

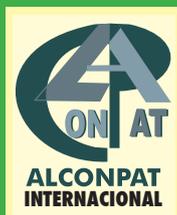
4

Vida Útil en la Construcción Civil
Vida Útil na Construção Civil
Service Life in Civil Construction

Boletín Técnico

Fernando Branco, Pedro Paulo & Mário Garrido

Asociación Latinoamericana de Control de Calidad, Patología
y Recuperación de la Construcción - ALCONPAT Int.



Elaboración de:



PREFÁCIO

Com o grande desenvolvimento atual dos meios de comunicação e de transporte, há efetiva possibilidade e necessidade de integração dos profissionais dos países Ibero-americanos, conscientes de que o futuro inscreve-se numa realidade social onde o conhecimento científico e o desenvolvimento tecnológico são as ferramentas corretas a serem utilizadas em benefício da sustentabilidade e qualidade de vida de nossos povos.

É missão e objetivo da ALCONPAT (Asociación Latinoamericana de Control de Calidad, Patología y Recuperación de la Construcción) ser um forte instrumento de união, desenvolvimento e difusão dos conhecimentos gerados pela comunidade da construção civil, com foco nos materiais e na gestão da qualidade de obras em andamento, no estudo dos problemas patológicos, na manutenção, recuperação e proteção do enorme patrimônio construído e na prevenção de falhas de projeto e construção em obras novas.

Desde sua fundação no ano de 1991 em Córdoba, Argentina, os membros da ALCONPAT Internacional e de suas delegacias e entidades nacionais, vêm organizando cursos, seminários, palestras e, nos anos ímpares o tradicional e reconhecido congresso científico CONPAT, já realizado de forma itinerante em onze diferentes países da Ibero-américa.

Com o objetivo de fortalecer essa integração e valorizar ainda mais a Construção Civil desses países, a ALCONPAT instituiu, em 2011, a “Comisión Temática de Procedimientos Recomendables” sob a profícua coordenação do Prof. Dr. Bernardo Tutikian. Essa Comissão tem o objetivo de levantar temas de interesse da comunidade, buscar um especialista que se disponha a pesquisar e escrever sobre o assunto, voluntariamente, e divulgar esse conhecimento na comunidade Ibero-americana.

O conteúdo deve ser claro, objetivo, com bases científicas, atualizado e não muito extenso, fornecendo a cada leitor profissional as bases seguras sobre um tema específico de forma a permitir seu rápido aproveitamento e, quando for o caso, constituir-se num ponto de partida seguro para um desenvolvimento ainda maior daquele assunto.

O resultado dessa iniciativa agora se cristaliza na publicação de 10 textos fantásticos, em forma de fascículos seriados, cuja série completa ou coletânea se denomina “O QUE É NA CONSTRUÇÃO CIVIL?”. Se tratam de textos conceituais visando o nivelamento do conhecimento sobre as principais “palavras de ordem” que hoje permeiam o dinâmico setor da

Construção Civil, entre elas: Sustentabilidade, Qualidade, Patologia, Terapia, Profilaxia, Diagnóstico, Vida Útil, Ciclo de Vida, e outras, visando contribuir para o aprimoramento do setor da construção assim como a qualificação e o aperfeiçoamento de seus profissionais.

Por ter um cunho didático, os diferentes temas são abordados de modo coerente e conciso, apresentando as principais etapas que compõem o ciclo dos conhecimentos necessários sobre aquele assunto. Cada fascículo é independente dos demais, porém o seu conjunto constituirá um importante referencial de conceitos utilizados atualmente na construção civil.

O curto prazo disponível para essa missão, de repercussão transcendental aos países alvo, foi superado vitoriosamente e esta publicação só se tornou realidade graças à dedicação, competência, experiência acadêmica, profissionalismo, desprendimento e conhecimento do Coordenador e Autores, apaixonados por uma engenharia de qualidade.

Estes textos foram escritos exclusivamente por membros da ALCONPAT, selecionados pela sua reconhecida capacidade técnica e científica em suas respectivas áreas de atuação. Os autores possuem vivência e experiência dentro de cada tópico abordado, através de uma participação proativa, desinteressada e voluntária.

O coordenador, os autores e revisores doaram suas valiosas horas técnicas, seus conhecimentos, seus expressivos honorários e direitos autorais à ALCONPAT Internacional, em defesa de sua nobre missão. Estimou-se essa doação em mais de 500h técnicas de profissionais de alto nível, a uma média de 50h por fascículos, acrescidas de pelo menos mais 200h de coordenação, também voluntária.

Todos os recursos técnicos e uma visão sistêmica, necessários ao bom entendimento dos problemas, estão disponíveis e foram tratados com competência e objetividade, fazendo desta coletânea uma consulta obrigatória. Espera-se que esta coletânea venha a ser amplamente consultada no setor técnico-profissional e até adotada pelas Universidades Ibero-americanas. Esta coletânea é mais um esforço que a ALCONPAT Int. realiza para aprimoramento e atualização do corpo docente e discente das faculdades e universidades, assim como para evolução dos profissionais da comunidade técnica ligada ao construbusiness, valorizando indistintamente a contribuição da engenharia no desenvolvimento sustentado dos países Ibero-americanos.

Mérida - México, março de 2013

Prof. Paulo Helene
Presidente ALCONPAT Internacional

Prof. Bernardo Tutikian
Coordenador Comisión Temática de Procedimientos Recomendables

Junta Directiva de ALCONPAT Internacional (bienio jan.2012/dez. 2013):

<i>Presidencia:</i>	<i>Prof. Paulo Helene</i>
<i>Presidência de Honor:</i>	<i>Prof. Luiz Carlos Pinto da Silva Filho</i>
<i>Vicepresidente Administrativo:</i>	<i>Profa. Maria Ysabel Dikdan</i>
<i>Vicepresidente Técnico:</i>	<i>Profa. Angélica Piola Ayala</i>
<i>Secretario Ejecutivo:</i>	<i>Prof. José Manuel Mendoza Rangel</i>
<i>Director General:</i>	<i>Dr. Pedro Castro Borges</i>
<i>Gestor:</i>	<i>Ing. Enrique Crescencio Cervera Aguilar</i>

Sede permanente ALCONPAT:

CINVESTAV Mérida México
<http://www.alconpat.org>
Dr. Pedro Castro Borges

Presidente Congreso CONPAT 2013

Prof. Sérgio Espejo

Comisiones Temáticas:

<i>Publicaciones</i>	<i>Dr. Pedro Castro Borges</i>
<i>Educación</i>	<i>Prof^a. Liana Arrieta de Bustillos</i>
<i>Membrecía</i>	<i>Prof. Roddy Cabezas</i>
<i>Premiación</i>	<i>Prof^a. Angélica Piola Ayala</i>
<i>Procedimientos Recomendables</i>	<i>Prof. Bernardo Tutikian</i>
<i>Relaciones Interinstitucionales</i>	<i>Prof. Luiz Carlos Pinto da Silva Filho</i>
<i>Historia ALCONPAT</i>	<i>Prof. Dante Domene</i>
<i>Boletín de Noticias</i>	<i>Arq. Leonardo López</i>

Missão da ALCONPAT Internacional:

ALCONPAT Internacional es una Asociación no lucrativa de profesionales dedicados a la industria de la construcción en todas sus áreas, que conjuntamente trabajan a resolver los problemas que se presentan en las estructuras desde la planeación, diseño y proyecto hasta la ejecución, construcción, mantenimiento y reparación de las mismas, promoviendo la actualización profesional y la educación como herramientas fundamentales para salvaguardar la calidad y la integridad de los servicios de sus profesionales.

Visão da ALCONPAT Internacional:

Ser la Asociación de especialistas en control de calidad y patología de la industria de la construcción con mayor representatividad gremial y prestigio profesional reconocido internacionalmente, buscando siempre el beneficio social y el óptimo aprovechamiento de los recursos humanos, materiales y económicos para la construcción de estructuras sustentables y amigables con el medio ambiente.

Valores de ALCONPAT Internacional:

Ciencia, Tecnología, Amistad y Perseverancia para el Desarrollo de América Latina.

Objetivos da ALCONPAT Internacional:

ARTÍCULO 1.2 del Estatuto. ALCONPAT se define como una asociación sin fines de lucro, cuyos fines son:
a) Contribuir al desarrollo científico y técnico de toda la comunidad Latinoamericana relacionada con la construcción y sus materiales, con énfasis en la gestión de la calidad, la patología y la recuperación de las construcciones.
b) Actuar como un interlocutor cualificado, tanto de la propia sociedad civil como de sus poderes públicos representativos.
c) Promover el papel de la ciencia y la tecnología de la construcción y sus materiales, y contribuir a su difusión como un bien necesario que es para toda la sociedad Latinoamericana y Iberoamericana.



04

ALCONPAT Internacional

Asociación Latinoamericana de Control de Calidad, Patología y
Recuperación de la Construcción

Boletín Técnico

Vida útil en la construcción civil

Vida útil na construção civil

Service life in civil construction

Fernando A. Branco
Pedro Paulo
Mário Garrido
ICIST/IST – Univ. Técnica de Lisboa. PORTUGAL

Introdução

A vida útil de uma construção ou de um elemento construtivo é “o período, depois de entrar em utilização, durante o qual todas as suas propriedades relevantes estão acima de níveis mínimos aceitáveis, considerando uma manutenção corrente” (ASTM E632-81 1981). Este conceito apresenta, no entanto, várias formas de interpretação, quando se procura aplicá-lo efectivamente à definição da vida útil de uma construção.

Veja-se, por exemplo, o caso das pontes. Estas construções são realizadas para oferecer um serviço à sociedade, permitindo acessos mais fáceis às pessoas e ao transporte de mercadorias, entre dois locais, separados por um obstáculo natural, como um rio ou um vale.

Os benefícios deste serviço podem ser quantificados tendo em conta o tempo poupado

pelos utilizadores da ponte, em vez de usarem uma via alternativa, mais longa. O valor económico global da ponte, durante a sua vida, pode assim ser estimado considerando o tráfego na ponte multiplicado pelas pessoas transportadas, pelo tempo poupado na travessia e pelo rendimento per capita do país. É este valor económico que justifica a adoção de pedágios nestas obras, tornando-as um negócio rentável.

As pontes são, portanto, projetadas para prestarem um serviço, em termos de tráfego máximo diário, referente a um certo período que se define como a sua vida útil. Para uma ponte ser economicamente rentável, no fim deste período, os benefícios da circulação rodoviária devem ser superiores aos custos de projeto, construção e manutenção. Esta vida útil, associada à rentabilidade económica do investimento realizado, designa-se por Vida Útil

Funcional e representa a base de análise de todos os investimentos na construção.

Nestes mesmos investimentos, o papel dos engenheiros é conceber, construir e manter construções que garantam a sua segurança estrutural e as condições de utilização durante um período que deve ser maior ou igual à Vida



Figura 1. Ponte romana com 2000 anos (foto de Fernando Branco).

Útil Funcional, e que se designa por Vida Útil Estrutural. A Vida Útil Funcional pode garantir a rentabilidade do investimento, enquanto que a Vida Útil Estrutural assegura que a estrutura suporta essa situação pelo menos durante aquele período (ANDRADE 1992; RINCON 1997; TUTIKIAN 2011).

A Fig. 1 ilustra uma ponte romana com 2000 anos, ou seja, uma grande Vida Útil Estrutural.

Em síntese, conclui-se que nas construções há dois conceitos de Vida Útil, um funcional e outro estrutural, e percebe-se que a Vida Útil Estrutural deve ser sempre maior que a Vida Útil Funcional, ou seja, os investimentos devem ser recuperados em períodos inferiores aos da vida estrutural. Veja-se então como se deve considerar em projeto estes dois períodos, começando pela análise da Vida Útil Funcional.

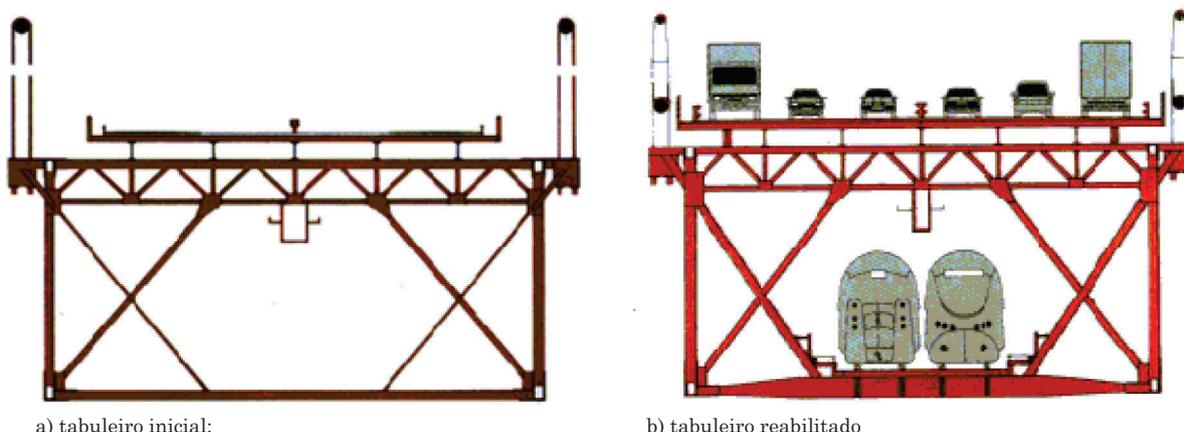
2. Projetar para a vida útil funcional

Para se definir em projeto a Vida Útil Funcional, é necessário realizar estudos econômicos da rentabilidade da construção. Como se disse no caso de uma ponte essa rentabilidade está essencialmente associado à velocidade e ao volume de tráfego que a estrutura pode suportar. A Vida Útil Funcional está assim basicamente ligada com o número de vias rodoviárias que existem na ponte, ou seja, com a sua largura, assim como ocorre nas estradas. Tal é estimado na fase de projeto com base em estudos de tráfego.

Durante a vida útil da obra, se o volume de tráfego começar a aumentar, a sua velocidade

média diminui, até se atingir eventualmente uma saturação máxima (cerca de 22.100 veículos, por hora e por via, correspondendo a cerca de 10% do valor médio global diário). Quando este valor máximo é atingido, a velocidade e o volume de tráfego decrescem abruptamente, reduzindo-se os benefícios funcionais e econômicos.

Nestas situações, tal como em estruturas convencionais, pode-se realizar a reabilitação funcional da ponte. Estas podem mesmo estar concebidas, desde a fase de projeto, tendo uma largura total de tabuleiro que permita a introdução de vias adicionais pela simples alteração da largura



a) tabuleiro inicial;

b) tabuleiro reabilitado

Figura 2. Reabilitação funcional de uma ponte. (Fonte: Refer 1999).

das vias rodoviárias existentes.

Se não forem propostas medidas de reabilitação em projeto, as soluções habituais de reabilitação funcional são:

a) construir uma ponte nova, eventualmente utilizando a existente para um dos sentidos de tráfego (desde que a Vida Útil Estrutural ainda o permita);

b) aumentar a largura do tabuleiro, se a infraestrutura existente permitir realizar em condições econômicas (solução frequente em pontes de alvenaria de pedra). Esta situação é ilustrada na Fig. 2, com a solução implementada na ponte suspensa 25 de Abril, em Lisboa (*REFER 1999*).

2. Noções básicas sobre a vida útil estrutural

Quando os benefícios funcionais da ponte são inferiores aos seus custos de manutenção/exploração e a sua reabilitação funcional não se justifica economicamente, a ponte atinge o fim da sua Vida Útil Funcional. Nesta situação podem ocorrer duas situações para a ponte:

a) é demolida e eventualmente reciclada;

b) se tiver valor histórico é conservada, sendo os custos de manutenção suportados pela sociedade, já que não tem valor funcional, mas ainda tem o histórico.

A Vida Útil Estrutural ou Vida Útil de Projeto deverá ser sempre superior à Vida Útil Funcional, de modo que a construção recupere neste período

o investimento econômico e, se possível, continue a ser utilizada, gerando lucros adicionais ou permitindo reabilitações funcionais.

A Vida Útil Estrutural está associada às condições de segurança e de utilização da estrutura, nomeadamente garantindo que não ocorram situações de colapso, deformações excessivas, etc. A Vida Útil Estrutural depende essencialmente da evolução das ações e dos materiais ao longo da vida da construção.

Antes de se abordar o modo de projetar para uma determinada Vida Útil Estrutural, convém recordar alguns conceitos base sobre o significado desta.

2.1 A Segurança estrutural

Os códigos estruturais definem os níveis de segurança a considerar no projeto estrutural, associados a probabilidades de ruptura (*ENV 1991-1, 1999*). Estes níveis de segurança, na prática, são definidos através de valores de projeto a adotar para as ações e para a resistência dos materiais. Para se ter segurança (S), a resistência dos materiais (R) tem de ser superior aos efeitos das ações (A), ou considerando uma distribuição estatística destas variáveis, as probabilidades p de segurança têm de ser positivas, de acordo com a equação 1 e Fig. 3.

$$p(S) = p(R-A) > 0 \quad (\text{Eq.1})$$

As distribuições estatísticas das variáveis são consideradas, na prática, através dos valores característicos das ações (A_k) e da resistência dos materiais (R_k). Estes valores característicos são definidos considerando uma distribuição estatística do tipo normal e um período de referência (habitualmente associada a uma vida útil de 50 anos para as construções correntes), correspondendo a

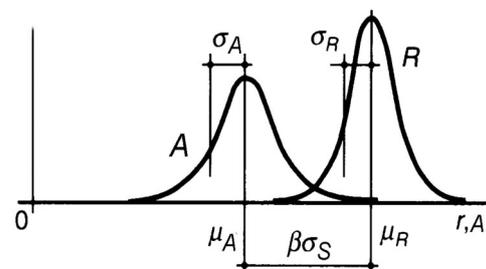


Figura 3. Distribuição estatística das ações (A) e das resistências (R)

um valor cuja probabilidade de ser excedido (para as ações) ou minorado (para as resistências) é de apenas 5%, nesse período de referência.

Observe-se que valores característicos estão associados a uma certa forma convencional de medir ações e principalmente resistências. No caso dos concretos pode ser um cilindro com altura o dobro do diâmetro e ensaiado a 28 dias. No caso de armaduras, tijolos, madeira, e outros materiais a forma de medir é diferente.

No projeto, estes valores característicos são

ainda multiplicados por coeficientes de segurança (majoração para ações e minoração para materiais), de modo a terem em conta as imprecisões dos modelos de análise ou dos processos construtivos, adotando-se então na verificação da segurança os valores de projeto A_d e R_d . A segurança estrutural, convencional e consensuada, é assim uma comparação entre o efeito das ações A_d e a resistência dos materiais R_d , de modo a garantir que no período de referência se tem, conforme Equação 2:

$$A_d < R_d \quad (\text{Eq. 2})$$

Nos códigos estruturais, este tipo de análise corresponde a níveis de segurança para o período de referência a uma probabilidade de ruptura da ordem de 7×10^{-5} , ou seja, correspondendo a um índice de fiabilidade $\beta=3,8$ (*ENV 1991-1, 1999; LITZNER, 1999*), de acordo com a Equação 3.

$$P_f = P(S < 0) \approx \Phi(-\beta(t)) \quad (\text{Eq. 3})$$

2.2 A Degradação dos materiais

Infelizmente, a equação da segurança estrutural (Equação 1) não é constante durante a Vida Útil Estrutural, já que ocorrem tipicamente variações das resistências dos materiais.

De fato os problemas da durabilidade dos materiais estruturais são os mais importantes e correspondem em geral à deterioração do concreto ou à corrosão das estruturas metálicas ou das armaduras de concreto armado. Estas situações, se nada for feito, conduzem a uma redução dos níveis de segurança ao longo da Vida Útil Estrutural.

De modo a garantir que os níveis de segurança estrutural da fase de projeto não sejam afetados

Na Equação 3, Φ corresponde a distribuição normal, com valores médios de $\mu_S = \mu_R - \mu_A$ e variância de $\sigma_S = (\sigma_R^2 + \sigma_A^2)^{0,5}$.

Em síntese, a segurança estrutural dos códigos estruturais define níveis de segurança através de valores característicos de ações e de resistências, associados a um período de referência, ou seja, a uma Vida Útil Estrutural, que é habitualmente de 50 anos, para as construções correntes.

Não havendo alterações das propriedades dos materiais, o que se passa ao fim de 50 anos, ou seja, no fim da Vida Útil Estrutural? - A ponte obviamente não cai, mas a sua probabilidade de colapso começa a aumentar, já que os valores característicos das ações (em particular nas ações variáveis, como o sismo, vento, etc.) para períodos mais longos são também maiores. Em síntese, passados 50 anos a ponte começa a ter níveis de segurança “ilegais”, ou seja, superiores aos que os códigos definem.

pela degradação dos materiais e se mantenham até ao final da Vida Útil Estrutural, surgiram nos últimos anos recomendações de durabilidade em códigos, ou seja, surgiu o conceito de Projeto de Durabilidade.

Hoje, os códigos (*NV206-1, 1999*), além das ações e da resistência dos materiais, definem especificações para os materiais e para os processos construtivos, que garantem que em termos de durabilidade se mantenham os mesmos níveis de segurança estrutural no final da vida útil, ou seja, para vidas de cerca de 50 anos, garantindo assim a Vida Útil Estrutural correntemente aceita. Estas



Figura 4. Deterioração de concreto armado (foto de Fernando Branco).

recomendações são ainda empíricas e resultam de análises estatísticas do comportamento das construções. Na prática, há um certo paralelo com o dimensionamento estrutural, em que as ações correspondem a um conjunto de condições de exposição ambiental e a resistência dos materiais corresponde a medidas construtivas e propriedades dos materiais (cobrimento, resistência mínima do concreto, etc.).

A Fig. 4 ilustra um caso que a durabilidade do elemento estrutural foi comprometida.

2.3 Componentes não estruturais

Além dos componentes estruturais, nos quais os conceitos de Vida Útil Estrutural estão razoavelmente identificados, estando associados aos níveis de segurança, há muitos outros componentes não estruturais que estão associados à qualidade da utilização das construções e cuja vida útil pode condicionar a funcionalidade da construção, ou

Tabela 1. Vida útil média de componentes não estruturais em pontes.

Pavimento	15 - 20 anos
Impermeabilização asfáltica	25 - 30 anos
Impermeabilização com concreto	25 - 30 anos
Proteções metálicas	10 - 20 anos
Juntas de dilatação	15 - 30 anos
Selantes de juntas	5 - 15 anos
Aparelhos de apoio	25 - 40 anos

3. Modelos de previsão da vida útil

3.1 Materiais estruturais

A estimativa da vida útil das pontes com base na deterioração dos materiais é um problema complexo, sujeito a grandes investigações em muitos países do mundo (CLIFTON, 1993). Essa estimativa inclui a definição dos estados limites associados ao fim da vida útil de projeto, a caracterização do ambiente, o estudo dos fenômenos de degradação e a definição de modelos matemáticos para simular essas degradações.

Os fenômenos de degradação nas estruturas metálicas estão essencialmente associados ao fenômeno de corrosão. Nas estruturas em concreto,

Então, repetindo a questão apresentada, o que se passa ao fim de 50 anos, ou seja, no fim da Vida Útil Estrutural? - A ponte obviamente não cai, mas a sua probabilidade de colapso começa a aumentar, em resultado não só do aumento dos valores característicos das ações, mas também da redução da resistência dos materiais em resultado da sua degradação. Passa-se então, como se referiu, a ter pontes com segurança decrescente “ilegal”, e se não se fizer algo a ponte colapsará, um dia.

seja, a sua Vida Útil Funcional. Ainda pode afetar a Vida Útil Estrutural ou de Projeto, se manutenções adequadas não forem realizadas.

Estes componentes apresentam em geral uma Vida Útil menor que a Vida Útil Estrutural ou mesmo que a Vida Útil Funcional. A Tabela 1 mostra elementos não estruturais que podem ser encontrados em pontes (CHBDC 1995).

Estes componentes nem sempre não são fundamentais para a segurança da estrutura, têm, no entanto de ser reparados ou substituídos durante a vida da obra, já que afetam bastante a sua funcionalidade. É assim necessário também definir a Vida Útil destes componentes, até porque condicionam bastante os custos de manutenção das construções.

os principais mecanismos de degradação estão associados às seguintes situações principais:

- corrosão de armaduras após a perda da proteção química devido à carbonatação do concreto;
- corrosão de armaduras após a perda da proteção química devido ao ataque de cloretos;
- degradação do concreto por ação gelo/degelo;
- degradação do concreto por sais químicos agressivos;
- degradação do concreto por reações álcali-sílica.

Entre os fenômenos associados às estruturas de

concreto, os dois primeiros são os mais relevantes e correspondem aos que têm sido objeto de mais estudos de previsão da vida útil de projeto.

Nas obras correntes, com vidas úteis de projeto da ordem dos 50-60 anos, as normas europeias (*NV206-1, 1999; LNEC, 2007*), definem características ambientes para cada mecanismo de degradação, com base nos quais existem recomendações para serem aplicadas às características do concreto (quantidade de cimento, relação água/cimento, resistência à compressão) e cobrimentos de

armaduras para se garantir a Vida Útil Estrutural sem redução dos níveis de segurança.

Para obras importantes, por exemplo a Ponte Vasco da Gama (vide Fig. 5), como sejam construções onde se define uma Vida Útil Estrutural maior, entre 100 e 120 anos, não há regulamentos aplicáveis. Aqui o estudo da vida útil tem de ser realizado com base na deterioração dos materiais, nas condições ambientais e nas condições limite definidas, usando modelos matemáticos de deterioração (*HELENE, 1993; ANDRADE, 1996; BRANCO, 2004*).



Figura 5. Ponte Vasco da Gama, projectada para uma Vida Útil Estrutural de 120 anos

Limite da Vida Útil – Na utilização de modelos de previsão da vida útil, um dos primeiros parâmetros que tem de ser definido é o conceito de fim da vida útil.

Em relação às situações limite que definem o fim da Vida Útil Estrutural, no projeto das estruturas de concreto armado considera-se habitualmente este limite como correspondendo ao início da oxidação nas armaduras de flexão/tracção dos elementos estruturais principais. É um critério conservador, mas que garante o conceito de nível de segurança do projeto estrutural (*HELENE, 1993; BRANCO, 2000*).

Por vezes, este critério é substituído por um em que se aceita uma pequena percentagem de corrosão nas armaduras. Tal tem como inconveniente o fato dos modelos de simulação associados serem mais complexos e imprecisos.

Nas estruturas metálicas habitualmente usa-se como critério de limite da Vida Útil Estrutural ou de Projeto o início da perda de seção resistente, por corrosão.

Definidos os critérios limite para o fim da

Vida Útil Estrutural, é necessário ter modelos para simular a degradação dos materiais em função das condições ambiente. Nas estruturas de concreto, os modelos de deterioração, como se referiu, foram desenvolvidos essencialmente para a carbonatação e para o ataque dos cloretos, e constam, essencialmente, dos seguintes aspectos (*HELENE 1997*):

Carbonatação do Concreto – Este fenómeno é causado pela reação do CO_2 da atmosfera com o Ca(OH)_2 dos produtos da hidratação do cimento, na presença de água. O resultado é a perda de alcalinidade do cobrimento do concreto e quando se atinge valores de pH próximos de 9 a 10, a armadura fica desprotegida quimicamente. A penetração do CO_2 nos poros do concreto desenvolve-se numa frente que avança com uma velocidade quantificada pelo coeficiente de difusão do CO_2 . A evolução da frente de carbonatação “d” pode ser estimada através da Equação 4.

$$d = K (t)^{0.5} \quad (\text{Eq.4})$$

Onde t é o tempo (anos) e K é o coeficiente de

carbonatação que depende da efetiva difusão do CO₂ através do concreto. Com base em ensaios, o coeficiente K tem valores entre 1,0 - 1,5 mm/ano^{0,5} para situações correntes, mas pode crescer para 4,0 - a 8,0 mm/ano^{0,5} para concretos porosos sujeitos a ciclos de molhagem e secagem (MANGAT, 1991; SILVA 2009). Na Fig. 6 ilustra-se o valor médio obtido na medição experimental de 100 estruturas

expostas ao ar, em que se obteve para K um valor médio de 3,5mm/ano^{0,5}, mas com uma dispersão significativa, denotando a variabilidade do coeficiente de carbonatação (MONTEIRO, 2010). Estudos recentes (NEVES 2011) considerando apenas concreto de pontes conduziram a valores médios de k=2,5mm/ano^{0,5}, ou seja um valor mais baixo associado a concretos de melhor qualidade.

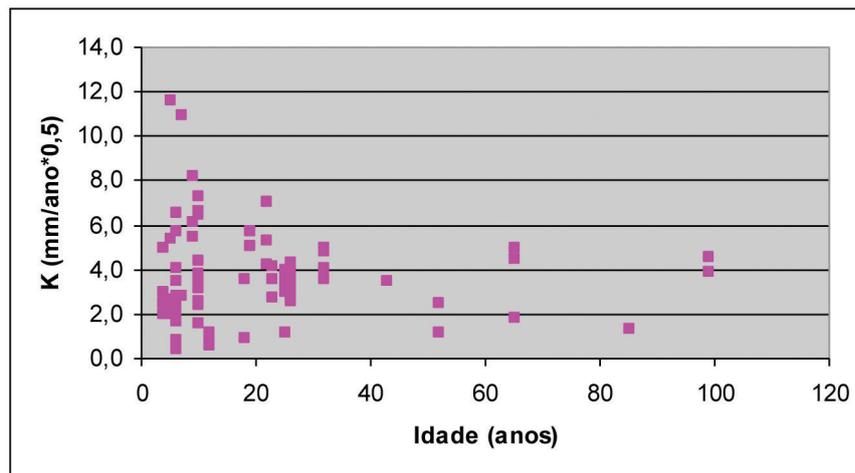


Figura 6. Coeficiente de carbonatação de 100 obras de concreto ao ar livre (K_{médio} = 3,5mm/ano^{0,5}).

Ataque de Cloretos no Concreto - Para o ataque dos íons cloro, a sua penetração no concreto pode ser razoavelmente simulada pela lei de difusão de Fick. A solução da equação diferencial, tendo em conta a variação com o tempo, do coeficiente de difusão dos cloretos D_c (cm²/sec), leva a equação 5, dando a concentração de cloretos C (x,t) dentro do concreto a profundidade x (cm) e tempo t (sec)

$$C(x,t) = C_0 (1 - \text{erf} (x / (2 (D_c t^{(1-m)} / (1-m))^{0,5}))) \quad (\text{Eq.5})$$

Onde C₀ é a concentração de cloretos na superfície (% da massa de cimento), “erf” é a função erro e “m” uma constante empírica (m = 0,4) (MANGAT, 1991).

A Equação 5 pode ser usada para estimar o tempo para o início da corrosão, para um recobrimento das barras de aço (x), considerando a concentração superficial de cloretos (vide Tabela 2), usando o coeficiente de difusão dos cloretos, obtido experimentalmente, e considerando que a corrosão no aço habitualmente inicia-se para valores de cerca de C = 0,4% da massa do cimento.

Tabela 2. Concentração superficial de cloretos

Zona da Ponte	Ambiente	C0 (%)
Tabuleiro	Ar	1,6
Pilares	Respingos	2,5
Pilares	Inter. Maré	5,0
Tabuleiro	Sais de degelo	1,6
Pilares	Sais de degelo	5,0

Depois da fase de iniciação, a evolução do diâmetro das barras de aço D_t (no tempo t) devida à corrosão pode também ser estimada pela equação 6 (MANGAT, 1991).

$$D_t = D_i - 0,023 \cdot t \cdot I \quad (\text{Eq. 6})$$

Onde D_i é o diâmetro inicial das barras de aço, t é o tempo em anos, I_c (μA/cm²) é a taxa de corrosão com valores variáveis entre 1x10⁻¹ to 1x10² μA/cm². A grande variação destes valores de I_c torna a avaliação da evolução da corrosão difícil, a menos que se utilizem medições in-situ.

Com estes modelos para a carbonatação e

para os cloretos pode-se estimar a evolução da degradação da estrutura e definir especificações para os materiais, nomeadamente em termos das propriedades do concreto e do recobrimento das armaduras de modo a garantir a ausência da oxidação das armaduras até ao fim da Vida Útil Estrutural, definida em projeto. Por exemplo, para a carbonatação basta multiplicar os anos da Vida Útil pretendida pelo coeficiente de carbonatação adotado, para se obter o recobrimento necessário às armaduras, para se evitar a oxidação.

Estruturas Metálicas – Nas estruturas metálicas, a vida útil pode ser estimada com base em taxas de corrosão. O produto das taxas de corrosão pelos anos da Vida Útil define a espessura de aço que será corroída durante esse período.

A Tabela 3 apresenta taxas de corrosão típicas em ambientes marítimos, para aço não protegido, que podem ser usadas como uma primeira estimativa para projeto.

Tabela 3. Taxas de corrosão em aço para ambientes marítimos

Localização	$\mu\text{m/ano}$
Zona enterrada	0,01
Submersa em lodos	0,1
Totalmente submersa	0,08 – 0,12
Zona inter-maré	0,1 – 0,2
Zona de respingos	0,2 – 0,4
Exposição ao ar	0,1 – 0,2

Modelagem da Vida Útil – com estes modelos para o concreto e para o aço pode-se estimar os recobrimentos de armaduras nos elementos de concreto armado ou a sobreesspessura a adotar nas peças metálicas de modo a que no fim da Vida Útil Estrutural pretendida não se tenha atingido a oxidação nas armaduras de aço ou na seção resistente metálica.

O problema deste tipo de análise reside no fato desta simulação, na fase de projeto, ter de ser feita escolhendo um valor para K (para a carbonatação), ou Dc (para os cloretos) ou taxa de corrosão (para as estruturas metálicas), sabendo-se que estes valores são muito variáveis com os materiais e com as condições ambiente.

Tal situação leva a que a solução atual consiste em numa primeira fase adotar uma estimativa de recobrimentos para o projeto, para ser executado em obra. Numa segunda fase, durante a vida da construção, monitora-se os valores adotados e caso se tenha errado na estimativa, poder-se-á adotar medidas corretivas da evolução da degradação.

Investigação recente permitiu relacionar ensaios de carbonatação acelerada com exposição natural (NEVES, 2011).

A resistência à carbonatação em condições naturais foi avaliada a partir de superfícies de concreto não revestido e não reparado de 21 viadutos, com idades compreendidas entre 4 e 32 anos. Extraíram-se 65 amostras de superfícies

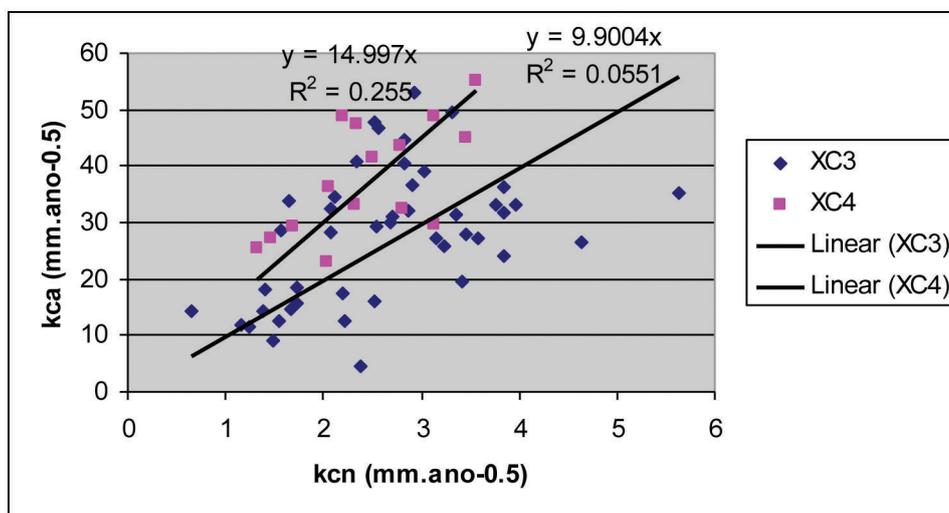


Figura 7. Relação entre carbonatação acelerada e exposição natural (Neves, 2011).

sujeitas à classe de exposição XC3 (sem contacto de água) e 29 amostras de superfícies sujeitas à classe de exposição XC4 (com contacto de chuva), segundo a *NP EN206-1*. Os mesmos testemunhos foram posteriormente sujeitos a ensaios de carbonatação acelerada com recurso de utilização de câmaras condicionadas, reguladas para

20 °C de temperatura, 65% de umidade relativa e concentração de CO₂ de 5%.

Estes resultados mostraram que com base em ensaios acelerados é possível estimar os coeficientes de carbonatação naturais dividindo os valores acelerados por cerca de 15 (XC4) ou 10 (XC3) (vide Fig.7).

4. Componentes não estruturais – *Buildings Life*

4.1 Componentes não estruturais e sustentabilidade da construção

Os componentes não estruturais têm uma influência significativa na qualidade e funcionalidade das construções. Estes podem contribuir tanto para a proteção e durabilidade de componentes estruturais, como é o caso das pinturas, como para a valorização das construções e para o aumento do conforto dos seus utilizadores. Estes componentes têm, tipicamente, uma vida útil inferior à Vida Útil Estrutural ou mesmo à Vida Útil Funcional das construções. Por esse motivo, muitas das ações de manutenção que são necessárias desenvolver durante o período de serviço das construções têm como objeto intervenções em componentes não estruturais. Assim, torna-se importante uma definição clara da vida útil destes componentes, assim como da forma como esta é afetada pelas propriedades intrínsecas dos materiais e pelas ações ambientais. Tal possibilita que a escolha e prescrição destes componentes sejam feitas da forma mais adequada e econômica, promovendo a sustentabilidade no setor da construção.

De fato, o interesse verificado em relação à temática da previsão da vida útil de materiais e componentes de edifícios foi, de certa forma, impulsionado por uma maior preocupação política e social com o conceito da “sustentabilidade” e “*desenvolvimento sustentável*”. Brundtland (1987) define “desenvolvimento sustentável” como “*development that meets the needs of the present generations without compromising the ability of future generations to meet their own needs*” (*desenvolvimento que satisfaz as necessidades da geração presente sem comprometer a capacidade de gerações futuras satisfazer suas próprias*

necessidades). A adoção de medidas de promoção de um “desenvolvimento sustentável” ficou consagrada como uma meta global das Nações Líderes das Nações Unidas no Rio de Janeiro, Brasil, em 1992, da qual resultou a Agenda 21 (ONU, 1993). Genericamente, este documento expressa um plano de ação ao nível global, nacional e local, visando todos os setores da atividade humana, para reduzir o impacto desta no ambiente e promover a adoção de padrões de atividade sustentáveis.

Pearce (2003) elaborou um relatório sobre qual deveria ser a contribuição da indústria da construção, no contexto específico da realidade do Reino Unido, na procura dessa sustentabilidade. O autor realça a importância das informações fornecidas ao património construído nas suas fases de projeto, construção e manutenção, nos níveis de atividade econômica aí incluída e na sua respectiva produtividade. Esta consideração evidencia o impacto que o espaço construído tem sobre a atividade humana, focando para além das dimensões técnicas da construção, a sua componente socioeconómica. As atividades da indústria da construção têm um impacto significativo na definição da qualidade de vida e da produtividade das sociedades, o que justifica uma aposta num rumo mais sustentável desta indústria.

Um vetor de atuação na procura desta sustentabilidade corresponde a um aumento do ciclo de vida das construções, resultando numa maior longevidade do espaço construído. Tal exige que a durabilidade seja uma preocupação presente nas fases de concepção, construção e exploração do património construído. Exige ainda

a preocupação em garantir a funcionalidade desse patrimônio ao longo do seu ciclo de vida, o que pode ser conseguido, em parte, por considerações na fase de concepção, cuidados acrescidos na fase de construção, e, sobretudo por um planejamento cuidadoso e detalhado das necessidades de manutenção. Adicionalmente, a sustentabilidade do espaço construído requer o controle e planejamento dos materiais e recursos econômicos necessários durante o seu ciclo de vida, de forma que seja gerido de um modo mais econômico possível (*DANIOTTI ET AL., 2007*).

Para tal, a previsão da vida útil dos materiais e componentes do patrimônio construído, quer este

seja um edifício ou qualquer outra infra-estrutura, assume uma grande importância. A existência de dados relativos à vida útil de materiais e componentes é essencial para se alcançar maior longevidade das construções, permitindo uma correta seleção, uso e manutenção destes (*MASTERS ET AL., 1987*). Tais dados são necessários ao planejamento da manutenção ao longo do ciclo de vida do espaço construído, devendo refletir dois mecanismos de degradação dos materiais e componentes: os agentes ambientais que têm influência nesses mecanismos; e a expectativa das vidas úteis desses materiais ou componentes.

4.2 Métodos de previsão da vida útil para componentes não estruturais

O desenvolvimento de métodos de previsão da vida útil em componentes diversos da construção, com função estrutural ou não, tem sido objeto de estudos realizados no âmbito de comissões técnicas internacionais, como *CIB (CIB W80)*, *RILEM (RILEM 71-PSL, 10 TSL, 175-SLM)* ou *ISO (ISO TC 59 SC 14) [3] (LACASSE ET AL., 2004)*.

Das comissões técnicas conjuntas *CIB W80* e *RILEM 71-PSL* resultaram os trabalhos de Masters e Brandt (*MASTERS ET AL., 1987, MASTERS ET AL., 1989*). Estes autores apresentaram um estado da arte dos métodos de previsão da vida útil e sugeriram um método geral de previsão da vida útil para materiais e componentes, identificando ainda necessidades de investigação nesse domínio.

Posteriormente, como resultado do trabalho conjunto das comissões técnicas *CIB W80* e *RILEM 100- TSL* foi apresentada uma nova contribuição para a temática dos métodos de previsão da vida útil de materiais e componentes de edifícios, da autoria de *Sjöström e Brandt (1991)*. Estes autores aprofundaram a problemática do recebimento e utilização de dados provenientes de exposição em serviço.

Os trabalhos de *Martin et al. (1994)* e *Martin (1999)* propõem um método de previsão da vida útil aplicada especificamente aos sistemas de revestimento por pintura. Nestes trabalhos, os autores sugerem a utilização da teoria da fiabilidade, como forma de melhorar a qualidade

das previsões e estimativas obtidas.

O *Architectural Institute of Japan (AIJ, 1993)* propôs um método de previsão da vida útil para materiais e componentes, baseada numa expressão factorial, a qual foi posteriormente adaptada pela *ISO*, nas suas normas da série *ISO 15686*.

A abordagem geral ao problema da previsão da vida útil de materiais e componentes de construção pode ser dividida em três fases fundamentais. Estas são as fases de i) definição do problema, ii) recebimento de dados e iii) análise de dados. Este procedimento é, de forma geral, semelhante ao sugerido na norma *ISO 15686-1:2000 (ISO, 2000)*, o qual por sua vez utiliza a estrutura proposta por *Masters et al. (1989)*.

Na fase de **definição do problema** é estabelecido o âmbito do estudo a desenvolver. Este âmbito traduz-se na definição de quais os materiais em análise, as suas características, o seu contexto de aplicação, as condições ambientais e possíveis fatores de degradação a que estão (ou estarão) expostos, quais os mecanismos de degradação e as anomalias possíveis, quais os ensaios que serão utilizados na fase de recebimento de dados e, finalmente, qual o tipo de análise de dados a utilizar e o resultado pretendido.

A fase de **recebimento de dados** pretende fornecer a informação necessária sobre os mecanismos de degradação e as anomalias do material, e também sobre a forma como as

características, os fatores ambientais e outros fatores de degradação influenciam a evolução desses mecanismos. Este recebimento de dados pode, essencialmente, ser realizado por duas vias: com metodologias de i) curto prazo, ou ii) longo prazo. As designações “curto” e longo” prazo referem-se ao tipo de degradação que é possível observar com a situação em causa: degradações que ocorrem num curto espaço de tempo ou degradações que ocorrem num espaço de tempo longo, respectivamente.

Os métodos de curto prazo caracterizam-se, geralmente, por submeter os materiais ou componentes a condições de exposição mais severas do que aquelas que seriam encontradas em serviço. Tal significa que os fatores de degradação podem ser caracterizados por maiores intensidades ou por ciclos mais rápidos (maiores frequências de incidência). Como exceção, há situações em que se averigua a existência de falhas prematuras, isto é, situações em que o material ou componente chega ao fim da sua vida útil muito antes do esperado ou desejado, mesmo sob condições normais de exposição.

Deste modo, estes estudos permitem observar a degradação equivalente à que se verificaria durante o período normal de serviço, mas num espaço de tempo muito inferior a este. Este aspecto torna os ensaios acelerados numa via bastante procurada nos métodos de previsão da vida útil (*ROY ET AL., 1996; JACQUES, 2000; PERRIN ET AL., 2001; FEKETE ET AL., 2005; GIACARDI ET AL., 2008; MOTOHASHI, 2008*).

Nesta categoria, inserem-se essencialmente dois tipos de ensaios: i) ensaios acelerados laboratoriais e ii) ensaios acelerados de campo.

Os ensaios acelerados laboratoriais envolvem a exposição dos materiais ou componentes a fatores de degradação muito mais intensos e/ou frequentes do que seria encontrado em serviço. Estes fatores são criados artificialmente e visam simular a ação durante o período de serviço, dos agentes de degradação que se espera serem mais condicionantes no contexto em causa.

Este tipo de ensaio permite isolar variáveis de degradação, de forma a avaliar a ação direta desses fatores sobre os materiais ou componentes em estudo, facilitando a determinação dos mecanismos

de degradação provocados por cada agente. Simultaneamente, é possível obter esses resultados em espaços de tempo relativamente curtos, o que é particularmente interessante para fabricantes de materiais e de componentes que pretendem ter um ritmo de desenvolvimento do produto rápido e competitivo.

No entanto, esta é uma vantagem relativa. É necessária precaução na interpretação e uso dos resultados provenientes de ensaios acelerados, uma vez que a sua correlação com a degradação que ocorre em exposição real nas condições de serviço é questionável e complexa (*MARTIN ET AL., 1994; JOHNSON ET AL., 1996; MALLON ET AL., 2002*). O fato de as condições de exposição serem obtidas por meios artificiais, acrescido da agravante de as suas intensidades e/ou frequências assumirem valores muito acima dos esperados em serviço, aumenta o risco de se originarem mecanismos de degradação que não ocorreriam numa exposição normal. De forma semelhante, também os mecanismos de degradação que de fato ocorrem sob condições normais de exposição, e os quais se pretende reproduzir laboratorialmente, podem não ser obtidos num regime de aceleração da degradação. A contribuir para esta incerteza, existe também o fato de o número de variáveis em atuação simultânea nestes ensaios ser, geralmente, reduzido (geralmente utiliza-se apenas um ou dois fatores, não sendo comuns ensaios acelerados com mais do que três fatores simultâneos). Tendo em consideração a natureza sinérgica dos fenômenos de degradação, esta limitação do número de variáveis em atuação simultânea pode também reduzir o espectro de mecanismos de degradação que são de fato induzidos nos ensaios acelerados.

Com base em considerações desta natureza, a utilidade dos resultados dos ensaios acelerados é por vezes posta em causa. No entanto, estes ensaios, pelas suas características, constituem uma ferramenta muito interessante para o estudo de relações “causa-efeito” entre fatores e mecanismos de degradação, carecendo apenas de prudência e julgamento experiente na análise e extrapolação dos seus resultados.

Por outro lado, os ensaios acelerados de campo consistem na exposição de espécimes de teste em

determinadas localizações, onde estes ficam sob a ação dos fatores de degradação presentes, os quais devem ser monitorizados e registados ao longo da duração do ensaio. Este tipo de ensaio pode assumir durações variadas (de meses a anos), de acordo com os objetivos pretendidos. É aqui considerado como um ensaio de curta duração, pois pode ser utilizado como tal se o local de exposição utilizado for escolhido por apresentar intensidades e/ou frequências acima da média (ou acima das que se verificarão nas condições reais de serviço) para um dado fator de degradação. Nestas situações, e apesar de as durações típicas dos ensaios serem superiores às dos ensaios laboratoriais acelerados, na realidade o que se pretende é acelerar os mecanismos de degradação para reduzir o tempo do ensaio, por intermédio de uma exposição dos espécimes a agentes de degradação com intensidade superior à que ocorrerá em condições de serviço.

Um exemplo clássico deste tipo de ensaios foram os realizados em Miami, Florida, EUA, caracterizada pelos elevados níveis de radiação UV, umidade e temperatura (MARTIN *ET AL.*, 1994; JOHNSON *ET AL.*, 1996). Exemplos de outros locais que foram utilizados este tipo de ensaio é Wittman, Arizona, EUA, ou Hoek Van Holland, nos Países Baixos, este último caracterizado pelo seu ambiente misto marítimo e industrial (JOHNSON *ET AL.* 1996).

Estes ensaios têm a vantagem de testar os materiais sob condições de exposição reais com um grau de aceleração inferior, o que permite reduzir os riscos associados aos ensaios acelerados no que se refere a utilidade prática dos dados que produzem. Porém, apesar de aqui serem apresentados como ensaios de curto prazo, os períodos de ensaio poderão ser demasiados longos, quando se pretende obter rapidamente informações sobre o desempenho de um dado material ou componente.

No entanto, existem métodos que se baseiam no estudo de dados a longo prazo, pretendendo-se observar a degradação real dos materiais e componentes quando expostos em condições de serviço. Assim é possível eliminar o risco de ocorrência de mecanismos de degradação artificiais, e torna-se também possível analisar diretamente o desempenho dos materiais quando expostos às

verdadeiras condições de serviço. Deste modo, observam-se as verdadeiras taxas de degradação, ao invés de taxas de degradação acelerada.

Existem quatro abordagens básicas para a obtenção de dados de degradação com estudos de longo prazo: i) ensaios de campo a longo prazo, ii) inspeção de edifícios em serviço, iii) utilização de edifícios experimentais e iv) exposição de espécimes em serviço (SJÖSTRÖM *ET AL.*, 1991; ISO, 2000).

Os ensaios de campo podem ser concebidos e utilizados como estudos de longo prazo. Quando os fatores de degradação utilizados e os seus respectivos níveis (intensidade, frequência, etc.) são semelhantes aos encontrados em condições de serviço, estes ensaios inserem-se na categoria dos ensaios de longo prazo, uma vez que a degradação que irá ser observada é semelhante à que ocorrerá em serviço.

Os ensaios de campo podem ser conduzidos nos locais onde os materiais ou componentes irão ser colocados em serviço, ou em locais com condições de exposição muito semelhantes.

A inspeção de construções em serviço consiste na observação de edifícios reais que não foram inicialmente concebidos para utilização em estudos de previsão da vida útil. Podem ser inspecionados materiais ou componentes específicos, obtendo-se informação relativa à verdadeira degradação que ocorre nas condições de exposição em serviço.

Quando são utilizados edifícios experimentais, existe também uma abordagem baseada na inspeção de edifícios. A grande diferença para o caso anterior consiste no fato de existir um controle muito maior sobre todas as condições experimentais. Os edifícios experimentais são concebidos com o intuito de incorporar e expor materiais ou componentes específicos em condições de serviço. Assim, é possível conhecer exactamente quais os materiais ou componentes em estudo, as suas características, as suas condições de aplicação e a idade destes a qualquer momento. Adicionalmente, é possível monitorar, a partir do momento de início do ensaio e até a conclusão deste, as condições de exposição e os fatores de degradação considerados relevantes para a situação em estudo.

Finalmente, a exposição de espécimes em serviço consiste na incorporação de materiais ou

componentes para os quais se pretende obter dados de vida útil em edifícios ou infraestruturas que não foram explicitamente concebidas para a execução de ensaios de durabilidade. Este tipo de abordagem é particularmente útil quando a degradação está diretamente ligada às ações e comportamentos dos utilizadores.

Após esta fase de recebimento de dados, tem lugar a **fase de análise de dados**, na qual toda a informação recolhida anteriormente é utilizada para construir modelos de degradação e obter estimativas da vida útil do material.

4.3 Caso de estudo: Plataforma *BuildingsLife*

Recentemente foi desenvolvida uma nova abordagem ao problema da previsão da vida útil em elementos não estruturais, que se baseia na inspeção de edifícios em serviço e numa análise estatística das condições de degradação de materiais e componentes. Esta análise estatística é realizada com base num conjunto significativo de inspeções, e pressupõe a prévia definição dos níveis de degradação e dos fatores de degradação a considerar. Este método foi implementado numa plataforma web (*BuildingsLife*), permitindo a gestão da manutenção das construções, tendo em conta a previsão do momento de ocorrência dos vários níveis de degradação, além de ajudar o projetista a escolher as melhores soluções construtivas e materiais, com base nas curvas de degradação e da sua interação com os fatores de degradação (PAULO, 2009; GARRIDO, 2010).

Uma das grandes vantagens deste método é a possibilidade de aplicação a qualquer componente, ou tipo de degradação, permitindo ainda, com base em observações periódicas, ir corrigindo o modelo inicial de previsão da vida útil da construção em análise. O método tem em síntese os seguintes passos:

Definição de níveis e fatores de degradação – para cada anomalia que se pretende estudar começa-se por se definir os níveis de degradação com base numa escala entre 0 e 5, em que o valor zero representa a ausência de degradação e cinco representa a extensão máxima possível da degradação. Em paralelo, estima-se os vários tipos

de fatores ambientais ou de materiais que poderão afetar a degradação (fatores de degradação).

Na análise de dados de vida útil de materiais e componentes de construção existem diversas formas e abordagens que podem ser adotadas. O objetivo destas é a modelação do desempenho dos materiais e componentes, para que seja possível a previsão da sua vida útil.

Como exemplos de algumas das abordagens mais utilizadas na análise e modelação de dados de previsão da vida útil, podem ser referidos: i) teoria da fiabilidade, ii) método factorial, iii) modelos determinísticos, iv) modelos estocásticos, e v) modelos de engenharia.

de fatores ambientais ou de materiais que poderão afetar a degradação (fatores de degradação).

Inspeções – são inspecionadas várias construções (mais de 100), apresentando a anomalia em estudo. Nestas inspeções é quantificada, para cada construção, a extensão da degradação associada a essa anomalia e feita a sua classificação de acordo com a escala de níveis de degradação pré-definida. São ainda caracterizados os fatores de degradação (condições ambientais ou materiais existentes), e determinada à idade da construção, ou, se diferente, do componente inspecionado. Refira-se que é, sempre que possível preferida que as inspeções sejam baseadas em avaliações quantitativas face avaliações qualitativas, uma vez que as segundas são mais facilmente influenciáveis por fatores associados ao inspetor e à sua própria experiência e individualidade, afetando a replicabilidade e comparabilidade com outros resultados. Como exemplo de uma avaliação quantitativa, pode-se considerar a caracterização da anomalia de destacamento de revestimento argamassado numa fachada através da quantificação da área relativa de descolamento, utilizando-se para tal uma imagem da fachada obtida por registo fotográfico (vide Fig. 8).

Modelagem – utilizando os dados estatísticos recebidos (extensão das anomalias em função da idade dos componentes), é feita a modelação do desempenho ao longo do tempo, em relação a cada anomalia considerada. São utilizados modelos determinísticos e modelos estocásticos. Os modelos determinísticos são apresentados sob a forma de

curvas de degradação, que simulam a evolução da degradação com o avanço do tempo em serviço dos componentes, sendo utilizadas para esse efeito as curvas de Gompertz, sendo que a cada idade do componente corresponde um valor de extensão das anomalias. Por sua vez, os modelos estocásticos permitem enriquecer as previsões obtidas, associando a cada nível de degradação uma probabilidade de ocorrência para uma determinada idade do componente. As Cadeias de Markov foram a metodologia aplicada para a utilização de métodos

probabilísticos para estimativa da vida útil.

Como exemplo apresenta-se um estudo realizado sobre a degradação das pinturas em construções antigas (GARRIDO, 2010) em que com base na inspeção de 100 edifícios se analisou a influência de cinco fatores: *i) espessura da película, ii) aglomerante da tinta, iii) textura da película, iv) preparação do substrato e v) orientação solar, no descasque das tintas quantificado em função da percentagem da área de tinta descascada.*



Figura 8. Registos fotográficos de fachada.

A degradação das tintas foi analisada recorrendo a curvas do tipo Gompertz o que conduziu às curvas de previsão da vida útil. A título de exemplo, a comparação entre o comportamento de tintas com espessura até 400 μm (nível 1) ou maior que 400 μm (nível 2), conduziu aos resultados apresentados na Fig. 9.

Apesar da dispersão dos resultados a análise mostra que as tintas mais espessas apresentam um comportamento melhor, com cerca de 5 anos adicionais de comportamento sem descasque. Pode-se também observar que as tintas com espessura menor suportam cerca de 25 anos sem descasque.

Na Fig. 10 são apresentados resultados semelhantes para a influência da orientação solar no descasque de tinta da pintura de fachada. É possível observar que não existe uma influência evidente da orientação solar no tempo necessário para a iniciação do descasque, sendo que para todas as orientações as curvas obtidas apenas indicam a iniciação do descasque decorridos cerca de 20 anos após aplicação da pintura. No entanto, após essa iniciação da anomalia, as pinturas de

fachadas orientadas a Norte apresentam uma evolução claramente menos gravosa face às pinturas de fachadas orientadas a Oeste, assim como às fachadas orientadas a Sul e Este. Este é um resultado consistente com a maior exposição à radiação UV a que os materiais estão sujeitos nestas últimas orientações solares face à primeira.

As equações das curvas apresentadas nas Figs. 9 e 10 (Curvas de Gompertz – G) são apresentadas nas Tabelas 4 e 5, respectivamente.

A evolução da degradação apresentada permite definir o fim da vida útil aceitável (percentagem máxima de descasque) e assim fazer-se previsões para as operações de manutenção. Esta técnica permite para qualquer tipo de degradação:

- modelar e quantificar o desempenho dos materiais;
- modelar e quantificar os fatores de degradação;
- analisar os fatores de degradação que afetam a vida útil;
- modelar e quantificar os níveis de degradação;
- obter um método determinístico para prever a vida útil;

- obter um método estocástico para previsão da vida útil;
- definir o melhor plano de manutenção e a estimativa dos custos.

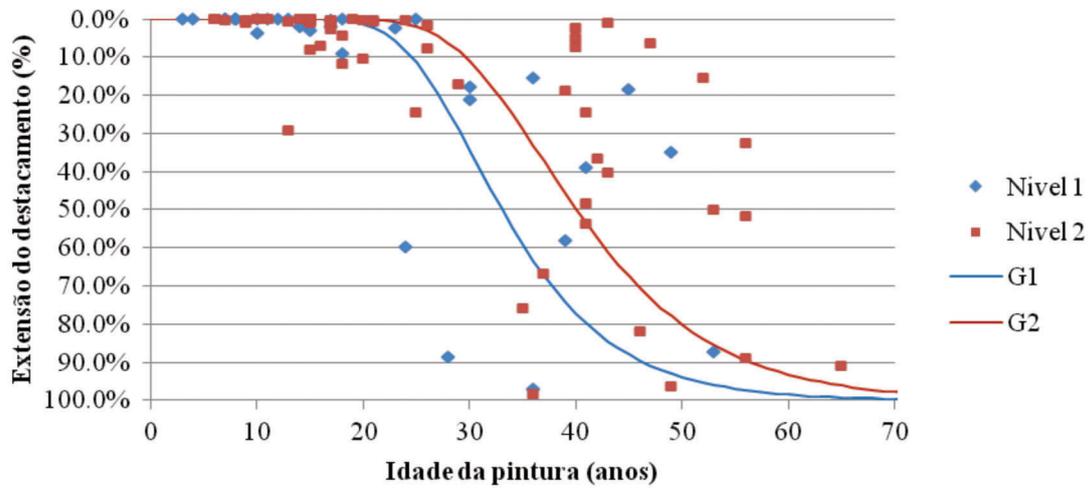


Figura 9 . Curvas de degradação da pintura em função da espessura (G - Gompertz).

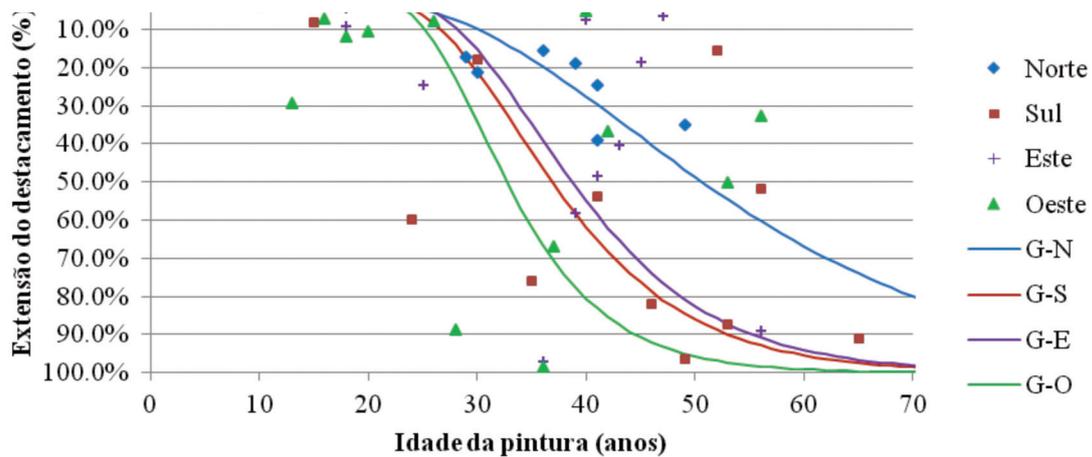


Figura 10. Curvas de degradação da pintura em função da orientação solar (G- Gompertz)

Tabela 4. Equações das curvas de Gompertz (DG) da degradação da pintura em função da espessura.

Curva	Equação
Nível 1 (G1)	$D_G = e^{-74,57801e^{-0,14159t}}$
Nível 2 (G2)	$D_G = e^{-68,84021e^{-0,11281t}}$

Tabela 5. Equações das curvas de Gompertz (DG) degradação da pintura em função da orientação solar (o que é o Dg?)

Curva	Equação
Norte	$DG = e^{-13,29133e^{-0,05828t}}$
Sul	$DG = e^{-52,04740e^{-0,11638t}}$
Este	$DG = e^{-57,32268e^{-0,11899t}}$
Oeste	$DG = e^{-130,73159e^{-0,16008t}}$

5. Projeto, construção e manutenção

A concepção das construções tendo em conta uma vida útil começa por um estudo económico em que se define a Vida Útil Funcional, necessária à rentabilidade do investimento, seguindo-se a definição de uma Vida Útil Estrutural ou de Projeto, maior que a anterior, durante a qual a construção deverá assegurar níveis adequados de segurança estrutural e de utilização.

A Vida Útil Estrutural ou de Projeto corresponde ao período desde a sua inauguração até se atingir

a degradação especificada ou um nível de deficiente funcionamento, considerando que haverá uma manutenção corrente. As construções correntes são habitualmente projetadas para vidas estruturais de 50 - 60 anos e as pontes importantes podem ser concebidas para períodos de 100 - 120 anos.

Para se garantir esta vida útil devem ser tomadas as seguintes medidas durante as fases de projeto, construção e exploração/manutenção.

5.1 Construção com durabilidade

Durante a fase de construção, um bom controle de qualidade é o melhor processo para se garantir a vida útil planejada. O controle de qualidade deve ser realizado pelo empreiteiro e verificado pela fiscalização, devendo manter-se o contato com o projetista para análise das anomalias. Nesta fase as principais atividades relacionadas com a durabilidade são as seguintes.

Estudo Inicial das Propriedades de Durabilidade dos Materiais Estruturais – Em particular em relação ao concreto, antes de se iniciarem as concretagens o empreiteiro deverá estudar as composições do concreto de modo a atingir as características especificadas em termos

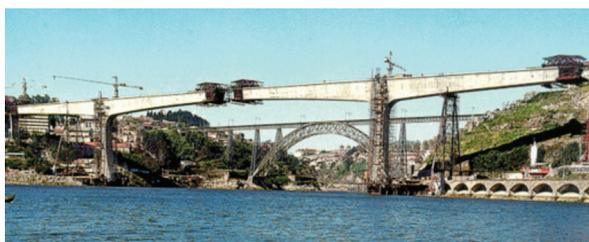


Figura 11. Construção da Ponte S. João (Porto). Implementação de controle cuidado de fluência e retração do concreto (foto de F. Branco).

de durabilidade. Isto é particularmente importante porque os ensaios de durabilidade demoram bastante tempo a realizar, pelo que devem ser feitos o mais cedo possível.

Controle In-situ – O controle dos materiais deve também ser feito in-situ de modo a verificar-se se as características de durabilidade se mantêm. Este controle periódico é fundamental para a qualidade da obra final (vide Fig.11).

O controle de qualidade tem tido desenvolvimentos recentes, onde sistemas periciais podem ser utilizados para definir procedimentos normalizados de controle. Por exemplo, se forem detectadas anomalias o sistema sugere ao fiscal os melhores procedimentos para sanar o problema (BRANCO, 2004).

Os métodos de construção devem ser implementados de modo a garantir os melhores procedimentos para se atingir uma boa durabilidade (nomeadamente na camada superficial do concreto dos elementos estruturais). As atividades relacionadas com a vibração, cura, controle de calor de hidratação, etc. são as mais importantes para garantir uma boa durabilidade.

5.2 Gestão durante a vida útil

Nas obras importantes, e porque os atuais modelos de simulação da degradação ainda não são suficientemente fiáveis, é necessário implementar o sistema de monitorização, definido na fase de projeto (vide Fig. 12).

A monitorização permitirá obter periodicamente o valor dos parâmetros principais que controlam a

degradação, como a profundidade de carbonatação (K reais da carbonatação), o teor de cloretos (coeficientes de difusão D_c dos cloretos), os níveis de corrosão (taxas efetivas de corrosão nas estruturas metálicas), que permitirão atualizar os modelos de previsão adotados em projeto e realizar previsões mais eficazes da vida útil.



Figura 12. Inspeções periódicas como parte de um sistema de gestão (foto de F. Branco).

6. Considerações finais

A caracterização da vida útil é um elemento cada vez mais importante na análise econômica dos investimentos e nos estudos de durabilidade das construções, permitindo otimizar as operações de manutenção.

No presente texto, depois de discutir o significado da vida útil das construções, apresentam-se as

Mais informações a respeito da monitoração podem ser encontradas no fascículo 05 da Série O Que É na Construção Civil?.

Além desta monitorização, para garantir o bom comportamento da construção durante a sua vida útil, é também necessário implementar diversas medidas de manutenção e reparação, o que é hoje inserido nos chamados sistemas de gestão das construções (BRANCO, 2004).

técnicas existentes mais recentes para quantificar, quer considerando a vida da estrutura, quer dos componentes não estruturais. Estes métodos estão a ser implementados em sistemas de gestão das construções reduzindo os custos da sua manutenção e aumentando a sua durabilidade

Referências Bibliográficas

- Andrade, C.; Alonso, C. (1996) - "Service life and residual life of concrete structures" (in Spanish), Seminar on Durability, National Laboratory of Civil Engineering (LNEC), Lisbon, Portugal, 1996.
- ANDRADE, M. C. Manual para diagnóstico de obras deterioradas por corrosão de armaduras. São Paulo. PINI, 1992. 104pag
- Architectural Institute of Japan (AIJ) (1993) - "The English Edition of Principal Guide for Service Life Planning of Buildings", AIJ, Japão, 1993.
- ASTM E 632-81 (1981) - "Standard Practice for Developing Accelerated Tests to a Prediction of the service Life of Building Components and Materials" American Society for Testing and Materials, Philadelphia.
- Branco, F. A.; Brito, J. (2004) - "Handbook of Concrete Bridge Management" - Ed. American Society of Civil Engineers, 468pp., Reston, Dez., 2004
- Branco, F.; Mendes, P.; Guerreiro, L. (2000) - "Special Studies for The Vasco da Gama Bridge".- Journal of Bridge Engineering, ASCE - American Society of Civil Engineering, vol.5, nº3, pp.224-232, Reston, 2000.
- CHBDC (1995) - "Canadian Highway Bridge Design Code. Clause 16.4 - Durability", Ottawa.
- Clifton, J.R. (1993) - "Predicting the Service Life of Concrete", ACI Materials Journal. pp. 611-617, Nov.-Dec.1993.
- Daniotti, B., Spagnolo, S. L. (2007) - "Service life prediction for buildings' design to plan a sustainable building maintenance". Proc. SB07 Lisbon - Sustainable Construction, Materials and Practices: Challenge of the Industry for the New Millenium, L. Bragança et al. (Eds.), IOS Press.
- ENV 1991-1 (1999) - "Eurocode 1: Basis of Design and Actions on Structures. Part 1: Basis of Design". European Committee for Standardisation-CEN, Brussels.
- ENV206-1 (1999) - "Concrete - Part 1: Specifications, performance, production and conformity". European Committee for Standardisation-CEN, Brussels.
- Fekete, E., Lengyel, B. (2005) - "Accelerated testing of waterborne coatings", Progress in Organic Coatings, 54, pp. 211-215, 2005.
- Garrido, M. (2010) - "Previsão da vida útil de pinturas de fachadas: Metodologia baseada na inspeção de edifícios em serviço". MSc Thesis in Civil Engineering, Instituto Superior Técnico, Technical University of Lisbon, Lisbon, Portugal, 2010.
- Giacardi, A., Morra, L. (2008) - "Outdoor wall painting semi-natural test", Proceedings of the 11th DBMC International Conference on Durability of Building Materials and Components, Istanbul, Turquia, 11-14 de Maio 2008.
- Helene, Paulo. Contribuição ao estudo da corrosão de armaduras nas estruturas de concreto armado. São Paulo, Universidade de São Paulo, Escola Politécnica da USP, PCC, 1993. Tese de Livre-Docência.
- HELENE, Paulo. Vida Útil das Estruturas de Concreto. In: IV Congresso Ibero Americano de Patologia das Construções e VI Congresso de Controle da Qualidade CON PAT-97, 1997, Porto Alegre. IV Congresso Ibero Americano de Patologia das Construções e VI Congresso de Controle da Qualidade CON

- PAT-97, 1997. v. 1. p. 1-30. International Organization for Standardization (ISO) (1984) – **“Performance standards in building – principles for their preparation and factors to be considered”**, ISO 6241:1984, 1984.
- Jacques, L. F. E. (2000) – **“Accelerated and outdoor/natural exposure testing of coatings”**, Progress in Polymer Science, 25, pp. 1337-1362, 2000.
- Johnson, B. W., McIntyre, R. (1996) – **“Analysis of test methods for UV durability predictions of polymer coatings”**, Progress in Organic Coatings, 27, pp. 95-106, 1996.
- Lacasse, M. A., Sjöström, C. (2004) - **“Recent advances in methods for service life prediction of building materials and components – an overview”**, Proceedings of the CIB World Building Congress, Toronto, Ontario, Canadá, 2 de Maio de 2004, pp. 1-10.
- Litzner, H.; Becker, A. (1999) - **“Design of Concrete Structures for Durability and Strength to Eurocode 2”**. Materials and Structures. vol.32, June, pp: 323-330.
- LNEC E-465 – (2007) - **“Concrete. Prescriptive methodology to estimate concrete properties to achieve the design service life under environment conditions XC or XS”** (in Portuguese), National Laboratory of Civil Engineering (LNEC), Lisbon, Portugal, 2007.
- Mallon, P. E., et al. (2002) – **“Durability of polymeric coatings: effects of natural and artificial weathering”**, Applied Surface Science, 194, pp. 176-181, 2002.
- Mangat, P.S., Elgarf, M.S. (1991) - **“The Effect of Reinforcement Corrosion on the Performance of Concrete Structures”**, BREU P3091 Report T1.4-03, 1991, Aberdeen.
- Martin, J. W., Saunders, S. C., Floyd, F. L., Wineburg, J. P. (1994) – **“Methodologies for Predicting the Service Lives of Coating Systems”**, NIST Building Science Series 172, Gaithersburg, MD, USA, 1994.
- Martin, J. W. (1999) – **“A Systems Approach to the Service Life Prediction Problem for Coating Systems”**, Service Life Prediction of Organic Coatings: A Systemic Approach, ACS Symposium Series, American Chemical Society, Vol. 722, pp. 1-20, 1999.
- Masters, L. W., Brandt, E. (1987) – **“Prediction of service life of building materials and components”**, RILEM Technical Committee, CIB W80/RILEM 71-PSL Final Report, Materials and Structures, 20, pp. 55-77, 1987.
- Masters, L. W., Brandt, E. (1989) - **Systematic methodology for service life prediction of building materials and components**, RILEM Recommendations, CIB W80/RILEM 71-PSL TC, Materials and Structures, 22, pp. 385-392, 1989.
- Monteiro, I. (2010) – **“Modelling the evolution fo carbonation in reinforced concrete elements”** (in Portuguese), MSc Thesis in Civil Engineering, Instituto Superior Técnico, Technical University of Lisbon, Lisbon, Portugal, 2010.
- Motohashi, K. (2008) – **“Durability evaluation of newly developed water-based paint systems for buildings”**, Proceedings of the 11th DBMC International Conference on Durability of Building Materials and Components, Istanbul, Turquia, 11-14 Maio 2008.
- Neves, R. (2011) – **“A permeabilidade ao ar e a carbonatação do betão nas estruturas”**, Tese de doutoramento, IST, Lisboa, 2011.
- NP EN 206-1:2005 Betão. **Parte 1: Especificação, desempenho, produção e conformidade**. IPQ, 2005, 84 p.
- Paulo, P. V. (2009) – **“A Building Management System (BuildingsLife): Application of deterministic and stochastic models with genetic algorithms to building façades”**, PhD Thesis in Civil Engineering, Instituto Superior Técnico, Technical University of Lisbon, Lisbon, Portugal, 2009.
- Pearce, D. (2003) – **“The Social and Economic Value of Construction – The Construction Industry’s Contribution to Sustainable Development”**, nCRISP, London, UK, 2003.
- Perrin, F. X., Irigoyen, M., Aragon, R., Vernet, J. L. (2001) – **“Evaluation of accelerated weathering tests of three paint systems: a comparative study of their aging behavior”**, Polymer Degradation and Stability, 72, pp. 115-124, 2001.
- REFER (1999) - **“A Ponte 25th de Abril – Segunda Fase”**. Ed. REFER, Lisboa
- RINCÓN, Oladis T.; CARRUYO, Aleida R.; ANDRADE, Carmen; HELENE, Paulo R.L.; DÍAZ, Isabel. **Manual de Inspección, Evaluación y Diagnóstico de Corrosión en Estructuras de Hormigón Armado. Ibero-America**, CYTED, Red DURAR, Red Temática XV.B Durabilidad de la Armadura, Abril 1997. 205 p. (en espanhol) Roy, S. K., Thy, L. B., Northwood, D. O. (1996) – **“The Evaluation of Paint Performance for Exterior Applications in Singapore’s Tropical Environment”**, Building and Environment, 31(5), pp. 477-486, 1996.
- SILVA, F. G; HELENE, Paulo.; CASTRO-BORGES, Pedro & LIBÓRIO, Jefferson. B. L. **Sources of variations when comparing concrete carbonation results**. Journal of Materials in Civil Engineering, ASCE, v. 21, n. 7, p. 333-42, July 2009. Revista en el SCI.
- Sjöström, C. H., Brandt, E. (1991) – **“Collection of in-service performance data: state-of-the-art and approach by CIB W80/RILEM 100-TSL, RILEM Technical Committees”**, Prediction Techniques of Service Life, CIB W80/RILEM 100-TSL, Materials and Structures, 24, pp. 70-76, 1991.
- TUTIKIAN, B. F. ; PACHECO, M. ; STRACK, D. ; CHRIST, R. . **Análise de Manifestações Patológicas na Ponte Arroio Felizes, Rio Grande do Sul, Brasil**. In: XI Congresso Latinoamericano de Patología de la Construcción y Control de Calidad, 2011, Antigua, Guatemala. XI Congreso Latinoamericano de Patología de la Construcción y Control de Calidad. Mérida, México: Alconpat Internacional, 2011. v. II.
- United Nations (UN) (1992) – **“Agenda 21: Earth Summit – The United Nations Programme of Action from Rio”**, United Nations Conference on Environment and Development (UNCED), Rio de Janeiro, Brasil, 3 a 14 de Junho de 1992.

Boletins Técnicos Alconpat

BT 01 – Bernardo Tutikian e Marcelo Pacheco

Inspección, Diagnóstico y Prognóstico en la Construcción Civil

Inspeção, Diagnóstico e Prognóstico na Construção Civil
Civil Construction Assessment

Boletim técnico 02 – Raúl Husni

Reparación y Refuerzo

Reparo e Reforço
Repair and Strengthening

Boletim técnico 03 – Antônio Carmona Filho e Thomas Carmona

Grietas en Estructuras de Hormigón

Fisuração nas Estruturas de Concreto
Cracking in Concrete Structures

BT 04 – Fernando Branco, Pedro Paulo e Mário Garrido

Vida Útil en la Construcción Civil

Vida Útil na Construção Civil
Service Life in Civil Construction

BT 05 – Gilberto Nery

Monitoreo en la Construcción Civil

Monitoração na Construção Civil
Monitoring in Civil Construction

BT 06 – Enio Pazini Figueiredo e Gibson Meira

Corrosión de armadura de estructuras de hormigón

Corrosão das armaduras das estruturas de concreto
Reinforcement corrosion of concrete structures

BT 07 – Alicia Mimbacas

Sostenibilidad en la Construcción

Sustentabilidade na Construção
Construction Sustainability

BT 08 – Paulo Helene e Salomon Levy

Curado del Hormigón

Cura do Concreto
Concrete Curing

BT 09 – Paulo Helene e Jéssika Pacheco

Controle da Resistência do Concreto

Control de la Resistencia del Hormigón
Conformity control for compressive strength

BT 10 – Hênio Tinoco

Responsabilidad Social en Construcción

Responsabilidade Social na Construção Civil
Social Responsibility in Civil Construction

Patrocínio de: