

**Vanderley M. John** é engenheiro civil pela Universidade do Vale do Rio dos Sinos – UNISINOS (1982). Mestre em Engenharia Civil (1987) pela Universidade Federal do Rio Grande do Sul – UFRGS. É doutor em Engenharia (1995) e livre-docente (2000) pela Escola Politécnica da Universidade de São Paulo – USP. Fez pós-doutorado no Royal Institute of Technology na Suécia (2000-2001). É professor associado do Departamento de Engenharia de Construção Civil da Escola Politécnica da USP. Diretor do CB 02 da ABNT desde 1995, representa esta organização no conselho técnico do PBQP-H. Participou diversas vezes da diretoria executiva da ANTAC, tendo sido seu presidente entre 1993 e 1995. Foi pesquisador do IPT no período de 1988 a 1995 e professor da UNISINOS (1986-1988). Atua nas áreas de Ciência de Materiais para Construção e Infra-estrutura, com ênfase em Reciclagem de Resíduos e Aspectos Ambientais.  
E-mail: john@poli.usp.br

**Neide Matiko Nakata Sato** é física pelo Instituto de física da Universidade de São Paulo, USP (1975), mestre e doutora em Engenharia Civil pela USP (1983 e 1998). Atuou como pesquisadora no Instituto de Pesquisas Tecnológicas do Estado de São Paulo S/A - IPT. Atualmente é pós-doutoranda da Escola Politécnica da USP e professora do Centro Universitário Nove de Julho - UNINOVE.  
E-mail: neidesato@uol.com.br

# 2.

## Durabilidade de componentes da construção

Vanderley M. John e Neide Matiko Nakata Sato

*“Tudo que se vê não é  
Igual ao que a gente viu há um segundo  
Tudo muda o tempo todo no mundo”  
Nelson Motta*

### Introdução

**N**a natureza nada é eterno, tudo o que existe, vivo ou inanimado, está em permanente transformação. Algumas dessas transformações, que acontecem rapidamente, podem apresentar interesse na vida prática e, portanto, devem ser consideradas em atividades de engenharia e arquitetura.

No contexto do ambiente construído, interessa conhecer as transformações que os materiais sofrem e que afetam a sua durabilidade, que é a capacidade de o edifício e suas partes manterem o seu desempenho ao longo do tempo, entendida como a capacidade de um produto de cumprir a função para a qual ele foi projetado. Embora a degradação de materiais específicos, como a madeira, tenha sido objeto de estudo sistemático há muito tempo – existem sólidos indícios que os antigos já compreendiam as causas da degradação da madeira e, em projeto, tomavam medi-

de especialistas se reuniu em torno do CIB e da RILEM, em uma comissão hoje denominada CIB W080/RILEM TC 140 (Prediction of Service Life of Building Materials and Components), para propor uma metodologia genérica para lidar com o problema de forma sistemática. Já em 1978 ocorreu a primeira conferência da série de dez da International Conference on Durability of Building Materials and Components (DBMC). No final da década de 1980, foi publicado o primeiro documento que sistematiza a metodologia e, no início deste século, a série de normas ISO 15686 – Buildings and Constructed Assets – Service Life Planning. No Brasil, os primeiros estudos no tema são de Francisco Romeu Landi (Poli/USP) e Wanderley Flauzino (IPT). No final dos anos 1990, a Antac estabeleceu um grupo de trabalho sobre o tema, que já realizou vários *workshops*, mas os conceitos não são de domínio público, apesar da sua importância.

A degradação de materiais e componentes possui grande importância econômica, pois exige dispendiosas atividades de manutenção e limita a vida útil das construções. De forma geral, assume-se que o volume de recursos consumidos nas atividades de manutenção de uma estrutura projetada adequadamente pode consumir o mesmo volume de recursos financeiros utilizados para a sua construção. Notícias sobre os efeitos da degradação da infra-estrutura pública, incluindo escolas, hospitais, pontes e rodovias, causando, inclusive, algumas mortes perfeitamente evitáveis, têm recebido ampla cobertura da imprensa. Por outro lado, a superação da carência de ambiente construído adequado no país requer não a construção, mas a formação de um estoque de casas, estradas, pontes, hospitais, etc., que esteja disponível para as gerações futuras. Sem a formação desse estoque, o país estará condenado a uma reconstrução permanente, com enormes custos econômicos, sociais e ambientais.

Como um aumento substancial da durabilidade das construções, na maioria das vezes, pode ser obtido com pequenas alterações de projeto, com aumento marginal das cargas ambientais e do custo, a durabilidade é uma ferramenta importante para o desenvolvimento sustentável.

A estimativa de vida útil de um produto nas condições de uso é um dos requisitos para a realização de uma análise do ciclo de vida de produto. É, também, fundamental em análises de desempenho econômico, a partir do conceito de custo global, que inclui não apenas os custos de construção, mas também os custos de manutenção e mesmo de demolição.

## Durabilidade e Desempenho

### O conceito de desempenho

A análise da eficiência de uma construção deve ser feita pelo grau de satisfação com que o produto construído atende às funções para as quais ele foi projetado ou, em outras palavras, atende às necessidades dos seus usuários. Essa análise, em grande parte, independe da solução material adotada.

O Quadro 1 apresenta as necessidades dos usuários, tal como definidas pela ISO 6241 para edifícios, que incluem durabilidade e economia.

Segurança	Adaptação ao uso
Estrutural	Conforto
Ao fogo	Acústico
No uso	Tátil
Estanqueidade	Antropodinâmico
Ar	Higrotérmico
Água	Adaptação ao uso
Pureza do ar	Economia
Higiene	Durabilidade

Quadro 1 – Necessidades dos usuários de acordo com a ISO 6241. Desenvolvida há mais de 20 anos, a lista não inclui necessidades relativas à preservação do ambiente.

## Desempenho e vida útil

Durabilidade é a capacidade do edifício e suas partes de manterem ao longo do tempo o desempenho, quando expostos a condições normais de uso. Durabilidade não é uma propriedade inerente de um material ou componente. A durabilidade de um produto pode ser descrita pela variação do desempenho ao longo do tempo, ou seja, como a capacidade do produto em atender às demais necessidades dos usuários varia ao longo do tempo (Figura 1). A variação de desempenho pode ser descrita de forma mais conveniente por meio de um indicador de degradação, característica mensurável que permite o acompanhamento do(s) efeito(s) dos processos de degradação no desempenho. Por exemplo, quando a cor é uma característica relevante no desempenho, a variação da cor pode ser utilizada como um indicador de degradação.

Ao contrário do senso comum, durabilidade não é uma propriedade do material, mas o resultado da interação entre o material e o ambiente que o cerca, incluindo aspectos de microclima. Assim, um mesmo material apresenta funções de desempenho *versus* tempo diferentes para diferentes condições de exposição. Como a durabilidade é uma função do desempenho, um mesmo material pode apresentar funções de desempenho *versus* tempo diferentes se forem mantidas as condições de exposição mas alterada a função do material.

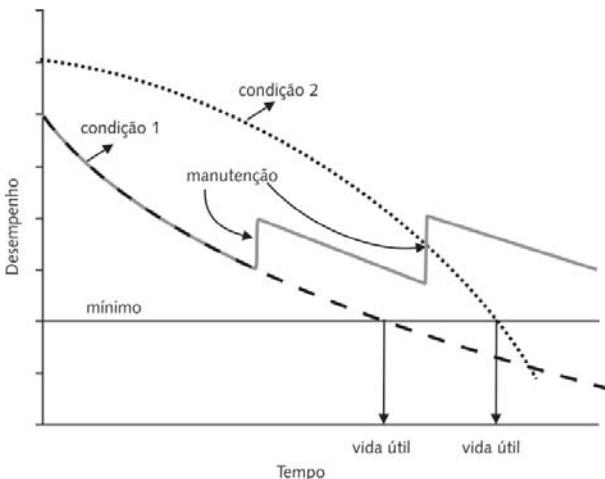


Figura 1 – Função de desempenho versus tempo descrevendo a durabilidade de um produto em determinadas condições ambientais. Atividades de manutenção podem recuperar o desempenho perdido, postergando o fim da vida útil.

A vida útil (em inglês, *service life*) é o período durante o qual um produto tem desempenho igual ou superior ao mínimo requerido, ou seja, as necessidades dos usuários são atendidas. A vida útil é, portanto, uma quantificação da durabilidade em determinadas condições.

## Obsolescência

Muitas vezes construções ou suas partes se tornam inadequadas para cumprir a função para a qual foram projetadas, sem que ocorra a degradação dos materiais empregados, mas tão-somente por mudanças nas necessidades dos usuários para as quais a construção não pode ser adaptada a um custo competitivo. Isso ocorre em decorrência da evolução tecnológica na área da construção, por mudanças de cultura por parte dos usuários, por razões econômicas, por mudanças sociais (Figura 2) ou até pelo desaparecimento da função para a qual o produto foi desenhado. Os gasômetros existentes nas grandes cidades brasileiras são exemplo de obsolescência funcional.

Os efeitos da mudança cultural são facilmente observáveis em acabamentos ou até em fachadas de edifícios. Os revestimentos cerâmicos, cujas vidas úteis ultrapassam 100 anos, são substituídos muito antes de qualquer degradação no seu desempenho tecnológico.



Figura 2 – O presídio do Carandiru sendo demolido por ter se tornado socialmente obsoleto

## Agentes de degradação

Os agentes (ou fatores) de degradação são quaisquer entes que agem sobre os materiais ou componentes de uma construção e que provocam alterações nos materiais que diminuem o seu desempenho.

Os agentes de degradação podem ser de natureza mecânica, eletromagnética, térmica, química ou biológica (Quadro 2).

Natureza	Classe
Agentes mecânicos	Gravidade Esforços e deformações impostas ou restringidas Energia cinética
Agentes eletromagnéticos	Vibrações e ruídos Radiação Eletricidade Magnetismo
Agentes térmicos	Níveis extremos ou variações muito rápidas de temperatura
Agentes químicos	Água e solventes Agentes oxidantes Agentes redutores Ácidos Bases Sais Quimicamente neutros
Agentes biológicos	Vegetais e microrganismos Animais

Quadro 2 – Natureza dos agentes de degradação (ISO 15686-2, 2001)

A origem dos agentes de degradação é diversa: o meio ambiente (clima, poluição, ventos, componentes do ar como o O<sub>3</sub>), o carregamento da construção (cíclico

ou contínuo), biológica (fungos, bactérias, roedores, vegetais), produzidos pelo uso da construção (como o desgaste por abrasão, impactos) ou até mesmo incompatibilidade química ou física entre materiais (corrosão eletrolítica) ou entre fases de um mesmo material (a reação alcali-agregado no concreto). O Quadro 3 apresenta a lista de agentes ou fatores de degradação publicada originalmente pela ISO 6241.

Fatores de uso	Carregamento
Desgaste	Deformação lenta
Atividades de manutenção	Fadiga
Projeto	Água e seus derivados
Incompatibilidade	Cargas de uso
Química	Ambientais
Física	Radiação
Biológicos	Temperatura
Roedores	Água
Fungos	Constituintes do ar e poluentes
Bactérias	Gelo/degelo
...	Vento

Quadro 3 – Fatores de degradação de acordo com a ISO 6241/1984

Muitas vezes um agente de degradação de uma natureza causa efeito de caráter diverso. Esse é o caso da temperatura: além de a elevação da temperatura provocar um aumento na taxa de degradação, tal como previsto por Arrhenius, ela também provoca variações dimensionais, que podem levar ao surgimento de tensões.



## Microclima e a degradação

Os agentes de degradação presentes na atmosfera (muitas vezes descritos como ambientais), isto é, clima e poluição, são muito importantes e, na maioria das vezes, determinantes da degradação dos materiais utilizados no envelope do edifício e das demais construções. Por sua natureza, a intensidade desses fatores varia no espaço e, do ponto de vista da engenharia, o mapeamento deles é importante. A variação espacial pode ser descrita em diferentes escalas (Figura 3). A escala macro pode ser descrita por meio de mapas confeccionados a partir dos dados climatológicos, como chuva, vento e temperatura (inclusive amplitude térmica), podendo incluir dados de poluição. Na descrição ao nível meso, os efeitos do terreno e do ambiente construído devem ser levados em conta. No nível local, a distância de fontes de poluição, sombreamento, etc., também deve ser incluída. Alguns efeitos locais, como efeito de ruas e rodovias na concentração de poluentes, já estão descritos pelos modelos de dispersão de poluentes. Já o microclima descreve condições ambientais nas quais o material está inserido, que são o resultado do clima local mediado por decisões de projeto. Um exemplo da influência do microclima determinado por decisões de projeto é o efeito da introdução de beirais que protejam as paredes de madeira da chuva e, ao manterem a madeira seca, evitam o ataque por fungos apodrecedores (Figura 3). Assim, o projeto define a durabilidade de uma solução construtiva.

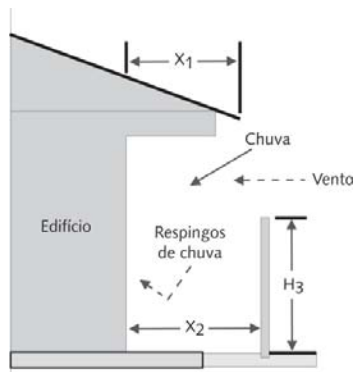
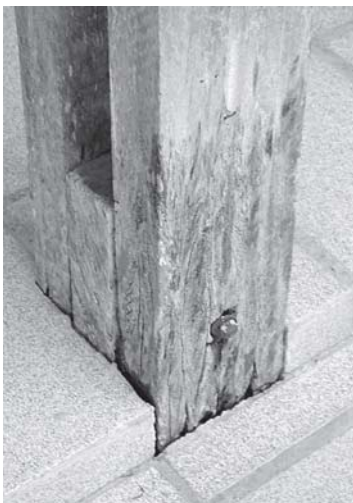


Figura 3 – Esquema analítico da influência de detalhes de projeto no controle do tempo durante o qual a estrutura de madeira permanece úmida e, portanto, suscetível à biodegradação (FOLIENTE et al., 2002). Imagem mostrando a influência do microclima na biodeterioração de madeira.

## Sistemas de informações geográficas e os fatores de degradação<sup>1</sup>

Nos anos recentes surgiram os sistemas de informações geográficas (SIG), sistemas que permitem georreferenciar uma base de dados, facilitando a recuperação e o tratamento de dados para quaisquer coordenadas específicas. Essas ferramentas permitem a apresentação da intensidade dos diferentes agentes de degradação nos diferentes pontos de uma determinada região geográfica. Dependendo do refinamento dos dados, é possível apresentar dados desde o nível macro até o nível local (HAAGENRUD et al., 1996).

O mapeamento GIS da intensidade de parâmetros atmosféricos já é uma prática comum em boa parte do mundo, incluindo cidades da Turquia (ELBIR, 2004) e Oslo (HAAGENRUD, 2004). A Figura 5 apresenta um mapa de amplitude térmica média mensal, produzido no Brasil a partir de dados meteorológicos, utilizando ferramenta SIG.

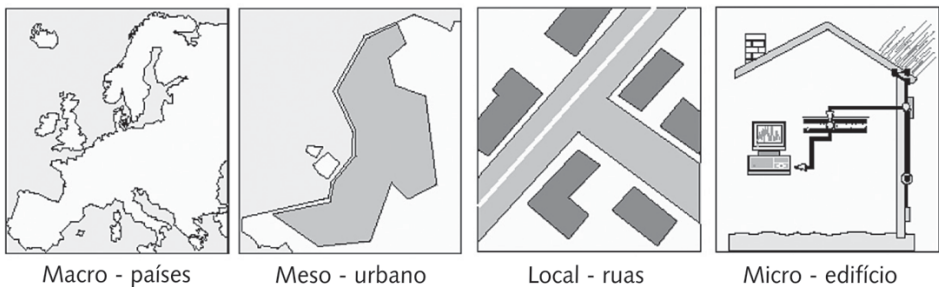


Figura 4 – Escalas geográficas segundo as quais é possível descrever a variação dos agentes de degradação ambiental (HAAGENRUD, 2004)

<sup>1</sup> O uso de ferramentas SIG em estudos de durabilidade é objeto do projeto. Mapeamento dos Agentes de Degradação dos Materiais, estudo integrado ao Programa de Tecnologia de Habitação (Habitare), da Financiadora de Estudos e Projetos (Finep), sob coordenação da Prof.<sup>a</sup> Maryangela G. Lima.

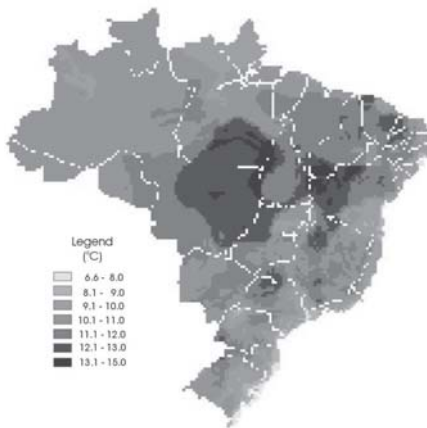


Figura 5 – Mapa da amplitude térmica média mensal para o Brasil, produzido a partir de dados climatológicos usando ferramenta SIG, produzido pelo projeto Habitare coordenado pela Prof.<sup>a</sup> Maryangela G. Lima (ITA)

## Sinergismo entre agentes

Em condições normais de uso, um produto está normalmente exposto a mais de um fator de degradação, simultaneamente. Nessa situação existe a possibilidade de sinergia entre os diferentes fatores de degradação: a degradação resultante é diferente da soma das degradações produzidas pelos fatores, individualmente. Um exemplo de sinergia é a interação entre ciclos de molhagem e secagem e a velocidade de carbonatação de concretos. Esse fato causa dificuldades adicionais ao estudo da degradação, tanto em termos de simulação da degradação em laboratório quanto na interpretação de resultados de envelhecimento, em condições reais de uso.

## Mecanismos de degradação

Os agentes de degradação provocam alterações no material, através de reações químicas, processos físicos ou mecânicos, causando perdas do desempenho de um produto. Corrosão eletrolítica em metais e dissolução de rochas carbonáticas por chuvas ácidas são exemplos de mecanismos de degradação. A compreensão dos mecanismos de degradação é a base científica da durabilidade, o que facilita a criação de modelos de degradação, orientando medidas para o aumento da resistência dos materiais à degradação e auxiliando no desenvolvimento de ensaios de envelhecimento acelerado.

## Indicadores de degradação

Os indicadores de degradação são propriedades, preferencialmente quantificáveis, que expressam o impacto da degradação no desempenho do produto. Em outras palavras, um indicador de degradação é uma propriedade do produto relevante para o desempenho na aplicação em questão, ou que possa ser facilmente correlacionada com o desempenho.

Indicadores de degradação comuns incluem variação de cor ou brilho, de propriedades mecânicas, como energia de fratura, alterações em rugosidade, perda de massa, etc.

Indicadores de degradação que possam ser medidos de forma não destrutiva apresentam grandes vantagens, pois permitem acompanhar a evolução do desempenho de um mesmo exemplar ao longo do tempo.

## Métodos de estudo de envelhecimento

Para realizar a previsão da durabilidade dentro de um prazo de tempo razoável, algumas estratégias podem ser realizadas:

- a) ensaios de envelhecimento acelerado;
- b) ensaios de envelhecimento natural; e
- c) estudos de campo.

### Ensaio de envelhecimento acelerado

Os ensaios de envelhecimento acelerado são realizados em laboratório, simulando a ação de agentes de degradação em intensidades muito superiores às esperadas em condições reais de uso.

É importante observar que não existem ensaios de envelhecimento acelerado universais: para cada mecanismo (ou combinação de agente de degradação com material) é necessário um ensaio completamente diferente.

Existem vários equipamentos utilizados nesse tipo de ensaio. Equipamentos que expõem as amostras a ciclos de calor, água e radiação UV (como Weather-

Ometer, da Atlas, e o Q-Sun, da Q-Panel) e às câmaras de C-UV, que combinam condensação com radiação ultravioleta, são utilizados em estudos de polímeros e são disponíveis comercialmente. Esses equipamentos utilizam lâmpadas de xenônio, que vão perdendo a eficiência ao longo do tempo e, portanto, possuem vida útil limitada. Esses equipamentos são irrelevantes no estudo de materiais pétreos, metálicos ou cimentícios, a menos que tais materiais tenham em sua superfície uma película orgânica, situação na qual se analisará a durabilidade da película.

As câmaras de carbonatação acelerada, onde a umidade é controlada e o teor de CO<sub>2</sub> é superior ao da atmosfera (algumas vezes com valores até 100% acima dos encontrados na atmosfera), à pressão atmosférica ou até à alta pressão, permitem acelerar as reações de carbonatação de materiais cimentícios, reações que tornam possível a corrosão do aço eventualmente embutido.

Equipamentos de molhagem e secagem são utilizados para acelerar o envelhecimento de compósitos de cimento reforçado com celulose ou outras fibras vegetais (DIAS, 2005). Um exemplo de um desses equipamentos pode ser visto na **Figura 5**. O aquecimento em atmosfera úmida é um método eficiente para acelerar a degradação de alguns produtos, como o das fibras de vidro utilizadas como reforço de matriz alcalina cimentícia, conforme demonstrado por Litherland, Oakley e Proctor (1981) e Aindow, Oakley e Proctor (1984), através da comparação de resultados de ensaios acelerados com ensaios de envelhecimento natural, em diferentes condições climáticas.

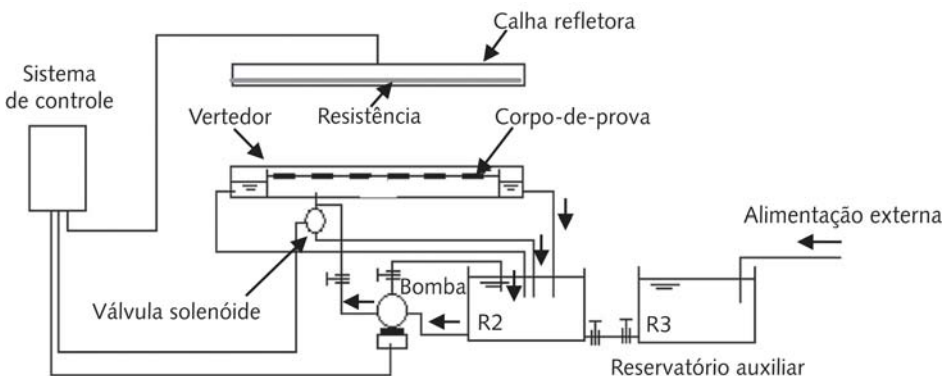


Figura 6 – Equipamento de envelhecimento acelerado de compósitos de fibrocimento, através de ciclos de molhagem e secagem, desenvolvido na Escola Politécnica da USP (DIAS, 2005), no âmbito de projeto Habitare/Finep

Os ensaios acelerados introduzem, muitas vezes, alterações nos mecanismos de degradação (por exemplo, a carbonatação pode levar à formação de produtos outros que não a calcita), dificultando a extrapolação das conclusões para situações de uso. Esse é um aspecto que sempre deve ser verificado.

Além disso, normalmente, esses ensaios implicam a exposição de pequenas amostras a um ou mais agentes simultaneamente, enquanto, em condições de uso, outros agentes de degradação certamente estão presentes. No caso de materiais cimentícios, cuja matriz sofre melhora contínua de suas propriedades mecânicas ao longo do tempo, devido à hidratação continuada, a exposição de corpos-de-prova ao envelhecimento acelerado, em idades em que a hidratação ainda não se completou, pode levar a conclusões incorretas, com o ganho de resistência mecânica devido à hidratação podendo compensar a perda provocada pela degradação acelerada.

## Envelhecimento natural

A exposição de corpos-de-prova aos agentes atmosféricos é técnica universalmente adotada, seja em estudos de corrosão, carbonatação, polímeros e tintas. Via de regra, os corpos-de-prova expostos são de pequenas dimensões e ficam orientados de forma a maximizar a exposição à radiação solar.

Nesses sítios de envelhecimento, as condições ambientais como temperatura, radiação em diferentes faixas, umidade, vento, pH da chuva, partículas no ar e concentração de poluentes ( $\text{SO}_x$ ,  $\text{NO}_x$ ,  $\text{CO}_2$ , etc.) são monitoradas de forma permanente, e o indicador de degradação é medido periodicamente. Dessa forma, expondo um mesmo material em sítios diferentes, é possível correlacionar intensidades de agentes de degradação com variação no desempenho (ver item Funções dose-resposta, a seguir). O projeto Durar teve por objetivo estruturar um embrião de rede brasileira de estações de envelhecimento natural.

O prazo para obtenção de resultados desses estudos é longo, mas a degradação decorrente de fatores atmosféricos é a que o material irá enfrentar em condições de uso. Uma forma de acelerar a obtenção de resultados é utilizar técnicas que sejam extremamente sensíveis a pequenas variações nas propriedades em questão.

As normas técnicas ASTM Method G7-89 – “Standard Practice for Atmospheric Environmental Exposure Testing of Non-metallic Materials” e ISO 9226 – “Determination of corrosion rate of standard specimens for the evaluation of corrosivity” padronizam os estudos de envelhecimento natural.

Uma variante recente, que acelera o envelhecimento natural, são os suportes de corpos-de-prova ativos, que acompanham a trajetória do sol, mantendo em todas as horas do dia uma exposição máxima à radiação natural.

Uma limitação dos ensaios de envelhecimento natural é que fatores de uso e aqueles relacionados com a interação entre os diversos materiais e componentes da construção não são considerados.

## Envelhecimento em uso

A exposição de materiais em construções submetidas a condições reais de uso é uma forma interessante de acompanhar a degradação de produtos. A principal vantagem é a ausência de qualquer artifício no processo, com todos os fatores de degradação atuando simultaneamente na intensidade real. Eventuais incompatibilidades com outros materiais ou produtos presentes nos edifícios, efeitos de manutenção e montagem, bem como os efeitos dos fatores de uso são detectáveis.

Por outro lado, muitas vezes não é possível medir acuradamente a intensidade dos fatores de degradação que atuam, de fato, sobre o produto, o que introduz dificuldades para a modelagem baseada em funções dose-resposta.

Uma possibilidade interessante é realizar estudos em um universo de edifícios que empreguem um mesmo produto, o que torna possível identificar a distribuição da vida útil de uma população de determinado produto. John (1987) apresenta uma metodologia desenvolvida pelo Ministério do Japão que permite, a partir de uma inspeção baseada em escala qualitativa, estimar o nível de degradação de um universo de componentes e até mesmo estimar a distribuição da sua vida útil ou a vida útil média.

Nível de degradação	Condições do componente
1	Sem deterioração ou minimamente deteriorado
2	Requer tarefas de manutenção e pequenos reparos
3	São necessárias operações de reparo parciais
4	São necessários reparos para ampliação da vida útil do componente
5	Extensa degradação. Necessidade de reposição do componente

Quadro 4 – Escala qualitativa de nível de degradação proposta por Ishizuka (JOHN, 1987)

## Funções dose-resposta

A intensidade da degradação pode ser correlacionada com a dose de agentes de degradação a que o material esteve exposto. Quando existirem dados da degradação do material submetido a várias doses dos agentes de degradação por período de tempo considerável, é possível estimar a correlação por regressão entre a dose dos agentes gerando uma “função dose-resposta”. Essa função pode ser ajustada por regressão múltipla.

Nos últimos anos uma série de funções dose-resposta foi construída a partir do envelhecimento de amostras padrão, em diferentes estações de envelhecimento, estabelecidas em diferentes sítios (HAAGENRUD, 2004). Um dos estudos mais abrangentes foi patrocinado pela ONU ECE Convention on Long-Range Transboundary Air Pollution, conhecida como ICP Materials<sup>2</sup>. Esse estudo gerou funções dose-resposta a partir de 39 sítios de envelhecimento natural, em 12 países europeus, de materiais como aço, chapas galvanizadas, rochas naturais e alumínio.

<sup>2</sup> O link <http://www.corr-institute.se/ICP-Materials> apresenta excelente material sobre o estudo.



Abaixo são apresentados dois exemplos de funções dose-resposta produzidas para aço e rocha calcária de Portland.

Aço (N=148, R<sup>2</sup>=0,68)

$$ML = 34 [SO_2]M^{0,33} \exp\{0,020Rh + f(T)\}t^{0,33}$$

f(T) = 0,059(T-10) quando T < 10°C, e f(T) = -0,036(T-10) para T > 10°C

Calcário de Portland (N=100, R<sup>2</sup>=0,88)

$$R = 2,7 [SO_2]^{0,48} \exp\{-0,018T\}t^{0,96} + 0,019Rain[H^+]t^{0,96}$$

T é a temperatura, em °C; Rh é a umidade relativa, em %; [pp] é a concentração de SO<sub>2</sub>, em µg/m<sup>3</sup>; t é o tempo, em anos; Rain a precipitação pluviométrica, em mm e [H<sup>+</sup>] a acidez (mg/l). Como indicadores de degradação foram utilizadas: variação de massa (ML é perda de massa, g/m<sup>2</sup>), profundidade da reação, medida a partir da superfície (R, µm), espessura lixiviada, etc.

Uma forma conveniente de gerar ferramentas de projeto, a partir de funções dose-resposta, é a construção dos mapas de degradação ou vida útil para o material. O trabalho pioneiro foi o de Scheffer (1971), que, a partir do conhecimento básico da influência da temperatura no crescimento de fungos xilófagos e de resultados de envelhecimento natural de amostras, em diferentes regiões climáticas, gerou uma equação matemática que expressa o risco de degradação, em função da temperatura e disponibilidade de umidade. Foliente et al. (2002) realizaram trabalho similar, que resultou em mapas de deterioração de madeira para a Austrália, produzidos a partir do conhecimento básico da influência da temperatura no crescimento de fungos xilófagos e de resultados de envelhecimento natural de amostras, em diferentes regiões climáticas, e gerou uma equação matemática que expressa o risco de degradação, em função da temperatura e disponibilidade de umidade.

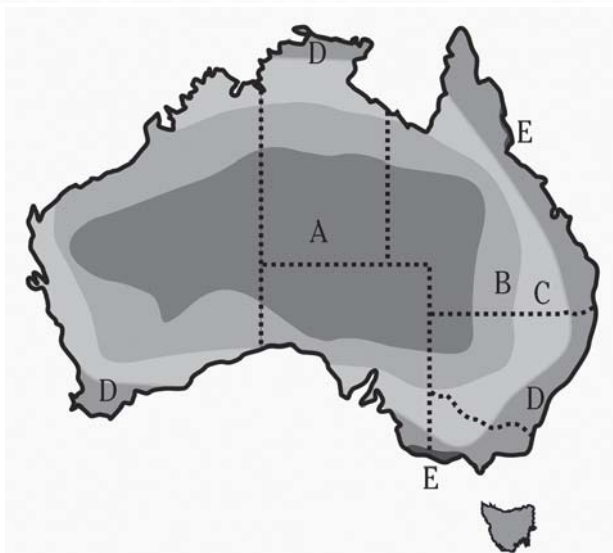
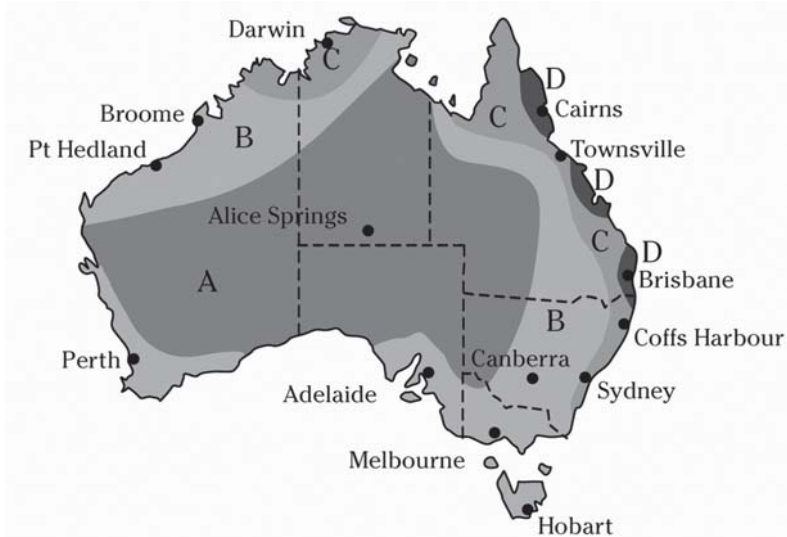


Figura 7 – Mapa de risco de biodeterioração de madeiras expostas ao intemperismo natural, em contato com o solo (à esquerda) e acima do solo (à direita), na Austrália. (FOLIENTE et al., 2002)

Podem, também, ser estimados impactos ambientais da degradação. Reiss et al. (2004) usam as funções dose-resposta para calcular a contaminação ambiental causada pela lixiviação do zinco e do cobre, presentes nos produtos da corrosão, para o ambiente, pela chuva.

## Previsão da vida útil de referência

A estimativa da vida útil de determinada solução construtiva apresenta grande interesse do ponto de vista de engenharia, por permitir estimar o impacto de decisões de projeto em atividades e custo de manutenção, impacto ambiental e até na vida útil final da edificação.

A norma ISO 15686-2:2001 apresenta metodologia para previsão de vida útil de componentes da construção, que é resumida na Figura 8. A metodologia proposta pode ser utilizada para um simples estabelecimento de uma função de desempenho *versus* tempo, para um local específico, ou pelo estabelecimento de funções dose-resposta válidas para uma gama de condições ambientais.

A previsão de vida útil de acordo com a metodologia se baseia em um processo iterativo, com tomadas de decisão durante as etapas intermediárias, permitindo melhorar as previsões, em função do conhecimento disponível. As etapas estabelecidas no fluxograma são descritas resumidamente a seguir.

### Definição do problema

Inicialmente, devem ser definidos o problema e o escopo do estudo. O estudo pode ser bem específico como quando se quer determinar, por exemplo, a sensibilidade da previsão de vida útil de um componente a pequenas alterações nas condições de uso. Pode ser, também, um estudo mais genérico, com o objetivo de estudar um componente submetido a diversas condições de exposição e de uso e determinar o seu desempenho ao longo do tempo, em todas as aplicações previstas para o componente.

Essa etapa de definição envolve, ainda, a identificação do contexto ambiental, levando em conta o uso do componente e os agentes que atuam na construção, no sentido amplo.

Como durabilidade depende da função que o produto exerce, a identificação das características e dos critérios de desempenho, críticos na aplicação em questão, é

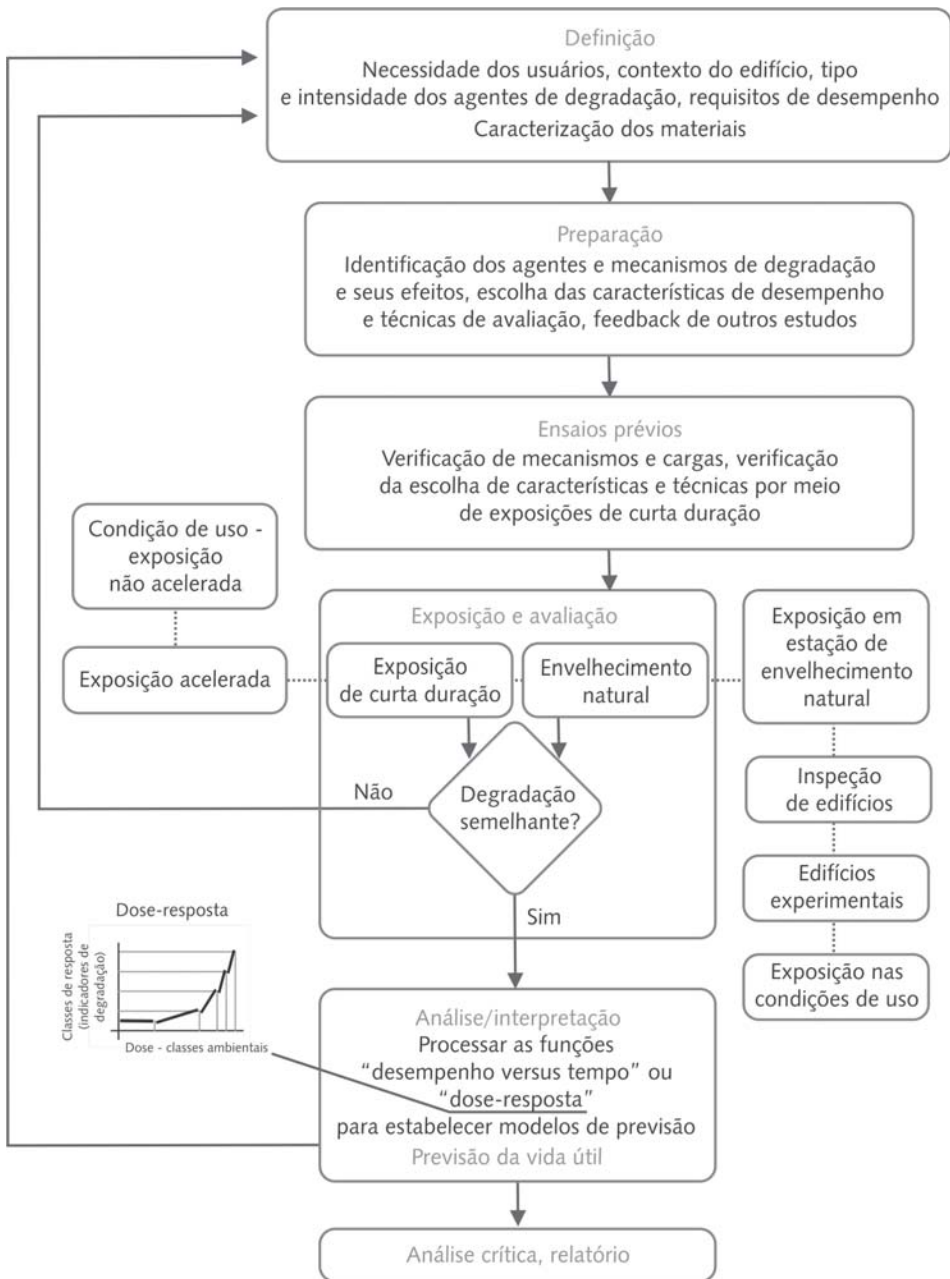


Figura 8 – Metodologia para previsão da vida útil de componentes de edifícios

também necessária. Segue um exemplo que mostra a importância do tema: em polímeros e madeira utilizados como acabamentos (ou estética), as alterações de cor e brilho são relevantes; já quando esses produtos cumprem função estrutural, as alterações de aparência podem muitas vezes ser negligenciadas.

Finalmente, são importantes as caracterizações química, física e da microestruturais dos materiais, pois as perdas de desempenho serão produzidas por alterações nos materiais. A compreensão exata da combinação de agentes de degradação e mecanismos de degradação depende da identificação das alterações das propriedades físico-químicas que a degradação provoca nos materiais.

## Preparação

Depois da definição do escopo do estudo devem ser identificados os agentes de degradação, mecanismos e indicadores de degradação, relevantes na aplicação específica, e as intensidades máximas e mínimas esperadas. O Quadro 3 apresenta os agentes de degradação mais comuns (ISO 15686-2, 2001).

A revisão bibliográfica é importante fonte de informações nessa etapa. A CIB Publication-295 (CIB, 2004) apresenta uma boa revisão sobre os principais mecanismos e fatores de degradação de alguns dos materiais comumente empregados na construção.

A identificação equivocada dos agentes, fatores e mecanismos de degradação elimina qualquer possibilidade de sucesso do estudo, pois leva ao projeto de ensaios de envelhecimento acelerado e seleção de indicadores de degradação equivocados. Um exemplo prático: um estudo realizado no Brasil escolheu submeter painéis de concreto armado a ensaio de envelhecimento acelerado, por ciclos de molhagem e secagem, que acelerou a hidratação da matriz de cimento, melhorando o desempenho geral do produto. Como o mesmo estudo utilizou a resistência mecânica como indicador de degradação, concluiu, erroneamente, que a durabilidade do produto era infinita, pois o envelhecimento melhorava progressivamente o desempenho mecânico. O real problema de degradação – corrosão das armaduras após carbonatação – não foi analisado.

## Ensaio prévios

A importância de um conjunto de ensaios prévios, bem realizados, combinado com uma ampla revisão bibliográfica, nunca pode ser subestimada. Korman et al. (2002) relatam o emprego de radiação UV e ciclos de calor e umidade no envelhecimento acelerado de concreto reforçado com fibras de aço, a ser exposto à abrasão por água – procedimento totalmente inadequado ao envelhecimento acelerado do produto, uma vez que o concreto e o aço são insensíveis à radiação UV e o concreto, quando exposto à umidade e ao calor, melhora seu desempenho mecânico, utilizado como indicador de degradação.

Assim, os ensaios prévios são feitos para testar hipóteses adotadas e resolver dúvidas, ou seja, a sua realização é uma etapa importante do processo. Experimentos mal formulados podem levar a conclusões equivocadas, com conseqüências desastrosas. Mesmo que o equívoco seja percebido mais adiante, as conseqüências são graves, uma vez que os estudos de degradação envolvem considerável volume de recursos e podem se estender por períodos relativamente longos, tornando cara e demorada a correção do problema.

Aspectos como identificação dos agentes de degradação relevantes, confirmação e detalhamento dos mecanismos envolvidos, estimativa das intensidades dos agentes de degradação identificados para realizar envelhecimento acelerado, sem alterações significativas nos mecanismos de degradação, teste da adequação e da precisão dos indicadores de degradação e das técnicas utilizadas para acompanhar a variação deles são muito importantes.

## Programas de exposição ao envelhecimento

Os programas de exposição ao envelhecimento devem ser cuidadosamente planejados, levando-se em conta o escopo do estudo e os resultados das etapas anteriores de definição do estudo, preparação e ensaios prévios.

Um programa convencional deve combinar estudos de curta duração com estudos de longa duração. Estudos de curta duração incluem tanto os ensaios acelera-

dos projetados para intensificar a ação do agente relevante quanto os ensaios de envelhecimento natural e, até mesmo, em uso, utilizando-se ferramentas de medida suficientemente sensíveis, que permitam confirmar as tendências de degradação em longo prazo. Ensaios de longo prazo podem incluir envelhecimento natural, construção de protótipos e envelhecimento em uso. As degradações observadas em exposições de curta duração aceleradas devem ser comparadas com as observadas nas condições de uso. Se nos ensaios de curta duração forem induzidos mecanismos não representativos das condições de uso, o programa de exposição deve ser alterado.

Quando se pretende produzir funções dose-resposta, é necessário que o programa de estudos inclua situações em que o produto seja exposto a diferentes intensidades dos diversos fatores de degradação relevantes. O planejamento estatístico é fundamental para permitir a generalização de conclusões. Deve-se mencionar que a variabilidade das propriedades pode aumentar significativamente com o envelhecimento, particularmente em estudos em que pode haver diferenças de microclima.

Atenção particular deve ser dedicada à possível ocorrência de microclimas que alterem substancialmente as condições ambientais em relação ao entorno, particularmente em estudos em condições reais de uso (edifícios).

## Análise e interpretação

A partir de avaliações de desempenho efetuadas ao longo dos vários programas de exposição, é determinada a vida útil prevista, envolvendo duas ou três etapas (ISO 15686-2:2001):

- a) a partir de dados de avaliação de desempenho são estabelecidas as funções desempenho *versus* tempo ou dose-resposta, nas condições de exposição;
- b) se as condições de exposição não abrangerem as condições em que o componente vai ser avaliado, deve ser determinada a função desempenho *versus* tempo ou dose-resposta na condição desejada, sintetizando, modelando e/ou interpolando ou extrapolando as funções estabelecidas em (a); e

c) a função desempenho *versus* tempo ou dose resposta, obtida nas etapas (a) ou (b), é utilizada para determinar a vida útil prevista para o componente.

## Planejamento da vida útil, conforme a ISO 15686

A norma ISO 15686-2:2001 define planejamento de vida útil como um processo de projeto que procura garantir, na medida do possível, que a vida útil de um edifício seja igual ou superior à vida de projeto, levando em conta (e, preferencialmente, otimizando) os custos globais (do ciclo de vida) do edifício. Implica, portanto, estimar a vida útil de cada parte do edifício e planejar as substituições das partes que tenham vida útil menor que a projetada, para a construção como um todo.

O processo inclui a definição da vida útil de projeto, definida como aquela “pretendida pelo projetista e cliente para sustentar as decisões de especificação”. Esse valor pode ser estabelecido com base em critérios econômicos, ambientais ou até mesmo técnicos.

Assim, parte do processo de planejamento de vida útil constitui-se na otimização do custo global, um parâmetro de avaliação da performance econômica do edifício. O custo global é composto do custo de construção mais o custo de manutenção, operação e demolição da construção, menos seu custo residual, sendo todos os valores considerados para uma mesma data (valor presente).

O centro da metodologia é o cálculo da vida útil estimada do componente (VUEC), nas condições reais do projeto, a partir dos dados da vida útil prevista pelas funções desempenho *versus* tempo ou dose-resposta, denominada vida útil de referência do componente (VURC), pela multiplicação por fatores que levem em conta particularidades do projeto, conforme a equação abaixo:

$$\text{VUEC} = \text{VURC} \times \text{A} \times \text{B} \times \text{C} \times \text{D} \times \text{E} \times \text{F} \times \text{G}$$

Os fatores de A até G levam em conta o efeito das diferenças entre as condições de uso esperadas no projeto e as condições observadas durante o processo de



previsão da VURC, especificamente:

- (A) quantidade de componentes;
- (B) nível de projeto;
- (C) nível de execução do serviço;
- (D) ambiente interno;
- (E) ambiente externo;
- (F) condições de uso; e
- (G) nível de manutenção.

Esse ajuste é conhecido pelo método dos fatores e é uma forma simplificada de ajustar uma informação geral – vida útil de referência – às peculiaridades de projeto, caso seja considerado necessário, documentando-se todas as correções feitas.

Uma parte essencial do planejamento da vida útil da construção é a percepção de que esta é limitada pela vida útil das partes não substituíveis, como componentes estruturais, fundações, etc. Uma falha na estimativa da vida útil estimada desses componentes afeta a vida útil projetada para toda a construção.

Idealmente, a estimativa da vida útil de referência do componente seria fornecida pelo fabricante, estimada a partir de estudos de previsão de vida útil, conforme especificado no item anterior. A União Européia emitiu uma diretiva tornando obrigatório que os fabricantes de materiais declarem a vida útil dos seus produtos (The Council of the European Communities. Directive 89/106/EEC, 1998), e algumas normas técnicas e códigos de prática já adotam modelos para a previsão da vida útil em diferentes condições ambientais.

Na ausência desses dados, existem outras fontes para previsão da vida útil, como, por exemplo, a experiência ou observações anteriores de materiais de construção semelhantes ou utilizados em condições similares; avaliações de durabilidade feitas em processos de concessão de certificados de Aprovação Técnica; dados publicados em literatura; e códigos de obras.

## A rede DURAR de sítios de envelhecimento natural

O projeto **Rede Brasileira de Estações de Envelhecimento Natural para Estudo da Durabilidade** implantou e opera uma rede de quatro estações de envelhecimento natural, que está disponível para a comunidade técnica, acadêmica ou industrial.

As estações estão localizadas em São Paulo, Rio Grande, Belém e Pirassununga, sendo essa última instalada com recursos da Fapesp. Em seu conjunto, estão representados climas diferentes, com quatro situações bastante diferentes em termos de clima e contaminantes. A estação de Belém encontra-se próxima à área de floresta em região quente, úmida, com chuvas muito freqüentes. A estação de Rio Grande, uma região subtropical de invernos frios e verões quentes, encontra-se à beira-mar.



Figura 9 – Localização das estações de envelhecimento natural da rede DURAR

Localidade	Temperatura °C			Precipitação (mm)	Latitude	Longitude
	Média	Média das máximas	Média das mínimas			
Belém	26,2	31,4	22,7	2.830	1° 27'S	48° 30'W
Rio Grande	18,0	22,2	14,6	1.300	32° 02'S	52° 06'W
São Paulo	22,0	28,0	18,0	1.548	23° 34'S	46° 27'W
Pirassununga				1.363	21° 59'46''S	47° 26'33''W

Quadro 5 – Normais climatológicas das cidades onde estão localizadas as estações da rede DURAR



(a)



(b)



(c)



(d)

Figura 10 – Vista das estações de envelhecimento: (a) Pirassununga, (b) Rio Grande, (c) São Paulo - com os sensores em primeiro plano - e (d) Belém.

## Infra-estrutura

As estações de envelhecimento são áreas isoladas de 600 m<sup>2</sup>. A estação de São Paulo está localizada no teto do edifício da engenharia civil, e as demais, no solo, em áreas que atendem aos critérios para estações climatológicas.

As estações estão equipadas com sistemas de medida das seguintes grandezas:

- a) temperatura do ar (-40 °C a +60 °C), termopares marca Vaisala;
- b) umidade relativa do ar (0% a 100%), por higrômetros da marca Vaisala;
- c) radiação solar global, na faixa de 305 nm a 2800 nm, através de piranômetros da marca Kipp & Zonen, com elemento sensor termopilha;
- d) radiação solar, na faixa do ultravioleta (300 nm a 400 nm), através de piranômetros da marca Kipp & Zonen;
- e) precipitação, através de pluviômetro de balsa, com resolução de 0,2 mm, da marca Hydrological Services;
- f) pH da água de chuva, através de equipamento da marca CSI;
- g) tempo de superfície úmida (*time of wetness*), através de equipamento da marca Wetcorr–Nilu;
- h) velocidade (0 m/s a 60 m/s) e direção (0 a 360 graus) do vento, através de equipamento marca R.M. Young; e
- i) temperatura do solo, através de termômetro da marca Campbell Scientific Inc.

Todos os sensores estão conectados a um equipamento programável de aquisição de dados, alimentado por sistema de baterias, conectadas a células fotovoltaicas, que podem manter o sistema independente da rede elétrica por vários meses. A ligação *on-line* do sistema, via Internet, está em implementação, o que aumentará ainda mais a confiabilidade dos dados.

## Resultados obtidos

### Disponibilização de infra-estrutura para a sociedade

As estações estão em operação e já oferecem estrutura para quatro projetos de pesquisa:

1. Estudo da lixiviação de biocida, em tinta de base aquosa, e sua relação com o crescimento de microrganismos. Esse estudo está em desenvolvimento no Projeto “Impacto ambiental das tintas imobiliárias”, financiado pela Finep/Habitare e Abrafati, sob coordenação de Vahan Agopyan (Poli/USP);
2. Estudo da durabilidade de tintas acrílicas, por meio da exposição de películas livres ao envelhecimento natural. A pesquisa faz parte do projeto “Tinta látex acrílica para construção civil: influência da formulação na microestrutura e nas propriedades da película”, financiado pela Fapesp, sob coordenação de Kai L. Uemoto (Poli/USP);
3. Estudo da influência da pintura sobre a durabilidade de perfis de PVC rígido para esquadrias, que tem como coordenador Antonio Rodolfo Junior (Braskem); e
4. Desenvolvimento de tecnologia para fabricação de telhas de fibrocimento (Finep/Habitare; Fapesp; Infibra; Imbralit), sob coordenação de Holmer Savastano Jr. (FZEA/ USP).

A disponibilidade do projeto tem sido divulgada em diferentes eventos, através de *banner* específico (Figura 11).

## Resultados de pesquisas

Os primeiros resultados de pesquisas realizadas utilizando a rede de estações já começam a ser publicados.

A Figura 12 apresenta os resultados de um estudo de colonização de superfícies pintadas com tinta emulsão acrílica, com diferentes volumes de pigmento e presença ou não de biocida. Os estudos demonstram claramente a influência tanto do volume de pigmento quanto do clima na colonização de fungos, o que coloca em questão o desenvolvimento de formulações padrão de tintas para todo o mercado brasileiro. É impressionante que essas diferenças ficam visíveis em um espaço

de tempo bastante curto, inferior a um ano. Esses dados já foram repassados para a indústria, parceira no projeto, e no médio prazo poderão resultar em pinturas mais duráveis, beneficiando os usuários dos produtos.

## INFRA-ESTRUTURA BRASILEIRA PARA ESTUDOS DE DURABILIDADE DE PINTURAS POR ENVELHECIMENTO NATURAL

<http://durar.pcc.usp.br>

**ENVELHECIMENTO NATURAL**

Estuda o efeito de parâmetros climatológicos, ambientais e microclimáticos na degradação de materiais.

Facilita a possibilidade de utilizar amostras comerciais, permitindo inclusive analisar o efeito dos substratos nos processos de degradação.

Oferece confiabilidade nos resultados, pois trabalha em um só teste todos os parâmetros ambientais, buscando em conta o sinergismo entre fatores controlados e não controlados da infituaçãoção das falhas de degradação típicas dos ambientes de envelhecimento acelerado.

Parâmetros climatológicos, ambientais e microclimáticos variam ao longo do Brasil, sendo necessário estabelecer protocolos de instalação para diferentes regiões, permitindo a realização de testes em diferentes situações, com grande confiabilidade.

**Alunos:** Nelson M. N. Sato, Vinícius M. Silva, Kai Loh (Américo), Rogério Sanches (Universidade de São Paulo)

**Alunos:** Rogério M. Mendes, Matheus Gonçalves (Universidade Federal do Rio Grande)

**Profs:** E.C. Guimarães (Universidade de Rio Grande)

### ESTAÇÕES

Localização das estações

Estação	Temperatura (°C)	Ornia Anual (mm)
SÃO PAULO	18	1200
RIO GRANDE	18	1200
PIRASSUNUNGA	18	1200
BELEM	28	2500

### MEDIDAS & EQUIPAMENTOS

Carta Inger Campbell Science CR10V. Alimentação por energia solar. Manufaturado em tempo real dos seguintes parâmetros:

- Temperatura do ar (sensor de platina - 40 a 60 °C Vaisala)
- Umidade relativa do ar (sensor capacitivo 0 a 100% Vaisala)
- Radiação solar global (50mm x 200mm - Kipp & Zonen)
- Radiação solar na faixa do ultravioleta (300nm a 400nm, Kipp & Zonen)
- Precipitação (Estação, medição de 0,2 mm, Hydrological Services)
- Tempo de superfície úmida (DewPoint, 300)
- Velocidade e direção do vento (velocidade 0 a 60 m/s, e direção 0 a 360 graus, 8 M Young)
- gê de água de chuva (ICM)
- Temperatura do solo (1,5°C a 10°C, Campbell, Belém, Rio Grande e Pirassununga)
- Canais adicionais para medidas sob demanda

### PATROCINADORES

### ENTIDADES

### PARCERIAS

Parcerias com o setor produtivo e acadêmico. O projeto tem por objetivo oferecer infra-estrutura para estudos de durabilidade para os setores produtivo e acadêmico. As parcerias podem ser estabelecidas visando:

- Desenvolvimento de pesquisas conjuntas, inclusive em combinação com estudos de envelhecimento acelerado (CAGE, carbonização acelerada, câmara de nevoa salina, câmara de SO2, câmara de má fumaça e neblina, câmara climática)
- Fornecimento de dados climatológicos
- Disponibilização de áreas para instalação de estações de prova em pequenas e grandes dimensões, incluindo instalação de amostras, imagens por computador

### CONTATOS

Interessados em parcerias, favor enviar e-mail para [durar@pcc.usp.br](mailto:durar@pcc.usp.br)

Figura 11 – Banner de divulgação da rede Durar de estações de envelhecimento natural

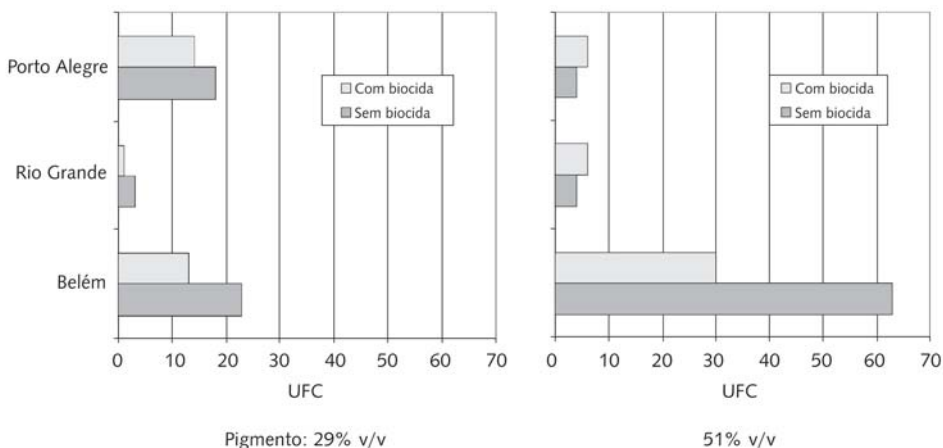


Figura 12 – Estudo do efeito do volume de pigmento na tinta e da presença de biocida na bioteriação (expressa em unidades formadoras de colônias – UFC), em diferentes estações de envelhecimento (exposição de apenas 30 dias). Dados gentilmente cedidos por Márcia Shirakawa.

No projeto Desenvolvimento de Tecnologia para Fabricação de Telhas de Fibrocimento – CIM CEL, executado pela USP, um dos principais desafios é analisar a durabilidade dos novos componentes de fibrocimento reforçado com celulose e PVA. A Figura 13 resume os resultados da evolução do comportamento mecânico de corpos-de-prova de fibrocimento, que utiliza fibras de PVA e celulose, no lugar do amianto, quando submetidas ao envelhecimento natural e acelerado, comparativamente ao desempenho original.

Novamente, observam-se diferenças significativas na evolução do comportamento mecânico entre amostras expostas nos diferentes sítios e dessas com o envelhecimento acelerado. Essa é uma demonstração prática da importância de incluir nos estudos de durabilidade o envelhecimento natural, preferencialmente em diversos sítios, combinados com envelhecimento acelerado. O estudo da microestrutura do material revelou que os corpos-de-prova apresentaram diferenças significativas na porosidade (Figura 14), provavelmente devido ao diferente grau de carbonatação, conforme medido por termogravimetria. A diferença na carbonatação pode estar associada a diferenças em temperatura e regime de chuvas. As conclusões disponíveis, até o momento, mostram uma acentuada redução da

tenacidade do material para níveis ainda muito superiores ao cimento amianto convencional e um efeito pouco acentuado na variação da resistência à flexão, medida pelo módulo de ruptura, o que permitiu a colocação do produto no mercado.

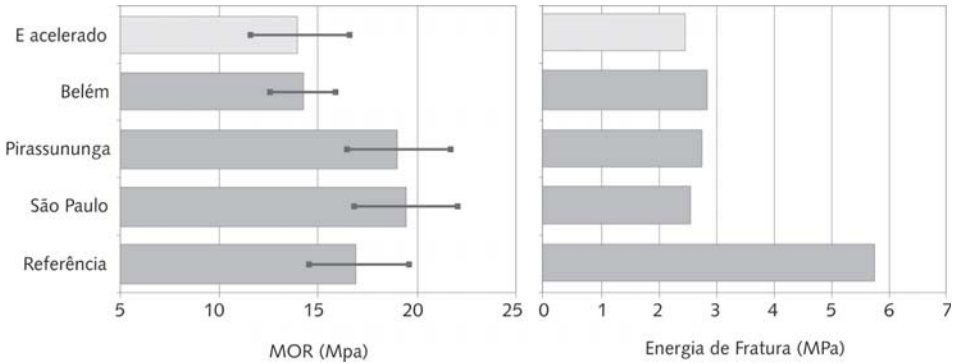


Figura 13 – Comparação entre resultados de envelhecimento acelerado e envelhecimento natural (1 ano), em três diferentes estações de corpos-de-prova de fibrocimento sem amianto, reforçada com 3% de PVA (DIAS, 2005). Observar que os corpos-de-prova expostos em Belém apresentaram acentuada redução no módulo de ruptura (MOR), enquanto as amostras de Pirassununga e São Paulo apresentaram ganho da propriedade.

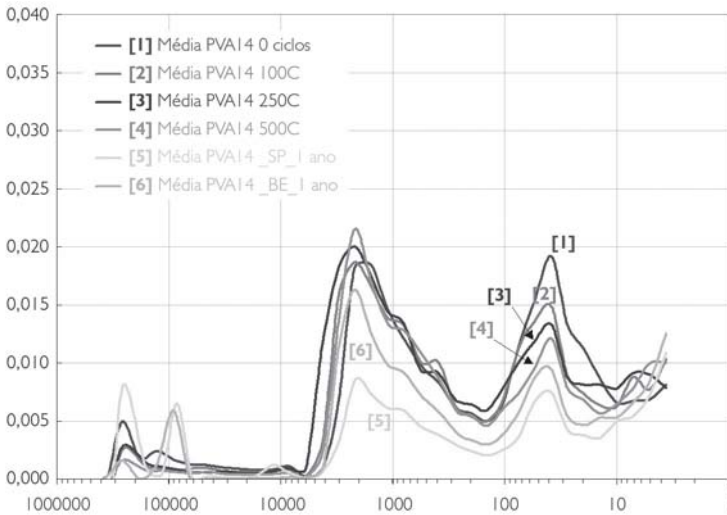


Figura 14 – Efeito dos diferentes envelhecimentos na distribuição de poros de fibrocimento sem amianto (1,4% de PVA). Observar que os corpos-de-prova submetidos ao envelhecimento natural apresentam menor porosidade em todas as faixas. Especialmente na faixa entre 10.000 nm e 1.000 nm, o produto envelhecido em Belém apresenta maior porosidade do que o envelhecido em São Paulo (DIAS, 2005).



MÊS	Temperatura do ar (°C)			
	Média das máximas diárias	Média das mínimas diárias	Máxima absoluta	Mínima absoluta
Janeiro	25,8	18,6	31,1	16,1
Fevereiro	26,2	18,3	32,1	15,0
Março	26,4	17,6	31,1	14,2
Abril	26,1	18,1	29,7	14,7
Maiο	21,6	14,2	28,1	8,8
Junho	21,6	12,7	25,9	7,9
Julho	20,6	12,7	26,4	7,3
Agosto	23,7	12,9	30,2	6,7
Setembro	27,9	16,3	34,2	12,5
Outubro	23,2	15,8	31,6	10,3
Novembro	25,9	17,6	32,4	13,9
Dezembro	25,7	17,9	30,9	14,4
No ano	24,6	16,1	30,3	11,8

Quadro 6 – Resultados medidos na estação de envelhecimento de São Paulo, no ano de 2004

## Comentários finais

O estudo de durabilidade de materiais e componentes deverá, no futuro, se tornar mais relevante e importante, seja na área acadêmica, na pesquisa e na indústria. Esses estudos devem abranger não só os materiais utilizados atualmente, mas também incluir o concreto armado, madeiras de diferentes espécies, madeiras submetidas a diferentes tratamentos, etc.

MÊS	Umidade relativa do ar (%)			
	Média das máximas diárias	Média das mínimas diárias	Máxima absoluta	Mínima absoluta
Janeiro	78	68	93	50
Fevereiro	85	64	93	46
Março	83	61	92	46
Abril	84	63	90	47
Maiο	83	67	90	46
Junho	83	65	92	50
Julho	84	66	92	50
Agosto	79	53	87	38
Setembro	76	48	88	25
Outubro	84	65	91	32
Novembro	81	60	91	38
Dezembro	85	65	91	46
No ano	82,0	62,2	90,6	42,9

Quadro 6 – (Continuação)

Nesse quadro, a existência de uma rede de estações de envelhecimento, pública, com procedimentos padrão de instrumentação ambiental é infra-estrutura indispensável para complementar e esclarecer os resultados dos já tradicionais métodos de envelhecimento acelerado, como mostram as referências estrangeiras e os resultados já obtidos na rede brasileira.

MÊS	Precipitação total mensal (mm)	Rad. solar global e m sup. horizontal (Wh/m <sup>2</sup> )	Rad. UV em sup. horizontal (Wh/m <sup>2</sup> )
Janeiro	230	4.482	203
Fevereiro	200	4.649	206
Março	145	4.503	191
Abril	86	4.024	166
Maiο	63	2.995	119
Junho	52	2.898	108
Julho	33	3.017	112
Agosto	1	4.068	142
Setembro	1	5.031	174
Outubro	82	3.767	161
Novembro	201	5.233	222
Dezembro	82	4.832	213
No ano	1.177	4.124,8	168,3

Quadro 6 – (Continuação)

A rede hoje existente deverá ser ampliada com algumas poucas estações complementares e necessita receber substancial reforço em termos de equipamentos de monitoramento ambiental, particularmente os relativos a poluentes atmosféricos como CO<sub>2</sub>, NO<sub>x</sub>, SO<sub>x</sub>, O<sub>3</sub>, entre outros.

## Referências

AINDOW, A. J.; OAKLEY, D. R.; PROCTOR, B. A. Comparison of the weathering behaviour of GRC with predictions made from accelerated ageing tests. **Cement and Concrete Research**, v. 14, Issue 2, p. 271-274, Mar. 1984.

CIB. **Guide and Bibliography to Service Life and Durability Research for Buildings and Components**. Cib, Rotterdam, Mar. 2004. (CIB Publication 295).

DIAS, C. M. R. **Efeitos do envelhecimento na microestrutura e comportamento mecânico dos fibrocimentos**. 2005. Dissertação (Mestrado) - Poli, Universidade de São Paulo, São Paulo.

ELBIR, T. A GIS based decision support system for estimation, visualization and analysis of air pollution for large Turkish cities. **Atmospheric Environment**, v. 38, Issue 27, p. 4509-4517, Sept. 2004.

FOLIENSTE, G. C.; LEICESTER, R. H.; WANG, C.; MACKENZIE, C.; COLE, I. Durability design for wood construction. **Forest Products Journal**, v. 52, n. 1, 11 Jan. 2002.

JERNBERG, P.; SJÖSTRÖM, C.; LACASSE, M. A.; BRANDT, E.; SIEMES, T. **Service life and durability research**. In: Guide and Bibliography to Service Life and Durability Research for Buildings and Components. CIB, Rotterdam, Mar.2004. p. 1.1-59. (CIB Publication 295).

HAAGENRUD, S. **Factors Causing Degradation: Part II**. In: Guide and Bibliography to Service Life and Durability Research for Buildings and Components. CIB, Rotterdam, March 2004. p.1.2-104. (CIB Publication 295).

HAAGENRUD, S. E.; HENRIKSEN, J. F.; SKANCKE, T. Modeling and mapping of degradation of built environment from available data and GIS based information tools. In: INTERNATIONAL CONFERENCE ON DURABILITY OF BUILDING MATERIALS AND COMPONENTS, STOCKHOLM, 7., 1996 (ed. C. Sjöström), E & FN Spon, U.K., 19-23. **Proceedings...** May 1996. p. 209-18.

KORMANN, A. C. M.; PORTELLA, K. F.; PEREIRA, P. N.; SANTOS, R. P. Desempenho de fibras de aço em concretos sujeitos à abrasão hidráulica. In: CONGRESSO BRASILEIRO DO CONCRETO, 44., Instituto Brasileiro do Concreto: Belo Horizonte, MG. **Anais...** 17 a 22 de agosto de 2002. (Trabalho III059).

KUS, H. **Long TERM performance of water repellants on rendered autoclaved aerated concrete.** KTH/HIG Gävle, 2002. (Tese de doutorado).

LITHERLAND, K. L.; OAKLEY, D. R.; PROCTOR, B. A. The use of accelerated ageing procedures to predict the long term strength of GRC composites. **Cement and Concrete Research**, v. 11, Issue 3, p. 455-466, May 1981.

REISS, D.; RIHM, B.; THÖNI, C.; FALLER, M. Mapping stock at risk and release of zinc and copper in Switzerland: dose response functions for runoff rates derived from corrosion rate data. **Water, Air, & Soil Pollution**, v. 159, Issue 1, p. 101-113, Nov. 2004

## Agradecimentos

Os autores agradecem à equipe e demais parceiros do projeto e também à Dra. Márcia Aiko Shirakawa e ao Eng. Cléber Marcos Ribeiro Dias, pela sessão dos dados que ilustram a utilização da estação de envelhecimento.

