pouco tempo de contato das soluções alcalinas na superfície do concreto (cinco aplicações com intervalo de 30 minutos entre elas). Observa-se que as soluções alcalinas aplicadas pelos métodos de imersão e manta, ou seja, com aplicação contínua houve maiores profundidades de realcalinização. Os valores de profundidade de realcalinização obtidos com os métodos de spray, trincha e manta equivalem a 11,3%, 9,1% e 92,8% do valor obtido com o método de imersão, em média. Não realizaram-se análises estatísticas para os métodos de spray e da manta, devido a baixa eficiência dos mesmos.

Comparando-se os dados da FIGURA 51 com os da FIGURA 52 é importante notar que os valores de R^2 no caso da aplicação com a manta é sempre inferior do que o método da imersão. Este é um indicativo que a eficiência do método da imersão, em termos de constância dos resultados, é maior do que a aplicação com a manta. Isso ocorre porque os resultados seguem um padrão de uniformidade maior no caso da aplicação por imersão, resultando em R^2 maior. Contudo, não se pode deixar de considerar que a aplicação por imersão em campo é inviável, ressaltando a vantagem da aplicação por manta, pois desenvolve uma alternativa eficiente e aplicável em estruturas reais.

Como é possível observar por meio da TABELA 10, para o método de imersão após 14 dias de tratamento obteve-se 15,62 mm e 12,71 mm de profundidade de realcalinização para as soluções comercial e de NaOH, respectivamente, e por meio da solução de KOH realcalinizou-se 15,56 mm após 11 dias de tratamento. Enquanto para o método da manta atingiu-se 17,13 mm, 10,87 mm e 12,71 mm para as mesmas soluções alcalinas após 14 dias.

TABELA 10 – Resumo dos resultados de realcalinização com o método de imersão e da manta.

Método de aplicação	Solução alcalina	Profundidade de realcalinização (mm)	Tempo (dias)
Imersão	KOH	15,56	11
	Comercial	15,62	14
	NaOH	12,71	14
Manta	KOH	17,13	14
	Comercial	10,87	14
	NaOH	12,71	14

Nota-se, por meio da FIGURA 53, que os k_{realc} obtidos por meio do método da manta são 4,09, 3,41 e 3,88 para as soluções de KOH, comercial, e de NaOH, respectivamente. Com a aplicação do método de imersão, os coeficientes encontrados são 5,04 para a solução de KOH, 4,26 para a solução comercial e 3,19 para a solução de NaOH. Os coeficiente de realcalinização foram considerados estatisticamente iguais de acordo com o teste Tukey com 95% de confiança (FIGURA 54), o que evidencia o método da manta como um método promissor para ser utilizado em situação de campo.

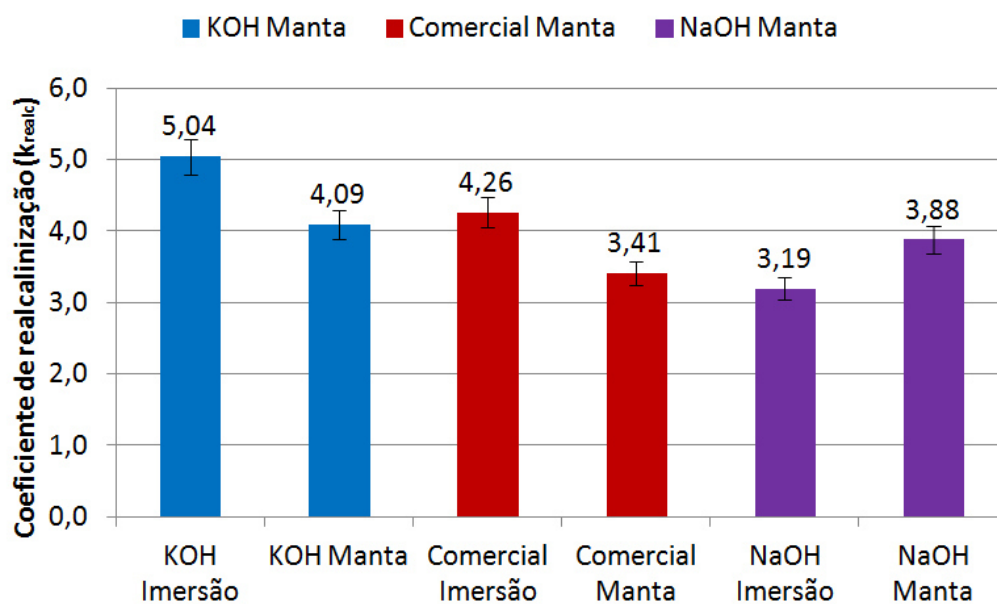


FIGURA 53 – Coeficiente de realcalinização para as soluções de KOH, comercial e NaOH aplicados por meio de imersão e método da manta.

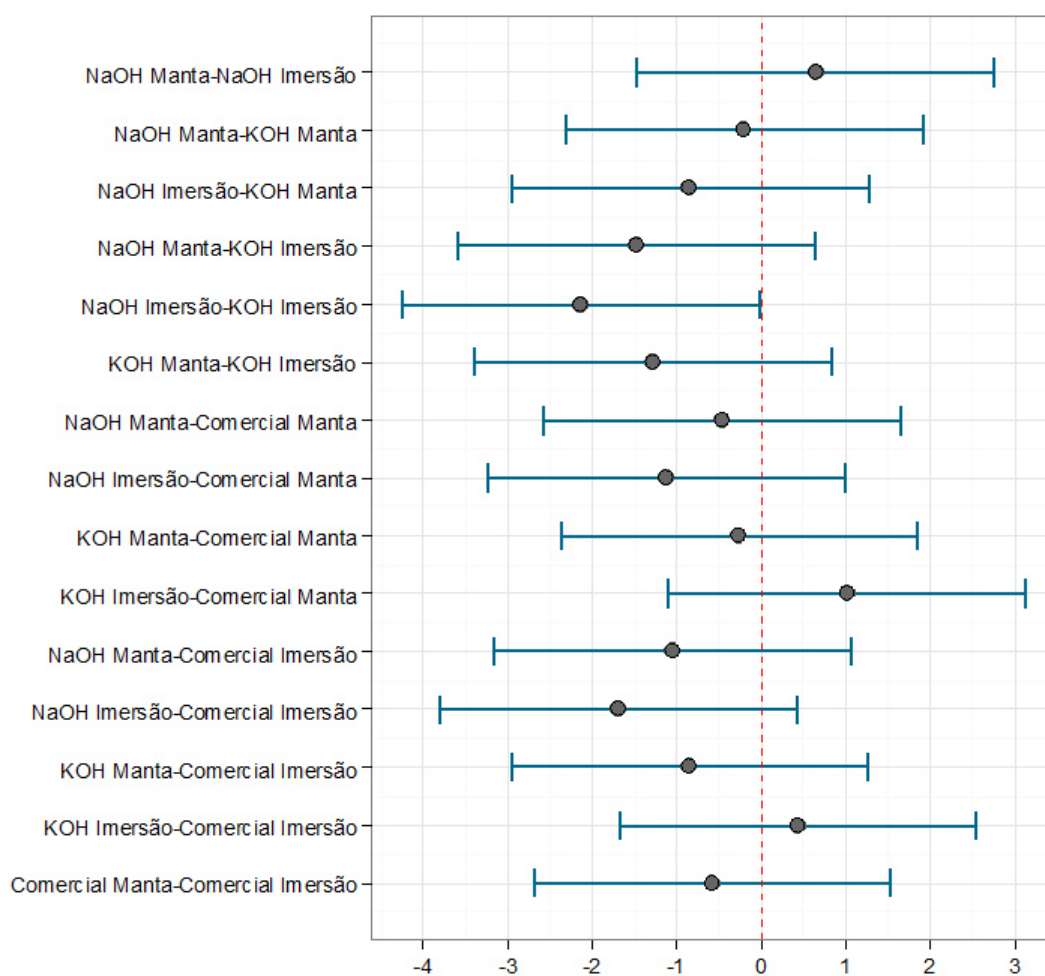


FIGURA 54 – Teste Tukey com intervalo de 95% de confiança para o coeficiente de realcalinização para diferentes soluções alcalinas e métodos de aplicação.

A FIGURA 55 e a FIGURA 56 ilustram corpos de prova após 8 dias de realcalinização, em solução de KOH, pelos métodos da manta e imersão, respectivamente.

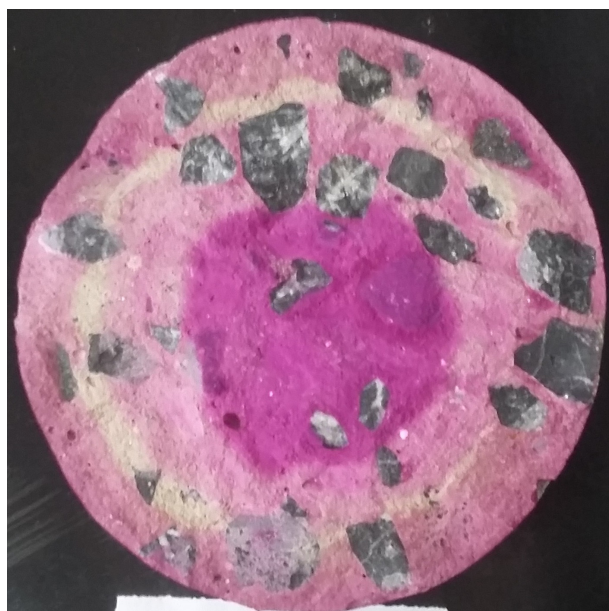


FIGURA 55 – Amostra realcalinizada por 8 dias com manta e solução de KOH.

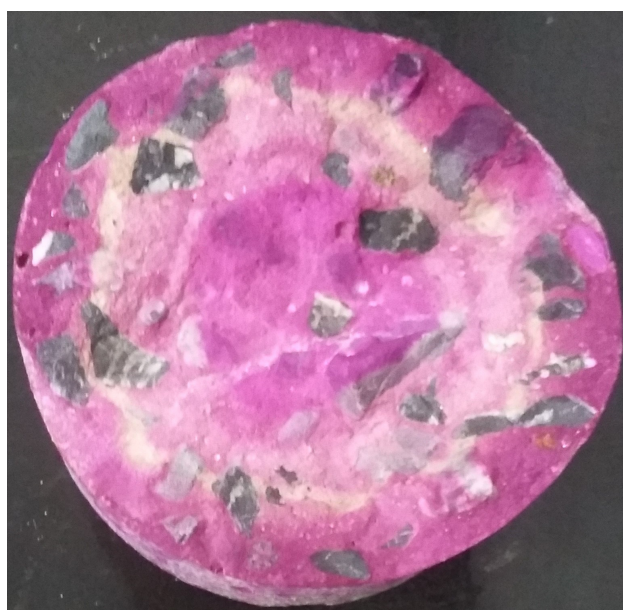


FIGURA 56 – Amostra após 8 dias imersa em solução de KOH.

Nesta etapa do trabalho constatou-se um novo fenômeno. Além da realcalinização de fora para dentro do corpo de prova, notou-se mais uma área alcalina ao redor de centro, como é possível observar na FIGURA 57. É importante ressaltar que esse fenômeno ocorreu para todas as amostras, com todas as soluções alcalinas e métodos de aplicação testados nessa etapa.

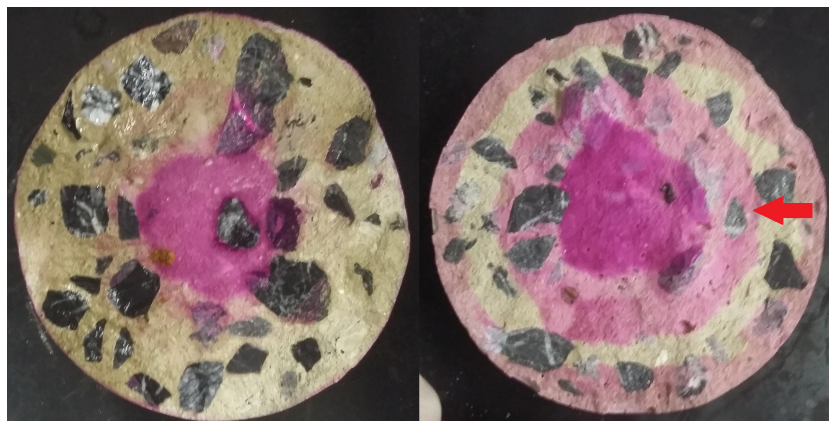




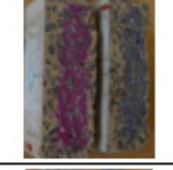

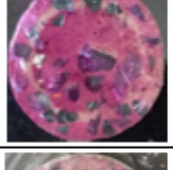
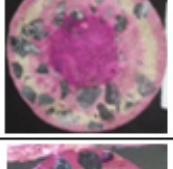
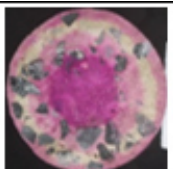


FIGURA 57 – Amostra após carbonatação e após 8 dias imersa em solução de KOH.

É possível observar na QUADRO 5 que para Araujo (2004), Sá (2006) e Araujo (2009), o comportamento da realcalinização foi o mesmo, ou seja, as amostras tiveram o pH elevado da região externa para a região interna. Este comportamento mostrou-se semelhante a realcalinização de pequenas espessuras de carbonatação obtidas neste trabalho. Quando houve a realcalinização de amostras com maiores espessuras de carbonatação, o comportamento assemelhou-se também ao encontrado por Araujo (2009) e Araujo e Helene (2011), ou seja, a realcalinização ocorreu também da parte interna para a parte externa das amostras. Vale ressaltar que o fenômeno encontrado neste trabalho ocorreu em amostras sem armaduras em seu interior e com uma região central não carbonatada. O que o diferencia do fenômeno encontrado por Araujo (2009) e Araujo e Helene (2011), pois apesar do comportamento semelhante, as amostras estavam expostas a condições diferentes. No caso dos autores citados, as amostras continha barras de aço em seu interior e a amostra estava totalmente carbonatada.

Cabe ressaltar que dentre as amostras citadas no QUADRO 5, apenas os corpos de prova desta etapa do trabalho apresentam simultaneamente uma elevada espessura de carbonatação e um centro alcalino (não carbonatado), fato que pode contribuir com a teoria do aparecimento deste fenômeno.

É possível que tenha ocorrido uma realcalinização interna, da área central não carbonatada (ainda alcalina) para a área carbonatada (menos alcalina). Ocorrendo por meio da difusão da portlandita (e do KOH e NaOH) presentes na pasta de cimento. Não é escopo deste trabalho identificar tais fenômenos, e para que se verifique o ocorrido, é necessário realizar ensaios para identificar os materiais presentes nessa nova área alcalina. Alguns dos possíveis ensaios a serem realizados em trabalhos futuros são, difração de raios-X, fluorescência de raios-X e termogravimetria.

Fonte	Araújo (2004)	Sá (2006)	Araújo (2009)		Araújo (2011)		Trabalho atual		
Amostras	Argamassa 5x10 cm	Argamassa 5x10 cm	Argamassa 4x4x16 cm	Concreto 4x10x12 cm	Concreto 4x10x12 cm	Concreto 10x20cm	Concreto 10x20cm	Concreto 10x20cm	Concreto 10x20cm
Carbonatação (mm)	Total	Total	Total	Total	Total	16,25 mm	16,25 mm	31,66 mm	
Soluções alcalinas	KOH	KOH	KOH	Ca(OH) ₂	Ca(OH) ₂	Ca(OH) ₂	KOH	KOH	
Imagem									

QUADRO 5 – Resumo dos fenômenos encontrados na realcalinização química.

Nesta etapa foram realizados ensaios de resistência à compressão (FIGURA 58) e absorção de água por sucção capilar (FIGURA 59) para verificar possíveis mudanças nas propriedades dos concretos realcalinizados.

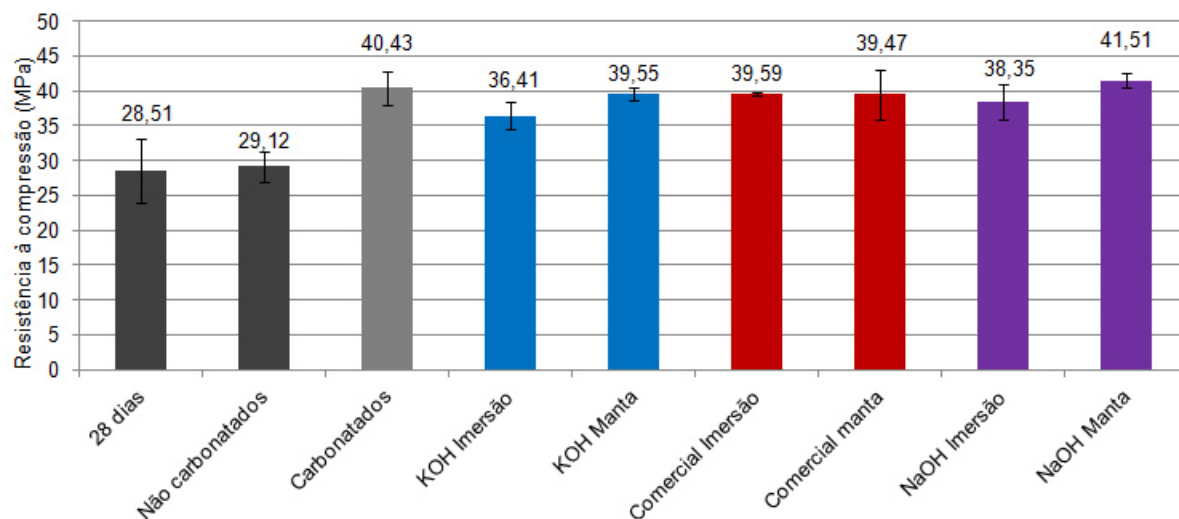


FIGURA 58 – Resistência à compressão do concreto antes e depois do tratamento.

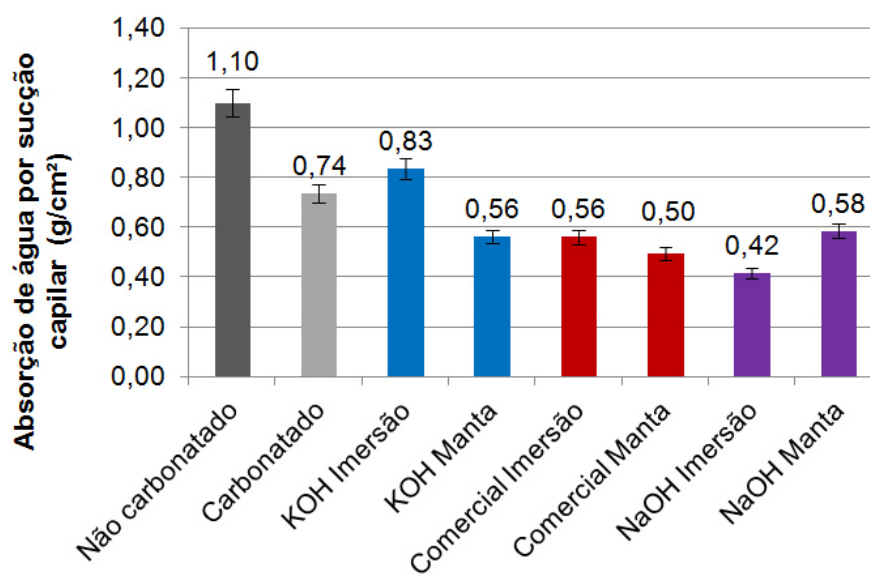


FIGURA 59 – Absorção de água por sucção capilar por 72h para o concreto antes e depois do tratamento de realcalinização.

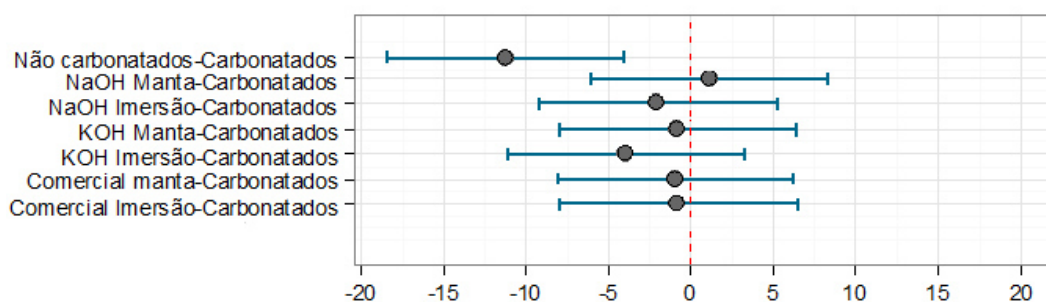


FIGURA 60 – Teste Tukey, com intervalo de 95% de confiança, para ensaio de resistência à compressão.

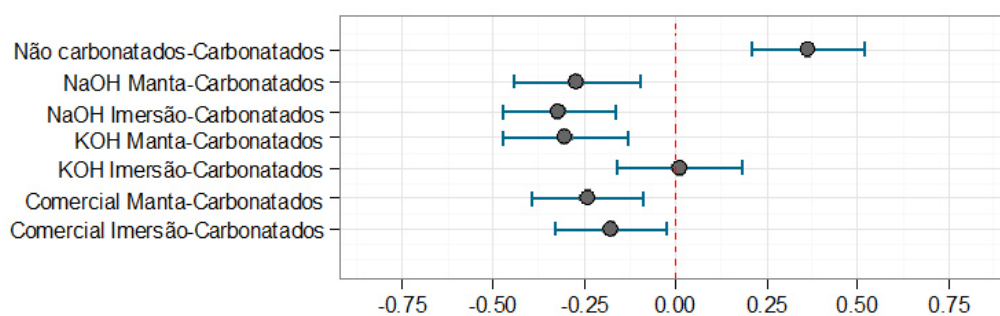


FIGURA 61 – Teste Tukey, com intervalo de 95% de confiança, para ensaio de absorção de água por sucção capilar.

Diferenças significativas entre valores de resistência à compressão e absorção de água por sucção capilar foram observadas entre as amostras carbonatadas ou não. Estes resultados estão de acordo com dados publicados por Medeiros e Helene (2001) tendo como motivo provável a colmatação dos poros devido a transformação da portlandita em carbonato de cálcio na estrutura de poros da camada carbonatada. É possível observar por meio da FIGURA 60 que não há diferenças significativas na resistência à compressão antes e depois da realcalinização, por meio do teste Tukey com 95% de confiança. Verifica-se por meio da FIGURA 61 que houveram diferenças significativas na absorção de água por sucção capilar antes e depois do tratamento de realcalinização, sendo que o único caso que não houve esta diferença foi com a amostra realcalinizada com imersão em solução de KOH. As diferenças encontradas para a absorção capilar nesta etapa, bem como na primeira etapa deste trabalho (FIGURA 46), podem ter ocorrido em função da dissolução do carbonato de cálcio pelas substâncias alcalinas. Isso faz com que o tamanho dos poros aumente, o que diminui a força de sucção capilar, reduzindo então a absorção por sucção capilar das amostras.

4.3 APLICAÇÃO DA REALCALINIZAÇÃO EM ESTRUTURA REAL

Primeiramente foi realizado o ensaio de esclerometria por meio da NBR 7584 (ABNT, 2012a) a fim de caracterizar o concreto dos pilares estudados, conforme apresentado na FIGURA 62.

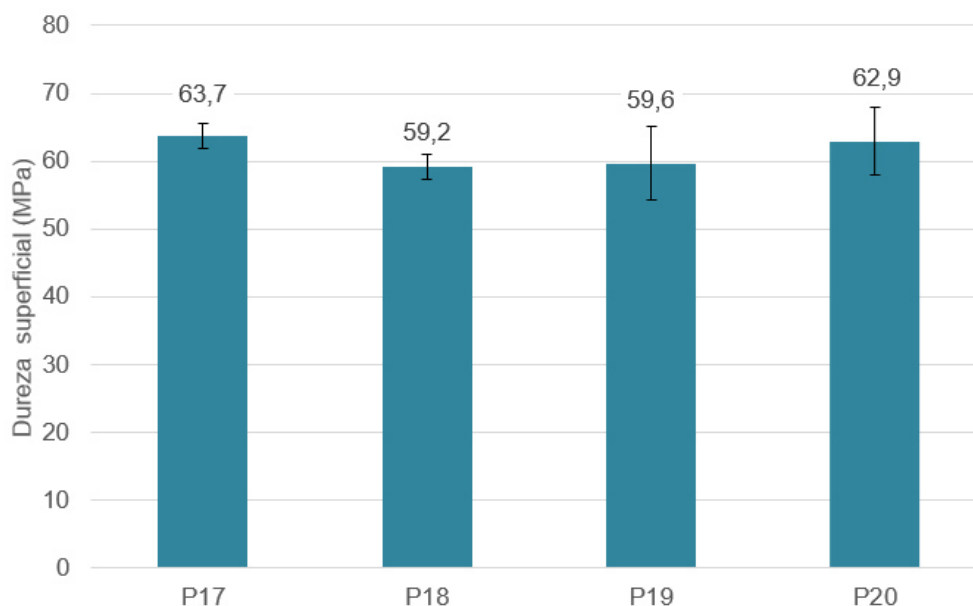


FIGURA 62 – Dureza superficial pelo método da esclerometria.

Os resultados obtidos pelo ensaio de esclerometria podem ser relacionados à resistência a compressão do concreto. Mas cabe lembrar que a esclerometria é um método indireto de obtenção dessa relação. Além disso a carbonatação pode influenciar no resultado deste ensaio. Geralmente concretos carbonatados tentem a apresentar dureza superficial maior que concretos não carbonatados de mesma resistência à compressão, devido a colmatação dos poros na superfície do concreto.

A profundidade de carbonatação e de realcalinização mensurada nos pilares é ilustrada na FIGURA 63. As profundidades de carbonatação medidas foram de 5,74 mm, 4,99 mm, 5,49 mm e 4,97 mm nos pilares P17, P18, P19 e P20, respectivamente. Os baixos valores de profundidade de carbonatação se devem ao fato de que a estrutura tem apenas 8 anos de exposição, sendo esta caracterizada como uma realcalinização de prevenção da despassivação do aço por carbonatação. Os pilares P17 e P18 foram tratados com solução de KOH e os pilares P19 e P20 foram tratados com solução de NaOH.

Após 7 dias de tratamento com manta umedecida em solução alcalina, mensurou-se a profundidade de realcalinização, resultando em pequenas profundidades de realcalinização. Este fato foi inesperado, uma vez que a realcalinização com a manta umedecida apresentou bons resultados nos testes de laboratório.

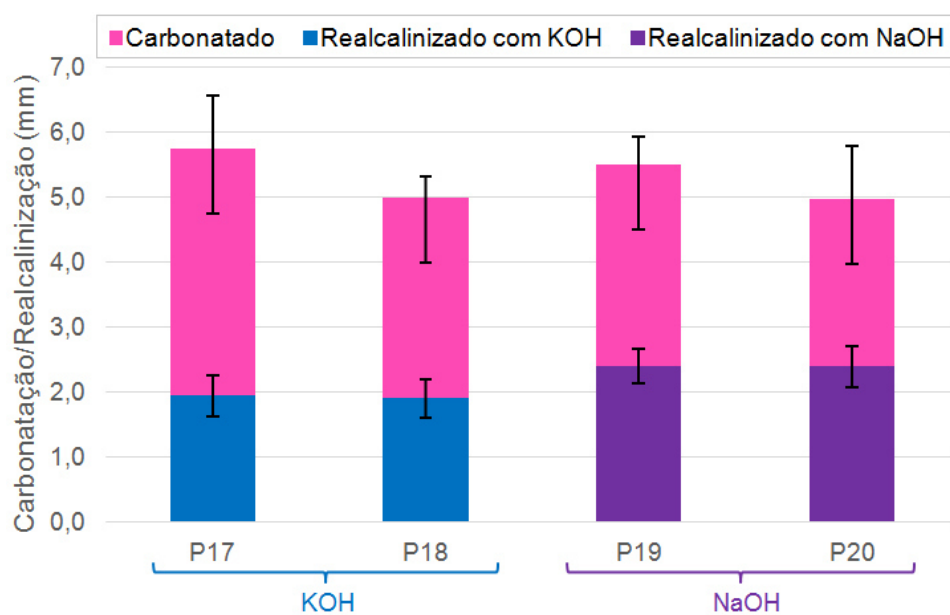


FIGURA 63 – Resultado da carbonatação e realcalinização dos pilares após 7 dias de tratamento.



FIGURA 64 – Realcalinização no pilar P17, tratado com manta embebida em solução de KOH.



FIGURA 65 – Realcalinização no pilar P19, tratado com manta embebida em solução de NaOH.

A FIGURA 64 mostra o pilar P17 tratado com a solução de KOH e a FIGURA 65 ilustra o pilar P19, tratado com a solução de NaOH, que ilustram o teste com fenolftaleína após o tratamento de realcalinização.

De acordo com o teste Tukey, com intervalo de 95% de confiança, não há diferenças significativas entre a profundidade de carbonatação (FIGURA 66) e a profundidade de realcalinização (FIGURA 67) dos pilares estudados. Isso indica que: 1- não há diferenças significativas na realcalinização de pilares de uma estrutura real com solução de KOH e NaOH; 2- no caso em questão todos os pilares podem ser considerados de concretos de qualidade semelhante, uma vez que suas profundidades de carbonatação são estatisticamente iguais.

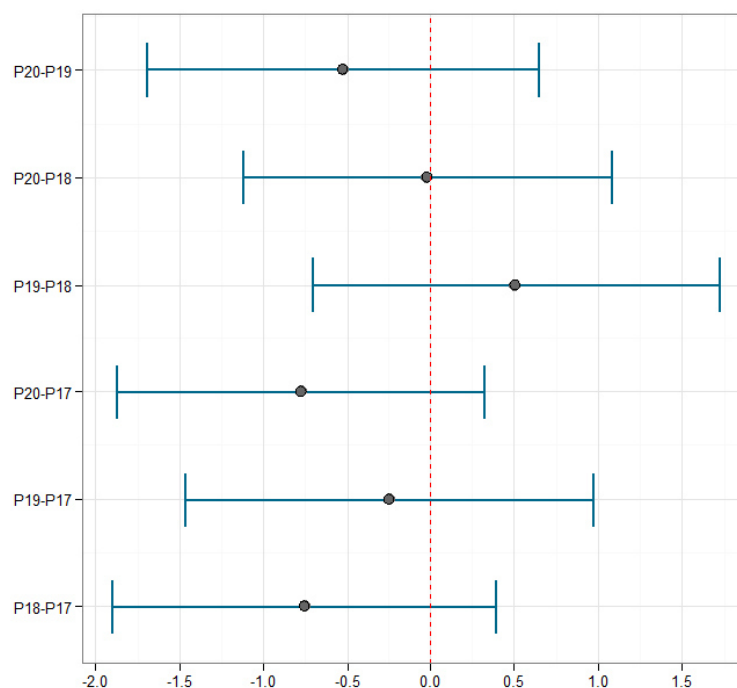


FIGURA 66 – Teste Tukey para profundidade de carbonatação dos pilares do objeto de estudo.

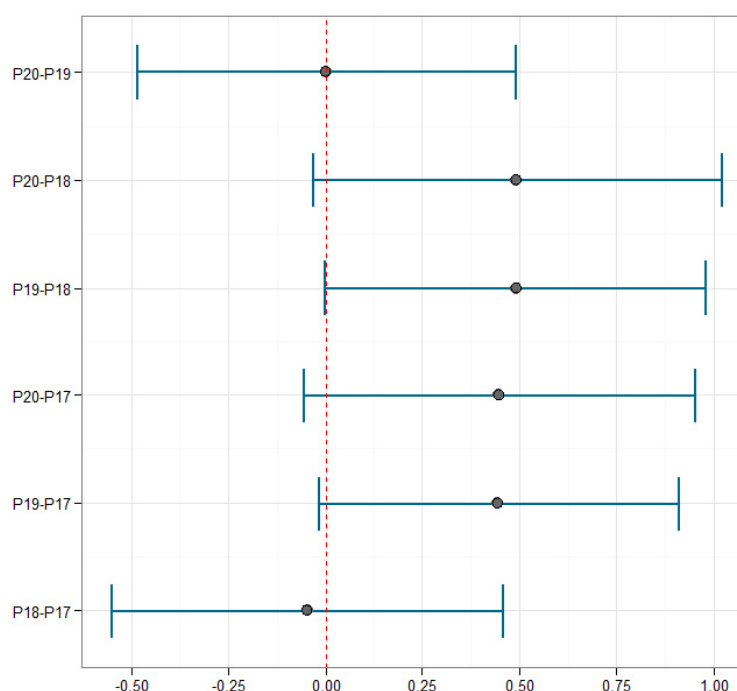


FIGURA 67 – Teste Tukey para profundidade de realcalinização dos pilares do objeto de estudo.

Durante o tratamento dos pilares, a forma com que a manta foi aplicada levou a distribuição desigual da solução ao longo do comprimento do pilar, sendo que no topo havia menos solução do que na base da estrutura. Para padronizar a avaliação, a medida de realcalinização foi realizada no centro do pilar. A ineficiência na realcalinização de pilares de uma estrutura real com o método da manta deve-se a dificuldade

em manter a solução homoganeamente distribuída em toda a superfície do concreto. Além disso, observou-se grande dificuldade no manuseio dos materiais devido a sua elevada alcalinidade e perigo de queimaduras químicas. No estudo de Araujo (2004) atingiu-se 19 mm de profundidade de realcalinização após 10 dias de realcalinização. Neste caso o pilar foi envolto por um plástico com solução de Na_2CO_3 . As regiões onde não houveram contato direto da solução com o pilar, não responderam ao tratamento. Isso mostra que ambos os estudos identificaram dificuldades em manter a solução em constante contato com os pilares, sendo este um tema a ser resolvido para viabilizar a aplicação em estruturas reais em condições de serviço.

Moreira (2006) obteve 10 mm de profundidade de realcalinização após 8 dias de tratamento com gel a base de vermiculita umedecido em solução tripla. O mesmo gel aplicado em laboratório levou apenas 5 dias para realcalinizar a mesma profundidade. Comparando resultados obtidos nessa etapa do presente trabalho e na primeira etapa de ensaios, obteve-se 12,91 mm de profundidade de realcalinização em laboratório e 3,16 mm e 2,78 mm em pilares de estrutura real para aplicação de solução de KOH pelo método da manta. Para a solução de NaOH aplicada com o mesmo método obteve-se 14,89 mm de profundidade de realcalinização em laboratório e 3,53 mm e 2,42 mm em campo. Ou seja, a aplicação em estrutura real foi, em média, 79% menos eficiente que em laboratório, para o mesmo tempo de tratamento, no experimento desenvolvido nesta dissertação. Isso se deve a também a ação do ambiente sobre o substrato, como vento, chuva, insolação, ente outros. Enquanto em laboratório o ambiente é controlado. A FIGURA 68 mostra a eficiência de cada caso em laboratório e em campo, o que evidencia a dificuldade de manter as condições ideais de laboratório em estruturas em serviço. Cabe salientar que apesar de válida, esta comparação faz-se em materiais com resistência a compressão diferentes.

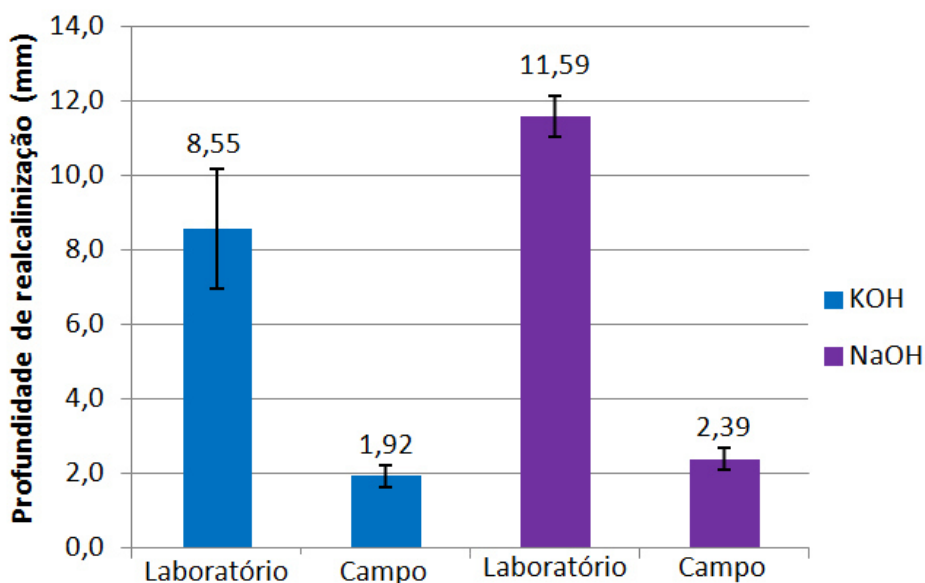


FIGURA 68 – Profundidade de realcalinização com aplicação de solução de KOH e NaOH em laboratório e em campo.

4.4 ANÁLISE DA INFLUÊNCIA DAS ADIÇÕES MINERAIS

Nesta etapa utilizaram-se adições minerais como parte da substituição do cimento. É possível observar na FIGURA 69 que a amostra com menor profundidade de carbonatação foi a amostra de referência, seguida pelas substituições de sílica de casca de arroz, sílica ativa, fíler quartzoso e metacaulim. Os coeficientes de carbonatação destas amostras são 1,43; 1,65; 1,80; 1,84 e 1,81, respectivamente.

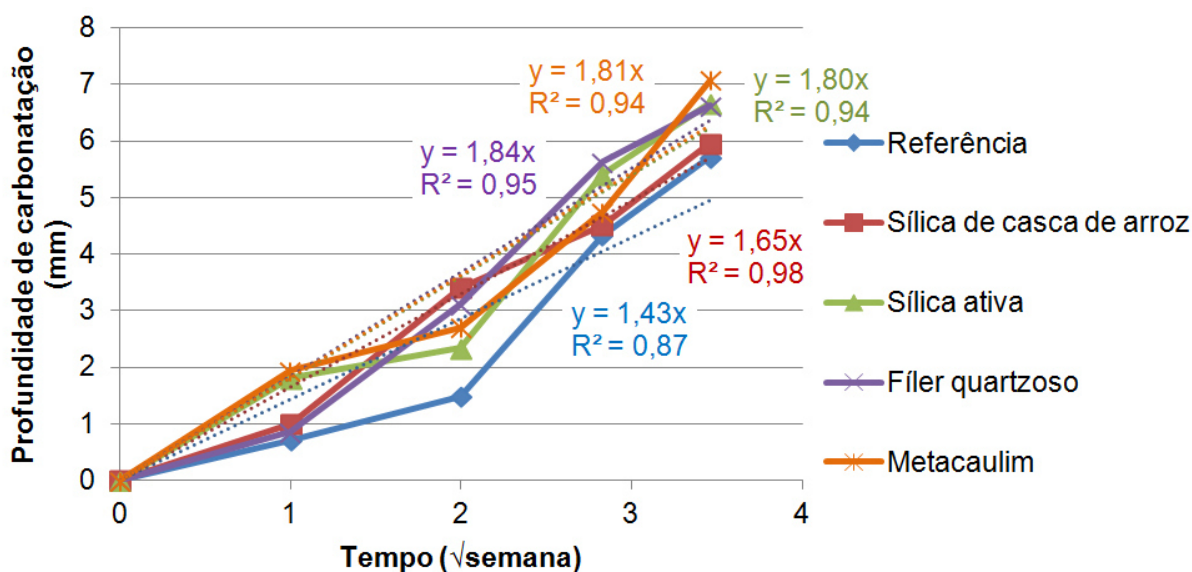


FIGURA 69 – Profundidade de carbonatação das amostras.

A profundidade de realcalinização das amostras é apresentada na FIGURA 70.

Os coeficientes de realcalinização são de 3,24, 2,11, 1,95, 1,85 e 1,67 para as amostras de fíler quartzoso, referência, sílica de casca de arroz, metacaulim e sílica ativa, respectivamente, como é possível observar na FIGURA 71.

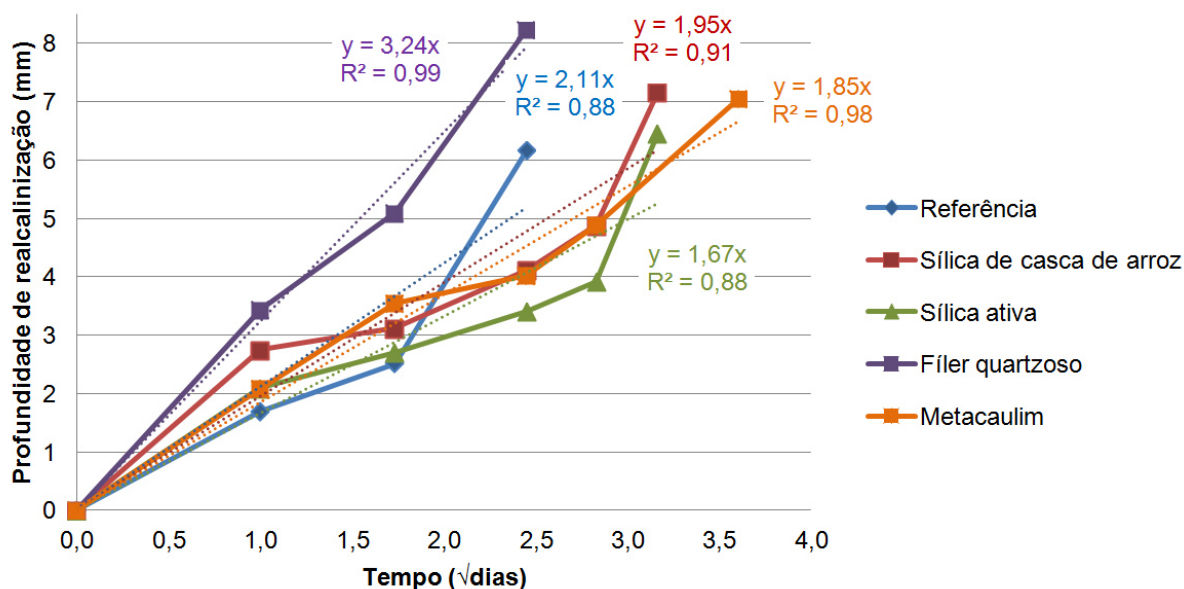


FIGURA 70 – Profundidade de realcalinização das amostras.

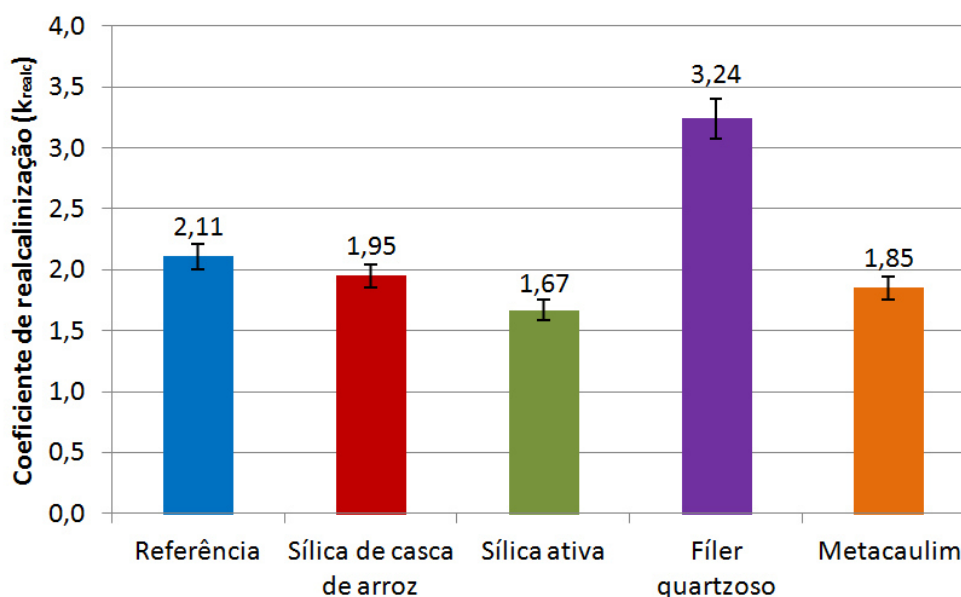


FIGURA 71 – Coeficiente de realcalinização para amostras com adição de sílica de casca de arroz, sílica ativa, fíler quartzoso e metacaulim.

A FIGURA 72 ilustra a evolução da realcalinização para as amostras com fíler quartzoso. É possível observar a evolução do tratamento desta amostra ao longo do tempo.

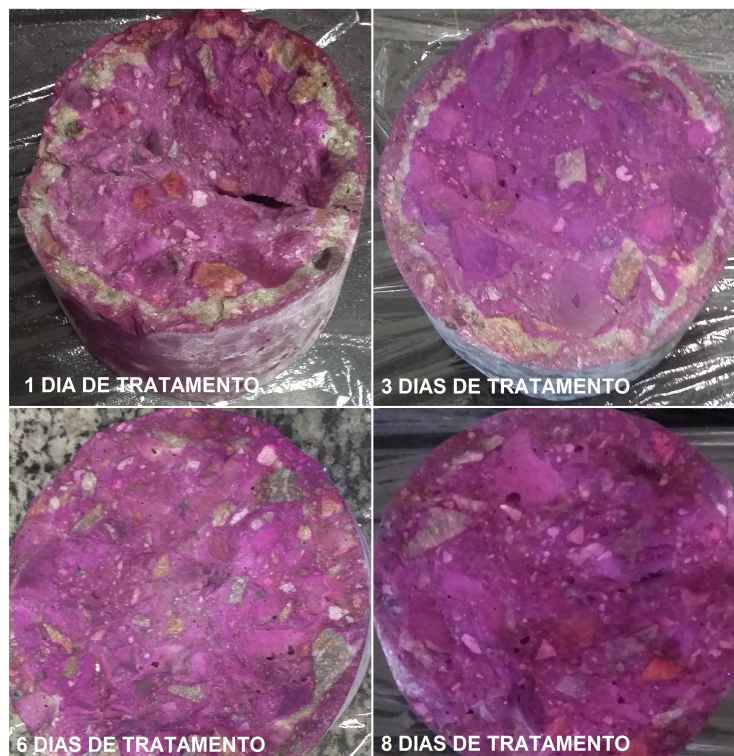


FIGURA 72 – Evolução da realcalinização das amostras com adição de fíler quartzoso.

Os ensaios de resistência à compressão (FIGURA 73) e absorção capilar (FIGURA 74) foram realizados aos 28 dias de idade a fim de caracterizar as amostras estudadas. É possível observar que a amostra com fíler quartzoso resultou na menor resistência à compressão e na maior absorção capilar.

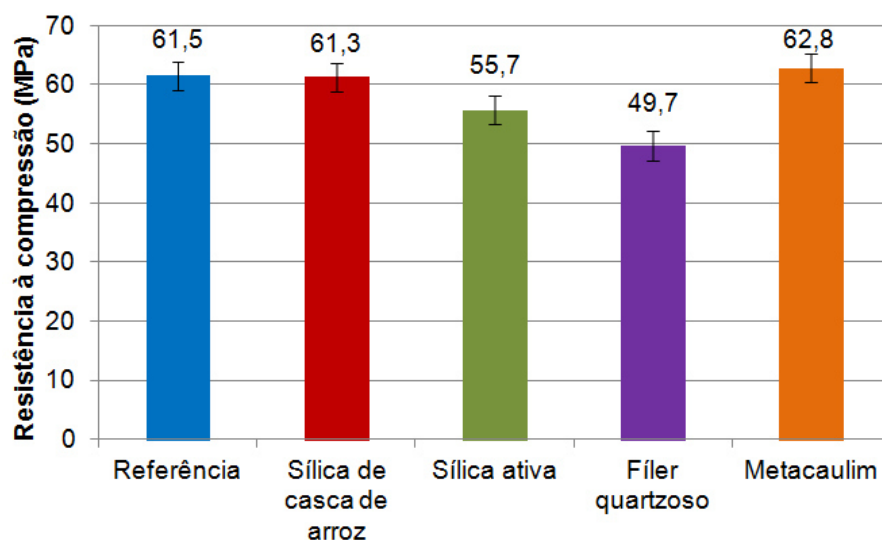


FIGURA 73 – Resistência à compressão para amostras com adições minerais.

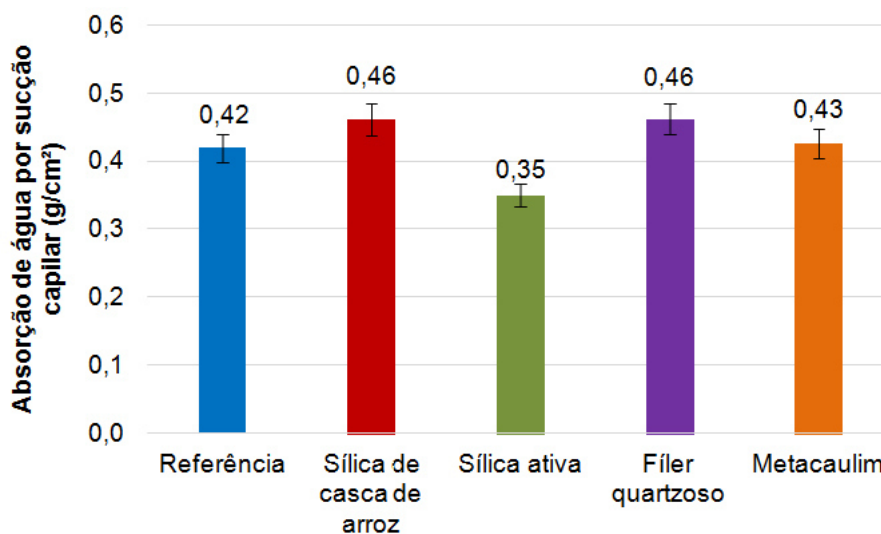


FIGURA 74 – Absorção de água por sucção capilar por 72h para amostras com adições minerais.

Após os resultados obtidos tentou-se estabelecer correlações entre o k_{realc} e as propriedades do concreto que podem influenciar neste coeficiente. Para tanto relacionou-se k_{relac} com k_{CO_2} , absorção de água por sucção capilar e resistência à compressão. A velocidade do avanço da frente de carbonatação poderia influenciar a velocidade de realcalinização, uma vez que ambos dependem da difusão de substâncias no interior do concreto. Observa-se por meio da FIGURA 75 que há uma baixa correlação, de 0,05.

Elaborou-se então a relação entre o k_{realc} e a resistência à compressão e absorção de água por sucção capilar visto que as adições pozolânicas podem elevar a resistência mecânica e refinar a estrutura porosa do concreto. De acordo com DAL MOLIN (2011), as adições minerais podem ter efeito microfíler, ou seja, pode haver o aumento da densidade da mistura, resultante do preenchimento dos vazios pelas partículas das adições. Há também o efeito de refinamento dos poros, pois a adição mineral restringe os espaços que os produtos de hidratação ocupam, gerando um grande número de pequenos cristais (DAL MOLIN, 2011).

Observa-se que quanto maior é a absorção capilar, maior é o k_{realc} e quanto maior a resistência à compressão, menor é o k_{realc} . Raisdorfer (2015) encontrou uma fraca relação entre k_{CO_2} e a absorção capilar e o k_{CO_2} e a resistência à compressão. Nos presente trabalho encontrou-se fraca correlação entre essas propriedades e o k_{realc} , conforme FIGURA 75. Esta afirmação está fundamentada no fato que o R^2 foi menor ou igual a 0,55 indicando pouca correlação entre os dados.

Após constatar as baixas correlações entre a velocidade de realcalinização e algumas propriedades do concreto, tentou-se relacionar o k_{relac} com índices que envolvam essas propriedades em conjunto. Portanto, testou-se a correlação entre o

k_{realc} e um índice com a resistência à compressão e a absorção de água por sucção capilar. Estas propriedades foram testadas em conjunto visto que ambas influenciam na difusão de substâncias no interior do concreto. Para este índice houve um boa correlação ($R^2=0,86$), como é possível observar na FIGURA 75. Essa correlação é maior do que a encontrada para a absorção capilar e para a resistência à compressão, que foram de 0,37 e 0,55, respectivamente. Isso significa que o comportamento da realcalinização ao longo do tempo não é bem explicado com a simples relação individual das grandezas testadas, mas pode ser explicada por uma composição delas, evidenciando a complexidade do tema em questão.

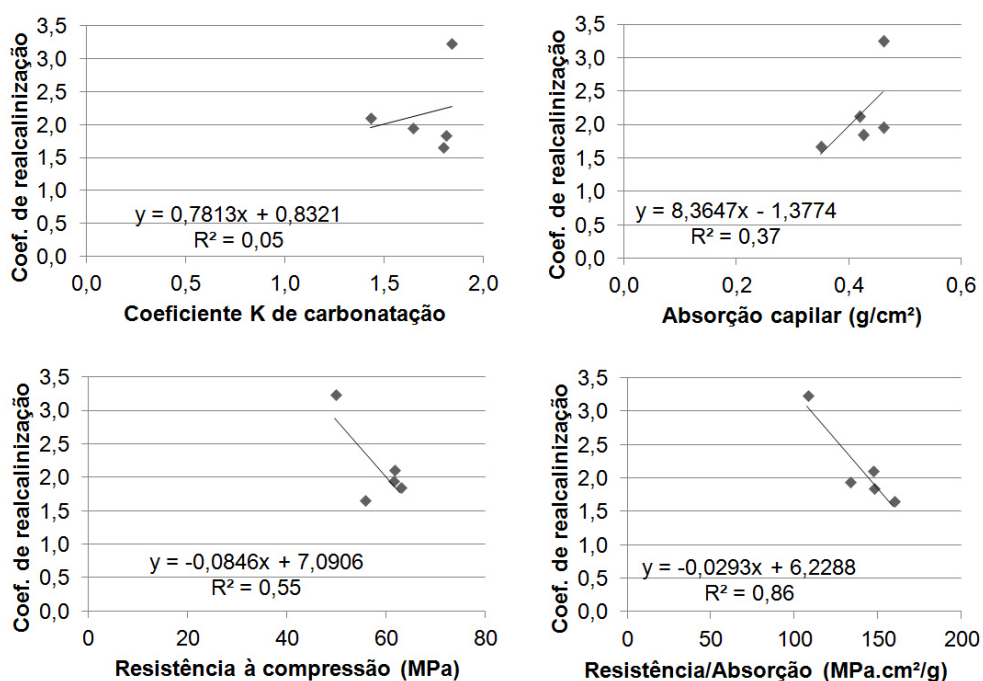


FIGURA 75 – Correlação entre o coeficiente de carbonatação, resistência à compressão, absorção capilar e coeficiente de realcalinização para amostras com adições minerais.

De acordo com NITA e JOHN (2007), na hidratação do cimento Portland sem pozolana a intensidade dos picos de portlandita aumentam com o decorrer da hidratação da alita e da belita, desde que não ocorra carbonatação. Em uma pasta de cimento com pozolana, parte ou todo o hidróxido de cálcio é consumido por reações com a pozolana, o que normalmente provoca uma redução na intensidade dos picos correspondentes. Apesar de fatores de influência como grau de cristalinidade e variações na orientação dos cristais durante a preparação de amostras, a variação da intensidade dos picos de portlandita na DRX para o estudo de pozolanas está relacionada com a sua quantidade no compósito cimentício (NITA, 2006). VOGLIS, KAKALI e TSIVILIS (2001), ANTIOHOS et al. (2007), CABRAL (2011), DANTAS (2013), PICANÇO, ANGÉLICA e BARATA (2014), VAITKEVICIUS, SERELIS e HILBIG (2014), GÓMEZ-ZAMORANO, GARCÍA-GUILLÉN e ACEVEDO-DÁVILA (2015), ABO-EL-ENEIN et al. (2015) e SILVA

(2016) também usaram o raciocínio de comparação de intensidade de picos para o estudo de pozolanas, assim como também realizado em outros trabalhos dentro do grupo de pesquisa orientado pelo Prof. Marcelo Medeiros, podendo-se exemplificar as publicações de Gobbi (2014), Raisdorfer (2015) e Medeiros et al. (2015).

Dentro deste contexto, a técnica de difração de raios-X foi aplicada em amostras da argamassa dos concretos e a avaliação teve como foco comparar a intensidade do principal pico relativo à portlandita (localizado na região de $34,2^\circ 2\theta$. nos difratogramas). A análise se baseou na premissa que, mantendo as mesmas condições de ensaio de DRX, a redução da intensidade do pico referente à portlandita nas argamassas dos concretos contendo adições minerais em comparação ao mesmo pico na argamassa do concreto de referência indica menor teor remanescente de Ca(OH)_2 nos concretos. Desta forma, as análises utilizaram uma pequena porção do difratograma gerado no ensaio de DRX, como ilustrado na FIGURA 76. Esta é uma avaliação puramente qualitativa, não apresentando a pretensão de quantificar o teor de portlandita em cada concreto estudado.

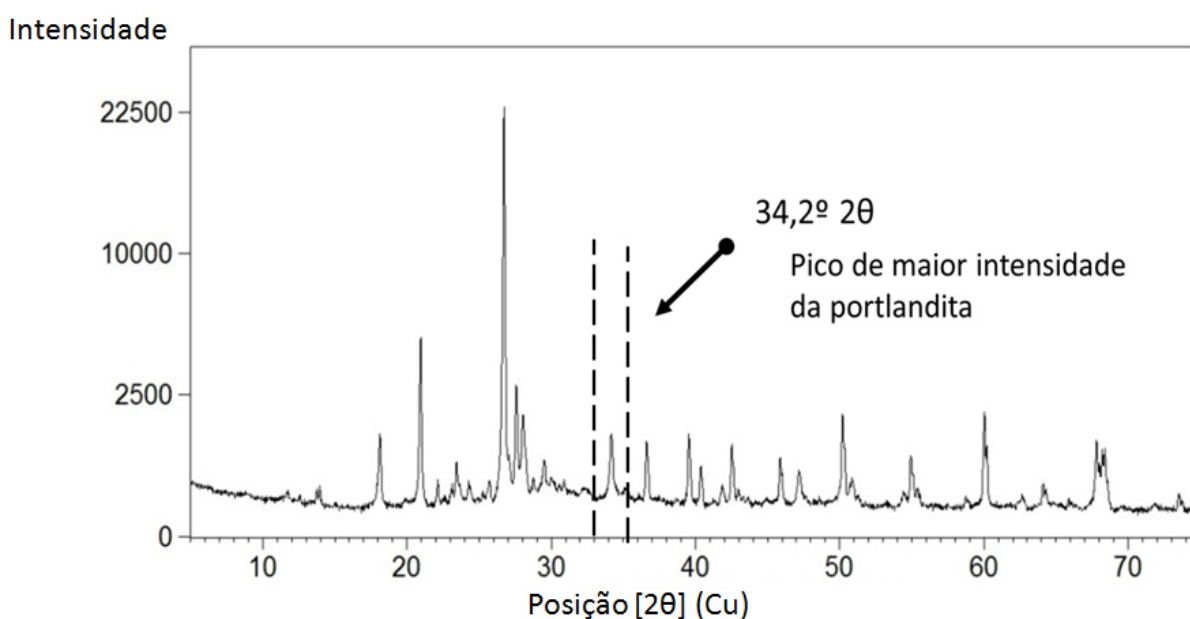


FIGURA 76 – Difratograma da amostra de argamassa extraída do concreto de referência.

FONTE: (RAISDORFER, 2015).

Desse modo, o pico principal de portlandita das argamassas extraída dos concretos é mostrado no difratograma da FIGURA 77. O concreto de referência com CPV ARI apresenta o maior pico de portlandita dentre as amostras, enquanto o concreto com substituição parcial de sílica ativa apresenta o menor pico. As amostras de concreto com teor de 10% de sílica de casca de arroz, fíler quartzoso e metacaulim possuem picos intermediários. Nesta avaliação pretende-se entender se existe relação entre

a intensidade de pico de portlandita e a velocidade de realcalinização do concreto do substrato. Por este motivo, comparou-se por meio da FIGURA 78 o coeficiente de realcalinização com a intensidade do pico principal de DRX para portlandita, e também não se estabeleceu uma correlação para essas propriedades, uma vez que R^2 foi igual a 0,09. Similarmente, Raisdorfer (2015), encontrou vínculo fraco entre este pico e o k_{CO_2} .

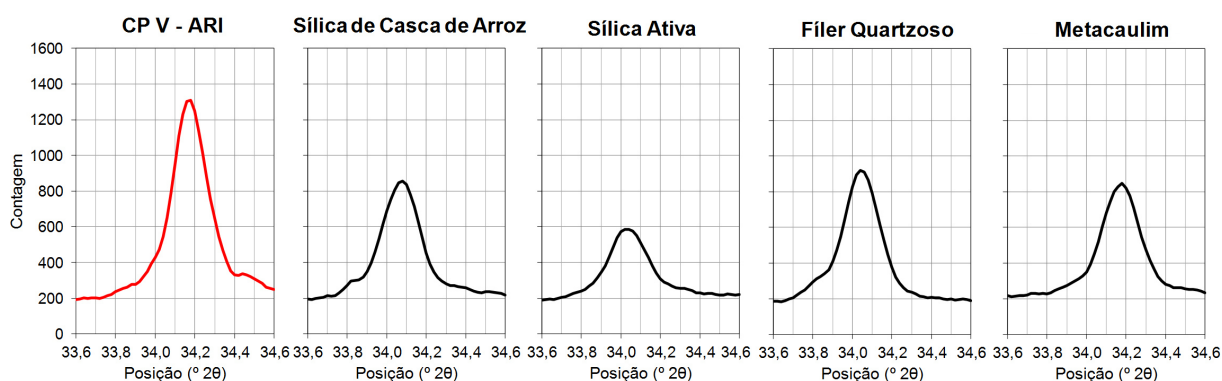


FIGURA 77 – Difratoograma das adições minerais (pico principal da portlandita localizado na região de $34,2^\circ 2\theta$).

FONTE: Adaptado de Raisdorfer (2015).

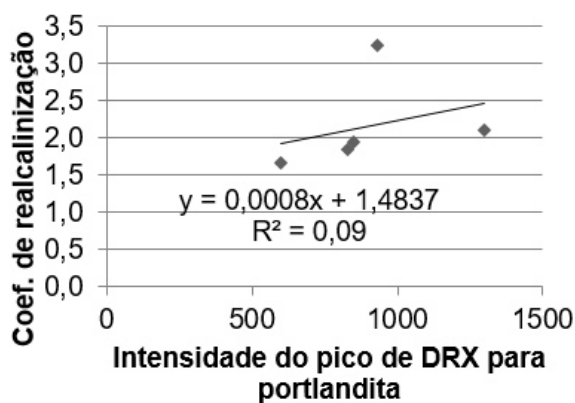


FIGURA 78 – Correlação entre o coeficiente realcalinização e intensidade do pico de DRX para portlandita.

Como houve pouca correlação entre o coeficiente de realcalinização e as propriedades analisadas, optou-se por reformular as comparações excluindo os resultados da amostra com fíler quartzoso. Essa decisão foi tomada com base nos resultados de DRX obtidos durante a caracterização das adições utilizadas. O fíler quartzoso é a única amostra que não apresenta halo amorfo (FIGURA 79), indicando que esta amostra é a única sem potenciais propriedades pozolânicas.

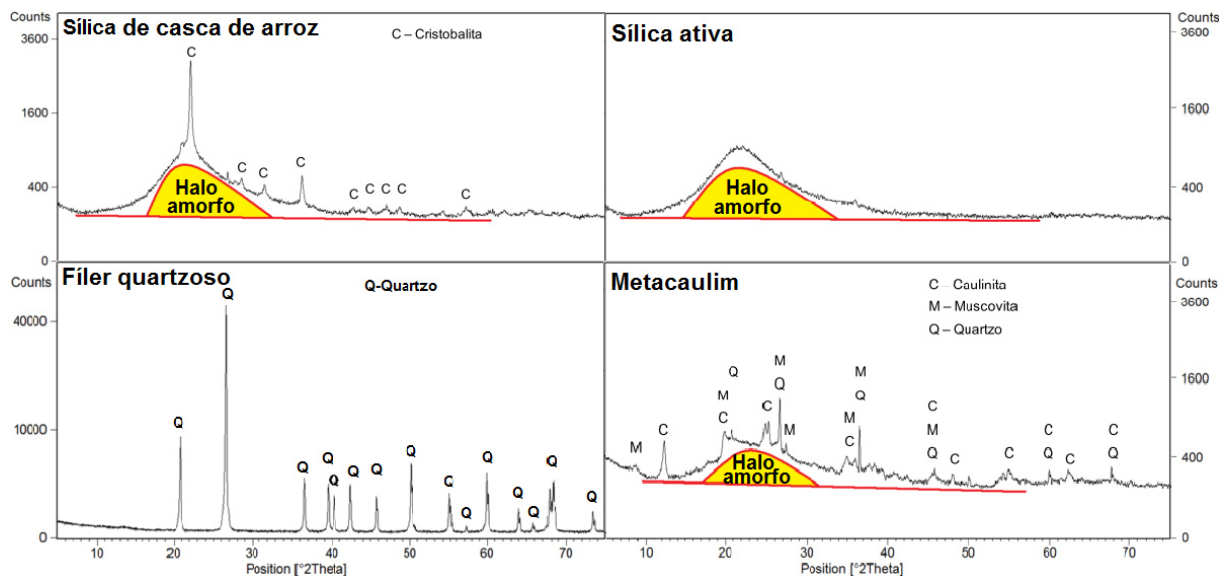


FIGURA 79 – Difração de raios X para as adições minerais.

Os materiais pozolânicos consomem o hidróxido de cálcio (C-H) transformando-os em silicato de cálcio hidratado (C-S-H), isso faz com que a reserva alcalina do concreto diminua (pela diminuição da C-H) e que a resistência aumente (pelo aumento do C-S-H). Portanto, as amostras moldadas com adições pozolânicas são diferentes das amostras moldadas com adição inerte em termos de funcionamento da adição mineral, como é o caso do fíler quartzoso. As novas correlações são apresentadas na FIGURA 80 e na FIGURA 81.

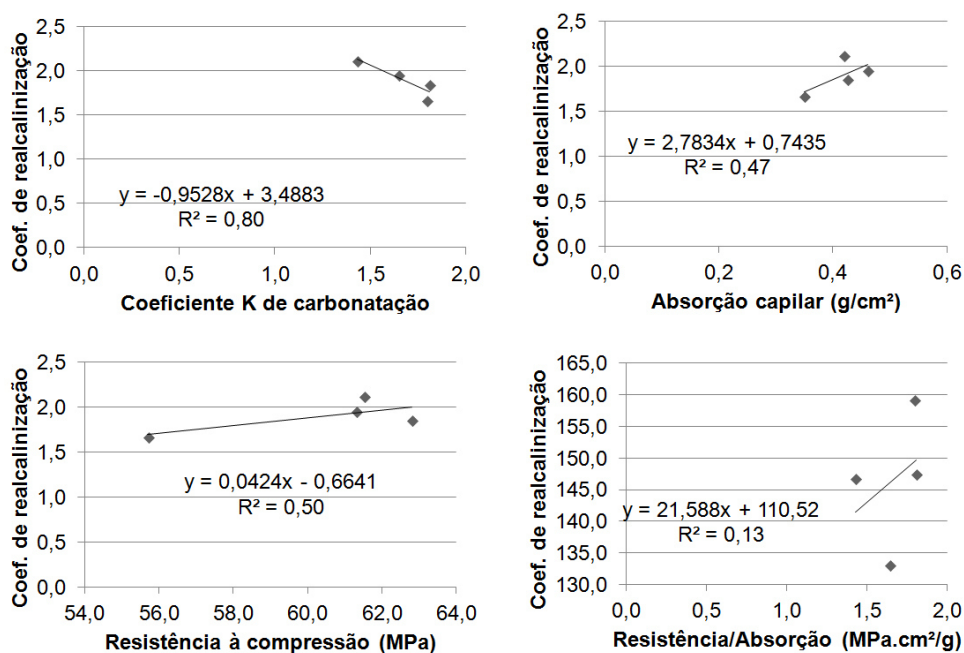


FIGURA 80 – Correlação sem a amostra com fíler quartzoso.

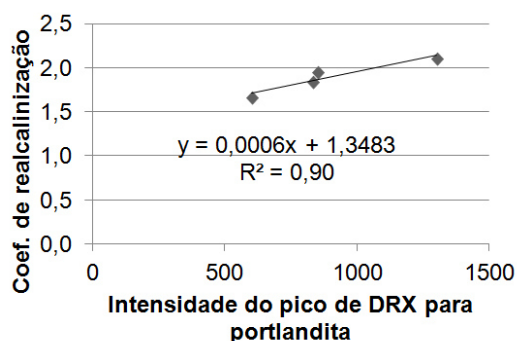


FIGURA 81 – Correlação entre coeficiente de realcalinização e intensidade de pico de DRX para portlandita sem a amostra com fíler quartzoso.

A correlação entre o k_{relac} e a carbonatação aumentou. Passou de 0,05 para as amostras com adições minerais, para 0,80 quando utilizadas apenas amostras com adições pozolânicas. Já comparando o k_{realc} com a absorção capilar e com a resistência à compressão, verifica-se que as correlações continuam fracas. Quando estas duas propriedades foram utilizadas para o cálculo de um índice (resistência à compressão/absorção capilar), a correlação entre esse índice e o k_{realc} se tornou baixa ($R^2=0,13$). Esses baixos valores de correlação ressaltam ainda mais que apenas vários fatores em conjunto são capazes de influenciar a velocidade de realcalinização.

É possível observar na FIGURA 81 que há uma relação entre o coeficiente de realcalinização e o pico principal de portlandita. Isso pode ser explicado, pois os concretos com menor intensidade de pico principal de portlandita tendem a ter menor alcalinidade, ou seja, essas amostras já iniciam o processo de carbonatação e realcalinização com o pH inferior às demais amostras. Com isso, as amostras de menor alcalinidade carbonatam mais rapidamente. Seguindo o mesmo princípio, estas amostras levam mais tempo para realcalinizar.

Portanto observa-se que para avaliar a influência das adições mineiras no processo de realcalinização, é necessário que se desassocie resultados obtidos com adições inertes e com adições pozolânicas, visto que estes materiais possuem comportamentos diferentes.

Realizou-se uma nova comparação entre as amostras retirando também a amostra de referência, como é possível observar na FIGURA 82. A amostra de referência foi retirada desta análise, pois também não contém adições pozolânicas na mistura.

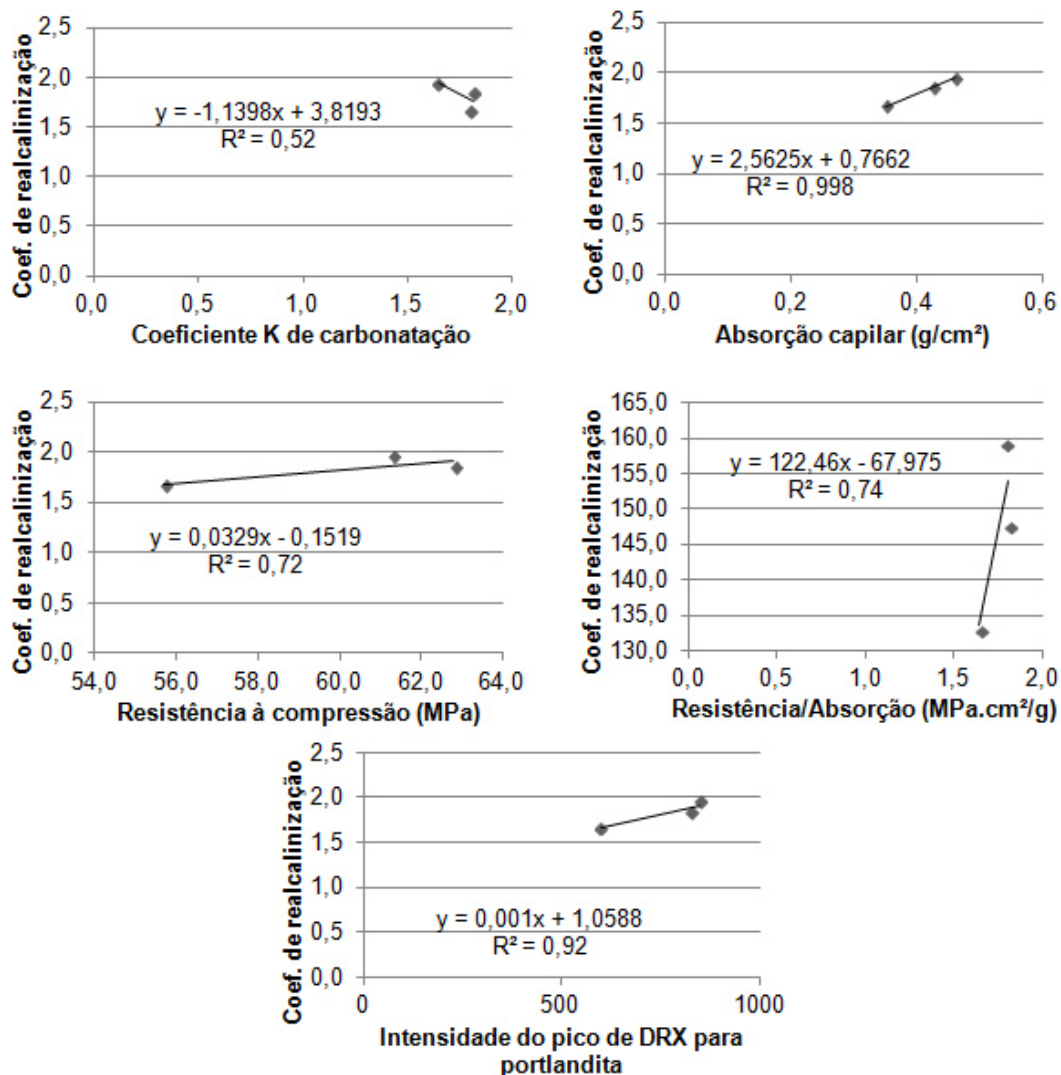


FIGURA 82 – Correlação sem a amostra com fíler quartzoso e a amostra de referência.

Observa-se que a correlação entre o coeficiente de realcalinização e os valores de resistência à compressão e absorção capilar, apresentaram valores maiores de correlação, 0,998 e 0,73, respectivamente. A correlação com o índice com as duas propriedades em conjuntos (resistência/absorção), também apresentou valores significativos de correlação (0,74).

A melhora nessas correlações pode ser explicada devido ao refinamento dos poros que pode ser causado pelas adições pozolânicas, modificando assim tanto a absorção como a resistência à compressão das amostras, o que não ocorre na amostra de referência.

Devido as correlações entre o coeficiente de realcalinização e o índice de resistência/absorção apresentarem boas correlações nas análises anteriores, elaborou-se a mesma correlação incluindo as amostras realcalinizadas com solução de KOH por imersão apresentadas dos itens 4.1 e 4.2.

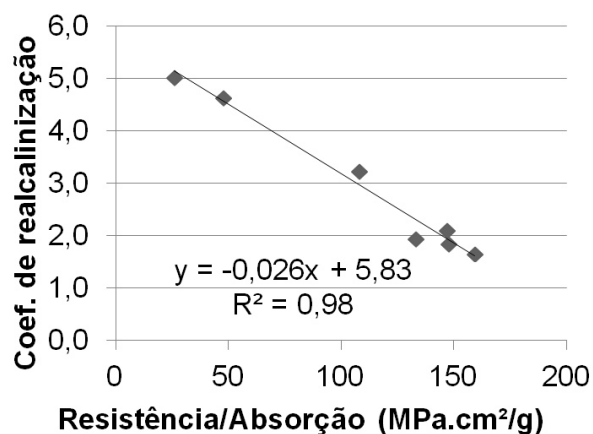


FIGURA 83 – Correlação entre o coeficiente de carbonatação, resistência à compressão, absorção capilar e coeficiente de realcalinização para amostras todas as amostras realcalinizadas com KOH por meio de imersão.

A FIGURA 83 corrobora com a teoria de que a resistência a compressão em conjunto com a absorção influenciam diretamente do avanço da frente de realcalinização, devido ao elevado valor de correlação entre essas o coeficiente de realcalinização e o índice de resistência/absorção (0,98).

5 CONSIDERAÇÕES FINAIS

5.1 CONCLUSÕES

Com base nos resultados obtidos com essa pesquisa pode-se concluir que:

- As soluções de KOH, comercial, tripla e de NaOH são eficazes na realcalinização química de concretos carbonatados tratados por meio de imersão e do método da manta;
- A solução alcalina com maior velocidade de realcalinização dentre as estudadas é a solução de KOH;
- As soluções de $\text{Ca}(\text{OH})_2$ e cal não são capazes de realcalinizar amostras carbonatadas (sem armadura em seu interior), após 9 meses de tratamento;
- Os métodos de spray e trincha foram ineficientes na realcalinização de concretos carbonatados, independentemente da solução alcalina utilizada;
- O método da manta se mostrou promissor, porém necessita de ajustes para sua aplicação em estruturas reais a fim de manter a quantidade de solução alcalina constante no interior da manta, de modo que as soluções permaneçam regularmente em contato com o concreto tratado;
- Os resultados obtidos em laboratório se mostraram mais eficientes que os resultados encontrados em campo;
- Diferentemente do que é relatado na literatura, é importante que a mão-de-obra seja treinada, para que todos os materiais sejam manuseados de forma segura, evitando acidentes. Esta afirmativa se fundamenta na experiência de aplicação em campo, pois mesmo com a utilização de EPIs deparou-se com riscos de queimaduras devido a elevada alcalinidade das soluções. No umedecimento da estrutura, deve-se atentar para o vento, devido a aplicação ser realizada por meio de spray. Durante a colocação da manta no entorno do pilar, deve-se atentar para o comprimento das luvas nitrílicas utilizadas;
- As adições minerais influenciam tanto a frente de carbonatação, como a frente de realcalinização;
- A reserva alcalina tem mais influência na velocidade de realcalinização do que a absorção capilar;

- Concretos com adições pozolânicas tem comportamento diferente de concretos com adições inertes perante a realcalinização química;
- A realcalinização química apresenta um comportamento diferente quando é aplicada em concretos com grandes espessuras carbonatadas e centro ainda alcalino. Nesta caso, além da realcalinização de fora para dentro do concreto, é observada uma região alcalina de dentro para fora das amostras.

5.2 SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS

- Analisar o comportamento microestrutural da realcalinização química e seus mecanismos;
- Aprimorar ou desenvolver um método de aplicação para a realcalinização química em estruturas reais;
- Desenvolver uma análise financeira da aplicação da realcalinização química em estrutura real, comparativamente com a aplicação de outros métodos de tratamento para estruturas de concreto armado carbonatadas;
- Analisar se o método de realcalinização química consegue repassivar armaduras em processo de corrosão;
- Estudar a velocidade de carbonatação dos concretos que tenham sido submetidos a realcalinização química;
- Desenvolver um coeficiente de realcalinização para concretos com diferentes relações água/cimento, tipos de cimento e tipos de adições minerais e pozolânicas;
- Estudar o novo fenômeno encontrado para concretos realcalinizados que possuem grandes espessuras carbonatadas;
- Verificar a possível potencialização da reação álcali-agregado em estruturas realcalinizadas.

5.3 ATUAÇÕES EM PUBLICAÇÕES

Artigos em periódico:

RÉUS, G. C.; RIBEIRO, A.; MEDEIROS, M. H. F. Influência do diâmetro dos agregados graúdos na frente de realcalinização de concretos carbonatados. Status: em elaboração.

CAMPOS, H. F.; ROCHA, T.; RÉUS, G.C.; KLEIN, N.; MARQUES FILHO, J. Determinação do teor ótimo de substituição do cimento Portland por pó de pedra por

métodos de empacotamento de partículas analíticas e experimentais e análise do excesso de água na consistência das pastas produzidas. Status: submetido.

CAPRARO, A. P. B.; RÉUS, G. C.; ARAUJO, J. S.; KLEIN, N. S.; HOPPE FILHO, J. Avaliação da atividade pozolânica de cinza volante adicionada a sistema cimentício em diferentes teores e finuras. **Revista Matéria**. Status: submetido.

MEDEIROS, M. H. F.; CAPRARO, A. P. B.; RÉUS, G. C.; ESCOBEDO, M. L. Resistência à compressão por testemunho de concreto: influência do fator de esbeltes e diâmetro da amostra. **REEC - Revista eletrônica de engenharia civil**, v. 13, p. 240-250, 2017. Status: publicado.

SOUZA, D. J.; REUS, G. C. ; CEZARIO, H. C. ; FLOR, E. P. ; SANTOS, E. S. ; MARINHO, G. ; CAMARA, L. A. . Application of Non-destructive Testing to Evaluate the Performance of Bridges Structures. **Journal of Civil Engineering and Architecture (Print)**, v. 11, p. 1-7, 2017. Status: publicado.

NEIA, T. A. L. C. ; LOPES, E. B. ; ARAUJO, A. L. B. A. ; DOMINGUES, A. B. ; RÉUS, G. C. . Análise de modelagem computacional em obra de arte especial de concreto armado com assimetria. **Concreto & Construção**, v. 1, p. 84-91, 2015. Status: publicado.

Artigos em anais de congressos:

RÉUS, G. C.; BECKER, A. C. C.; MEDEIROS, M. H. F. Estudo da realcalini-zação química como alternativa para recuperação de estruturas de concreto armado carbonatadas. Status: em elaboração.

SANTOS, RÉUS, G. C.; SOUZA, D. J. ; SILVESTRO, L. ; GOMES, G. R. ; MEDEIROS, M. H. F. ; SANTOS FILHO, M. L. . Influência da frente de carbonatação na resistência superficial do concreto obtida pelo método da esclerometria. In: II CBPAT - Congresso Brasileiro de Patologia das Construções, 2016, Belém. **Anais do II Congresso Brasileiro de Patologia das Construções**. Porto Alegre: Alconpat, 2016. v. 1. p. 1323-1330. Status: publicado.

BONATTO, I. ; ZEM, N. C. G. ; CAPRARO, A. P. B. ; RÉUS, G. C. ; MEDEIROS, M. H. F. . Estudo de caso de uma estrutura de concreto armado por meio da aplicação do mapa de danos. In: II CBPAT - Congresso Brasileiro de Patologia das Construções, 2016, Belém. **Anais do II Congresso Brasileiro de Patologia das Construções**. Porto Alegre: Alconpat, 2016. v. 1. p. 1381-1392. Status: publicado.

SOUZA, D. J. ; SANTOS, E. S. ; FLOR, E. P. ; MARINHO, G. P. ; RÉUS, G. C. ; CEZARIO, H. C. ; CAMARA, L. A. ; SANTOS FILHO, M. L. . Non-destructive testing in bridge structures performance evaluation: A case study. In: **8th International Conference on Bridge Maintenance, Safety and Management**, 2016, Foz do Iguaçu.

IABMAS 2016, 2016. Status: publicado.

SOUZA, D. J. ; RÉUS, G. C. ; VERDEZI, T. ; RODEGHIERO, I. F. ; MEDEIROS, M. H. F. . Estudo de caso de previsão de vida útil de pontes e viadutos na região de Curitiba pelo método da resistividade elétrica e do potencial de corrosão. In: 18º Encontro Nacional de Conservação Rodoviária, 2015, Foz do Iguaçu. **18º Encontro Nacional de Conservação Rodoviária**, 2015. v. 1. p. 1-18. Status: publicado.

RÉUS, G. C.; BECKER, A. C. C. ; RAISDORFER, J. W. ; SOUZA, D. J. ; CEZARIO, H. C. ; LENCZUK, B. S. T. ; NIKKEL, S. ; RODRIGUES, D. S. ; MEDEIROS, M. H. F. . Aplicação de soluções alcalinas para realcalinização de concretos carbonatados: uma alternativa para pontes de concreto armado. In: 18º Encontro Nacional de Conservação Rodoviária, 2015, Foz do Iguaçu. **18º Encontro Nacional de Conservação Rodoviária**, 2015. v. 1. p. 1-15. Status: publicado.

MIRANDA, D. C. ; HORTEGA, M. D. ; ZAU, S. K. S. ; ZEM, N. C. G. ; RÉUS, G. C. ; MEDEIROS, M. H. F. . Estudo de caso de inspeção de estrutura de concreto armado de prédio público no Centro Politécnico da UFPR: 6 anos de degradação. In: 57º Congresso Brasileiro do Concreto, 2015, Bonito. **57º Congresso Brasileiro do Concreto**, 2015. v. 1. p. 1-21. Status: publicado.

RÉUS, G. C.; SOUZA, D. J. ; BECKER, A. C. C. ; RAISDORFER, J. W. ; MEDEIROS, M. H. F. . ANAIS DO 57º CONGRESSO BRASILEIRO DO CONCRETO. Aplicação de soluções alcalinas para realcalinização de concretos carbonatados. In: 57º Congresso Brasileiro do Concreto, 2015, Bonito. **57º Congresso Brasileiro do Concreto**, 2015. v. 1. p. 1-15. Status: publicado.

REFERÊNCIAS

- ABO-EL-ENEIN, S. A.; EL-KADY, G.; EL-SOKKARY, T. M.; GHARIEB, M. Physico-mechanical properties of composite cement pastes containing silica fume and fly ash. **Housing and Building National Research Center (HBRC Journal)**, v. 11, p. 7–15, 2015. Citado na página 87.
- ALMUSALLAM, A. A. Effect of degree of corrosion on the properties of reinforcing steel bars. **Construction and Building Materials**, v. 15, n. 8, p. 361–368, 2001. ISSN 09500618. Citado na página 21.
- AMERICAN CONCRETE INSTITUTE. **ACI222**: Protection of metals in concrete against corrosion. 2001. Citado na página 21.
- ANDERSSON, K.; ALLARD, B.; BENGTSSON, M.; MAGNUSSON, B. Chemical composition of cement pore solution. **Cement and Concrete Research**, v. 19, n. c, p. 327–332, 1989. Citado na página 21.
- ANDRADE, C.; CASTELLOTE, M.; SARRÍA, J.; ALONSO, C. Evolution of pore solution chemistry, electro-osmosis and rebar corrosion rate induced by realkalisation. **Materials and Structures**, v. 32, n. 6, p. 427–436, 1999. ISSN 1359-5997. Citado 2 vezes nas páginas 20 e 32.
- ANTIOHOS, S. K.; PAPADAKIS, V. G.; CHANIOTAKIS, E.; TSIMAS, S. Improving the performance of ternary blended cements by mixing different types of fly ashes. **Cement and Concrete Research**, v. 37, p. 877–885, 2007. Citado na página 87.
- ARAUJO, F. W. C. **Contribuição à viabilização da técnica de realcalinização do concreto carbonatado através da absorção/difusão de soluções alcalinas**. Dissertação (Mestrado), 2004. Citado 11 vezes nas páginas 19, 20, 33, 34, 35, 36, 37, 43, 62, 74 e 82.
- ARAUJO, F. W. C. **Estudo da repassivação da armadura em concretos carbonatados através da técnica de realcalinização química**. Tese (Tese de doutorado) — Universidade de São Paulo, 2009. Citado 10 vezes nas páginas 19, 20, 33, 34, 35, 36, 43, 62, 63 e 74.
- ARAUJO, F. W. C.; HELENE, P. Estudo da repassivação das armaduras em concretos carbonatados através da realcalinização química com solução saturada de hidróxido de cálcio. **Anais do 53º Congresso Brasileiro do Concreto - CBC2011**, v. 1, p. 1–15, 2011. Citado 3 vezes nas páginas 20, 63 e 74.
- ARAUJO, F. W. C. de; HELENE, P. Realcalinização Eletroquímica: Técnica Preventiva ou de Reabilitação? **Concreto Construções**, IBRACON, n. 80, p. 37–41, 2008. Citado na página 20.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR NM 23**: Cimento portland e outros materiais em pó - determinação da massa. Rio de Janeiro, 2001. Citado na página 39.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR NM 248**: Agregados - determinação da composição granulométrica. 2003. Citado na página 41.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 5739**: Concreto - ensaio de compressão de corpos-de-prova cilíndrico. 2007. Citado na página 57.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 7584**: Concreto endurecido — avaliação da dureza superficial pelo esclerômetro de reflexão — método de ensaio. 2012. Citado 2 vezes nas páginas 57 e 78.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 9779**: Argamassa e concreto endurecidos — determinação da absorção de água por capilaridade. Rio de Janeiro, 2012. Citado 2 vezes nas páginas 57 e 65.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 6118**: Projeto de estruturas de concreto — procedimento. Rio de Janeiro, 2014. Citado na página 44.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 5738**: Concreto - procedimento para moldagem e cura de corpos-de-prova. 2015. Citado na página 57.

BANFILL, P. F. G. Re-alkalisation of carbonated concrete - effect on concrete properties. **Construction and Building Materials**, II, p. 255–258, 1997. Citado na página 20.

BERTOLINI, L.; CARSANA, M.; REDAELLI, E. Conservation of historical reinforced concrete structures damaged by carbonation induced corrosion by means of electrochemical realkalisation. **Journal of Cultural Heritage**, Elsevier Masson SAS, v. 9, n. 4, p. 376–385, 2008. ISSN 12962074. Citado 4 vezes nas páginas 20, 30, 31 e 32.

BLANCO, G.; BAUTISTA, A.; TAKENOUTI, H. EIS study of passivation of austenitic and duplex stainless steels reinforcements in simulated pore solutions. **Cement and Concrete Research**, v. 28, p. 212–219, 2006. Citado na página 21.

BRENNA, A.; BOLZONI, F.; BEREITA, S.; ORMELLESE, M. Long-term chloride-induced corrosion monitoring of reinforced concrete coated with commercial polymer-modified mortar and polymeric coatings. **Construction and Building Materials**, v. 48, p. 734–744, 2013. Citado na página 29.

CABRAL, K. C. **Efeito da adição de cargas minerais leves na resistência mecânica de grautes para cimentação de poços offshore**. Dissertação (Mestrado), 2011. Citado na página 87.

CAPRARO, A. P. B.; MIRANDA, D. C.; HORTEGA, M. D.; ZAU, S. K. S.; MEDEIROS, M. H. F. Inspeção em uma estrutura de concreto armado usando potencial de corrosão, profundidade de carbonatação e resistividade elétrica: estudo de caso. **II CBPAT - Congresso Brasileiro de Patologia das Construções**, v. 1, p. 1381–1392, 2016. Citado na página 45.

CARMONA, T. G. Modelos de previsão da despassivação das armaduras em estruturas de concreto sujeitas à carbonatação. 2005. Citado na página 22.

CASCUDO, O. **O controle da corrosão de armaduras em concreto. Inspeção e técnicas eletroquímicas**. 1. ed. São Paulo: UFG, 1997. Citado na página 26.

CASTELLOTE, M.; LLORENTE, I.; ANDRADE, C.; TURRILLAS, X.; ALONSO, C.; CAMPO, J. In-situ monitoring the realkalisation process by neutron diffraction: Electroosmotic flux and portlandite formation. **Cement and Concrete Research**, v. 36, n. 5, p. 791–800, 2006. ISSN 00088846. Citado na página 20.

CASTELLOTE, M.; LLORENTE, I.; ANDRADE, C.; TURRILLAS, X.; ALONSO, C.; CAMPO, J. Neutron diffraction as a tool to monitor the establishment of the electro-osmotic flux during realkalisation of carbonated concrete. **Physica B: Condensed Matter**, v. 385-386 I, p. 526–528, 2006. ISSN 09214526. Citado na página 20.

CASTRO, A. **Influência das adições Minerais na Durabilidade do Concreto Sujeito à Carbonatação**. Dissertação (Mestrado), 2003. Citado na página 47.

COSTA, M. R. M. M.; CINCOTTO, M. A. . Metodologia de caracterização de argamassas colantes. **Boletim Técnico da Escola Politécnica da USP**, único, p. 1–23, 2007. Citado na página 58.

DAL MOLIN, D. C. C. **Capítulo 8: Adições minerais. Concreto:Concreto: Ciência e Tecnologia**. 1ª edição. ed. São Paulo: [s.n.], 2011. Citado na página 86.

DANTAS, H. d. O. **Avaliação dos efeitos da adição de nanossílicas em pó e coloidal em pastas de cimento Portland**. Dissertação (Mestrado), 2013. Citado na página 87.

DIAMANTI, M.; BRENNNA, A.; BOLZONI, F.; BERRA, M.; PASTORE, T.; ORMELLESE, M. Effect of polymer modified cementitious coatings on water and chloride permeability in concrete. **Construction Building Materials**, v. 49, p. 720–728, 2013. Citado na página 29.

DIAZ, F. G. **Realcalinización electroquímica del concreto reforzado carbonatado: una opción de prevención contra la corrosión**. 207 p. Tese (Doutorado) — Universidad Autónoma de Nuevo León, 2010. Citado 2 vezes nas páginas 20 e 32.

DJUKIC, M. B.; V., S.; BAKIC, G. M.; SEDMAK, A.; RAJICIC, B. Hydrogen damage of steels: A case study and hydrogen embrittlement model. **Engineering Failure Analysis**, v. 58, p. 485–498, 2015. Citado na página 32.

GENTIL, V. **Corrosão**. 3. ed. Rio de Janeiro: [s.n.], 1996. 345 p. ISBN 8521610556. Citado na página 26.

GHODS, P.; ISGOR, O. B.; MCRAE, G.; MILLER, T. The effect of concrete pore solution composition on the quality of passive oxide films on black steel reinforcement. **Cement and Concrete Composites**, Elsevier Ltd, v. 31, n. 1, p. 2–11, 2009. ISSN 09589465. Citado 2 vezes nas páginas 21 e 26.

GOBBI, A. Atividade pozolânica de adições minerais pelas nbr 5751/2012 e nbr 5752/2012: uma análise crítica. 2014. Citado 2 vezes nas páginas 42 e 88.

GOÑI, S.; ANDRADE, C. Synthetic concrete pore solution chemistry and rebar. **Cement and Concrete Research**, v. 20, n. c, p. 525–539, 1990. Citado na página 21.

GONZÁLEZ, F.; FAJARDO, G.; ARLIGUIE, G.; JUÁREZ, C. A.; ESCADEILLAS, G. Electrochemical Realkalisation of Carbonated Concrete : an Alternative Approach to Prevention of Reinforcing Steel Corrosion. v. 6, p. 6332–6349, 2011. Citado na página 20.

GÓMEZ-ZAMORANO, L. Y.; GARCÍA-GUILLÉN, G.; ACEVEDO-DÁVILA, J. L. Estudo da hidratação de pastas de cimento portland com substituições de escória granulada de alto forno, cinza volante e metacaulim: efeito da utilização de dois aditivos superplastificantes. **Revista Alconpat**, v. 5, p. 203–218, 2015. Citado na página 87.

HELENE, P. R. L. **Corrosão em armaduras para concreto armado**. 1ª. ed. São Paulo: PINI, 1986. 46 p. Citado 3 vezes nas páginas 23, 26 e 60.

HELENE, P. R. L. **Contribuição ao estudo da corrosão em armaduras de concreto armado**. 248 p. Tese (Tese) — Universidade de São Paulo, 1993. Citado 7 vezes nas páginas 15, 18, 21, 23, 26, 27 e 28.

HELENE, P. R. L. **Manual de Reparo, Proteção e Reforço de Estruturas de Concreto**. 1ª. ed. São Paulo: Multipla, 2003. 718 p. Citado 4 vezes nas páginas 17, 18, 21 e 28.

HO, D.; MARK, S. Interactions between surface coatings and their concrete substrate. **Repair, Rehabilitation, and Maintenance of Concrete Structures, and Innovations in Design and Construction**, n. Coréia, ACI International, p. 370–380, 2000. Citado na página 29.

Hoppe Filho, J. **Sistemas cimento, cinza volante e cal hidratada: mecanismo de hidratação, microestrutura e carbonatação de concreto**. 247 p. Tese (Tese) — Universidade de São Paulo, 2008. Citado 3 vezes nas páginas 22, 23 e 25.

HOUST, Y. F.; WITTMAN, F. H. Depth profiles of carbonates formed during natural carbonation. **Cement and Concrete Research**, v. 32, n. 12, p. 1923–1930, 2002. ISSN 00088846. Citado na página 18.

JASŃNIOK, M.; ZYBURA, A. Modelling the carbonated concrete realkalization. **Journal of Civil Engineering and Management**, v. 15, n. 2, p. 159–168, 2009. ISSN 1392-3730. Citado na página 20.

KOYAMA, M.; TASAN, C. C.; AKIYAMA, E.; TSUZAKI, K.; RAABE, D. Hydrogen-assisted decohesion and localized plasticity in dual-phase steel. **Acta Materialia**, v. 70, p. 174–187, 2014. Citado na página 32.

MARTÍNEZ, I.; ANDRADE, C.; CASTELLOTE, M.; VIEDMA, G. P. de. Advancements in non-destructive control of efficiency of electrochemical repair techniques. **Corrosion Engineering, Science and Technology**, v. 44, n. 2, p. 108–118, 2009. ISSN 1478422X. Citado na página 20.

MEDEIROS, M. H. F. Ensaio não destrutivo para avaliação de estruturas de concreto com vistas à durabilidade: efeito dos nanotubos de carbono (NTC) na tecnologia do concreto estrutural. In: . Projeto de Pesquisa aprovado pela Fundação Araucária: [s.n.], 2012. p. 1–48. Citado na página 17.

MEDEIROS, M. H. F.; FILHO, J. H.; GOBBI, A.; PEREIRA, E. Pozolanas de elevada reatividade: uma avaliação crítica do ensaio de Índice de atividade pozolânica (iap) com cal usando difração de raios x. **Ambiente Construído (Online)**, v. 15, p. 19–29, 2015. Citado na página 88.

MEDEIROS, M. H. F.; HELENE, P. Estudo da carbonatação em concretos e argamassas. **Revista Engenharia, Ciência Tecnologia**, v. 4, n. 4, p. 3–12, 2001. Citado 3 vezes nas páginas 23, 24 e 77.

MEDEIROS, M. H. F.; HELENE, P. R. L. Efficacy of surface hydrophobic agents in reducing water and chloride ion penetration in concrete. **Materials and Structures**, v. 41, p. 59–71, 2008. Citado 2 vezes nas páginas 16 e 29.

MEDEIROS, M. H. F.; HELENE, P. R. L. Durabilidade e proteção do concreto armado. **Téchne: Revista de Tecnologia da Construção (São Paulo)**, v. 151, p. 50–54, 2009. Citado na página 29.

MEDEIROS, M. H. F.; PEREIRA, E.; FIGURA, A. S.; TISSOT, F. M.; ARTIOLI, K. A. Avaliação da eficiência de sistemas de proteção de superfície para concreto: absorção de água, migração de cloretos e ângulo de contato. **Matéria (UFRJ)**, v. 20, p. 145–159, 2015. Citado na página 29.

MEHTA, P. K.; MONTEIRO, P. J. M. **Concreto: microestrutura, propriedades e materiais**. 1ª. ed. São Paulo: IBRACON, 2008. 669 p. ISBN 978-85-98576-12-1. Citado 2 vezes nas páginas 16 e 25.

MORAGUES, A.; MACIAS, A.; ANDRADE, C. Equilibria of the chemical composition of the concrete pore. **Cement and Concrete Research**, v. 17, n. i, p. 173–182, 1987. Citado na página 21.

MOREIRA, C. **Realcalinização de estruturas de concreto carbonatado com utilização de gel saturado de solução alcalina**. 122 p. Dissertação (mestrado) — Universidade Federal de Goiás, 2006. Citado 11 vezes nas páginas 19, 20, 32, 33, 34, 35, 36, 37, 38, 43 e 82.

NAGALLI, A. **Gerenciamento de resíduos sólidos na construção civil**. 1. ed. São Paulo: [s.n.], 2014. Citado na página 16.

NEVILLE, A. M. **Propriedades do concreto**. 2. ed. São Paulo: [s.n.], 1997. ISBN 8572660682. Citado 4 vezes nas páginas 21, 24, 25 e 60.

NITA, C. **Utilização de pozolanas em compósitos de cimento reforçados com fibras de celulose e PVA**. Dissertação (Mestrado), 2006. Citado na página 87.

NITA, C.; JOHN, V. M. Materiais pozolânicos: o metacaulim e a sílica ativa. **Boletim Técnico da Escola Politécnica da USP**, BT/PCC/451, p. 1–13, 2007. Citado na página 87.

PAULETTI, C. **Análise comparativa de procedimentos para ensaios acelerados de carbonatação**. 176 p. Tese (Doutorado) — Universidade Federal do Rio Grande do Sul, 2004. Citado na página 47.

PICANÇO, M. d. S.; ANGÉLICA, R. S.; BARATA, M. S. Cimentos portland aditivados com arenito zeolítico com propriedades pozolânicas. **Revista Matéria**, v. 19, p. 67–80, 2014. Citado na página 87.

PINTO, T. P. P. **Metodologia para a Gestão Diferenciada de Resíduos Sólidos da Construção Urbana**. Dissertação (Tese de doutorado) — Escola Politécnica, Universidade de São Paulo, 1999. Citado na página 16.

POSSAN, E. Carbonatação acelerada: estado da arte das pesquisas no Brasil. **Ambiente Construído**, p. 7–20, 2007. Citado 3 vezes nas páginas 24, 45 e 47.

RAISDORFER, J. W. **Influência da adição ou substituição de adições minerais ao cimento Portland: efeitos na carbonatação, absorção capilar e resistividade de concretos**. Dissertação (Mestrado) — Universidade Federal do Paraná, 2015. Citado 6 vezes nas páginas 25, 42, 44, 86, 88 e 89.

REDAELLI, E.; BERTOLINI, L. Electrochemical repair techniques in carbonated concrete. Part I: Electrochemical realkalisation. **Journal of Applied Electrochemistry**, v. 41, n. 7, p. 817–827, 2011. ISSN 0021891X. Citado na página 20.

RIBEIRO, P. H. L. C. **Realcalinização eletroquímica de estruturas de concreto armado carbonatadas inseridas no meio urbano - influencia de características da estrutura no comportamento do tratamento**. 143 p. Tese (Dissertação) — Universidade Federal da Paraíba, 2009. Citado na página 20.

RIBEIRO, P. H. L. C.; MEIRA, G. R.; FERREIRA, P. R. R.; BARBOSA, N. P. Realcalinização de concretos carbonatados – influência de características do material. In: P. H. L. C. Ribeiro, G. R. Meira, P. R. R. Ferreira, e. N. P. B. (Ed.). **Cinpar**. Córdoba: [s.n.], 2010. p. 18. Citado 2 vezes nas páginas 20 e 32.

RIBEIRO, P. H. L. C.; MEIRA, G. R.; FERREIRA, P. R. R.; PERAZZO, N. Electrochemical realkalisation of carbonated concretes-Influence of material characteristics and thickness of concrete reinforcement cover. **Construction and Building Materials**, Elsevier Ltd, v. 40, p. 280–290, 2013. ISSN 09500618. Citado na página 20.

ROSTAM, S. Service life design of concrete structures - a challenge to designers as well to owners. **Asian journal of civil engineering (building and housing)**, v. 6, n. 5, p. 423–445, 2004. Citado na página 24.

SILVA, K. D. d. C. **Avaliação da atividade pozolânica dos resíduos de lã de rocha, fibra de vidro e lã de vidro**. Dissertação (Mestrado), 2016. Citado na página 88.

Sá, R. R. de. **Influência da realcalinização por meio de absorção/difusão de soluções alcalinas na resistência a compressão do concreto, na aderência de tintas e vernizes e na repassivação das armaduras**. 198 p. Dissertação (Mestrado), 2006. Citado 9 vezes nas páginas 19, 20, 33, 34, 35, 36, 43, 62 e 74.

TEIXEIRA, F. A. **Realcalinização do concreto carbonatado empregando solução rica em álcalis**. 150 p. Tese (Doutorado), 2002. Citado na página 20.

TONG, Y.; BOUTEILLER, V.; MARIE-VICTOIRE, E.; JOIRET, S. Efficiency investigations of electrochemical realkalisation treatment applied to carbonated reinforced concrete - Part 1: Sacrificial anode process. **Cement and Concrete Research**, Elsevier Ltd, v. 42, n. 1, p. 84–94, 2012. ISSN 00088846. Citado na página 20.

VAITKEVICIUS, V.; SERELIS, E.; HILBIG, H. The effect of glass powder on the microstructure of ultra high performance concrete. **Construction and Building Materials**, v. 68, p. 102–109, 2014. Citado na página 87.

VOGLIS, N.; KAKALI, G.; TSIVILIS, S. Identification of composite cement hydration products by means of x-ray diffraction. **Mikrochimica Acta**, v. 126, p. 181–183, 2001. Citado na página 87.

WOLF, J. Influência do teor de calcário na carbonatação de argamassas de cimento branco. 2010. Citado na página 22.

XIONG, Y.; DENG, S.; WU, D. Experimental study on compressive strength recovery effect of fire-damaged high strength concrete after realkalisation treatment. **Procedia Engineering**, v. 135, p. 255–258, 2016. Citado na página 20.

YEIH, W.; CHANG, J. J. A study on the efficiency of electrochemical realkalisation of carbonated concrete. **Construction and Building Materials**, v. 19, p. 516–524, 2005. ISSN 09500618. Citado 3 vezes nas páginas 20, 30 e 32.