

# Aula 4 – Mecanismos de Degradação Químicos e Eletroquímicos

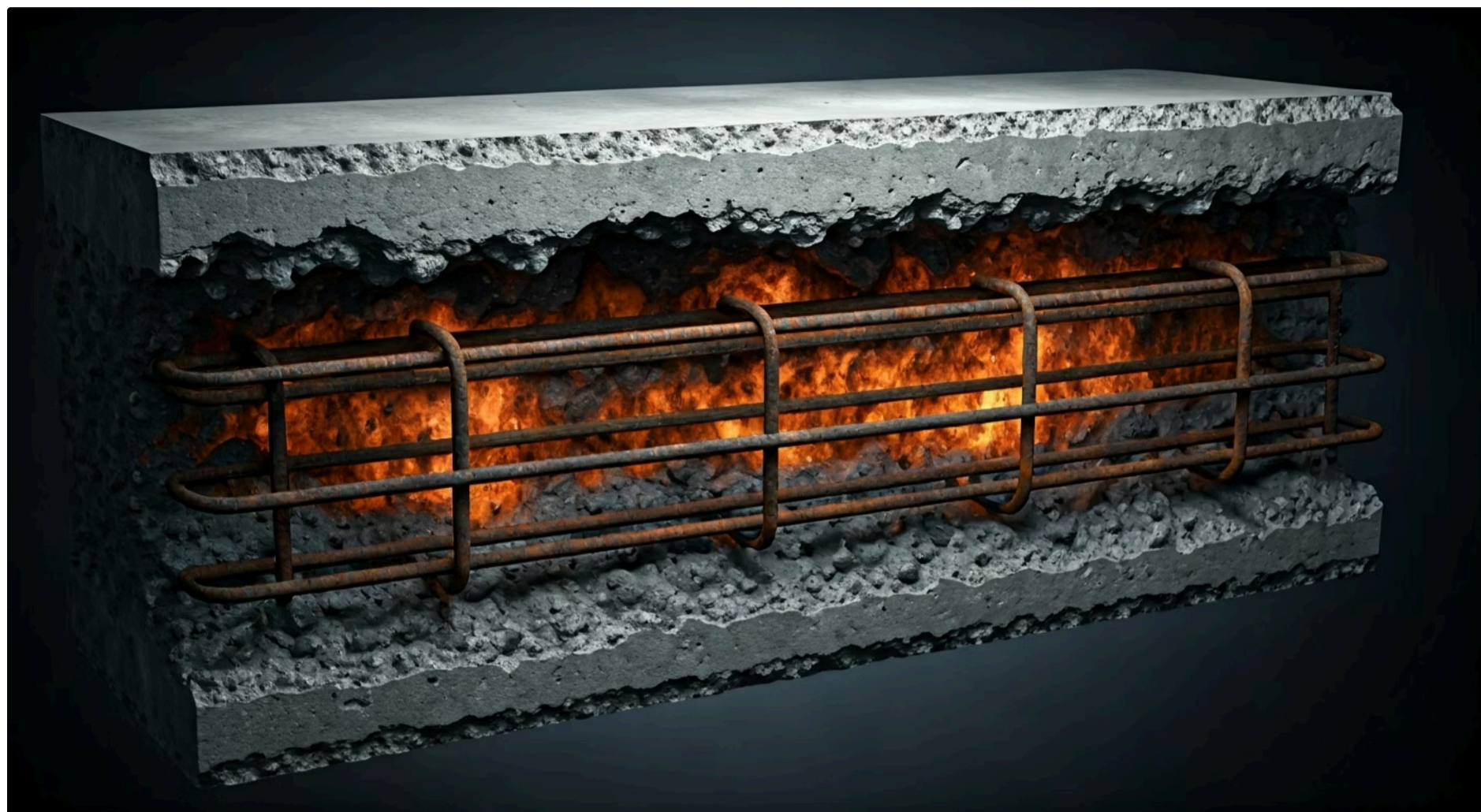


Imagine por um instante que as construções ao nosso redor – os edifícios onde moramos, os viadutos que atravessamos, as pontes que nos conectam – são como organismos vivos. Assim como nós, elas estão constantemente expostas a um ambiente que pode ser hostil, e, com o tempo, podem adoecer. A patologia das construções é justamente a área que investiga essas "doenças", buscando entender suas causas, sintomas e, claro, as melhores formas de tratamento e prevenção. Nesta aula, vamos mergulhar nos inimigos silenciosos que atacam nossas estruturas por meio de reações químicas e eletroquímicas, muitas vezes invisíveis a olho nu, mas com potencial devastador.

Compreender esses mecanismos não é apenas uma curiosidade acadêmica; é uma habilidade essencial para qualquer profissional da engenharia e arquitetura. É o que nos permite diagnosticar problemas antes que se tornem catástrofes, propor soluções eficazes e, acima de tudo, construir com mais segurança e durabilidade. Ao final desta jornada, você será capaz de identificar os principais mecanismos de degradação química e eletroquímica, entender como eles afetam o concreto e as armaduras, e relacionar esses conhecimentos com as práticas de inspeção e reparo.

Nossa exploração começará pela corrosão das armaduras, um dos problemas mais comuns e sérios, desvendando seu funcionamento eletroquímico e suas diferentes manifestações. Em seguida, abordaremos a carbonatação do concreto, um processo que altera a proteção natural do aço, e o ataque insidioso de íons cloreto e sulfatos. Não deixaremos de lado a complexa Reação Álcali-Agregado (RAA) e a lixiviação de compostos do cimento, finalizando com a integração desses conhecimentos e as tecnologias mais recentes para diagnóstico e intervenção. Prepare-se para desvendar os segredos por trás da deterioração e se tornar um guardião da longevidade das nossas construções.

# A Corrosão das Armaduras: O Inimigo Silencioso do Concreto Armado



Quando pensamos em concreto armado, a imagem que nos vem à mente é de solidez e resistência. Afinal, a combinação do concreto, que resiste bem à compressão, com o aço, que suporta as tensões de tração, é a base de grande parte da nossa infraestrutura. No entanto, por trás dessa aparente invulnerabilidade, esconde-se um dos maiores desafios da patologia das construções: a corrosão das armaduras. Este fenômeno, muitas vezes invisível até que o dano seja avançado, é uma das principais causas de deterioração e colapso estrutural, impactando diretamente a segurança e a vida útil das edificações.

📄 **O Escudo Protetor Natural:** O concreto fresco é um material altamente alcalino, com um pH que varia entre 12,5 e 13,5. Essa alcalinidade cria uma fina camada passivadora de óxidos na superfície do aço, uma espécie de "escudo" protetor que impede a reação do metal com o oxigênio e a água.

Para entender a corrosão, precisamos primeiro compreender o ambiente protetor que o concreto oferece ao aço. O concreto fresco é um material altamente alcalino, com um pH que varia entre 12,5 e 13,5. Essa alcalinidade cria uma fina camada passivadora de óxidos na superfície do aço, uma espécie de "escudo" protetor que impede a reação do metal com o oxigênio e a água. É como se o aço estivesse em um sono profundo e seguro, protegido por essa barreira química. Mas, o que acontece quando esse escudo é quebrado?

A quebra dessa camada passivadora é o ponto de partida para a corrosão. Uma vez exposto, o aço reage com o oxigênio e a umidade presentes nos poros do concreto, formando óxidos de ferro, popularmente conhecidos como ferrugem. O problema é que a ferrugem ocupa um volume significativamente maior (até 6 vezes) do que o aço original. Esse aumento de volume gera pressões internas no concreto, que podem atingir valores de até 30 MPa, causando fissuras, deslocamentos e, em casos extremos, a perda da capacidade estrutural. É um processo insidioso que, se não for detectado e tratado a tempo, pode comprometer seriamente a integridade da estrutura.

# O Mecanismo Eletroquímico da Corrosão: Uma Bateria na Estrutura

Para desvendar a corrosão em sua essência, precisamos olhar para ela como um processo eletroquímico, ou seja, uma reação química que envolve a transferência de elétrons. Pense em uma pilha ou bateria comum: ela gera eletricidade através de reações de oxidação e redução. Na corrosão do aço em concreto, um processo similar ocorre, transformando a armadura em uma espécie de "bateria" onde o metal se degrada. Entender essa dinâmica é crucial para identificar os fatores que aceleram ou inibem o processo.

## Os Quatro Elementos da Célula Eletroquímica



### Ânodo

A região do aço onde ocorre a oxidação (perda de elétrons), ou seja, onde o ferro se transforma em íons de ferro ( $\text{Fe} \rightarrow \text{Fe}^{2+} + 2\text{e}^-$ ). É o ponto de "sacrifício" do metal.



### Cátodo

A região do aço onde ocorre a redução (ganho de elétrons), geralmente do oxigênio e da água ( $\text{O}_2 + 2\text{H}_2\text{O} + 4\text{e}^- \rightarrow 4\text{OH}^-$ ).



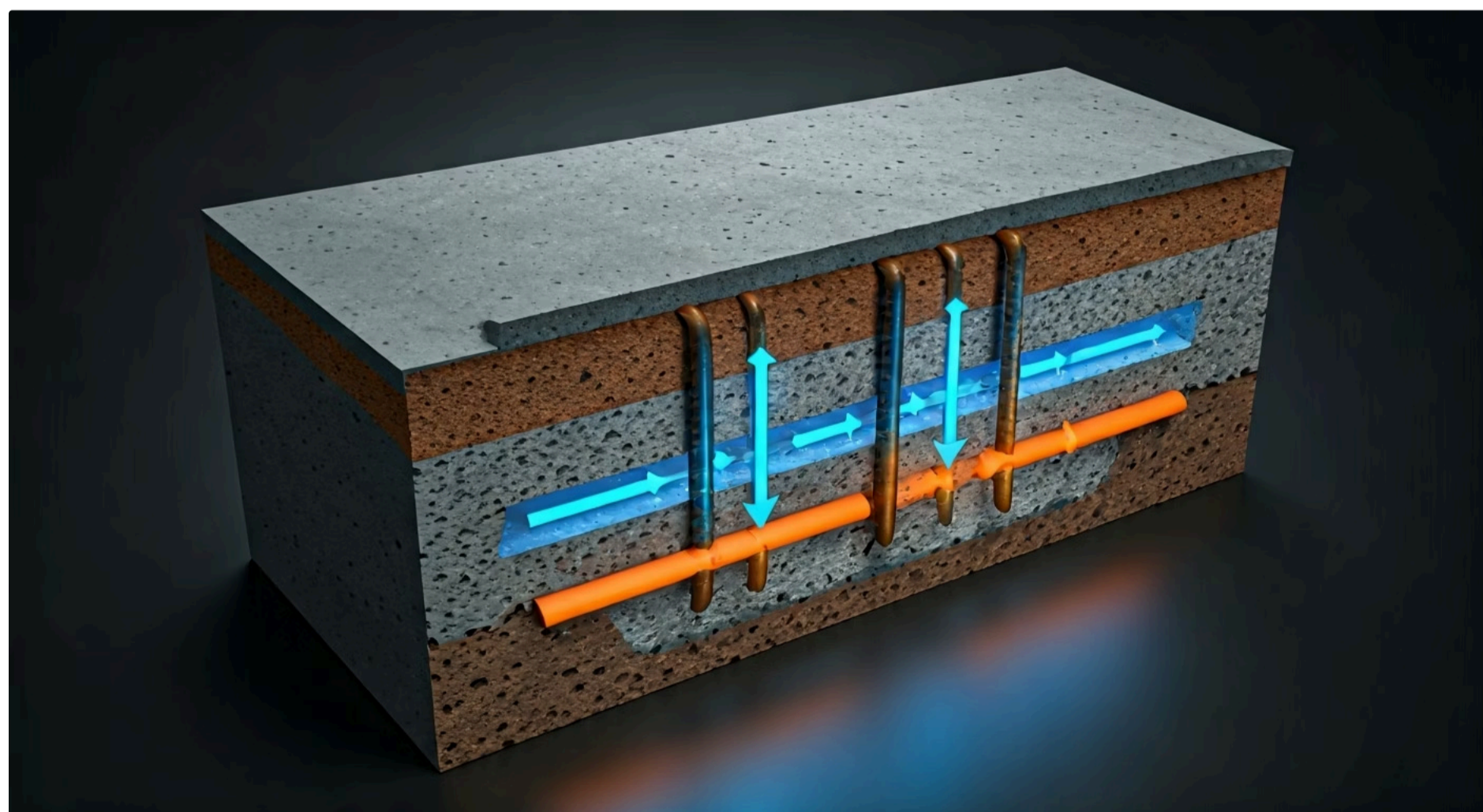
### Eletrólito

O meio condutor que permite o fluxo de íons entre o ânodo e o cátodo. No concreto, esse papel é desempenhado pela água presente nos poros, que contém íons dissolvidos.



### Conexão Metálica

O próprio aço da armadura, que permite o fluxo de elétrons do ânodo para o cátodo.

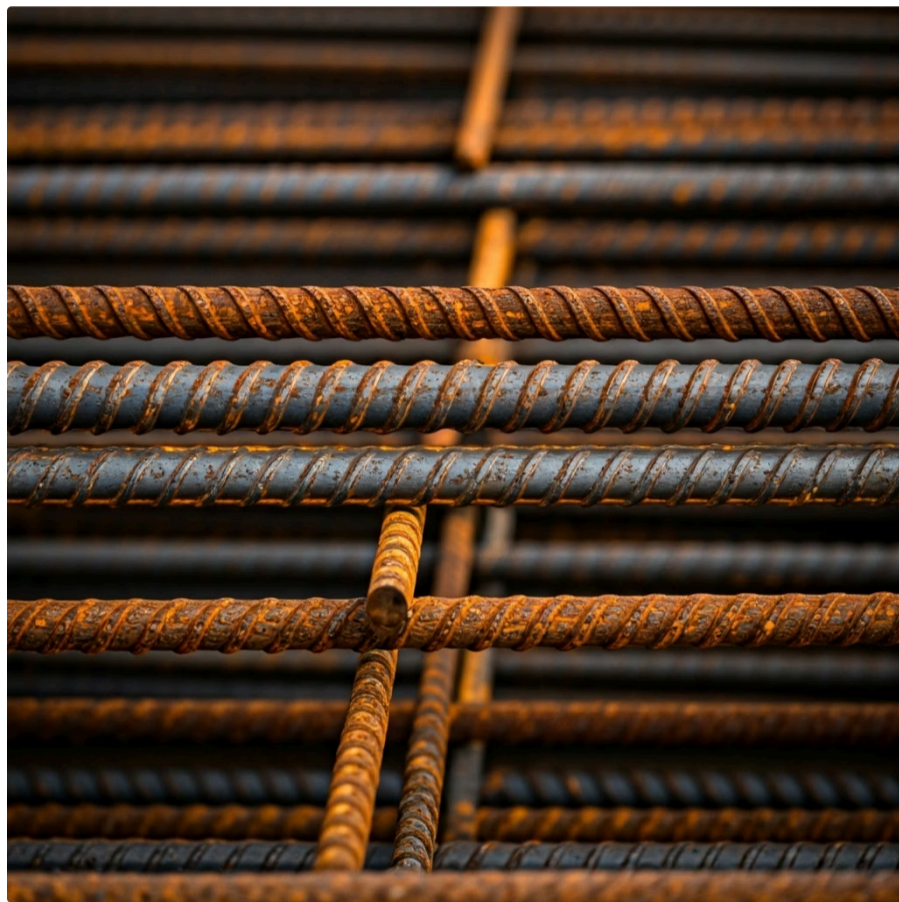


Imagine que o aço, em um determinado ponto, perde sua camada passivadora. Essa área desprotegida se torna o ânodo. Os elétrons liberados pelo ferro viajam através do próprio aço até uma área vizinha que ainda está passivada (o cátodo), onde reagem com o oxigênio e a água. Os íons de ferro formados no ânodo migram através da solução porosa do concreto (o eletrólito) e reagem com os íons hidroxila formados no cátodo, resultando na formação de hidróxido de ferro, que posteriormente se transforma em ferrugem. É um ciclo contínuo que consome o aço e danifica o concreto.

# Tipos de Corrosão: Uniforme vs. Por Pites

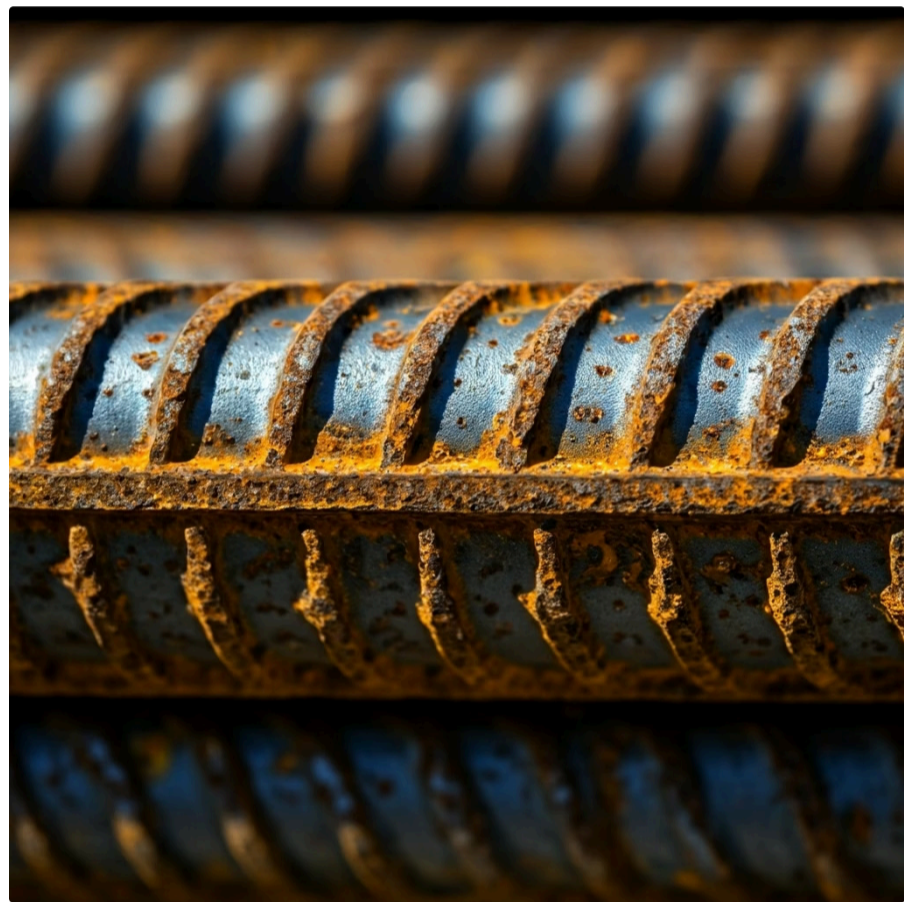
A corrosão não se manifesta de uma única forma; ela pode atacar o aço de maneiras distintas, cada uma com suas características e níveis de periculosidade. Compreender esses tipos é fundamental para um diagnóstico preciso e para a escolha da estratégia de reparo mais adequada. Os dois tipos mais comuns e relevantes em estruturas de concreto armado são a corrosão uniforme e a corrosão por pites (ou puntiforme). Embora ambas causem danos, suas naturezas são bastante diferentes, e a capacidade de identificá-las pode salvar uma estrutura.

## Corrosão Uniforme



A **corrosão uniforme**, como o próprio nome sugere, ocorre de maneira mais ou menos homogênea sobre uma grande área da superfície da armadura. É como se o aço estivesse "enferrujando por igual". Este tipo de corrosão é geralmente associado à carbonatação do concreto, onde a perda de alcalinidade afeta uma área extensa da armadura. Embora cause uma redução gradual da seção transversal do aço, seus efeitos são, em geral, mais previsíveis e visíveis, pois a ferrugem se espalha e as fissuras tendem a ser mais generalizadas. É um processo mais lento, que permite um tempo maior para detecção e intervenção.

## Corrosão Por Pites



Por outro lado, a **corrosão por pites** (ou puntiforme) é um fenômeno muito mais insidioso e perigoso. Ela se caracteriza pela formação de pequenas e profundas cavidades (pites) em pontos específicos da armadura, enquanto o restante da superfície pode parecer relativamente intacto. Pense em um ataque concentrado, como um "tiro de canhão" em vez de um "bombardeio generalizado". Este tipo de corrosão é tipicamente causado pela presença de íons cloreto, que conseguem penetrar a camada passivadora em pontos localizados, criando microcélulas eletroquímicas altamente ativas.

- ❑ **Atenção:** A grande ameaça da corrosão por pites é que ela pode levar à falha estrutural repentina, pois a redução da seção transversal do aço é concentrada em pontos críticos, diminuindo drasticamente a capacidade de carga da armadura sem sinais externos óbvios até que o dano seja severo.

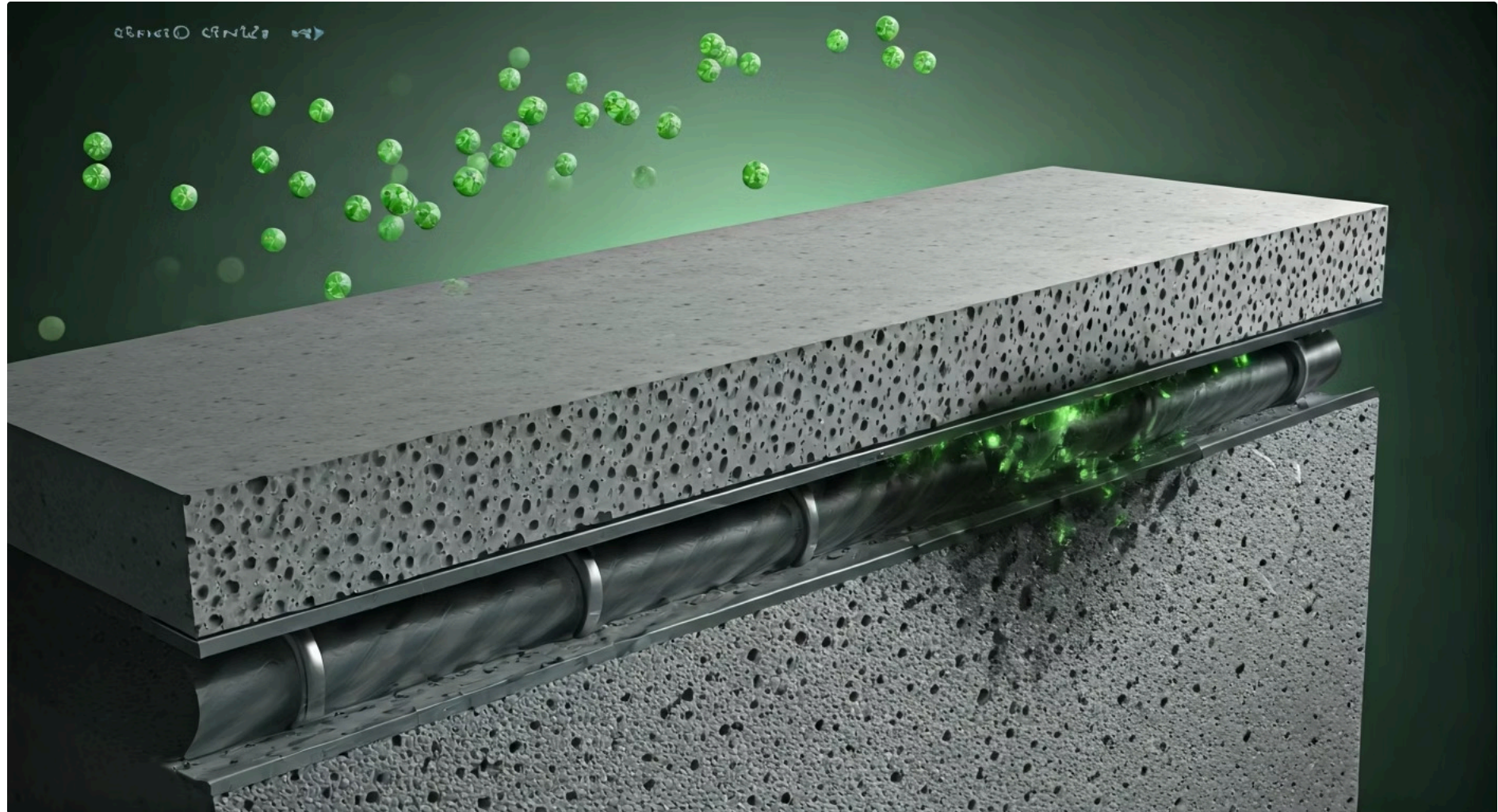
# Comparando os Tipos de Corrosão

A diferença entre a corrosão uniforme e a por pites pode ser comparada à diferença entre uma doença crônica e uma doença aguda. A corrosão uniforme é como uma doença crônica que se desenvolve lentamente, dando tempo para tratamento. Já a corrosão por pites é como uma doença aguda e agressiva, que pode levar a um colapso súbito se não for rapidamente identificada e contida. Por isso, a inspeção e o monitoramento são cruciais, especialmente em ambientes onde a presença de cloretos é uma constante.

A detecção da corrosão por pites é particularmente desafiadora, pois os danos internos podem ser significativos antes que qualquer fissura ou mancha de ferrugem apareça na superfície do concreto. Técnicas avançadas de diagnóstico, como a medição de potencial de corrosão e a resistividade elétrica do concreto, tornam-se ferramentas indispensáveis para identificar essas áreas de risco. A ABNT NBR 16747:2020, por exemplo, estabelece diretrizes para inspeção predial que incluem a avaliação de anomalias e falhas, muitas delas relacionadas a esses mecanismos de degradação.

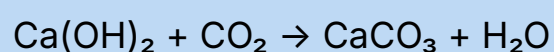
Conceito	Âmbito/Aplicação	Base/Origem	Exemplo
<b>Corrosão Uniforme</b>	Grande área da superfície da armadura	Carbonatação do concreto	Armadura com camada fina e generalizada de ferrugem em uma laje antiga
<b>Corrosão por Pites</b>	Pontos localizados e profundos na armadura	Ataque de íons cloreto	Pequenos buracos profundos em uma barra de aço de uma ponte marítima

# Carbonatação do Concreto: O Ataque Ácido do Ar



O concreto, como vimos, é um material naturalmente alcalino, e essa alcalinidade é a grande protetora das armaduras de aço. No entanto, essa proteção não é eterna. Um dos processos mais comuns e insidiosos que afetam a durabilidade do concreto é a **carbonatação**. Este fenômeno é uma reação química que ocorre quando o dióxido de carbono ( $\text{CO}_2$ ) presente na atmosfera penetra nos poros do concreto e reage com os hidróxidos de cálcio ( $\text{Ca}(\text{OH})_2$ ) formados durante a hidratação do cimento. É como se o ar estivesse lentamente "neutralizando" a defesa natural do concreto.

## ☐ A Reação Química da Carbonatação



(Hidróxido de cálcio + Dióxido de carbono → Carbonato de cálcio + Água)

A reação principal da carbonatação pode ser simplificada como:  $\text{Ca}(\text{OH})_2 + \text{CO}_2 \rightarrow \text{CaCO}_3 + \text{H}_2\text{O}$  (Hidróxido de cálcio + Dióxido de carbono → Carbonato de cálcio + Água)

O resultado dessa reação é a formação de carbonato de cálcio ( $\text{CaCO}_3$ ), um composto estável, e a redução do pH do concreto. Onde antes tínhamos um ambiente altamente alcalino (pH 12,5-13,5), após a carbonatação, o pH pode cair para valores próximos de 8 a 9. Essa queda de pH é o ponto crítico, pois é justamente nesse ambiente menos alcalino que a camada passivadora do aço se desestabiliza e se rompe. É como se o escudo protetor do aço fosse dissolvido, deixando-o vulnerável à corrosão.

Imagine que o concreto é uma esponja porosa. O  $\text{CO}_2$  do ar entra lentamente por esses poros, como um gás invisível, e vai reagindo com a "cola" alcalina que mantém o ambiente seguro para o aço. Essa frente de carbonatação avança do exterior para o interior da peça de concreto. A velocidade com que a carbonatação ocorre depende de vários fatores, como a porosidade do concreto (quanto mais poroso, mais rápido), a umidade do ambiente (umidade intermediária acelera o processo) e a concentração de  $\text{CO}_2$  no ar (maior em áreas urbanas e industriais).

# Efeitos e Prevenção da Carbonatação

Os efeitos da carbonatação são diretos e perigosos para a estrutura. Uma vez que a frente de carbonatação atinge a armadura, a despassivação do aço ocorre, e o processo de corrosão pode ser iniciado, desde que haja oxigênio e umidade suficientes. As fissuras e deslocamentos resultantes da expansão da ferrugem são os sinais mais visíveis desse problema. Em casos mais avançados, a perda de seção da armadura pode comprometer a capacidade estrutural da peça.

## Concreto de Qualidade

Utilização de concretos com baixa relação água/cimento, que resultam em menor porosidade e maior compacidade, dificultando a penetração do CO<sub>2</sub>.

## Cobrimento Adequado

Uma espessura adequada de cobrimento da armadura é crucial, pois quanto maior o cobrimento, mais tempo o CO<sub>2</sub> levará para atingir o aço.

## Revestimentos Protetores

A aplicação de revestimentos protetores e a manutenção regular das superfícies expostas podem prolongar significativamente a vida útil da estrutura.

A prevenção da carbonatação passa por medidas como a utilização de concretos com baixa relação água/cimento, que resultam em menor porosidade e maior compacidade, dificultando a penetração do CO<sub>2</sub>. Uma espessura adequada de cobrimento da armadura também é crucial, pois quanto maior o cobrimento, mais tempo o CO<sub>2</sub> levará para atingir o aço. Além disso, a aplicação de revestimentos protetores e a manutenção regular das superfícies expostas podem prolongar significativamente a vida útil da estrutura.

A ABNT NBR 16747:2020, ao abordar a inspeção predial, enfatiza a importância de avaliar a qualidade do concreto e a presença de anomalias como fissuras, que podem ser indicativos de carbonatação avançada e corrosão. Ferramentas como kits de fenolftaleína, que mudam de cor em contato com o concreto carbonatado, são usadas em campo para determinar a profundidade da frente de carbonatação, fornecendo dados essenciais para o diagnóstico e planejamento de intervenções.

# Ataque por Íons Cloreto: O Sal que Corrói por Dentro



Se a carbonatação é um ataque generalizado que enfraquece a proteção do concreto, o ataque por íons cloreto é um "agente secreto" que age de forma mais direta e agressiva, perfurando o escudo protetor do aço em pontos específicos. Este é, sem dúvida, um dos mecanismos de degradação mais perigosos e difíceis de combater, especialmente em ambientes marinhos, estruturas expostas a sais de degelo ou em indústrias que utilizam cloretos em seus processos. A presença desses íons pode acelerar drasticamente a corrosão das armaduras, levando a danos severos em um curto espaço de tempo.

Os íons cloreto ( $\text{Cl}^-$ ) penetram no concreto através dos poros e fissuras, migrando em direção à armadura. Diferente do  $\text{CO}_2$ , que reduz o pH do concreto de forma generalizada, os cloretos atuam de maneira mais localizada e direta. Eles conseguem romper a camada passivadora do aço mesmo em ambientes de alto pH, criando pontos de fragilidade onde a corrosão por pites pode se iniciar. É como se os cloretos fossem pequenas "chaves" que abrem buracos no escudo protetor, permitindo que o oxigênio e a água ataquem o metal de forma concentrada.

"Imagine que a camada passivadora do aço é uma barreira de segurança. A carbonatação a enfraquece por completo, mas os cloretos, mesmo com a barreira intacta, conseguem criar 'portas secretas' e entrar."

Imagine que a camada passivadora do aço é uma barreira de segurança. A carbonatação a enfraquece por completo, mas os cloretos, mesmo com a barreira intacta, conseguem criar "portas secretas" e entrar. Uma vez que um íon cloreto atinge a superfície do aço e rompe a passivação, ele cria uma microcélula eletroquímica altamente ativa. Essa célula se torna um ânodo, onde o aço é rapidamente consumido, formando um pite profundo. A concentração de cloretos nessas áreas localizadas acelera ainda mais a reação, tornando o processo de corrosão extremamente rápido e destrutivo.

# Efeitos e Prevenção do Ataque por Cloretos

Os efeitos do ataque por cloretos são devastadores. A corrosão por pites, como já discutimos, é perigosa porque reduz a seção transversal do aço em pontos críticos, comprometendo a capacidade de carga da armadura sem que haja sinais externos óbvios de dano. As fissuras e deslocamentos só aparecem quando a corrosão já está em estágio avançado, e a estrutura pode estar em risco iminente de falha. Em ambientes marinhos, por exemplo, a maresia carrega cloretos que se depositam nas superfícies das estruturas, penetrando no concreto e iniciando esse processo destrutivo.

## Estratégias de Prevenção

01

### Concreto de Alta Qualidade

Uso de concretos de alta qualidade, com baixa permeabilidade e baixa relação água/cimento, que dificultam a penetração dos íons.

02

### Aditivos Inibidores

Aditivos inibidores de corrosão podem ser incorporados ao concreto para retardar o processo.

03

### Armaduras Especiais

Utilização de armaduras de aço inoxidável ou revestidas com epóxi são soluções mais caras, mas eficazes em ambientes extremamente agressivos.

04

### Cobrimento e Barreiras

O cobrimento adequado da armadura é fundamental, assim como a aplicação de barreiras superficiais, como pinturas e membranas impermeabilizantes.

A prevenção contra o ataque de cloretos é um desafio complexo. Ela envolve o uso de concretos de alta qualidade, com baixa permeabilidade e baixa relação água/cimento, que dificultam a penetração dos íons. Aditivos inibidores de corrosão podem ser incorporados ao concreto, e a utilização de armaduras de aço inoxidável ou revestidas com epóxi são soluções mais caras, mas eficazes em ambientes extremamente agressivos. O cobrimento adequado da armadura também é fundamental, assim como a aplicação de barreiras superficiais, como pinturas e membranas impermeabilizantes.

A inspeção de estruturas em ambientes agressivos, conforme a ABNT NBR 16747:2020, deve incluir a avaliação da presença de cloretos. Técnicas como a extração de amostras de concreto para análise química em laboratório, que determinam a concentração de cloretos em diferentes profundidades, são cruciais para mapear o risco de corrosão e planejar as medidas corretivas. A detecção precoce é a chave para evitar danos irreparáveis.

# Ataque por Íons Sulfato: A Expansão Interna do Concreto



Além dos cloretos, outro inimigo químico do concreto são os íons sulfato ( $\text{SO}_4^{2-}$ ). O ataque por sulfatos é um processo de degradação que ocorre quando o concreto entra em contato com soluções contendo esses íons, geralmente presentes em solos argilosos, águas subterrâneas, esgotos ou em ambientes industriais. Diferente da carbonatação e do ataque por cloretos, que afetam principalmente a armadura, o ataque por sulfatos age diretamente na matriz do concreto, causando sua expansão e desagregação. É como se o concreto estivesse "inchando" por dentro, gerando tensões internas que levam à sua destruição.

O mecanismo do ataque por sulfatos envolve reações químicas entre os íons sulfato e os compostos hidratados do cimento, principalmente o aluminato tricálcico hidratado ( $\text{C}_3\text{A}$ ) e o hidróxido de cálcio ( $\text{Ca}(\text{OH})_2$ ). Essas reações formam produtos expansivos, como a etringita secundária e o gesso. A etringita, em particular, é um mineral que, ao se formar nos poros do concreto, ocupa um volume significativamente maior do que os reagentes originais. Essa expansão gera pressões internas que podem exceder a resistência à tração do concreto, resultando em fissuras, deslocamentos e perda de massa.

"Imagine o concreto como uma parede de tijolos e argamassa. O ataque por sulfatos é como se a argamassa começasse a inchar e se expandir, empurrando os tijolos para fora e causando rachaduras em toda a parede."

Imagine o concreto como uma parede de tijolos e argamassa. O ataque por sulfatos é como se a argamassa começasse a inchar e se expandir, empurrando os tijolos para fora e causando rachaduras em toda a parede. O processo é lento, mas contínuo, e os danos se acumulam ao longo do tempo. As fissuras resultantes do ataque por sulfatos são geralmente paralelas à superfície e podem levar à desagregação completa do concreto, expondo a armadura e tornando-a vulnerável a outros mecanismos de corrosão.

# Efeitos e Prevenção do Ataque por Sulfatos

Os efeitos visíveis do ataque por sulfatos incluem fissuras, deslocamentos de argamassa e agregados, e uma aparência esbranquiçada ou pulverulenta na superfície do concreto. Em casos severos, a estrutura pode perder sua integridade e capacidade de carga. A severidade do ataque depende da concentração de sulfatos na solução agressiva, da permeabilidade do concreto e do tipo de cimento utilizado.

## Medidas Preventivas

- **Cimentos Especiais:** Utilização de cimentos resistentes a sulfatos (CP V-ARI RS ou CP IV), que possuem baixo teor de aluminato tricálcico ( $C_3A$ ), minimizando a formação de etringita.
- **Concreto de Alta Qualidade:** Concretos com baixa relação água/cimento e boa compactação são essenciais para reduzir a penetração dos íons sulfato.
- **Barreiras Físicas:** Em situações de alta agressividade, membranas impermeabilizantes podem ser aplicadas para isolar o concreto do ambiente agressivo.
- **Análise do Ambiente:** Avaliação de solos e águas subterrâneas para identificar a presença de sulfatos antes da construção.



A prevenção é a melhor estratégia contra o ataque por sulfatos. Ela envolve a utilização de cimentos especiais, como os cimentos resistentes a sulfatos (CP V-ARI RS ou CP IV), que possuem baixo teor de aluminato tricálcico ( $C_3A$ ), minimizando a formação de etringita. Concretos de alta qualidade, com baixa relação água/cimento e boa compactação, também são essenciais para reduzir a penetração dos íons sulfato. Em situações de alta agressividade, barreiras físicas, como membranas impermeabilizantes, podem ser aplicadas para isolar o concreto do ambiente agressivo.

A ABNT NBR 16747:2020 reforça a necessidade de avaliar o ambiente de exposição da estrutura durante a inspeção, incluindo a análise de solos e águas subterrâneas para identificar a presença de sulfatos. A detecção precoce de fissuras e a análise laboratorial de amostras de concreto podem confirmar a ocorrência do ataque e guiar as ações de reparo, que geralmente envolvem a remoção do concreto deteriorado e a substituição por um material mais resistente.

# Reação Álcali-Agregado (RAA): A Guerra Silenciosa Interna



Enquanto a carbonatação, os cloretos e os sulfatos vêm de fora, a **Reação Álcali-Agregado (RAA)** é um conflito que nasce de dentro do próprio concreto, uma "guerra silenciosa" entre dois de seus componentes essenciais: o cimento e o agregado. Este fenômeno é uma das causas mais complexas e difíceis de prever de degradação do concreto, pois depende da interação de fatores químicos e mineralógicos que nem sempre são óbvios durante a fase de projeto.

A RAA ocorre quando agregados que contêm sílica reativa (presente em certos tipos de rochas, como opala, calcedônia, quartzo microcristalino) reagem com os álcalis (principalmente sódio e potássio) presentes no cimento e na água de amassamento, na presença de umidade. Essa reação forma um gel expansivo, conhecido como gel álcali-sílica. É como se o agregado, em vez de ser um material inerte, se tornasse um "agente secreto" que, ao reagir com os álcalis, produz uma substância que incha.

## A Analogia da Pedra Mágica

Imagine que o concreto é uma mistura de "pedras" (agregados) e "cola" (pasta de cimento). Se algumas dessas pedras forem "mágicas" e começarem a inchar quando em contato com a cola e a água, elas vão empurrar a cola e as outras pedras, causando fissuras e deformações em toda a estrutura.

Imagine que o concreto é uma mistura de "pedras" (agregados) e "cola" (pasta de cimento). Se algumas dessas pedras forem "mágicas" e começarem a inchar quando em contato com a cola e a água, elas vão empurrar a cola e as outras pedras, causando fissuras e deformações em toda a estrutura. O gel álcali-sílica absorve água do ambiente, expandindo-se e gerando pressões internas que podem exceder a resistência à tração do concreto, resultando em fissuras características e, em casos severos, em deformações e deslocamentos de elementos estruturais.

# Sinais e Prevenção da RAA

As fissuras causadas pela RAA são geralmente em forma de "mapa" (map cracking), interconectadas e aleatoriamente distribuídas na superfície do concreto. Outros sinais incluem exsudação de gel (uma substância gelatinosa que pode ser visível nas fissuras), deslocamento de elementos e, em casos extremos, falha estrutural. A RAA é um processo lento, que pode levar anos ou até décadas para se manifestar, o que dificulta sua detecção precoce e a atribuição da causa.



## Ensaaios de Agregados

Realizar ensaios nos agregados para verificar sua reatividade à sílica antes da utilização.



## Cimentos com Baixo Teor de Álcalis

Utilização de cimentos com baixo teor de álcalis quando agregados reativos são inevitáveis.



## Materiais Pozolânicos

Adição de materiais pozolânicos (cinza volante ou sílica ativa) que reagem com os álcalis antes que ataquem o agregado.



## Controle de Umidade

Controle da umidade interna do concreto para mitigar o problema.

A prevenção da RAA é crucial e começa na seleção dos materiais. É fundamental realizar ensaios nos agregados para verificar sua reatividade à sílica. Se agregados reativos forem inevitáveis, medidas como a utilização de cimentos com baixo teor de álcalis, a adição de materiais pozolânicos (como cinza volante ou sílica ativa, que reagem com os álcalis antes que eles ataquem o agregado) e o controle da umidade interna do concreto podem mitigar o problema.

A ABNT NBR 16747:2020, ao guiar a inspeção predial, orienta a observação de padrões de fissuração e a coleta de amostras para análise petrográfica em laboratório, que pode identificar a presença de agregados reativos e o gel álcali-sílica. O diagnóstico da RAA é complexo e exige expertise, mas é essencial para evitar a progressão do dano e planejar intervenções que visem controlar a umidade e, se possível, inibir a reação.

# Lixiviação de Compostos do Cimento: A Lavagem dos Nutrientes



O concreto é um material poroso, e a água, em suas diversas formas, está constantemente interagindo com ele. A **lixiviação de compostos do cimento** é um processo de degradação que ocorre quando a água, ao percolar através do concreto, dissolve e carrega consigo componentes solúveis da pasta de cimento, principalmente o hidróxido de cálcio ( $\text{Ca(OH)}_2$ ). É como se a chuva ou a água subterrânea estivesse "lavando" os nutrientes essenciais do concreto, deixando-o mais fraco e poroso.

Este fenômeno é mais comum em estruturas expostas a águas puras (com baixo teor de sais dissolvidos), águas ácidas (como chuva ácida ou efluentes industriais) ou em situações onde há um fluxo contínuo de água através do concreto. A água pura, por exemplo, tem uma capacidade maior de dissolver o  $\text{Ca(OH)}_2$ , que é relativamente solúvel. Já a água ácida reage quimicamente com o hidróxido de cálcio, formando sais que são mais solúveis e facilmente lixiviados.

"Imagine que o concreto é um bolo poroso. A lixiviação é como se a água estivesse passando por esse bolo e dissolvendo o açúcar ( $\text{Ca(OH)}_2$ ) que o mantém unido. Com o tempo, o bolo fica esfarelado e perde sua estrutura."

Imagine que o concreto é um bolo poroso. A lixiviação é como se a água estivesse passando por esse bolo e dissolvendo o açúcar ( $\text{Ca(OH)}_2$ ) que o mantém unido. Com o tempo, o bolo fica esfarelado e perde sua estrutura. No concreto, a remoção do  $\text{Ca(OH)}_2$  leva a um aumento da porosidade e da permeabilidade, o que, por sua vez, facilita a entrada de outros agentes agressivos e reduz a resistência mecânica do material. Além disso, a perda de alcalinidade pode despassivar a armadura, tornando-a vulnerável à corrosão.

# Sinais e Prevenção da Lixiviação

Os sinais visíveis da lixiviação incluem a formação de depósitos esbranquiçados na superfície do concreto, conhecidos como eflorescências. Essas eflorescências são, na verdade, o carbonato de cálcio que se forma quando o  $\text{Ca(OH)}_2$  lixiviado reage com o  $\text{CO}_2$  do ar. Em casos mais avançados, o concreto pode apresentar uma aparência esfarelada, com perda de massa e exposição dos agregados. A resistência do concreto é comprometida, e a durabilidade da estrutura é drasticamente reduzida.



## Controle de Água

Controle da entrada e do fluxo de água no concreto através de sistemas de drenagem eficientes e impermeabilização adequada.



## Concreto de Baixa Permeabilidade

Utilização de concretos de baixa permeabilidade, com boa compactação e baixa relação água/cimento.



## Proteção de Superfícies

Proteção das superfícies expostas com revestimentos adequados para evitar o contato direto com a água.



## Cimentos Especiais

Em ambientes com águas ácidas, uso de cimentos resistentes a ácidos ou revestimentos protetores específicos.

A prevenção da lixiviação passa, principalmente, pelo controle da entrada e do fluxo de água no concreto. Isso inclui a utilização de concretos de baixa permeabilidade, com boa compactação e baixa relação água/cimento. Sistemas de drenagem eficientes, impermeabilização adequada e a proteção das superfícies expostas são medidas essenciais. Em ambientes com águas ácidas, o uso de cimentos resistentes a ácidos ou revestimentos protetores específicos pode ser necessário.

A inspeção predial, conforme a ABNT NBR 16747:2020, deve atentar para a presença de eflorescências, manchas de umidade e áreas com concreto desagregado, que podem ser indicativos de lixiviação. A análise da água que entra em contato com a estrutura também pode fornecer pistas sobre a agressividade do ambiente. O tratamento da lixiviação geralmente envolve a interrupção da fonte de umidade, a remoção do concreto deteriorado e a aplicação de materiais de reparo que restaurem a integridade e a proteção do concreto.

# Conectando os Mecanismos e as Novas Fronteiras da Patologia



Até agora, exploramos cada mecanismo de degradação química e eletroquímica de forma individual. No entanto, na realidade das construções, esses processos raramente ocorrem isoladamente. É comum que a carbonatação abra caminho para a corrosão das armaduras, ou que a lixiviação aumente a porosidade do concreto, tornando-o mais suscetível ao ataque de cloretos e sulfatos. A interação entre esses fenômenos pode acelerar a deterioração e tornar o diagnóstico e o reparo ainda mais desafiadores.

Compreender essa interconexão é o que nos permite ter uma visão holística da patologia das construções. Por exemplo, um concreto com alta relação água/cimento será mais poroso, facilitando a penetração de  $\text{CO}_2$ , cloretos e sulfatos, e também a lixiviação. A corrosão resultante da carbonatação ou dos cloretos pode gerar fissuras, que, por sua vez, permitem uma penetração ainda mais rápida de agentes agressivos, criando um ciclo vicioso de degradação.

**Visão Holística:** É nesse cenário complexo que a inovação e as novas tecnologias se tornam aliadas indispensáveis. A ABNT NBR 16747:2020 não apenas estabelece diretrizes para a inspeção predial, mas também incentiva a aplicação de metodologias avançadas para a avaliação de anomalias.

É nesse cenário complexo que a inovação e as novas tecnologias se tornam aliadas indispensáveis. A ABNT NBR 16747:2020, por exemplo, não apenas estabelece diretrizes para a inspeção predial, mas também incentiva a aplicação de metodologias avançadas para a avaliação de anomalias. As tecnologias de diagnóstico estão em constante evolução, oferecendo ferramentas cada vez mais precisas e eficientes para identificar e monitorar a degradação.

# Tecnologias Avançadas de Diagnóstico e Reparo

## Tecnologias de Diagnóstico



### Drones

Inspeção de fachadas e áreas de difícil acesso com câmeras de alta resolução, reduzindo custos e riscos.



### Termografia Infravermelha

Técnica não destrutiva que detecta variações de temperatura indicando umidade, vazios ou descolamentos.

A aplicação de **drones** para inspeção de fachadas e áreas de difícil acesso revolucionou a forma como avaliamos grandes estruturas. Equipados com câmeras de alta resolução, eles permitem a detecção de fissuras, deslocamentos e manchas de umidade sem a necessidade de andaimes ou acesso manual, reduzindo custos e riscos. A **termografia infravermelha**, por sua vez, é uma técnica não destrutiva que detecta variações de temperatura na superfície dos materiais. Essas variações podem indicar a presença de umidade, falhas de isolamento, vazios ou até mesmo a descolamento de revestimentos, fornecendo pistas valiosas sobre a saúde interna do concreto.

No campo dos materiais de reparo, a evolução também é notável. Os **polímeros** e as **argamassas poliméricas** oferecem soluções de alta performance para a restauração de estruturas. Esses materiais possuem características como alta aderência, baixa permeabilidade, resistência química e flexibilidade, que os tornam ideais para preencher fissuras, recompor seções de concreto e proteger as armaduras. Sistemas de proteção catódica, inibidores de corrosão e revestimentos avançados são outras tecnologias que visam prolongar a vida útil das estruturas, combatendo os mecanismos de degradação de forma mais eficaz.

A integração desses conhecimentos – desde a compreensão dos mecanismos básicos até a aplicação das tecnologias mais recentes – é o que define o profissional de patologia das construções do futuro. Não se trata apenas de identificar o problema, mas de propor soluções inteligentes e duradouras, garantindo a segurança e a sustentabilidade do nosso patrimônio construído.

## Materiais de Reparo



### Polímeros e Argamassas

Materiais de alta performance com aderência, baixa permeabilidade e resistência química.



### Sistemas de Proteção

Proteção catódica, inibidores de corrosão e revestimentos avançados para prolongar a vida útil.

# Consolidação do Conhecimento

Nesta aula, mergulhamos nos complexos mecanismos de degradação química e eletroquímica que afetam as estruturas de concreto armado. Vimos como a corrosão das armaduras, impulsionada pela carbonatação e pelo ataque de cloretos, pode comprometer a integridade do aço. Exploramos como os sulfatos e a Reação Álcali-Agregado (RAA) atacam a própria matriz do concreto, causando expansão e fissuração. E compreendemos a lixiviação, que "lava" os componentes essenciais do cimento, enfraquecendo o material. Cada um desses processos, isolado ou em conjunto, representa um desafio significativo para a durabilidade e segurança das construções.

## Em prática

Ao inspecionar uma estrutura, observe atentamente: manchas de ferrugem e fissuras longitudinais (corrosão), eflorescências e concreto esfarelado (lixiviação), fissuras em mapa (RAA), ou desagregação e fissuras paralelas (sulfatos). Lembre-se que a prevenção, através de um bom projeto e execução, é sempre a melhor estratégia, mas o diagnóstico precoce com o uso de tecnologias como drones e termografia é vital para a intervenção eficaz.

## Autoavaliação

- Qual dos seguintes mecanismos de degradação é mais comumente associado à formação de "pites" (corrosão puntiforme) nas armaduras?
  - Carbonatação do concreto
  - Lixiviação de compostos do cimento
  - Ataque por íons cloreto
  - Reação Álcali-Agregado (RAA)
- A carbonatação do concreto resulta em:
  - Aumento do pH do concreto, fortalecendo a camada passivadora.
  - Formação de etringita expansiva, causando fissuras internas.
  - Redução do pH do concreto, despassivando a armadura.
  - Dissolução de agregados reativos, formando gel expansivo.
- Qual tecnologia de diagnóstico é mais adequada para detectar umidade e falhas de isolamento em fachadas de difícil acesso?
  - Análise química de amostras de concreto
  - Medição de potencial de corrosão
  - Termografia infravermelha
  - Ensaio de esclerometria
- A principal consequência da Reação Álcali-Agregado (RAA) é:
  - Aumento da resistência à compressão do concreto.
  - Formação de gel expansivo que causa fissuras e deformações.
  - Diminuição da permeabilidade do concreto.
  - Aceleração da passivação das armaduras.

**Gabarito:** 1. c) | 2. c) | 3. c) | 4. b)

**Questão Discursiva:** Explique a importância da ABNT NBR 16747:2020 no contexto da detecção e prevenção dos mecanismos de degradação químicos e eletroquímicos em edificações, considerando as tecnologias emergentes discutidas.

# Próximos Passos

## Próxima Aula

Na Aula 5, exploraremos os **Mecanismos de Degradação Biológicos**, entendendo como fungos, bactérias e outros organismos vivos podem afetar a durabilidade das construções.

## Recursos Adicionais

### Vídeo

"Corrosão em Estruturas de Concreto Armado" (para visualização do processo).

### Artigo

"Novas Tecnologias na Inspeção de Estruturas" (para aprofundar em drones e termografia).

### Norma

ABNT NBR 16747:2020 (para consulta das diretrizes de inspeção).

---

**NOTA IMPORTANTE:** As informações regulatórias/legais/técnicas desta aula estão atualizadas até 2025. Consulte sempre fontes oficiais para verificar alterações.