



UNIVERSIDADE FEDERAL DE PERNAMBUCO
CENTRO DE TECNOLOGIA E GEOCIÊNCIAS
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA CIVIL E AMBIENTAL
CURSO DE GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA CIVIL

MATHEUS BATISTA CALADO COSTA

ESTUDO DE SOLUÇÃO REALCALINIZADORA EM
CONCRETOS CARBONATADOS

RECIFE, 2023

MATHEUS BATISTA CALADO COSTA

ESTUDO DE SOLUÇÃO REALCALINIZADORA EM CONCRETOS CARBONATADOS

Trabalho de Conclusão de Curso apresentada à
Universidade Federal de Pernambuco como parte dos
requisitos para a obtenção do título de Engenheiro
Civil.

Área de concentração: CONSTRUÇÃO

Orientador: Prof. Dr. Tibério Wanderley Correia de
Oliveira Andrade

RECIFE, 2023

Ficha de identificação da obra elaborada pelo autor,
através do programa de geração automática do SIB/UFPE

Costa, Matheus Batista Calado.

Estudo de solução realcalinizadora em concretos carbonatados / Matheus
Batista Calado Costa. - Recife, 2023.

50p : il., tab.

Orientador(a): Tibério Wanderley Correia de Oliveira Andrade
Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação) - Universidade Federal de
Pernambuco, Centro de Tecnologia e Geociências, Engenharia Civil -
Bacharelado, 2023.

1. Realcalinização. 2. Carbonatação. 3. Solução Alcalina. I. Andrade, Tibério
Wanderley Correia de Oliveira. (Orientação). II. Título.

690 CDD (22.ed.)



SERVIÇO PÚBLICO FEDERAL
UNIVERSIDADE FEDERAL DE PERNAMBUCO
CENTRO DE TECNOLOGIA E GEOCIÊNCIAS
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA CIVIL E AMBIENTAL
COORDENAÇÃO DO CURSO DE GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA CIVIL

ATA DA DEFESA DO TRABALHO DE CONCLUSÃO DE CURSO PARA CONCESSÃO DO GRAU DE ENGENHEIRO CIVIL

CANDIDATO: MATHEUS BATISTA CALADO COSTA

BANCA EXAMINADORA:

Orientador: Tibério Wanderley Correia de Oliveira Andrade

Examinador 1: Tiago Ancelmo de Carvalho Pires de Oliveira

Examinador 2: Juliana Rodrigues Ferreira

TÍTULO DO TRABALHO DE CONCLUSÃO DE CURSO:

LOCAL: RECIFE-PE

DATA: 04/10/2023 HORÁRIO DE INÍCIO: 10h.

Em sessão pública, após exposição de cerca de 30 minutos, o(s) candidato(s) foi (foram) arguido(s) oralmente pelos membros da banca com NOTA: 9 (deixar 'Exame Final', quando for o caso).

1) (x) aprovado(s) (nota $\geq 7,0$), pois foi demonstrado suficiência de conhecimento e capacidade de sistematização no tema da monografia e o texto do trabalho aceito.

As revisões observadas pela banca examinadora deverão ser corrigidas e verificadas pelo orientador no prazo máximo de 30 dias (o verso da folha da ata poderá ser utilizado para pontuar revisões).

O trabalho com nota no seguinte intervalo, **3,0 $\leq$ nota $< 7,0$** , será reapresentado, gerando-se uma nota ata; sendo o trabalho aprovado na reapresentação, o aluno será considerado **aprovado com exame final**.

2) () reprovado(s). (nota $< 3,0$)

Na forma regulamentar foi lavrada a presente ata que é assinada pelos membros da banca e pelo(s) candidato(s).

Recife, 04 de outubro de 2023

Documento assinado digitalmente



TIBERIO WANDERLEY CORREIA DE OLIVEIRA ANI

Data: 04/10/2023 11:45:56-0300

Verifique em <https://validar.iti.gov.br>

Orientador:

Documento assinado digitalmente



TIAGO ANCELMO DE CARVALHO PIRES DE OLIVEIRA

Data: 04/10/2023 15:03:47-0300

Verifique em <https://validar.iti.gov.br>

Avaliador 1:

Documento assinado digitalmente



JULIANA RODRIGUES FERREIRA

Data: 04/10/2023 18:59:32-0300

Verifique em <https://validar.iti.gov.br>

Avaliador 2:

Documento assinado digitalmente



MATHEUS BATISTA CALADO COSTA

Data: 04/10/2023 11:10:48-0300

Verifique em <https://validar.iti.gov.br>

Candidato :

..

Coordenação do Curso de Engenharia Civil-Dcivil

Rua Acadêmico Hélio Ramos s/nº, Cidade Universitária, Recife-PE CEP: 50740-530.

Fones: (081)2126.8220/8221 Fone/fax: (081)2126.8219.

AGRADECIMENTOS

Primeiramente a Deus, que me deu sabedoria e discernimento para chegar até o fim neste trabalho.

A minha mãe Idelma Maria Batista Ribeiro e ao meu pai José Alberto Calado Costa, ao meu irmão José Lucas Batista Calado Costa, e a toda a minha família que sempre me incentivaram, apoiaram e acompanharam cada passo que dei na graduação.

A minha namorada Bruna Marcela da Silva que me incentivou desde o início e me deu apoio em todos os momentos.

Aos amigos, em especial Camila Chalegre, Klebinaldo Santana e Ruan Thiago, que estiveram comigo em todos os momentos da graduação. E a todos os outros que de alguma forma também contribuíram desde o início do ABI Engenharia, e que pude compartilhar todos os momentos possíveis da universidade, momentos quais levarei sempre comigo.

Ao meu orientador Tibério Wanderley Correia de Oliveira Andrade, pela confiança e empenho em me ajudar a realizar o estudo da melhor forma possível, sendo bem prestativo e se mostrando sempre disponível.

E a todos que contribuíram de alguma forma para a realização desse sonho e que não foram mencionados.

RESUMO

O presente trabalho tem como objetivo contribuir na busca de alternativas eficazes no tratamento de concretos carbonatados. A carbonatação é um fenômeno físico-químico que ocorre na pasta de cimento e degrada o concreto armado provocando manifestações patológicas, resultante da reação do dióxido de carbono da atmosfera com componentes da pasta de cimento, ocasionando a diminuição do pH do concreto e tornando as armaduras vulneráveis à corrosão.

O objetivo principal foi avaliar a realcalinização de concreto velho e carbonatado para repassivação das armaduras no seu interior, ou seja, analisar a eficácia desse processo. A solução alcalina foi avaliada através de três métodos distintos de aplicação, primeiro temos os métodos de spray e trincha, são os dois métodos sugerido pelo fornecedor do produto e um método alternativo que é a aplicação por manta. Foi utilizada uma solução alcalina disponível no mercado nacional.

Notou-se que os métodos de aplicação por spray e por trincha não se mostraram eficazes na realcalinização do concreto carbonatado, neste estudo. Em contrapartida, o método de aplicação com manta apresentou resultados satisfatórios para esse estudo, atingindo uma profundidade de realcalinização de 15 mm ao término do tratamento, mas vale ressaltar que o concreto utilizado tinha mais de 50 anos, com baixa resistência à compressão e alta permeabilidade, o que pode ter favorecido a obtenção da profundidade de realcalinização alcançada.

Palavras-chave: Realcalinização, carbonatação, solução alcalina.

ABSTRACT

The present study aims to contribute to the search for effective alternatives in the treatment of carbonated concretes. Carbonation is a physicochemical phenomenon that occurs in the cement paste and degrades reinforced concrete, leading to pathological manifestations, resulting from the reaction of atmospheric carbon dioxide with components of the cement paste, causing a decrease in concrete pH and making the reinforcements vulnerable to corrosion.

The main objective was to assess the realkalization of old and carbonated concrete to reactivate the reinforcements within it, in other words, to analyze the effectiveness of this process. The alkaline solution was evaluated through three distinct application methods. Firstly, there were the spray and brush methods, both of which are suggested by the product supplier, and an alternative method, which involved membrane application. A domestically available alkaline solution was used.

It was noted that the spray and brush application methods did not prove to be effective in realkalizing the carbonated concrete in this study. In contrast, the application method using a blanket yielded satisfactory results for this study, achieving a recalcification depth of 15 mm at the end of the treatment. It's worth noting that the concrete used was over 50 years old, with low compressive strength and high permeability, which may have favored the achievement of the recalcification depth attained.

Keywords: Realkalization, carbonation, alkaline solution.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 – Esquema simplificado de corrosão de armadura por carbonatação	20
Figura 2 - Representação esquemática da interação entre o concreto e o ambiente agressivo às armaduras.....	20
Figura 3 – Evolução esquemática da deterioração de estruturas de concreto por corrosão de armaduras.....	22
Figura 4– Esquema representativo de carbonatação.....	23
Figura 5 – Representação esquemática da realcalinização eletroquímica.	24
Figura 6 - Ilustração do princípio de realcalização eletroquímica.....	25
Figura 7 – Evolução da realcalinização eletroquímica da estrutura de concreto armado ao longo do tratamento.	26
Figura 8 – Esquema de realcalinização química.	28
Figura 9 – Esquema de realcalinização química	29
Figura 10 – Evolução da realcalinização química ao longo do tempo.	29
Figura 11 – Pilar envolto pela cinta de borracha com solução alcalina em seu interior.	32
Figura 12 – Gel aplicado em estrutura de tamanho real	33
Figura 13 - Princípio da realcalinização passiva	34
Figura 14 – Testemunhos extraídos.....	35
Figura 15 – Embalagem do produto utilizado.	36
Figura 16 – Características da solução alcalina.....	37
Figura 17 – Corpo de prova fraturado para a medição de carbonatação.	37
Figura 18 - Corpo de prova em imersão	38
Figura 19 – Corpo de prova após retificação.....	39
Figura 20 - Ensaio de resistência à compressão	40
Figura 21 – Método envolvimento das amostras em manta embebida com solução alcalina. .	41
Figura 22 – Método de aplicação de solução alcalina com spray.	41
Figura 23 – Método de aplicação de solução alcalina com trincha.	42
Figura 24 - Profundidade de realcalinização das amostras.....	43
Figura 25 - Final do tratamento de realcalinização método de spray	44
Figura 26 - Final do tratamento de realcalinização método de trincha.	44
Figura 27 - Final do tratamento de realcalinização método de manta.....	45
Figura 28 - Absorção de água das amostras	45
Figura 29 – Resistência à compressão das amostras	46

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 – Resumo das soluções alcalinas para realcalinização química encontradas na bibliografia.	30
Tabela 2 – Resumo das características e resultados obtidos por diversos autores para a realcalinização química	31

LISTA DE SIGLAS E ABREVIATURAS

A/m ²	Ampere por Metro Quadrado
Ah/m ²	Ampere Hora por Metro Quadrado
ABNT	Associação Brasileira de Normas Técnicas
CaCO ₃	Carbonato de Cálcio
Ca(OH) ₂	Hidróxidos de Cálcio
Cl-	Íons Cloreto
CO ₂	Dióxido de Carbono
H ₂	Hidrogênio
H ₂ O	Água
H ₂ S	Sulfeto de Hidrogênio
K ₂ CO ₃	Carbonato de Potássio
KOH	Hidróxido de Potássio
Mpa	Mega Pascal
Na ₂ CO ₃	Carbonato de Sódio
NaOH	Hidróxido de Sódio
NBR	Norma Técnica Brasileira
O ₂	Oxigênio
OH-	Hidroxila
RAE	Realcalinização Eletroquímica
RAQ	Realcalinização Química
SO ₂	Dióxido de Enxofre

Sumário

1 - INTRODUÇÃO.....	13
1.1 - Justificativa e motivação	14
1.2 – Objetivos	15
1.2.1 – Objetivo Geral	15
1.2.2 – Objetivos Específicos	15
2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA.....	16
2.1 – Concreto Armado.....	16
2.2 – Patologias	18
2.3 – Concreto Carbonatado	22
2.4 – Realcalinização do Concreto	23
2.4.1 Realcalinização Eletroquímica (RAE).....	24
2.4.2 Realcalinização Química (RAQ).....	28
2.4.3 Realcalinização Passiva	33
3 MATERIAIS E MÉTODOS.....	35
3.1 – Corpos de provas.....	35
3.2 – Solução alcalina	36
3.3 – Medição da carbonatação.....	37
3.4 – Ensaio de absorção	38
3.5 – Ensaio de resistência à compressão	39
3.6 – Métodos de aplicação das soluções alcalinas nas amostras	40
4 RESULTADOS E DISCUSSÃO	43
4.1 – Efetividade da realcalinização	43
4.2 – Absorção	45
4.3 – Resistência à compressão.....	46
5 CONCLUSÕES	47
5.1 – Considerações finais.....	47

5.2 – Limitações do Trabalho	47
5.3 – Trabalhos futuros.....	47
6 REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	48

1 - INTRODUÇÃO

O concreto aplicado nas edificações e obras de engenharia civil em geral é, dentre todos os materiais de construção, o mais versátil, econômico e largamente usado. Poucas pessoas imaginam a dimensão de sua contribuição para a infraestrutura e o ambiente construído do mundo moderno, tais como estradas, viadutos, barragens, edifícios dentre outros tipos de estruturas e, tampouco, estão atentas ao seu papel de material ambientalmente amigável. Efetivamente, o concreto não necessita de conservantes tóxicos e apresenta uma inerente resistência ao fogo quando comparado, por exemplo, ao plástico e à madeira. Além disso, consome menos energia na sua produção em comparação com a maioria dos materiais de construção (BATTAGIN, 2010).

As estruturas de concreto armado são projetadas e construídas para apresentar o desempenho requerido durante uso do sistema construtivo. Assim, durante toda a sua vida útil, deve demonstrar certo grau de segurança, ainda que em condições de operação e condições ambientais adversas. No entanto, existem vários fatores que podem contribuir significativamente para a deterioração de uma estrutura de concreto armado e, conseqüentemente, a perda de durabilidade.

De acordo com a ABNT NBR 6118/2014 – Projeto de Estruturas de Concreto – As estruturas devem ser projetadas para, além de resistir aos esforços, apresentarem durabilidade satisfatória definida em projeto. Durabilidade, definida pela NBR 6118 (ABNT, 2014) consiste na capacidade da estrutura resistir às influências ambientais previstas e definidas em conjunto pelo autor do projeto estrutural e pelo contratante, no início dos trabalhos de elaboração do projeto.

O conceito de durabilidade vem evoluindo simultaneamente com a construção civil e com as mudanças nas necessidades dos usuários. A ideia inicial de se usar apenas a resistência como parâmetro principal para garantir a integridade das estruturas não é mais considerada adequada. Com o aumento do conhecimento sobre os materiais utilizados na engenharia civil e suas interações com o meio ambiente, foram sendo incorporados conceitos de durabilidade e desempenho para definir propriedades do concreto armado. Atualmente, com o uso da ciência e tecnologia é possível acrescentar também de maneira quantitativa a questão do tempo através do conceito de vida útil. Outros fatores que também foram agregados a este grupo são os

aspectos econômicos, relacionados com os custos do ciclo de vida, que englobam utilização e manutenção, e a questão de se buscar por soluções mais sustentáveis na Engenharia (POSSAN, 2010).

1.1 - Justificativa e motivação

O concreto é um dos materiais mais amplamente utilizados na construção civil devido às suas propriedades de resistência, durabilidade e versatilidade. No entanto, mesmo com essas vantagens, o concreto armado está sujeito a diversos tipos de intempéries físicas e químicas que influenciam diretamente em sua durabilidade.

Entre os problemas enfrentados pelo concreto, a carbonatação é um dos mais comuns. A carbonatação é um processo químico em que o dióxido de carbono (CO_2), presente na atmosfera, reage com o hidróxido de cálcio ($\text{Ca}(\text{OH})_2$) presente na pasta de cimento, devido a sua liberação na hidratação do cimento. Essa reação resulta na formação gradativa de carbonato de cálcio (CaCO_3), levando a redução do pH do concreto, que inicialmente é extremamente alta pela presença elevada de hidróxido de cálcio, que é uma base forte.

A carbonatação afeta principalmente a camada superficial do concreto, que está em contato com o ar atmosférico, e se propaga para camadas mais profundas ao longo do tempo com velocidades distintas, isto é, com taxas de carbonatação que dependem de fatores como a permeabilidade do concreto, concentração de CO_2 e umidade do concreto. A redução do pH, causada pela carbonatação, compromete a camada de passivação das armaduras, tornando-as suscetíveis à corrosão.

A recuperação de concretos carbonatados torna-se uma questão importante na manutenção e preservação das estruturas de concreto. A possibilidade de utilização de produtos de realcalinização que são aplicados na superfície dos elementos de concreto, surge como uma alternativa promissora para restaurar as propriedades alcalinas dos concretos velhos e carbonatados, restaurando a passivação das armaduras, contribuindo assim para a sobrevida das estruturas de concreto armado.

1.2 – Objetivos

1.2.1 – Objetivo Geral

O principal objetivo deste estudo é investigar a eficácia de um realcalinizador, comercializado no mercado nacional, na recuperação de concretos carbonatados.

1.2.2 – Objetivos Específicos

- Fazer uma revisão da literatura, para obter um embasamento teórico e compreender como o realcalinizador atua na recuperação de concretos carbonatados, analisando os seus mecanismos de ação e explorando os processos de realcalinização, reativação da camada de passivação das armaduras e o aumento do pH da matriz de concreto;
- Avaliar a eficácia da solução alcalina comercializada no mercado nacional, na neutralização da acidez causada pela carbonatação. Essa avaliação será realizada por meio de experimentos para avaliar sua capacidade de realcalinização de um concreto velho e já carbonatado;
- Fornecer contribuição significativa para profissionais da construção civil e pesquisadores interessados em aplicar o realcalinizador em suas práticas de recuperação de estruturas de concreto carbonatado.

2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

2.1 – Concreto Armado

A cal hidráulica e pozolanas (de origem vulcânica) já eram conhecidos pelos romanos como opções de aglomerante para as suas construções. A descoberta do cimento Portland tem sua origem nas pesquisas realizadas por Smeaton e Parker, no século XVIII, sendo que sua produção industrial somente ocorreu no século seguinte, como consequência dos estudos e pesquisas de Vicat e Josef Aspdin, na Inglaterra em 1824.

A argamassa armada surgiu na França, no ano de 1849, com o primeiro objeto do material registrado pela História sendo um barco, do francês Lambot, o qual foi apresentado oficialmente em 1855. O barco foi construído com telas de fios finos de ferro preenchidas com argamassa.

Em 1861, o horticultor e paisagista Joseph Monier, constrói vasos ornamentais em argamassa armada, conseguindo em 1867 patentear essa invenção. Posteriormente, consegue patentes de tubos, reservatórios, placas e pontes.

Em 1850 tem início uma série de ensaios realizados pelo advogado norte americano Thaddeus Hyatt, que em 1877 obtém patente para um sistema de execução de vigas de concreto e aço, no qual as barras previam os efeitos de tração e cisalhamento, sugerindo o uso de estribos e barras dobradas.

Na França, Hennebique foi o primeiro após Hyatt a compreender a função das armaduras no concreto. *“Percebeu a necessidade de dispor outras armaduras além da armadura reta de tração. Imaginou armaduras dobradas, prolongadas em diagonal e ancoradas na zona de compressão. Foi o primeiro a colocar estribos com a finalidade de absorver tensões oriundas da força cortante e o criador das vigas T, levando em conta a colaboração da laje como mesa de compressão”*, (VASCONCELOS, 1985).

Os alemães estabeleceram a teoria mais completa do novo material, toda ela baseada em experiências e ensaios. “O verdadeiro desenvolvimento do concreto armado no mundo iniciou-se com Gustavo Adolpho Wayss” que fundou sua firma em 1875, após comprar as patentes de Mounier para empregar no norte da Alemanha (VASCONCELOS, 1985).

O concreto é um material resultante da mistura dos agregados (naturais ou britados) com cimento e água. Em função de necessidades específicas, são acrescentados aditivos químicos (retardadores ou aceleradores de pega, plastificantes e superplastificantes, etc.) e adições minerais (escórias de alto-forno, pozolanas, fillers calcários, microssílica, etc.) que melhoram as características do concreto fresco ou endurecido.

A resistência do concreto endurecido depende de vários fatores, como a relação água/cimento, o grau de adensamento, os tipos de agregados e de aditivos, etc. Quanto menor é a relação água/cimento da pasta utilizada no concreto, maior é a resistência à compressão do concreto. A relação água/cimento determina a porosidade da pasta de cimento endurecida e, portanto, as suas propriedades mecânicas e de permeabilidade a líquidos e gases. Como a pasta de cimento é a fase continua do concreto, que envolve os agregados miúdos e graúdos, a permeabilidade do concreto está diretamente relacionada a permeabilidade da pasta de cimento endurecida.

O concreto armado é o material composto, obtido pela associação do concreto com barras de aço, convenientemente colocadas em seu interior. Em virtude da baixa resistência à tração do concreto (cerca de 10% da resistência à compressão), as barras cumprem a função de absorver os esforços de tração na estrutura, enquanto o concreto absorve os esforços de compressão. Ambos, atuando de forma conjunta para resistir aos esforços que lhe forem aplicados.

Além de absorver os esforços de compressão, o concreto protege as armaduras contra a corrosão. Apesar da fissuração, quase sempre inevitável em uma estrutura de concreto armado, a durabilidade das armaduras não fica prejudicada, desde que as aberturas das fissuras sejam limitadas. Essa proteção da armadura pelo concreto se dá através da camada de cobrimento, que é a distância existente entre a superfície do elemento e a superfície mais exposta da barra de aço que está mais próxima dessa superfície. Quanto maior a agressividade do meio, maior deverá ser o cobrimento mínimo, para garantir uma determinada vida útil ao concreto armado, sob o ponto de vista da corrosão.

2.2 – Patologias

O termo "patologia", é derivado do grego (pathos - doença, e logia - ciência, estudo) e significa "estudo da doença". Na construção civil pode-se atribuir patologia aos estudos dos danos ocorridos em edificações. As manifestações patológicas se entendem como as degradações identificadas na edificação, as quais podem ser geradas durante o período de execução da obra (quer por emprego de métodos construtivos ou materiais inapropriados), ou na própria elaboração do projeto ou ainda adquiridas ao longo do tempo pela utilização da edificação. Essas manifestações patológicas podem se manifestar de diversos tipos, tais como: trincas, fissuras, rachaduras, entre outras.

A corrosão das armaduras é a principal manifestação patológica que afetam as estruturas de concreto armado no mundo, comprometendo progressivamente a sua durabilidade e a sua segurança estrutural. A corrosão é definida como a deterioração de um material, geralmente metálico, por ação química ou eletroquímica do meio ambiente associada ou não a esforços mecânicos. A deterioração causada pela interação físico-química entre o material e o seu meio operacional representa alterações prejudiciais indesejáveis, sofridas pelo material, tais como desgaste, variações químicas ou modificações estruturais, tornando-o inadequado para o uso (GENTIL, 2007).

A corrosão das armaduras do interior do concreto é uma reação entre o elemento ferro, que compõe o aço, e o oxigênio da atmosfera, produzindo o óxido de ferro. Essa transformação é progressiva, pois tende a aumentar o nível de degradação da barra de aço. O volume de óxido de ferro formado é muitas vezes superior ao volume do aço original, produzindo tensões de tração no concreto que o mesmo não consegue suportar, fissurando e destacando partes vulneráveis, como quinas de vigas e pilares, além das camadas de cobrimento que protege o próprio aço. Além disso, o óxido de ferro formado é poroso, não aderente ao metal original e solúvel em água, e quando as barras de aço chegam no estado em que perdem seção acentuada, a segurança e a estabilidade da estrutura ficam extremamente comprometidas.

As barras de aço inseridas no concreto estão protegidas, inicialmente, por uma película passivadora, imperceptível a olho nú, que envolve as barras de aço, encontrada em toda a superfície das barras. Essa película é formada a partir da alta alcalinidade do meio aquoso presente no concreto (pH próximo de 13), resultado da reação do hidróxido de cálcio e da

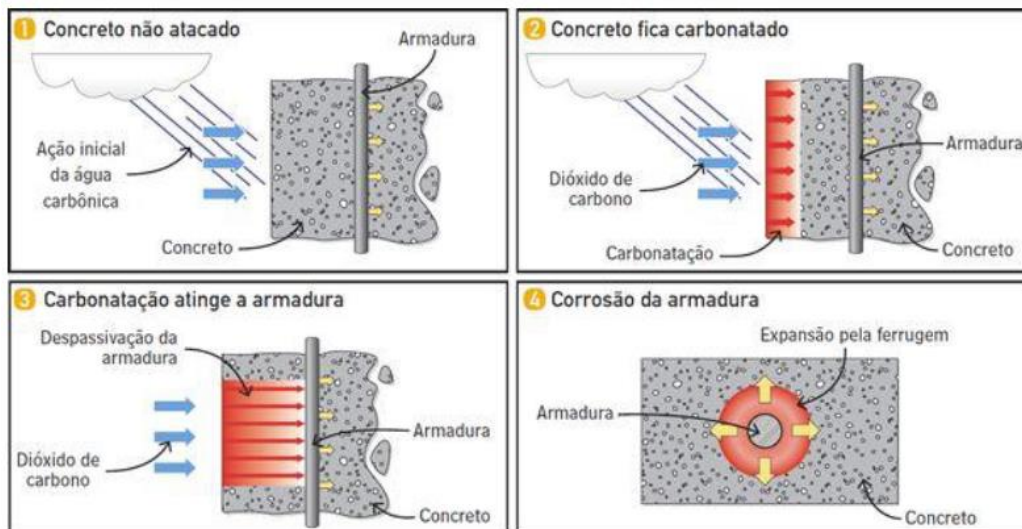
oxidação superficial das barras de aço. Assim, a corrosão se propaga quando essa película é rompida, sendo o processo denominado de despassivação da armadura.

E a partir disso, a principal proteção da armadura contra os agentes da despassivação, isto é, os agentes que destroem essa película protetora, é o revestimento. Essa espessura de revestimento é definida principalmente pelo nível de concentração dos agentes de despassivação encontrados no ambiente que o concreto está inserido. A NBR 6118 (ABNT, 2014) define 04 classes de agressividade ambiental no tocante a corrosão das armaduras, sendo a classe I a mais branda e a classe IV a mais severa.

A corrosão das armaduras é influenciada por uma série de fatores que devem ser considerados no projeto, construção e manutenção de estruturas de concreto. Alguns dos principais fatores incluem:

- A qualidade do concreto: Esse parâmetro é o que define as taxas de difusão de CO₂ e de íons cloreto para o interior do concreto, que são os agentes naturais que destroem a película passivadora que protege o aço da corrosão;
- O revestimento das armaduras: Essa espessura define a distância em que os agentes de despassivação vão percorrer no interior do concreto até chegar na armadura, despassivando-a;
- A concentração dos agentes da despassivação no ambiente que são:
 - Íons cloreto: A penetração gradativa de íons cloreto (Cl⁻) provenientes de ambientes marinhos, em regiões próximas ao mar pela ação da névoa salina ou diretamente pela água salgada pelo respingo de maré, levam a despassivação das armaduras pela quebra do filme passivador que protege o aço. Na grande maioria dos casos, os mecanismos de transporte dos íons cloreto para o interior do concreto são a absorção capilar e a difusão iônica.
 - Carbonatação do concreto: A carbonatação é um fenômeno natural, que se caracteriza pela reação entre o gás carbônico do meio ambiente e o Ca(OH)₂ abundante na pasta de cimento endurecida. A redução do pH abaixo de 11 na região em que se encontra a armadura, quebra a película passivadora, expondo o aço a corrosão. (ADÃO; HEMERLY, 2010). O processo pode ser visualizado na figura 1 abaixo.

Figura 1 – Esquema simplificado de corrosão de armadura por carbonatação

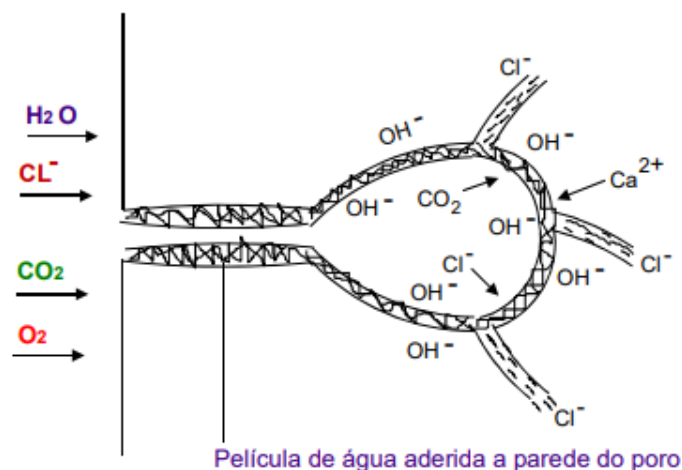


(fonte: (CORSINI, 2013))

- Presença simultânea de oxigênio e umidade no concreto: Após a despassivação a armadura está aberta à corrosão, entretanto, para que a mesma ocorra é necessário que existe condições favoráveis, isto é, a presença simultânea de oxigênio e umidade. Concretos armados com armaduras despassivada e que estejam submersos a taxa de corrosão é muito baixa, devido a falta de oxigênio. Da mesma maneira, os concretos armados com armaduras despassivadas em ambientes muito secos, as taxas de corrosão também são muito baixas, por falta de eletrólito.

Na figura 2, temos a representação esquemática da interação entre o concreto e o ambiente contaminado com seus agentes prejudiciais (Cl⁻ e CO₂) à durabilidade das armaduras.

Figura 2 - Representação esquemática da interação entre o concreto e o ambiente agressivo às armaduras



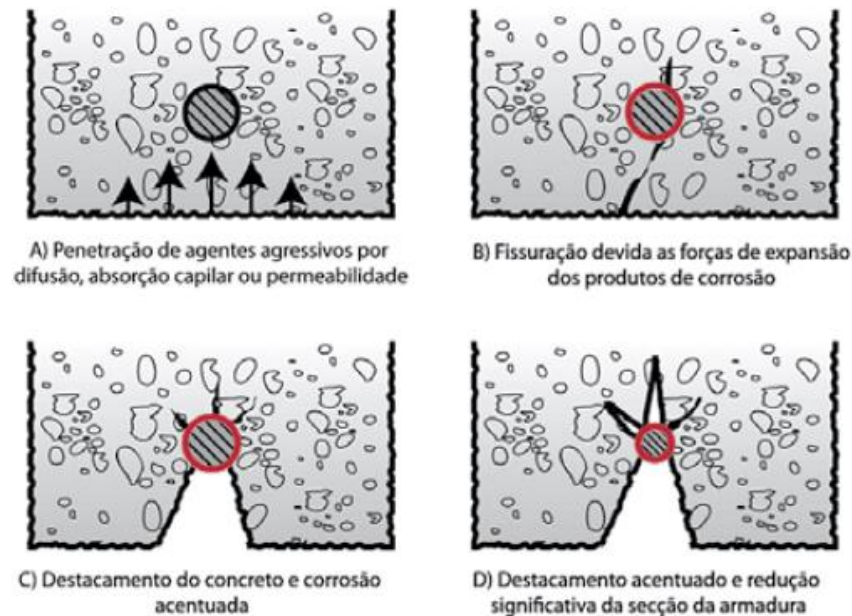
(fonte: (Nepomuceno, 1992))

O mecanismo de corrosão das armaduras é dividido em duas fases distintas: iniciação e propagação. Esses estágios estão interligados e ocorrem ao longo do tempo, conforme o processo de despassivação avança na estrutura de concreto.

- **Iniciação:** É o intervalo de tempo necessário para que ocorra a penetração de agentes naturais da despassivação (Cl^- , CO_2) através do cobrimento do concreto até que estes atinjam a armadura. Quando uma certa quantidade destes elementos chega até o nível das barras, eles provocam redução das condições de estabilidade química da película passivadora, sem a perda de funcionalidade da estrutura. No período de iniciação não existe corrosão das armaduras, podendo essa fase durar poucos anos ou décadas para chegar ao seu término, dependendo da permeabilidade do concreto, da concentração desses agentes no ambiente e de outros fatores. O intervalo de tempo que corresponde a fase de iniciação pode ser considerado o tempo de vida útil projeto de uma estrutura de concreto, sob o ponto de vista da corrosão das armaduras.
- **Propagação:** É o intervalo de tempo que se inicia após a fase de iniciação em que a estrutura está efetivamente em processo de corrosão. A cinética dessa corrosão vai depender essencialmente da presença simultânea de oxigênio e umidade. O processo corrosivo começa efetivamente a instalar-se, onde ocorre a dissolução do ferro (oxidação), gerando os chamados produtos de corrosão. A corrosão das armaduras gera a formação de óxidos de ferro, que exercem pressão sobre o concreto circundante, fissuração, destacamento do concreto, além da destruição das barras de aço, com redução gradativa de sua seção.

Na figura 3, observamos a representação esquemática do mecanismo de corrosão das armaduras do concreto, desde a iniciação, passando pela propagação até a deterioração da estrutura.

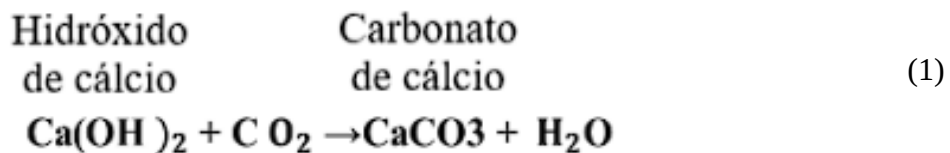
Figura 3 – Evolução esquemática da deterioração de estruturas de concreto por corrosão de armaduras



(fonte: HELENE; FIGUEIREDO (1986))

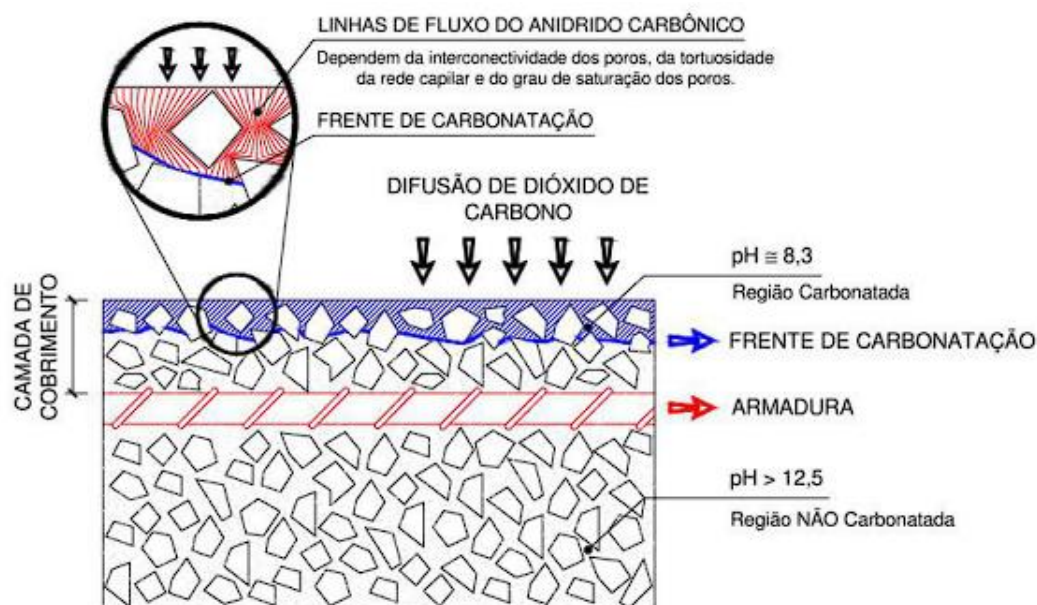
2.3 – Concreto Carbonatado

Tanto CASCUDO (1997) quanto HELENE (1986) afirmam que a alta alcalinidade do concreto, adquirida pela presença do Ca(OH)_2 , liberado nas reações de hidratação do cimento, é reduzida lentamente com o tempo devido à ação de gases ácidos presentes na atmosfera, como SO_2 e H_2S , e principalmente o CO_2 , que penetram no concreto por difusão. O CO_2 incorporado no concreto em reação com o Ca(OH)_2 forma o CaCO_3 . Este processo é denominado carbonatação e é retratado pela Equação (1) e pela Figura 4.



A Figura 4 demonstra um corte esquemático de uma estrutura de concreto que está carbonatando. A imagem mostra a reação entre o Ca(OH)_2 e CO_2 que dá origem ao CaCO_3 e H_2O , onde o carbonato resultante tem pH neutro, ou seja, reduz o pH para menor que 9 na região carbonatada.

Figura 4– Esquema representativo de carbonatação



(fonte: HOPPE FILHO (2008))

De acordo com CASCUDO (1997), existe uma frente de avanço da carbonatação do concreto, desde a parte mais externa até a mais interna, onde duas zonas apresentam pH muito diferentes; uma delas a um pH menor que 9 e outra zona de pH maior que 12, sendo estas resp*ctivamente as regiões carbonatadas e não carbonatadas. É importante que esta frente de carbonatação não atinja a armadura de modo a não despattivá-la.

A carbonatação não é um processo instantâneo, mas sim um processo que ocorre ao longo do tempo. As regiões mais carbonatadas são geralmente as mais expostas ao ambiente externo, onde o CO_2 é mais facilmente absorvido pela matriz de concreto. No entanto, a taxa de carbonatação pode variar dependendo de fatores como a permeabilidade do concreto, a concentração de CO_2 , a umidade e a temperatura.

2.4 – Realcalinização do Concreto

O princípio básico do processo de realcalinização do concreto é reestabelecer a alcalinidade, aumentar o pH do concreto carbonatado e assim obter a repassivação da armadura da estrutura de concreto armado com o uso de soluções alcalinas. Na literatura encontram-se três tipos de realcalinização, que serão discutidos nos tópicos a seguir, sendo a realcalinização

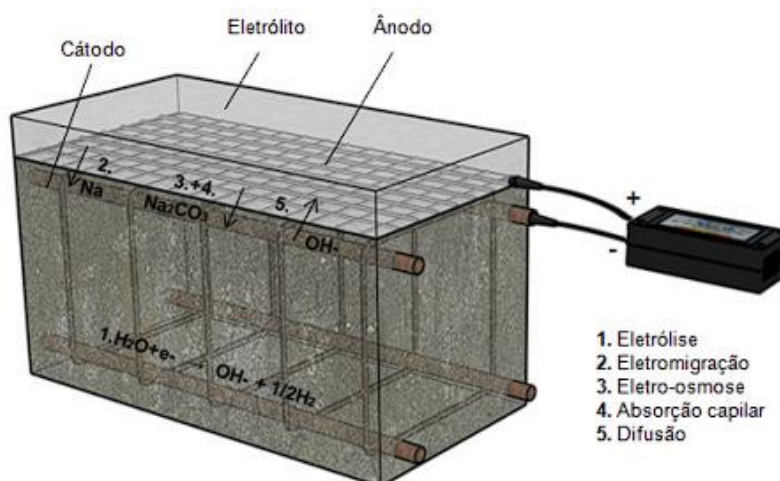
eletroquímica (RAE) e a realcalinização química (RAQ) os dois tipos mais comuns, além do terceiro tipo e menos usual, a realcalinização passiva (SÁ, 2006).

2.4.1 Realcalinização Eletroquímica (RAE)

A realcalinização eletroquímica é um método de recuperação eletroquímico que se aplica temporariamente sobre a estrutura de concreto armado visando restaurar suas propriedades originais em termos de pH da solução interna de poros. A técnica consiste em aplicar uma corrente elétrica contínua entre a armadura, cátodo (polo negativo), e uma malha metálica externa, ânodo (polo positivo), encapsulada num eletrólito (RIBEIRO *et al.*, 2014)

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 uma 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 5.

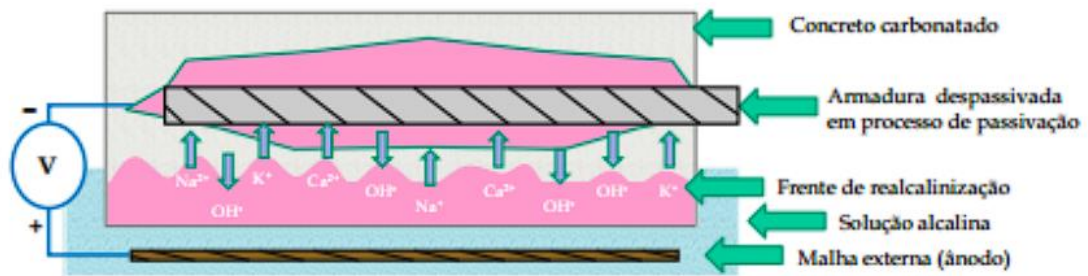
Figura 5 – Representação esquemática da realcalinização eletroquímica.



(fonte: REUS (2017) adaptado de YEIH e CHANG (2005))

A figura 6 ilustra o princípio da realcalinização eletroquímica, e a frente de realcalinização segundo ARAÚJO (2009).

Figura 6 - Ilustração do princípio de realcalização eletroquímica.



(fonte: ARAÚJO (2009). Adaptada ARAÚJO (2004))

É necessário um preparo no concreto antes do início da reabilitação, para que o mesmo não fissure e não permita a entrada de agentes agressivos (Cl⁻ e CO₂) que possam prejudicar a eficiência do método (SÁ, 2006).

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), onde são formados os íons hidroxila e moléculas de hidrogênio. Na região anódica (sistema temporário) ocorre a oxidação, conforme Equação (3)



Após a aplicação de corrente na armadura, essa se torna o cátodo e por eletrólise da água produz íons hidroxila e hidrogênio em sua superfície, causando o aumento de pH para valores acima de 13,5. A corrente aplicada faz com que esses íons se afastem da armadura, aumentando a zona de realcalinização. Os íons presentes na solução eletrolítica migram por eletrosmose para o interior do concreto, como mostrado na Figura 7. A quantidade de íons hidroxila produzida na interface aço/concreto depende da carga total e corrente aplicada, e da duração do tratamento (GONÇALVES *et al.*, 2003; RIBEIRO *et al.*, 2014).

Figura 7 – Evolução da realcalinização eletroquímica da estrutura de concreto armado ao longo do tratamento.



(fonte: Adaptado de BERTOLINI et al (2008))

A presença de cloretos em concretos carbonatados pode causar diminuição do fluxo eletrosmótico, pois os cloretos diminuem a espessura da dupla camada de moléculas de água na parede dos poros do concreto carbonatado. Concretos impregnados com película polimérica de base silano ou siloxano também sofre de diminuição do fluxo eletrosmótico, tendo como prováveis causas a quebra da continuidade da dupla camada de moléculas de água ligadas por forças elétricas logo na superfície do concreto e pelo fato do concreto estar protegido superficialmente, dificultando a movimentação iônica (EGGERS; OLIVEIRA, 1997).

A densidade de corrente utilizada nesse tratamento varia de 0,5 a 2,0 A/m² e a duração de aplicação das cargas varia de dias a semanas, dependendo das condições da estrutura, como: profundidade de carbonatação, espessura de cobrimento, qualidade do concreto, geometria das armaduras e; dos valores operacionais, como: densidade e distribuição de corrente. A densidade de carga total requerida para o tratamento é na ordem de 40 a 200 A.h/m² (RIBEIRO *et al.*, 2014).

BERTOLINI *et al.* (2004) diz que por conhecimentos empíricos o fim do tratamento é determinado quando a densidade de carga total passada atinge valores entre 200 e 41 450 Ah/m², o que equivale a um tratamento de 8 a 18 dias com uma densidade de carga de 1 A/m². A carga total passada está relacionada com a qualidade da realcalinização, mas não garante a repassivação da armadura.

O final do tratamento também pode ser determinado medindo o pH de corpos de prova com solução alcoólica de fenolftaleína, esses corpos de prova devem ser retirados de áreas representativas (BERTOLINI, L.; *et al.*, 2004; ARAÚJO, 2009; RIBEIRO *et al.*, 2014). A fenolftaleína muda de coloração ao atingir pH superior a 9, porém pH ligeiramente superior a

9 não passiva a armadura. Portanto a timolftaleína seria mais recomendada por indicar pH superior a 10 (BERTOLINI, L.; *et al.*, 2004).

A aplicação de técnicas eletroquímicas pode trazer efeitos secundários não desejáveis e até perigosos à estrutura, sendo esses a fragilização por hidrogênio, a reação álcali-agregado e a perda de aderência. Em casos de estruturas com armaduras de alta resistência (protendidas ou pós-tensionadas) as técnicas eletroquímicas não podem ser utilizadas, pois as altas densidades de corrente acarretam no desprendimento de hidrogênio na superfície da armadura e causam fragilização por hidrogênio.

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. A coexistência de diferentes mecanismos de fragilização por hidrogênio e seus efeitos simultâneos no aço, ainda não estão bem documentadas (KOYAMA *et al.*, 2014).

A redução da aderência entre a armadura e o concreto ocorre devido à 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

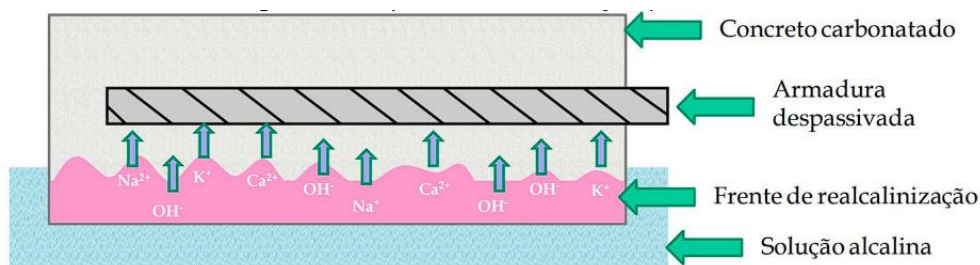
ocorrer devido ao substrato úmido gerado pela realcalinização e aos cristais formados na superfície do concreto.

2.4.2 Realcalinização Química (RAQ)

A realcalinização química busca elevar o pH do concreto carbonatado, por absorção e difusão de soluções alcalinas, sem uso de corrente elétrica. Ocorre através dos capilares dos poros do concreto, a solução é absorvida por ação de forças hidráulicas. Os álcalis da solução reagem com os produtos presentes na solução dos poros do concreto formando produtos que propiciam a elevação do pH e a fixação dos álcalis em seu interior até atingir a armadura e repassivá-la. Na realcalinização eletroquímica utiliza-se corrente elétrica para realizar a eletrólise da água e consequentemente produzir OH^- na superfície do aço e transportar os íons alcalinos por eletromigração e eletrosmose para o interior dos poros do concreto.

Pela Figura 8 é possível observar como ocorre a realcalinização química, os íons alcalinos penetrando o concreto carbonatado por capilaridade até chegar a armadura, momento em que pode-se encerrar o tratamento.

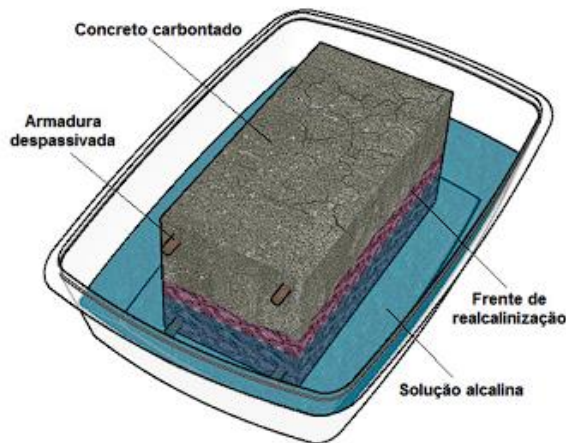
Figura 8 – Esquema de realcalinização química.



(fonte: ARAUJO (2004)).

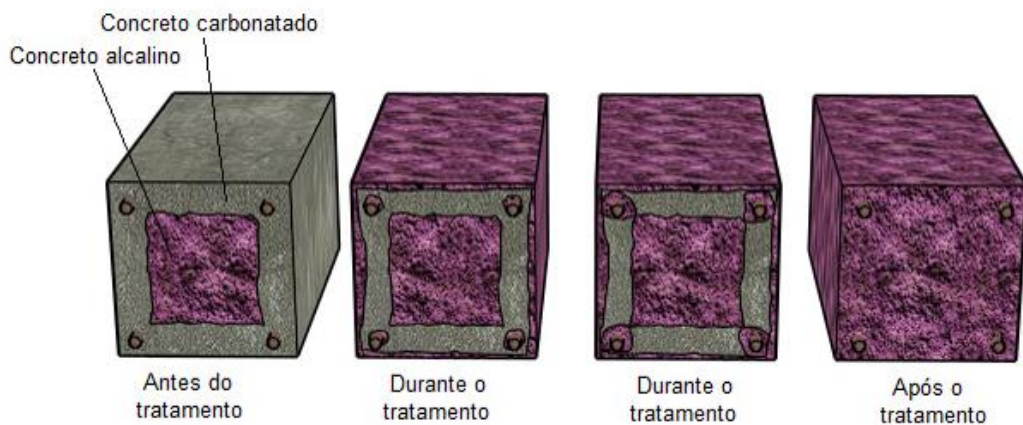
A Figura 9 mostra o funcionamento da realcalinização química em condições de laboratório. Ao contrário da realcalinização eletroquímica, esta técnica não necessita de campo elétrico no seu emprego. Na realcalinização química, a elevação do pH do concreto ocorre de fora para dentro, como é possível observar na Figura 10.

Figura 9 – Esquema de realcalinização química



(fonte: REUS (2017), adaptado de (ARAUJO, 2009)).

Figura 10 – Evolução da realcalinização química ao longo do tempo.



(fonte: REUS (2017)).

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, Ca(OH)_2 , Na_2CO_3 e solução tripla contendo NaOH, KOH e Na_2CO_3 .

A Tabela 1 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.

Tabela 1 – 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: REUS (2017)).

Como é possível observar na Tabela 1, ARAUJO (2004) e SÁ (2006) utilizaram Na₂CO₃, KOH e a solução tripla, já MOREIRA (2006) utilizou apenas a solução tripla, sendo que este autor também empregou um gel, composto pelos mesmos elementos alcalinos. ARAUJO (2009) utilizou as Na₂CO₃ e KOH, e também preparou uma solução que não havia sido empregada anteriormente, a solução de Ca(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.

Os resultados obtidos pelos autores variaram de acordo com a espessura do cobrimento carbonatado. O resumo das características dos corpos de prova e os resultados obtidos são apresentados na Tabela 2.

Tabela 2 – 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;

ARAÚJO (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: REUS (2017)).

O tempo de realcalinização variou de 1 semana para a solução tripla para o cobrimento 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 cobrimento de 25 mm e relação água/cimento de 0,50.

Alguns pesquisadores testaram também a realcalinização química em estruturas de tamanho real. ARAÚJO (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 Na_2CO_3 utilizada esteve em contato direto com a superfície do pilar. A Figura 11 mostra a aplicação da solução in loco.

Figura 11 – Pilar envolto pela cinta de borracha com solução alcalina em seu interior.



(fonte: ARAUJO (2004)).

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 Na_2CO_3 , KOH e $\text{Ca}(\text{OH})_2$. 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 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 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. A Figura 12 mostra a aplicação da solução in loco.

Figura 12 – Gel aplicado em estrutura de tamanho real



(fonte: MOREIRA (2006)).

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.

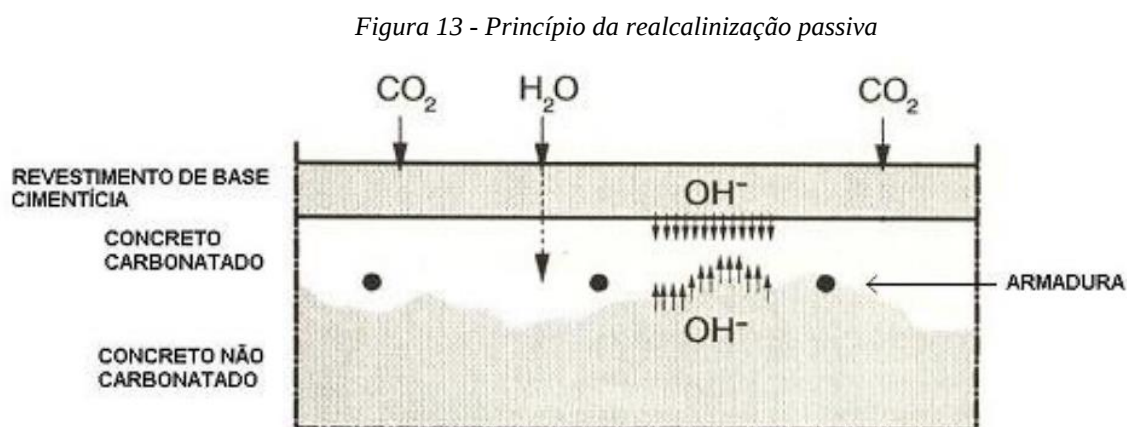
2.4.3 Realcalinização Passiva

Esse tipo de realcalinização segue o mesmo princípio da RAQ, porém com maneira de aplicação diferente.

A realcalinização passiva ocorre pelo processo de difusão, ou gradiente de concentração, através da aplicação de um revestimento cimentício na superfície do concreto carbonatado. Os íons alcalinos dessa capa se direcionam para o interior do concreto realcalinizando-o até a atingir a armadura (MATTILA E PENTTI (1996) apud SÁ (2006)).

A realcalinização passiva consiste na aplicação de um revestimento cimentício úmido rico em álcalis sobre a estrutura de concreto armado e, devido a grande diferença de concentração de álcalis entre o revestimento e o interior do concreto, faz com que esses migrem por difusão para o interior do concreto (HELENE, 2008).

A figura 13 ilustra a frente de realcalinização passivo no concreto, mostrando a capa de base cimentícia responsável pelo processo.



(fonte: MATTILA e PENTTI (1996) apud SÁ (2006))

No entanto, a técnica de realcalinização passiva apresenta algumas desvantagens, quando comparada a outros métodos de realcalinização, pois trata-se de uma técnica que requer um período longo de tempo para ser concluído, cerca de dois anos, além disso, sua eficácia é garantida apenas para profundidades de até 2 cm (GROCHOSKI e HELENE, 2008).

A eficiência desse método depende da porosidade do concreto, e do tempo de umidificação na capa cimentícia. É um processo lento e acabou sendo abandonado pelos pesquisadores após o início do uso da corrente elétrica na realcalinização eletroquímica (SÁ, 2006).

3 MATERIAIS E MÉTODOS

3.1 – Corpos de provas

Os corpos de provas utilizados neste estudo, foram provenientes da extração de testemunhos de um mesmo local, retirado de uma única laje da cobertura, de uma antiga estrutura fabril, construção essa com cerca de 60 anos. Foram extraídos 13 testemunhos para o estudo, devido a limitação da construção, e dos 13 foram utilizados 10 testemunhos, pois três deles não estavam adequados para ser utilizados nos ensaios, pois já estavam com algumas fraturas e com armação exposta que dificultava na retificação dos mesmos.

Figura 14 – Testemunhos extraídos



(fonte: Autor)

Para a realização do estudo os dez testemunhos foram distribuídos da seguinte forma:

- Dois testemunhos foram utilizados para os ensaios de absorção, resistência à compressão e verificação da profundidade de carbonatação, antes do uso da solução realcalinizadora;
- Três testemunhos foram utilizados para o método de aplicação por Trincha, passando pelos ensaios de absorção, resistência à compressão e verificação da profundidade de realcalinização;

- Três testemunhos foram utilizados para o método de aplicação por Spray, passando também pelos ensaios de absorção, resistência à compressão e verificação da profundidade de realcalinização;
- Dois testemunhos foram utilizados para o método de aplicação por manta, passando também pelos ensaios de absorção, resistência à compressão e verificação da profundidade de realcalinização;

3.2 – Solução alcalina

Foi utilizado uma solução de Hidróxido de Potássio (KOH) para o processo de realcalinização. Ela é uma solução rica em álcalis, desenvolvida para a realcalinização de concretos carbonatados, por absorção e difusão capilar. Com as seguintes características apresentada pelo fabricante:

Figura 15 – Embalagem do produto utilizado.



(fonte: Autor)

Figura 16 – Características da solução alcalina.

Dados Técnicos			
Característica	Unidade	Valor	Observações
Densidade	g/cm ³	1,02	
Consumo, por demão	ml/m ²	150	necessário 5 demãos
Intervalo entre demãos	minutos	30	
pH		11 a 12	
Características			
Tipo de produto	Realcalinizador de concreto		
Base	Eletrólitos alcalinos		
Estado	Líquido		

(fonte: Autor)

3.3 – Medição da carbonatação

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.

Para verificar a profundidade de carbonatação dos corpos de prova, eles foram fraturados, limpos com um pincel e a solução indicadora de pH foi aspergida na superfície recém fraturada da amostra. Após aspergir a fenolftaleína, foi verificado que não houve reação, isso indica que a seção do testemunho estava totalmente carbonatado, o CO₂ já penetrou profundamente dentro do concreto.

Figura 17 – Corpo de prova fraturado para a medição de carbonatação.



(fonte: Autor)

Foram conduzidos ensaios de resistência à compressão, conforme a norma ABNT NBR 5739 de 2007, e de absorção de água, de acordo com a ABNT NBR 9778 de 2005, a fim de avaliar possíveis alterações nessas propriedades do concreto. Essas análises foram realizadas uma vez que a resistência à compressão do concreto é uma das características fundamentais desse material, que não deve sofrer modificações substanciais após passar por tratamentos destinados a aprimorar sua durabilidade, como é o caso da realcalinização.

3.4 – Ensaio de absorção

Os ensaios de absorção foram realizados em duas etapas: antes da realcalinização e após a realcalinização. Os testemunhos foram colocados em ambiente seco, protegidos das intempéries do tempo, onde permaneceram por três dias. Após os três dias, foram identificados, pesados e colocados em submersão com água para que não houvesse interferência na carbonatação ou realcalinização já realizados. Permaneceram por três dias em submersão, conforme Figura 18.

Figura 18 - Corpo de prova em imersão



(fonte: Autor)

Decorridos os três dias, os testemunhos tiveram suas superfícies secas para retirar o excesso de água e em seguida foram pesados novamente. Para obtenção do percentual de absorção foi utilizado a Equação 4.

$$Abs\% = \frac{(Msaturada - Mseca)}{Mseca} \quad (4)$$

Abs – Absorção de água

Msaturada – Massa específica da amostra saturada

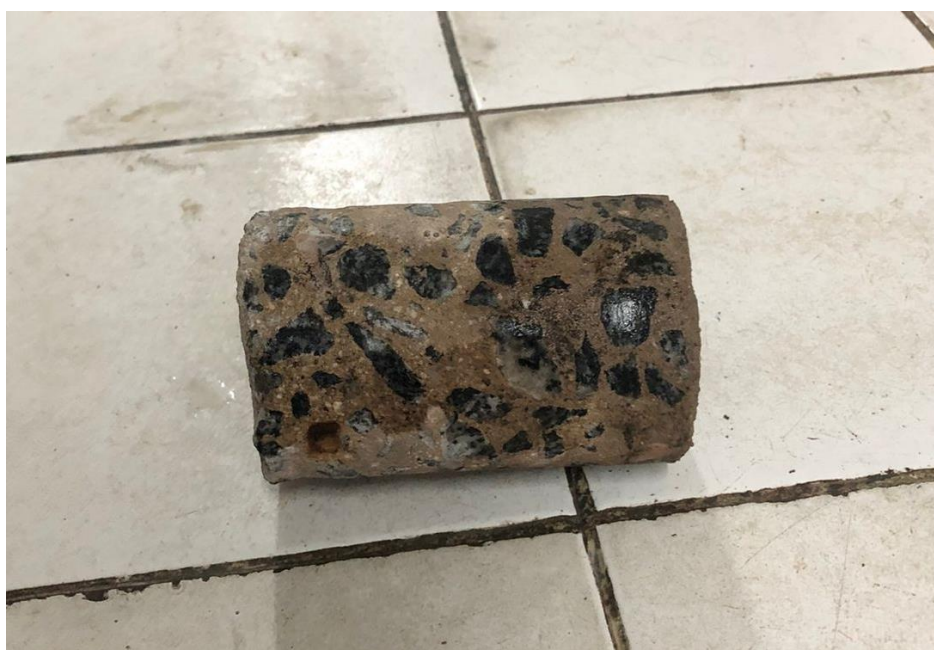
Mseca – Massa específica da amostra seca

3.5 – Ensaio de resistência à compressão

Os ensaios foram realizados em laboratório, de acordo com a NBR 5739 (ABNT, 2007), antes dos rompimentos dos corpos de prova, foi realizado a retificação dos testemunhos cilíndricos de dimensão 7 x 10 cm. Os ensaios de resistência à compressão foram realizados antes e após a realcalinização das amostras.

As Figura 19 e 20 mostram o corpo de prova retificado e o ensaio de resistência à compressão, respectivamente.

Figura 19 – Corpo de prova após retificação



(fonte: Autor)

Figura 20 - Ensaio de resistência à compressão



(fonte: Autor)

3.6 – Métodos de aplicação das soluções alcalinas nas amostras

Foram adotados três métodos de aplicação distintos no estudo. O primeiro método, foi a aplicação por manta, ao qual os corpos de prova foram envolvidos em uma manta feita inteiramente de polietileno tereftalato (PET) reciclado, um material resistente à ação alcalina, para garantir que essa manta não iria se deteriorar. Essa manta é comumente empregada em sistemas de drenagem. Ela foi mergulhada na solução alcalina e durante a aplicação em laboratório, as amostras foram envolvidas com a manta e cobertas com filme plástico, e deixado em ambiente seco por 30 dias, para evitar a evaporação do produto, conforme ilustrado na Figura 21.

Os métodos de aplicação por spray e por trincha apresentado nas Figuras 22 e 23, respectivamente, seguiram as instruções de aplicação do produto fornecidas pelo fabricante, e também foram deixados em ambiente seco. Em ambos os casos, foram aplicadas cinco demãos do produto, com um intervalo de 30 minutos entre cada aplicação. Antes da aplicação da solução, as superfícies de cada amostra foram limpas e secas.

Figura 21 – Método envolvimento das amostras em manta embebida com solução alcalina.



(fonte: Autor)

Figura 22 – Método de aplicação de solução alcalina com spray.



(fonte: Autor)

Figura 23 – Método de aplicação de solução alcalina com trincha.



(fonte: Autor)

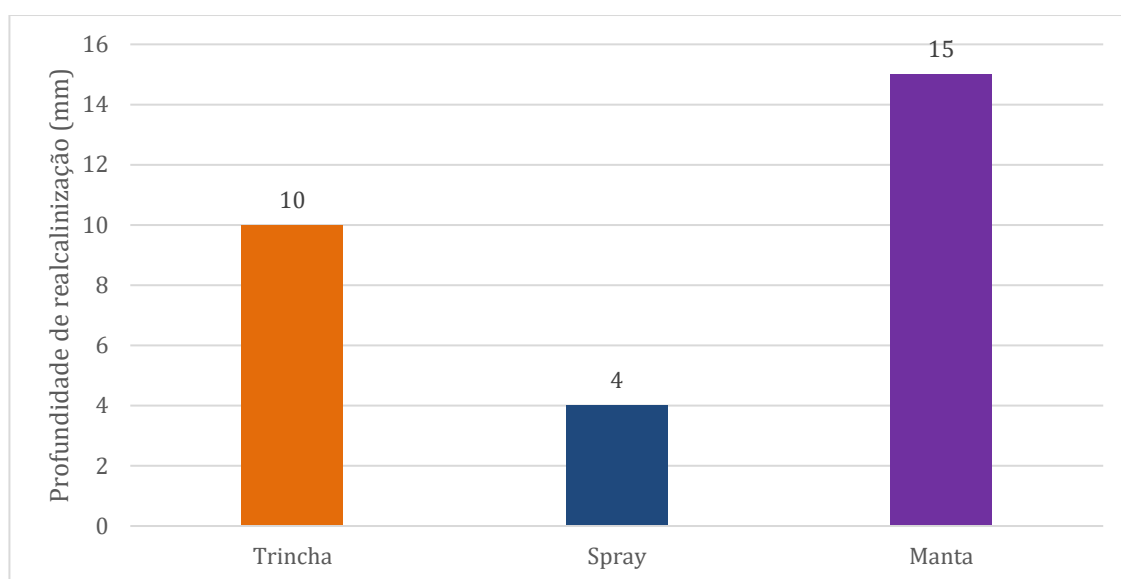
É importante ressaltar a necessidade do uso de equipamento de proteção individual (EPIs), visto que os produtos aplicados são de elevada alcalinidade, ou seja, são produtos corrosivos.

4 RESULTADOS E DISCUSSÃO

4.1 – Efetividade da realcalinização

Após 30 dias da aplicação do realcalinizador, os corpos de prova foram submetidos a análise da frente de realcalinização. A Figura 24 apresenta as profundidades de realcalinização obtidas após o tratamento com solução alcalina utilizando os métodos de manta, spray e trincha.

Figura 24 - Profundidade de realcalinização das amostras



(fonte: Autor)

O resultado mostra que o método de aplicação por spray, recomendado pelo fabricante, para a solução comercial foi menos eficaz neste estudo, uma vez que resultou em uma profundidade de realcalinização reduzida (4 mm) e apenas em uma área específica, como ilustrado na Figura 25.

Figura 25 - Final do tratamento de realcalinização método de spray



(fonte: Autor)

No segundo método proposto pelo fabricante (trincha), apresentou um resultado mais satisfatório, para esse estudo, comparado ao método de spray, chegando alcançar em certos pontos 10mm de profundidade, porém vale ressaltar que esses pontos possuíam algumas fissuras na amostra que podem ter facilitado a penetração do produto, como podemos ver na Figura 26.

Figura 26 - Final do tratamento de realcalinização método de trincha.



(fonte: Autor)

Na aplicação contínua (manta), houve um resultado mais satisfatório comparado ao método de trincha, visto que ocorreu uma maior profundidade de realcalinização (15mm), quase uniforme em todo o corpo de prova, como vemos na Figura 27.

Figura 27 - Final do tratamento de realcalinização método de manta.

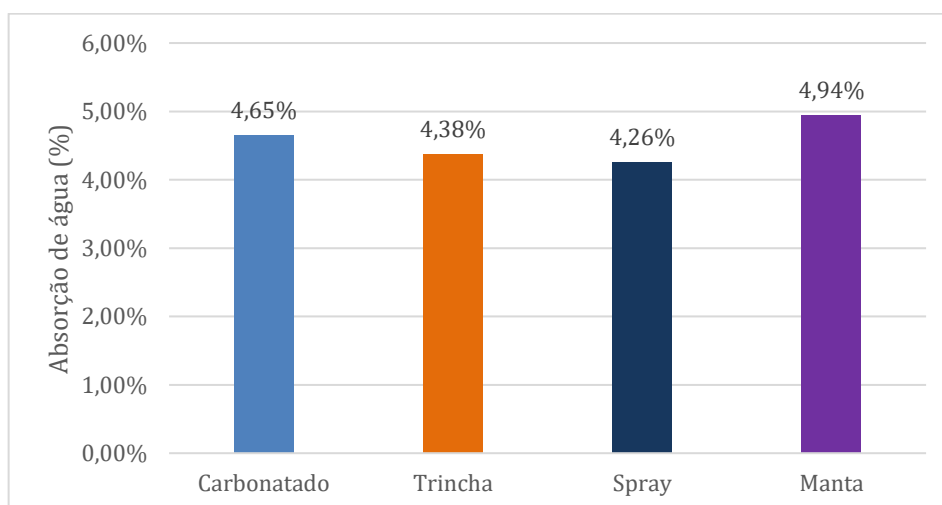


(fonte: Autor)

4.2 – Absorção

Os resultados dos ensaios de absorção estão expressos na Figura 28.

Figura 28 - Absorção de água das amostras



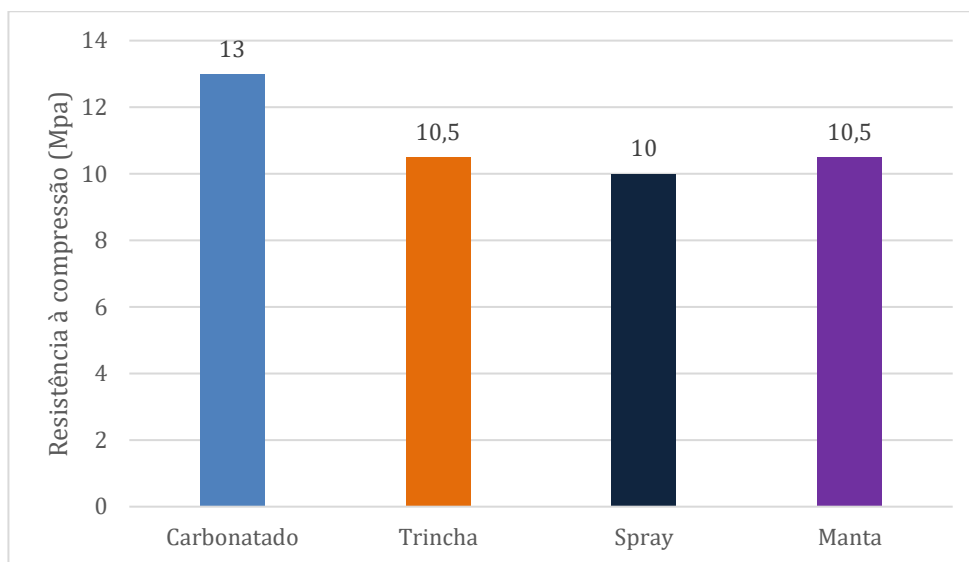
(fonte: Autor)

Os resultados indicam que não houve alterações significativas nos resultados entre antes e depois do procedimento de realcalinização.

4.3 – Resistência à compressão

Os valores de resistência à compressão anterior a realcalinização não apresentou alterações significativas, ressaltando que algumas amostras rompidas depois da realcalinização apresentavam pequenas fissuras devido sua extração. Os resultados dos ensaios de resistência à compressão estão expressos na Figura 29.

Figura 29 – Resistência à compressão das amostras



(fonte: Autor)

O resultado mostra ausência de mudanças significativas tanto na resistência à compressão quanto na capacidade de absorção do concreto sugere que a microestrutura do concreto tratado não sofreu alterações relevantes, mas vale ressaltar que a quantidade de amostra foi muito pequena.

5 CONCLUSÕES

5.1 – Considerações finais

Foi possível avaliar a eficácia da solução alcalina e dos métodos de aplicação com base no avanço da frente de realcalinização nos corpos de prova. Notou-se que os métodos recomendados pelo fabricante da solução comercial, ou seja, os métodos de aplicação por spray e por trincha, não proporcionaram profundidades de realcalinização capazes de assegurar a plena recuperação das estruturas de concreto carbonatadas, neste trabalho analisado.

No entanto, com o método de aplicação por manta, a solução comercial demonstrou uma boa eficácia na realcalinização de concretos carbonatados em comparação com os métodos sugeridos pelo fabricante, para as amostras estudadas. É importante destacar que o concreto utilizado tinha mais de 50 anos, com baixa resistência à compressão e alta permeabilidade, o que pode ter favorecido a obtenção da profundidade de realcalinização alcançada.

5.2 – Limitações do Trabalho

A limitação do trabalho foi a utilização de um único concreto com mais de 50 anos, que demonstrou ser um concreto muito “pobre”, tendo uma baixíssima resistência a compressão e uma elevada permeabilidade, que hoje em dia esse concreto não é mais classificado como um concreto estrutural.

E também, pela baixa quantidade de amostras disponíveis para o estudo deste trabalho, limitando assim uma melhor avaliação.

5.3 – Trabalhos futuros

Para trabalhos futuros se sugere refazer os ensaios feito neste trabalho utilizando corpos de prova moldados em laboratório com diferentes tipos de resistências (20, 30 e 40 Mpa, por exemplo) possuindo um maior controle e dados dos materiais usados, e utilizando uma câmara de carbonatação, para melhor avaliar o desempenho das amostras. Pode-se afirmar que os métodos de spray e trincha não seriam eficazes, já que em um concreto de baixa resistência e elevada permeabilidade, demonstrou não ser eficaz.

O ponto futuro a ser sugerido, é o estudo do método alternativo da aplicação por manta, nos concretos de resistências variáveis (20, 30 e 40 Mpa, por exemplo), pois é possível que um concreto de menor permeabilidade e maior resistência, comparado ao do estudo deste trabalho, esse método não apresente resultados satisfatórios.

6 REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ABNT NBR 5739. **Associação Brasileira de Normas Técnicas - Concreto - Ensaio de compressão de corpos de prova cilíndricos.**

_____. NBR 6118. **Associação Brasileira de Normas Técnicas - Projeto de estruturas de concreto - Procedimento.**

_____. NBR 9778. **Associação Brasileira de Normas Técnicas - Argamassa e concreto endurecidos - Determinação da absorção de água, índice de vazios e massa específica.**

ADÃO, Francisco Xavier; HEMERLY, Adriano Chequetto. **Concreto armado: Novo milênio: Cálculo prático e econômico.** 2. ed. São Paulo: Interciência, 2010.

ARAUJO, F. W. C. De. **Contribuição à viabilização da técnica de realcalinização do concreto carbonatado através da absorção/difusão de soluções alcalinas.** Dissertação (Mestrado) - Curso de Mestrado em Engenharia Civil, Universidade Federal de Goiás, Goiânia.

_____. **Estudo da Repassivação da Armadura em Concretos Carbonatados Através da Técnica de Realcalinização Química.** Tese de Doutorado – Universidade de São Paulo, 2009.

BATTAGIN, A. F. **Cuidados ao construir em áreas litorâneas | PORTAL ABCP.** Disponível em: <<https://abcp.org.br/cuidados-ao-construir-em-areas-litoraneas/>>.

BERTOLINI, L.; *et al.* **Corrosion of steel in concrete: prevention, diagnosis, repair.** [S.l.]: Weinheim: WILEY-VCH, 2004. p. 392.

_____; CARSANA, M.; REDAELLI, E. **Conservation of historical reinforced concrete structures damaged by carbonation induced corrosion by means of electrochemical realkalisation.** Journal of Cultural Heritage, Milão.

CASCUDO, O. **O CONTROLE DA CORROSAO DE ARMADURAS EM CONCRETO: INSPEÇÃO E TECNICAS ELETROQUIMICAS.** 1º ed. Goiânia - GO: Editora UFG, 1997.

CORSINI, R. **Ambientes agressivos.** 3. ed. São Paulo: Téchné, 2013.

DJUKIC, M. B. . *et al.* **Hydrogen damage of steels: A case study and hydrogen embrittlement model.** Engineering Failure Analysis, v. 58, p. 485–498.

EGGERS, M. .; OLIVEIRA, P. S. F. **Novas técnicas eletroquímicas de recuperação de estruturas de concreto: realcalinização e dessalinização (extração de cloretos)**. IV Congresso Iberoamericano de Patologia das Construções, 1997.

GENTIL, Vincente. **Corrosão**. 5ª ed. Rio de Janeiro. Ed. LTC, 2007.

GONÇALVES, A. .; ANDRADE, C. .; CASTELLOTE, M. **Procedimientos de reparación de armaduras. In: Manual de rehabilitación de estructuras de hormigón: reparación, refuerzo y protección**. CYTED – XV-F. 2003, Cap. 7, p. 338-376.

GROCHOSKI, M.; HELENE, P. **Sistemas de reparo para estruturas de concreto com corrosão de armaduras**. Boletim Técnico da Escola Politécnica da USP, São Paulo, p. 21, 2008.

HELENE, P. R. L. **Manual para diagnostico de obras deterioradas por corrosao de armaduras**. São Paulo: PINI, 1992.

_____; FIGUEIREDO, A. **Corrosão de armaduras para concreto armado**. v. 71 ed. São Paulo: PINI, 1986.

HOPPE FILHO, J. **Sistemas cimento, cinza volante e cal hidratada: mecanismo de hidratação, microestrutura e carbonatação de concreto**. Universidade de São Paulo, 2008.

KOYAMA, M. . *et al.* **Hydrogen-assisted decohesion and localized plasticity in dual-phase steel**. Acta Materialia, v. 70, p. 174–187.

MOREIRA, L. C. **Realcalinização de estruturas de concreto carbonatado com utilização de gel saturado de solução alcalina**. Dissertação (mestrado) — Universidade Federal de Goiás.

NEPOMUCENO, A.A. Comportamiento de morteros de reparacion frente a la carbonatación y la penetracion de cloruros en estructuras de hormigon armado dañadas por corrosion de armaduras. Estudio mediante la resistencia de polarizacion. 1992. 371p. Tese (Doutorado) - Universid Politecnica de Madrid, Instituto de Ciencias de la Construccion “Eduardo Torroja”- CSIC. Madrid.

POSSAN, E. **Modelagem da carbonatação e previsão de vida útil de estruturas de concreto em ambiente urbano**. TESE (Doutorado em Engenharia Civil): Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2010.

REUS, G. C. **REALCALINIZAÇÃO QUÍMICA COMO MEIO DE**

RECUPERAÇÃO DE ESTRUTURAS DE CONCRETO ARMADO CARBONATADAS.

Dissertação de Mestrado, Universidade Federal do Paraná, 2017.

RIBEIRO, D. V. . *et al.* **Corrosão em Estruturas de Concreto Armado - Teoria, Controle e Métodos de Análise.** Editora Campos, 2014.

SÁ, R. R. De. **Influência da realcalinização por meio da absorção/difusão de soluções alcalinas na resistência à compressão do concreto, na aderência de tintas e vernizes e na repassivação da armadura.** Dissertação de Mestrado – Universidade Federal de Goiás – Goiânia, 2006.

VASCONCELOS, A. C. **O concreto no Brasil - Recordes, Realizações, História.** v. 1; 2ª ed. São Paulo: Ed. PINI, 1985.

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.