

UNIVERSIDADE TECNOLÓGICA FEDERAL DO PARANÁ
DEPARTAMENTO ACADÊMICO DE CONSTRUÇÃO CIVIL
CURSO DE ENGENHARIA CIVIL

PATRÍCIA PERIN
RODOLPHO MANTOVANI

**CONTRIBUIÇÃO AO ESTUDO DA REALCALINIZAÇÃO QUÍMICA EM
CONCRETO CONVENCIONAL**

TRABALHO DE CONCLUSÃO DE CURSO

CURITIBA
2017

PATRÍCIA PERIN
RODOLPHO MANTOVANI

**CONTRIBUIÇÃO AO ESTUDO DA REALCALINIZAÇÃO QUÍMICA EM
CONCRETO CONVENCIONAL**

Trabalho de Conclusão de curso apresentado como requisito parcial à obtenção do título de Bacharel em Engenharia Civil, do Departamento Acadêmico de Construção Civil da Universidade Tecnológica Federal do Paraná.

Orientador: Prof. Dr. Wellington Mazer

CURITIBA
2017

FOLHA DE APROVAÇÃO

CONTRIBUIÇÃO AO ESTUDO DA REALCALINIZAÇÃO QUÍMICA EM CONCRETO CONVENCIONAL

Por

**PATRICIA PERIN
RODOLPHO MANTOVANI**

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado ao Curso de Engenharia Civil da Universidade Tecnológica Federal do Paraná, defendido no segundo semestre de 2017 e aprovado pela seguinte banca de avaliação:

Orientador – Dr. Wellington Mazer
UTFPR

Prof. Dr. Adauto Lima
UTFPR

Prof. Dr. Arthur Medeiros
UTFPR

OBS.: O documento assinado encontra-se em posse da coordenação do curso.

AGRADECIMENTOS

A Deus, que nos deu sabedoria e discernimento para chegarmos até o fim neste trabalho.

Aos nossos pais, que incentivaram, apoiaram e acompanharam cada passo que demos na graduação.

Aos nossos amigos, em especial João Leonardo Berdú, Ricardo Feix Mello e Walter Nogueira, que das mais diversas maneiras nos ajudaram a concluir este trabalho.

Ao nosso orientador, que além de provedor dos materiais necessários pra nossos ensaios, sempre esteve disponível, paciente e nos apoiou em todos os momentos.

RESUMO

PERIN, Patrícia; MANTOVANI, Rodolpho. Contribuição ao estudo da realcalinização química em concreto convencional. 2017. 57 f. Trabalho de Conclusão de Curso (Bacharelado em Engenharia Civil), Universidade Tecnológica Federal do Paraná. Curitiba, 2005.

Este Trabalho de Conclusão de Curso busca contribuir na busca de alternativas para tratamento de concretos carbonatados, tendo em foco a realcalinização química aplicada de duas maneiras distintas. O objetivo principal é analisar a eficácia de diferentes soluções alcalinas com métodos diferentes de aplicação. Foram utilizados corpos de prova cilíndricos de concreto de 10x20 centímetros. Após a carbonatação dos corpos de prova, o ensaio de realcalinização foi realizado com filtros umedecidos de soluções de Na_2OH_3 , KOH, NaOH e Barrilha Leve 5% com e sem o uso de filmes plásticos protetores, em dois ciclos de sete dias, avaliando a cada etapa de carbonatação e da realcalinização a alteração da resistência axial e da absorção do concreto, bem como a efetividade da carbonatação e da realcalinização através da aspersão de fenolftaleína na superfície dos corpos de prova. A análise teve como resultado a barrilha leve como melhor solução realcalinizadora, além de apresentar o melhor custo benefício.

Palavras-chave: Realcalinização química. Carbonatação. Manifestações patológicas do concreto.

ABSTRACT

PERIN, Patrícia; MANTOVANI, Rodolpho. Contribution to the study of chemical realkalisation in conventional concrete. 2017. 57 f. Trabalho de Conclusão de Curso (Bacharelado em Engenharia Civil), Universidade Tecnológica Federal do Paraná. Curitiba, 2005.

This Work seeks to contribute in the search of alternatives for the treatment of carbonated concretes, having its focus on applying chemical realkalisation in two different ways. The main goal is to analyze the effectiveness of different alkaline solutions using distinct application methods. It was used cylindrical concrete samples measuring 10x20 cm in this test. After carbonating the test samples, the realkalisation trial was carried out using foam layers soaked with solutions of Na_2OH_3 , KOH, NaOH and Light Barrique 5%, with and without the use of protective plastic films, in two cycles of seven days, assessing in every carbonation and realkalisation stage the alteration in axial resistance and concrete absorption, as well as the effectiveness of those two processes by means of sprinkling phenolphthalein on the test samples' surface. The analysis resulted in Light Barrique being the best realkalisation solution, presenting also the best cost-benefit.

Keywords: Chemical realkalisation. Carbonation. Pathological manifestations of concrete.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 - Célula de Corrosão em concreto armado	16
Figura 2 - Diagrama de Pourbaix ou Diagrama de equilíbrio termodinâmico. Potencial x pH para o sistema Fe – H ₂ O a 25°C, delimitando os domínios prováveis de corrosão, passivação e imunidade.	18
Figura 3 – Representação esquemática do processo de carbonatação.....	19
Figura 4 – Evolução da velocidade de carbonatação em função da umidade relativa do concreto, na ausência de água de molhagem.....	21
Figura 5 – Influência da relação a/c sobre a profundidade de carbonatação,	21
Figura 6 - Evolução da RAQ no concreto carbonatado	24
Figura 7 – Detalhe dos corpos de prova prismáticos	25
Figura 8 - Avanço da realcalinização em corpos de prova carbonatados.	25
Figura 9 - Corpos de prova após 9 semanas de tratamento (RAQ) aspergidos com fenolftaleína.....	26
Figura 10 - Profundidade da realcalinização com 9 semanas de tratamento.....	26
Figura 11 - Ilustração do princípio de realcalinização eletroquímica.....	27
Figura 12 - Evolução ao longo do tempo da aplicação da realcalinização eletroquímica.....	28
Figura 13 - Princípio da realcalinização passiva	28
Figura 14: Hidróxido de Potássio 0,1 N.....	34
Figura 15: Carbonato de Sódio 0,1 N.....	34
Figura 16: Hidróxido de Sódio.....	34
Figura 17: Barrilha leve	35
Figura 18: Câmara de carbonatação aberta com os corpos de prova antes do início do processo.....	35
Figura 19: Corpos de prova com superfícies aspergida com fenolftaleína após 10 dias na câmara de carbonatação	36
Figura 20: Realcalinização dos corpos de prova carbonatados	37
Figura 21: Corpos de prova após aspersão de fenolftaleína com uma semana após realcalinização.....	38
Figura 22: Corpo de prova após aspersão de fenolftaleína com duas semanas de realcalinização, com ruptura diametral.....	38
Figura 23: Corpos de prova em imersão	39
Figura 24: Pesagem dos corpos de prova.....	40
Figura 25: Ensaio de resistência à compressão axial	40
Figura 26: Ensaio de resistência à compressão diametral	41
Figura 27: Corpos de prova após segunda semana de carbonatação	42
Figura 28: Corpos de prova submetidos à compressão diametral e com asperção de fenolftaleína após segunda semana de carbonatação	43
Figura 29: Realcalinização superficial dos corpos de prova após 14 dias	44
Figura 30: Corpos de prova após a retirada dos feltros	45
Figura 31: Corpos de prova rompidos diametralmente após 2 semanas de realcalinização.....	45

LISTA DE QUADROS

Quadro 1: Caracterização de agregado miúdo.....	30
Quadro 2: Caracterização de agregado graúdo	31
Quadro 3: Traço do concreto.....	32
Quadro 4: Lista de CP's e data das concretagens	33
Quadro 5: Custo e quantidade de soluções alcalinas	33
Quadro 6: Absorção dos corpos de prova pós cura	46
Quadro 7: Absorção dos corpos de prova pós carbonatação	46
Quadro 8: Absorção dos corpos de prova pós realcalinização com barrilha leve 5%	46
Quadro 9: Absorção dos corpos de prova pós realcalinização com Hidróxido de Sódio	46
Quadro 10: Absorção dos corpos de prova pós realcalinização com Carbonato de Sódio	46
Quadro 11: Absorção dos corpos de prova pós realcalinização com Hidróxido de Potássio	47
Quadro 12: Média da absorção dos corpos de prova após os ensaios	47
Quadro 13: Média dos ensaios de absorção com uso e não uso de filme protetor ...	47
Quadro 14: Resistência à compressão aos 28 dias	49
Quadro 15: Resistência à compressão após uma semana em carbonatação	50
Quadro 16: Resistência à compressão após duas semanas em carbonatação	51
Quadro 17: Resistência à compressão após realcalinização em barrilha 5%	52
Quadro 18: Resistência à compressão após realcalinização em Hidróxido de Sódio	53
Quadro 19: Resistência à compressão após realcalinização em Carbonato de Sódio	54
Quadro 20: Resistência à compressão após realcalinização em Hidróxido de Potássio	54

LISTA DE GRÁFICOS

Gráfico 1: Curva granulométrica do agregado miúdo.....	30
Gráfico 2: Curva granulométrica do agregado miúdo.....	31
Gráfico 3: Média da absorção dos corpos de prova após os ensaios	47
Gráfico 4: Média dos ensaios de absorção com uso e não uso de filme protetor	48
Gráfico 5: Projeção F_{ckj}	50
Gráfico 6: Resistência à compressão axial x Idade (uma semana na câmara de carbonatação).....	51
Gráfico 7: Resistência à compressão axial x Idade (duas semanas na câmara de carbonatação).....	52
Gráfico 8: Resistência à compressão x Idade (realcalinização com barrilha 5%)	53
Gráfico 9: Resistência à compressão axial x idade (realcalinização com Hidróxido de Sódio).....	53
Gráfico 10: Resistência à compressão x Idade (realcalinização com Carbonato de Sódio).....	54
Gráfico 11: Resistência à compressão x Idade (realcalinização com Hidróxido de Potássio)	55

SUMÁRIO

1. INTRODUÇÃO	12
1.1. Objetivos	13
1.1.1. Objetivo geral.....	13
1.1.2. Objetivos específicos	13
1.2. Justificativa	13
2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA.....	15
2.1. Corrosão em armaduras de concreto	15
2.2. Carbonatação do concreto.....	18
2.2.1. Descrição do fenômeno	18
2.2.2. Avanço da carbonatação no concreto	19
2.2.3. Teor de umidade.....	20
2.2.4. Relação água/cimento	21
2.2.5. Carbonatação acelerada.....	22
2.2.6. Tipo de cimento	22
2.3. Realcalinização	23
2.3.1. Realcalinização química	24
2.3.2. Realcalinização eletroquímica	27
2.3.3. Realcalinização passiva.....	28
3. MATERIAIS E MÉTODOS	30
3.1. Caracterização dos materiais.....	30
3.1.1. Agregados	30
3.1.2. Tipo de cimento	31
3.2. Metodologia	32
3.2.1. Escolha do Fck	32
3.2.2. Traço.....	32
3.2.3. Moldagem dos corpos de prova.....	33
3.2.1. Soluções alcalinas	33
3.2.2. Processo de carbonatação	35
3.2.3. Processo de realcalinização	36
3.2.4. Ensaio de absorção	39
3.2.5. Ensaio de resistência à compressão	40
4. RESULTADOS E DISCUSSÃO	42
4.1. Efetividade da carbonatação.....	42
4.2. Efetividade da realcalinização.....	43
4.3. Absorção.....	46

4.4. Resistência à compressão	48
5. CONCLUSÕES	56
5.1. Considerações finais.....	56
5.2. Trabalhos futuros	56
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	58

1 INTRODUÇÃO

O concreto armado requer uma série de cuidados na sua produção e aplicação, desde a dosagem do concreto, adensamento e cura, até sua manutenção periódica. É necessário um bom controle, visando melhorias em sua vida útil e seu desempenho. Caso algo não saia como o planejado, podem ocorrer manifestações patológicas na estrutura.

É senso comum que o Brasil utiliza estruturas de concreto armado em larga escala em relação às demais estruturas, porém também são pouco conhecidas as características dessas estruturas com mais de 50 anos, uma vez que não há um grande número de estruturas em tal idade. Além disso, as normas de construção de estrutura de concreto menos recentes não eram tão rigorosas quanto à proteção da armadura, fazendo com que esta se torne mais próxima das intempéries do meio ambiente e, conseqüentemente, ao longo do tempo mais vulnerável ao fenômeno da carbonatação.

A carbonatação é uma das grandes causas de manifestações patológicas do concreto armado em ambientes urbanos, a corrosão do aço. A carbonatação ocorre lentamente com a ação do tempo por conta dos gases ácidos presentes na atmosfera, que ao interagirem com o concreto fazem com que este perca sua característica alcalina, tornando a armadura mais susceptível a ações corrosivas.

Para corrigir ou prevenir esse tipo de problema são aplicados vários métodos, com diferentes abordagens, como por exemplo: o uso de inibidores de corrosão, execução de reparos localizados, pinturas superficiais do aço, proteção catódica e também tratamento com realcalinização com a intenção de retomar as propriedades alcalinas do concreto, tornando a armadura passiva novamente.

É possível realizar o processo de realcalinização do concreto de duas formas: a RAE, realcalinização eletroquímica e a química RAQ, realcalinização química. Na primeira, um campo elétrico é aplicado entre a armadura da estrutura e um ânodo externo, na presença de uma solução alcalina, promovendo uma migração de íons, restabelecendo a alcalinidade do concreto. Já na segunda, uma solução alcalina é colocada em contato com o concreto, podendo ser através de aspersão, uso de pincel ou ainda com o uso de imersão, para que os íons hidroxila possam adentrar ao concreto. Neste trabalho serão avaliados diferentes soluções alcalinas no processo

de realcalinização química, através da imersão dos corpos de prova, cobrimento dos corpos de prova com feltro saturado e com feltro saturado envolto em plástico.

1.1. Objetivos

1.1.1. Objetivo geral

Pretende-se neste trabalho avaliar a eficácia de soluções diferentes com aplicações diferentes na realcalinização química em concretos convencionais.

1.1.2. Objetivos específicos

- Analisar diferentes produtos a serem usados nas soluções alcalinas para realcalinização química;
- Avaliar o tempo da realcalinização do concreto em diferentes tipos de aplicações;
- Determinar a eficiência de cada solução alcalina e de cada meio tipo de aplicação;
- Comparar a viabilidade econômica das diferentes soluções alcalinas;
- Avaliar a resistência do concreto pós tratamento;
- Avaliar a absorção do concreto pós tratamento.

1.2. Justificativa

Considerando a ação da carbonatação na corrosão do aço nas estruturas de concreto, que ocorrem e que irão aumentar nos próximos anos, estudar soluções alcalinas que evitem sua ocorrência para manter o aço protegido é de grande valia. Ademais, a realcalinização é um dos poucos métodos de tratamento de estruturas que evitam a destruição das mesmas, e ainda que existam poucos dados sobre a eficiência da RAQ em diferentes tipos de aplicação, diferentes soluções alcalinas existentes no mercado de preços variados, a RAQ tem se mostrado bem eficiente quando aplicada pelo método da imersão, que é mais complexo de ser executado em uma estrutura real, sendo assim, se faz necessário um novo método de aplicação da realcalinização

química que seja de fácil e possível aplicação em estruturas usuais, sem danificar a estrutura, que seja eficiente, rápida, e tenha um bom custo benefício.

2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

2.1. Corrosão em armaduras de concreto

Segundo Helene (1986) a corrosão é “a interação destrutiva de um material com o ambiente, seja por reação química ou eletroquímica”. Cascudo (1997) destaca que “no caso de um metal esse é convertido a um estado não metálico; quando isso ocorre, o metal perde suas qualidades essenciais tais como resistência mecânica, elasticidade e ductilidade”. Além disso, o mesmo autor classifica a corrosão em dois tipos: corrosão química e eletroquímica, sendo a primeira conhecida também como corrosão seca ou simplesmente oxidação, já a segunda como corrosão eletroquímica ou aquosa.

A oxidação, segundo Cascudo (1997), se dá por uma reação gás metal e Bertolini (2013) afirma ainda que ocorre sob alta temperatura. “Este fenômeno ocorre, preponderantemente, durante a fabricação de fios e barras de aço. Ao sair do trem de laminação, com temperaturas da ordem de 900°C, o aço experimenta uma forte reação de oxidação com o ar ambiente” (HELENE, 1986). Por fim, Bertolini (2013) conclui que nas condições normais de uso das estruturas de edifícios e civis a oxidação seca não deve ser considerada.

A corrosão no concreto armado, de acordo com Helene (1986), Cánovas (1988) e Cascudo (1997), é um mecanismo de corrosão eletroquímica, ocorrendo na presença de água ou ainda com ambiente úmido de umidade relativa (U.R) maior que 60%.

Helene (1986) cita que para ocorrer a oxidação são necessárias quatro condições: existir um eletrólito, uma diferença de potencial, oxigênio e ainda a presença de agentes agressivos. No caso do concreto, a água sempre está presente, principalmente em regiões da obra expostas à intempéries, em quantidade suficiente para que possa atuar como eletrólito. A Figura 1 retrata o processo.

No que diz respeito à diferença de potencial entre dois pontos da barra, isto pode ocorrer por diferentes motivos, tais como a diferença de umidade, aeração, concentração salina e tensão no concreto e no aço, podendo desencadear pilhas ou cadeias de pilhas conectadas em série. O que ocorre frequentemente é a formação de micropilhas que podem inclusive alterar a posição dos polos, ocasionando uma corrosão generalizada (VERBECK, 1974 *apud* HELENE, 1986). Por outro lado,

quando os anodos são de dimensões menores, podem produzir a corrosão localizada, sendo mais comum em fios e cordoalhas para concreto protendido. Também conhecida como corrosão sob tensão, sua principal característica é a ruptura frágil, sem que ocorra deformação na estrutura de forma que torne-a imperceptível até a ruptura (HELENE, 1986).

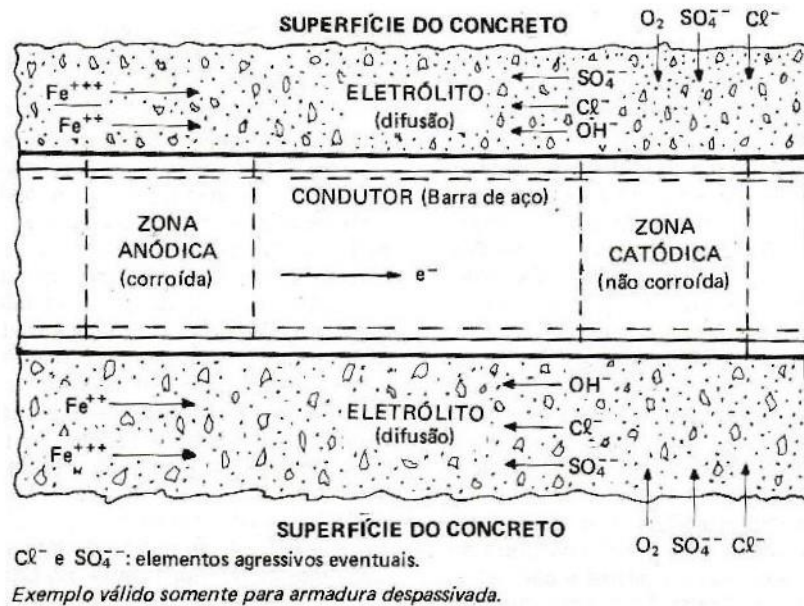


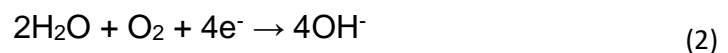
Figura 1 - Célula de Corrosão em concreto armado
Fonte: Porrero (1975) *apud* Helene (1986)

Helene (1986) explica que a reação que tem como produto a ferrugem da corrosão do aço trata-se de uma reação de oxirredução. Esta reação ocorre com a transferência de elétrons, sendo o agente oxidante aquele que reduz, sendo o agente redutor aquele que oxida, sendo este último aquele que perdeu elétrons, como mostram as Equações 1 a 6.

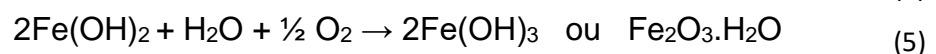
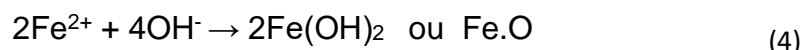
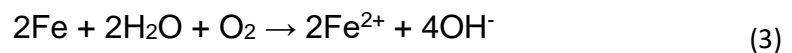
Oxidação do Ferro:



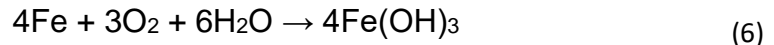
Redução do Oxigênio:



Corrosão:



Equação Geral:

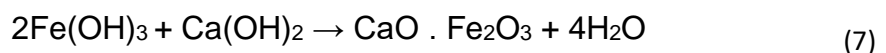


Alguns agentes chamados agressivos, principalmente de caráter ácido, podem funcionar como catalizadores, acelerando a reação da reação. Alguns desses elementos podem já estar presentes no concreto ou ainda serem absorvidos pelo mesmo. Entre eles pode-se citar os íons sulfeto (S^-), os íons cloreto (Cl^-), o dióxido de carbono (CO_2), os nitritos (NO_3^-), o gás sulfídrico (H_2S), o cátion amônio (NH_4^+), os óxidos de enxofre (SO_2 , SO_3), fuligem etc (HELENE, 1986).

De acordo com Bertolini (2013), Cascudo (1997) e Helene (1986), após as reações de hidratação do concreto, tem-se como produto uma solução saturada de hidróxido de cálcio $\text{Ca}(\text{OH})_2$ (portlandita), que preenche os poros e capilares do concreto, conferindo uma alcalinidade com pH em torno de 12,5.

Levando em conta que a faixa usual de potencial de corrosão no concreto pode variar de +0,1V a -0,4V, segundo a permeabilidade e as características do concreto, para temperaturas de 25°C (PETROCOKINO, 1960 *apud* HELENE, 1986) em relação ao eletrodo padrão de hidrogênio e sendo o pH do concreto em torno de 12,5; de acordo com o Diagrama de Pourbaix, que indica que as condições de potencial e pH em que um processo particular de reação corrosiva é termodinamicamente favorável, verifica-se que as reações de eletrodo no ferro são de passivação (CASCUDO, 1997), conforme Figura 2.

Em ambientes altamente alcalinos, como o do concreto, é formada uma capa ou película protetora de caráter passivo que envolve a armadura, chamada de proteção química. De acordo com Cascudo (1997), o filme passivo é muito aderente ao aço e bastante delgado (normalmente invisível), cuja espessura varia entre 10^{-3} e 10^{-1} μm . Segundo Helene (1986) a película é resultante da combinação da ferrugem superficial ($\text{Fe}(\text{OH})_3$) como hidróxido de cálcio ($\text{Ca}(\text{OH})_2$), segundo a Equação (7).



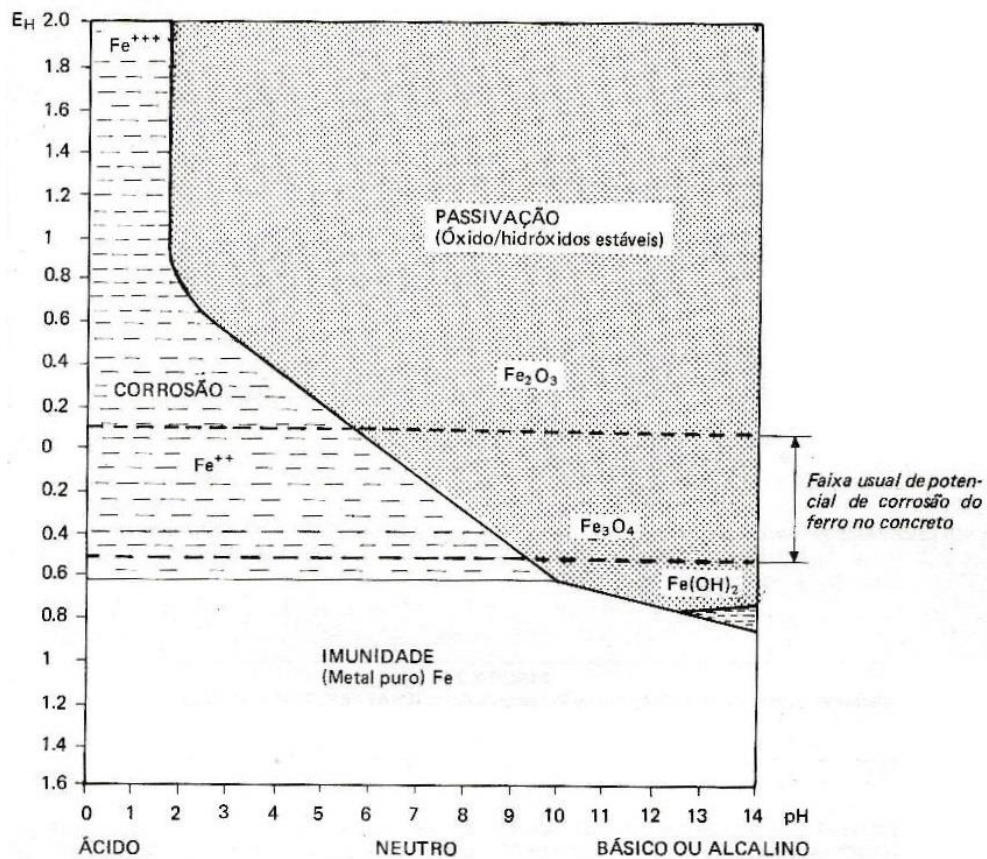


Figura 2 - Diagrama de Pourbaix ou Diagrama de equilíbrio termodinâmico. Potencial x pH para o sistema Fe – H₂O a 25°C, delimitando os domínios prováveis de corrosão, passivação e imunidade. Fonte: Pourbaix (1961) *apud* Helene (1986)

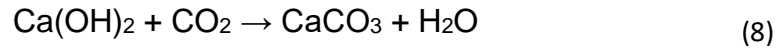
Portanto, para proteger o aço no concreto pode-se elevar a diferença de potencial desde que o pH seja maior que 12, colocando o aço em uma região de passivação e diminuição do potencial de corrosão, a fim de atingir o domínio de imunidade de corrosão e finalmente “manter o meio com pH acima de 10,5 e abaixo de 13, que é o meio natural proporcionado pelo concreto, desde que este seja homogêneo e compacto” (COUTINHO, 1973 *apud* HELENE, 1986).

2.2. Carbonatação do concreto

2.2.1. Descrição do fenômeno

Tanto Cascudo (1997) quanto Helene (1986) afirmam que a alta alcalinidade do concreto, adquirida pela presença de hidróxido de cálcio, liberado nas reações de hidratação do cimento, é reduzida lentamente com o tempo devido à ação de gases ácidos presentes na atmosfera, como SO₂ e H₂S, e principalmente o CO₂, que

penetram no concreto por difusão. O gás carbônico incorporado no concreto em reação com o hidróxido de cálcio forma o carbonato de cálcio. Este processo é denominado carbonatação e é retratado pela Equação 8 e pela Figura 3.



Levando em conta que o pH de precipitação do carbonato de cálcio é em torno de 9,4, tem-se com isso uma alteração significativa nas condições de estabilidade química, ou ainda da película passivadora do aço (CASCUDO, 1997; HELENE, 1986).

Ainda sobre o aspecto da diminuição do pH do concreto, Cascudo (1997) relata que muitos autores propuseram um valor de pH crítico entre 11,5 e 11,8. Abaixo disto não se pode garantir a passivação, muito embora tenham sido encontradas situações com pH inferiores nas quais a passivação não havia ocorrido.

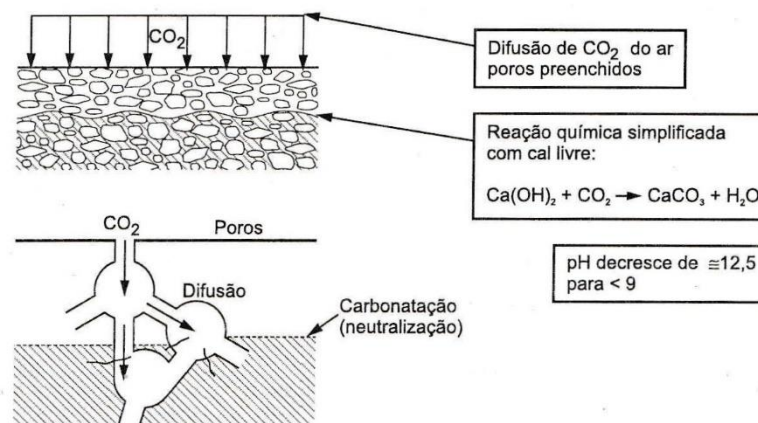


Figura 3 – Representação esquemática do processo de carbonatação
 Fonte: Cascudo (1997)

2.2.2. Avanço da carbonatação no concreto

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 respectivamente as regiões carbonatadas e não carbonatadas. É importante que esta frente de carbonatação não atinja a armadura de modo a não despassivá-la.

De acordo com Bertolini (2013), a vida útil de uma estrutura pode ser considerada como a soma de um tempo de ativação – ou iniciação – e um tempo de propagação, sendo que este último trata-se do tempo da corrosão da armadura de modo a comprometer a sua funcionalidade.

A velocidade de penetração da carbonatação juntamente com a espessura de cobertura das armaduras são os fatores que determinam a fases de ativação da corrosão. Na superfície externa do concreto iniciam-se as reações de carbonatação que penetram com uma evolução aproximadamente proporcional à raiz quadrada do tempo, conforme explica Bertolini (2013).

A Equação 9 retrata a evolução da penetração da carbonatação, onde x é a profundidade da carbonatação, t expressa o tempo decorrido, e K é coeficiente de carbonatação, expresso em $mm/ano^{\frac{1}{2}}$ (BERTOLINI, 2013).

$$x = K \cdot (t)^{-\left(\frac{1}{2}\right)} \quad (9)$$

2.2.3. Teor de umidade

Um fator de grande importância na carbonatação é o teor de umidade do concreto, uma vez que além do CO_2 possuir uma taxa de dissolução em água 10^4 vezes menor, torna a carbonatação em concreto saturado praticamente irrelevante, já que os poros do concreto estarão completamente preenchidos por água. Por outro lado, a ausência de água permite que o CO_2 se difunda no interior nos poros, porém impede que a carbonatação aconteça (BERTOLINI, 2013; CASCUDO, 1997).

Como a água é necessária para a carbonatação, essa ocorre desde que os poros do concreto estejam parcialmente preenchidos com água, que é comum nas superfícies de concreto, variando apenas em relação ao teor de umidade (CASCUDO, 1997). Segundo Bertolini (2013) a velocidade de carbonatação mais elevada se dá em concreto protegido da chuva e com uma atmosfera com 60%-80% de umidade relativa, conforme a Figura 4.

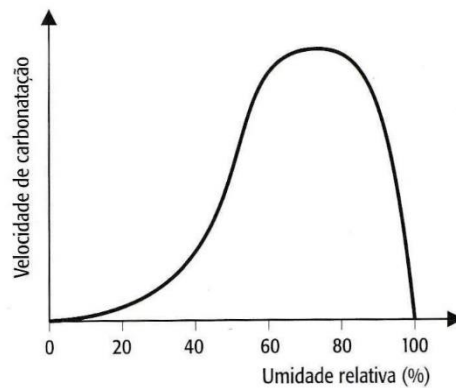


Figura 4 – Evolução da velocidade de carbonatação em função da umidade relativa do concreto, na ausência de água de molhagem.
Fonte: Tuutti (1982) *apud* Bertolini (2013)

2.2.4. Relação água/cimento

A relação água/cimento tem fator preponderante na qualidade do concreto, desde a sua compacidade até sua porosidade, que é de fundamental importância para a carbonatação, uma vez que com a porosidade reduzida a difusão de gases como o CO_2 também é reduzida (CASCUDO, 1997).

A Figura 5 retrata o avanço da carbonatação para diferentes relações água/cimento de concretos expostos em laboratório a 20°C e a 50% de umidade relativa por seis anos. É possível perceber que a profundidade da carbonatação é menor quando a relação água/cimento também for menor.

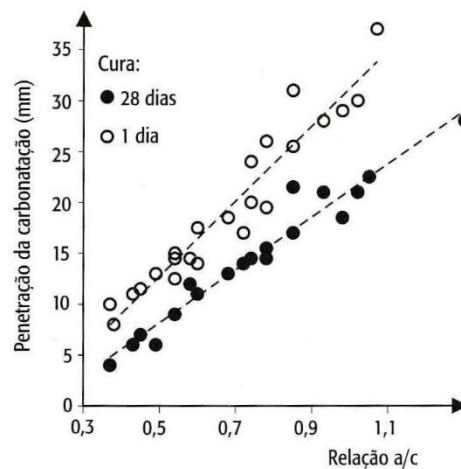


Figura 5 – Influência da relação a/c sobre a profundidade de carbonatação,
Fonte: Page (1992) *apud* Bertolini (2013)

2.2.5. Carbonatação acelerada

De acordo com Kazmierczak (1995) *apud* Araújo (2009), a difusão do CO₂ pelos poros do concreto se dá na razão direta do gradiente de concentração de CO₂, de acordo com o princípio da primeira lei de Fick. Dessa forma, conclui-se que quanto maior for a concentração de dióxido de carbono na atmosfera, maior será a difusão do gás no concreto, e conseqüentemente na carbonatação.

Para que se possam realizar alguns estudos dos processos ligados à carbonatação, como a realcalinização, por exemplo, se faz necessária a aceleração desse processo em laboratório. A chamada carbonatação acelerada é realizada em uma câmara com o percentual de CO₂ controlado, assim como o teor de umidade e a temperatura.

Segundo Pauletti (2009) a profundidade de carbonatação acelerada realizada com 100% de CO₂ são sempre inferiores às encontradas nos ensaios com 6%, levantando ainda a seguinte hipótese em relação à carbonatação, que tem como produto carbonato de cálcio e a água:

Como a água também é um produto da carbonatação, quando realizada em saturação, com 100% de CO₂, a produção de água nos poros é muito grande o que provoca uma obstrução total ou parcial dos poros do concreto, dificultando a difusão do CO₂ e inevitavelmente o avanço da frente de carbonatação. É natural que para obter a carbonatação acelerada se use valores de concentração do gás mais elevadas, porém sua eficiência é mais elevada quando com valores mais próximos das condições naturais (PAULETTI, 2009).

Além de recomendar o uso do percentual de 6% de CO₂ para a carbonatação acelerada, Pauletti (2009) recomenda que a cura dos corpos de prova seja de 28 dias, pois nessa idade os cimentos com adições têm possibilidade de serem comparados em igualdade de relação a/c com cimentos sem ou com poucas adições.

2.2.6. Tipo de cimento

Quando comparados aos concretos de cimento Portland comum, os concretos com adições de escória de alto-forno ou com adições de materiais pozolânicos, tais como cinza volante ou sílica ativa, possuem desempenho melhorado quanto à penetração de líquidos, gases e íons pelo fato deste tipo de cimento apresentar em

sua estrutura pastas mais compactas, no entanto essas adições tendem a piorar o comportamento frente à carbonatação (CASCUDO, 1997).

Em ensaios realizados com CP V-ARI, cimento com menor número de adições e conseqüentemente mais puro, Raisdorfer (2015) utilizou diferentes tipos de adições minerais e verificou que essas adições reduziram a resistência à carbonatação, ou seja, a carbonatação ocorre mais rapidamente em cimentos com adições minerais.

2.3. Realcalinização

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).

Os benefícios da técnica de realcalinização estão ligados ao tipo de eletrólito usado no tratamento. A maioria dos autores têm o carbonato de sódio (Na_2CO_3) na concentração de 1M como o melhor composto para a realcalinização eletroquímica por manter seu pH sempre próximo à 10,5, valor que mantém a película de passivação, enquanto outros autores ainda citam e estudam alguns eletrólitos diferentes (ARAÚJO, 2009).

Um exemplo é o trabalho de Sergi *et al* (1996) *apud* Araújo (2009) que utilizou o hidróxido de lítio (LiOH) como composto para a realcalinização eletroquímica, e afirmaram que o hidróxido de lítio quando comparado ao carbonato de sódio é ainda melhor, pois apesar de terem o mesmo pH, há a vantagem da permanência prolongada dos íons de Lítio na estrutura.

Araújo e Figueredo (2005) *apud* Araújo (2009) usaram, além do carbonato de sódio, o hidróxido de potássio (KOH) e observaram que a solução com potássio foi tão eficiente quanto a de sódio inclusive em relação ao tempo de obtenção de 2,5 cm de material carbonatado.

2.3.1. Realcalinização química

A realcalinização química (RAQ) ocorre pela difusão e absorção de soluções alcalinas pelo concreto. Na Figura 6 se pode observar o sentido da realcalinização do concreto carbonatado, que se inicia pela parte externa até a interna ao longo do tempo.

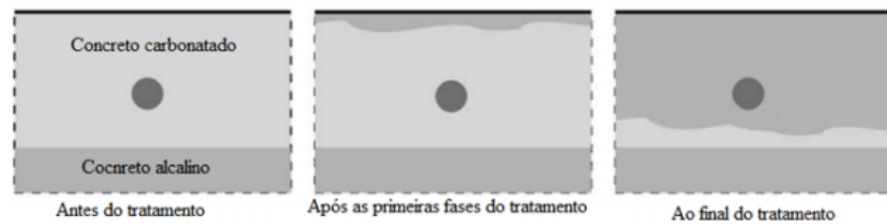


Figura 6 - Evolução da RAQ no concreto carbonatado
Fonte: REUS, et al. (2015).

A difusão e absorção das soluções alcalinas pelo concreto ocorrem por capilaridade e ação de forças hidráulicas, não dependendo do fluxo de corrente elétrica para acontecer (SÁ, 2006).

Em seu trabalho, Sá (2006) utilizou tamanhos e formatos diferentes de corpos de prova a cada ensaio. Para o ensaio da influência da carbonatação e realcalinização na resistência do concreto, utilizou-se corpos de prova de argamassa cilíndricos, nas dimensões 5 x 10 cm. O uso de argamassa no lugar do concreto para realização do ensaio foi justificado pelo fato de as características do concreto no entorno da armadura se assemelharem mais à argamassa. Para o ensaio de carbonatação acelerada e reapassivação da armadura por realcalinização, o autor moldou corpos de prova nas dimensões 20 x 30 x 6 cm e foi colocado no centro delas uma barra de aço CA 50-A de 10 mm de diâmetro, tendo assim 2,5 cm de cobrimento, como ilustrado na Figura 7 e o traço rodado foi 1 : 2,38 : 3,05 : 0,7. Para a determinação da profundidade da carbonatação, foi utilizada a fenolftaleína como indicador de pH. Para o controle da passivação e reapassivação da armadura foram tomadas medidas eletroquímicas com o aparelho GECOR 6.

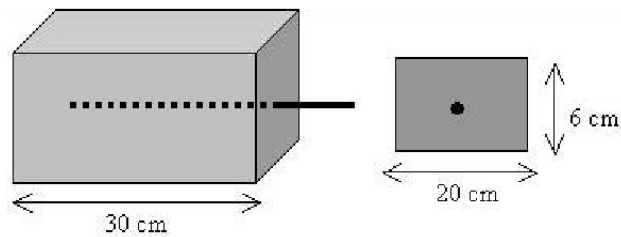


Figura 7 – Detalhe dos corpos de prova prismáticos
Fonte: Sá, (2006)

As soluções alcalinas usadas por Sá (2006) em seu trabalho foram três: Na_2CO_3 , KOH e uma solução tripla, formada por carbonato de sódio, hidróxido de sódio e hidróxido de potássio ($\text{Na}_2\text{CO}_3 + \text{NaOH} + \text{KOH}$). Foram realizados ciclos de 2 dias submersos e 5 dias de secagem em temperatura e umidade controlada. Para a verificação da realcalinização os corpos de prova foram fraturados e aspergidos com solução alcoólica de timoltaleína. Ao final do processo de realcalinização, pôde-se comprovar a alcalinidade do concreto e o avanço do mesmo, mesmo que lento, como mostrado na figura 8 o avanço da realcalinização a cada ciclo de três dias

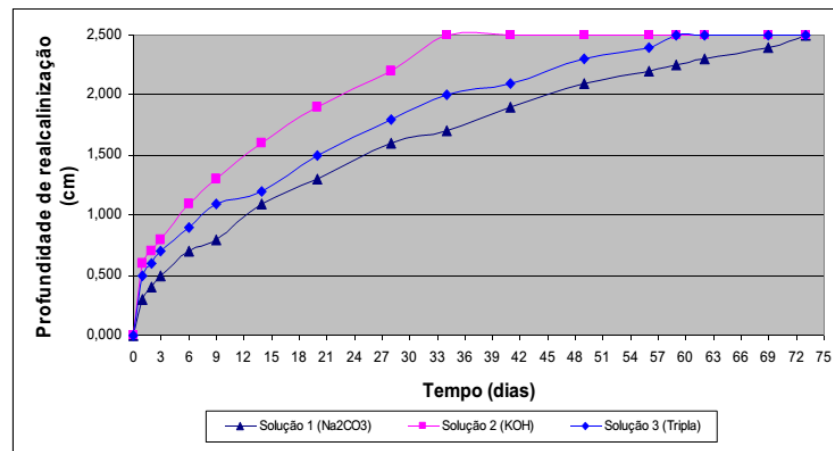


Figura 8 - Avanço da realcalinização em corpos de prova carbonatados.
Fonte: Sá, (2006)

Para os ensaios de realcalinização por absorção e difusão, Araújo (2009), preparou corpos de prova cilíndricos de 5x10 cm, sem aço e com diferentes relações água/cimento. As soluções alcalinas utilizadas foram Na_2CO_3 , KOH, e $\text{Ca}(\text{OH})_2$. O processo de realcalinização foi feito com ciclos de molhagem e secagem que duraram 5 dias. A profundidade da realcalinização foi medida usando fenoltaleína. A primeira medição foi feita após 3 semanas e se obteve um resultado satisfatório apenas com o KOH. Após 9 semanas de tratamento os resultados melhoraram, porém alguns corpos

de prova ainda não estavam totalmente realcalinizados, na Figura 9 tem-se as imagens dos corpos de prova após a RAE e na Figura 10 a profundidade da realcalinização após 9 semanas de tratamento.



Figura 9 - Corpos de prova após 9 semanas de tratamento (RAQ) aspergidos com fenolftaleína . Fonte: ARAÚJO (2009).

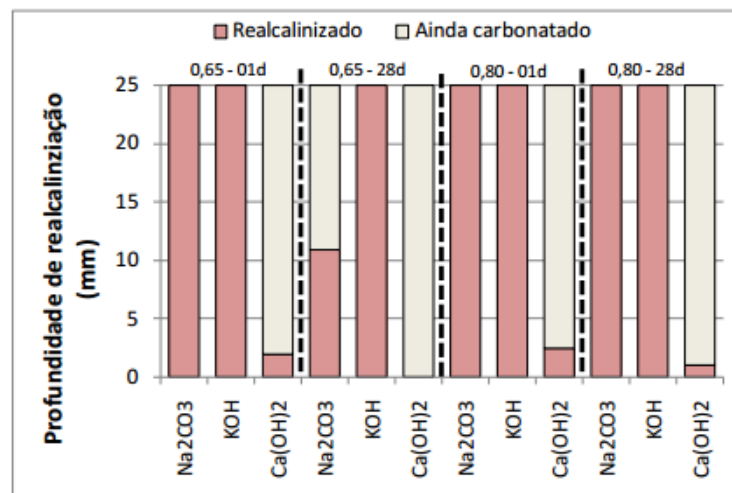


Figura 10 - Profundidade da realcalinização com 9 semanas de tratamento. Fonte: ARAÚJO (2009)

Após 14 semanas de realcalinização química por ciclagem, Araújo (2009) observou a realcalinização completa dos corpos de prova tratados com Na₂CO₃ e KOH, porém não obteve sucesso com o Ca(OH)₂, que não alcançou 5 mm de profundidade de realcalinização.

Uma solução própria para realcalinização química é comercializada no Brasil, suas concentrações e composições não são divulgadas pelo fabricante. Reus et al, (2017), ensaiou essa solução em quatro métodos diferentes, que foram spray e trincha, que são as formas de aplicação sugeridas pelo fabricante, manta e imersão. O método da manta consiste em envolver o corpo de prova com um feltro umedecido

com a solução, e protegido por plástico filme. Observou-se que os dois métodos sugeridos pelo fabricante (spray e trincha) correspondem a 9,01% e 8,28% da profundidade obtida como método da manta, e o método de imersão é ainda melhor que a manta. A resistência á compressão do concreto aumentou com a carbonatação e reduziu 1,35% após a realcalinização pelos métodos da manta, e imersão, e a absorção por capilaridade dos corpos de prova reduziu em aproximadamente 50% da absorção do concreto são. Com esse trabalho ficou concluído que a solução comercial é eficiente na realcalinização de concretos carbonatados, porém em métodos de aplicação diferentes do indicado pelo fabricante.

2.3.2. Realcalinização eletroquímica

A realcalinização eletroquímica (RAE) se dá pelo fluxo de corrente elétrica entre ânodo e cátodo, com o envolvimento do concreto por uma solução alcalina. 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 que possam prejudicar a eficiência do método (SÁ, 2006). A figura 11 ilustra o princípio da realcalinização eletroquímica, e a frente de realcalinização segundo Araújo (2009).

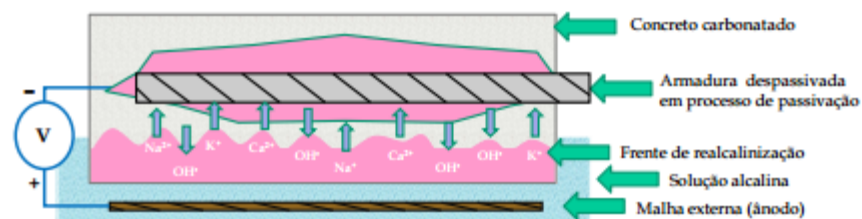


Figura 11 - Ilustração do princípio de realcalinização eletroquímica.
Fonte: ARAUJO, 2009. Adaptada de ARAUJO, 2004.

Reus *et al.* (2015) define a realcalinização eletroquímica como um sistema anódico temporário, onde um campo elétrico induz a migração de íons. Nesse método o pH aumenta primeiro em volta das armaduras, indo até a superfície de concreto, como mostrado na Figura 12.

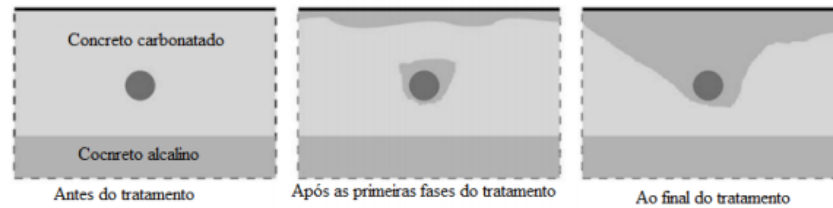


Figura 12 - Evolução ao longo do tempo da aplicação da realcalinização eletroquímica.

A densidade elétrica total passante, definida como a densidade de corrente elétrica aplicada pelo tempo de tratamento, é a principal influenciadora da RAE, pois determina a quantidade de hidroxilas produzidas próximo à armadura (RIBEIRO *et al.*, 2010).

Segundo Ribeiro, *et al.* (2010), é certa a eficiência da RAE na realcalinização do concreto, ainda que haja controvérsias no meio científico sobre a repassivação da armadura. Os autores observaram uma forte tendência à repassivação da armadura, apesar de não obter dados conclusivos.

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

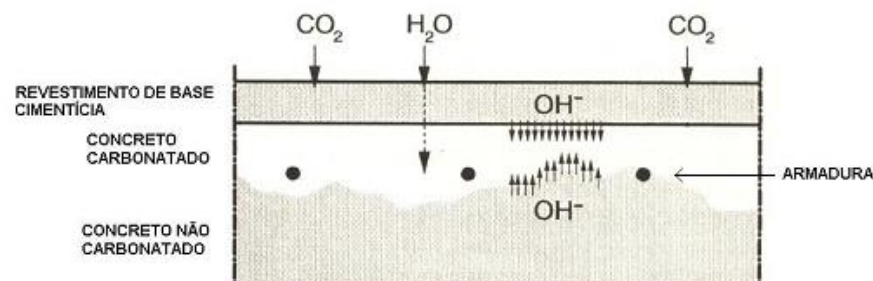


Figura 13 - Princípio da realcalinização passiva
Fonte: MATTILA E PENTTI, 1996 *apud* SÁ, 2006

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. Caracterização dos materiais

3.1.1. Agregados

Os agregados utilizados foram escolhidos de acordo com a disponibilidade na região da cidade de Curitiba – PR, sendo estes caracterizados de acordo com os Quadros 1 e 2 e Gráficos 1 e 2.

Agregado Miúdo (Areia Média)				
Peneira	Peso Retido	% Retido	% Retido Acum.	% Passante
4,80	6,20	1,24%	1,24%	98,76%
2,40	8,80	1,76%	3,01%	96,99%
1,20	22,50	4,51%	7,52%	92,48%
0,60	87,00	17,44%	24,95%	75,05%
0,30	216,90	43,48%	68,43%	31,57%
0,15	126,10	25,28%	93,71%	6,29%
Fundo	31,40	6,29%	100,00%	0,00%
Total	498,90	Módulo de Finura	2,99	
		Norma	2,20 a 2,90	

Quadro 1: Caracterização de agregado miúdo

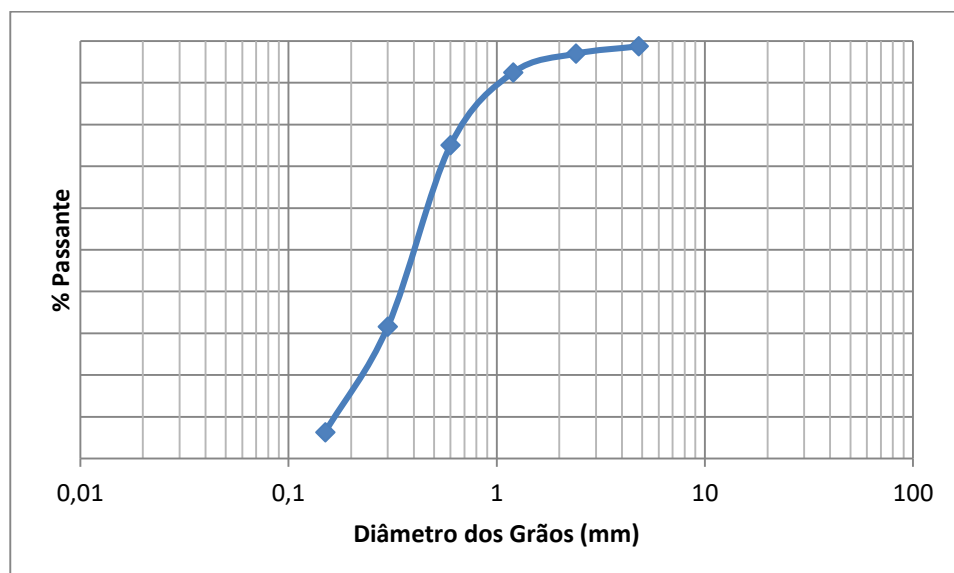


Gráfico 1: Curva granulométrica do agregado miúdo

Agregado Graúdo				
Peneira	Peso Retido	% Retido	% Retido Acum.	% Passante
25	0	0,00%	0,00%	100,00%
19	16,9	1,69%	1,69%	98,31%
12,5	272	27,20%	28,89%	71,11%
9,5	390,3	39,03%	67,93%	32,07%
6,3	297,7	29,77%	97,70%	2,30%
Fundo	23	2,30%	100,00%	0,00%
Total	999,9	Módulo de Finura	1,70	
			Dimensão Máxima Carac.	19 mm

Quadro 2: Caracterização de agregado graúdo

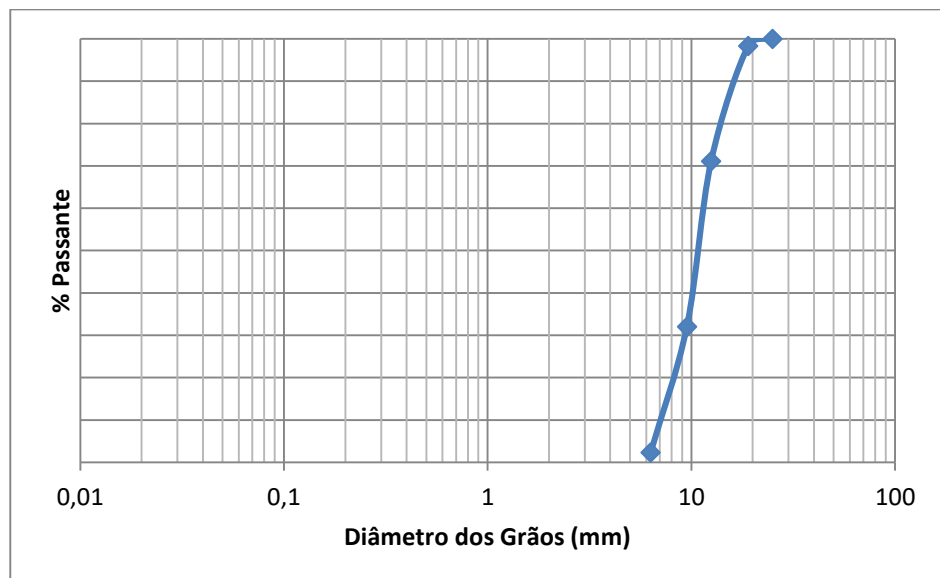


Gráfico 2: Curva granulométrica do agregado miúdo

3.1.2. Tipo de cimento

O cimento escolhido foi o CP IV-32 RS, com alta resistência ao ataque de sulfatos, que por possuir um teor de 15% a 50% de adições de materiais pozzolânicos favorecem a carbonatação, conforme mostrado no Capítulo 2.

3.2. Metodologia

3.2.1. Escolha do Fck

A escolha do Fck de 20 MPa adotado foi baseada na tabela de agressividade da norma NBR 6118 (ABNT, 2014) levando em conta a menor agressividade, buscando favorecer a carbonatação para a realização dos ensaios de realcalinização química, conforme Tabela 1.

Concreto (a)	Tipo (b, c)	Classe de agressividade			
		I	II	III	IV
Relação água/cimento em massa	CA	≤ 0,65	≤ 0,60	≤ 0,55	≤ 0,45
	CP	≤ 0,60	≤ 0,55	≤ 0,50	≤ 0,45
Classe de concreto ABNT NBR 8953	CA	≥ C20	≥ C25	≥ C30	≥ C40
	CP	≥ C25	≥ C30	≥ C35	≥ C40
(a) empregado na execução das estruturas deve cumprir com os requisitos estabelecidos na ABNT NBR 12655.					
(b) CA corresponde a componentes e elementos de concreto armado					
(c) CP corresponde a componentes e elementos de concreto protendido					

Tabela 1: Correspondência entre a classe de agressividade e a qualidade do concreto

Fonte: NBR 6118 (ABNT, 2014)

3.2.2. Traço

O traço foi calculado através do método da Associação Brasileira de Cimento Portland - ABCP, que leva em consideração a análise granulométrica, e massa específica dos agregados, junto com a resistência e consistência desejada do concreto.

As etapas do método ABCP consistem em determinar primeiro a relação água cimento, com base no tipo de cimento utilizado, depois determinar o consumo de água, cimento, e agregados no concreto.

Com os dados dos agregados, escolha do tipo de cimento, e resistência de dosagem, chegou-se no traço abaixo, conforme Quadro 3:

Cimento	Areia	Brita	Águra
1	1,45	3,2	0,58

Quadro 3: Traço do concreto

3.2.3. Moldagem dos corpos de prova

Os corpos de prova foram divididos em cinco betonadas distintas, sendo as duas primeiras acontecendo no primeiro dia e as demais acontecendo no segundo devido a capacidade da betoneira limitar-se a 20 litros de concreto, conforme Quadro 4.

Os cilindros de dimensão 10x20cm foram moldados com adensamento manualmente em 2 camadas de 12 golpes de acordo com a NBR 5738 (ABNT, 2008) Concreto – Procedimento para moldagem e cura de corpo de prova.

Data	Betonada	nº de CP's
28/07/2017	1	10
28/07/2017	2	11
21/08/2017	3	8
21/08/2017	4	8
21/08/2017	5	9

Quadro 4: Lista de CP's e data das concretagens

3.2.1. Soluções alcalinas

Foram escolhidas quatro soluções alcalinas para o processo de realcalinização, sendo elas o Carbonato de Sódio (Na_2CO_3), a Barrilha Leve que também é o Na_2CO_3 , porém comercializado em pó para adição em água e tem a função de elevar o pH de piscinas. Também foram escolhidos o Hidróxido de Sódio - NaOH, e Hidróxido de Potássio - KOH. No Quadro 5 estão apresentados os custos das soluções e as Figuras 14, 15, 16 e 17 mostram as embalagens das mesmas.

Substância Alcalina	Qde	Preço
Barrilha	Na_2CO_3 1 kg	R\$ 10,00
Carbonato de Sódio	Na_2CO_3 1 L	R\$ 41,00
Hidróxido de Sódio	NaOH 1 L	R\$ 41,00
Hidróxido de Potássio	KOH 1 L	R\$ 41,00

Quadro 5: Custo e quantidade de soluções alcalinas



Figura 14: Hidróxido de Potássio 0,1 N

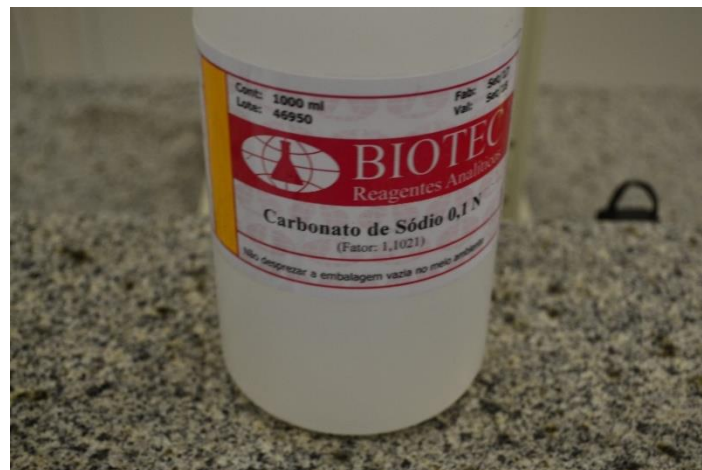


Figura 15: Carbonato de Sódio 0,1 N



Figura 16: Hidróxido de Sódio

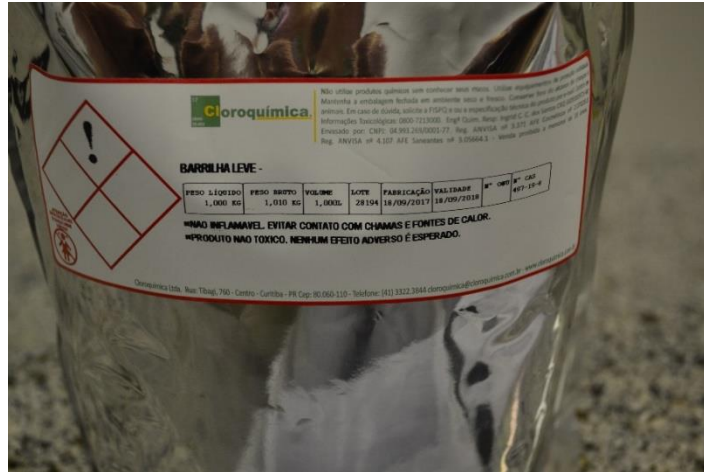


Figura 17: Barrilha leve

É importante ressaltar que a concentração de barrilha leve usada foi de 5%, ou seja, 1 kg de barrilha é suficiente para produzir 20 litros da solução, sendo seu custo por litro de aproximadamente R\$ 0,50.

3.2.2. Processo de carbonatação

Os corpos de prova foram colocados em uma câmara conectada à um cilindro de CO₂, que foram fechados e isolados. Após a liberação do gás carbônico, a câmara tornou-se saturada para início do processo de carbonatação, conforme Figura 18.



Figura 18: Câmara de carbonatação aberta com os corpos de prova antes do início do processo

A carbonatação foi dividida em duas fases de 10 dias, havendo um intervalo entre elas para a checagem da carbonatação dos corpos de prova, que foi feita através da aspersão de fenolftaleína na superfície dos corpos de prova, que apresenta coloração rosa ao entrar em contato com superfície alcalina (pH maior que 9). A Figura 19 mostra corpos de prova com a superfície carbonatadas



Figura 19: Corpos de prova com superfícies aspergida com fenolftaleína após 10 dias na câmara de carbonatação

Após verificação do segundo período de carbonatação, os corpos de prova foram submetidos à compressão diametral, conforme Figura 26, para avaliação da penetração da carbonatação no concreto.

Com os corpos de prova rompidos, a penetração da carbonatação foi avaliada com o uso de fenolftaleína.

3.2.3. Processo de realcalinização

Levando em conta a eficácia da realcalinização química com a submersão dos corpos de prova, decidiu-se realizar o processo de realcalinização utilizando feltros de duas maneiras diferentes: com feltros envoltos nos corpos de prova e expostos ao tempo e com os feltros envoltos nos corpos de prova, porém protegidos por um filme plástico.

Em um dos casos, após terem sido tirados da câmara de carbonatação e com a carbonatação superficial verificada, foram envolvidos por feltros embebidos das soluções alcalinas.

No outro caso, repetiu-se o processo realizado no primeiro, porém, após terem sido envolvidos pelos feltros, os corpos de prova também foram envolvidos com um filme plástico. A Figura 20 retrata o ensaio, sendo os corpos de prova posicionados na horizontal aqueles sem o uso de filme plástico, e os posicionados na vertical aqueles com uso de filme plástico.



Figura 20: Realcalinização dos corpos de prova carbonatados

Assim como na carbonatação, o ensaio foi dividido em duas etapas de uma semana. Após a primeira semana, foi verificado com a aspensão de fenolftaleína se a superfície dos corpos de prova haviam realcalinizado ou não e comparado com os demais soluções, de acordo com a Figura 21



Figura 21: Corpos de prova após aspersão de fenolftaleína com uma semana após realcalinização

Após a verificação, os corpos de prova foram novamente envolvidos com os feltros e reservados por mais uma semana e em seguida tiveram a superfície aspergida com fenolftaleína.

Para verificar a profundidade da realcalinização foi feito o ensaio de compressão diametral e aspergido fenolftaleína conforme a Figura 22.



Figura 22: Corpo de prova após aspersão de fenolftaleína com duas semanas de realcalinização, com ruptura diametral

3.2.4. Ensaio de absorção

Os ensaios de absorção foram realizados em três etapas: antes da carbonatação, após carbonatação e antes da realcalinização e após a realcalinização. Os corpos de prova 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 23.



Figura 23: Corpos de prova em imersão

Decorridos os três dias, os corpos de prova tiveram sua superfície secada para tirar o excesso de água e em seguida foram pesados novamente, conforme a Figura 24. Para obtenção do percentual de absorção foi usada a Equação 10.

$$Abs\% = \frac{(M_{saturada} - M_{seca})}{M_{seca}} \quad (10)$$



Figura 24: Pesagem dos corpos de prova

3.2.5. Ensaio de resistência à compressão

Os ensaios de resistência à compressão foram realizados na sequência dos ensaios de absorção. Ainda com os corpos de prova saturados, estes foram levados às prensas de compressão, onde os corpos de prova foram ensaiados quanto à resistência à compressão axial e diametral. As Figura 25 e 26 mostram a realização dos ensaios.



Figura 25: Ensaio de resistência à compressão axial

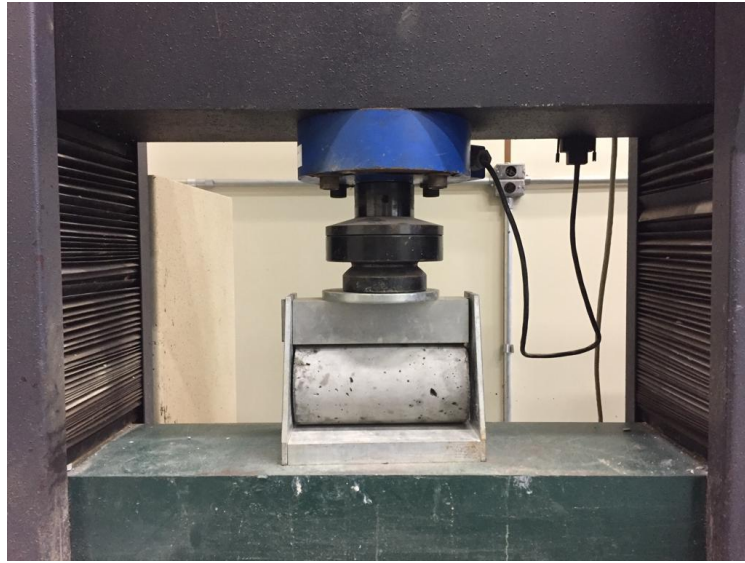


Figura 26: Ensaio de resistência à compressão diametral

4. RESULTADOS E DISCUSSÃO

4.1. Efetividade da carbonatação

Os corpos de prova submetidos à carbonatação só obtiveram a superfície carbonatada após o segundo período na câmara. A Figura 27 mostra os corpos de prova submetidos à aspensão de fenolftaleína, exibindo os mesmos com a superfície sem mudança de cor, obtendo a diminuição do pH.



Figura 27: Corpos de prova após segunda semana de carbonatação

Para rompimento dos corpos de prova e avaliação da penetração da carbonatação, os corpos de prova foram colocados à prensa e submetidos à compressão diametral, conforme Figura 28.



Figura 28: Corpos de prova submetidos à compressão diametral e com asperção de fenolftaleína após segunda semana de carbonatação

É possível que a ausência de água na câmara de carbonatação devido ao não controle de umidade da câmara e o fato da mesma estar saturada de gás carbônico tenha influenciado na carbonatação dos corpos de prova, uma vez que a água é elemento necessário para o processo e a saturação da câmara faz com que a carbonatação ocorra muito rapidamente preenchendo os poros e dificultando a penetração do gás carbônico.

4.2. Efetividade da realcalinização

Tendo em vista que a carbonatação ocorreu apenas superficialmente, a aspersão de fenolftaleína foi feita também superficialmente antes dos ensaios de compressão axial, e após o ensaio de compressão diametral para confirmar que a pequena profundidade de carbonatação estava realcalinizada.

Com uma semana de realcalinização, a única solução que apresentou uma leve cor arroxeada na superfície foram os corpos de prova tratados com barrilha leve 5%, sendo que os protegidos no plástico filme apresentaram mais cor que os apenas enrolados no feltro, os demais corpos de prova nas outras três soluções continuaram incolores.

Após a segunda semana de tratamento com os feltros saturados de solução alcalina, observou-se a cor roxa com mais intensidade, como pode ser visto nas Figura 29, e a eficiência da barrilha se confirmou superior as outras soluções. Os corpos de

prova tratados com barrilha leve (1) ficaram com toda a superfície colorida, os corpos de prova tratados com carbonato de sódio (2) foram os segundos em intensidade de roxo, porém bem menor que os de barrilha, o hidróxido de sódio (3) apresentou mais regiões arroxeadas que os tratados com hidróxido de potássio (4).

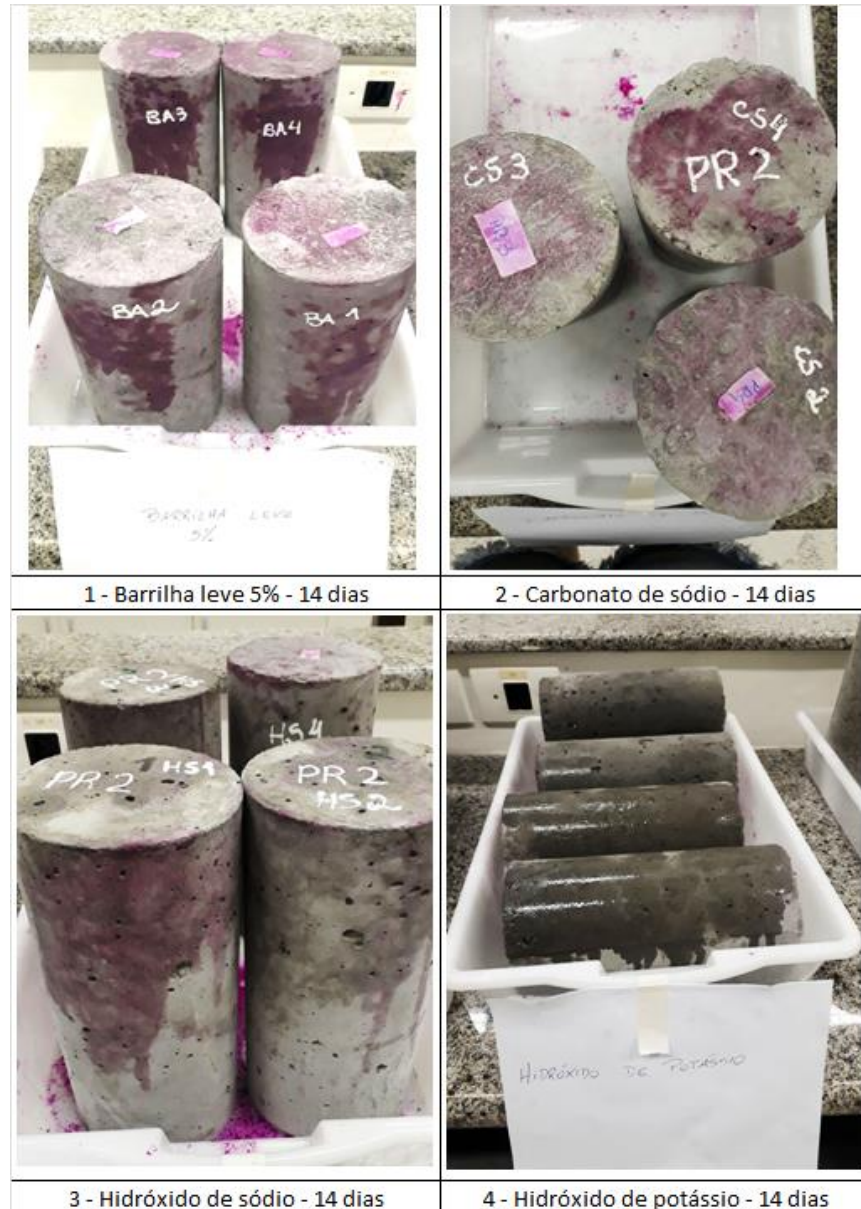


Figura 29: Realcalinização superficial dos corpos de prova após 14 dias

Os corpos de prova com o feltro envolto pelo plástico filme apresentaram uma cor mais forte que os apenas com feltro, pois como se pode ver na Figura 30. Quando tirados dos feltros, os corpos de prova que ficaram envoltos do plástico filme ainda estavam úmidos e os outros dois apenas no feltro estavam secos.

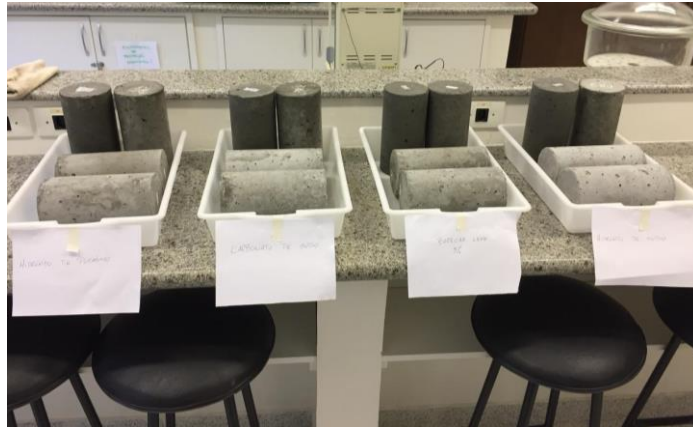


Figura 30: Corpos de prova após a retirada dos feltros

Após a ruptura diametral foi aspergida a fenolftaleína para comprovar a profundidade da realcalinização e a barrilha se confirmou como solução mais eficiente, não deixando nenhuma profundidade de carbonatação, já nos corpos de prova das demais substâncias se observou alguns pontos incolores na capa de superfície, ficando mais nítida a ordem de eficiência das soluções como indicado na Figura 31.

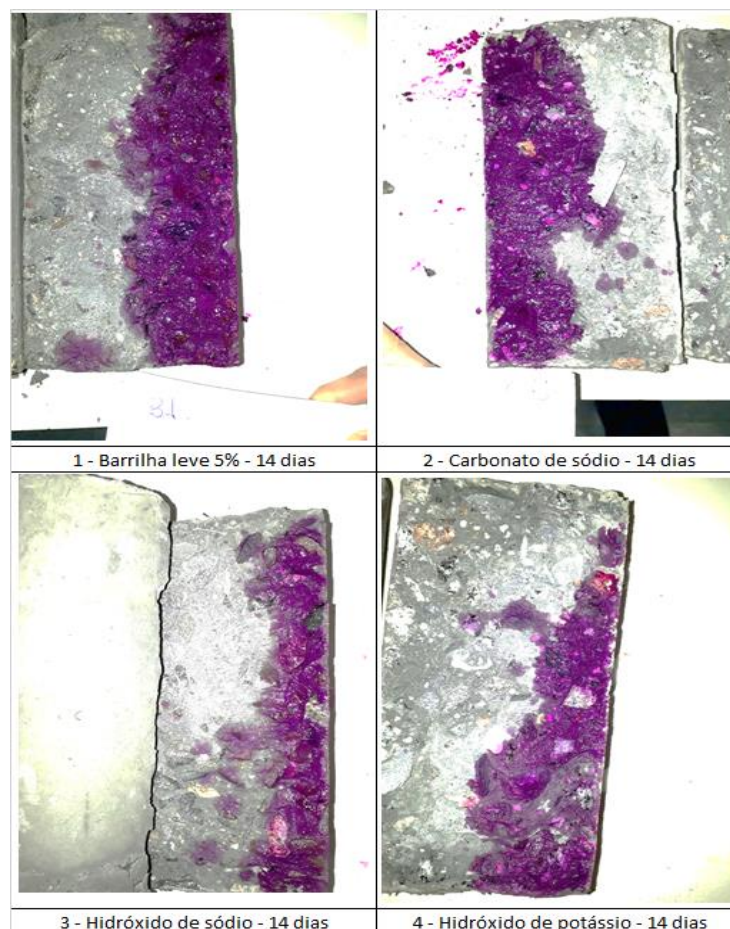


Figura 31: Corpos de prova rompidos diametralmente após 2 semanas de realcalinização

4.3. Absorção

Os resultados dos ensaios de absorção estão expressos dos Quadros 6 a 13 e também nos Gráficos 3 e 4 abaixo relacionados.

Pós Cura				
Idade (dias)	Massa seca (g)	Massa úmida (g)	Absorção (%)	Média
52	3698	3776	2,11%	1,92%
52	3726	3795	1,85%	
28	3758	3832	1,97%	
28	3654	3721	1,83%	
28	3670	3738	1,85%	

Quadro 6: Absorção dos corpos de prova pós cura

Pós Carbonatação				
Idade (dias)	Massa seca (g)	Massa úmida (g)	Absorção (%)	Média
87	3686	3803	3,17%	3,29%
87	3658	3771	3,09%	
63	3524	3651	3,60%	

Quadro 7: Absorção dos corpos de prova pós carbonatação

Barrilha leve 5%					
Método	Idade (dias)	Massa seca (g)	Massa úmida (g)	Absorção (%)	Média
Feltro	91	3762,5	3819	1,50%	1,47%
Feltro	91	3879,2	3935,3	1,45%	
Filme	91	3854,2	3896,9	1,11%	0,93%
Filme	91	3787,4	3815,7	0,75%	

Quadro 8: Absorção dos corpos de prova pós realcalinização com barrilha leve 5%

Hidróxido de Sódio					
Método	Idade (dias)	Massa seca (g)	Massa úmida (g)	Absorção (%)	Média
Feltro	115	3781,2	3830,9	1,31%	1,23%
Feltro	115	3756	3798,8	1,14%	
Filme	91	3730,7	3760,2	0,79%	0,92%
Filme	91	4007,1	4049,5	1,06%	

Quadro 9: Absorção dos corpos de prova pós realcalinização com Hidróxido de Sódio

Carbonato de Sódio					
Método	Idade (dias)	Massa seca (g)	Massa úmida (g)	Absorção (%)	Média
Feltro	115	3781,2	3828,5	1,25%	1,25%
Feltro	91	3957,6	4007,3	1,26%	
Filme	91	3829,9	3855,4	0,67%	0,66%
Filme	115	3601,2	3624,5	0,65%	

Quadro 10: Absorção dos corpos de prova pós realcalinização com Carbonato de Sódio

Hidróxido de Potássio					
Método	Idade (dias)	Massa seca (g)	Massa úmida (g)	Absorção (%)	Média
Feltro	91	3755,5	3811,5	1,49%	1,37%
Feltro	91	3782,5	3830	1,26%	
Filme	91	3832,8	3871,5	1,01%	1,09%
Filme	115	3794,4	3838,5	1,16%	

Quadro 11: Absorção dos corpos de prova pós realcalinização com Hidróxido de Potássio

Ensaio	Absorção (%)
Pós Cura	1,92%
Pós Carbonatação	3,29%
Barrilha leve 5%	1,20%
Hidróxido de Sódio	1,08%
Carbonato de Sódio	0,95%
Hidróxido de Potássio	1,23%

Quadro 12: Média da absorção dos corpos de prova após os ensaios

Absorção (%)		
Ensaio	Com Filme	Sem Filme
Barrilha leve 5%	1,47%	0,93%
Hidróxido de Sódio	1,23%	0,92%
Carbonato de Sódio	1,25%	0,66%
Hidróxido de Potássio	1,37%	1,09%

Quadro 13: Média dos ensaios de absorção com uso e não uso de filme protetor

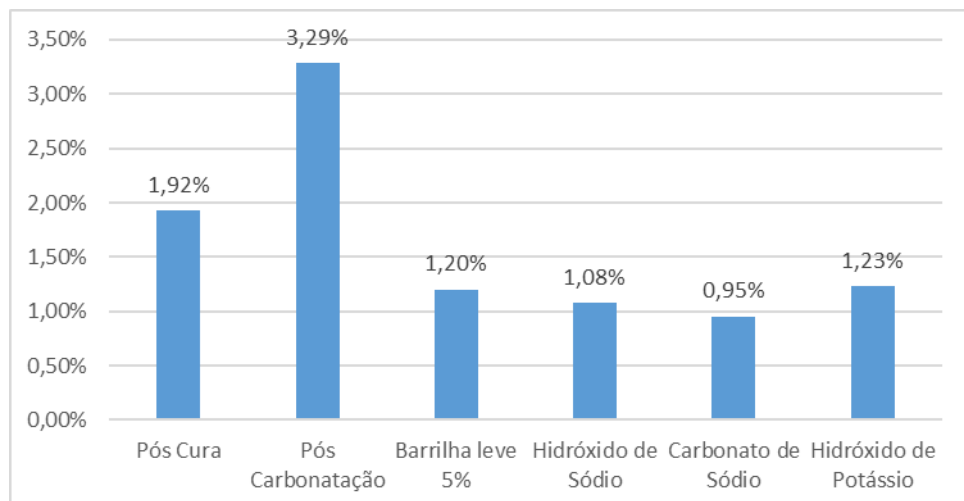


Gráfico 3: Média da absorção dos corpos de prova após os ensaios

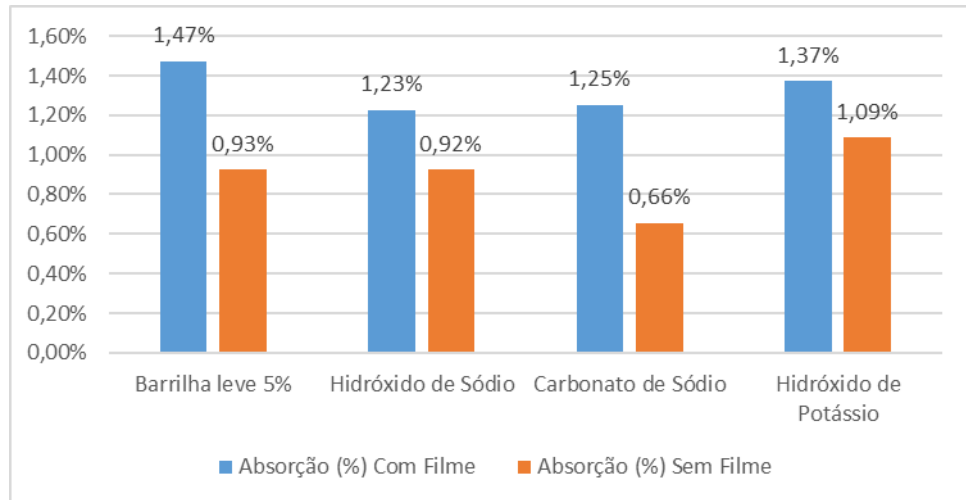


Gráfico 4: Média dos ensaios de absorção com uso e não uso de filme protetor

Esperava que a absorção para os ensaios de carbonatação fossem menores que os resultados obtidos antes do ensaio, uma vez que após a carbonatação uma vez que essa promove o preenchimento dos poros do concreto, diminuindo os espaços vazios para o preenchimento com água.

Isso leva a crer que os resultados de absorção podem não ter sido satisfatórios, uma vez que os mesmos corpos de prova foram utilizados para os ensaios de compressão.

Outro exemplo disso é a diferença da absorção entre os ensaios de realcalinização, que obtiveram valores bem superiores quando ensaiados com o uso de filme protetor, já que esses estavam mais úmidos após o término dos ensaios, como mostram as imagens, em outras palavras, os corpos de prova que não utilizaram os feltros protetores provavelmente estavam mais secos na pesagem antes de serem colocados no tanque de imersão.

4.4. Resistência à compressão

Os corpos de prova obtiveram os seguintes resultados quanto a compressão axial aos 28 dias, antes dos ensaios de carbonatação e realcalinização, como mostrado no Quadro 14.

Idade (dias)	Betonada	Compressão axial (MPa)
28	5	16,85
28	5	15,72

Quadro 14: Resistência à compressão aos 28 dias

O corpo de prova ensaiado aos 28 dias com maior resistência serviu de referência para projeção da resistência à compressão para as idades mais avançadas com objetivo de comparação em relação aos corpos de prova ensaiados quanto à carbonatação e a realcalinização.

A projeção foi baseada nas Equações 11 e 12, item 12.3.3 da NBR 6118 (ABNT, 2014) onde:

$$f_{ckj} = \beta_1 f_{ck} \quad (11)$$

Sendo β_1 :

$$\beta_1 = \exp\left\{s \left[1 - \left(\frac{28}{t}\right)^{\frac{1}{2}}\right]\right\} \quad (12)$$

O parâmetro s utilizado na expressão acima varia em função do tipo de cimento, sendo 0,38 para o CP IV, e t dado em dias. Levando em conta que os ensaios foram realizados no decorrer de 115 dias, obteve-se a seguinte projeção, como mostra o Gráfico 5.

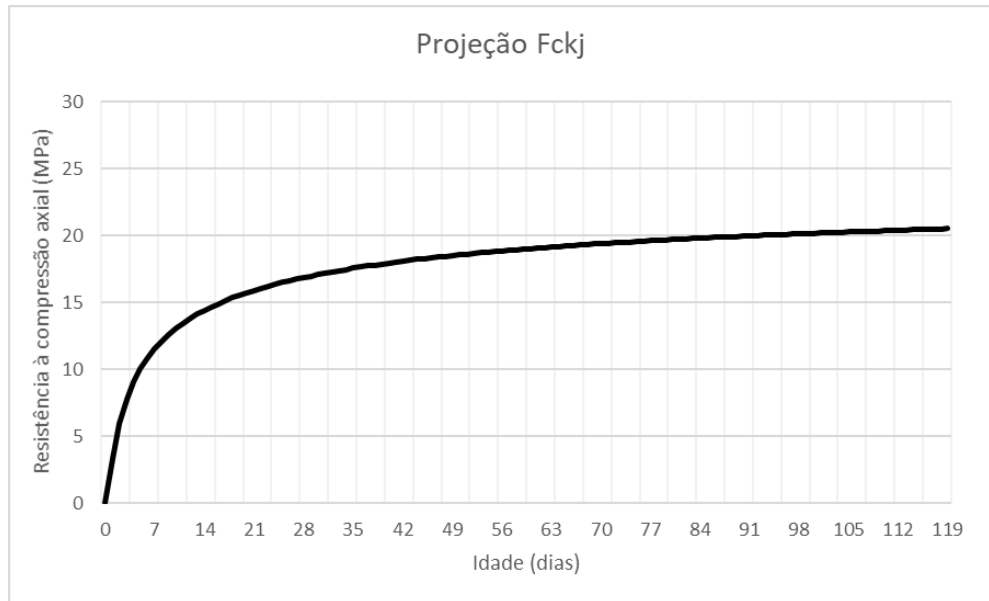


Gráfico 5: Projeção Fckj

Após uma semana de carbonatação a resistência à compressão obtida dos corpos de prova foi abaixo relacionada, como mostra o Quadro 15 e o Gráfico 6.

Pós primeira semana de carbonatação		
Idade (dias)	Betonada	Compressão axial (MPa)
62	2	24,52
62	2	12,60
38	4	14,22

Quadro 15: Resistência à compressão após uma semana em carbonatação

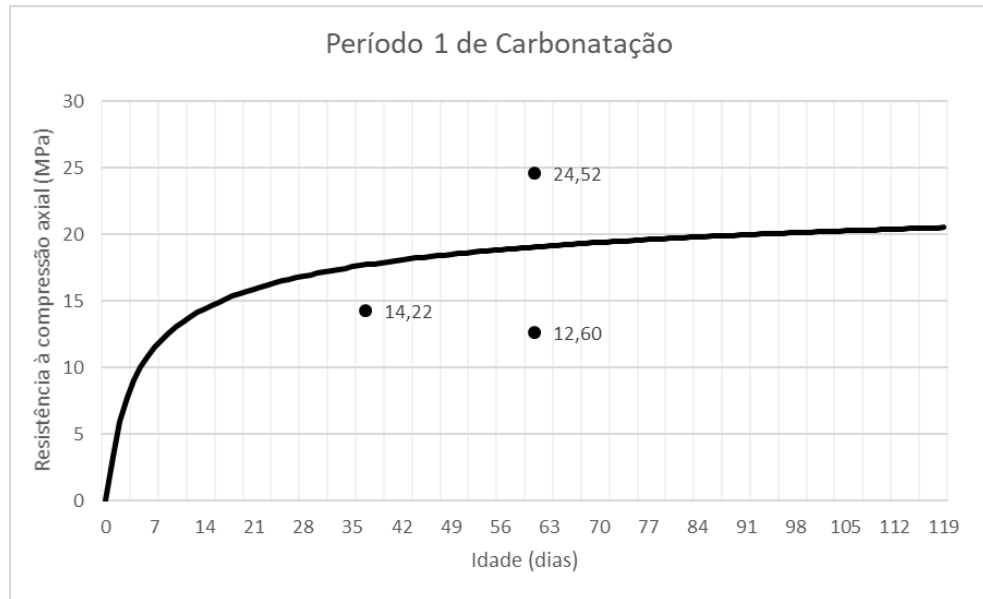


Gráfico 6: Resistência à compressão axial x Idade (uma semana na câmara de carbonatação)

Já na segunda semana de carbonatação, os resultados obtidos foram os seguintes, como mostram o Quadro 16 e o Gráfico 7:

Pós segunda semana de carbonatação		
Idade (dias)	Betonada	Compressão axial (MPa)
87	1	22,54
63	5	17,72
63	5	18,93

Quadro 16: Resistência à compressão após duas semanas em carbonatação

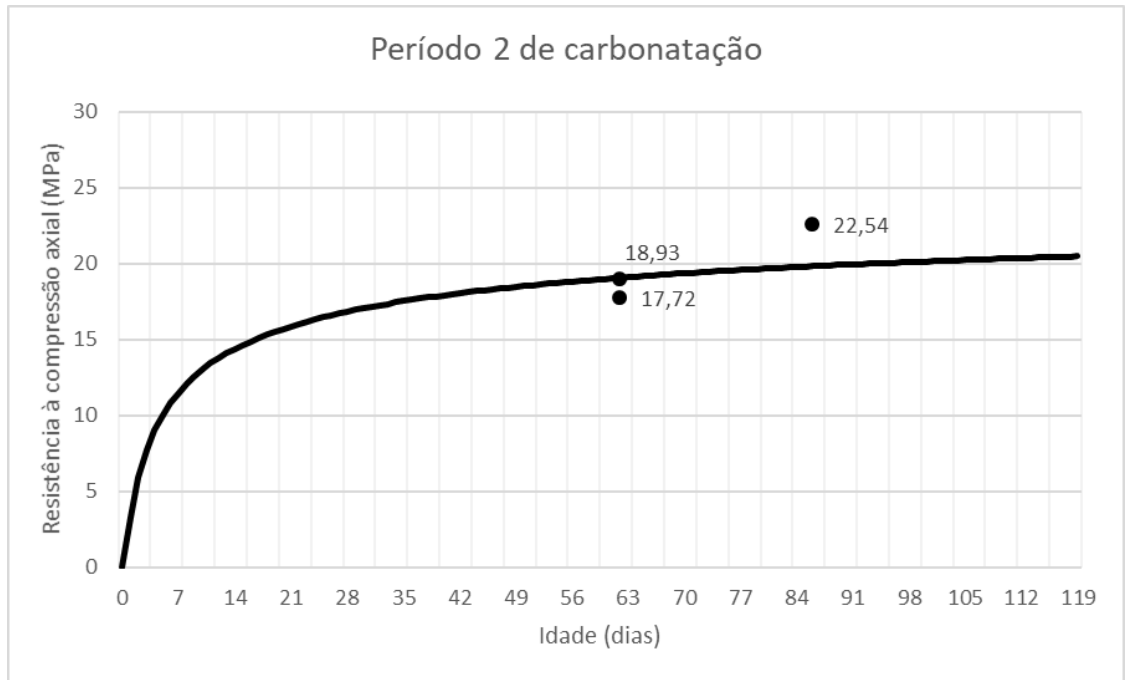


Gráfico 7: Resistência à compressão axial x Idade (duas semanas na câmara de carbonatação)

Os valores de resistência à compressão obtidos para as soluções alcalinas utilizadas nos ensaios de realcalinização foram os abaixo relacionados, como mostram os Quadros 17 ao 20 e Gráficos 8 ao 11:

Barrilha leve 5%			
Tipo	Idade (dias)	Betonada	Compressão axial (MPa)
Feltro	91	5	21,93
Feltro	91	4	20,93
Filme	91	5	23,09

Quadro 17: Resistência à compressão após realcalinização em barrilha 5%

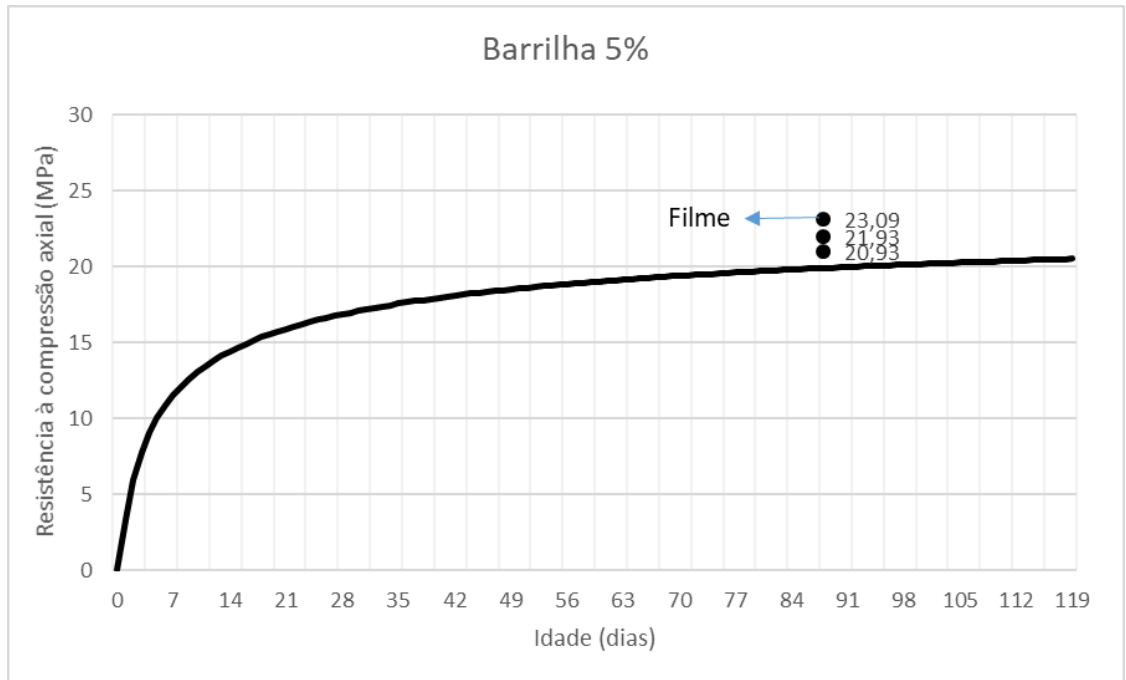


Gráfico 8: Resistência à compressão x Idade (realcalinização com barrilha 5%)

Hidróxido de Sódio			
Tipo	Idade (dias)	Betonada	Compressão axial (MPa)
Feltro	115	2	27,01
Feltro	115	2	22,26
Filme	91	3	26,16

Quadro 18: Resistência à compressão após realcalinização em Hidróxido de Sódio

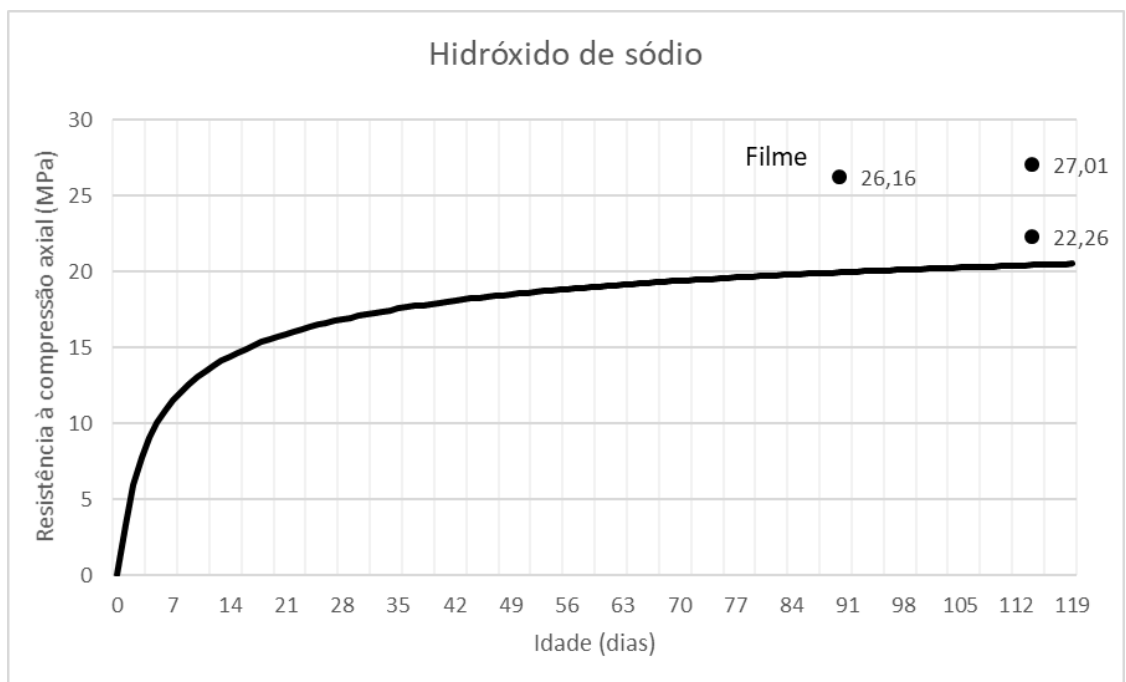


Gráfico 9: Resistência à compressão axial x idade (realcalinização com Hidróxido de Sódio)

Carbonato de Sódio			
Tipo	Idade (dias)	Betonada	Compressão axial (MPa)
Feltro	115	1	26,72
Feltro	91	4	11,06
Filme	91	3	19,47

Quadro 19: Resistência à compressão após realcalinização em Carbonato de Sódio

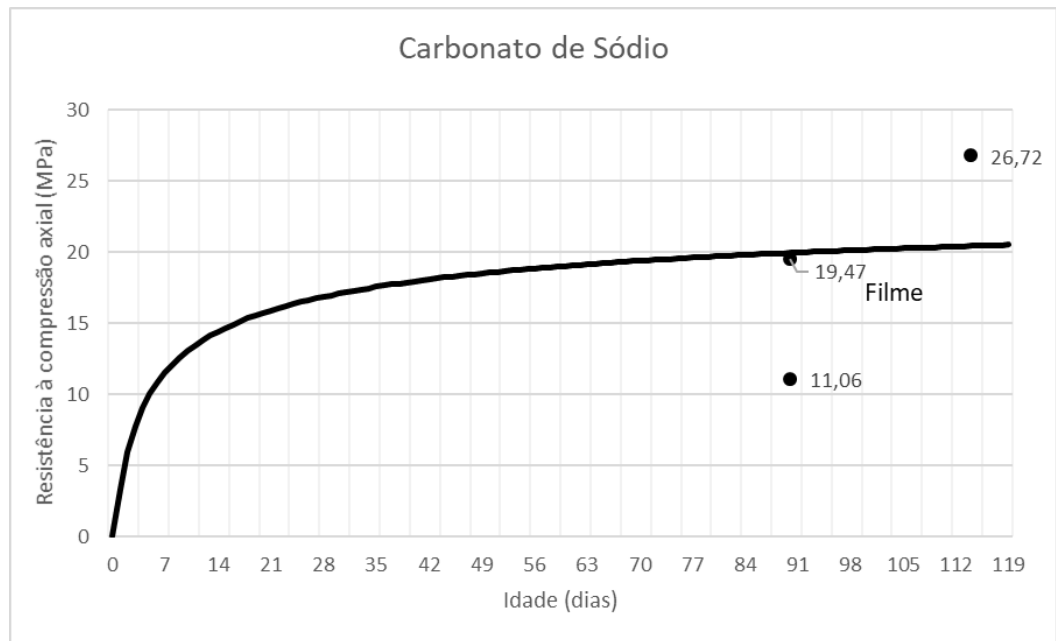


Gráfico 10: Resistência à compressão x Idade (realcalinização com Carbonato de Sódio)

Hidróxido de Potássio			
Tipo	Idade (dias)	Betonada	Compressão axial (MPa)
Feltro	91	5	21,79
Feltro	91	5	27,67
Filme	91	3	15,81

Quadro 20: Resistência à compressão após realcalinização em Hidróxido de Potássio

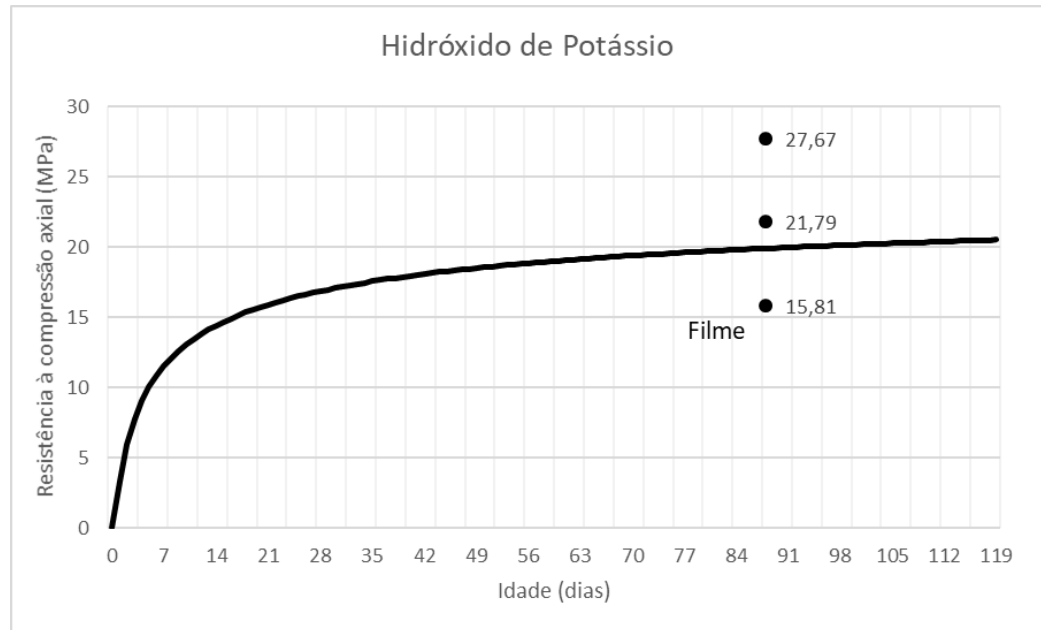


Gráfico 11: Resistência à compressão x Idade (realcalinização com Hidróxido de Potássio)

De acordo com a NBR 12655 (ABNT, 2006), entre os valores obtidos nos ensaios de compressão, deve-se adotar o maior valor de resistência, sendo assim, como se obteve maiores valores do que a projeção, pode-se afirmar que a carbonatação aumentou a resistência à compressão do concreto.

Assim como a carbonatação, a resistência à compressão dos corpos de prova ensaiados na realcalinização aumentou, podendo ser possível afirmar que após a carbonatação e a realcalinização os corpos de prova obtiveram resistência à compressão aumentada.

Obteve-se após a realcalinização valores acima e abaixo da projeção para o uso do filme para a proteção do fletro, não tornando possível a avaliação quanto a influência da realcalinização de diferentes métodos em relação à compressão.

5. CONCLUSÕES

5.1. Considerações finais

Foi possível analisar a eficiência das soluções alcalinas e dos métodos, pela superfície dos corpos de prova, e pelo pequeno avanço da frente de carbonatação, existente nos corpos de prova.

Como se pode observar nos resultados, os corpos de prova que ficaram com a superfície com a cor mais vermelho carmim, com a fenolftaleína, foram os corpos de prova que foram tratados pela Barrilha Leve 5%. Tanto a superfície do concreto, quanto a pequena profundidade que havia sido carbonatada, foram realcalinizadas por completo após 14 dias de tratamento. Sendo assim a Barrilha foi a solução mais eficiente, no mesmo intervalo de tempo, dentre as soluções testadas, para os dois tipos de aplicação da realcalinização química.

Observou-se também, que a carbonatação e a realcalinização aumentaram a resistência a compressão do concreto, porém, nada se pôde concluir sobre a resistência diferenciando os métodos de realcalinização, uma vez que esses apresentaram valores acima do projetado e abaixo do projetado, enquanto analisando apenas a realcalinização, obteve-se melhoria na resistência.

Devido a secagem dos corpos de prova não ter sido adequada, não foi possível avaliar a absorção de água nos ensaios realizados de carbonatação e realcalinização.

5.2. Trabalhos futuros

Para trabalhos futuros se sugere refazer os ensaios feitos deste trabalho utilizando para a carbonatação controle de umidade e teor de gás carbônico para maior efetividade do processo. Além disso, se sugere que se use corpos de prova destinados para os ensaios de resistência à compressão e absorção de modo que um não interfira nos resultados do outro. Outro ponto, seria verificar a efetividade do uso de feltros para a realcalinização após a carbonatação acelerada ter ocorrido de maneira efetiva. Estudar mais profundamente o uso da Barrilha Leve e sua efetividade combinado o uso dos feltros no avanço da frente de realcalinização. O uso de diversas

soluções alcalinas também é bem-vindo bem como o estudo da sua viabilidade econômica, comparativo de preços e disponibilidade de mercado.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 5738:2008: Procedimento para moldagem e cura de corpos de prova.** Rio de Janeiro, p. 6. 2008.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 5739:2007: Ensaios de compressão em corpos de prova cilíndricos.** Rio de Janeiro p. 8. 2007.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 6118:2014: Projeto de estruturas de concreto.** Rio de Janeiro, p. 256. 2014.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 7211:2005: Agregados para concreto – Especificação.** Rio de Janeiro, p. 9. 2005.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 9778:1987: Argamassa e concreto endurecidos - Determinação da absorção de água por imersão - Índice de vazios e massa específica.** Rio de Janeiro, p. 3. 1987.

ARAÚJO, Fernanda Wanderley Corrêa de. **Estudo da Repassivação da Armadura em Concretos Carbonatados Através da Técnica de Realcalinização Química.** 2009. 217 p. Tese de Doutorado – Universidade de São Paulo, São Paulo, 2009.

BERTOLINI, Luca. **Materiais de Construção: patologia, reabilitação, prevenção.** São Paulo: Oficina de Textos, 2013.

CÁNOVAS, Manuel Fernández. **Patologia e Terapia do Concreto.** 1. Ed. São Paulo: Editora Pini Ltda., 1988.

CASCUDO, Oswaldo. **O controle da Corrosão de Armaduras em Concreto.** 1. Ed. Goiânia, GO. Editora UFG, 1997.

HELENE, Paulo R. L. **Corrosão em Armaduras para Concreto Armado.** 1. Ed. São Paulo: Editora Pini Ltda., 1986.

PAULETTI, Cristiane. **Estimativa da carbonatação natural de materiais cimentícios a partir de ensaios acelerados e modelos de predição**. 2009. Tese de Doutorado – Universidade Federal do Rio Grande do Sul – Porto Alegre, 2009.

RAISDORFER, Janderson William. **Influência da adição ou substituição de adições minerais ao cimento Portland: Efeitos na carbonatação, absorção capilar e resistividade de concretos**. 2015. 151 p. Dissertação de Mestrado – Universidade Federal do Paraná – Curitiba, 2015

RIBEIRO, Philippe H. L. C.; MEIRA, Gibson R.; FERREIRA, Pablo R. R.; BARBOSA, Normando P.; Realcalinização eletroquímica de concretos carbonatados – eficiência do tratamento. **ENTAC 2010, XIII Encontro Nacional de Tecnologia do Ambiente Construído**. Canela/RS, p. 10, out. 2010.

REUS, G. C.; BECKER, A. C. C.; RAISDORFER, J.; SOUZA, D. J.; CEZARIO, H. C.; LENCZUK, B. S. T.; NIKKEL, S.; RODRIGUES, D. S.; MEDEIROS, M. H. F. Aplicação de soluções alcalinas pra a realcalinização de concretos carbonatados: uma alternativa para pontes de concreto armado. **4ª ExpoPavimentação**. Foz do Iguaçu/PR, p. 16, ago. 2015

REUS, G. C.; JESUS, A. R. de; MEDEIROS, M. H. F. de. Aplicação de solução comercial alcalina para realcalinização química de concretos carbonatados. **Revista Técnico-científica do CREA/PR** - Universidade Federal do Paraná – Curitiba, p. 13, 2017.

SÁ, Rodrigo Resende 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**. 2006. 155 p. Dissertação de Mestrado – Universidade Federal de Goiás – Goiânia, 2006.