

Conceitos essenciais sobre Patologias em Estruturas de Concreto

Conteudista:

Rogério Calazans Verly

Brasília, setembro de 2022.

Conceitos essenciais sobre Patologias em Estruturas de Concreto

Módulo 1

Diagnóstico

Conforme estabelece O Art. 11 da INSTRUÇÃO NORMATIVA Nº 03/DNIT SEDE, DE 1º DE ABRIL DE 2022, o servidor que optar por receber a GECC relativa à elaboração de material didático, cede, tacitamente e em caráter irrevogável, a titularidade dos direitos patrimoniais relativos aos materiais produzidos em decorrência dessa percepção. Desta forma, tendo em vista o contido no Processo nº 50600.021235/2022-68, o DNIT poderá revisar o material cedido, adaptá-lo e utilizá-lo livremente em outros eventos que venha a promover, bem como o ceder a outros órgãos e entidades federais.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 - Efeito da deterioração e da manutenção no desempenho estrutural	3
Figura 2 - Composição do diagnóstico para manifestações patológicas	4
Figura 3 - Corrosão de armadura com deslocamento do concreto na base de um pilar	5
Figura 4 - Mecanismo do processo de corrosão das armaduras de reforço no concreto armado	6
Figura 5 - Fases do ciclo de uma estrutura de concreto	7
Figura 6 - Dreno mal posicionado provocando manchas na estrutura	7
Figura 7 - Dados de inspeção visual e dos ensaios se complementam para formar o diagnóstico	9
Figura 8 - Importância da inspeção visual mostrada em termos de informações obtidas e dos custos totais de inspeção	10
Figura 9 - Grupos de ensaios para avaliação das estruturas de concreto armado	10
Figura 10 - Métodos para avaliação da qualidade do concreto	11
Figura 11 - Desenho esquemático de como utilizar o ultrassom em um elemento de concreto	12
Figura 12 - Princípio de funcionamento do impacto-eco	12
Figura 13 - Exemplo de aplicação do impacto-eco	13
Figura 14 - Esquema com o princípio de medição do GPR	13
Figura 15 - A endoscopia pode ser um eficiente meio de complementação para a constatação de vazios, bastando a execução de um furo (a). Podem ser constatadas vazios bastante extensos (b)	14
Figura 16 - Extração de corpo de prova de uma estrutura	15
Figura 17 - Extração de corpo de prova de uma estrutura	15
Figura 18 - Representação esquemática do dispositivo para a determinação da força de arranque (a) e superfície de ruptura aproximadamente cônica (b)	16
Figura 19 - Esquema do arranjo para obtenção da velocidade superficial pelo impacto-eco	17
Figura 20 - Determinação da resistência superficial do concreto	17
Figura 21 - Equipamento utilizado para localização de barras de aço	18
Figura 22 - Utilização do fissurômetro para definição da abertura de uma fissura	19
Figura 23 - Imagem de microscópio mostrando fissuras associadas a ciclos de gelo-degelo	21
Figura 24 - Imagem de microscópio mostrando fissuras associadas a ciclos de gelo-degelo	21
Figura 25 - Uso de fenolftaleína para avaliação do avanço da frente de carbonatação	23
Figura 26 - Esquema do princípio de avaliação do mapeamento do potencial	24

SUMÁRIO

1.	APRESENTAÇÃO.....	1
2.	DIAGNÓSTICO	3
2.1	SINTOMAS.....	4
2.2	MECANISMO	5
2.3	ORIGEM.....	6
2.4	CAUSA	8
3.	TÉCNICAS PARA O DIAGNÓSTICO	9
3.1	QUALIDADE DO CONCRETO	11
3.1.1	Existência de falhas ou vazios no interior do concreto	11
3.1.2	Resistência à compressão	14
3.1.3	Resistência superficial do concreto	17
3.2	ARMADURA E COBRIMENTO.....	18
3.3	FISSURAS	18
3.4	DETERIORAÇÃO DO CONCRETO	20
3.5	CAUSAS DA CORROSÃO DE ARMADURAS	22
4.	REFERÊNCIAS.....	25

1. APRESENTAÇÃO

O desenvolvimento de cursos autoinstrucionais pelo Instituto de Pesquisas Rodoviárias - IPR, disponibilizados de maneira assíncrona, sem o acompanhamento de um tutor, atende ao Plano Educacional proposto para o ano de 2022. Desta forma, o participante acessa os materiais e conteúdos disponíveis de acordo com seu ritmo e com sua disponibilidade de tempo, atendendo ao prazo estipulado para conclusão do curso e conclusão das avaliações propostas.

O curso “**Conceitos essenciais sobre patologia em estruturas de concreto**” tem o objetivo de promover a independência do aluno, desenvolvendo temáticas de maneira simples e objetiva, possibilitando que o domínio dos conceitos básicos sobre o assunto o torne apto à realização de cursos de aperfeiçoamento (síncronos e/ou presenciais).

Cabe destacar o Programa de Manutenção e Reabilitação de Estruturas - PROARTE, que contempla um conjunto de atividades para a realização da manutenção e reabilitação das estruturas sob administração do Departamento Nacional de Infraestrutura de Transportes - DNIT.

Além das atividades desenvolvidas no âmbito do PROARTE, há outras atividades executadas rotineiramente na infraestrutura rodoviária que carecem de conhecimentos sobre patologia de estruturas de concreto, como as inspeções realizadas nas estruturas das Obras de Arte Especiais - OAEs.

O **Módulo 1** apresenta conceitos sobre o diagnóstico de suas etapas, permitindo um trabalho de avaliação baseado em método sistemático. Embora as inspeções visuais forneçam a maior parte das informações para a realização do diagnóstico, muitas vezes sua complementação por meio de medições e estudos pode ser fundamental para a segurança do diagnóstico.

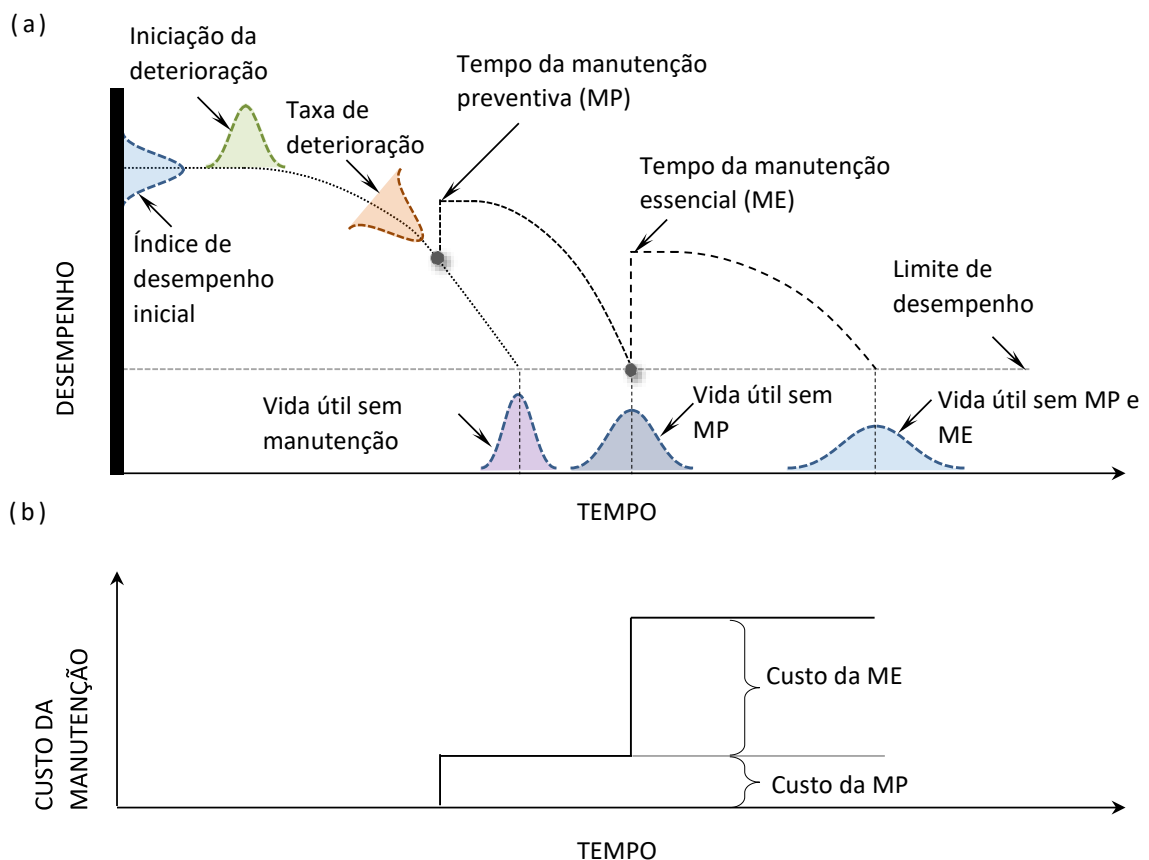
Todas as manifestações patológicas do concreto armado envolvem os produtos de hidratação do cimento. Para auxiliar na compreensão dos mecanismos o **Módulo 2** apresenta o processo de hidratação do cimento e as variações volumétricas que ocorrem durante o processo. Os dois módulos restantes do curso tratam das

manifestações patológicas em si, divididas em causas físicas (**Módulo 3**) e causas químicas (**Módulo 4**).

2. DIAGNÓSTICO

O concreto é amplamente usado nas estruturas de pontes, viadutos, passarelas, contenções, galerias e outros dispositivos que são expostos às ações do meio ambiente. Essa interação pode acelerar a perda de desempenho dos materiais, que ocorre normalmente em todas as estruturas, em momentos e taxas variáveis, como mostrado na Figura 1.

Figura 1 - Efeito da deterioração e da manutenção no desempenho estrutural.



Fonte: Adaptado de FRANGOPOL, 2016.

As incertezas sobre o desempenho inicial, sobre o momento em que se inicia o processo de deterioração e mesmo sobre a velocidade que ocorre (taxa), levam à necessidade de constante acompanhamento das estruturas.

Esse acompanhamento é feito, em um primeiro momento, por meio de inspeções rotineiras realizadas periodicamente. No caso do DNIT é utilizada a Norma

DNIT 010/2004 - PRO: *Inspeções em pontes e viadutos de concreto armado e protendido - Procedimento.*

Nesse sentido, Helene (1992) descreve a **patologia** como o ramo da engenharia que estuda os sintomas, mecanismos, causas e origens dos defeitos das construções, que são as partes que compõem o diagnóstico do problema (Figura 2).

O estudo da correção e da solução para as manifestações patológicas compõem a **terapia**. A seguir serão detalhadas essas quatro partes.

Figura 2 - Composição do diagnóstico para manifestações patológicas.



Fonte: Autor.

2.1 Sintomas

Grande parte dos problemas patológicos se refletem em manifestações externas, ou sintomas, que permitem fazer julgamentos acerca das demais partes do diagnóstico do problema. **Os sintomas são também denominados lesões, danos, defeitos ou manifestações patológicas (HELENE, 1992).** Dessa forma, uma inspeção rotineira, que se caracteriza por observações visuais, objetiva identificar os sintomas existentes na estrutura e relacioná-los com suas possíveis causas, mecanismos e origens.

De uma forma geral, o sintoma é que nos avisa sobre o problema, levando à sequência das investigações para a compreensão do mecanismo, da causa e da origem. A Figura 3 mostra o deslocamento provocado pela corrosão das armaduras na base do pilar de um viaduto. A partir dessa constatação é possível avaliar os demais itens que envolvem o diagnóstico.

Figura 3 - Corrosão de armadura com deslocamento do concreto na base de um pilar.



Fonte: Autor.

Dentre os sintomas mais comuns em estruturas de concreto armado, podemos citar as eflorescências, fissuras, manchas etc. Essas manifestações patológicas serão abordadas nos próximos módulos do curso.

2.2 Mecanismo

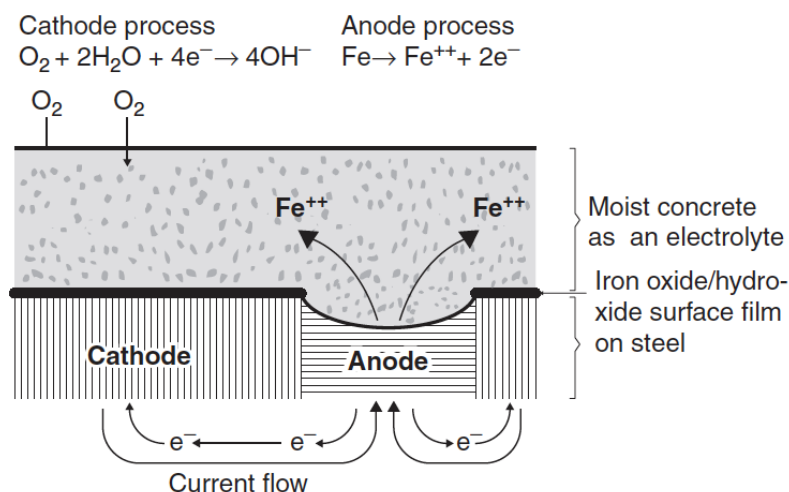
Toda manifestação patológica ocorre de acordo com um determinado mecanismo, mais ou menos complexo. A **corrosão de armadura** mostrada na Figura 3 é resultante de um processo eletroquímico que ocorre de acordo com o mecanismo apresentado na Figura 4.

Esse mecanismo se caracteriza pela migração de elétrons e íons entre regiões distintas da superfície do metal, que só ocorre se houver **oxigênio** (reações catódicas de redução), **água** (eletrólito por onde circulam os íons) e o estabelecimento de uma **célula eletroquímica** (heterogeneidade do material).

Nesse sentido, Meira (2017) explica que a **corrosão eletroquímica** pressupõe a formação de uma célula eletroquímica, com a existência dos seguintes elementos: a presença de um ânodo que se caracteriza pela

passagem do material do estado metálico para o estado iônico (oxidação); um cátodo, onde são consumidos os elétrons gerados na região anódica (redução); uma diferença de potencial entre ambos, sendo o ânodo de potencial mais eletronegativo; uma ligação metálica entre o ânodo e o cátodo, que pode ser caracterizada pelo mesmo material metálico; e uma ligação externa caracterizada pela condução iônica através do eletrólito.

Figura 4 - Mecanismo do processo de corrosão das armaduras de reforço no concreto armado.



Fonte: Mehta e Monteiro (2008).

Assim, nessa etapa do diagnóstico identifica-se os agentes envolvidos no processo e as relações que ocorrem entre eles.

2.3 Origem

O ciclo de vida de uma estrutura pode ser dividido de várias formas. A depender a abordagem pretendida, esse ciclo pode ser dividido desde formas mais simples, como antes e após o início do uso, até um número maior de fases. No caso deste curso pode ser dividida em quatro fases: **concepção, detalhamento, construção e uso** (Figura 5).

Figura 5 - Fases do ciclo de uma estrutura de concreto.



Fonte: Autor.

Porém, nem sempre é simples identificar a fase que se originou a manifestação patológica. Isso ocorre porque um mesmo sintoma pode ser consequência de problemas distintos. Na Figura 6 é mostrada a mancha existente na viga de uma OAE e logo acima da via há um dreno por onde passa a água.

Figura 6 - Dreno mal posicionado provocando manchas na estrutura.



Fonte: Autor.

Percebe-se que o posicionamento do dreno se mostra inadequado. Porém, resta esclarecer se esse posicionamento foi definido em projeto (detalhamento), por um reposicionamento, fruto de alguma restrição executiva (execução) ou se o dreno

seria parte de um sistema de drenagem mais abrangente, com dutos canalizando a água para um destino adequado, e foi danificado com a estrutura em operação (uso).

Algumas informações adicionais podem dar pistas para a identificação. A existência de passeios para pedestres ou ciclovias no tabuleiro podem limitar o posicionamento dos drenos. Nesse caso, o projetista poderia ajustar o posicionamento da viga de forma que a funcionalidade da estrutura fosse mantida (passeios e ciclovias) sem comprometer a durabilidade da estrutura (manchas).

2.4 Causa

A causa se refere ao agente causador. Fissuras que se abrem durante a passagem de uma carga exemplificam bem essa questão, uma vez que o **sintoma** é a própria fissura constatada. Já o **mecanismo** pode ser ilustrado pelo equilíbrio de forças na seção transversal da viga, que exige maior ou menor deformação dos materiais para ser alcançado. Nesse caso, há três situações possíveis e que devem ser elucidadas no estudo da **origem**:

- Fase de projeto: a seção projetada não tem capacidade suficiente para a carga prevista inicialmente;
- Fase de construção: os materiais não foram aplicados conforme o projeto; ou
- Fase de uso: a carga aplicada é superior à considerada no projeto.

Supondo que se trata da viga de uma ponte ou viaduto, em qualquer das três alternativas descritas, o agente causador será o veículo que passou no tabuleiro da estrutura. Pode parecer estranho em um primeiro momento, mas essa abordagem para a realização do diagnóstico permite tratar o problema de forma didática e assertiva, permitindo a seleção da intervenção mais apropriada para cada caso.

TOME NOTA

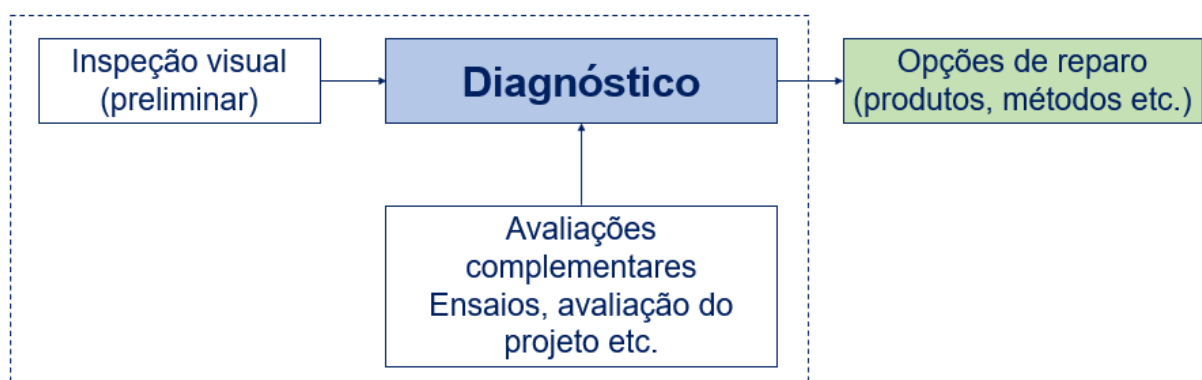
O diagnóstico se completa com avaliações quanto às consequências das manifestações patológicas no comportamento geral da estrutura (HELENE, 1992). Essas consequências podem ser divididas em dois grupos: as que afetam a segurança da estrutura (associadas aos estados limites últimos) e as que afetam o comportamento da estrutura em serviços (associadas aos estados limites de serviço).

Dessa forma, entende-se que o prognóstico é um importante complemento ao diagnóstico.

3. TÉCNICAS PARA O DIAGNÓSTICO

Algumas manifestações patológicas são perfeitamente diagnosticadas por meio da inspeção visual. Além das inspeções visuais, a utilização de equipamentos e procedimentos especializados permite a complementação das informações necessárias para a definição das intervenções mais apropriadas, conforme mostrado na Figura 7.

Figura 7 - Dados de inspeção visual e dos ensaios se complementam para formar o diagnóstico.

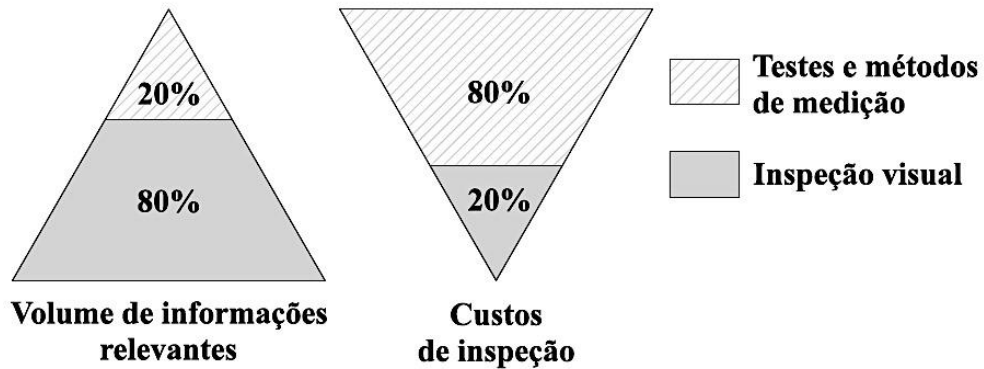


Fonte: Autor.

A Figura 8 ilustra a relação entre custos e resultados obtidos por meio de inspeção visual e por testes e métodos de medição. Fica clara a importância da inspeção visual, que retorna 80% das informações relevantes para a gestão das estruturas com apenas 20% dos custos de inspeção, assim como fica evidente a

necessidade de complementações dessas informações em alguns casos. **Esses procedimentos, por serem mais onerosos, devem ser realizados em casos e momentos específicos (CEB-FIB, 2002).**

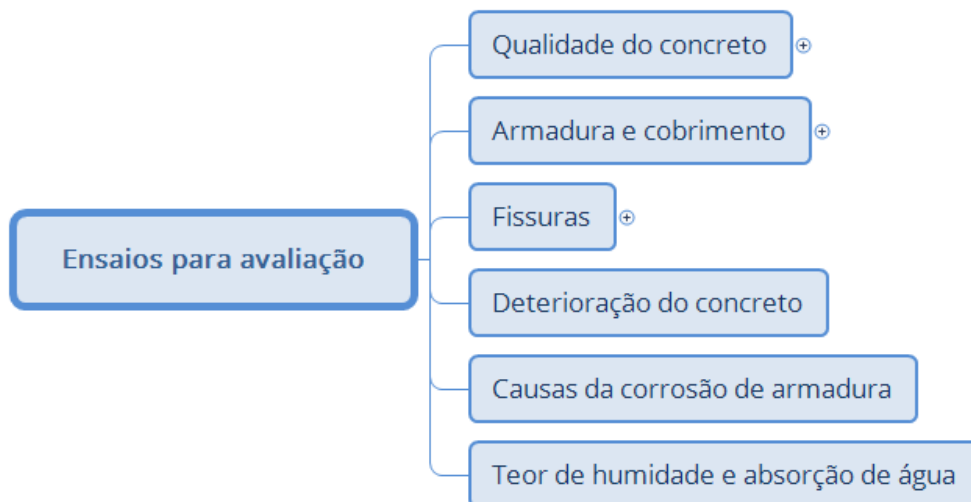
Figura 8 - Importância da inspeção visual mostrada em termos de informações obtidas e dos custos totais de inspeção.



Fonte: Adaptado de CEB-FIB (2002).

Neste item serão apresentados alguns dos principais métodos utilizados em estruturas de concreto para complementar as inspeções visuais. Há uma infinidade de testes e equipamentos que possibilitam avaliar a resistividade do concreto, o potencial de corrosão das armaduras, a dureza superficial do concreto, existência de compostos no interior do concreto etc. Esses ensaios podem ser agrupados conforme mostrado na Figura 9.

Figura 9 - Grupos de ensaios para avaliação das estruturas de concreto armado.

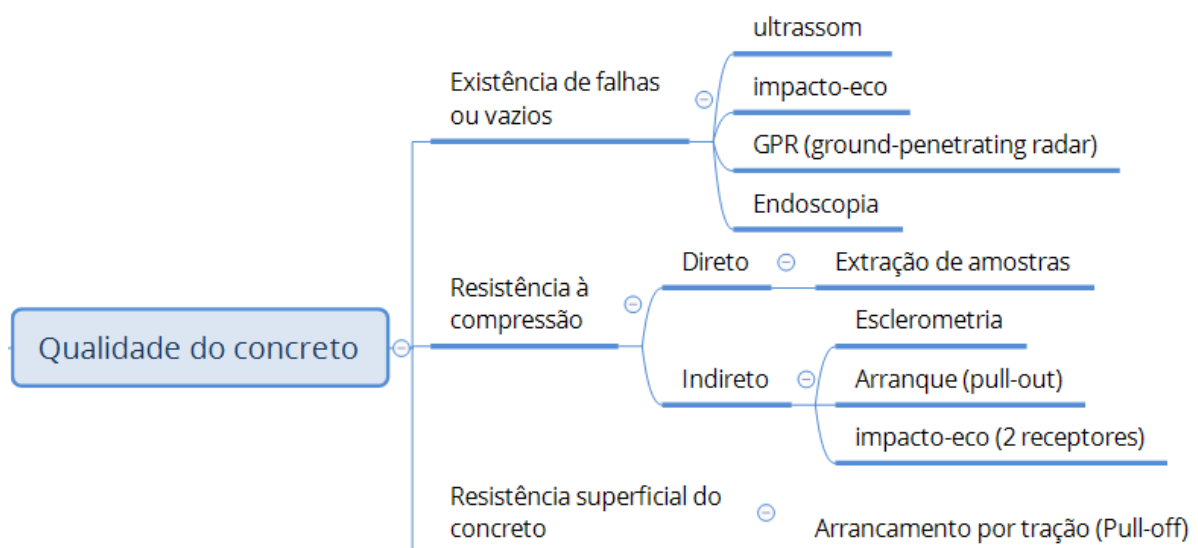


Fonte: Autor.

3.1 Qualidade do concreto

A qualidade do concreto pode ser verificada sob diversos aspectos, a depender do que se pretende investigar. Assim, há ensaios e equipamentos para avaliar: **existência de falhas ou vazios; resistência à compressão; resistência superficial do concreto**, conforme mostrado na Figura 10.

Figura 10 - Métodos para avaliação da qualidade do concreto.



Fonte: Autor.

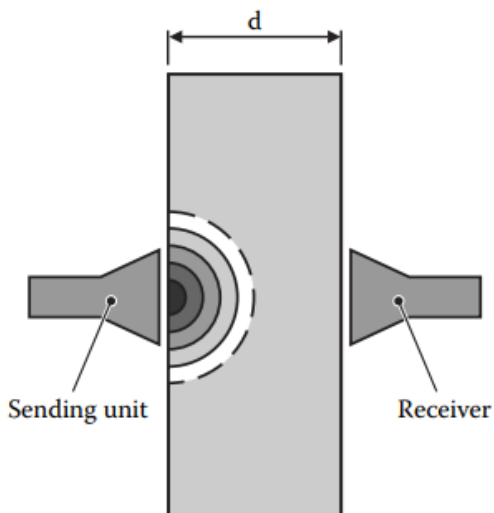
3.1.1 Existência de falhas ou vazios no interior do concreto

A existência de defeitos e vazios não visíveis pode ser identificada por meio da mediação de ondas de som ou magnéticas. O **ultrassom** permite a identificação da existência de vazios, fissuras ou barras de aço, que são detectados pela variação da velocidade da onda no interior do elemento estrutural. Também pode ser correlacionado com algumas propriedades do concreto, como a resistência (precisa de extração para estabelecimento de uma correlação).

A Figura 11 mostra a utilização do equipamento em uma situação que se tem acesso a lados opostos do elemento estrutural, situação denominada transmissão direta. Caso não se tenha acesso a lados opostos, é perfeitamente possível optar pelo

posicionamento em faces contíguas, usando-se então a designação **transmissão semidireta** ou mesmo numa única face, **transmissão indireta** (COSTA, 2017).

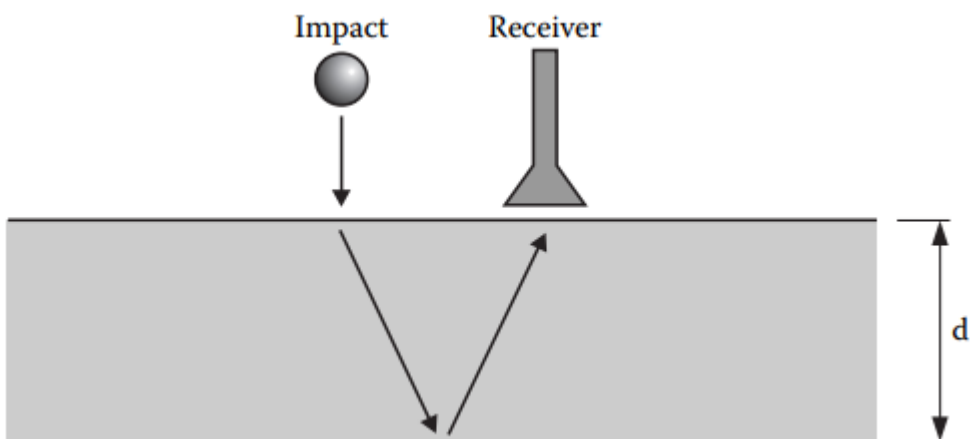
Figura 11 - Desenho esquemático de como utilizar o ultrassom em um elemento de concreto.



Fonte: Raupach e Büttner (2002).

Quando apenas um lado do elemento estrutural está acessível, a utilização de outro equipamento pode ser útil. O **impacto-eco** não utiliza ondas ultrassônicas, e sim uma onda induzida mecanicamente por meio de um impacto de uma esfera (Figura 12). Esse equipamento foi desenvolvido para a obtenção da espessura de elementos estruturais, mas pode ser utilizado para a identificação de falhas não visíveis (RAUPACH e BÜTTNER, 2002). A Figura 13 ilustra a aplicação do equipamento.

Figura 12 - Princípio de funcionamento do impacto-eco.



Fonte: Raupach e Büttner (2002).

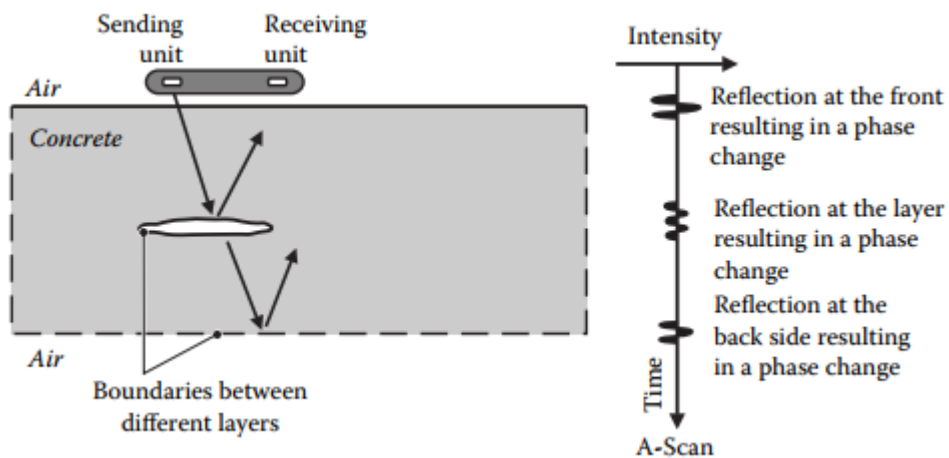
Figura 13 - Exemplo de aplicação do impacto-eco.



Fonte: Raupach e Büttner (2002).

Quando se tratar de áreas muito extensas, os dois métodos apresentados anteriormente se tornam pouco produtivos. Nesses casos, o **GPR (ground-penetrating radar)** pode ser usado. O GPR foi originalmente projetado para medições geofísicas a fim de detectar objetos enterrados ou limites do solo. Baseia-se também no envio e recepção de radiações eletromagnéticas, que se encontram na banda de micro-ondas (frequências UHF e VHF). A resposta em função da mudança de fases (ar-concreto) indica a espessura do elemento estrutural e/ou a existência de vazios, como mostrado na Figura 14.

Figura 14 - Esquema com o princípio de medição do GPR.



Fonte: Raupach e Büttner (2002).

A constatação de vazios por meio do ultrassom ou GPR deve ser confirmada por outros métodos. Um método de fácil utilização é a **endoscopia**, que necessita apenas de um furo e o equipamento (Figura 15). O contato visual permite inferir sobre a origem do problema e, por consequência, definir a intervenção mais apropriada.

Figura 15 - A endoscopia pode ser um eficiente meio de complementação para a constatação de vazios, bastando a execução de um furo (a). Podem ser constatados vazios bastante extensos (b).



(a)



(b)

Fonte: (a) Costa (2017); (b) Raupach e Büttner (2002).

3.1.2 Resistência à compressão

A resistência à compressão do concreto é um dos parâmetros chave no que se refere à capacidade resistente de uma estrutura. É relativamente fácil a sua medição em amostras extraídas da estrutura (método direto), mas também pode ser determinada de forma não destrutiva (método indireto) (COSTA, 2017). O método direto consiste na extração de corpos de prova da estrutura e avaliação por meio de sua ruptura (Figura 16).

Figura 16 - Extração de corpo de prova de uma estrutura.



Fonte: Costa (2017).

Dentre os métodos indiretos, o esclerômetro é bastante comum nas avaliações de estruturas de concreto. O ensaio é baseado no recuo da haste do equipamento após o impacto na superfície do concreto (Figura 17). A leitura do equipamento fornece o índice esclerométrico, uma medida da dureza superficial do concreto, que pode ser correlacionada com a resistência à compressão do concreto.

Figura 17 - Aplicação do esclerômetro em uma superfície de concreto.

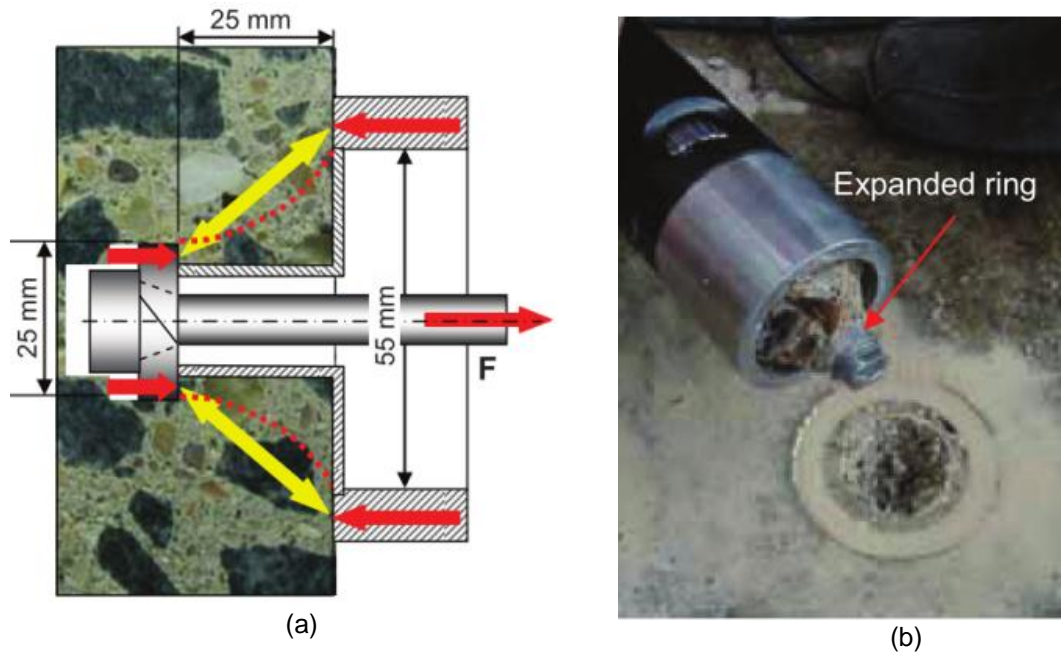


Fonte: Raupach e Büttner (2002).

Outro método indireto de determinação da resistência à compressão do concreto é o arrancamento de uma peça de metal embebida no concreto, também

denominado *pullout*. É aplicada uma força de tração na barra de aço, contra um anel metálico de apoio de 55mm de diâmetro interior, até que esta dá origem a uma superfície de ruptura aproximadamente cônica do concreto (Figura 18).

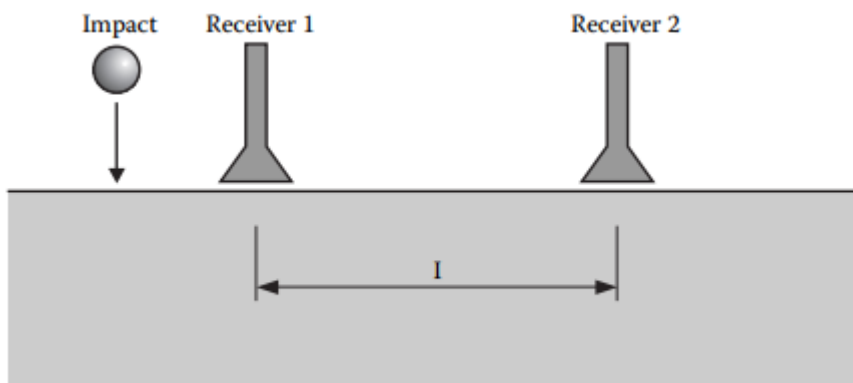
Figura 18 -Representação esquemática do dispositivo para a determinação da força de arranque (a) e superfície de ruptura aproximadamente cônica (b).



Fonte: Costa (2017).

A adaptação do ensaio impacto-eco, pela inclusão de mais um receptor, permite a obtenção da velocidade do pulso ultrassônico na superfície do concreto, que também pode ser relacionada com a resistência à compressão do concreto (Figura 19).

Figura 19 - Esquema do arranjo para obtenção da velocidade superficial pelo impacto-eco.

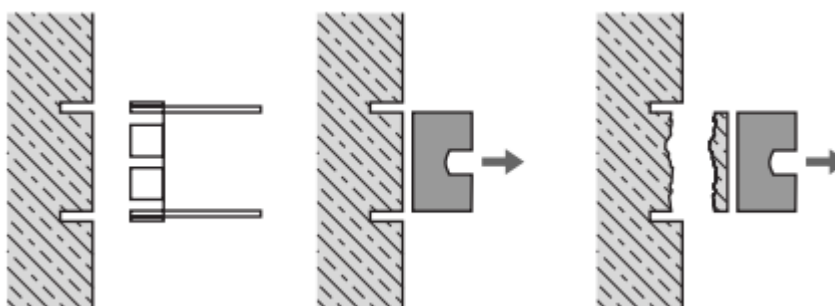


Fonte: RAUPACH e BÜTTNER (2002).

3.1.3 Resistência superficial do concreto

O último conjunto de ensaios para avaliação da qualidade do concreto se refere à resistência superficial, propriedade que pode fornecer informações importantes sobre o concreto da superfície. É realizado um corte ao redor da superfície a ser ensaiada, após o qual é colado o dispositivo que transferirá a força ao concreto. Por fim, a força de arrancamento provoca a ruptura do concreto (Figura 20). Este ensaio é denominado *pulloff*.

Figura 20 - Determinação da resistência superficial do concreto.



Fonte: RAUPACH e BÜTTNER (2002).

Cabe observar que este ensaio é diferente do *pullout*, em especial pela forma como as tensões são mobilizadas.

3.2 Armadura e cobrimento

Propriedade diretamente relacionada à durabilidade das estruturas de concreto, o cobrimento das armaduras pode ser determinado por equipamentos que utilizam métodos **magnéticos** ou **indutivos**. Os indutivos são mais precisos e, dependendo do equipamento, podem fornecer simultaneamente o diâmetro das barras e o seu cobrimento. Outra informação importante é o posicionamento das armaduras no interior dos elementos estruturais. Diante da necessidade de serem executados furos para extração de amostras ou de realização de outros ensaios, é necessário conhecer com exatidão os locais das barras e dos cabos de protensão, uma vez que podem interferir nos resultados de outros ensaios ou, se rompidos indevidamente, comprometer a capacidade de suporte das estruturas. A Figura 21 mostra um equipamento sendo utilizado para a localização das barras de aço.

Figura 21 - Equipamento utilizado para localização de barras de aço.



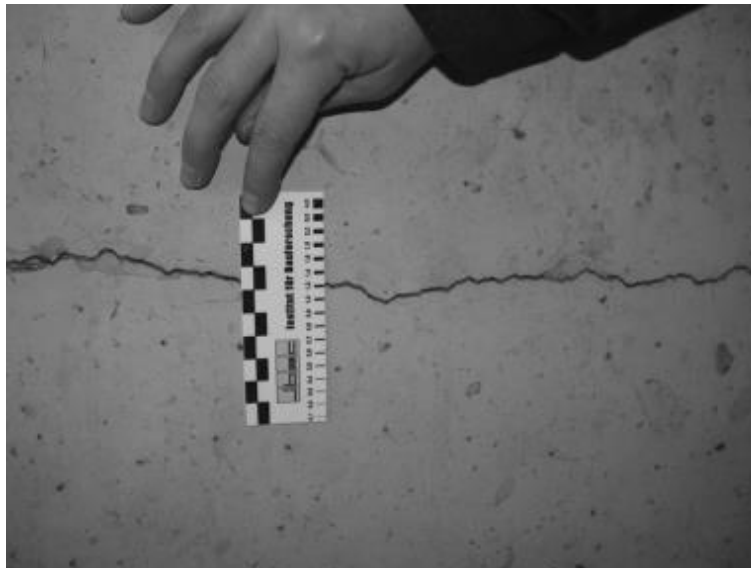
Fonte: RAUPACH e BÜTTNER (2002).

3.3 Fissuras

A caracterização adequada das fissuras permite uma avaliação mais assertiva para o diagnóstico. Porém, nem sempre é possível a obtenção de todas as informações sobre as fissuras simultaneamente: **abertura, movimentação e**

profundidade. A **abertura** das fissuras é facilmente obtida por meio de um fissurômetro, pequena peça com uma escala de aberturas (Figura 22).

Figura 22 - Utilização do fissurômetro para definição da abertura de uma fissura.



Fonte: RAUPACH e BÜTTNER (2002).

Além da abertura, é importante verificar se a fissura é **ativa ou passiva** (movimentação). Fissuras ativas são as que apresentam variação na sua abertura com o carregamento da estrutura. Esta avaliação pode ser feita por meio da utilização de **selos de gesso ou de plaquetas de vidro** coladas sobre a fissura. Como são materiais frágeis, se rompem, caso a fissura apresente variação de abertura, ainda que muito pequenas.

A **profundidade** da fissura também pode auxiliar no diagnóstico, e sua medição pode ser realizada por meio da extração de corpos de prova ou por meio de métodos não destrutivos, como o ultrassom ou o impacto-eco. No caso de extração de uma amostra, é recomendável a utilização de resina polimérica de baixa viscosidade, que garante que as partes do corpo de prova não se separem durante a extração, além de permitir a visualização da fissura diretamente na amostra.

TOME NOTA

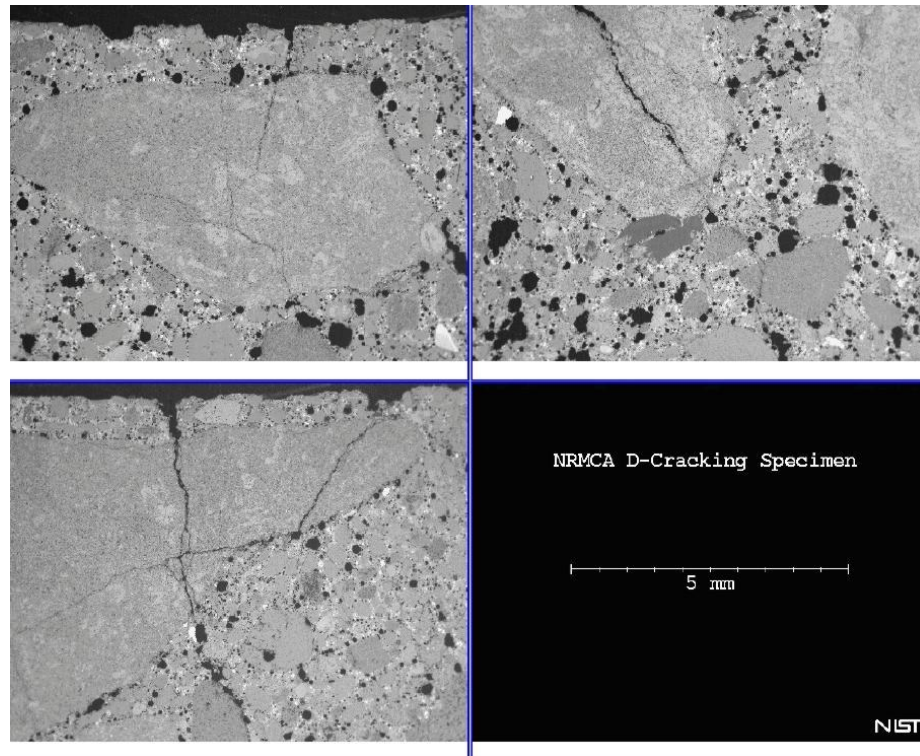
Deve ser observado que um mesmo tipo de equipamento ou metodologia pode ser usado para se obter diferentes informações. Um exemplo é a observação da profundidade das fissuras por meio do ultrassom ou impacto-eco, já apresentados anteriormente para avaliação da existência de falhas ou vazios no concreto.

3.4 Deterioração do concreto

A avaliação da deterioração do concreto pode ser realizada por diferentes métodos, a depender do mecanismo que se deseja avaliar. Muitos dos processos de deterioração envolvem a formação de produtos com aumento de volume (reações expansivas) ou a perda da capacidade aglomerante da pasta de cimento. Esses mecanismos serão apresentados com mais detalhes nos próximos módulos do curso. Por ora, serão abordados de forma superficial, com o objetivo de apresentar algumas das técnicas utilizadas para sua identificação.

Os principais mecanismos envolvem a ação de **substâncias ácidas**, a ocorrência de **ciclos gelo-degelo** e **reações álcali-agregado** (RAA), que podem ser identificados com o auxílio de microscopia. A Figura 23 mostra uma imagem de microscópio revelando fissuras associadas ao ciclo gelo-degelo.

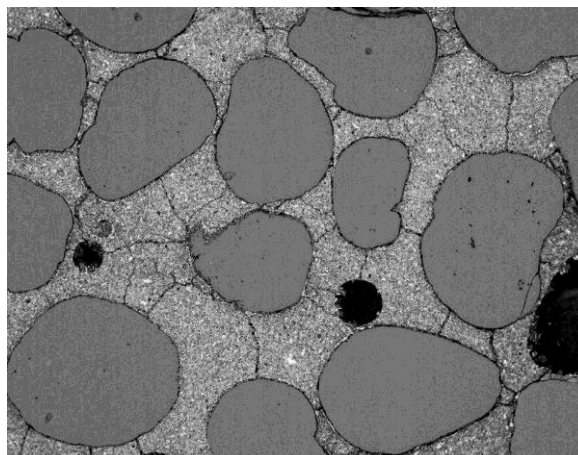
Figura 23 - Imagem de microscópio mostrando fissuras associadas a ciclos de gelo-degelo.



Fonte: Concrete microscopy library: < <http://publish.illinois.edu/concretemicroscopylibrary/>>, acesso em 07/08/2022.

Uma fonte externa de **sulfatos** pode provocar a conversão de monossulfatos em etringita, o que provoca aumento de volume e conseqüente geração de tensões internas (tração). A Figura 24, também obtida por microscopia, mostra fissuras na pasta de cimento provocadas por ataque de sulfatos.

Figura 24 - Imagem de microscópio mostrando fissuras associadas ao ataque por sulfatos.



Fonte: Concrete microscopy library: < <http://publish.illinois.edu/concretemicroscopylibrary/>>, acesso em 07/08/2022.

Além do uso de microscópio, são também empregadas **análise petrográfica, microscopia eletrônica de varredura (MEV)**, dentre outros muito recursos disponíveis.

3.5 Causas da corrosão de armaduras

Assim como no item anterior, o mecanismo da corrosão de armaduras será apresentado nos próximos módulos do curso. Uma breve abordagem foi feita na Figura 4 para exemplificar o conceito de mecanismo como uma fase do diagnóstico. De forma bem simplista, o processo de corrosão se inicia com a perda da proteção da armadura, denominada “passivação”. Essa perda ocorre basicamente quando duas substâncias penetram no concreto de cobrimento e alcançam a posição das armaduras (CO₂ ou cloretos). Dessa forma, os ensaios avaliam o avanço das frentes de CO₂ e de cloretos.

Com a reação do CO₂ com o hidróxido de cálcio se obtém um produto com menor pH (mais ácido). Essa reação é denominada carbonatação. De acordo com Raupach e Büttner (2014), o **avanço da frente de carbonatação (CO₂)** pode ser avaliada por um dos seguintes métodos:

- ensaio pelo indicador de fenolftaleína;
- análise de difração de raio-X;
- espectroscopia de infravermelhos;
- varrimento por colorimetria diferencial; e
- análise química.

Um exemplo do uso da fenolftaleína é mostrado na Figura 25.

Figura 25 - Uso de fenolftaleína para avaliação do avanço da frente de carbonatação.

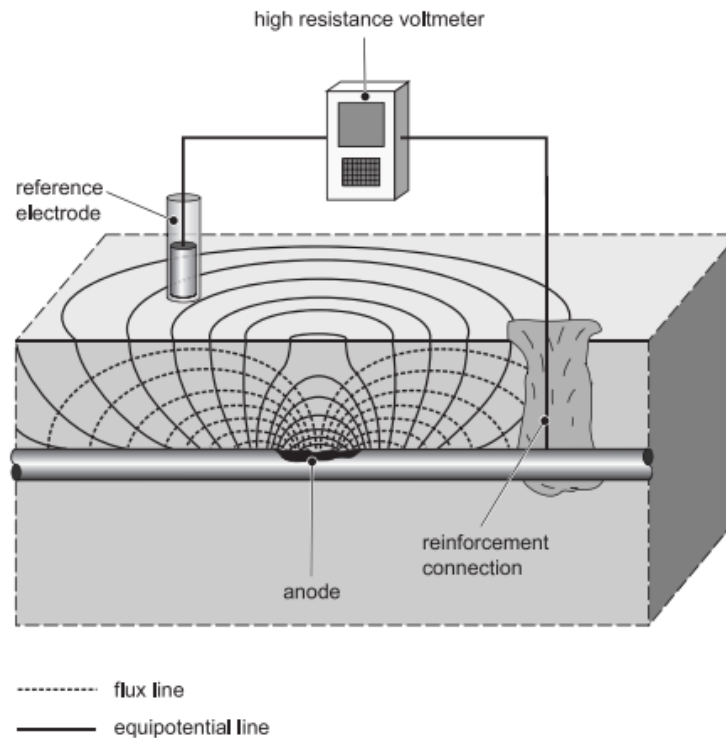


Fonte: Costa (2017).

O **avanço da frente de cloretos** é avaliado por meio de análise química após a extração de amostras do concreto por dois meios: testemunhos retirados com serra copo ou amostras pulverizadas com a utilização de furadeira. Esse material passará por análise química que indicará a concentração de cloretos em diferentes profundidades.

Além do avanço das frentes que podem “despassivar” a armadura, o **mapeamento do potencial** é um método não destrutivo de detecção dos diferentes riscos de corrosão da armadura imersa no concreto, particularmente de zonas com uma grande probabilidade de corrosão induzida pelos cloretos (RAUPACH e BÜTTNER, 2014). O mapeamento do potencial de corrosão requer o acesso à armadura e o deslocamento do eletrodo de referência pela superfície do concreto, conforme mostrado na Figura 26.

Figura 26 - Esquema do princípio de avaliação do mapeamento do potencial.



Fonte: Raupach e Büttner (2014).

A quarta avaliação se refere à **resistividade do concreto**. Essa é uma importante propriedade do concreto por diversos motivos, dos quais podem ser destacados dois que afetam diretamente a iniciação e a propagação do processo de corrosão. O primeiro se refere à possibilidade de correlação com a resistência imposta ao ingresso e à mobilidade de cloretos no concreto. E a segunda, considerando que o processo de corrosão já está instalado, é que a taxa de corrosão é inversamente proporcional à resistividade do concreto.

4. REFERÊNCIAS

CEB-FIB. **Bulletin 17 - Management, maintenance and strengthening of concrete structures, Technical Report**, 2002.

COSTA, P.M.M.P. **Reabilitação de estruturas de betão - apontamentos de apoio às aulas**. Coimbra: 2017. 147 p.

FRANGOPOL, D. M., SABATINO, S., DONG, Y. **Bridge Life-Cycle Performance and Cost: Analysis, Prediction, Optimization and Decision Making**. In: IABMAS 2016 - Maintenance, Monitoring, Safety, Risk and Resilience of Bridges and Bridge Networks, Foz do Iguaçu, Brasil, 2016.

HELENE, P. **Manual para reparo, reforço e proteção de estruturas de concreto**. 2ª ed. São Paulo: Pini, 1992. 213 p.

MEHTA, P. K.; MONTEIRO, P. J. M. **Concreto: microestrutura, propriedades e materiais**. 3. ed. São Paulo: IBRACON, 2008. 674 p.

MEIRA, G. R. **Corrosão de armaduras em estruturas de concreto: fundamentos, diagnóstico e prevenção**. João Pessoa: IFPB, 2017.

RAUPACH, M.; BÜTTNER, T. **Concrete repair to EN 1504: diagnosis, design, principles and practice**. Boca Raton: CRC Press, 2014.