



UNIVERSIDADE DE
COIMBRA

Maria Irene Marçal de Moura

TÉCNICAS CONSTRUTIVAS PARA
INTERVENÇÃO/REABILITAÇÃO NO BETÃO ARMADO
CARBONATADO – CASOS DE ESTUDO

Dissertação no âmbito do Mestrado de Reabilitação de Edifícios, Ramo Estrutural, orientada pelo Professor Doutor Paulo Manuel Mendes P. da Providência e Costa e apresentada Faculdade de Ciências e Tecnologia da Universidade de Coimbra, ao Departamento de Engenharia Civil.

Fevereiro de 2023

Faculdade de Ciências e Tecnologia da Universidade de Coimbra
Departamento de Engenharia Civil

Maria Irene Marçal de Moura

TÉCNICAS CONSTRUTIVAS PARA INTERVENÇÃO/REABILITAÇÃO NO BETÃO ARMADO CARBONATADO — CASOS DE ESTUDO

CONSTRUCTION TECHNIQUES FOR INTERVENTION/REHABILITATION IN CARBONATED REINFORCED CONCRETE — CASE STUDIES

Dissertação de Mestrado de Reabilitação de Edifícios, com Especialização em Reabilitação estrutural de edifícios,
orientada pelo Professor Doutor Paulo Manuel Mendes P. da Providência e Costa.

Esta Dissertação é da exclusiva responsabilidade do seu autor. O Departamento de Engenharia Civil da FCTUC
declina qualquer responsabilidade, legal ou outra, em relação a erros ou omissões que possa conter.

Fevereiro de 2023



UNIVERSIDADE D
COIMBRA

AGRADECIMENTOS

Há muito tempo eu me imaginava estudando no exterior, por isso, primeiramente eu gostaria de agradecer aos meus pais, Nicolle Fernanda e Carlos Alberto, pois nada disso teria sido possível se eles não me encorajassem a vir para Portugal realizar esse grande sonho. Nem sempre foi fácil seguir esse caminho a distância, mas o apoio que eu recebi deles e da minha família me impulsionou a superar cada obstáculo e conquistar minhas vitórias.

Agradeço do fundo do meu coração a minha avó, a tios e tias, primos e primas, que através de mensagens e ligações tiveram tanta paciência comigo, e me mandaram forças para continuar a caminhada até aqui. A minha família certamente teve mais confiança em mim do que eu mesma, e esse foi o combustível que moveu todos os dias, aqui está o meu singelo muito obrigada!

Aos meus melhores amigos, que escutaram todas as histórias mais aleatórias do meu dia a dia no exterior, que me apoiaram nas minhas batalhas internas, e me deram todo suporte, mesmo a distância, muito obrigada, não teria aguentado isso tudo sozinha. Um pedaço desse mestrado eu devo a vocês!

Preciso agradecer também ao apoio da Tecomat Engenharia para o desenvolvimento desse estudo, empresa que trabalhei enquanto estava em Recife (PE), e que me apresentou esta área tão importante na engenharia civil, e de especial significado para mim. Agradeço ao Eng. João Ribeiro, que me permitiu partilhar casos reais de extrema importância para o debate do tema, e em especial, ao Eng. Rodrigo Pereira e a Eng. Juliana Rodrigues que partilharam o seu tempo comigo, trocando ideias, tirando dúvidas, e até mesmo me tranquilizando durante todo esse processo.

Por último, mas não menos importante, eu gostaria de agradecer ao meu orientador, Prof. Paulo Providência, por ter aceitado esse desafio comigo, mesmo de última hora. Ele foi o primeiro contato que eu tive com o Mestrado de Reabilitação de Edifícios na Universidade de Coimbra, e eu sou feliz em poder contar com seu conhecimento e apoio no fim deste ciclo.

RESUMO

O betão armado é o material mais utilizado na construção de edifícios. No entanto, é sabido que os produtos e sistemas utilizados nem sempre permitem protegê-lo do surgimento mais ou menos precoce de manifestações patológicas, quanto mais não seja porque todos os materiais estão sujeitos à degradação com o tempo. Mesmo que o projeto cumpra todos os critérios indicados nas normas vigentes, a execução da obra pode muitas vezes comprometer a durabilidade da edificação por não cumprir o projeto. O uso de materiais diferentes dos indicados, um recobrimento mal executado, a ausência de manutenção, entre outros fatores, podem ser a causa inicial de problemas graves, como por exemplo a corrosão das armaduras. Neste trabalho, será analisado um dos fatores mais determinantes na corrosão no aço: a carbonatação do betão de recobrimento. Apesar de ser um assunto muito estudado, os métodos de prevenção da carbonatação (ou de prevenção da corrosão apesar da carbonatação) e de intervenção no betão carbonatado são diversos e, desta forma, o profissional que se depara com uma dada situação deve ter conhecimento suficiente para decidir que técnica utilizar. De outra forma, a reabilitação da estrutura poderá ser insatisfatória. Este trabalho começa por apresentar um estado da arte sobre a carbonatação de estruturas de betão armado: caracterização deste processo e seu envolvimento como antecedente para a corrosão das armaduras; características do betão e do ambiente que influenciam este fenómeno; os ensaios utilizados na inspeção e avaliação, os métodos e técnicas que podem ser utilizados para resolução do problema e as normas aplicáveis para a reparação. É dada uma particular atenção a casos reais de obras de reparação. A apresentação dos estudos de caso tem como objetivo analisar e comparar as melhores soluções a adotar em edificações com betão carbonatado. A tese será desenvolvida com base em duas fontes principais de informação: por um lado, documental, ou seja, livros, relatórios de pesquisa, dissertações e artigos técnicos ou científicos, abrangendo estudos nacionais e internacionais, e, por outro lado, o acervo de empresas que trabalharam na reabilitação de edifícios. Assim, espera-se que o presente trabalho possa ser útil para futuros casos práticos, mostrando as técnicas mais utilizadas em campo e proporcionando ajuda aos profissionais do ramo em suas decisões.

Palavras-chave: Betão; Carbonatação; Reabilitação; Intervenção; Casos práticos.

ABSTRACT

Reinforced concrete is the most used material in the construction of buildings. However, it is known that the products and systems used do not always protect against the more or less early appearance of pathological manifestations, not least because all materials are subject to degradation over time. Even if the project complies with all the criteria indicated in the current regulations, the execution of the work can often compromise the durability of the building by not complying with the project. The use of materials other than those indicated, poorly executed coating, lack of maintenance, among other factors, can be the initial cause of serious problems, such as reinforcement corrosion. In this work, one of the most determining factors in steel corrosion will be analyzed: the carbonation of the overlay concrete. Despite being a much studied subject, the methods of preventing carbonation (or preventing corrosion despite carbonation) and intervention in carbonated concrete are diverse and, therefore, the professional who is faced with a given situation must have sufficient knowledge to decide which technique to use. Otherwise, the rehabilitation of the structure may be unsatisfactory. This work begins by presenting a state of the art on the carbonation of reinforced concrete structures: characterization of this process and its involvement as an antecedent for reinforcement corrosion; characteristics of concrete and the environment that influence this phenomenon; the tests used in the inspection and evaluation, the methods and techniques that can be used to solve the problem and the applicable standards for the repair. Particular attention is given to real cases of repair works. The presentation of case studies aims to analyze and compare the best solutions to adopt in buildings with carbonated concrete. The thesis will be developed based on two main sources of information: on the one hand, documentary, that is, books, research reports, dissertations and technical or scientific articles, covering national and international studies, and, on the other hand, the collection of companies that worked on the rehabilitation of buildings. Thus, it is expected that the present work can be useful for future practical cases, showing the techniques most used in the field and providing help to professionals in the field in their decisions.

Keywords: Concrete; Carbonation; Rehabilitation; Intervention; Practical cases.

ÍNDICE

AGRADECIMENTOS	1
RESUMO	2
ABSTRACT	3
ÍNDICE.....	4
ÍNDICE DE FIGURAS	6
ÍNDICE DE QUADROS	7
1. INTRODUÇÃO.....	1
1.1 ENQUADRAMENTO.....	1
1.2 OBJETIVOS	2
1.3 ESTRUTURA DO TRABALHO	2
2. ESTADO DA ARTE: BETÃO, DURABILIDADE, CARBONATAÇÃO E CORROSÃO .	4
2.1 BETÃO E SUA COMPOSIÇÃO QUÍMICA	4
2.2 PARÂMETROS DE PROJETO DO BETÃO	5
2.3 DURABILIDADE E VIDA ÚTIL.....	9
2.4 CARBONATAÇÃO	10
2.4.1 PROCESSOS ENVOLVIDOS.....	10
2.4.2 CONDIÇÕES QUE INFLUENCIAM NO PROCESSO DA CARBONATAÇÃO	14
2.5 CORROSÃO.....	16
3. ENSAIOS PARA INSPEÇÃO/AVALIAÇÃO	19
4. AÇÕES MITIGATÓRIAS (ESTRUTURAS NOVAS) E MÉTODOS DE INTERVENÇÃO (ESTRUTURAS EXISTENTES).....	25
4.1 AÇÕES MITIGATÓRIAS EM ESTRUTURAS NOVAS	26
4.2 MÉTODOS DE INTERVENÇÃO EM ESTRUTURAS EXISTENTES	27
5. CASOS DE ESTUDO	30
5.1 CASO 1 – BRASIL.....	30
5.2 CASO 2 – BRASIL.....	33
5.3 CASO 3 – BRASIL.....	36

5.4 CASO 4 – MÉXICO	38
6. PRINCIPAIS CONCLUSÕES (E TRABALHOS FUTUROS).....	40
7. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	43
ANEXO A	50

ÍNDICE DE FIGURAS

- Figura 2.1 - Diagrama de Pourbaix para o sistema água/ferro a 25°C
- Figura 2.2 - Perfis de concentração de hidróxidos na zona de carbonatação
- Figura 2.3 - Difusão do CO₂ no betão, dando início a carbonatação
- Figura 2.4 - Grau de carbonatação em função da humidade relativa do ar
- Figura 2.5 – Representação do processo de corrosão da armadura.
- Figura 2.6 – Gráfico que representa a vida útil de acordo com a corrosão das armaduras, modelo proposto por Tuutti (1982)
- Figura 3.1 - Representação do ensaio de fenolftaleína
- Figura 3.2 - Representação da profundidade de carbonatação
- Figura 3.3 - Ensaio de Resistividade Elétrica em pilar
- Figura 3.4 - Exemplo do circuito de um eletrodo de referência
- Figura 3.5 - Ensaio de Potencial de Corrosão em pilar
- Figura 5.1 - Planta de divisão dos blocos
- Figura 5.2 – Exemplos de pilares encontrados na inspeção visual dos 4 blocos
- Figura 5.3 – Exemplos de aplicação da solução de fenolftaleína diretamente à superfície ou em carotes.
- Figura 5.4 – Vista 3D e esboço com dimensões do reservatório
- Figura 5.5 – Resultado da aspersion com solução de fenolftaleína em zonas quebradas de fresco de 3 pilares
- Figura 5.6 – Exemplo de viga com corrosão de armadura.
- Figura 5.7 – Exemplos de aplicação da solução de fenolftaleína em carotes
- Figura 5.8 – Localização da torre TP U2, destacada em amarelo
- Figura 5.9 – Fotos da inspeção com pontos de corrosão com armadura exposta, fissuras, reparos localizados, além de descolamento do betão

ÍNDICE DE QUADROS

Quadro 2.1 - Classes de exposição em função das condições ambientais

Quadro 2.2 - Classes de agressividade ambiental (CAA)

Quadro 2.3 - Classes indicativas de resistência de acordo com as Classes de exposição

Quadro 2.4 - Valores do recobrimento mínimo, $c_{min,dur}$ requisitos relativos à durabilidade das armaduras para betão armado, de acordo com a EN 10080

Quadro 3.1 - Risco de corrosão da armadura em relação ao valor da resistividade elétrica

Quadro 3.2 - Potencial de corrosão relacionado ao eletrodo de referência Cu/CuSO₄, de acordo com ASTM C 876 – 91

Quadro 3.3 - Métodos mais sofisticados de medição de carbonatação

Quadro 6.1 – Resumo dos métodos aplicados nos casos de estudo

1. INTRODUÇÃO

1.1 ENQUADRAMENTO

A área de reabilitação de edifícios cresceu muito nos últimos anos devido a grande demanda de construções com manifestações patológicas, que chamam atenção não só do setor da engenharia civil, quanto dos cidadãos em geral. No entanto, Sousa (2011) afirmou que ainda “é muito reduzido o volume de trabalhos de manutenção, de reparação e de reabilitação face ao volume total de trabalhos de construção realizados”, mostrando a grande necessidade de intervenção no património construído. O betão armado, em particular, pode apresentar diversos tipos de anomalias, de diversas causas, que surgem com o passar do tempo, prejudicando o edificado tanto em questões de funcionalidade como estruturalmente.

De entre os principais problemas que atingem o betão armado, a corrosão de armaduras é o mais recorrentemente observado, Santos (2014). A corrosão pode ter consequências estruturais brutais, como por exemplo, redução da secção da armadura e fissuração do betão, fragilizando a estrutura e diminuindo a sua resistência, podendo levá-la ao colapso, Moura (2012).

São dois os principais iniciadores da corrosão em estruturas de betão armado: a carbonatação e os cloretos. Embora a carbonatação esteja sempre presente, o ataque por cloretos pode ser bem mais severo. Estes agentes estão associados ao início do processo, ou seja, à criação das condições para que a corrosão possa acontecer. Depois de criadas estas condições, a corrosão só acontecerá de forma grave em condições específicas de humidade. Nesta dissertação será discutido apenas o processo de carbonatação do betão, mostrando como as reações impactam na durabilidade e na vida útil da construção.

A carbonatação em si é um processo natural ao betão, sendo esperado que o atinja com o passar do tempo, depois de ultrapassar a barreira proporcionada por algum revestimento. Mas, pelo facto de destruir a protecção das armaduras, despassivando-as, e abrir caminho para a sua corrosão, se torna um fator de risco que deve ser combatido ou, pelo menos, considerado no projeto e execução das edificações com estrutura de betão armado. Thiery (2005) apud Reis et

al. (2018) enfatiza quando diz que a carbonatação é um dos principais motivos de deterioração, já que “é um dos ataques mais incidentes nas estruturas de betão”.

Em alguns casos, o processo ainda pode estar na fase inicial, ou seja, a frente de carbonatação ainda está afastada da armadura, e uma reparação simples pode resolver o problema. Contudo, devido a falta de acompanhamento e manutenção, muitas estruturas se encontram em estágios elevados de degradação, sendo necessário uma intervenção detalhada e de alto nível. De qualquer maneira, é preciso entender claramente o que afetou a estrutura, saber o que motivou a aparição de certa patologia, para que assim seja possível estabelecer um plano de intervenção adequado, seguindo as normativas existentes, selecionando técnicas apropriadas e materiais de qualidade, garantindo que a reabilitação seja eficiente e duradoura, Henriques (2016).

1.2 OBJETIVOS

A dissertação tem como objetivo apresentar as técnicas de intervenção para reabilitação de estruturas com betão carbonatado, que já foram aplicadas na prática, e analisar como tomar uma decisão acertada a respeito da recuperação da edificação. Além de procurar fazer uma abordagem ampla sobre o conceito e as variáveis correlacionadas ao fenómeno da carbonatação, expondo formas de prevenir, detetar e reparar estruturas de betão armado com esta manifestação patológica, se apresentam exemplos práticos e reais para analisar/comprovar a utilização e eficácia dos métodos de restauração.

1.3 ESTRUTURA DO TRABALHO

Tendo em conta os objetivos apresentados, a presente tese se divide em seis capítulos. No primeiro capítulo, Introdução, é feita uma pequena apresentação do que será abordado na dissertação, a respeito do betão armado e a carbonatação. No segundo capítulo, Estado da arte: Betão, Durabilidade, Carbonatação e Corrosão, é exposto um pouco das normas aplicadas nesse estudo, e como elas conceituam durabilidade e vida útil de uma estrutura de betão armado, além de explicar a carbonatação e todos os fatores envolvidos nesse processo.

O terceiro capítulo aborda os diferentes tipos de ensaios que podem ser utilizados para identificar a carbonatação e sua profundidade numa estrutura, Ensaios para inspeção/avaliação. Já o quarto capítulo, Ações mitigatórias (estruturas novas) e métodos de intervenção (estruturas

existentes), fala sobre o que deve ser feito em vista de proteger as estruturas de betão armado novas e reabilitar as que foram atingidas pelo processo de carbonatação.

O quinto capítulo aborda os Casos de estudo, com o objetivo de exemplificar obras reais reabilitadas: quais as técnicas e materiais escolhidos, e como foi possível chegar a essas conclusões. Criando um comparativo com o que é discutido na teoria e como é executado na prática. Por fim, o sexto capítulo é referente as Principais conclusões e trabalhos futuros, onde é feito um resumo do que foi apresentado na dissertação, nomeando-se os resultados alcançados com este trabalho. Além de sugestão para futuros trabalhos que possam dar seguimento ao estudo, tão importante na atualidade.

2. ESTADO DA ARTE: BETÃO, DURABILIDADE, CARBONATAÇÃO E CORROSÃO

2.1 BETÃO E SUA COMPOSIÇÃO QUÍMICA

O betão é uma mistura de materiais, incluindo cimento hidráulico, que, quando este reage com a água, formam uma pasta que endurece e ganha resistência. Para além do cimento e da água necessária à sua hidratação, a mistura contém agregados finos e grossos. Embora os constituintes citados sejam suficientes, podem usar-se adições e adjuvantes para melhorar algumas das suas propriedades, Costa e Appleton (2002).

A relação água/cimento e o traço afetam as propriedades do betão fresco, que pode ser mais maleável ou mais consistente, e do betão endurecido, incluindo a proteção contra os agentes agressivos. Para isso é preciso conhecer as propriedades de cada constituinte:

- **Cimento:** é formado pela combinação de argila e calcário, que durante seu processo de cozedura, geram novos compostos chamados de clínquer. Este material moído, gera o cimento portland, ao qual se podem acrescentar adições. “As propriedades do cimento, nomeadamente o seu comportamento mecânico, dependem da sua composição química e da finura obtida na moagem” (Costa e Appleton, 2002). O silicato tricálcico (C3S), o silicato bicálcico (C2S), o aluminato tricálcico (C3A) e o aluminoferrato tetracálcico (C4AF) são os elementos constituintes predominantes no cimento portland, onde os dois primeiros são os principais responsáveis pela resistência da pasta, Costa e Appleton (2002).
- **Agregados:** são divididos entre materiais finos e grossos, e o formato de seus grãos afeta algumas características do betão, como por exemplo a trabalhabilidade. De acordo com Costa e Appleton (2002), “a granulometria e a resistência são as propriedades mais importantes dos agregados”, pois acabam por interferir na quantidade necessária dos outros constituintes, para preenchimentos dos vazios existentes, influenciando também na trabalhabilidade e resistência do betão.
- **Água:** é um fator de extrema importância, tanto na fase do betão fresco quanto endurecido. Ela deve ser utilizada em quantidade suficiente para possibilitar as reações de hidratação do cimento e garantir trabalhabilidade apropriada a mistura, Costa e

Appleton (2002). O aumento da porosidade do betão, por exemplo, pode ser reflexo da água excedente que após evaporação deixou vazios na estrutura. Também é imprescindível que a água utilizada seja livre de substâncias nocivas, que possam reagir no futuro e prejudicar o betão.

- Adições: são materiais acrescentados ao, ou combinados com o, cimento portland com o objetivo de “melhorar certas propriedades ou adquirir propriedades especiais”, Costa e Appleton (2002). Alguns exemplos de adições bastante utilizados são: sílicas, cinzas volantes, pozolanas, filer calcário, escórias de alto forno, entre outros. Dependendo da quantidade utilizada, as adições podem interferir na concentração de hidróxido de cálcio livre no betão.
- Adjuvantes: são materiais acrescentados ao betão com o objetivo de “modificar as propriedades tecnológicas do betão”, Costa e Appleton (2002). Os adjuvantes modificam as propriedades do betão, fresco e/ou endurecido, podendo alterar a quantidade necessária de outros constituintes básicos da mistura (por exemplo, reduzir a quantidade de água de amassadura necessária). Eles podem colaborar na trabalhabilidade, atrasar ou agilizar a presa, reduzir a permeabilidade, inibir a corrosão de armaduras, entre outros efeitos (Costa e Appleton, 2002).

2.2 PARÂMETROS DE PROJETO DO BETÃO

O betão armado é o material mais utilizado na construção. No entanto, os profissionais, por vezes, por achar que dominam as técnicas relativas à produção e execução em obras com este material, negligenciam cuidados básicos, que podem fazer toda diferença no produto final. De acordo com André (2013), todas as fases do processo construtivo, desde a conceção e projeto à construção, precisam receber atenção, devido a importância de cada uma, sendo necessário o seu acompanhamento e supervisão. Para além disso, é também necessário que os usuários cumpram as indicações contidas no plano de manutenção e monitorização da edificação que deverá acompanhar o projeto. Estes cuidados, se executados de forma correta, ajudarão a estrutura a suportar durante mais tempo as condições agressivas do meio, “(...) mantendo a sua forma, qualidade, desempenho e estabilidade inicialmente exigidas e estudadas” (André, 2013).

O EN 1992-1-1 (Eurocódigo 2) enfatiza que para que cada elemento estrutural seja preservado, durante a vida útil da estrutura, certos critérios de durabilidade precisam ser atendidos nas sucessivas etapas: concepção estrutural, seleção dos materiais, pormenores construtivos, execução, controlo da qualidade, inspeções, verificações e nas disposições particulares.

Assim sendo, as normativas, como o Eurocódigo 2 em Portugal, e a NBR 6118 no Brasil, definem requisitos para as edificações e suas características particulares, como por exemplo o sítio em que estão localizadas. Pode-se ver no Quadro 2.1 (para Portugal) e no Quadro 2.2 (para o Brasil) os níveis em que o betão pode estar exposto quanto as condições ambientais de entorno, que influenciam diretamente na concepção do projeto.

Quadro 2.1 - Classes de exposição em função das condições ambientais (Eurocódigo 2, 2004).

Designação da classe	Descrição do ambiente	Exemplos informativos de condições em que podem ocorrer as classes de exposição
1 Nenhum risco de corrosão ou ataque		
X0	Parra betão sem armadura ou elementos metálicos embebidos: todas as exposições excepto em situação de gelo/degelo, abrasão ou ataque químico.	Betão no interior de edifícios com uma humidade do ar ambiente muito baixa.
2 Corrosão induzida por carbonatação		
XC1	Seco ou permanentemente húmido.	Betão no interior de edifícios com uma humidade do ar ambiente baixa. Betão permanentemente submerso em água.
XC2	Húmido, raramente seco.	Superfícies de betão sujeitas a contacto prolongado com água. Um grande número de fundações.
XC3	Humidade moderada.	Betão no interior de edifícios com uma humidade do ar ambiente moderada ou elevada. Betão exterior protegido da chuva.
XC4	Alternadamente húmido e seco.	Superfícies de betão sujeitas a contacto com água, não incluídas na classe de exposição XC2.
3 Corrosão induzida por cloretos		
XD1	Humidade moderada.	Superfícies de betão expostas a cloretos transportados pelo ar.
XD2	Húmido, raramente seco.	Piscinas. Elementos de betão expostos a águas industriais contendo cloretos.
XD3	Alternadamente húmido e seco.	Elementos de pontes expostos a pulverizações contendo cloretos. Pavimentos. Lajes de parques de estacionamento.
4 Corrosão induzida por cloretos presentes na água do mar		
XS1	Exposto ao sal transportado pelo ar mas não em contacto directo com a água do mar.	Estruturas próximas da costa ou na costa.
XS2	Permanentemente submerso.	Elementos de estruturas marítimas.
XS3	Zonas sujeitas aos efeitos das marés, da rebentação e da neblina marítima.	Elementos de estruturas marítimas.
5 Ataque gelo/degelo		
XF1	Saturação moderada em água, sem produto descongelante.	Superfície verticais de betão expostas à chuva e ao gelo.
XF2	Saturação moderada em água, com produto descongelante.	Superfícies verticais de betão de estruturas rodoviárias expostas ao gelo e a produto descongelantes transportados pelo ar.
XF3	Saturação elevada em água, sem produtos descongelantes.	Superfícies horizontais de betão expostas à chuva e ao gelo.
XF4	Saturação elevada em água com produtos descongelantes ou com água do mar.	Estradas e tabuleiros de pontes expostos a produtos descongelantes. Superfícies de betão expostas a

		pulverizações directas contendo produtos descongelantes e expostas ao gelo. Zonas sujeitas aos efeitos da rebentação de estruturas marítimas expostas ao gelo.
6 Ataque químico		
XA1	Ambiente químico ligeiramente agressivo, de acordo com a EN 206-1.	Terrenos naturais e água no terreno.
XA2	Ambiente químico moderadamente agressivo, de acordo com a EN 206-1.	Terrenos naturais e água no terreno.
XA3	Ambiente químico altamente agressivo, de acordo com a EN 206-1.	Terrenos naturais e água no terreno.

Quadro 2.2 - Classes de agressividade ambiental (CAA) (NBR 6118, 2014).

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

^a Pode-se admitir um microclima com uma classe de agressividade mais branda (uma classe acima) para ambientes internos secos (salas, dormitórios, banheiros, cozinhas e áreas de serviço de apartamentos residenciais e conjuntos comerciais ou ambientes com concreto revestido com argamassa e pintura).

^b Pode-se admitir uma classe de agressividade mais branda (uma classe acima) em obras em regiões de clima seco, com umidade média relativa do ar menor ou igual a 65 %, partes da estrutura protegidas de chuva em ambientes predominantemente secos ou regiões onde raramente chove.

^c Ambientes quimicamente agressivos, tanques industriais, galvanoplastia, branqueamento em indústrias de celulose e papel, armazéns de fertilizantes, indústrias químicas.

Contudo, os parâmetros ambientais são apenas o início do processo, pois o que garante que o betão tenha um bom desempenho são suas características intrínsecas a longo prazo. A NBR 6118 (2014) destaca que “a durabilidade das estruturas é altamente dependente das características do betão e da espessura e qualidade do betão do recobrimento da armadura”. Por isso é necessário que a escolha do tipo de betão seja apropriada a cada situação. Por exemplo, o Quadro 2.3, retirado do Anexo E do Eurocódigo 2, informativo, mostra a classe indicativa de resistência do betão de acordo com a classe de exposição.

Quadro 2.3 - Classes indicativas de resistência de acordo com as Classes de exposição (Anexo E - Eurocódigo 2, 2004).

Classes de Exposição de acordo com o Quadro 4.1										
Corrosão										
Classe indicativa de resistência	Corrosão induzida por carbonatação				Corrosão induzida por cloretos			Corrosão induzida pelos cloretos da água do mar		
	XC1	XC2	XC3	XC4	XD1	XD2	XD3	XS1	XS2	XS3
	C20/25	C25/30	C30/37		C30/37		C35/45	C30/37	C35/45	

Como refere André (2013), manifestações patológicas provenientes de reações químicas, como a carbonatação, são derivadas da combinação de agentes internos (características próprias) e externos (intempéries) ao betão. Uma das funções do recobrimento é justamente a proteção relativamente aos últimos. Ou seja, o recobrimento dos elementos estruturais é de essencial importância na proteção contra agentes externos, prejudiciais ao betão e a armadura (Figueiredo e Meira, 2013), funcionando como uma barreira físico-química, além de promover uma “transmissão eficaz das forças de aderência” e “uma adequada resistência ao fogo”, como explica o EN 1992-1-1. Normativamente, o recobrimento nominal (c_{nom}) deve cumprir com critérios de aderência e de condições ambientais, sendo especificado como a soma do recobrimento mínimo (c_{min}) mais uma margem para as tolerâncias de execução (Δc_{dev}).

De modo a atingir estes objetivos o EN 1992-1-1 estabelece uma espessura mínima para o recobrimento, definida pelo máximo dos três valores seguintes:

- $c_{min,b}$;
- $c_{min,dur} + \Delta c_{dur,\gamma} - \Delta c_{dur,st} - \Delta c_{dur,add}$;
- 10 mm;

em que:

- $c_{min,b}$ - recobrimento mínimo para os requisitos de aderência;
- $c_{min,dur}$ - recobrimento mínimo relativo às condições ambientais;
- $\Delta c_{dur,\gamma}$ - margem de segurança;
- $\Delta c_{dur,st}$ - redução do recobrimento mínimo no caso de utilização de aço inoxidável;
- $\Delta c_{dur,add}$ - redução do recobrimento mínimo no caso de protecção adicional.

O Quadro 2.4 apresenta o recobrimento mínimo indicado pela norma, de acordo com a classe de exposição ambiental (Xx) e com a classe estrutural (Sx).

Quadro 2.4 - Valores de $c_{min,dur}$, relativo à durabilidade das
armaduras para betão armado, de acordo com a EN 10080 (Eurocódigo 2, 2004).

Requisito ambiental para $c_{min,dur}$ (mm)							
Classe Estrutural	Classe de Exposição de acordo com o Quadro 4.1						
	X0	XC1	XC2 / XC3	XC4	XD1 / XS1	XD2 / XS2	XD3 / XS3
S1	10	10	10	15	20	25	30
S2	10	10	15	20	25	30	35
S3	10	10	20	25	30	35	40
S4	10	15	25	30	35	40	45
S5	15	20	30	35	40	45	50
S6	20	25	35	40	45	50	55

Todavia, para que o recobrimento proporcione uma boa proteção ao elemento estrutural, nomeadamente à corrosão da armadura, a qualidade do betão, a sua aplicação, etc., têm de ser adequadas e controladas. Características como a compacidade e a porosidade do betão, definem a qualidade do recobrimento, e elas dependem de uma série de parâmetros como a relação água/cimento, tipo e quantidade de cimento, a granulometria dos agregados, tipo e teor das adições usadas, além da colocação, vibração e cura adequadas. Outro fator que pode afetar a durabilidade é a existência de fissuras com abertura excessiva, que funcionam como porta de acesso à armadura.

2.3 DURABILIDADE E VIDA ÚTIL

Bolina et al. (2019) destacam que a etapa de construção propriamente dita dos edifícios, mesmo podendo ser curta em relação à totalidade do seu período de vida, “(...) pode deflagrar problemas produzidos por lançamento, adensamento ou cura deficientes (...)”, que irão afetar diretamente a durabilidade e vida útil da obra. Desta forma, a qualidade e o bom desempenho da edificação dependem intimamente do cuidado posto na execução do projeto (André, 2013).

Todavia, por muito tempo, a comunidade técnica acreditou que, mesmo sem maiores cuidados, as edificações durariam para sempre (Martins, 2011), retardando a inclusão de requisitos relativos à durabilidade nas normas aplicáveis à construção civil. Só na década de 1980, em que foi publicada a ISO 6241 (1984), passou a ser considerada a ideia de que as edificações em betão armado envelhecem, e que esse envelhecimento é função da sua utilização, dos materiais e sistemas empregados, do ambiente exterior e das atividades periódicas de manutenção (Bolina et al., 2019). E facto, a partir desta década tornou-se evidente a importância da durabilidade

para a prática da construção civil, tendo sido publicados diversos regulamentos, normas e outras especificações técnicas que mencionam essas questões, como por exemplo o da ASTM E632 (1981), CEB 182 (1989), CEB 238 (1997), Comitê 201 da ACI (2001) (Martins, 2011), todos apresentando os requisitos a satisfazer para que as edificações cumpram com o que é determinado em projeto durante o seu período de vida útil.

No Brasil, normas como a NBR 6118 (2014) e a NBR 15575 (2013) refletem os conceitos de durabilidade e vida útil, que, em Portugal, surgem nos Eurocódigos de uma forma geral, e no Eurocódigo 2 (2010) para estruturas de betão. As normas brasileiras se completam ao dizer que a durabilidade está ligada a capacidade da estrutura, por completa e individualizada em seus sistemas, de cumprir com os requisitos esperados, com as influências do meio externo, garantindo as condições de uso especificadas no projeto, além de concordarem que a vida útil se traduz no período em que o edifício desempenha sua funcionalidade, como foi prescrita no projeto, admitindo que é cumprido o manual de manutenção que consta do projeto. O Eurocódigo não difere muito quanto a definição de durabilidade, exigindo que as estruturas se mantenham íntegras e que satisfaçam as exigências de estabilidade, resistência e desempenho. As normativas dos dois países indicam, para edifícios comuns, uma duração mínima de 50 anos para o período de vida útil de projeto.

2.4 CARBONATAÇÃO

2.4.1 PROCESSOS ENVOLVIDOS

A carbonatação é um processo físico-químico que ocorre no betão, sendo uma das principais causas para a posterior corrosão das armaduras. É um processo habitual no betão, que pode levar anos até trazer danos significativos. A reação acontece porque o dióxido de carbono (CO_2) existente na atmosfera penetra no betão em virtude da sua porosidade, reagindo, na presença de humidade, com os hidróxidos de cálcio hidratados ou em suspensão nos vazios do betão. Esta reação reduzindo o pH no betão afetado, eliminando as condições favoráveis que tinham levado à criação e conservação da camada, ou película, passivadora que protege o aço e que se forma durante a betonagem (Simas, 2007; André, 2013; Inácio, 2018; Silva e Melo, 2020).

Essa película passivadora “impede o acesso de humidade, oxigênio e agentes agressivos à superfície do aço, dificultando a dissolução do ferro” (Figueiredo e Meira, 2013), devido ao meio básico (alcalino) resultante da concentração de hidróxidos presentes. Pourbaix (1974)

apresentou um diagrama de equilíbrio termodinâmico que explica como o aço pode se comportar de acordo com o pH do meio em que se encontra, Figura 2.1. O diagrama mostra como o betão não carbonatado do recobrimento funciona como barreira de proteção a armadura: sua alta alcalinidade, garante um pH elevado, combinado com “sua faixa usual de potencial de corrosão (entre 0,1 e -0,5V)” (Araújo, 2009) mantém a armadura na área de passivação do diagrama. “No estado de passivação o metal encontra-se coberto por uma camada de óxidos que atua como uma barreira protetora que impede a sua oxidação.” (Rodrigues, 2017).

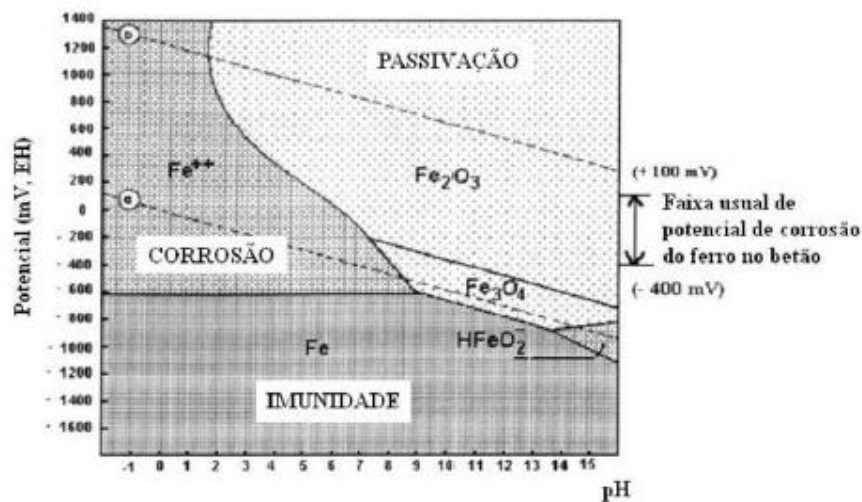


Figura 2.1 - Diagrama de Pourbaix para o sistema água/ferro a 25°C. (Monteiro, 2010 apud Rodrigues, 2017).

A carbonatação é assim designada “pelo fato de neutralizar o hidróxido de cálcio (Ca(OH)_2) pelo dióxido de carbono, [correspondendo à] transformação de um hidróxido alcalino em sal de baixa solubilidade, o carbonato de cálcio (CaCO_3)” (Silva e Melo, 2020). Contudo, existem outros hidróxidos consumidos durante a reação, como o hidróxido de sódio (NaOH) e o hidróxido de potássio (KOH), que estão em muito menor proporção no meio, resultando das impurezas da argila utilizada no fabrico do cimento, Figura 2.2.

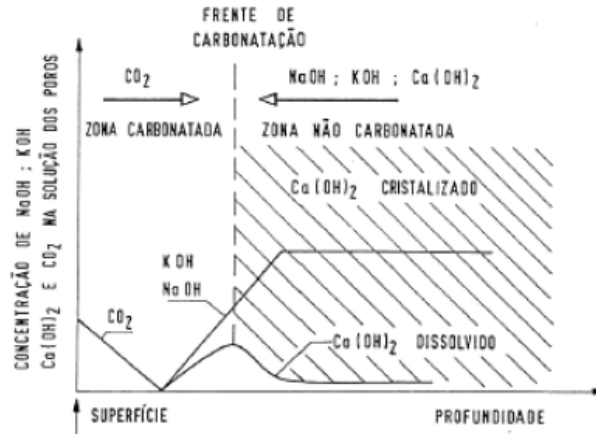
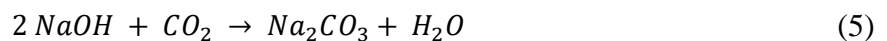
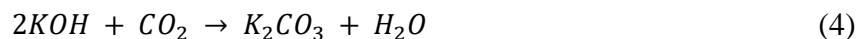
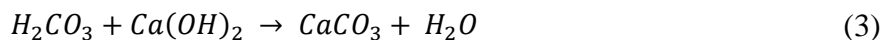
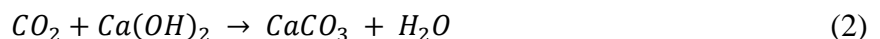


Figura 2.2 – Perfis de concentração de hidróxidos na zona de carbonatação. (Costa, 2006 apud Simas, 2007).

No processo de cura do betão (hidratação do cimento) as reações químicas geram um pH alcalino, em torno de 13 para um elemento sã, devido a presença dos hidróxidos referidos, NaOH, KOH, Ca(OH)₂. Desta forma, com a degradação (carbonatação) do material, por contato com o CO₂, o meio húmido nos poros do betão começa a ficar menos alcalino, em virtude da carbonatação, diminuindo o pH para valores inferiores a 9,0. Simas (2007) afirma que o maior motivo do decréscimo do pH é a dissolução do CO₂ na água presente nos poros no betão, apresentado pelas expressões abaixo, “pois no seu estado gasoso não consegue reagir diretamente com os hidratos da pasta cimentícia” (Rodrigues, 2017).



Para que as reações (1) a (5) ocorram, se faz necessário mecanismos de transporte na matriz do betão. No caso da carbonatação, o mecanismo de difusão do dióxido de carbono no betão acontece naturalmente já que sua concentração é muito maior no meio externo. Contudo, é necessário destacar que para dar-se início a carbonatação, os canais da matriz porosa do betão não podem estar totalmente secos nem saturados. O gás adentra através dos poros e aberturas na superfície da estrutura, que precisam possuir simultaneamente oxigênio (gasoso) e água (Figueiredo e Meira, 2013 apud Rodrigues e Júnior, 2019), difundindo o agente agressivo pela zona do recobrimento (e para além dela), Figura 2.3. O ataque é gradativo e com o tempo forma

uma faixa conhecida como frente de carbonatação, Simas (2007), separando a área carbonatada da não carbonatada, de pH distintos.

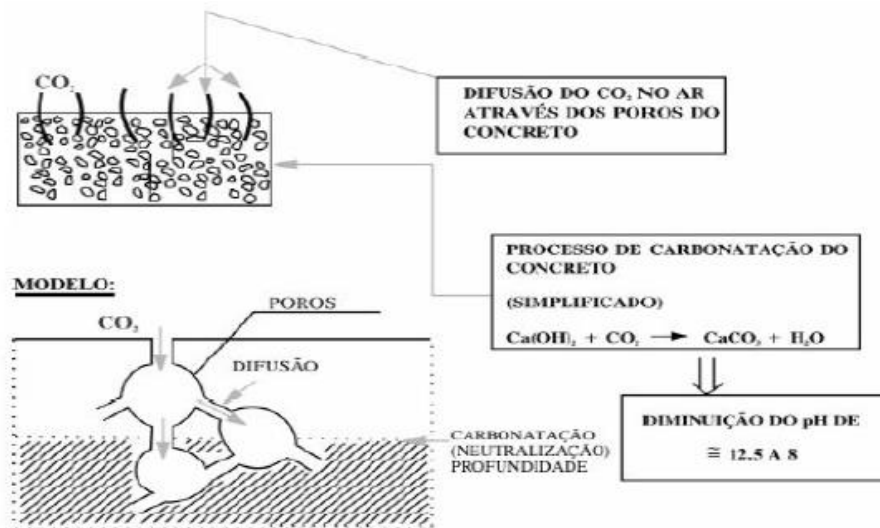


Figura 2.3 – Difusão do CO₂ no betão, dando início a carbonatação. (CEB-BI 152, 1984 apud Silva e Melo, 2020)

O estudo dos mecanismos de carbonatação permitiu estabelecer modelos matemáticos de difusão da carbonatação em elementos de betão. A segunda Lei de Fick, Equação (6), é utilizada quando se fala no mecanismo de avanço do CO₂ no betão – transporte do meio de maior concentração para um de menor concentração –, de forma contínua, mas não linear, ou seja, existe variação no fluxo da difusão (Simas, 2007):

$$\frac{\partial C}{\partial t} = D \times \frac{\partial^2 C}{\partial x^2} \quad (6)$$

Esta equação diferencial ordinária linear e homogênea, contrária a primeira Lei de Fick, considera o acúmulo do elemento em difusão, nesse caso o CO₂. Nesta expressão, D é o coeficiente de difusão do dióxido de carbono, t se refere ao tempo decorrido, C representa a concentração do elemento a difundir pela estrutura (CO₂) e x se relaciona com a distância (espessura) atingida.

Outra equação relativa ao processo de carbonatação, é a Equação (7), que prevê o avanço da profundidade de carbonatação, Nardino *et al* (2019):

$$x = k \cdot \sqrt{t} \quad (7)$$

Esta equação é deduzida da primeira Lei de Fick, após diversas simplificações (Monteiro, 2010). Nesta expressão, k representa o coeficiente de carbonatação, t o tempo de exposição ao agente agressivo e x representa a profundidade de carbonatação. Contudo, a evolução da carbonatação acaba por ser um processo mais complexo, já que diversas variáveis estão envolvidas, muitas vezes específicas a cada estrutura de betão (Martins, 2011), não sendo possível considerar um valor único para o coeficiente de carbonatação. Foram entretanto desenvolvidos modelos, e respetivas modelações numéricas, que levam em consideração os fatores de maior influência para previsão da carbonatação no betão de recobrimento, mas cujo interesse prático do projeto é limitado.

Todavia a carbonatação do betão acaba por se tornar um processo cada vez mais lento, já que o carbonato de cálcio gerado pela reação entre o hidróxido de cálcio e o dióxido de carbono, se precipita, e vai “colmatando os poros do betão” (Richardson, 1988 apud Martins, 2011; Rodrigues, 2017; Ngala e Page, 1997 apud Silva e Melo, 2020), dificultando o ingresso do CO_2 , atrasando o processo.

Muitos autores, como Silva e Melo (2020) e Rodrigues e Helene (1993) apud Júnior (2019), afirmam que esse processo acaba por ser, de certa forma, benéfico ao betão, pois diminui a porosidade, dificultando a entrada de agentes agressivos, dá seguimento a hidratação do cimento, com a água que ainda se encontra no interior da estrutura, resultando numa maior resistência do betão. Mas, como se referiu, não impede que a barreira passivante que protege a armadura da corrosão seja destruída, mais tarde ou mais cedo.

2.4.2 CONDIÇÕES QUE INFLUENCIAM NO PROCESSO DA CARBONATAÇÃO

Como já foi comentado, para que a reação de carbonatação se inicie no betão, é preciso que certas características do material e do ambiente, a que ele está exposto, coexistam e reajam entre si (Simas, 2007; Araújo, 2009; Martins, 2011; André, 2013; Santos, 2014; Henriques, 2016; Rodrigues, 2017; Rodrigues e Júnior 2019).

Assim sendo, os fatores que atuam na velocidade da carbonatação estão relacionados, por um lado, com a composição e execução do betão, como por exemplo:

- Relação água/cimento: afeta diretamente a compacidade do betão endurecido, determinando a porosidade e permeabilidade que terá. Se for utilizado um betão com valor muito alto, poderá causar efeito negativo, permitindo que o dióxido de carbono seja difundido mais facilmente no interior da peça;
- Classe de resistência do cimento: Parrott (1987) apud Simas (2007) apresenta uma fórmula experimental, onde sugere que o aumento da classe e o aumento da resistência a carbonatação são diretamente proporcionais;
- Tipo e quantidade de cimento e Teor de adições: A forte presença do hidróxido de cálcio (portlandita), Ca(OH)_2 , é a garantia que o betão será mais resistente a carbonatação, André (2013). Desta forma quanto maior a quantidade de cimento no betão, maior a sua durabilidade. O uso das adições deve ser cuidadosamente avaliado tanto no que respeita ao tipo como quantidade, não devendo sobrepor o lugar do cimento (Simas, 2007; Figueiredo et al, 1993 apud Araújo, 2009; Henriques, 2016);
- Qualidade da cura e Grau de hidratação atingido: No seu processo de endurecimento o betão passa por reações de hidratação do cimento, que vão definir a concentração de humidade interna ao elemento, assim como a sua estrutura porosa. Ou seja, quanto mais longa e adequada for a cura, melhor será o grau de hidratação, garantindo menor permeabilidade da estrutura em idades avançadas, Helene (2001) apud Rodrigues (2017).

Por outro lado, variam com as características atmosféricas locais:

- Humidade relativa do ar: embora o CO_2 permeie o betão mais facilmente quando seus poros estão secos, a carbonatação não será iniciada nestas condições. E o oposto, na situação de saturação dos poros, também não permite que se inicie este processo, já que a difusão na água é mais baixa, e não há oxigênio em estado gasoso para reagir. A velocidade da carbonatação terá seus valores mais expressivos quando a humidade relativa estiver entre 50 a 70%, como mostra o gráfico apresentado por Verbeck (1950), Figura 2.4. Parrot (1987) apud Rodrigues (2017) afirma que a 60% o índice de carbonatação é máximo.

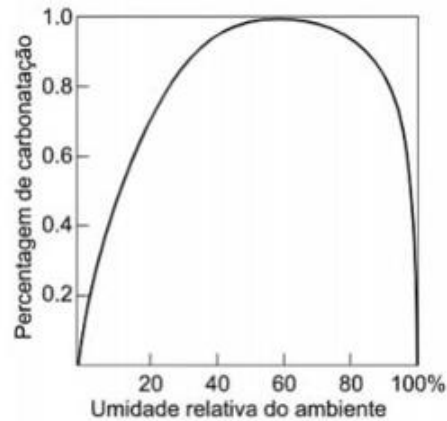


Figura 2.4 - Grau de carbonatação em função da humidade relativa do ar (Vénuat & Alexandre, 1969 apud Rodrigues, 2017).

- Concentração de CO₂: Quanto maior for a concentração do dióxido de carbono na atmosfera, maior será a intensidade agressiva nas estruturas de betão. Simas (2007) refere que zonas industriais e zonas fortemente urbanizadas apresentam um valor entre 0,30% e 1% em volume na atmosfera, enquanto zonas urbanas mais brandas giram em torno de 0,10% em volume, e zonas rurais apresentam cerca de 0,03% em volume, destacando que áreas com intensa formação de dióxido de carbono e baixa ventilação, podem atingir resultados bem maiores.
- Temperatura: A temperatura, em conjunto com a humidade do ar, pode interferir na quantidade de água livre no betão. Todavia, Simas (2007) afirma que “a difusão e a velocidade de carbonatação aumentam com a temperatura, desde que todos os outros factores permaneçam constantes”. E ainda Monteiro (2010) apud Rodrigues (2017) destaca que, segundo a teoria de Arrhenius, “um incremento de temperatura implica um aumento da taxa de reações químicas”.

2.5 CORROSÃO

A corrosão das armaduras é um processo eletroquímico, já que o metal precisa de um eletrólito para que aconteçam as reações de oxidação e redução, que alteram as características físicas do aço, diferentemente da corrosão química, onde o contato do metal com o oxigénio é direto, sem necessidade de intermédios, Santos (2014).

No caso do betão armado, o próprio betão e o aço formam uma célula eletroquímica, originando um efeito pilha, onde a armadura funciona como o condutor metálico, permitindo que a corrente elétrica seja estabelecida entre o ânodo e a cátodo, e existindo nos poros do betão o meio aquoso, com iões em solução, Freitas (2013). A região anódica oxida (perdendo secção), liberando eletrões, que serão recebidos pela região catódica, onde em conjunto com a água e o oxigénio presente, formarão os iões hidróxidos (reação de redução do oxigénio), Figura 2.5. A maior parte dos hidróxidos de ferro (ferrugem) depositam-se junto ao varão, aumentando de volume pela deposição de material.

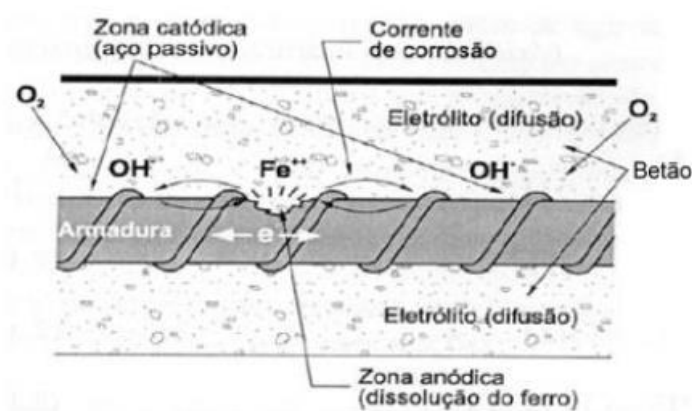


Figura 2.5 – Representação do processo de corrosão da armadura. (Amaral, 2012 apud Santos, 2014)

No caso da carbonatação, devido ao ataque do dióxido de carbono ser generalizado na estrutura, a corrosão é aproximadamente uniforme. A área superficial do aço é atingida por completo, com “perda de massa maioritariamente constante com diminuição da secção transversal” (Santos, 2014).

O impacto da corrosão das armaduras no betão armado é tão grande, que Tuutti (1982) apresentou um modelo que relaciona este processo de deterioração com a vida útil da estrutura, dividindo o processo em duas etapas, Figura 2.6: fase de iniciação e fase de propagação. A primeira fase corresponde ao período em que os agentes nocivos adentram a estrutura, modificando as condições naturais do betão de recobrimento, alcançando a película passivada e destruindo-a. A segunda fase, como sugere o nome, é o período de propagação, evolução, do fenómeno da corrosão, até um estado em que a zona onde ocorre atinja um nível elevado de degradação, necessitando de intervenção (Freitas, 2013; Santos, 2014; Gouveia, 2017).

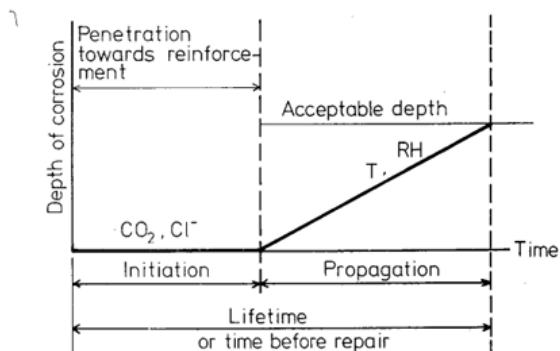


Figura 2.6 – Iniciação e propagação da corrosão das armaduras com o tempo (CO_2 – dióxido de carbono, Cl^- – íões cloreto, T – temperatura e RH – humidade relativa, Tuutti, 1982.)

3. ENSAIOS PARA INSPEÇÃO/AVALIAÇÃO

No diagnóstico de estruturas, todo trabalho deve começar por uma análise do histórico da edificação em questão, seguida de inspeção tátil e visual, mas só isso não é suficiente. Para uma investigação completa das características que definem a estrutura no momento do estudo, é preciso a realização de ensaios detalhados e específicos, de acordo com as manifestações patológicas apresentadas ou suspeitadas.

No caso de suspeita do fenómeno da corrosão das armaduras, na sequência de carbonatação, o ensaio mais conhecido e utilizado em obra é o de aspersão de uma solução alcoólica de fenolftaleína numa face quebrada de fresco (a prática corrente de aplicar a solução à superfície exterior das carotes “antigos” não é permitida pela norma, porque pode estar contaminada). Esse composto, originalmente incolor, indica, através da coloração, o pH da estrutura (Simas, 2007; Rodrigues e Júnior, 2019; Silva *et al.*, 2019). Quando entra em contato com um meio básico (alcalino), adquire cor rósea, enquanto em contato com um meio ácido (ou mesmo neutro), se mantém incolor, ou seja, o dito meio mantém a sua coloração, como se não tivesse sido aplicado nenhum produto, Figura 3.1.



*Figura 3.1 – “Ensaio” de fenolftaleína: antes, durante e após aplicação à superfície exterior da carote, logo após a sua extração. A metade inferior, correspondendo ao interior do elemento, mantém-se muito alcalina.
(Acervo pessoal)*

Como já foi referido, um elemento de betão são é alcalino, girando o seu pH em torno de 13,0. Os investigadores divergem na determinação do ponto de viragem da fenolftaleína, entre 9 e 10,5, causando assim um certo grau de incerteza num material com pH entre a fase neutra e a básica, onde a coloração pode se apresentar “incorreta” em relação a quantidade de iões H⁺ presentes no meio (Martins, 2011). Contudo este ainda é o método mais empregado na prática, gerando resultados de confiança quanto a profundidade da carbonatação.

No Brasil não há normas quanto a forma de realizar o ensaio, se baseando nos princípios publicados pela RILEM CPC 18. Já Portugal segue a EN 14630:2006.

A RILEM CPC 18 (1984) se divide em cinco tópicos: Objetivos, Definição, Materiais de teste, Teste de Laboratório e Teste em estruturas concluídas. A norma destaca a diferença entre fazer o ensaio em laboratório e *in situ* (ou melhor, através de carotes obtidas *in situ* mas com ensaio realizado *in situ* ou em laboratório): no primeiro caso, permite comparar diferentes tipos de betão com adições diversas, e, no segundo, determinar o estado do betão superficial da estrutura naquele momento. Esta especificação indica ainda que o indicador colorimétrico consiste em 1% de fenolftaleína numa solução alcoólica de 70%.

Para se averiguar a profundidade de carbonatação em estruturas existentes, é preciso um carote com no mínimo 50mm de diâmetro, o qual é partido ao meio, longitudinalmente, para se realizar imediatamente o ensaio na superfície quebrada. Em casos que seja preciso apenas ter uma noção se a carbonatação já atingiu a zona da armadura, a norma permite que esta zona seja quebrada e o ensaio seja executado diretamente na superfície assim obtida. Nas duas situações, a região em que será aspergida a solução de fenolftaleína deve ser limpa da poeira e de partículas soltas antes do teste, procedendo-se à aspersão logo após esta limpeza.

A “norma” indica que “A precisão da medição deve ser para o 0,5 mm mais próximo. As profundidades de carbonatação inferiores a 0,5 mm não são contabilizadas.”. A Figura 3.2 mostra as formas de verificação da zona carbonatada: quando a frente (a) é aproximadamente retilínea, a profundidade corresponde a dk, (b) não tem grandes irregularidades, deve ser tomada a média entre dk e dkmax, (c) apresenta profundidades maiores pontuais, deve ser tomado, mais uma vez, o valor dk.

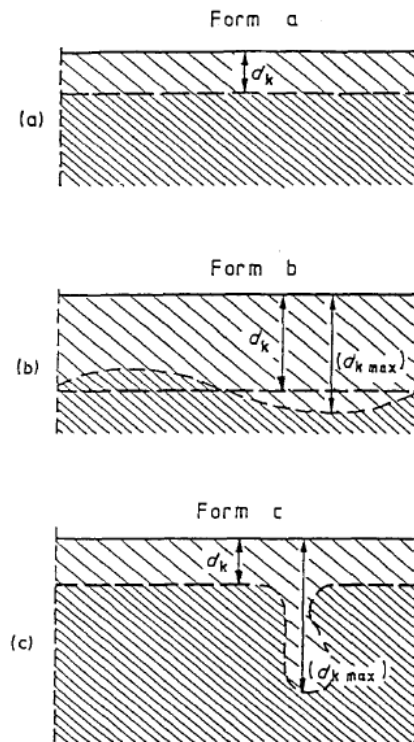


Figura 3.2 - Representação da profundidade de carbonatação. (RILEM CPC – 18)

Ainda existem outros ensaios, caso o betão não apresente sinais claros de corrosão, como o da resistividade elétrica, e/ou o de potencial de corrosão, executados na superfície da estrutura, que podem avaliar e determinar a intensidade do processo de corrosão na peça. É claro que se o valor da intensidade for significativo a frente de carbonatação já deve ter atingido a armadura. Mas pode não haver corrente significativa (corrosão) mesmo que a frente tenha atingido a armadura.

O ensaio de Resistividade Elétrica é mais comumente realizado pelo método dos quatro eletrodos, como é exemplificado na Figura 3.3. Quando em contato com a superfície, de preferência saturada e sem qualquer tipo de revestimento, a diferença de potencial encontrada na estrutura gera uma corrente elétrica que será detectada pelos eletrodos do equipamento, indicando qual a resistividade ali existente.



Figura 3.3 - Ensaio de Resistividade Elétrica em pilar. (Acervo pessoal)

O CEB Bulletin 192 (1989) definiu valores que podem ser comparados com os resultados obtidos no ensaio, estabelecendo qual o risco da armadura estar em processo de corrosão, Quadro 3.1.

Quadro 3.1 - Risco de corrosão da armadura em relação ao valor da resistividade elétrica (CEB 192, 1989)

Resistividade do betão ($k\Omega.cm$)	Risco de corrosão
< 5	Muito alta
5 a 10	Alta
10 a 20	Baixa
> 20	Muito baixa

Já o ensaio de Potencial de Corrosão se baseia na diferença de potencial entre a armadura e um eletrodo de referência, Figura 3.4, acoplado ao equipamento de medição, como pode ser visto na Figura 3.5. A aferição é realizada em formato de malha ou em padrão aleatório, ASTM C 876 (2015), que no fim indicará quais as áreas mais prováveis de ocorrência de corrosão. Assim como no ensaio de Resistividade, é preciso que a superfície de ensaio esteja sem revestimento e saturada.

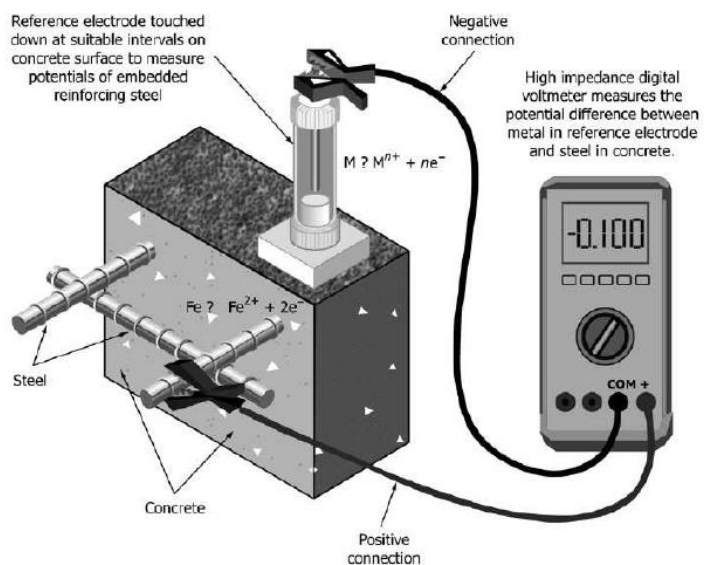


Figura 3.4 - Esquema do circuito de um eletrodo de referência. (ASTM C 876, 2015)

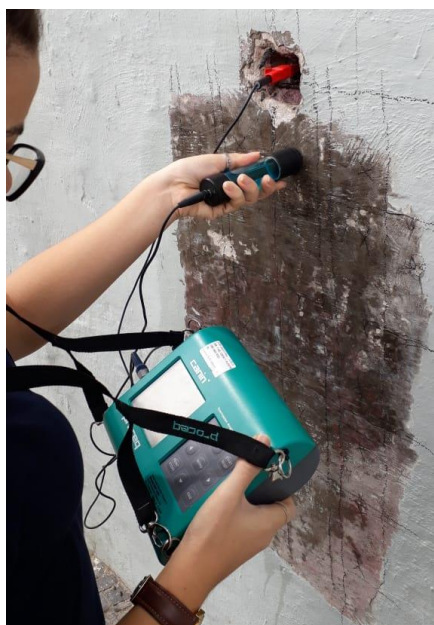


Figura 3.5 – Ensaio de Potencial de Corrosão em pilar. (Acervo pessoal)

A ASTM C 876 (2015), indica como deve ser executado o ensaio, que equipamentos utilizar, que eletrodos podem ser escolhidos para referência, como calibrar o equipamento e fazer a leitura posteriormente. A versão anterior, de 1991, fornecia ainda os limites da probabilidade de corrosão, para utilização de um eletrodo de referência de Cu/SO₄Cu, Quadro 3.2.

Quadro 3.2 - Potencial de corrosão relacionado ao eletrodo de referência Cu/CuSO₄, de acordo com ASTM C 876 – 91 (ASTM C 876, 1991)

Potencial de corrosão (mV)	Probabilidade de corrosão
> -200	≤ 5%
-200 – -350	Incerto
< -350	≥ 95%

Simas (2007) ainda cita técnicas menos comuns, que exigem equipa qualificada e equipamentos sofisticados, para realização do ensaio de carbonatação, encontrando resultados com alta exatidão, que na maioria das vezes difere dos do ensaio da fenolftaleína. Os ensaios citados são apresentados no Quadro 3.3.

Quadro 3.3 – Métodos mais sofisticados de medição de carbonatação. (SIMAS, 2007)

ENSAIO	PRÓPOSITO
Difracção de Raio-X (XRDA)	Determina a intensidade de distribuição de cristais de Ca(OH) ₂ e CaCO ₃ .
Análise térmica diferencial (DTA)	As substâncias presentes na massa cimentícia são caracterizadas em função da sua temperatura, ensaio qualitativo.
Termogravimetria (TGA)	Determina a concentração de distribuição de cristais de Ca(OH) ₂ e CaCO ₃ , ensaio quantitativo.
Espectroscopia de infravermelho por transformada de Fourier (FTIR)	Fornecer o espectro de infravermelho da amostra, determinando a profundidade a que ocorre o pico das ligações C-O presentes nos cristais de CaCO ₃ , correspondente à frente de carbonatação.

4. AÇÕES MITIGATÓRIAS (ESTRUTURAS NOVAS) E MÉTODOS DE INTERVENÇÃO (ESTRUTURAS EXISTENTES)

Existem muitas normas relacionadas as estruturas de betão armado ao redor do mundo, já que é o material mais utilizado para a construção de edificações desde meados do século XX. Contudo, muitos países ainda não possuem padronização quanto as melhores técnicas a serem aplicadas seja para proteção da estrutura, manutenção, reabilitação, ou até mesmo quais produtos utilizar para cada situação em específico.

Com o aumento do setor da reabilitação na construção civil e obras públicas, o Comitê Europeu de Normalização (CEN) identificou a inexistência de um documento que colaborasse com o processo de inspeção e diagnóstico das manifestações patológicas em edifícios, assim como metodologias que garantissem que a estrutura seria reparada adequadamente, recuperando sua durabilidade, Sousa (2011).

Dessa forma surgiu a série de normas NP EN 1504 (2006, 2008, 2009), que em dez partes, “estabelece o requisito da elaboração de um manual de qualidade, para todos os trabalhos de intervenção numa estrutura” Sousa (2011), entre muitos outros aspetos. Cada parte da norma visa apresentar diretrizes sobre as fases num processo de diagnóstico e recuperação, métodos e produtos a serem utilizados, acompanhamento e controlo da qualidade (NP EN 1504 - 2006, 2008, 2009):

- Parte 1: define os **termos relacionados com os produtos e sistemas** para reparação, para utilização na manutenção e protecção, reabilitação e reforço de estruturas de betão;
- Parte 2: especifica requisitos para a identificação, desempenho, segurança e avaliação da conformidade de produtos e sistemas a utilizar para a **protecção superficial do betão**, a fim de aumentar a durabilidade do betão e das estruturas de betão armado, tanto no caso de betão novo como no dos trabalhos de reparação e manutenção;
- Parte 3: especifica requisitos para a identificação, desempenho e segurança de produtos e sistemas a utilizar para a **reparação estrutural e não estrutural de estruturas de betão**;

- Parte 4: especifica requisitos para a identificação, desempenho e segurança de produtos e sistemas a utilizar para a **colagem estrutural de materiais de reforço numa estrutura de betão existente**;
- Parte 5: especifica requisitos e critérios de conformidade para identificação, desempenho e segurança de **produtos de injeção utilizados na reparação e protecção de estruturas de betão**;
- Parte 6: especifica os requisitos para a identificação, desempenho e segurança de produtos e sistemas a utilizar na **ancoragem de armaduras de aço como as utilizadas no reforço estrutural** de forma a assegurar a continuidade das estruturas de betão armado;
- Parte 7: especifica os requisitos para a identificação e o desempenho de produtos e sistemas para **revestimentos activos e estanques para a protecção de armaduras de aço não revestidas e de aço embebido em betão de estruturas a reparar**;
- Parte 8: especifica **procedimentos para o controlo da qualidade e avaliação da conformidade**, incluindo a marcação e rotulagem, de produtos e sistemas para a protecção e reparação de estruturas de betão;
- Parte 9: estabelece considerações básicas para a **especificação da protecção e reparação das estruturas de betão simples e betão armado** utilizando produtos e sistemas especificados nas outras partes;
- Parte 10: estabelece **requisitos para a condição do substrato antes e durante a aplicação**, abrangendo estabilidade estrutural, armazenagem, preparação e aplicação de produtos e sistemas para a protecção e reparação de estruturas de betão, incluindo **controlo da qualidade, saúde, segurança e ambiente**.

André (2013) ressalta que a norma “define 43 métodos de reparação, agrupados em 11 princípios que possibilitam a prevenção das causas de deterioração físicas, químicas e eletroquímicas, que surgem no betão e nas armaduras”, e Inácio (2018) destaca a importância da NP EN 1504 na eficácia das intervenções em estruturas de betão armado, citando a facilidade de entendimento dos princípios e métodos abordados. Refira-se, porém, que os 43 métodos não são estanques, podendo um dado método ser incluído em diferentes princípios, caso em que só alguns dos seus requisitos diferirão.

4.1 AÇÕES MITIGATÓRIAS EM ESTRUTURAS NOVAS

Para garantirem maior durabilidade ao edificado, as estruturas novas de betão armado precisam apresentar características que protejam o betão da entrada de agentes nocivos. O betão de recobrimento, como já citado, é o principal recurso de protecção, trabalhando como barreira

física entre o aço e o ambiente ao seu redor. Assim sendo, quando o betão é fabricado com qualidade, seguindo as diretrizes específicas para seu uso e localização, a probabilidade de a estrutura ser contaminada é muito baixa para idades iniciais. “A protecção contra a corrosão do aço das armaduras depende da compacidade, da qualidade e da espessura do recobrimento”, como refere o Eurocódigo 2. Por isso é tão importante determinar cuidadosamente o recobrimento mínimo, para assegurar que mesmo com possíveis erros de execução, cobertos por uma dada tolerância, seja garantida uma camada mínima de protecção.

O EN 1992-1-1 apresenta requisitos de localização no membro e de condições ambientais, apresentados na secção 2.1, para o cálculo do recobrimento, onde o valor final pode ser modificado de acordo com a presença de protecção adicional, por exemplo, ou uso de aço inoxidável no betão armado.

Mesmo com boa espessura, o betão pode apresentar características físicas que não oferecem qualidade a estrutura, ou seja, permeabilidade excessiva. Desta forma, em certos casos, se torna necessário aplicar produtos para selagem da peça, seja porque após o processo de cura o betão apresenta características mais fracas ou porque o ambiente ao redor é demasiado agressivo, ou outros motivos.

4.2 MÉTODOS DE INTERVENÇÃO EM ESTRUTURAS EXISTENTES

A dinâmica das manifestações patológicas em estruturas já existentes pode variar bastante, de acordo com todos os parâmetros e características apresentados. Contudo, as causas geradoras das anomalias mostram um certo padrão, principalmente quando se fala de corrosão das armaduras. A norma NP EN 1504 (2009) apresenta princípios específicos para protecção e recuperação de estruturas de betão armado que apresentam o aço já despassivado ou em processo de despassivação, são eles:

- Princípio 7: Preservação ou restauração da passividade;
- Princípio 8: Aumento da resistividade;
- Princípio 9: Controlo catódico;
- Princípio 10: Protecção catódica;
- Princípio 11: Controlo de áreas anódicas.

Esses métodos se referem a corrosão proveniente da carbonatação do betão assim como contaminação por cloretos, todavia o trabalho focará apenas no primeiro causador.

O Princípio 7 cobre desde métodos mais simples e de prevenção, até métodos mais minuciosos e delicados para restauração da camada passiva que o betão proporciona a armadura. Inclui 5 métodos, todos voltados para o tratamento e a substituição do betão, onde o último não é relevante ao estudo aqui desenvolvido, pois é específico ao ataque por cloretos.

O método 7.1 tem eficácia se utilizado como meio preventivo, atrasando o ingresso de agentes nocivos, para que não se inicie o processo de corrosão. Consiste na execução de uma nova camada de recobrimento, acrescentando uma barreira extra contra a carbonatação. Já o método 7.2 substitui a camada de betão carbonatado, sendo necessário que toda a zona contaminada seja retirada para que não haja a criação de novos ânodos. Se a frente de carbonatação já estiver perto da armadura, deve-se remover o betão até 15mm após a camada de aço e aplicar betão novo. O método 7.3 refere-se a Realcalinização eletroquímica do betão carbonatado, com sua metodologia baseada no CEN/TS 14038-1 (2004). Este método se baseia na colocação de um ânodo num eletrólito temporário na superfície da estrutura, criando uma corrente elétrica entre ele e a armadura, favorecendo o aumento do pH no betão, Réus (2017). Todavia, é uma prática restrita, de durabilidade limitada, sendo possível que o processo de carbonatação volte a progredir após sua execução. É indicado associar o tratamento a um sistema de proteção, com revestimento específicos, quando o betão não for repostado. Réus (2017) ainda afirma que a “realcalinização eletroquímica pode apresentar alguns efeitos colaterais, como a perda de ductilidade das armaduras e a redução da aderência entre a armadura e o betão”. Por fim, o método 7.4 se refere a Realcalinização do betão carbonatado por difusão. Por não ser tão comum, pode apresentar procedimentos diferentes, por exemplo, executando uma camada de betão ou argamassa hidráulica bastante alcalina na superfície da estrutura, mantendo-a húmida por um bom tempo, o que tenderá a realcalinizar o betão por difusão. Esta técnica pode levar muito tempo, mesmo para tratar camadas de betão pouco espessas.

O Princípio 8 está relacionado ao aumento da resistividade elétrica como forma de reparar o betão, diminuindo o teor de humidade na estrutura, com o que impede a circulação dos iões necessários à formação dos hidróxidos de ferro. Seus métodos são bastante similares aos do Princípio 2, como por exemplo: “aplicação de proteções externas ventiladas, tratamentos superficiais repelentes da água, impregnações preenchendo poros ou revestimentos superficiais”, NP EN 1504-9 (2009).

Os Princípios 9 e 10 incluem métodos relacionados a zona catódica, sendo o primeiro referente ao Controlo catódico e o segundo relativo a Protecção catódica. O princípio 9 é empregado raramente porque consiste em limitar o ingresso do oxigénio, dificultando que a reação catódica aconteça, paralisando o processo de corrosão pela impossibilidade de formação de cátodos. Esse objetivo pode ser teoricamente alcançado, por exemplo, com a aplicação de pintura como

revestimento, selando os poros de entrada, ou submetendo a estrutura a um estado de saturação superficial com água. Já o Princípio 10 é aplicado quando a armadura possui elevado risco de corrosão, em zonas de profunda carbonatação. Consiste em criar um potencial elétrico, seja por fontes externas de correntes elétricas ou por ânodos de sacrifício, transformando toda a armadura num enorme cátodo (conseguindo, além disso, realcalinizar o betão, recuperando a passividade da armadura, de forma similar ao método 7.3). Esse procedimento utiliza de base a EN 12696 (2000), e se bem monitorizado e acompanhado, diminui a parcela de betão carbonatado a ser retirada, e é eficaz durante um grande período, controlando o processo corrosivo. Um bom exemplo de utilização é no emprego de malhas anódica de titânio ativado.

Por último, o Princípio 11 consiste no Controlo de áreas anódicas, por exemplo, em situações em que a carbonatação do betão está avançada e ele não pode ser completamente substituído. Desta forma, procura-se conter a reação do ânodo com intervenções pontuais, seja diretamente na armadura ou no betão. Entre os métodos mais utilizados estão o uso de Pinturas, com pigmentos activos, da armadura, Pinturas como revestimento de barreira da armadura e utilização de Inibidores de corrosão. O primeiro tipo de revestimento pode ser aplicado diretamente na barra de aço, se ela estiver exposta, proporcionando uma camada sacrificial, impedindo que o processo de corrosão ocorra na armadura. O revestimento de barreira só será eficaz se o aço for totalmente coberto pelo material, por isso é preciso que todo o perímetro esteja limpo e seja bem revestido. Esse método diminui a quantidade de oxigénio que atinge a armadura, preservando-a de ser oxidada. Já o emprego de inibidores de corrosão pode ser realizado na superfície do betão (perdendo eficiência se ele não penetrar até a armadura) ou mesmo com a introdução do material na mistura que será realizada para reparação. De acordo com a NP EN 1504-9 (2009), esses inibidores podem alterar a superfície do aço ou formar uma camada passiva sobre ele, e dependendo do produto utilizado, impedir a formação tanto de áreas anódicas como catódicas.

5. CASOS DE ESTUDO

Com o objetivo de exemplificar na prática casos de estruturas de betão que foram identificadas com o problema da carbonatação, este capítulo apresenta estudos reais de construções que passaram por inspeção e intervenção para reabilitação do edificado. A informação relativa aos três primeiros casos foi recolhida junto da Tecomat Engenharia, empresa Pernambucana, e a informação relativa ao quarto caso foi retirada da literatura.

5.1 CASO 1 – BRASIL

Este caso é referente a uma construção industrial presente no Bairro do Recife, em Pernambuco. Por a edificação possuir mais de 100 anos na época da inspeção, a empresa responsável não possuía as plantas originais da construção. Contudo, desenvolveram um projeto acerca do que foi encontrado, Figura 5.1, dividindo a área em blocos, de acordo com os respectivos anos de construção. O bloco A possuía dois pavimentos, o B sete pavimentos, o C seis pavimentos e o D cinco pavimentos (Tecomat Engenharia).

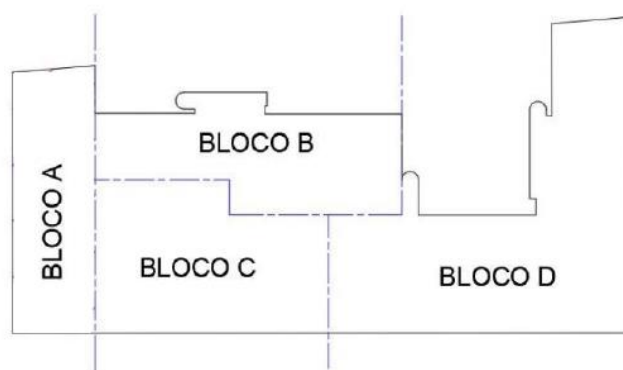


Figura 5.1 – Planta de divisão dos blocos. (Acervo técnico da Tecomat Engenharia)

O edifício em questão havia sido um moinho durante muitos anos, tendo-se decidido proceder à sua reabilitação. Dessa forma, devido as mudanças exigidas pelo novo projeto, foram realizados diversos ensaios para comprovar o estado da estrutura, entre eles o de carbonatação.

A inspeção visual e tátil identificou os pilares como os elementos mais degradados da estrutura, Figura 5.2. Como era muito grande a quantidade de elementos da estrutura, foram selecionados 60 pilares e uma viga (Tecomat Engenharia), sortidos entre todos os blocos e andares do edifício, para aspersão da solução de fenolftaleína.

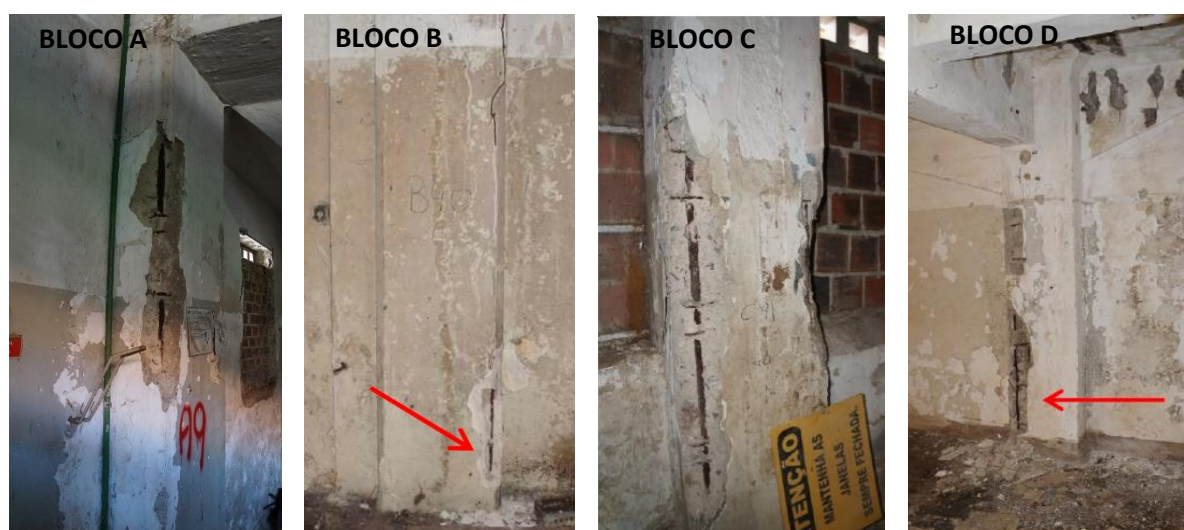


Figura 5.2 – Exemplos de pilares encontrados na inspeção visual dos quatro blocos. (Acervo técnico da Tecomat Engenharia)

Em 29 pilares e na viga, ou seja, quase 50% da amostra, a frente de carbonatação já tinha ultrapassado o betão de recobrimento. Noutros 7 elementos a profundidade estava muito próxima ao recobrimento, ou seja, a menos de 5mm da armadura. O panorama geral foi (Tecomat Engenharia):

- Bloco A: 4 de 9 pilares apresentavam betão de recobrimento totalmente carbonatado;
- Bloco B: 2 de 16 pilares e 1 viga apresentavam betão de recobrimento totalmente carbonatado;
- Bloco C: 12 de 13 pilares apresentavam betão de recobrimento totalmente carbonatado;
- Bloco D: 12 de 22 pilares apresentavam betão de recobrimento totalmente carbonatado.

Os blocos C e D se apresentavam visivelmente mais deteriorados no momento da inspeção (Tecomat Engenharia), o que foi confirmado com o resultado dos “ensaios” realizados, Figura 5.3. Sendo assim, foi desenvolvida uma estratégia de intervenção adequada para cada bloco, sendo que seus novos usos seriam voltados para residências e hotelaria. Os planos de recuperação propostos se basearam na publicação Saint-Gobain (2021).

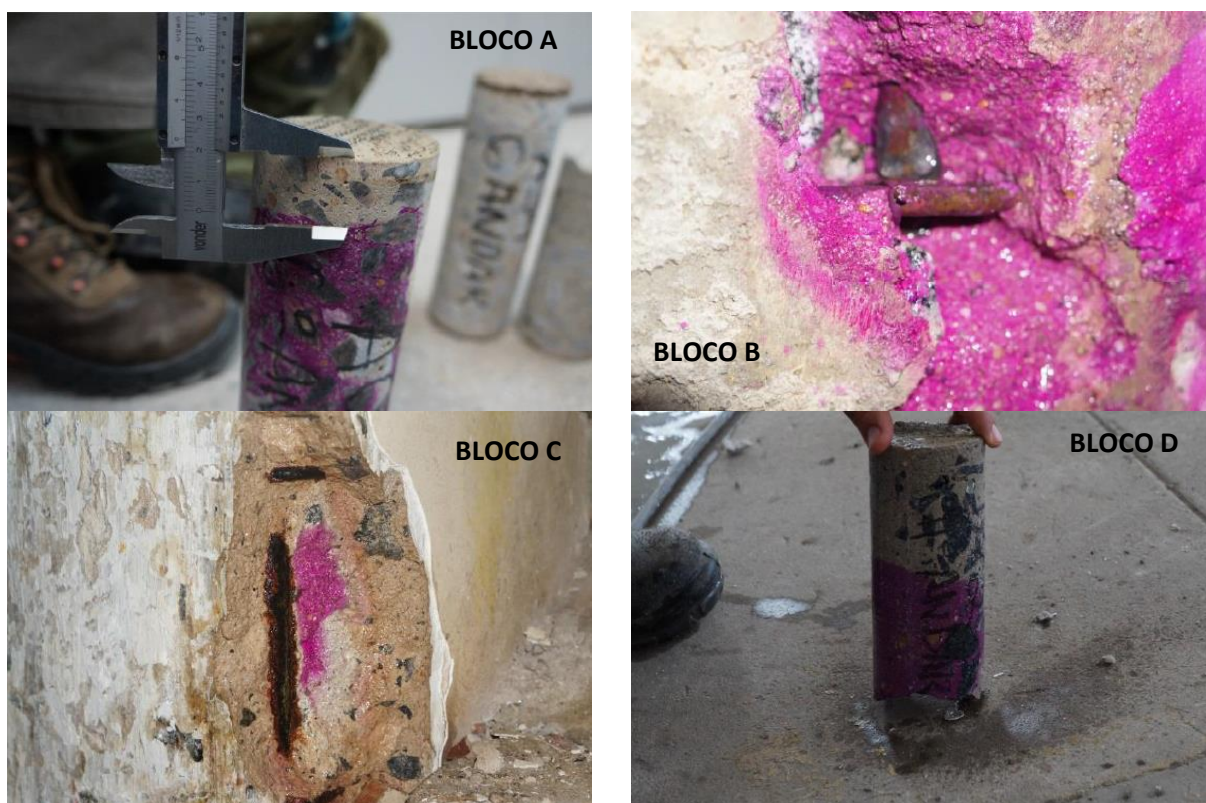


Figura 5.3 – Exemplos de aplicação da solução de fenolftaleína diretamente à superfície ou em carotes. (Acervo técnico da Tecomat Engenharia)

O bloco A foi sujeito a reforço estrutural por encamisamento nas novas vigas e pilares por causa do incremento dos esforços, e também a espessamento do recobrimento. Sendo proposto um modelo de intervenção com os seguintes passos:

1. Escareamento da superfície de betão até a formação de uma base rugosa, com boas condições de aderência;
2. Colocação das novas armaduras, respeitando as normas quanto aos valores do recobrimento;
3. Colocação da cofragem;

4. Preenchimento do “novo elemento” com graute fluido;
5. Após retirada da cofragem, execução da cura (úmida ou química) adequada para obtenção de um resultado uniforme.

No bloco B foram executadas recuperações pontuais, nas quais o betão antigo foi substituído por graute, além da utilização de uma protecção superficial de base cimentícia, do tipo do SikaTop-120 BR (informações nos Anexos). Sendo proposto um modelo de intervenção com os seguintes passos, após identificação das zonas deterioradas, determinando assim qual será a “janela” de reparo:

1. Remoção do betão nas áreas atingidas, criando um substrato com boas condições de aderência;
2. Limpeza das armaduras para a retirada de possíveis contaminantes existentes, além de “remover o betão até deixar pelo menos 2 cm livres em torno da barra. Em barras corroídas, a liberação deverá ser feita longitudinalmente em, no mínimo, 15 cm além do trecho corroído”, Saint-Gobain (2021). Se for observado um dano grave ou falta de armaduras na estrutura, deverá ser feita a reposição do aço;
3. Preencher as cavidades com graute, seguida de cura adequada para obtenção de um resultado uniforme;
4. Pintura do betão com uma protecção superficial de base cimentícia.

Para o bloco C foi adotada uma estratégia diferente para os pilares internos e os de periferia: os primeiros receberam o produto de protecção superficial de base cimentícia após os reparos pontuais, assim como no bloco B, enquanto que os mais externos foram reforçados estruturalmente, assim como no bloco A, seguindo o mesmo plano de intervenção proposto.

Por fim, como o bloco D recebeu mais 2 pavimentos, todos os pilares foram reforçados, devido o acréscimo significativo de carga, processo semelhante ao que foi executado para o bloco A, apenas com a diferença de valores entre as cargas, já que cada um teria um tipo de utilização distinta.

5.2 CASO 2 – BRASIL

Este caso é referente a um Reservatório de água em Maceió, no Estado de Alagoas, no Nordeste do Brasil. Não foi encontrado o projeto original, mas sua construção data de 45 anos, de acordo com informações recebidas dos responsáveis (Tecomat Engenharia). A estrutura tem cerca de 16 metros de altura, do nível do terreno a laje da tampa, Figura 5.4.

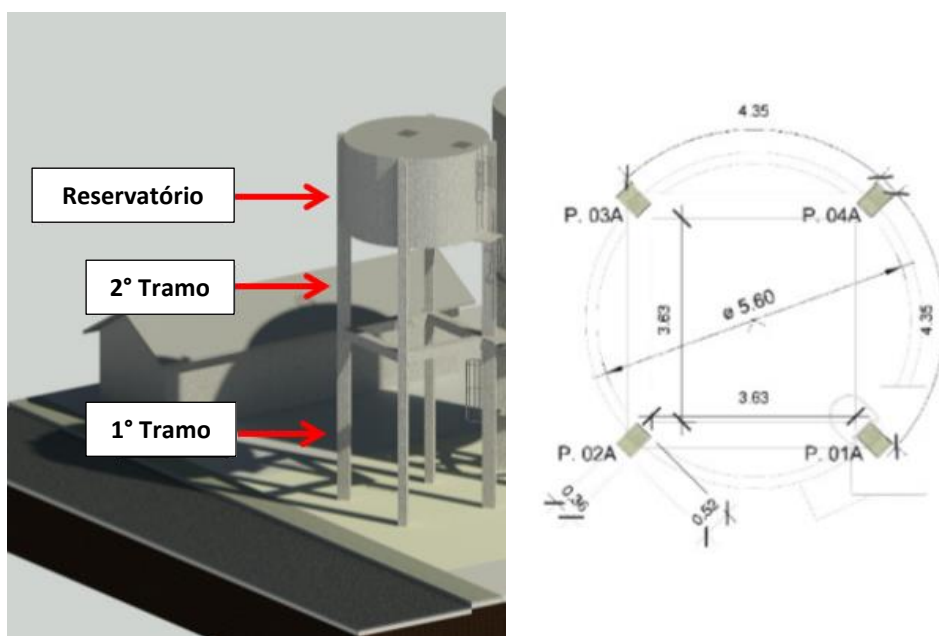


Figura 5.4 – Vista 3D e esboço com dimensões do reservatório. (Acervo técnico da Tecomat Engenharia)

A inspeção foi realizada com o propósito de confirmar se seria possível a utilização do reservatório para usos futuros, já que existiam duas torres, com anos de construção diferentes (sendo a do caso de estudo aqui analisado a mais antiga), e apenas se sabia que uma delas estava preenchida com água, mas não se sabia qual das duas (Tecomat Engenharia). Os quatro pilares passaram pelo ensaio da fenolftaleína, contudo, os ensaios só foram executados no 1º tramo (térreo), já que não foi dado acesso, ao Engenheiro patologista da Tecomat, ao 2º tramo (elevado).

Após a escolha dos pontos de estudo, houve a quebra da superfície do betão, para aspersão da fenolftaleína direta na estrutura, devido a suas dimensões. Três dos quatro pilares analisados já possuíam profundidade de carbonatação superior ao recobrimento da armadura, como é possível ver na Figura 5.5.



*Figura 5.5 – Resultado da aspersão com solução de fenolftaleína em zonas quebradas de fresco de 3 pilares.
(Acervo técnico da Tecomat Engenharia)*

A proposta de intervenção para o reservatório foi recuperar as áreas mais afectadas pela carbonatação, com o planeamento baseado no manual da Saint-Gobain (2021). Este manual trata a escolha do tipo de reparo de acordo com as profundidades de degradação encontradas nas obras, assim sendo, para o caso de estudo em questão, foi sugerido o reparo semiprofundo, com aberturas entre 3 e 6 cm a preencher.

Para a realização deste tipo de reparo inicialmente é feita uma análise com o objetivo de identificar as zonas deterioradas, determinando assim qual será a “janela” de reparo. Em seguida:

1. Remoção do betão nas áreas atingidas, criando um substrato com boas condições de aderência;
2. Limpeza das armaduras para a retirada de possíveis contaminantes existentes, além de “remover o betão até deixar pelo menos 2 cm livres em torno da barra. Em barras corroídas, a liberação deverá ser feita longitudinalmente em, no mínimo, 15 cm além do trecho corroído”, Saint-Gobain (2021). Se for observado um dano grave ou falta de armaduras na estrutura, deverá ser feita a reposição do aço;
3. Pintar/cobrir as armaduras com material inibidor de corrosão;
4. Preencher as cavidades com graute fluido com resistência à compressão superior a 50MPa, seguida de cura adequada para obtenção de um resultado uniforme;

5. Aplicação de tinta a base de poliuretano na superfície do novo betão, com o objetivo de impedir a entrada de água, mantendo a estrutura estanque.

5.3 CASO 3 – BRASIL

Este caso é referente a um edifício comercial, um Hotel de 48 anos existente em Salvador, na Bahia. A inspeção foi motivada pela futura mudança de uso, convertendo-o para uma edificação residencial, necessitando de resultados que garantissem um bom estado de conservação da construção (Tecomat Engenharia). Pelo processo estar correndo em sigilo, não será possível divulgar fotos externas do edifício.

Foram escolhidos 15 pontos para realização dos ensaios de profundidade de carbonatação, sortidos entre os 29 pavimentos. Onze pilares, três vigas e uma laje foram analisados com a solução de fenolftaleína (Tecomat Engenharia), Figura 5.6. Assim como no caso do reservatório, os pontos escolhidos sofreram quebra da superfície do betão, para realização do ensaio naquele momento, in loco, seguindo os critérios adotados pela RILEM CPC 18 (1984).



Figura 5.6 – Exemplo de viga com corrosão de armadura. (Acervo técnico da Tecomat Engenharia)

Todas as vigas e seis dos onze pilares foram identificados com betão de recobrimento totalmente carbonatado, além de dois pilares estarem com profundidade muito próxima ao recobrimento, ou seja, a menos de 5mm da armadura, como é possível ver exemplos na Figura 5.7. Apenas a laje não foi encontrada com profundidade de carbonatação superior ao betão de recobrimento.



Figura 5.7 – Exemplos de aplicação da solução de fenolftaleína em carotes frescos. (Acervo técnico da Tecomat Engenharia)

A técnica de intervenção sugerida, devido aos resultados encontrados, foi a de recuperação estrutural, retirando o betão antigo, o substituindo por betão de alta resistência, seguido do aumento da seção dos pilares, para conformidade do recobrimento com as normativas. Desta forma, baseado no método apresentado pelo manual da Saint-Gobain (2021), foi proposto o reparo semiprofundo, com aberturas entre 3 e 6 cm a preencher, semelhante ao caso 2.

Para realização da intervenção, o esquema recomendado foi:

1. Remoção do betão nas áreas atingidas, criando um substrato com boas condições de aderência;
2. Limpeza das armaduras para a retirada de possíveis contaminantes existentes, além de “remover o betão até deixar pelo menos 2 cm livres em torno da barra. Em barras corroídas, a liberação deverá ser feita longitudinalmente em, no mínimo, 15 cm além do trecho corroído”, Saint-Gobain (2021). Se for observado um dano grave ou falta de armaduras na estrutura, deverá ser feita a reposição do aço;
3. Preencher as cavidades com graute fluido de alta resistência à compressão, seguida de cura adequada para obtenção de um resultado uniforme.

5.4 CASO 4 – MÉXICO

Este caso foi retirado da literatura. O estudo é referente a uma torre cilíndrica (TP U2) de betão armado, com mais de 70 metros de altura, Figura 5.8, que pertencia a instalações do ramo petrolífero, no estado de Veracruz no México. Como as construções já possuíam 50 anos de serviço, e estavam inativas e abandonadas há anos, com a finalidade de retomar seu funcionamento, era preciso “identificar as medidas corretivas necessárias para prolongar a vida útil desses ativos existentes”, Maldonado-Bandala *et al.* (2018).



Figura 5.8 – Localização da torre TP U2 destacada em amarelo. (Maldonado-Bandala *et al.*, 2018)

Mesmo localizada entre grandes porções de águas salgadas, Laguna de Pajaritos e Rio Coatzacoalcos, a análise permitiu concluir que a carbonatação foi o fator mais relevante para o início da corrosão das armaduras, “A alta concentração de CO_2 e a alta humidade relativa do ar no ambiente reduziram o pH do betão e geraram a despassivação da armadura de aço”, Maldonado-Bandala *et al.* (2018).

Devido as grandes dimensões da estrutura, a inspeção visual foi realizada com a utilização de drone, Figura 5.9, sendo possível identificar áreas que passaram por reparos prévios (não tão bem realizados), áreas com descolamento do betão, corrosão de armaduras expostas além de fissuras diversas (Maldonado-Bandala *et al.*, 2018). Foi executado o ensaio de fenolftaleína em doze zonas.



Figura 5.9 – Fotos da inspeção com pontos de corrosão com armadura exposta, fissuras, reparos localizados, além de descolamento do betão. (Maldonado-Bandala et al., 2018)

Pelo estado crítico encontrado, foi preciso traçar uma proposta de reabilitação urgente. O plano de intervenção consistia em (Maldonado-Bandala *et al*, 2018):

1. Remoção do betão contaminado apenas nas zonas anódicas;
2. Limpeza das armaduras de aço antes da reposição do betão, todavia, se a secção encontrada estivesse com menos de 90% do diâmetro original, seria necessária a substituição das barras de aço;
3. Vedação das fissuras encontradas, para que fosse impedida a entrada de agentes agressivos;
4. Aplicação de argamassa de reparo estrutural, a base de cimento Portland, fluida o suficiente para aplicação manual;
5. Aplicação de inibidor de corrosão de nitrato de cálcio nas zonas reabilitadas;
6. Aplicação de “cobertura anticarbonatação impermeável a cloretos com capacidade para colmatar fissuras”.

6. PRINCIPAIS CONCLUSÕES (E TRABALHOS FUTUROS)

Os casos discutidos apresentaram métodos de intervenção referentes a princípios (NP EN 1504-9, 2009) não só relacionados com a corrosão da armadura, mas também com problemas no betão, como por exemplo a necessidade de reforço estrutural devido a mudança de utilização das edificações. Contudo, os estudos num geral propuseram técnicas, para combater a corrosão, referentes ao Princípio 7, 8 e 11, como o aumento do recobrimento, a substituição do betão contaminado e a aplicação de produto de protecção superficial e inibidor de corrosão. No Quadro 6.1 abaixo, é possível ver um resumo dos métodos aplicados em cada caso.

Quadro 6.1 – Resumo dos métodos aplicados nos casos de estudo. (A autora)

Caso 1	Princípio 7	Método 7.1	Aumento do recobrimento
	Princípio 7	Método 7.2	Substituição do betão contaminado
	Princípio 8	Método 8.3	Aplicação de protecção superficial
	Princípio 4	Método 4.1	Adição ou substituição de armaduras
	Princípio 4	Método 4.4	Adição de argamassa ou betão
Caso 2	Princípio 7	Método 7.2	Substituição do betão contaminado
	Princípio 11	Método 11.2	Aplicação de inibidor de corrosão
Caso 3	Princípio 7	Método 7.1	Aumento do recobrimento
	Princípio 7	Método 7.2	Substituição do betão contaminado
Caso 4	Princípio 7	Método 7.2	Substituição do betão contaminado
	Princípio 11	Método 11.2	Aplicação de inibidor de corrosão
	Princípio 4	Método 4.6	Vedação das fissuras

Todavia, é possível perceber que foram adotadas na maioria dos casos soluções de prevenção ou técnicas para uma fase inicial do problema, mesmo as estruturas sendo encontradas em estado elevado de degradação. Por exemplo, a NP EN 1504-9 (2009) é clara quando refere que o método 7.1 deve ser utilizado quando a armadura ainda estiver passivada, proporcionando protecção extra, o que não condizia com a situação da edificação do Caso 1.

Nos elementos em que o betão contaminado foi substituído ou reforçado com novo material, foi como se a peça anterior fosse “ignorada”, dando espaço para uma nova, que foi criada para funcionar como uma barreira de protecção, além de garantir maior resistência ao elemento, que uma hora, provavelmente, também será atingida pela carbonatação, dando início ao ciclo novamente.

É facto que os métodos propostos possivelmente são mais económicos que outros, como por exemplo a recalibração ou a protecção catódica, ainda mais em estruturas gigantes como foram apresentadas, o que gera uma preferência na hora da escolha. Mas talvez, pelos países mencionados também não possuem uma normativa similar a NP EN 1504, as soluções passam a depender mais das experiências do engenheiro estrutural envolvido, sendo elas limitadas ou não. A falta da regulamentação gera um vazio, que poderia proporcionar medidas mais adequadas para os problemas identificados.

Esses pontos mostram mais uma vez que na realidade, as construções novas recebem mais importância e cuidado que o património edificado já existente, que é superior em quantidade e demanda atenção do setor da construção civil.

Durante o período de pesquisa, por exemplo, foi possível identificar que ainda não existem muitos estudos publicados sobre casos reais, e não acompanhados em laboratório, de estruturas de betão carbonatado, o que leva esta área a não receber o destaque que merece. Infelizmente não foi possível apresentar casos de estudo de Portugal, pois mesmo contactando oito empresas do setor da reabilitação na construção civil, não foram obtidas respostas até o momento final deste trabalho.

Por isso, como propostas para trabalhos futuros, seria muito interessante e necessário ao ramo, a análise de casos reais portugueses de estruturas de betão armado já carbonatado, desde a fase da inspeção até o modelo de intervenção. Além do clima ser diferente dos casos apresentados no capítulo anterior, algo que impacta diretamente no processo em si, é pertinente fazer a comparação do que é sugerido no meio teórico, através das normativas, e como é realmente executado na prática, investigando os motivos que levaram a cada reparação.

Mais instigante ainda, seria encontrar casos de estudo onde a estrutura de betão armado, que foi identificada carbonatada, e passou por reabilitação, tivesse sido reinspecionada após a execução

da intervenção. Trazendo novas questões para serem debatidas quanto aos métodos e produtos aplicados em situações desse tipo.

7. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ANDRÉ, Ruben Filipe Contente (2013). “Reparação de estruturas de betão armado afetado pela carbonatação do betão e corrosão das armaduras”. Dissertação de Mestrado em Engenharia Civil, Universidade Lusófona, Lisboa.

ARAÚJO, Fernanda Wanderley Corrêa (2009). “Estudo da repassivação da armadura em concretos carbonatados através da técnica de realcalinização química”. Dissertação de Doutorado em Engenharia de Construção Civil e Urbana, Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, São Paulo.

ABNT NBR 15575:2013. Desempenho de edificações habitacionais, Associação Brasileira de Normas Técnicas, Rio de Janeiro.

ABNT NBR 6118:2014. Projeto de estruturas de concreto – procedimentos, Associação Brasileira de Normas Técnicas, Rio de Janeiro.

ASTM E 632-82. Standard Practice for Developing Accelerated Tests to Aid Prediction of the Service Life of Building Components and Materials, American Society for Testing and Materials, USA.

ASTM C 876-91. Standard test method for halfcell potentials of uncoated reinforcing steel in concrete, American Society for Testing and Materials, USA.

ASTM C 876-15. “Standard test method for halfcell potentials of uncoated reinforcing steel in concrete, American Society for Testing and Materials, USA.

BOLINA, Fabricio. L.; TUTIKIAN, Bernardo. F.; HELENE, Paulo. R. L. (2019). “Patologia de estruturas.” Oficina de textos: São Paulo.

BS EN 14630: 2006. Products and systems for the protection and repair of concrete structures - Test methods - Determination of carbonation depth in hardened concrete by the phenolphthalein method, 2006.

COSTA, A. e APPLETON, J., Estruturas de Betão I Parte II – Materiais, 2002, IST Lisboa

CEB Bulletin 182 (1989). “Durable Concrete Structures”, Comité Euro-International du Béton e FIB – International Federation for Structural Concrete, Suíça.

CEB Bulletin 192 (1989). “Diagnosis and assessment of concrete structures: state-of-art report”, Comité Euro-International du Béton e FIB – International Federation for Structural Concrete, Suíça.

CEB Bulletin 238 (1997). “New approach to durability design - An example for carbonation induced corrosion” Comité Euro-International du Béton e FIB – International Federation for Structural Concrete, Suíça.

CEN/TS 14038-1:2004, Electrochemical realkalization and chloride extraction treatments for reinforced concrete - Part 1: Realkalization.

EN 12696: 2000, Cathodic protection of steel in concrete.

FIGUEIREDO, Enio; MEIRA, Gibson (2013). “Boletín técnico 6 Corrosión de armadura de estructuras de hormigón”. Mérida: Asociación Latinoamericana de Control de Calidad, Patología y Recuperación de la Construcción - ALCONPAT Internacional.

GOUVEIA, Ema Rita Reais (2017). “Ciclo de vida de pontes rodoviárias de betão: estudo da fiabilidade da estrutura para estados limites de despassivação e corrosão”. Dissertação de Mestrado Integrado em Engenharia Civil, Universidade de Coimbra, Coimbra.

HELENE, Paulo Roberto do Lago (1993). “Contribuição ao estudo da corrosão em armaduras de concreto armado”. Dissertação de Doutorado em Engenharia Civil, Universidade de São Paulo, São Paulo.

HENRIQUES, Sara Martins (2016). “Procedimentos de reparação de estruturas de betão armado - Normas e Recomendações”. Dissertação de Mestrado em Engenharia Civil, Instituto Técnico de Lisboa, Lisboa.

INÁCIO, Hugo Anjos (2018). “Sistematização das técnicas de reabilitação e reforço de estruturas de betão armado”. Dissertação de Mestrado em Reabilitação Urbana, Instituto Politécnico de Tomar, Tomar.

ISO (1984). “Performance standards in Building – Principles for their preparation and factors to be considered”. ISO 6241, International Organization for Standardization, Switzerland.

LNEC (1993). “E391 - Betões. Determinação da resistência à carbonatação”. Laboratório Nacional de Engenharia Civil, Lisboa.

MALDONADO-BANDALA, E. E., NIEVES-MENDOZA, D., VELA-JIMÉNEZ, J. L., CASTRO-BORGES, P. (2018). "Evaluation of pathological problems associated with carbonation and sulfates in a concrete tower with more than 50 years in service". Revista Alconpat, Volume 8, Issue 1 (january – april 2018), pp 94 – 107.

MARTINS, Carlos Alberto Cavalcanti (2011). “Estimativa da profundidade de carbonatação do concreto com o uso de redes neurais”. Dissertação de mestrado em Engenharia Civil, Universidade Católica de Pernambuco, Pernambuco.

MONTEIRO, Isabel Filipa Garcia (2010). "Modelação da evolução da carbonatação em elementos de betão armado". Dissertação de Mestrado em Engenharia Civil, Instituto Superior de Engenharia de Lisboa, Lisboa.

MOURA, Daniela da Silveira (2012). "Deterioração e Reabilitação de Estruturas de Betão Armado". Dissertação de Mestrado em Tecnologias e Gestão das Construções, Instituto Superior de Engenharia do Porto.

NARDINO, Cladilson; VALDÉS, Analiet; MEDEIROS, Marcelo Henrique; PIERALISI, Ricardo. (2019). "Previsão de vida útil de estruturas por modelos matemáticos e carbonatação natural". 4º Simpósio Paranaense de Patologia das Construções, Paraná.

NP EN 1990:2009, Eurocódigo 1 – Bases para o projecto de estruturas. Instituto Português da Qualidade, Portugal.

NP EN 1992-1-1:2010, Eurocódigo 2 – Projecto de estruturas de betão, Parte 1-1: Regras gerais e regras para edifícios. Instituto Português da Qualidade, Portugal.

NP EN 1504-1:2006, Produtos e sistemas para a protecção e reparação de estruturas de betão – Definições, requisitos, controlo da qualidade e avaliação da conformidade. Parte 1: Definições. Instituto Português da Qualidade, Portugal.

NP EN 1504-2:2006, Produtos e sistemas para a protecção e reparação de estruturas de betão – Definições, requisitos, controlo da qualidade e avaliação da conformidade. Parte 2: Sistemas de protecção superficial do betão. Instituto Português da Qualidade, Portugal.

NP EN 1504-3:2006, Produtos e sistemas para a protecção e reparação de estruturas de betão – Definições, requisitos, controlo da qualidade e avaliação da conformidade. Parte 3: Reparação estrutural e não estrutural. Instituto Português da Qualidade, Portugal.

NP EN 1504-4:2006, Produtos e sistemas para a protecção e reparação de estruturas de betão – Definições, requisitos, controlo da qualidade e avaliação da conformidade. Parte 4: Colagem estrutural. Instituto Português da Qualidade, Portugal.

NP EN 1504-5:2006, Produtos e sistemas para a protecção e reparação de estruturas de betão – Definições, requisitos, controlo da qualidade e avaliação da conformidade. Parte 5: Injecção do betão. Instituto Português da Qualidade, Portugal.

NP EN 1504-6:2008, Produtos e sistemas para a protecção e reparação de estruturas de betão – Definições, requisitos, controlo da qualidade e avaliação da conformidade. Parte 6: Ancoragem de armaduras de aço. Instituto Português da Qualidade, Portugal.

NP EN 1504-7:2008, Produtos e sistemas para a protecção e reparação de estruturas de betão – Definições, requisitos, controlo da qualidade e avaliação da conformidade. Parte 7: Protecção contra a corrosão das armaduras. Instituto Português da Qualidade, Portugal.

NP EN 1504-8:2006, Produtos e sistemas para a protecção e reparação de estruturas de betão – Definições, requisitos, controlo da qualidade e avaliação da conformidade. Parte 8: Controlo da qualidade e avaliação da conformidade. Instituto Português da Qualidade, Portugal.

NP EN 1504-9:2009, Produtos e sistemas para a protecção e reparação de estruturas de betão – Definições, requisitos, controlo da qualidade e avaliação da conformidade. Parte 9: Princípios gerais para a utilização de produtos e sistemas. Instituto Português da Qualidade, Portugal.

NP EN 1504-10:2008, Produtos e sistemas para a protecção e reparação de estruturas de betão – Definições, requisitos, controlo da qualidade e avaliação da conformidade. Parte 10: Aplicação de produtos e sistemas e controlo da qualidade da obra. Instituto Português da Qualidade, Portugal.

POURBAIX, M. (1974). “Atlas of Electrochemical Equilibrium in Aqueous Solutions”. Association of Corrosion Engineers. Houston.

REIS, R., SOARES, J., CAMÕES, A., RIBEIRO, M. (2018). "Revestimentos tradicionais como proteção de betões de elevado volume de cinzas volantes face à carbonatação". 3º Congresso Luso-Brasileiro Materiais de Construção Sustentáveis, Coimbra.

RÉUS, Giovana Costa (2017). "Recalcalinização química como meio de recuperação de estruturas de concreto armado carbonatadas". Dissertação de Mestrado Engenharia de Construção Civil, Universidade Federal do Paraná, Paraná.

RILEM CPC 18:1984, Measurement of Hardened concrete carbonation depth. Recomendação RILEM, *Materials and Structures.*, Vol.17, Nº 102.

RODRIGUES, José Jorge Almeida (2017). "Proteção e Reabilitação de Estruturas de Betão Armado". Dissertação de Mestrado em Engenharia Civil, Instituto Superior de Engenharia de Lisboa, Lisboa.

RODRIGUES, Lucas; JÚNIOR, Adilson. (2019). "Carbonatação em estruturas de concreto". Revista Refaf. Mato Grosso. V.8, N. 1, p. 90-107.

SAINT-GOBAIN, Manual de Especificações. Concrete works - Soluções técnicas para reparos, reforços e recuperação de estruturas e superfícies de betão, 2021, Weber.

SANTOS, Tiago Manuel Heleno dos (2014). "Corrosão das armaduras do betão armado: causas, consequências, prevenção e projeto de durabilidade." Dissertação de Mestrado em Engenharia Civil, Instituto Superior de Engenharia de Lisboa, Lisboa.

SILVA, Hébori C.; MELO, Felipe P. (2020). "CARBONATAÇÃO DO CONCRETO: Análise comparativa da profundidade de carbonatação em concretos com agregados convencionais e reciclados". Fundação de Ensino e Pesquisa do Sul de Minas, Minas Gerais.

SILVA, Matheus; MADEIROS, João; CAVALCANTE, Lia; GOMES, George; CAVALCANTE, Felipe; MOTA, Larissa; AMANCIO, Felipe; POSSAN, Edna; MESQUITA,

Esequiel. (2019). “Avanço da carbonatação em concretos para idades iniciais”. II Simpósio Brasileiro sobre Reabilitação das Construções, Ceará.

SIMAS, Marcos da Silva Lopes (2007). “Sistemas de protecção do betão face à carbonatação”. Dissertação de Mestrado em Engenharia Civil, Instituto Superior Técnico da Universidade Técnica de Lisboa, Lisboa.

SOUSA, José Albano Martins (2011). "Inspeção e reabilitação de estruturas segundo a NP EN 1504 - Caso de obra". Dissertação de Mestrado em Engenharia Civil, Universidade do Porto, Porto.

TUUTTI, Kyosti (1982). “Corrosion of steel in concrete”. Tese de Doutoramento, Division of Building Materials, Swedish Cement and Concrete Research Institute, Stockholm.

ANEXO A

QUESTIONÁRIO CASOS DE ESTUDO - INTERVENÇÃO NO BETÃO CARBONATADO

Obra Nº: 1

1.Localidade:	Bairro do Recife/Pernambuco									
2.Tipo de Edificação:	<input type="checkbox"/> Residencial	<input type="checkbox"/> Comercial	<input checked="" type="checkbox"/> Indústria	<input type="checkbox"/> Outros:						
3.Idade da Edificação:	108 anos									
4.Quantidade de pavimentos:	BLOCO A: 2 pavimentos / BLOCO B: 7 pavimentos / BLOCO C: 6 pavimentos / BLOCO D: 5 pavimentos									
5.Possui projeto(s):	<input type="checkbox"/> Estrutural	<input checked="" type="checkbox"/> Arquitetura	<input checked="" type="checkbox"/> Outros	<input type="checkbox"/> Não						
6.Passou por inspeção tátil visual:	<input type="checkbox"/> Não <input checked="" type="checkbox"/> Sim									
7.Elementos Ensaaiados:	<input checked="" type="checkbox"/> Pilares	<input checked="" type="checkbox"/> Vigas	<input type="checkbox"/> Lajes							
8.Quantidade de elementos ensaiados:	60 Pilares	1 Vigas	<input type="checkbox"/> Lajes							
9. Profundidade de carbonatação dos elementos ensaiados:	Bloco A									
	Ponto Nº	Pilar 9	Pilar 17	Pilar 37	Pilar 23	Pilar 34	Pilar 07	Pilar 03	Pilar 34	Pilar 37
	Cobrimto	5,45 cm	2,09cm	2,32cm	3,02cm	5,37cm	2,88cm	2,45cm	2,77cm	2,56cm
	Profundidade de carbonatação	> 5,45cm	> 2,09cm	> 2,32cm	> 3,02cm	3,29cm	2,34cm	2,31cm	2,24cm	2,06cm
	Bloco B									
	Ponto Nº	Pilar 48	Pilar 23	Pilar 36	Pilar 02	Pilar 19	Pilar 15	Pilar 37	Viga B36-05	Pilar 22
	Cobrimto	4,13cm	2,65cm	3,25cm	2,10cm	1,20cm	3,51cm	2,05cm	2,32cm	1,85cm
	Profundidade de carbonatação	0,93cm	0,69cm	0,64cm	0,69cm	>1,20cm	0,65cm	1,61cm	>2,32cm	0,52cm
	Ponto Nº	Pilar 29	Pilar 12	Pilar 24	Pilar 28	Pilar 45	Pilar 26	Pilar 35	Pilar 05	
	Cobrimto	2,90cm	1,90cm	3,13cm	1,60cm	2,20cm	3,19cm	1,22cm	2,94cm	
	Profundidade de carbonatação	0,84cm	0,30cm	0,1cm	0,3mm	0,66cm	0,45cm	0,48cm	0,13cm	
	Bloco C									
	Ponto Nº	Pilar 24	Pilar 28	Pilar 31	Pilar 38	Pilar 46	Pilar 25	Pilar 30	Pilar 35	Pilar 15
	Cobrimto	2,61cm	2,00cm	3,49cm	1,73cm	3,56cm	2,40cm	2,35cm	1,98cm	1,44cm
	Profundidade de carbonatação	>2,61cm	>2,00cm	>3,49cm	>1,73cm	>3,56cm	0,9mm	>2,35cm	>1,98cm	>1,44cm
	Ponto Nº	Pilar 35	Pilar 33	Pilar 29	Pilar 31					
	Cobrimto	3,90cm	1,95cm	2,27cm	4,34cm					
	Profundidade de carbonatação	>0,30cm	>1,95cm	>2,27cm	>4,34cm					
	Bloco D									
	Ponto Nº	Pilar 50	Pilar 49	Pilar 39	Pilar 48	Pilar 60	Pilar 47	Pilar 16	Pilar 14	Pilar 22
	Cobrimto	3,00cm	4,50cm	2,43cm	3,83cm	7,67cm	6,43cm	3,65cm	2,76cm	2,80cm
	Profundidade de carbonatação	>3,00cm	>4,50cm	>2,43cm	3,00cm	3,92cm	3,53mm	1,29cm	2,11cm	1,09cm
	Ponto Nº	Pilar 27	Pilar 36	Pilar 39	Pilar 63	Pilar 17	Pilar 24	Pilar 47	Pilar 51	Pilar 76
	Cobrimto	2,92cm	1,54cm	3,76cm	1,85cm	2,93cm	2,60cm	1,61cm	2,17cm	0,97cm
	Profundidade de carbonatação	0,91cm	>1,54cm	>3,76cm	1,42cm	1,69cm	2,18cm	>1,61cm	>2,17cm	>0,97cm
	Ponto Nº	Pilar 82	Pilar 79	Pilar 53	Pilar 21					
	Cobrimto	3,40cm	3,46cm	2,89cm	2,63cm					
	Profundidade de carbonatação	7,52cm	9,40cm	>2,89cm	7,10cm					
10. Tipo de intervenção/Técnica utilizada:	Bloco A, recuperar e aplicar produto; Bloco B, aplicar o produto; Bloco C, reforçar periferia, e produto internamente; Bloco D, reforço por aumento da carga.									
11. Produtos utilizados na intervenção:	Blocos B e C: SikaTop-120 BR, Nafufill CR ou equivalente técnico.									
12.Outros detalhes:										
13.É possível partilhar fotos:	<input type="checkbox"/> Não	<input checked="" type="checkbox"/> Sim								
14. Foi feita alguma inspeção após a intervenção:	<input checked="" type="checkbox"/> Não	<input type="checkbox"/> Sim	Se sim, como estava a estrutura? _____							

QUESTIONÁRIO CASOS DE ESTUDO - INTERVENÇÃO NO BETÃO CARBONATADO

Obra Nº: 2

1.Localidade:	Maceió, Alagoas										
2.Tipo de Edificação:	<input type="checkbox"/>	Residencial	<input type="checkbox"/>	Comercial	<input type="checkbox"/>	Indústria	<input checked="" type="checkbox"/>	Outros:	Reservatório		
3.Idade da Edificação:	45 Anos										
4.Quantidade de pavimentos:	Cerca de 16 m de altura do nível do terreno à laje da tampa										
5.Possui projeto(s):	<input type="checkbox"/>	Estrutural	<input type="checkbox"/>	Arquitetura	<input type="checkbox"/>	Outros	<input checked="" type="checkbox"/>	Não			
6.Passou por inspeção tátil visual:	<input type="checkbox"/>	Não	<input checked="" type="checkbox"/>	Sim							
7.Elementos Ensaaiados:	<input checked="" type="checkbox"/>	Pilares	<input type="checkbox"/>	Vigas	<input type="checkbox"/>	Lajes					
8.Quantidade de elementos ensaiados:	4	Pilares	0	Vigas	0	Lajes					
9. Profundidade de carbonatação dos elementos ensaiados:	Bloco A										
	Ponto Nº	P1 A(Térreo)	P2 A(Térreo)	P3 A(Térreo)	P4 A(Térreo)						
	Cobrimento	2,67	2,86	1,78	2,91						
	Profundidade de carbonatação	> 2,67cm	> 2,86cm	> 2,98cm	> 1,07cm						
10. Tipo de intervenção/Técnica utilizada:	Encamisamento de toda a estrutura aumentando o cobrimento para 5cm										
11. Produtos utilizados na intervenção:	Graute fluido com resistencia superior à 50MPa e posterior aplicação de tinta a base de PU										
12.Outros detalhes:											
13.É possível compartilhar fotos:	<input type="checkbox"/>	Não	<input checked="" type="checkbox"/>	Sim							
14. Foi feita alguma inspeção após a intervenção:	<input checked="" type="checkbox"/>	Não	<input type="checkbox"/>	Sim	Se sim, como estava a estrutura? _____						

QUESTIONÁRIO CASOS DE ESTUDO - INTERVENÇÃO NO BETÃO CARBONATADO

Obra Nº: 3

1.Localidade:	Rua Fonte do boi - Salvador, Bahia										
2.Tipo de Edificação:	<input type="checkbox"/>	Residencial	<input checked="" type="checkbox"/>	Comercial	<input type="checkbox"/>	Indústria	<input type="checkbox"/>	Outros:			
3.Idade da Edificação:	48 anos										
4.Quantidade de pavimentos:	Subsolo 2 + Subsolo 1 + Térreo + Mezanino 1 + Mezanino 2 + 1º andar + 2º ao 21º tipos + 22º + 23º + Cobertura										
5.Possui projeto(s):	<input type="checkbox"/>	Estrutural	<input checked="" type="checkbox"/>	Arquitetura	<input type="checkbox"/>	Outros	<input type="checkbox"/>	Não			
6.Passou por inspeção tátil visual:	<input type="checkbox"/>	Não	<input checked="" type="checkbox"/>	Sim							
7.Elementos Ensaaiados:	<input checked="" type="checkbox"/>	Pilares	<input checked="" type="checkbox"/>	Vigas	<input checked="" type="checkbox"/>	Lajes					
8.Quantidade de elementos ensaiados:	15	Pilares	3	Vigas	1	Lajes					
9. Profundidade de carbonatação dos elementos ensaiados:	Bloco B										
	Ponto Nº	P3 - 23°	P8 - 23°	P1 - 22°	P2 - 22°	P3-22°	L26/28 - 21°	P20-21°	P19-11°	P2 - 11°	
	Cobrimento	3,85	3,39	3,93	3,27	6,22	3,5	4,7	5,3	3,15	
	Profundidade de carbonatação	3,61	>3,39	3,45	>3,27	2,98	2,11	3,12	3,09	>3,15	
	Ponto Nº	P7-11°	P23-4°	P26-4°	Viga - 1°	Viga - 1°	Viga-1°				
	Cobrimento	2,2	3,1	2,79	1,71	2,52	2,28				
Profundidade de carbonatação	>2,2	>3,1	>2,79	>1,71	>2,52	>2,28					
10. Tipo de intervenção/Técnica utilizada:	Recuperação estrutural de todas as estruturas de periferia da edificação (Aumento do cobrimento para valores iguais à 4cm)										
11. Produtos utilizados na intervenção:	Graute fluido 50MPa										
12.Outros detalhes:											
13.É possível compartilhar fotos:	<input type="checkbox"/>	Não	<input checked="" type="checkbox"/>	Sim							
14. Foi feita alguma inspeção após a intervenção:	<input checked="" type="checkbox"/>	Não	<input type="checkbox"/>	Sim	Se sim, como estava a estrutura? _____						

QUESTIONÁRIO CASOS DE ESTUDO - INTERVENÇÃO NO BETÃO CARBONATADO

Obra Nº:	4								
1.Localidade:	Litoral sul do estado de Veracruz, México								
2.Tipo de Edificação:	<input type="checkbox"/> Residencial	<input type="checkbox"/> Comercial	<input checked="" type="checkbox"/> Indústria	<input type="checkbox"/> Outros:					
3.Idade da Edificação:	Não é mencionada.								
4.Quantidade de pavimentos:	Uma torre cilíndrica (U2) com 23 m de diâmetro x 70+ m de altura								
5.Possui projeto(s):	<input type="checkbox"/> Estrutural	<input type="checkbox"/> Arquitetura	<input type="checkbox"/> Outros	<input checked="" type="checkbox"/> Não					
6.Passou por inspeção tátil visual:	<input type="checkbox"/> Não	<input checked="" type="checkbox"/> Sim							
7.Elementos Ensaiaados:	<input type="checkbox"/> Pilares	<input type="checkbox"/> Vigas	<input type="checkbox"/> Lajes	<input checked="" type="checkbox"/> Torre Cilíndrica					
8.Quantidade de elementos ensaiados:	<input type="checkbox"/> Pilares	<input type="checkbox"/> Vigas	<input type="checkbox"/> Lajes	<input checked="" type="checkbox"/> 12	Pontos				
9. Profundidade de carbonatação dos elementos ensaiados:	Ponto Nº								
	Cobrimento								
	Profundidade de carbonatação								
	Ponto Nº								
	Cobrimento								
	Profundidade de carbonatação								
10. Tipo de intervenção/Técnica utilizada:	O concreto deteriorado e/ou contaminado só deve ser removido das zonas anódicas. O vergalhão de aço precisa ser limpo e o substrato preparado. Se considerado necessário após a avaliação, o vergalhão deve ser substituído. Em locais onde a diminuição do diâmetro nominal original exceda 10%, a estrutura precisa ser reforçada através da substituição do vergalhão danificado por vergalhão do diâmetro original e com o mesmo ponto de escoamento (fy). A recuperação da seção é melhor feita usando argamassa de reparo estrutural preparada contendo cimento Portland resistente ao sulfato (RS). Ele precisará ser suficientemente fluido para permitir a aplicação manual. Para reduzir a probabilidade de corrosão em áreas reparadas, será necessário aplicar inibidor de corrosão de nitrato de cálcio. Será necessário aplicar uma cobertura anticarbonatação impermeável a cloretos com capacidade para colmatar fissuras e incluir componentes químicos em conformidade com ASTM C494 / C494M-17 (2017). Se aparecerem rachaduras, elas devem ser cobertas, pois são o principal ponto de entrada de contaminantes.								
11. Produtos utilizados na intervenção:									
12.Outros detalhes:									
13.É possível compartilhar fotos:	<input type="checkbox"/> Não	<input checked="" type="checkbox"/> Sim							
14. Foi feita alguma inspeção após a intervenção:	<input checked="" type="checkbox"/> Não	<input type="checkbox"/> Sim	Se sim, como estava a estrutura? _____						



FICHA TÉCNICA DE PRODUTO

SikaTop®-120 BR

Argamassa polimérica para revestimento e acabamento final em estruturas de concreto

DESCRIÇÃO DO PRODUTO

SikaTop®-120 BR é uma argamassa cimentícia, polimérica, pré-dosada com baixa permeabilidade à água, ideal para nivelar, revestir e estucar superfícies de concreto novas ou reparadas em espessuras de até 2 mm. É fornecido pronto para o uso, bastando misturar os dois componentes (A e B).

USOS

- Proteção e revestimento superficial de grandes áreas de concreto e alvenaria, em espessuras de até 2 mm;
- Proteção superficial do concreto aparente;
- Acabamento final de superfícies de concreto novas ou recuperadas;
- Pré-moldados;
- Para correção de falhas e imperfeições superficiais de elementos de concreto;
- Nivelar superfícies rugosas de concreto;
- Homogeneizar cor em peças de concreto após reparo e reforço estrutural.

DADOS DO PRODUTO

Base química	Cimento Portland, areia de quartzo e resina de estireno butadieno.
Embalagem	Conjunto com 18kg (A+B).
Aspecto / Cor	Parte A: líquido branco leitoso Parte B: pó fino Produto misturado: cinza escuro
Prazo de validade	6 meses a partir da data de produção.
Condições de estocagem	Estocado apropriadamente, nas embalagens originais e intactas, em temperaturas entre +5°C e +35°C. Protegido da luz direta do sol e do gelo.
Densidade	~ 1,91 kg/l (a +25°C).

Ficha Técnica de Produto
SikaTop®-120 BR
Agosto 2017, Versão 01.01
020302040070000034

DADOS TÉCNICOS

Resistência à Compressão	7 dias	> 10 MPa
	14 dias	> 25 MPa
	28 dias	> 30 MPa
	ASTM C 349/02	
Resistência adesiva à tração	> 2 MPa (28 dias)	EN 1542

INFORMAÇÃO DO SISTEMA

Estrutura do sistema	<i>Proteção das Armaduras com Inibidor Anódico</i> 2 x Sikatop®-108 Armatec sobre a armadura limpa e isenta de produtos de corrosão.	
	<i>Proteção das Armaduras com Inibidor Misto</i> 300 – 400 ml de Sika® Ferrogard® 901 por saco de 25 kg de Sika® Monotop® 622 BR (reduzir 400 – 500 ml de água devido ao efeito plastificante do inibidor).	
	<i>Ponte de Aderência: concreto c/ porosidade alta (< 20MPa) ou baixa (> 50MPa)</i> Nata de cimento + Sika® Superfix diluído 1:1 em água.	
	<i>Ponte de Aderência: concreto c/ porosidade média (20MPa - 50MPa)</i> Saturar o substrato com água até a condição SSS – Superfície Saturada e Seca (sem empoçamentos).	
	<i>Recomposição do Concreto Deteriorado</i> Sika® Monotop®-622 BR aplicada manualmente ou por equipamento de projeção. No caso de ponte de aderência, aplicar na condição úmido sobre úmido.	

Proteção das Armaduras nas áreas não reparadas
Sika® Ferrogard® 903 aplicado por aspersão sobre concreto em quantas de mãos quanto necessárias para atingir consumo mínimo de 500 g/m².

Argamassa de Estucamento e Nivelamento
Sikatop®-120 BR aplicada com desempenadeira metálica (1-2 mm).

INFORMAÇÃO SOBRE A APLICAÇÃO

Proporção da mistura	Líquido : Pó = 28 : 72 (em peso).
Consumo	1,91kg/m² para 1 mm de espessura
Espessura da camada	Mínimo 1 mm / Máximo 2 mm.
Pot life	40-60 minutos (25°C / 50% u.r.a.).

INSTRUÇÕES DE APLICAÇÃO

QUALIDADE DO SUBSTRATO / PRÉ-TRATAMENTO

O substrato de concreto deve encontrar-se são, isento de partículas soltas, graxa, óleo, produtos de corrosão, pinturas, nata de cimento, agentes de cura química e desmoldantes.

Lixar toda a superfície para abrir a porosidade e garantir a aderência do produto. Aspirar todo o pó antes da aplicação.

MISTURA

Adicionar o conteúdo do componente B (pó) ao componente A (líquido) em recipiente não absorvente e estanque, misturando por 3 minutos com misturador mecânico de baixa rotação (400 - 500rpm) com hélice acoplada para mistura até o produto se apresentar homogêneo, tixotrópico e sem grumos.

Obs: Recomenda-se adicionar areia de quartzo na argamassa SikaTop®-120 BR (até proporção 1:3 em volume) com o objetivo de obter uma argamassa de con-

Ficha Técnica de Produto
SikaTop®-120 BR
Agosto 2017, Versão 01.01
020302040070000034

sistência seca, ideal para preenchimento de pequenas cavidades “buracos ou bicheiras” e imperfeições presentes na superfície da peça de concreto antes do revestimento com SikaTop®-120 BR.

APLICAÇÃO

Umedecer a superfície com a água e sobre a superfície saturada seca e aplicar o SikaTop® 120 BR com desempenadeira metálica em espessura máxima de 1 mm por camada. Aplicar de 2 a 3 camadas até atingir o acabamento desejado.

LIMPEZA DE FERRAMENTAS

Limpar todas as ferramentas e equipamentos de aplicação com água limpa imediatamente após o uso. Material endurecido/curado só poderá ser removido mecanicamente.

VALOR BASE DO PRODUTO

Todos os dados técnicos aqui contidos são baseados em testes de laboratórios. Medidas de valores em condições reais podem variar devido a condições fora de nosso controle.

RESTRIÇÕES LOCAIS

Para maiores informações sobre manuseio, estocagem e disposição dos resíduos consulte a versão mais recente de nossa Ficha de Segurança do Material que contém os dados disponíveis, das propriedades físicas, de ecologia, de toxicidade, e outros dados de segurança pertinentes.

ECOLOGIA, SAÚDE E SEGURANÇA

Para mais informações sobre manuseio, estocagem e disposição dos resíduos consulte a versão mais recente de nossa Ficha de Segurança do Material que contém os dados disponíveis, das propriedades físicas, de ecologia, de toxicidade, e outros dados de segurança pertinentes.

Ficha Técnica de Produto
SikaTop®-120 BR
Agosto 2017, Versão 01.01
020302040070000034

3 / 4

BUILDING TRUST



NOTA LEGAL

As informações e, em particular, as recomendações relacionadas à aplicação e à utilização final dos produtos Sika® são fornecidas de boa-fé e baseadas no conhecimento e na experiência de uso desses produtos, desde que devidamente armazenados, manuseados e aplicados em condições normais. Na prática, as variações no estado do material, nas superfícies e nas condições de aplicação em campo são de tal forma imprevisíveis que nenhuma garantia a respeito da comercialização ou aptidão de um determinado produto para um determinado fim, nem quaisquer responsabilidades decorrentes de qualquer relacionamento legal entre as partes poderão ser inferidas dessas informações ou de quaisquer recomendações dadas por escrito ou por qualquer outro meio. Os direitos de propriedade de terceiros deverão ser observados. Todas as encomendas aceitas estão sujeitas às condições de venda e de entrega vigentes. Os usuários deverão sempre consultar as versões mais recentes das fichas técnicas de cada produto (disponíveis mediante solicitação).

Sika S.A.
Av. Doutor Alberto Jackson Bygton,
1525
Vila Menck, CEP-06276-000 - Osasco - SP
Fone: 0800 703 7340
bra.sika.com



Ficha Técnica de Produto
SikaTop®-120 BR
Agosto 2017, Versão 01.01
020302040070000034

4 / 4

SikaTop-120BR-pt-BR-(08-2017)-1-1.pdf

BUILDING TRUST

