



LABORATÓRIO NACIONAL  
DE ENGENHARIA CIVIL

# ALGUMAS SITUAÇÕES DE PATOLOGIA EM EDIFÍCIOS DE BETÃO ARMADO

Medidas preventivas

**Manuel F. Camacho Baião**

Investigador Principal, LNEC

LISBOA • 2009

COMUNICAÇÕES  
COM 146

**BAIÃO, Manuel**

Engenheiro Civil, Doutor em Edifícios

Departamento de Edifícios

Comunicação apresentada às "*Jornadas Técnicas da 1.ª Feira Internacional da Construção e Habitação*", realizada na Cidade da Praia, em Cabo Verde, Outubro, 2009

Copyright © LABORATÓRIO NACIONAL DE ENGENHARIA CIVIL, I.P.

Divisão de Divulgação Científica e Técnica

AV DO BRASIL 101 • 1700-066 LISBOA

e-e: [livraria@lnec.pt](mailto:livraria@lnec.pt)

[www.lnec.pt](http://www.lnec.pt)

Editor: LNEC

Colecção: Comunicações

Série: COM 146

1.ª edição: 2009

Tiragem: 100 exemplares

Descritores: Estrutura de betão armado / Patologia da construção

Descriptors: Reinforced concrete structure / Construction pathology

CDU 624.07[012.4]:624.059

ISBN 978-972-49-2189-1

## **ALGUMAS SITUAÇÕES DE PATOLOGIA EM EDIFÍCIOS DE BETÃO ARMADO. MEDIDAS PREVENTIVAS**

### **RESUMO**

Pretende-se nesta comunicação apresentar algumas situações de anomalias que se podem verificar em edifícios correntes de betão armado, em particular, anomalias que decorrem do funcionamento deficiente das respectivas estruturas. Abordam-se nesse sentido aspectos relacionados com os efeitos anómalos devidos à retracção do betão, às acções térmicas e mecânicas e à corrosão de armaduras em elementos estruturais e referem-se as medidas que nas diversas fases da construção do edifício devem ser tidas em conta para prevenir essas anomalias.

## **SOME SITUATIONS OF PATHOLOGY IN REINFORCED CONCRETE BUILDINGS. PREVENTIVE MEASURES**

### **ABSTRACT**

This paper intends to present some situations of deficiencies which may exist in current reinforced concrete buildings, in particular, anomalies arising from the malfunctioning of the respective structures. With this purpose, aspects related to effects due to concrete shrinkage, thermal and mechanical actions and reinforcement steel corrosion in structural elements are referred, as well as the measures that must be taken into account, in the various stages of the building construction, to prevent the correspondent anomalies.

## **QUELQUES SITUATIONS DE PATHOLOGIE DANS LES BÂTIMENTS EN BÉTON ARMÉ. MESURES PRÉVENTIVES**

### **RÉSUMÉ**

Cette communication prétend présenter quelques situations d'anomalies qui peuvent se vérifier dans les bâtiments courants en béton armé, en particulier, des anomalies qui résultent du fonctionnement déficient des respectives structures. S'abordent, dans ce sens, des aspects correspondants aux effets anormaux dus à la rétraction du béton, aux actions thermiques et mécaniques et à la corrosion des armatures en acier des éléments structurels et, aussi, se rapportent les mesures qui, dans les diverses phases de la construction du bâtiment, doivent être tenues en compte pour empêcher les anomalies correspondantes.

**ALGUMAS SITUAÇÕES DE PATOLOGIA EM EDIFÍCIOS  
DE BETÃO ARMADO. MEDIDAS PREVENTIVAS**

**ÍNDICE**

	Pág.
1 - INTRODUÇÃO .....	1
2 - ENQUADRAMENTO DAS SITUAÇÕES DE PATOLOGIA ANALISADAS .....	1
3 - RETRACÇÃO DO BETÃO.....	2
3.1 - Nota prévia .....	2
3.2 - Efeitos e factores condicionantes da retracção do betão .....	3
3.3 - Medidas preventivas relativas aos efeitos da retracção do betão.....	5
4 - VARIAÇÕES DE TEMPERATURA DOS ELEMENTOS DE BETÃO.....	6
4.1 - Nota prévia .....	6
4.2 - Efeitos das variações de temperatura.....	6
4.3 - Medidas preventivas relativas aos efeitos das variações de temperaturas .....	7
5 - ACÇÕES MECÂNICAS SOBRE OS ELEMENTOS DE BETÃO .....	7
5.1 - Nota prévia .....	7
5.2 - Efeitos das acções mecânicas.....	8
5.2.1 - Fendilhação.....	8
5.2.2 - Deformação excessiva dos elementos estruturais.....	9
5.2.3 - Esmagamentos localizados.....	11
5.3 - Medidas preventivas relativas aos efeitos das acções mecânicas .....	11
6 - CORROSÃO DAS ARMADURAS.....	13
6.1 - Mecanismos envolvidos na corrosão das armaduras.....	13
6.1.1 - Processo de corrosão.....	13
6.1.2 - Protecção das armaduras .....	13
6.1.3 - Fases do processo de deterioração das armaduras .....	14
6.1.4 - Corrosão induzida por cloretos.....	15
6.1.5 - Corrosão induzida por carbonatação.....	16
6.1.6 - Propagação da corrosão .....	17
6.2 - Efeitos da corrosão das armaduras .....	18
6.2.1 - Fendilhação e delaminação.....	18
6.2.2 - Redução da resistência e das condições de segurança das estruturas.....	18
6.3 - Medidas preventivas da corrosão .....	19

	Pág.
7 - CONCLUSÕES .....	20
AGRADECIMENTO.....	20
BIBLIOGRAFIA .....	20

# **ALGUMAS SITUAÇÕES DE PATOLOGIA EM EDIFÍCIOS DE BETÃO ARMADO. MEDIDAS PREVENTIVAS**

## **1 - INTRODUÇÃO**

Numa abordagem sintética dos tipos de anomalias que podem afectar os edifícios correntes com estrutura de betão armado construídos nas últimas décadas, seleccionam-se, nesta comunicação, algumas das principais causas dessas anomalias, em particular as que correspondem a deficiências em elementos estruturais desses edifícios.

Abordam-se, nesse sentido, aspectos relacionados com os efeitos anómalos devidos à retracção do betão, às acções térmicas e mecânicas e à corrosão de armaduras em elementos estruturais.

Na sequência da análise, ainda que breve, dos mecanismos e dos factores que contribuem para produzir as respectivas anomalias, referem-se as medidas que nas diversas fases do processo construtivo dos edifícios devem ser tidas em conta para prevenir a sua ocorrência.

## **2 - ENQUADRAMENTO DAS SITUAÇÕES DE PATOLOGIA ANALISADAS**

Entende-se por patologia em edifícios o estudo das anomalias que neles se podem verificar, incluindo nesse estudo a análise dos sintomas ou efeitos, dos mecanismos, das causas e consequências dessas anomalias.

Entende-se por anomalia, verificada num determinado elemento de construção (estrutura, parede, pavimento, etc.), o fenómeno que conduz à redução do desempenho previsto desse elemento e por sintoma ou efeito dessa anomalia a forma de manifestação externa a partir da qual se podem deduzir, se necessário com recurso a meios auxiliares de diagnóstico, a natureza, a origem e os mecanismos dos fenómenos envolvidos.

No que se refere a estruturas de betão armado de edifícios, os sintomas ou os efeitos das anomalias mais correntes são a fendilhação, a deformação excessiva, o esmagamento, a delaminação e o esboroamento.

Os agentes causadores das anomalias podem agrupar-se em três tipos: 1) acções naturais; 2) desastres naturais; 3) desastres devidos a causas humanas imprevisíveis. Referem-se a seguir exemplos de acções ou agentes causadores das anomalias correspondentes a cada um desses tipos.

## 1. Acções naturais

- a. Físicas: retracção; variações de temperatura; acções mecânicas; vento; alteração das condições do solo e abaixamento do nível freático.
  - b. Químicas: corrosão das armaduras; reacções álcalis-agregados e ataque de sulfatos.
  - c. Biológicas: vegetais (por exemplo, raízes de árvores)
2. Desastres naturais: sismos; ciclones e tempestades marítimas.
  3. Desastres devidos a causas humanas imprevisíveis: fogo; explosão; choque e inundação.

A origem das anomalias pode ser determinada por: i) erros ou insuficiências originais; ii) alterações introduzidas na construção durante a sua fase de serviço, resultantes de intervenções intencionais ou acidentais; iii) alterações devidas a processo de degradação previsível no tempo.

O erro humano pode assim estar na origem das anomalias durante uma ou mais fases do processo de construção de um empreendimento; fase de concepção e projecto; fase de execução e fase de serviço.

Para a presente análise seleccionaram-se os seguintes conjuntos de causas de anomalias, devidas a acções naturais:

- Anomalias devidas às causas físicas:
  - Retracção do betão;
  - Variações de temperatura dos elementos de betão;
  - Acções mecânicas sobre os elementos de betão.
- Anomalias devidas a causas químicas:
  - Corrosão de armaduras

## 3 - RETRACÇÃO DO BETÃO

### 3.1 - Nota prévia

Os elementos de betão sofrem, ao longo da sua vida, variações dimensionais importantes que se verificam praticamente desde que o betão é moldado e compactado até que atinge um estado de equilíbrio higrométrico com o ambiente, designando-se essas variações dimensionais por retracção.

Após se obter esse estado de equilíbrio, as variações dimensionais dos elementos de betão dependem das variações do seu teor de água, o qual, por sua vez depende das

condições de exposição desses elementos à humidade relativa ambiental, ou à água nas suas diversas formas (água da chuva, água do solo ou água devida a causas fortuitas).

No que se refere à retracção, as causas dessas variações dimensionais são as seguintes [S. COUTINHO, A. GONÇALVES, 1994].

a) Antes da presa do betão

Assentamento plástico ou retracção plástica, resultante do assentamento dos constituintes do betão e da evaporação da água à superfície.

b) Após a presa do betão

1. Retracção resultante das reacções químicas do cimento com a água. O volume dos produtos da reacção dos componentes do cimento com a água é inferior à soma dos volumes desta com os dos componentes anidros;
2. Retracção de secagem ou retracção hidráulica, resultante do movimento da água que pode sair por evaporação;
3. Retracção autogénea, resultante da passagem da água livre do interior da pasta de cimento para água combinada, devida à hidratação contínua do cimento;
4. Retracção por carbonatação, resultante da combinação do dióxido de carbono com os componentes hidratados de cimento, especialmente o hidróxido de cálcio.

### **3.2 - Efeitos e factores condicionantes da retracção do betão**

A retracção é um fenómeno que, como se referiu atrás, conduz a importantes variações dimensionais nas peças de betão, as quais começam a verificar-se praticamente desde que estas são moldadas.

Os efeitos que podem produzir-se são: i) a muito curto prazo, poucas horas após a betonagem, fendilhação devida a assentamento e a retracção plástica; ii) a médio prazo, fendilhação na própria estrutura devida a movimentos restringidos (com ocorrência de tensões de tracção instaladas de valor superior à resistência à tracção do betão) ou deformações estruturais (com implicações, em particular, no comportamento de elementos não-estruturais que se opõem aos movimentos de retracção da estrutura, como, por exemplo, em paredes de compartimentação de alvenaria com ligações rígidas à estrutura).

Os efeitos da retracção, que dependem de diversos factores, são idênticos aos produzidos por diminuições de temperatura da estrutura não-reversíveis, prevendo o regulamento português de estruturas de betão armado e pré-esforçado [REBAP, 1986], que, no

dimensionamento das estruturas e na verificação das condições de segurança, a retracção seja assimilada a um abaixamento lento e uniforme da temperatura de 15°C.

Os factores que condicionam a retracção do betão são diversos. De forma sintética referem-se os seguintes, em correspondência com ambas as situações atrás referidas, antes da presa e após a presa do betão:

#### **a) Factores condicionantes da retracção plástica (antes da presa do betão)**

A água, os agregados e o cimento têm densidades diferentes, sendo a água o constituinte mais leve e portanto o que mais facilmente surge à superfície.

O assentamento dos sólidos que constituem o betão dá-se nos primeiros minutos e a fendilhação que surge deve-se à presença de armaduras ou de agregados de maiores dimensões que impedem o assentamento de conjunto.

Por outro lado a velocidade de evaporação da água de amassadura à superfície é superior à velocidade com que a água do interior de betão chega à superfície, por exsudação.

Não existem teorias perfeitamente consolidadas sobre a ocorrência de fendilhação devida à retracção plástica, mas pode dizer-se que o aumento de elementos finos no betão e o aumento da quantidade de água provocam o aparecimento deste tipo de fendilhação.

Também os factores que determinam a evaporação da água à superfície, como a velocidade do ar, a baixa humidade relativa do ar e a temperatura de betão superior à do ambiente, contribuem para o aparecimento desta fendilhação.

Como nesta fase o ligante só tem a coesão que resulta das tensões capilares, a retracção que pode originar a fendilhação manifesta-se geralmente entre 1 e 3 horas, mas, em casos extremos, o intervalo de tempo que decorre entre o fim da compactação e o início da fendilhação pode chegar a ser apenas de 10 a 20 minutos.

#### **b) Factores condicionantes da retracção após a presa do betão**

Das parcelas de retracção após a presa do betão, a retracção de secagem e a autogénea são as mais importantes.

A retracção do betão é afectada por muitos factores, dos quais a seguir se referem os mais relevantes.

##### **i) Dimensões da secção transversal da peça de betão**

Quanto menor a secção da peça, maior a retracção. Os elementos de maior secção chegam a sofrer expansão no início da presa e do endurecimento, devido à libertação de calor de hidratação dos constituintes do cimento, mas durante o seu arrefecimento sofrem contracções, as quais podem produzir fendilhação nesses elementos.

ii) Quantidade de água da amassadura

Quanto maior a quantidade de água da amassadura, para a mesma dosagem de cimento, maior razão A/C, maior a retracção do betão.

iii) Dosagem de cimento

Quanto maior a dosagem de cimento, para a mesma razão A/C, maior a retracção.

iv) Natureza e granulometria do agregado

Agregados com maior módulo de elasticidade e de maiores dimensões conduzem a retracções menores.

v) Duração do período inicial da cura

Quanto maior for o período em que se impede a saída da água do betão, isto é, quanto maior for o período de cura, menor será a retracção.

vi) Humidade relativa do ar ambiente

A retracção é mais elevada se o elemento de betão estiver exposto a condições ambientes com humidade relativa do ar mais baixa.

vii) Composição do cimento

Quanto mais elevada a tensão de rotura do cimento maiores as tensões devidas à retracção e portanto mais fissurável este se torna, mesmo que as extensões de retracção não sejam as mais elevadas. É o que acontece quando se compara cimento aluminoso com cimento Portland normal. O cimento aluminoso apesar de ser menos retráctil, como adquire resistências superiores mais rapidamente é mais fissurável [S. COUTINHO, A. GONÇALVES, 1994].

### **3.3 - Medidas preventivas relativas aos efeitos da retracção do betão**

Assim, no sentido de evitar a fendilhação por retracção plástica, devem ser adoptadas as seguintes medidas [S. COUTINHO, A. GONÇALVES, 1994]:

i) Humedecer os moldes e a base sobre a qual se vai betonar;

ii) Humedecer os agregados, se eles são absorventes e estiverem secos;

iii) Baixar a temperatura do betão no tempo quente;

iv) Evitar temperaturas muito elevadas do betão no tempo frio;

v) Começar a cura do betão tão cedo quanto possível depois da colocação e acabamento;

vi) Proteger o betão com coberturas temporárias ou fazer rega por aspersão durante intervalo de tempo apreciável entre a colocação e o acabamento;

vii) Proteger a superfície de betão do vento e da radiação solar.

## **4 - VARIAÇÕES DE TEMPERATURA DOS ELEMENTOS DE BETÃO**

### **4.1 - Nota prévia**

As variações de temperatura a que os edifícios e em particular as suas estruturas podem estar sujeitos, em função das variações da temperatura do ar ambiente e do aquecimento produzido pela radiação solar incidente sobre o edifício, constituem acções capazes de gerar esforços, que podem ser significativos, quer nessas estruturas, em particular, em elementos da envolvente dos edifícios, quer em elementos não-estruturais ligados rigidamente a essas estruturas.

### **4.2 - Efeitos das variações de temperatura**

Os efeitos das variações de temperatura nas estruturas resultam da variação de volume dessas estruturas.

A relação entre a variação de volume e a variação de temperatura é expressa pelo coeficiente da variação (dilatação/contractão) térmica.

A variação de volume cria tensões quando os movimentos das estruturas estão restringidos, as quais podem ser de qualquer um dos tipos: tracção, compressão ou corte. As tensões criadas podem gerar efeitos anómalos tais como fendilhação e deformação excessiva nas estruturas de betão.

Em edifícios, os efeitos das variações de temperatura mais vulgares e que podem causar danos resultam da deformação excessiva das estruturas. Essa deformação excessiva verifica-se especialmente em lajes de coberturas deficientemente protegidas das variações térmicas, quer de variações uniformes que se podem registar durante o ano, quer de variações diferenciais de temperatura que se podem verificar diariamente, em particular em elementos expostos à radiação solar.

A existência de paredes de alvenaria de preenchimento da malha estrutural cria restrições a estes movimentos térmicos, conduzindo à instalação de tensões significativas nas zonas de ligação entre as alvenarias das paredes e o betão da estrutura, em particular ao das vigas e das lajes de coberturas que se localizam sobre essas paredes. Logo que essas tensões ultrapassam a resistência das ligações entre betão e alvenaria ocorrem fendas.

Fendas do mesmo tipo podem surgir entre as platibandas, também de alvenaria, e a estrutura que as suporta, devido a variações dimensionais diferenciais entre a laje da cobertura e essas platibandas.

### **4.3 - Medidas preventivas relativas aos efeitos das variações de temperaturas**

As medidas destinadas a prevenir a ocorrência das anomalias causadas pelas acções térmicas a que as estruturas podem estar sujeitas passam essencialmente pela necessidade de, na fase de concepção e projecto, por um lado, se efectuar um correcto dimensionamento estrutural, prevendo estas acções de acordo com as condições a que a estrutura vai estar exposta na fase de serviço, e, por outro, se adoptar um adequado isolamento térmico do edifício.

O isolamento térmico, que normalmente é previsto com o objectivo de satisfazer as exigências de conforto dos utentes no interior dos edifícios e as exigências de economia de energia, deverá ser previsto também com o objectivo de proteger as estruturas das amplitudes térmicas diárias e anuais, no sentido de minimizar os efeitos que atrás se referiram.

Em relação aos elementos emergentes das envolventes dos edifícios, onde esse tipo de isolamento térmico não é aplicável, dever-se-á prever uma concepção adequada desses elementos, no sentido de prevenir a sua fendilhação, deformação ou movimentação que ponham em causa aspectos do seu comportamento que se pretendam preservar, como, por exemplo, a sua estanquidade ou durabilidade.

## **5 - ACÇÕES MECÂNICAS SOBRE OS ELEMENTOS DE BETÃO**

### **5.1 - Nota prévia**

Todas as estruturas e, em geral, os elementos de betão armado suportam cargas. Alguns suportam apenas o peso próprio dos materiais que os constituem e outros suportam também cargas aplicadas.

Todos os materiais se deformam quando sujeitos a esforços. Alongam quando sujeitos a tensões de tracção e encurtam quando sujeitos a tensões de compressão.

O betão armado é um material constituído por dois tipos de materiais, o betão e a armadura de aço. O betão apresenta uma boa resistência aos esforços de compressão e má aos esforços de tracção (cerca de 10% da resistência à compressão). A armadura de aço providencia a necessária resistência à tracção.

No entanto em determinadas situações, a capacidade resistente das estruturas de betão armado não é suficiente para que elas funcionem em condições adequadas às acções a que estão sujeitas. Nessas situações surgem anomalias como fendilhação, deformações excessivas ou esmagamentos.

## 5.2 - Efeitos das acções mecânicas

### 5.2.1 - Fendilhação

A fendilhação decorrente dos esforços provenientes de cargas aplicadas nas peças apresenta, em regra, configurações associáveis ao funcionamento estrutural, sendo possível identificar facilmente o tipo de esforço que a origina:

#### a) Fendas de tracção

As fendas de tracção pura apresentam um espaçamento mais ou menos regular e podem surgir em locais com elevadas cargas concentradas. Apresentam um desenvolvimento normal às cargas aplicadas.

#### b) Fendas de flexão

As fendas de flexão aparecem principalmente em elementos de pavimentos, em geral na face inferior, com um desenvolvimento, maior ou menor, perpendicular a essa face.

Em vigas altas, a fendilhação pode iniciar-se de forma distribuída na face mais traccionada e convergir na zona a meia altura das faces laterais dessas vigas para fendilhação em menor número e de maior largura, se essas faces laterais não dispuserem de armadura longitudinal suficiente.

#### c) Fendas de esforço transversal

As fendas de esforço transversal apresentam-se inclinadas em relação ao eixo da peça e ocorrem sobretudo: i) nas faces laterais e a meia altura dos elementos; ii) junto dos apoios; iii) próximo das zonas de aplicação de cargas concentradas

#### d) Fendas de torção

As fendas de torção apresentam-se inclinadas em relação ao eixo das peças, tal como para o esforço transversal, mas ocorrem geralmente em todas as faces e apresentam um padrão helicoidal, ou seja, em faces paralelas, as fendas têm inclinação contrária

#### e) Outras fendas

Referem-se ainda as fendas que ocorrem nas seguintes situações:

##### 1. Fendas de corte

Ocorrem em elementos compostos por betões de idades diferentes, ou em elementos com secções específicas, por exemplo, vigas com secção em "I" sem armaduras de esforço transversal.

##### 2. Fendas de canto em lajes

Ocorrem nas zonas de canto sem continuidade de lajes de betão armado e devem-se à falta da armadura necessária para resistir aos esforços de tracção que se geram na face superior das lajes nessas zonas.

### 3. Fendas de punçoamento em lajes fungiformes de betão armado

Ocorrem em lajes fungiformes deficientemente dimensionadas no que se refere a espessuras da secção de betão ou a quantidade e disposição de armadura.

Essas fendas, com configuração circular e radial em volta dos pilares, podem ser devidas apenas a esforços provenientes de cargas verticais, mas têm em geral o contributo de esforços causados por movimentos horizontais devido a acções térmicas ou a eventuais acções de pré-esforço, acções sísmicas ou a assentamento de fundações.

A fendilhação associada aos esforços decorrentes de cargas aplicadas depende do valor destas, mas pode não ocorrer na sequência imediata da aplicação destas cargas e apenas ocorrer mais tarde, devido aos efeitos da fluência do betão.

No entanto a fendilhação em peças de betão armado é, em determinadas circunstâncias admissível.

O regulamento português [REBAP, 1986], admite, como estados limites de utilização, no caso de armaduras ordinárias, a abertura de fendas com as larguras a seguir referidas, em correspondência com as condições também indicadas:

- 0,1 mm, ambientes muito agressivos e combinações de acções raras;
- 0,2 mm, ambientes moderadamente agressivos e combinações de acções frequentes;
- 0,3 mm, ambientes pouco agressivos e combinações de acções frequentes,

em que:

- Ambientes muito agressivos correspondem a ambientes com forte concentração habitual de agentes corrosivos, líquidos agressivos (águas muito puras, águas salinas, etc.) ou solos especialmente agressivos;
- Ambientes moderadamente agressivos correspondem a ambientes interiores em que a humidade relativa é habitualmente elevada ou em que é de esperar a presença temporária de agentes corrosivos, ambientes exteriores sem concentração especial de agentes corrosivos ou águas e solos não especialmente agressivos;
- Ambientes pouco agressivos correspondem a ambientes em que a humidade relativa é habitualmente baixa e em que não é de esperar a presença de agentes corrosivos (interiores de edifícios de habitação, de escritórios, etc.);
- Combinações de acções raras correspondem a estados limites de muito curta duração;
- Combinações de acções frequentes correspondem a estados limites de curta duração;

#### **5.2.2 - Deformação excessiva dos elementos estruturais**

A deformação excessiva de estruturas de betão armado ocorre sobretudo em lajes de pavimentos, associada ao funcionamento em flexão.

A deformação excessiva é uma anomalia cada vez mais frequente devido ao seguinte:

- a) Existência de materiais (aço e betão) com resistências cada vez mais elevadas, o que permite, em termos de resistências últimas, a diminuição de secções com o conseqüente aumento da deformabilidade;
- b) Vantagens resultantes da adopção de menores alturas de pavimento e de vigas, permitindo a diminuição na distância entre pisos, mantendo o pé-direito;
- c) Vantagens, arquitectónicas e de utilização dos espaços, resultantes do aumento dos vãos (distância entre pilares);
- d) O facto de os projectos de estruturas serem elaborados sem serem efectuadas a necessárias verificações aos estados limites de deformação, tendo em conta também os efeitos diferidos do betão, fluência e retracção.

A deformação excessiva, exceptuando os casos extremos, é sobretudo prejudicial para os elementos não-estruturais, como são por exemplo as paredes de alvenaria apenas com funções de compartimentação.

Estes elementos de alvenaria não têm capacidade de deformação elástica que permita acompanhar a deformação excessiva da estrutura.

A fendilhação começa por ocorrer na zona de ligação dos panos de alvenaria aos elementos da estrutura e, depois, com a instalação de tensões internas, ocorre no seio dos próprios panos de alvenaria.

No caso de panos de paredes de preenchimento completo da malha estrutural apoiados sobre lajes de pavimentos excessivamente deformáveis, pode ocorrer fendilhação horizontal na base desses panos, sobretudo nas zonas próximas do meio vão dessas lajes, e, após a entrada em carga da alvenaria pode surgir fendilhação inclinada (normalmente a 45°) orientada em cada um dos lados do pano de parede para os seus extremos apoiados.

Se esses panos não fizerem o preenchimento completo da malha estrutural ou se tiverem aberturas, a fendilhação que pode ocorrer será mais complexa, já que é condicionada, consoante as circunstâncias, pelas zonas singulares onde se verifica maior concentração de tensões, como são por exemplo os cantos dessas aberturas (portas e janelas).

Este fenómeno da fendilhação pode ser particularmente agravado no caso de lajes em consola, em que se distinguem duas situações: o caso das paredes dispostas na direcção do vão, onde podem surgir fendas inclinadas; e o caso das paredes, junto ao bordo livre, perpendiculares ao vão, onde para além do deslocamento vertical, ocorre uma rotação da extremidade em consola. Esta rotação, só por si, pode originar fendas na base das paredes, no lado exterior, e no topo, no lado interior.

Para além da deformação dos pavimentos e das vigas, que ocorre predominantemente por flexão destes elementos, pode ainda verificar-se outro tipo de deformações, embora menos frequente e associado a situações mais específicas. É o caso, por exemplo, do encurtamento diferencial de elementos de suporte verticais, principalmente em edifícios altos, que pode dever-se ou à ocorrência de esforços axiais bastante diferentes em pilares com secções semelhantes ou à ocorrência de cargas semelhantes em pilares ou paredes com secções bastante diferentes.

As deformações dos elementos estruturais estão associadas aos valores das cargas aplicadas e à deformabilidade desses elementos. No entanto em edifícios correntes são os efeitos da fluência a longo prazo que conduzem à ocorrência de deformações mais acentuadas.

### **5.2.3 - Esmagamentos localizados**

A ocorrência de esmagamentos localizados em elementos estruturais de betão, em condições normais de utilização, corresponde a uma situação anómala com consequências muito graves.

O esmagamento caracteriza-se pela ocorrência de fendilhação paralela à direcção das tensões de compressão e geralmente pelo empolamento do recobrimento eventualmente associado a encurvadura da armadura longitudinal na mesma face do elemento estrutural.

O esmagamento corresponde a já terem sido ultrapassadas as tensões máximas de compressão no betão ou seja corresponde a um estado de tensão no ramo de descarga do diagrama de tensões-extensões.

Este tipo de situação pode ocorrer mais facilmente nas peças sujeitas a flexão composta.

Em pilares, que são elementos sujeitos predominantemente a esforço axial, dada a relativa uniformidade de tensões, a ocorrência de esmagamentos deste tipo é extremamente preocupante, uma vez que é difícil fazer a redistribuição de esforços axiais entre pilares.

Atendendo a que as roturas por esmagamento do betão não são roturas dúcteis e, portanto, por poderem surgir repentinamente e sem aviso, recomenda-se a utilização imediata de escoramento nas situações em que tal seja de prever.

### **5.3 - Medidas preventivas relativas aos efeitos das acções mecânicas**

As medidas destinadas a prevenir as anomalias causadas pelas acções mecânicas incidem nas fases de concepção e projecto, de execução e de utilização. Ressaltam-se os seguintes aspectos no que se refere a cada uma destas fases:

### **a) Na fase de concepção e projecto**

Na fase de concepção e projecto dever-se-á conceber e dimensionar a estrutura para que ela possa resistir em boas condições de segurança e de utilização às acções e às combinações de acções a que ela irá estar sujeita.

Para além da verificação em relação aos estados limites últimos, deve ser efectuada a verificação em relação aos estados limites de utilização (de fendilhação e de deformação), sabendo-se que esta última verificação não é muitas vezes realizada.

Em desenhos a escalas adequadas, deverão ser devidamente pormenorizadas as geometrias das peças e das armaduras a colocar e especificadas as respectivas dimensões, assim como a localização, os comprimentos de amarração e os recobrimentos das armaduras.

As peças desenhadas devem ser de fácil leitura, de forma a evitar dúvidas na sua interpretação.

Deverão ser especificados os materiais a aplicar, assim como os requisitos para a sua aplicação. Esta informação deverá ser fornecida nos desenhos, de forma evidente, e na descrição dos trabalhos (especificações técnicas das peças escritas).

A descrição dos trabalhos também deverá incluir todos os requisitos para a execução. Salienta-se a informação relevante para a sequência das operações de execução das estruturas, em particular para o fabrico, colocação, compactação e cura do betão e para a descofragem e retirada do escoramento dos elementos de betão armado.

### **b) Na fase de execução**

Deverão ser tidos em devida conta os procedimentos para o controlo das operações especificadas para a execução das estruturas, chamando-se em especial a atenção para:

- i) a qualidade das cofragens utilizadas;
- ii) a disposição do escoramento e o seu assentamento sobre o solo;
- iii) a dosagem dos constituintes do betão, em particular, para a quantidade de água da amassadura;
- iv) a compactação do betão;
- v) os cuidados a ter na cura do betão;
- vi) o cumprimento dos prazos de descofragem e retirada do escoramento.

Deverão também ser tidas em devida conta as precauções a adoptar no sentido de minimizar os riscos de fendilhação das paredes de alvenaria, devido à deformação dos elementos de suporte, lajes e vigas.

### **c) Na fase de utilização**

Deverão ser convenientemente analisadas as alterações de utilização da estrutura que impliquem a imposição de maiores sobrecargas para além das que foram previstas em

projecto, assim como as alterações na estrutura existente que modifiquem as condições previstas em projecto, como, por exemplo, a realização de ampliações em altura do edifício, ou a retirada ou execução de paredes, usualmente efectuadas com o objectivo de redefinir os espaços interiores existentes.

## **6 - CORROSÃO DAS ARMADURAS**

### **6.1 - Mecanismos envolvidos na corrosão das armaduras**

#### **6.1.1 - Processo de corrosão**

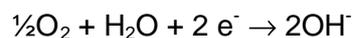
A corrosão das armaduras é o processo de deterioração mais significativo que afecta as estruturas de betão armado, particularmente em ambiente marítimo.

O mecanismo da corrosão é um processo electroquímico, isto é, ocorrem simultaneamente reacções de oxidação (anódica) e redução (catódica) havendo consequentemente um fluxo de electrões. É portanto um processo que requer um ânodo, um cátodo e um electrólito. A matriz de betão constitui o electrólito e a armadura de aço permite a condução eléctrica entre as zonas anódicas e catódicas nas armaduras.

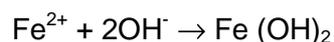
No ânodo dá-se a oxidação de ferro da armadura, ou seja, a ionização do ferro em iões positivos ( $\text{Fe}^{2+}$ ) e electrões ( $2\text{e}^-$ ):



No cátodo, nas condições normais de pH do betão, dá-se a redução do oxigénio:



A reacção total correspondente à corrosão resulta da soma dos dois processos:



Os produtos da corrosão são hidróxidos e óxidos complexos dependendo das condições de acesso de oxigénio e têm um volume maior do que o ocupado pelo ferro que lhes deu origem.

A água e o oxigénio têm de estar presentes para que a reacção tenha lugar. A carência de qualquer um destes elementos pode dificultar ou mesmo inibir o processo de corrosão.

#### **6.1.2 - Protecção das armaduras**

No betão, as armaduras estão protegidas contra a corrosão devido à elevada alcalinidade do meio (pH = 12,5 a 13,5). Esta alcalinidade é conferida pela presença do hidróxido de cálcio,  $\text{Ca}(\text{OH})_2$ , e também por hidróxidos de sódio e potássio.

Forma-se à superfície do aço das armaduras uma fina película (alguns nanómetros) de óxidos e hidróxidos ferrosos, que nestas condições são estáveis e protegem o aço da progressão da corrosão. Diz-se que a armadura está "passivada".

A corrosão das armaduras começa com a perda de protecção conferida pela película passivante, devida à contaminação do betão, em particular, por cloretos, ou à redução do pH do betão de recobrimento, na sequência da reacção do dióxido de carbono da atmosfera, em particular, com o hidróxido de cálcio (carbonatação). Após essa perda inicia-se a corrosão e a sua propagação.

Assim a perda de protecção conferida pelo recobrimento do betão ocorre essencialmente em resultado da penetração no betão dos iões de cloreto e do dióxido de carbono. Estes elementos são transportados através do sistema de poros da matriz de produtos hidratados do cimento. No caso do dióxido de carbono, ocorre reacção com a matriz cimentícia reduzindo o seu pH. No caso dos cloretos a sua permanência no betão pode ocorrer estando estes sob a forma livre ou ligados na matriz, física ou quimicamente.

### **6.1.3 - Fases do processo de deterioração das armaduras**

A deterioração das armaduras começa com a perda de protecção conferida pela película passivante. Após esta perda segue-se o início da corrosão e a propagação da corrosão.

A perda de protecção conferida pela película passivante ocorre como resultado da penetração no betão e da acção dos iões de cloreto e do dióxido de carbono. Estes elementos são transportados através do sistema de poros da pasta de cimento, como atrás se referiu.

Nenhum dano físico ocorre enquanto os elementos agressivos contaminam apenas o betão do recobrimento.

O período desta primeira fase constitui normalmente uma percentagem substancial do tempo de vida da estrutura, antes que a primeira acção de manutenção seja necessária.

Este período depende da espessura do recobrimento e das propriedades do betão de recobrimento.

A segunda fase do processo de deterioração envolve a corrosão. A transição entre a primeira e a segunda fase é marcada pela desp passivação da armadura e o início da corrosão.

Durante a segunda fase ocorre a perda de secção da armadura e, devido ao elevado volume dos produtos da corrosão, pode ocorrer a fendilhação e a delaminação do betão de recobrimento.

## **6.1.4 - Corrosão induzida por cloretos**

### **1. Fontes de contaminação por cloretos**

A contaminação do betão por cloretos pode ter origem em fontes internas ou externas ao betão.

As fontes internas correspondem à utilização de constituintes do betão contaminados: agregados finos mal lavados (areia da praia) ou água de amassadura (água do mar ou água salobra). A utilização de adjuvantes aceleradores como o cloreto de cálcio não é já mais permitida.

As fontes externas decorrem da exposição do betão em ambientes que contém cloretos, tais como ambientes marítimos ou ambientes com sais de degelo. Neste caso os cloretos existentes no meio ambiente podem penetrar no betão através dos mecanismos de difusão, migração iónica ou por fluxo de água (permeação e absorção por capilaridade).

### **2. Início da corrosão induzida por cloretos**

A corrosão por acção dos cloretos dá-se, sem haver redução do pH do betão, por destruição pontual, como se fossem picadas na película passivante que protege o aço das armaduras. Esta forma de corrosão é assim caracterizada pelo rompimento pontual da película passivante, actuando as zonas de rotura da película como ânodos e a restante superfície do aço, em contacto com a matriz cimentícia envolvente, como cátodo.

Dada a grande desproporção de áreas anódicas e catódicas, a quantidade de electrões que se produz na zona concentrada do ânodo conduz a que o ataque nesta zona se faça em profundidade, podendo rapidamente obter-se a rotura da armadura com a consequente redução da resistência mecânica da estrutura.

### **3. Limite crítico do teor de cloretos no betão**

O valor crítico do teor de cloretos no betão, ou seja, a concentração de cloretos que promove a despassivação das armaduras e o início da corrosão, depende de diversos factores, entre os quais se referem:

i) O pH do betão

Uma maior alcalinidade do betão permite aumentar o valor crítico dos cloretos;

ii) A humidade relativa do meio ambiente

Em ambientes secos o teor de cloretos no betão pode ser mais elevado sem que se produza a corrosão;

### iii) A temperatura

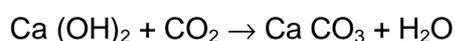
O aumento da temperatura acelera as reacções químicas, pelo que em zonas climáticas em que as temperaturas são mais elevadas podem verificar-se níveis mais elevados de corrosão por cloretos.

Em Portugal, o valor máximo admissível do teor de cloretos em betão armado é de 0,4% da massa do cimento utilizado. Este valor deverá ser reduzido para 0,2%, no caso de elementos expostos a ambientes marítimos ou em contacto com água contendo sais.

## 6.1.5 - Corrosão induzida por carbonatação

### 1. Processo de carbonatação de betão

A carbonatação consiste na reacção do dióxido de carbono do ar com os hidróxidos do betão, em particular, com o hidróxido de cálcio, formando carbonato de cálcio:



Esta reacção modifica lentamente a estrutura do betão reduzindo o seu pH e o volume dos poros, alterando em consequência o seu comportamento do seguinte modo:

- do ponto de vista mecânico e químico, a carbonatação é benéfica, aumenta a resistência mecânica e química do betão;
- do ponto de vista da corrosão, a carbonatação é prejudicial, abaixa o pH, por vezes até valores como pH = 8, criando condições adequadas à despassivação do aço das armaduras (note-se que para pH < 10,5 - 11, a película passivante pode deixar de ser estável, originando a perda da passivação).

### 2. Factores que condicionam a carbonatação

O avanço da carbonatação depende em maior ou menor escala de diversos factores:

#### i) Teor de CO<sub>2</sub> da atmosfera

O dióxido de carbono existe na atmosfera na proporção de 0,03% em volume ou 0,04% em peso, ou seja, 0,5 mg/l de ar. Esta proporção pode variar devido a condições locais (depende da existência de vegetação e de outros factores biológicos e muito especialmente da poluição do ar, provocada pela combustão de produtos petrolíferos, nas grandes cidades e centros industriais ou em caves de garagens e em túneis).

#### ii) Teor de água do betão

Um factor muito importante que afecta a taxa de carbonatação é o teor de água do betão, o qual depende das condições ambientais a que o betão está exposto (partindo do princípio que as condições ambientais se reflectem directamente no teor de água do betão).

No ar saturado de humidade e no ar seco não há praticamente carbonatação. O máximo é atingido em atmosferas com humidade relativa entre 60 e 80%.

### iii) Alcalinidade do betão

A alcalinidade do betão está dependente da quantidade de hidróxidos de potássio, de sódio e de cálcio existente no betão, ou seja da dosagem de cimento Portland.

### iv) Permeabilidade do betão ao CO<sub>2</sub>

Modelos simples da taxa de carbonatação do betão muitas vezes assumem que a profundidade de carbonatação é proporcional à raiz quadrada do tempo (t):

$$X_c = k \cdot t^{1/2}$$

em que:

X<sub>c</sub> – profundidade de carbonatação;

k – constante que depende fundamentalmente da porosidade do betão e das condições ambientais;

t – tempo de exposição.

Como a formação do carbonato de cálcio vai colmatar os poros do betão, as primeiras camadas carbonatadas vão formar uma barreira à penetração posterior de dióxido de carbono, verificando-se que ao longo do tempo a velocidade de carbonatação varia aproximadamente na razão inversa da espessura da camada carbonatada.

## 6.1.6 - Propagação da corrosão

### 1. Influência da humidade e da temperatura

O teor de água representa um papel importante no desenvolvimento da propagação, já que daí depende a quantidade de solução electrolítica disponível e portanto a resistividade do meio, mas também a quantidade de oxigénio no interior do betão, a qual será maior ou menor consoante o preenchimento dos poros com água:

- Se o betão está seco, os poros têm livre acesso de oxigénio. No entanto a velocidade de corrosão é reduzida em virtude da elevada resistência do meio (falta de electrólito).
- Se o betão está saturado, os poros estão completamente cheios de água, a resistividade do meio é mínima, mas a entrada de oxigénio está dificultada. A quantidade de oxigénio que se pode dissolver na água é muito pequena (falta oxigénio para alimentar a reacção catódica).
- A situação intermédia em que os poros de betão têm alguma humidade corresponde à condição em que a velocidade de corrosão é máxima, porque a quantidade de água é suficiente para garantir uma baixa resistência do meio e permitir o acesso do oxigénio em quantidade suficiente.

A temperatura também pode ter um papel importante no processo de corrosão. Os aumentos de temperatura contribuem para uma maior mobilidade das moléculas e dos iões, facilitando o transporte iónico e acelerando a corrosão. As diminuições de temperatura podem dar lugar a condensações, que por sua vez podem dar origem a incrementos locais no teor de água do betão, aumentando também a velocidade de corrosão localizada.

## **2. Influência do ambiente marítimo**

A agressividade do ambiente marítimo deve-se em parte à elevada humidade e concentração salina na atmosfera. Dentro do ambiente marítimo podem considerar-se zonas com diferentes comportamentos à corrosão, as zonas atmosféricas, as zonas de salpicos, as de maré e as imersas.

### **6.2 - Efeitos da corrosão das armaduras**

#### **6.2.1 - Fendilhação e delaminação**

A fendilhação apresenta-se em geral associada a empolamento do betão e deve-se à deposição de óxidos e hidróxidos de ferro (ferrugem), a qual se processa com aumento de volume (até cerca de 8 vezes), originando tensões muito importantes no betão em torno dos varões.

A corrosão ocorre frequentemente em estruturas de edifícios, nos elementos com recobrimentos reduzidos, como por exemplo:

- armaduras transversais de vigas e pilares, que sendo exteriores às armaduras longitudinais, apresentam frequentemente recobrimentos inferiores aos recomendáveis (por vezes inferiores a 5 mm);
- armaduras inferiores de lajes ou vigas que, pela falta de espaçadores ou pela sua colocação incorrecta, também apresentam com frequência recobrimentos muito reduzidos, sendo esta situação evidente em lajes exteriores de varandas.

A fendilhação de betão por corrosão das armaduras pode apresentar como característica geométrica a sua distribuição ao longo dos varões, podendo os bordos dessas fendas apresentar ou não cor acastanhada proveniente da ferrugem.

A progressão da corrosão traduz-se no aumento da fendilhação e depois num processo de destacamento do recobrimento que pode colocar a armadura à vista.

A deterioração do recobrimento conduz a aumentos significativos da velocidade de corrosão das armaduras dada a facilidade de penetração da água e do oxigénio.

#### **6.2.2 - Redução da resistência e das condições de segurança das estruturas**

A corrosão da armadura, consoante o grau em que se verifica, pode conduzir a

situações com consequências graves no funcionamento das estruturas.

Nas zonas traccionadas dos elementos de betão, a corrosão da armadura reduz a capacidade resistente dos elementos de betão armado, quer por redução da área dos varões quer por diminuição ou anulação de aderência do betão aos varões da armadura.

Nas zonas comprimidas ou em elementos comprimidos (como pilares), a fendilhação e a delaminação do betão reduzem a efectiva secção resistente de betão.

A corrosão das armaduras pode assim afectar a segurança dos elementos de betão armado, quer em relação aos estados limites de utilização (podendo verificar-se deformações visíveis nos elementos), quer em relação aos estados limites últimos, em particular, para as acções mais gravosas que podem ocorrer de forma variável ou acidental durante a vida da estrutura, como são respectivamente a acção sísmica e a acção do fogo.

### **6.3 - Medidas preventivas da corrosão**

Não é económica e ecologicamente viável substituir ou reparar estruturas com relativamente poucos anos de vida em serviço, pelo que é necessário mudar não só a filosofia do projecto estrutural de modo a englobar também os aspectos da durabilidade, combatendo em particular a corrosão através da adopção de medidas preventivas.

Apontam-se em seguida alguns dos aspectos mais relevantes que devem ser tidos em conta na prevenção da corrosão em estruturas de betão armado [M. SALTA, 1997]:

#### **a) Relativamente às características do betão a prescrever**

O betão deve ser definido com as características adequadas às condições de agressividade ambiental existentes, as quais passam pela adopção das seguintes medidas:

1. Especificação de betões de baixa permeabilidade recorrendo a:
  - i. Utilização de adições pozolânicas
  - ii. Baixas razões A/C
  - iii. Adequada dosagem de cimento
2. Especificação de espessuras de recobrimento suficientes para o tempo de vida estabelecido no projecto

#### **b) Relativamente às disposições construtivas a adoptar**

Devem ser adoptadas as disposições construtivas que permitam assegurar a satisfação dos seguintes aspectos:

1. Controlo da geometria e selagem de juntas de modo a evitar condições de acumulação de águas;
2. Utilização de adequada distribuição de armaduras;

3. Transporte e colocação de betão de forma adequada e utilização de cofragens adequadas, para evitar segregação do betão;
4. Conveniente compactação e boa ligação entre camadas de betão;
5. Realização de cura adequada, evitando fendilhação;
6. Utilização de sistemas de controlo de qualidade eficazes em todas as operações construtivas.

## **7 - CONCLUSÕES**

As estruturas de betão armado têm vindo a ser utilizadas correntemente na construção de edifícios há algumas décadas, seguindo-se a processos de construção que utilizavam estruturas mistas de alvenaria e betão armado.

Apesar da evolução verificada ao longo do tempo nesta tecnologia construtiva, continuam a observar-se nestas estruturas diversas anomalias que não só as afectam a elas próprias, como afectam elementos de construção não estruturais, como são as paredes de alvenaria, que com elas confinam.

O conhecimento das causas e dos mecanismos que conduzem à ocorrência das anomalias é um passo fundamental não só para a formulação das medidas que visam a reparação dessas anomalias, em edifícios a reabilitar, mas também para uma adequada definição das medidas que visam a prevenção das mesmas anomalias, em edifícios a construir.

## **AGRADECIMENTO**

O autor agradece à Investigadora Coordenadora Eng.<sup>a</sup> Manuela Salta, do Departamento de Materiais do LNEC, a leitura crítica do texto relativo à corrosão de armaduras.

## **BIBLIOGRAFIA**

COUTINHO, A. de Sousa; GONÇALVES, Arlindo – *Fabrico e propriedades do betão*. Vol. III. 2<sup>a</sup> ed.. Lisboa: LNEC, 1994.

COSTA, António – *Reabilitação e reforço estrutural*. Mestrado integrado em Engenharia Civil. Lisboa: IST, 2008- 2009.

COSTA, António; APPLETON, Júlio – *Mecanismos de deterioração das estruturas de betão armado*. Lisboa: IST, 1999.

FERREIRA, M. J. Esteves – *Introdução à prevenção da corrosão no betão armado*. In Seminário *Prevenção da corrosão em estruturas de betão armado*. Lisboa: LNEC, 1997.

HELENE, Paulo - *Manual para reparo, reforço e proteção de estruturas de concreto*. 2ª ed.. São Paulo: Editora PINI, LTDA. 1992.

PAIVA, J. Vasconcelos; AGUIAR, José; PINHO, Ana – *Guia técnico de reabilitação habitacional*. 1ª ed.. Lisboa: INH - LNEC, 2006.

PAIVA, J. Vasconcelos; CARVALHO, E. Cansado; CAVALEIRO E SILVA, A. – *Patologia da Construção – Documento introdutório do tema. 1º Encontro sobre Conservação e Reabilitação de Edifícios de Habitação*. Lisboa: LNEC, 1985.

SALTA, M. Manuela – *Introdução à corrosão do aço no betão. Modelos de comportamento às acções agressivas*. In Seminário *Prevenção da corrosão em estruturas de betão armado*. Lisboa: LNEC, 1997.

Regulamento de Segurança e Acções para Estruturas de Edifícios e Pontes (RSA). Decreto-Lei nº 235/83, de 31 de Maio. Lisboa: Imprensa Nacional – Casa da Moeda, E.P., 1984.

Regulamento de Estruturas de Betão Armado e Pré-esforçado (REBAP). Decreto-Lei nº 349-C/83, de 30 de Julho, e Decreto-Lei nº 357/85, de 2 de Setembro. Lisboa: Imprensa Nacional – Casa da Moeda, E.P., 1986

NP ENV 13670-1:2007 – Execução de estruturas em betão - Parte 1: Regras gerais. Caparica: Instituto Português da Qualidade, Julho de 2007.

NP EN 206-1:2007 – Betão - Parte 1: Especificação, desempenho, produção e conformidade. Caparica: Instituto Português da Qualidade, Junho de 2007.

