

AValiação E DIAGNÓSTICO DE ESTRUTURAS



LUIZ CARLOS P. SILVA FILHO

Professor / Pesquisador

LEME / PPGEC / UFRGS

MSc (UFRGS) PhD (Univ. Leeds)

Avenida Osvaldo Aranha, 99 / Centro

Porto Alegre / RS – Brasil

lcarlos@ppgec.ufrgs.br

RESUMO

As atividades de conservação podem ser divididas em quatro estágios. O primeiro passo consiste em examinar a estrutura e detectar os problemas patológicos. Depois, é necessário estimar as consequências desses problemas no desempenho da estrutura e determinar a provável curva de degradação. O terceiro estágio envolve a seleção da melhor alternativa para intervir em cada problema, priorizando as intervenções se necessário. Finalmente, é necessário preparar um programa de ações para solucionar os problemas de acordo com as prioridades estabelecidas. Estes estágios podem ser classificados em diagnóstico, prognóstico, seleção das estratégias de manutenção ou reabilitação e tratamento. No presente trabalho se aborda rapidamente alguns conceitos relacionados ao primeiro dos estágios, o diagnóstico. Uma breve revisão dos conceitos de vida útil e durabilidade é seguida pela análise das técnicas de inspeção, ensaio e monitoração, que fornecem os dados para o diagnóstico. Exemplos de Sistemas de Inspeção em operação ou propostos também são apresentados.

Palavras-chave: *Avaliação Estruturas; Conservação Estruturas; Vida Útil; Durabilidade; Inspeção de Obras.*

1. INTRODUÇÃO

A ação do tempo é inexorável. Todas as coisas são afetadas e mudam com sua passagem. Estas afirmações, aparentemente incontestes, não são muitas vezes levadas em conta efetivamente quando se projetam e utilizam obras civis.

Ao longo dos últimos séculos, a experiência acumulada e a evolução das técnicas construtivas permitiram que o homem selecionasse os materiais mais adequados para suas edificações. Com a consolidação das técnicas de alvenaria cerâmica e a invenção do concreto armado, no início do século passado, as construções começaram a tomar a forma atual.

Aparentemente, a percepção de que a durabilidade dos materiais de construção atuais é relativamente longa, em relação à expectativa de vida humana, acabou por gerar a impressão de que as estruturas construídas com o mesmo teriam duração quase infinita. Infelizmente, esta impressão se mostrou falsa, como mostram os inúmeros registros de problemas e de ocorrências de deterioração. Os problemas se agravaram quando se percebeu que, em muitos casos, a deterioração acontecia muito antes que se atingisse a vida útil de projeto das estruturas, demandando intervenções não previstas para correção dos problemas e restauração das funções das estruturas. A multiplicidade e complexidade das questões envolvidas acabou por dar origem à toda a área de estudos denominada de Patologia e Terapia das Construções.

Cabe salientar que, no caso das estruturas de concreto, os registros dos problemas de durabilidade ganharam destaque no início da década de 80, quando autoridades nos Estados Unidos verificaram que particularmente metade do estoque de mais de 500.000 pontes se encontram estruturalmente ou funcionalmente deficientes. Posteriormente, a necessidade de investir grandes somas para recuperar obras de grande valor (como o Empire State Building, que teve suas fachadas renovadas, pois os conectores de aço originais haviam corroído e iniciado um processo de perda de aderência dos painéis do revestimento) alertou usuários e projetistas para a necessidade de promover a durabilidade.

No Brasil, a partir do final da mesma década, também começaram a aparecer registros diversos de problemas patológicos prematuros em estruturas de concreto. Um trabalho seminal nesta área foi apresentado pela professora Denise Dal Molin, em sua dissertação de mestrado (Dal Molin, 1988), onde se analisaram os registros de problemas associados à

fissuração, acumulados pelo CIENTEC. As conferências realizadas em 1987 na USP (IX Simpósio Nacional de Tecnologia da Construção-Reparos, Reforços e Proteção das Estruturas de Concreto) e em 1988 na UFRGS (I Semiário de Patologia das Construções), abriram o campo para que iniciassem estudos voltados para a questão da investigação das patologias de estruturas de concreto e seus tratamentos.

Nota-se que as estruturas mais recentes muitas vezes acabam se mostrando mais suscetíveis ao desenvolvimento de processos de deterioração em idades reduzidas, que às vezes se iniciam logo após sua construção. Entre as causas que contribuem para isto, podendo-se destacar:

- o aumento do ambiente construído, o que aumenta, estatisticamente, a chance de ocorrência de problemas;
- a otimização dos processos de cálculo e construção, com conseqüente redução dos excessos de materiais e aumento da esbeltez das estruturas;
- a ausência de considerações sobre a durabilidade nas normas vigentes;
- o desconhecimento sobre algumas das formas de deterioração das estruturas de concreto.

Apesar do desenvolvimento da área de estudos sobre Patologia e Terapia, e da crescente conscientização sobre a importância de atentar para a durabilidade, este conceito ainda se confunde com o conceito da vida útil, como discutido a seguir.

2. DURABILIDADE E VIDA ÚTIL

A durabilidade é muitas vezes encarada e definida como uma propriedade intrínseca de um material. É fácil verificar, no entanto, que esta interpretação é falha, quando se considera que amostras de um mesmo material, com as mesmas características, poderão apresentar desempenho bastante distinto se expostos a condições de uso e exposição ambiental diferentes. Por exemplo, em alguns ambientes secos e rurais (onde a umidade e a concentração de CO₂ no ar são baixas), um concreto comum, com pouco cobrimento, provavelmente durará bastante tempo. Já se o mesmo material estiver localizado junto ao mar, num ambiente úmido e rico em cloretos, a deterioração pode acontecer em um período curto.

A durabilidade, portanto, não pode ser considerada como uma propriedade do material, devendo ser encarada como uma estimativa do desempenho, em termos de manutenção de sua integridade físico-química, de um material em certas condições específicas de uso e exposição ambiental. Revisando a literatura da área, pode-se encontrar algumas definições que seguem esta linha, como segue:

- *habilidade de resistir a mudanças de estado, ou seja, de suas propriedades (Pihlajavaara, 1978);*
- *capacidade de resistir às condições para as quais foi projetado, sem deterioração por muitos anos (Neville, 1975);*
- *capacidade de manter suas propriedades ao longo do tempo, sob condições normais de uso (Flauzino, 1988);*
- *capacidade de um material de manter o seu bom comportamento e desempenho em condições de segurança, sob as condições previstas de serviço, durante o tempo previsto de duração (Calleja, 1986);*
- *capacidade de resistir à ação das intempéries, ataques químicos, abrasão ou qualquer outro processo de deterioração, o que significa conservação de sua forma original, qualidade e capacidade de utilização quando exposto ao seu meio ambiente (ACI Committee 1991).*
- *capacidade de um produto de satisfazer, durante um período de tempo previsto na sua concepção, as exigências a ele impostas, sejam de origem técnica ou subjetiva (satisfação do usuário), quando exposto a um ambiente previamente determinado (Silva Filho, 1994);*

Um conceito associado à idéia de durabilidade, porém distinto, é a vida útil. Vida útil pode ser definida como o tempo durante o qual o desempenho de uma estrutura se mantém satisfatório. Enquanto a durabilidade é definida como a percepção humana de uma qualidade que muda no ambiente, a vida útil expressa a medida desta durabilidade. Ou seja, pode-se dizer que a vida útil é um padrão universal de operacionalização da questão da durabilidade para fins de projeto e gerenciamento de obras.

Cabe salientar que a vida útil pode ser definida de diferentes formas, conforme a interpretação sobre qual o período de tempo que a estrutura deve suportar. A *Vida Útil de Projeto* corresponde ao tempo durante o qual a estrutura deve manter um desempenho mínimo, consideradas as condições de projeto. Normalmente varia entre 50 e 100 anos. Já a *Vida Útil de Utilização* compreende o tempo até que a estrutura sofra uma degradação tão intensa que

prejudique seu uso. A *Vida Útil Residual* expressa o tempo remanescente, a partir de uma inspeção ou análise da estrutura, até que ocorra a falha crítica.

A estimativa do valor que deve ser empregado para a vida útil de projeto, em função do tipo de construção, vem sendo alvo de intensa discussão. Um período adequado deve estar relacionada com uma idade mínima de uso, compatível com o ciclo médio de vida do homem ou com o ciclo médio de ocupação da edificação. Aceita esta premissa, pode-se estabelecer em 70 anos a idade básica para definir a performance de parte ou do todo da construção e o atendimento das condições de habitabilidade sem grandes intervenções renovadoras (PRUDÊNCIO JR, 1995).

O Professor Paulo Helene, da POLI/USP, propôs um modelo de vida útil que aborda o fenômeno da corrosão da armadura, mas que como modelo conceitual aplica-se a todos os mecanismos de deterioração. Criado a partir de um modelo clássico de vida útil estabelecido por Tuutti, o modelo distingue alguns pontos específicos na curva de deterioração que poderiam ser empregados como indicativos para definição da vida útil, como se vê na figura 1. Na mesma podem ser definidas os seguintes intervalos:

- Vida útil de projeto: período de tempo que vai até a despassivação da armadura. Normalmente corresponde ao período de tempo necessário para que a frente de carbonatação atinja a armadura;
- Vida útil de serviço ou de utilização: período de tempo que vai até o momento em que aparecem manchas na superfície do concreto, ou ocorrem fissuras no concreto de cobrimento, ou ainda quando há o destacamento do concreto de cobrimento;
- Vida útil última ou total: período de tempo que vai até a ruptura e colapso parcial ou total da estrutura. Corresponde a esse período, do qual há uma redução significativa da seção resistente da armadura ou uma perda importante da aderência armadura/concreto, acarretando o colapso parcial ou total da estrutura;
- Vida útil residual: corresponde ao período de tempo que a estrutura ainda será capaz de desempenhar suas funções, contado, neste caso, a partir da data de uma vistoria. A avaliação da vida útil consiste em se medir o envelhecimento, ao longo do tempo, de uma propriedade relevante de um material ou componente.

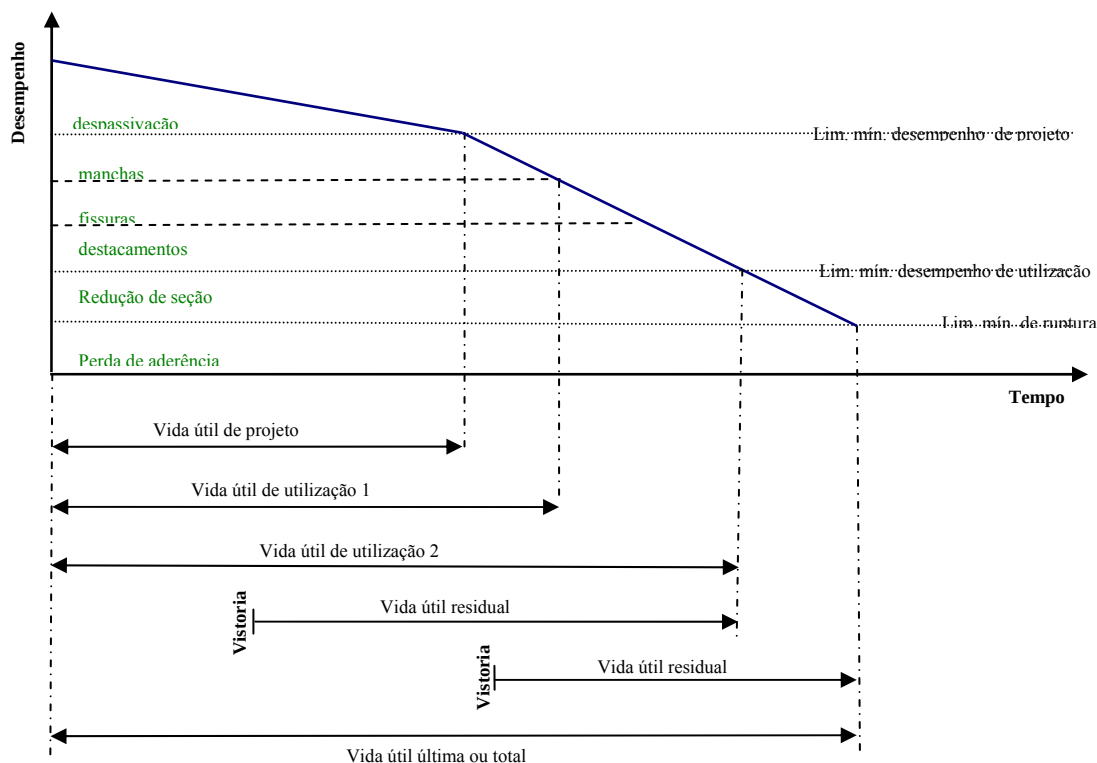


Figura 1 – Exemplo de definição de intervalos de vida útil a partir da identificação de pontos característicos da curva de deterioração.

O estabelecimento de um plano de manutenção é uma das condições de contorno consideradas necessárias para a definição da vida útil. Atividades de manutenção podem estender a vida útil, ao recuperar, pelo menos parcialmente, o desempenho da estrutura, como mostrado na figura 2.

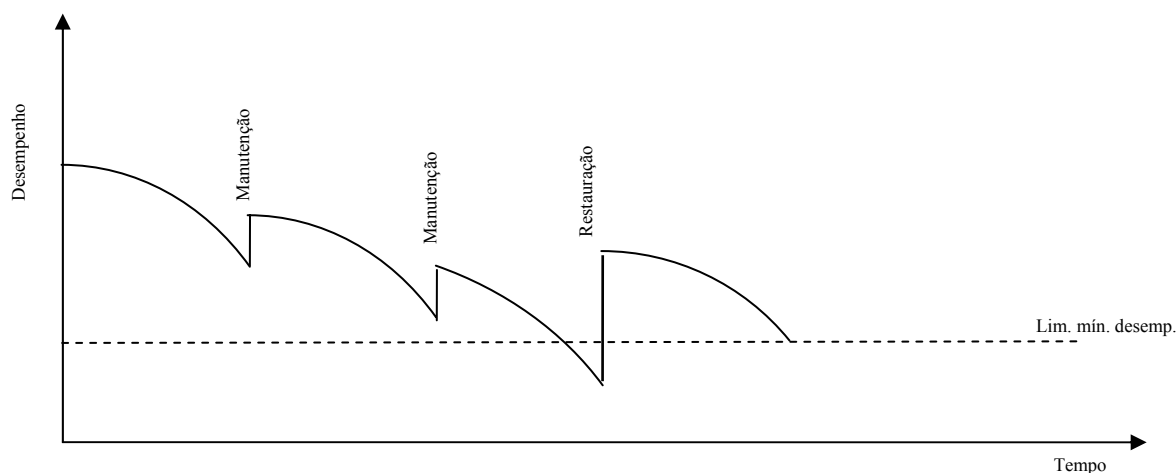


Figura 2 – Exemplo de curva de deterioração com efeitos de manutenção.

Cabe notar que, quando o desempenho estiver abaixo do mínimo aceitável, as ações para recuperação do desempenho serão consideradas como ações de conservação, que podem tomar a forma de restaurações, reparos ou reforços, como discutido no item 6.

3. GERENCIAMENTO DA VIDA ÚTIL DE ESTRUTURAS DE CONCRETO

Promover a durabilidade é usar estratégias para garantir que o desempenho seja adequado durante um tempo mais longo. O conceito de vida útil permite operacionalizar a questão de durabilidade. Ou seja, admite-se que qualquer estrutura que está sendo projetada vai ter uma determinada vida útil. As decisões de projeto são tomadas de forma a gerenciar o processo de degradação das estruturas, buscando atingir a vida útil desejada.

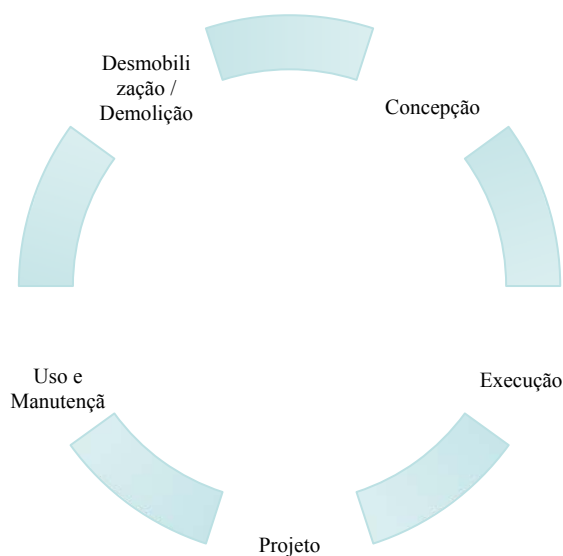


Figura 3 – Representação do ciclo de vida de uma edificação.

O ciclo de vida de uma estrutura pode ser representado pela figura 3. As atividades desenvolvidas em cada uma das etapas representada afetam decisivamente a durabilidade e vida útil das estruturas.

Nas fases iniciais, concepção e projeto, é que se avalia como a estrutura vai ser utilizada e se relacionar com o meio ambiente. As estimativas de quais os principais agentes de degradação atuantes são feitas nestas fases. As principais decisões sobre como preparar a estrutura para enfrentá-los também são tomadas nesta fase, e afetam de forma crítica o futuro

desempenho da mesma. Idealmente, as características esperadas do material e a política de manutenção deveriam ser definidas, em detalhe, nestas fases. Infelizmente, por questões de custo e falta de conhecimento, muitas vezes a fase de concepção é praticamente descartada e a fase de projeto é comprimida temporalmente. Os esforços são focados simplesmente no dimensionamento da estrutura, sendo dada pouca atenção às considerações de durabilidade e desempenho de longo prazo.

As coisas pioram quando a fase de execução não é adequadamente controlada e documentada. Ao invés de obter elementos com as características e geometrias previstas em projeto, surgem erros, adaptações e desvios nas propriedades dos materiais constituintes.

A famosa regra de Sitter estima que a evolução dos custos de intervenção na estrutura ocorre segundo uma progressão geométrica de razão 5, conforme mostra a figura 4. Embora nem todos os problemas sigam esta lei de formação de custos, a mesma ilustra como é importante gerenciar a durabilidade em todas as fases de um projeto, visando atingir a vida útil com menores custos.

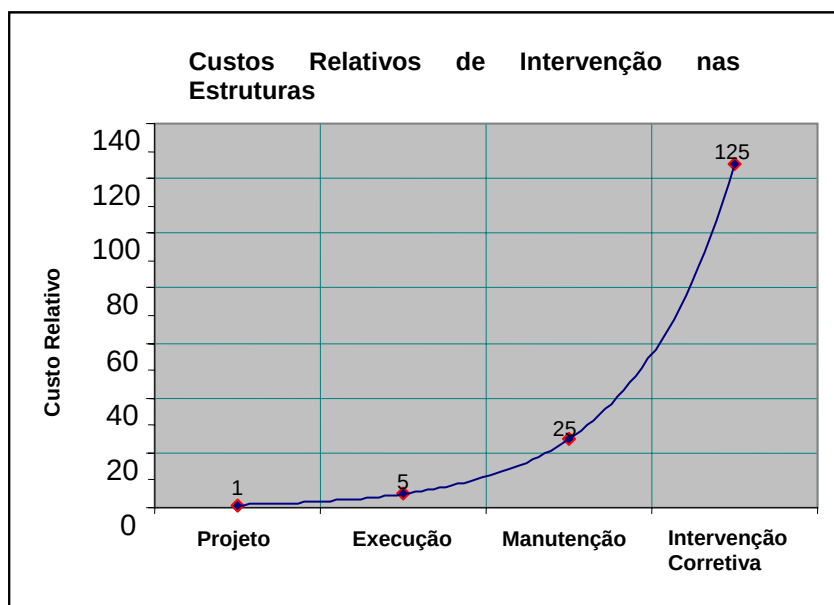


Figura 4 – Evolução de custos prevista pela Lei de Sitter.

A garantia de durabilidade das estruturas de concreto requer que sejam efetuadas esforços coordenados de todas as partes interessadas:

- Proprietário: definição das expectativas presentes e futuras de uso da estrutura;
- Responsável pelo projeto arquitetônico: definição de detalhes e especificação de materiais;
- Responsável pelo projeto estrutural: definição de geometrias, detalhes, especificação de materiais e de manutenção preventiva;
- Responsável pela tecnologia do concreto: definição das características dos materiais para concreto, traços e metodologia de execução, em conjunto com os responsáveis pela construção e usuário;

- Responsável pela construção: definição de tecnologia complementares da construção, respeitando o projeto e especificações das fases anteriores;
- Usuário (proprietário ou não): Obediência às condições de uso, de operação e de manutenção preventiva especificados anteriormente.

Diante do exposto, pode-se dizer que, ao se projetar uma estrutura, deveria-se admitir uma certa qualidade de seus materiais, um determinado padrão de uso, a existência de uma certa agressividade ambiental e de um plano de manutenção. Estas condições de contorno permitiriam estimar qual a durabilidade esperada e definir qual a vida útil viável. Medidas de projeto (aumento da resistência dos materiais, modificação de características geométricas, aplicação de sistemas de proteção, aumento da frequência ou complexidade das operações de manutenção) podem então ser tomadas para garantir que a estrutura se adapte às condições e atinja uma vida útil que justifique os recursos, materiais e financeiros, investidos na sua construção.

O problema é que, no momento do projeto, existe um elevado grau de incerteza. Além de não se saber com precisão quais serão as características dos materiais e da estrutura final (resistências, dimensões, cobrimentos, etc), tem-se que projetar, com base em suposições, qual será o uso futuro e como evoluirão as condições ambientais. Muitas vezes as informações sobre as condições ambientais são escassas ou incompletas. Já as características da obra são presumidas, pois só serão de fato definidas durante o processo de execução. Os sistemas de controle de qualidade buscam assegurar que as características do material real reproduzam as de projeto, mas isto nem sempre acontece, resultando em variações de resistência, forma e dimensão, por exemplo. Mais ainda, os materiais de construção não são homogêneos, podendo apresentar significativas variações nas suas características. O concreto, em especial, é um material dinâmico, que altera suas características com o tempo. O padrão de uso real também difere significativamente daquele padrão ideal considerado em projeto¹.

Por todas estas razões, existe sempre uma incerteza quanto ao real desempenho da estrutura. Quanto mais longa a vida útil, mais incerteza na estimativa e maior a dispersão possível, como mostrado na figura 5.

¹ Um projeto em desenvolvimento na Universidade de Uberlândia, pelo Prof. Turíbio, está medindo cargas em edifícios com o intuito de determinar uma distribuição potencial das diferenças entre os carregamentos reais prevalentes durante o uso e os carregamentos de projeto.

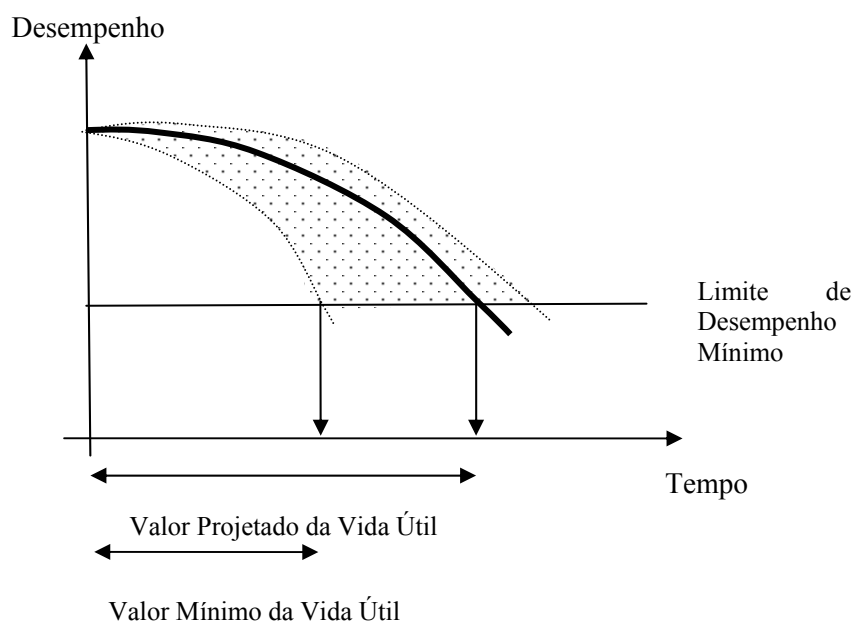


Figura 5 – Evolução das incertezas na estimativa da curva de deterioração.

As inspeções são fundamentais para lidar com as incertezas. Cada inspeção permite reposicionar a curva de desempenho no tempo, reduzindo a dispersão e ajustando a previsão de vida útil. Se necessário, podem então ser tomadas medidas para aumentar a vida útil residual, fazendo com que a mesma supere a vida útil de projeto.

Para garantir que uma estrutura atinja a vida útil de projeto e, de preferência, a supere, é fundamental que se tenha um sistema de acompanhamento de seu desempenho. Desta forma, é possível identificar, e tratar os eventuais processos de deterioração.

4. AVALIAÇÃO DE ESTRUTURAS

A figura 6 mostra como, de forma resumida, como o processo de avaliação de estruturas pode ocorrer. Verifica-se que é necessário averiguar, inicialmente, se a estrutura ainda é útil. Caso contrário, o melhor seria descartá-la. Para verificar se a estrutura ainda atende os requisitos (compliance) e encontra-se em boas condições, as inspeções são fundamentais. Em conjunto com ensaios, ela permitem elaborar um diagnóstico do estado de deterioração (condition state), o que vai orientar a decisão sobre monitorar, recuperar ou aceitar a estrutura.

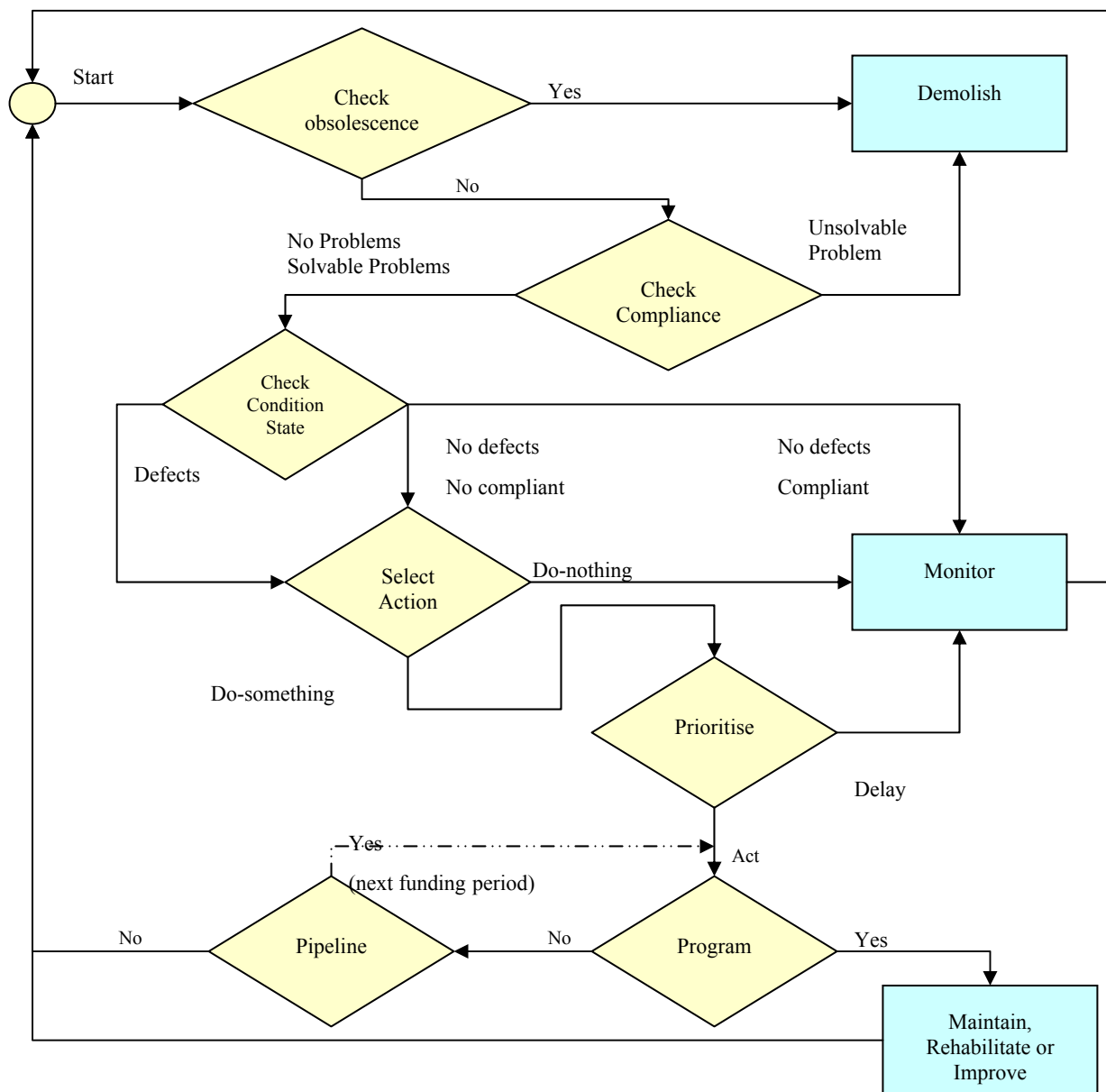


Figura 6 – Representação do processo de avaliação de estruturas (Silva Filho, 1999).

Nos itens a seguir se discute, sumariamente, alguns aspectos sobre as técnicas de inspeção, ensaios e monitoramento, tripé que constitui a base das atividades de avaliação de estruturas.

4.1 Técnicas de Inspeção

A principal forma de acompanhar as estruturas e reduzir a incerteza sobre sua condição atual consiste na realização de inspeções regulares. Diferentes entidades propõem períodos e escopos diferentes para as inspeções.

Em termos de escopo, as inspeções podem ser mais simples, baseadas simplesmente num exame visual, ou mais complexas, envolvendo a realização de ensaios e coleta de amostras. A maioria das inspeções, hoje em dia, é eminentemente visual. Um especialista, com conhecimentos sobre os mecanismos de deterioração, visita a obra, atentando para questões como sinais de corrosão de armaduras, padrão de fissuração,

Recomenda-se que a inspeção seja conduzida de forma a permitir que haja contato próximo entre o inspetor e a estrutura. O problema é que, em muitas estruturas, o acesso do inspetor à estrutura é dificultado, seja por questões de localização da peça estrutural seja pela existência de revestimentos. Fundações e pontes localizadas sobre penhascos e rios são notoriamente difíceis de examinar, pois requerem ações como remoção de pisos, abertura de inspeções e equipamentos de acesso especiais.

De fato, o custo indireto de acesso ao elemento estrutural pode ser muito superior ao efetivo custo de inspeção. Isto inibe, em grande parte, a realização de inspeções periódicas, especialmente no Brasil, onde as verbas para este fim são bastante limitadas.

Apesar dos custos, experiências recentes mostram que é fundamental inspecionar estes elementos, dada a probabilidade de desenvolvimento e progressão silenciosa de mecanismos de degradação. O caso das fundações é crítico, pois as mesmas, além de receberem cargas elevadas, normalmente não se encontram visíveis aos usuários, e ficam expostas a ambientes bastante úmidos e, frequentemente, agressivos.

Em termos de tipologia e periodicidade, a OECD (Organização para a Cooperação e Desenvolvimento Econômico), através de um levantamento das práticas em vários países, identificou que as inspeções normalmente se organizam da seguinte forma:

- *Inspeções ordinárias, regulares ou corriqueiras*: marcadamente visuais, tem por objetivo detectar alterações bruscas de desempenho e sinais preliminares de degradação. Recomenda-se que ocorrem em intervalos de 1 a 3 anos;

- *Inspeções especiais ou principais:* inspeções em maior detalhe, com participação de equipes de especialistas, realizadas para averiguar qual o desempenho real da estrutura e identificar problemas patológicos não aparentes. Usa suporte de ensaios e pode incluir coleta de amostras para ensaios complementares.

Além das inspeções rotineiras, recomenda-se que sejam feitas as seguintes inspeções:

- *Inspeções cadastrais:* inspeção detalhada, com verificações geométricas, necessária quando uma estrutura é introduzida no sistema de inspeções, para estabelecer uma referência de degradação. No caso de estruturas novas, pode ser conjugada com a inspeção para registro do projeto “as-built”.
- *Inspeções emergenciais:* quando uma estrutura sofre efeitos de ações extraordinárias, capazes de provocar alterações bruscas de desempenho;
- *Inspeções de monitoramento:* quando se deseja acompanhar o desenvolvimento de problemas ou sintomas detectados nas inspeções rotineiras, com vistas a obter subsídios para consolidar um diagnóstico;

Nas inspeções busca-se observar sinais da existência de problemas patológicos. Os sintomas e verificações mais comuns são:

- análise da existência de deformações excessivas indicativas de problemas de sobrecarga;
- recalques e movimentações de elementos estruturais, indicativos de alterações nas condições de apoio das estruturas;
- sinais (manchas, fissuras, etc.) indicativos da ocorrência de corrosão de armaduras;
- evidências de ataques físico-químicos ao concreto, por ação de sulfatos ou outros íons agressivos, ou de reações tipo álcali-agregado;
- padrões fissuratórios, especialmente aqueles relacionados a problemas de fadiga de materiais;
- em pontes e viadutos, verificação das condições de funcionamento de aparelhos de apoio e juntas;

- em estruturas históricas, verificação de sinais de presença de umidade, cripto eflorescências e outras manifestações que afetam revestimentos, afrescos e elementos estruturais;

4.2 Técnicas de Ensaio

Para complementar os dados obtidos nas inspeções visuais, muitas vezes é necessário recorrer a ensaios, que vão gerar dados específicos para que se confirme ou reforme o diagnóstico inicial resultante do exame visual. Preferencialmente, busca-se utilizar técnicas de ensaio não-destrutivos (NDT), que não afetem a integridade ou prejudiquem a função da estrutura. Alguns ensaios, ditos semi-destrutivos (SDT), podem causar danos locais, facilmente sanados. Em casos mais sérios ou quando é necessário mais certeza, pode ser necessário recorrer à extração de corpos de prova ou à provas de carga na estrutura real.

O uso de ensaios não-destrutivos no Brasil ainda é recente, mas vem se intensificando. A figura 7 mostra alguns dos ensaios mais conhecidos.

Dentre eles, destaca-se, pela simplicidade, baixo custo e rapidez de execução, o ensaio de esclerometria. Este ensaio baseado na norma NBR 7584/82: Concreto Endurecido – Avaliação da Dureza Superficial Pelo Esclerômetro de Reflexão, é baseado na reflexão de uma massa (martelo) que, ao ser impulsionada por uma mola, se choca com a superfície de ensaio. O aparelho então registra a energia remanescente (reco do martelo).

O ensaio fornece uma medida da dureza superficial do material. No entanto, quando aplicado ao concreto sofre influências das características do cimento, do agregado, da idade, da umidade e da intensidade de carbonatação, entre outras. Por isto, seus dados devem ser usados com cautela, de preferência de forma comparativa, para identificar regiões de compacidade superficial distintas. Por esta razão, recomenda-se que, sempre que possível, seja feita uma consorciação de ensaios, buscando reforçar as evidências para que se possa fazer o diagnóstico.

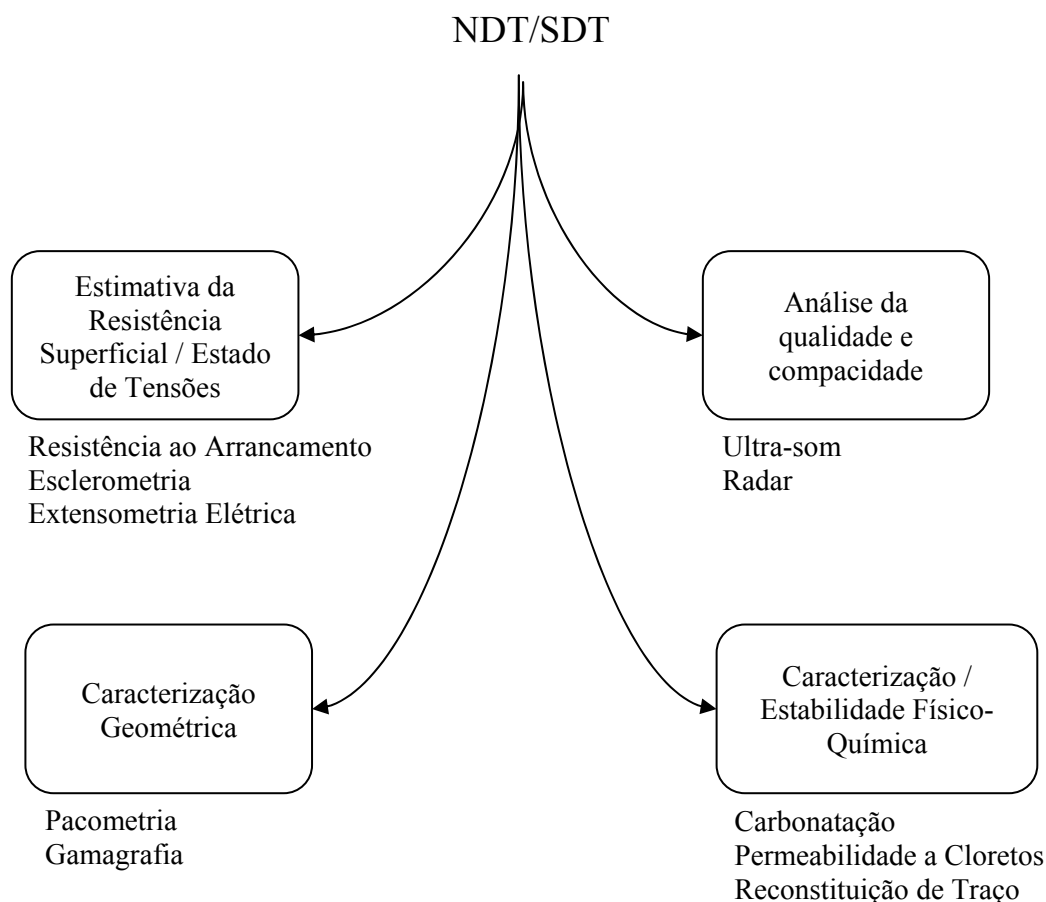


Figura 7 – Principais ensaios não-destrutivos e semi-destrutivos.

Outro grupo de ensaios que vem ganhando espaço são os ensaios de prospecção por ondas sonoras (pulso ultrassônico) ou eletromagnéticas, que permitem avaliar o interior dos materiais sem causar danos. Desta forma é possível verificar a compacidade, detectar defeitos ou avaliar a posição e condição de interfaces entre materiais. Os principais ensaios de cada grupo são o de pulso de ultrassom e de emissão de ondas de radar.

A metodologia do ensaio de velocidade de propagação do pulso ultra-sônico está baseada no fato de que o tempo de propagação dos pulsos ultra-sônicos expressa a densidade do material. A aplicação prática do método faz uso de um equipamento de ultra-som tradicional com transdutores de superfície de baixa frequência (25-60 kHz). A Figura 8 ilustra a execução do ensaio de velocidade de propagação do pulso ultra-sônico em corpos de prova cilíndricos de concreto.

A figura 9 mostra um ensaio de ultrassom sendo aplicado a uma obra de arte. Pode-se verificar no diagrama em anexo como o exame do espectro de ecos permite determinar a profundidade de cada camada.



7

Figura 8 – Execução do Ensaio de Propagação do Pulso Ultra-Sônico.

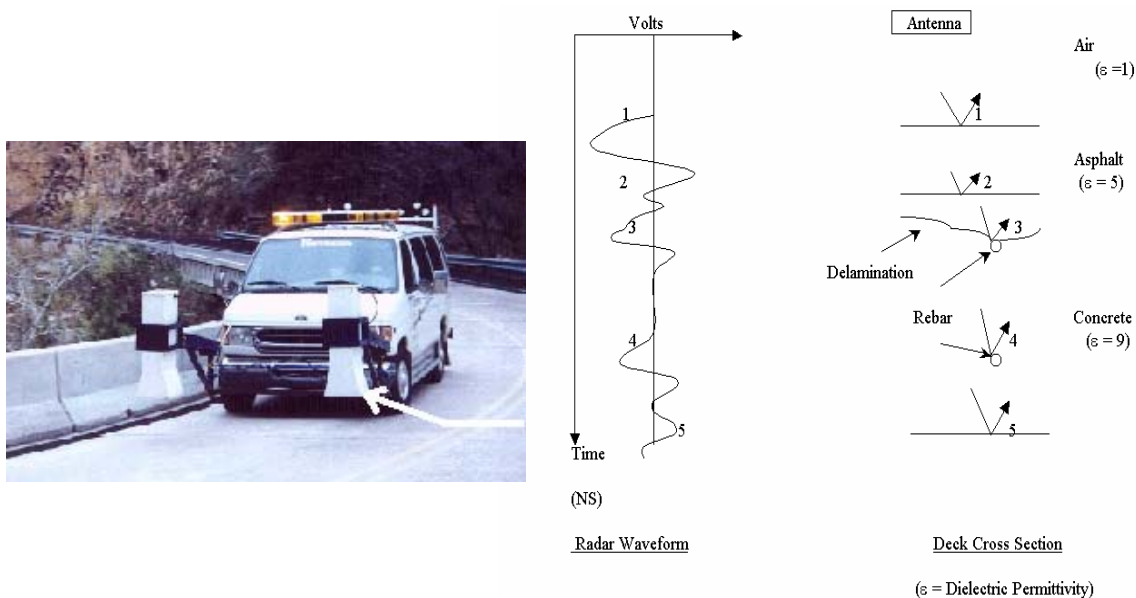


Figura 9 – Aplicação de ensaio de radar em pontes (Shin, 2005).

Uma das grandes dificuldades do emprego de ensaios ultrassônicos consiste na interpretação dos dados². Muitas vezes se busca realizar uma análise gráfica, com a produção de curvas de níveis com zonas de leituras similares, como mostrado na figura 10.

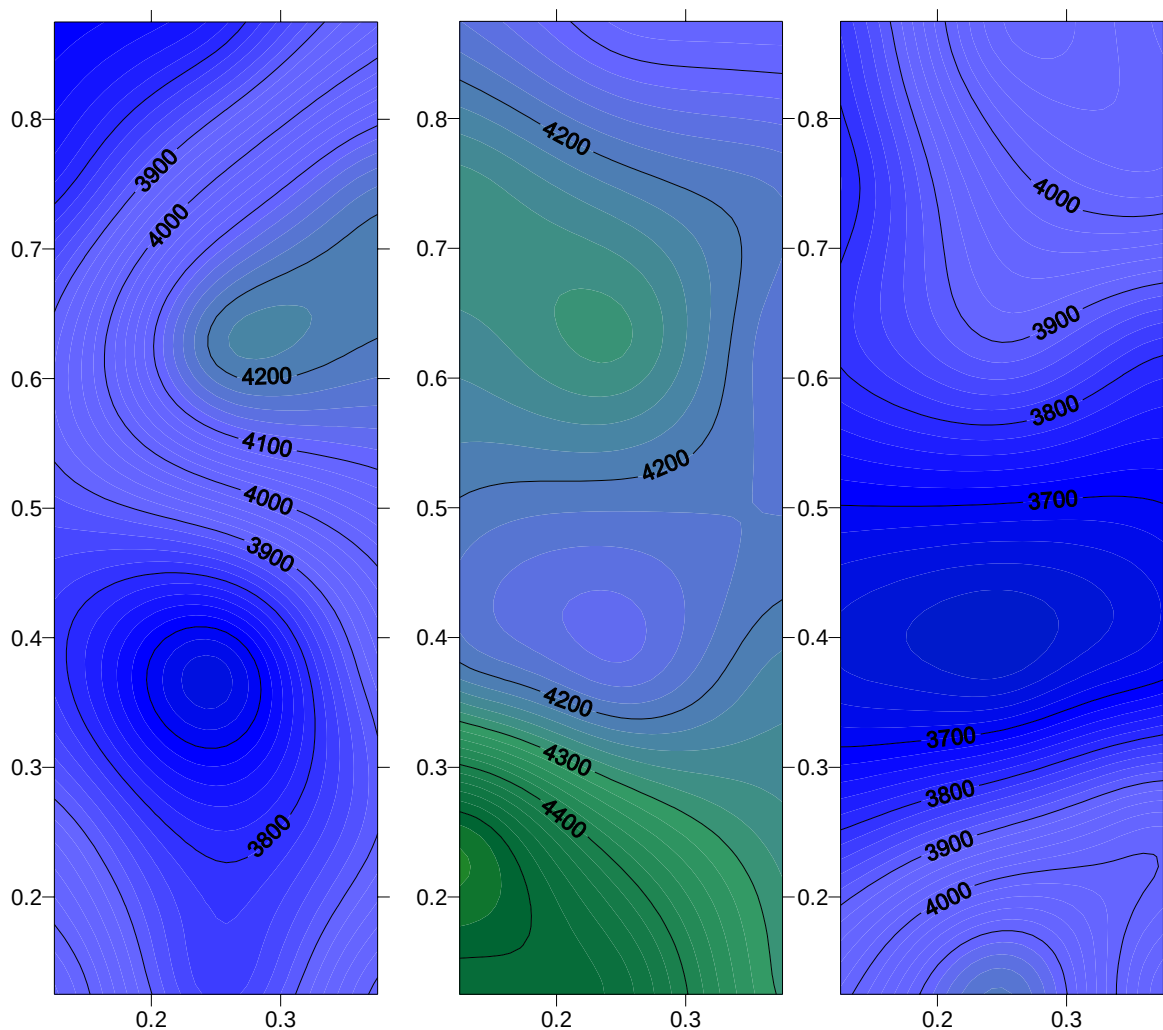


Figura 10 – Resultados do mapeamento ultrassônico de trechos de pilares.

O radar é uma nova técnica que está começando a ser empregada. Mais poderosa que o ultrassom ela permite a localização de vazios, a identificação da armadura e a determinação das zonas com compacidade diferenciada. Baseada na reflexão parcial das ondas eletromagnéticas que ocorre quando as mesmas se propagam para um material diferente, o ensaio permite um mapeamento em profundidade de uma estrutura.

² O pesquisador Alexandre Lorenzi, do Grupo de Pesquisa LEME, está desenvolvendo um trabalho especial sobre a interpretação de dados de ultrassom para estimativa da resistência com auxílio de redes neurais artificiais.

Outro conjunto de ensaios importante envolve a realização de ensaios de pH através do uso de indicadores colorimétricos, para determinação da frente de carbonatação, e de ensaios de contaminação por íons cloreto. Estes ensaios servem como balizadores fundamentais para determinação da suscetibilidade à corrosão.

4.3 Técnicas de Monitoramento

Muitas vezes se deseja realizar um acompanhamento da evolução das condições de conservação durante sua operação. Nestes casos é necessário o uso de sensores acoplados à estrutura que permitam medir alterações nas condições de contorno importantes para a definição da vida útil, tais como os carregamentos, condições ambientais ou as características do material.

Para verificar o efeito das cargas, expresso pelo estado de tensões e deformações na estrutura, é comum empregar-se extensômetros mecânicos ou elétricos de deformação (strain gages).

A extensometria elétrica é um método não destrutivo de instrumentação de estruturas que permite medir variações dimensionais do sensor, as quais podem ser ajustadas para indicar a deformação específica da superfície sobre a qual o sensor havia sido instalado. Os extensômetros elétricos, mostrados na figura 11, são calibrados de tal forma a fornecer valores de deformação específica³ (ϵ). Sabendo o módulo de elasticidade do material (E) ao qual os mesmos foram fixados, é possível determinar as tensões atuantes (σ), através da lei de Hooke:

$$\sigma = E \cdot \epsilon \quad (\text{Equação 1})$$

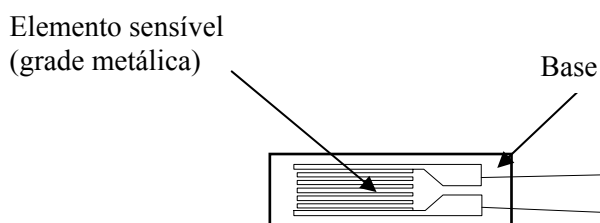


Figura 11 - Detalhe de um extensômetro elétrico

³ A deformação específica é um fator adimensional que representa a variação percentual de uma dimensão, isto é, $(\Delta x / x)$. A mesma é normalmente dada em microstrains ($\mu\epsilon$) ou seja, variações percentuais na ordem dos micrometros (10^{-6} m).

Uma nova técnica de monitoramento que vem sendo desenvolvida envolve o uso de sensores de fibra ótica. As fibras óticas são muito interessantes para fabricação de sensores devido à sua insensibilidade a interferências eletro-magnéticas e à boa acurácia das leituras óticas. Para gerar um sensor, as propriedades das fibras óticas podem ser usadas de várias formas:

- as primeiras aplicações se basearam no estudo das franjas de interferência causadas pelo deslocamento do espectros luminosos numa fibra deformada, em relação à uma fibra de controle, quando ambas são alimentadas pelo mesmo sinal ótico. Este tipo de sensor demanda equipamentos complexos e os sinais não são facilmente interpretáveis;
- criam-se texturas superficiais na superfície externa da fibra, denominadas Redes de Bragg, que causam a reflexão de certos comprimentos de onda. A detecção do espectro da luz transmitida ou refletida permite identificar qual o comprimento de onda afetado. Quando a fibra sofre deformações;
- em alguns casos, a fibra é usada simplesmente para conduzir a luz. Em algumas aplicações, um polímero sensível a mudanças de pH e umidade é colocado no extremo da fibra. Quando as condições ambientais mudam, a cor do polímero se altera e o sinal ótico conduzido pela fibra é afetado.

O Professor Basheer, apresentou recentemente, no IV HPC, em Recife, uma compilação de sensores de fibra ótica desenvolvidos na Queen's University, na Irlanda do Norte, que permitem a medição de pH, concentração de cloretos e temperatura.

No Brasil, uma equipe da Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro, sob coordenação dos Professores Arthur Braga e Luiz, já desenvolveram sensores de Bragg.

Na Suíça, sensores de fibra ótica já são corriqueiramente incorporados em mantas ou perfis extrudados de polímeros estruturados com fibras, permitindo que se acompanhe a sua evolução de deformações.

Outros sensores que estão sendo ativamente desenvolvidos buscam monitorar a umidade, principal fator de degradação das estruturas. O Professor Elton Bauer, da Universidade de Brasília, tem trabalhado no desenvolvimento de sensores resistivos de umidade. Os mesmos apresentaram excelentes resultados porém são sensíveis à concentração de sais solúveis existentes na amostra. Um trabalho do LEME, desenvolvido pelo Engenheiro José Mendes de

Araújo, desenvolveu sensores capacitivos de baixo custo, menos sensíveis à presença de íons solúveis. Sensores capacitivos de umidade, com maior precisão, fabricados industrialmente, também estão disponíveis.

4.4 Diagnóstico

Os itens anteriores discutiram sobre as formas como são coletados os dados necessários para subsidiar a montagem de um sistema de avaliação de estruturas de concreto armado. Como se viu, a tendência consiste na realização de inspeções visuais regulares, complementadas por ensaios não-destrutivos eventuais.

Os dados coletados devem então ser organizados de forma a permitir entender quais os mecanismos de deterioração atuantes e estimar sua intensidade. Critérios de agregação devem então ser utilizados para combinar os dados, permitindo a tomada de decisão. De forma geral, deve-se procurar coletar os dados da forma mais desagregada possível, utilizando depois critérios de combinação para que se possa ter uma idéia do estado da obra como um todo. Para tanto é comum subdividir a estrutura em elementos ou sistemas, agrupados por função ou afinidade (por exemplo, em vigas, colunas, paredes de alvenaria, etc).

Para agregar os dados em cada elemento e obter notas médias para uma “família” de elementos, é fundamental atribuir importância aos defeitos identificados durante as inspeções. A combinação do tipo de elemento afetado com a forma e intensidade do mecanismo de degradação caracterizará o estado de deterioração de cada elemento estrutural.

Os parâmetros utilizados na definição da importância relativa dos defeitos são escolhidos de acordo com as expectativas existentes em relação à estrutura. Podem ser considerados como parâmetros de controle qualquer aspecto que afeta a segurança, a estética, a funcionalidade, a facilidade de inspeção ou os custos, entre outros. Independentemente dos parâmetros escolhidos, a variação do desempenho é usualmente representada de forma genérica por uma curva de deterioração, discretizada em estados, conforme mostra a Figura 12.

Os estágios de deterioração normalmente são representados por intervalos numéricos. Para facilitar a classificação dos defeitos é recomendado que se estabeleça uma descrição detalhada das características de cada estágio. No final, produz-se uma enorme matriz de elementos

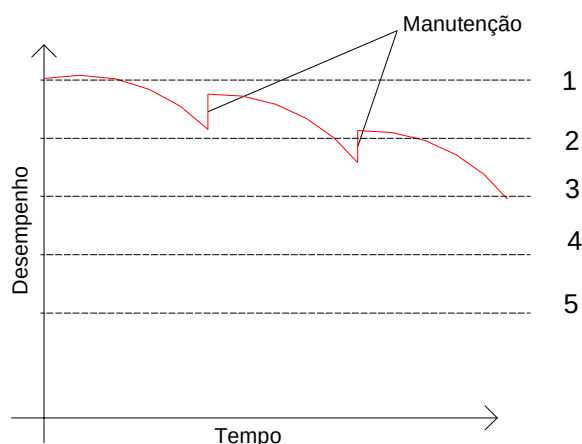


Figura 12 – Curva de deterioração dividida em intervalos discretos.

5. AVALIAÇÃO DE ESTRUTURAS: EXEMPLOS E TENDÊNCIAS

No item anterior foi abordado como são coletados e analisados os dados necessários para a avaliação de uma estrutura. A seguir discute-se algumas das áreas em que a inspeção já está se tornando uma prática comum.

5.1 Inspeção Obras de Arte

Diante da escassez de verbas públicas para investimento em novas construções, a preservação da infra-estrutura civil tem se constituído numa premissa inescapável. Dentre os vários elementos da infra-estrutura, destacam-se as obras de arte viárias, elementos fundamentais no funcionamento dos sistemas de transporte viários.

A manutenção de pontes e viadutos é um processo de grande importância, pois a rede rodoviária é o principal meio utilizado para escoar a produção e abastecer determinadas regiões brasileiras. Esta rede é longa e pouco redundante, o que faz com que interrupções de seu funcionamento pelo comprometimento estrutural de uma obra de arte causem grandes transtornos. Infelizmente, a situação do nosso estoque de obras de arte se caracteriza por ser

delicada, com uma série de manifestações patológicas. Estas manifestações muitas vezes se originam em problemas de projeto e detalhamento ou de erros de execução, sendo freqüentemente potencializados pela falta de manutenção e pela ação de ambientes agressivos, o que leva a um envelhecimento prematuro das estruturas.

Além deste envelhecimento, o sistema de transporte sofre danos que podem ser relacionados ao uso inadequado, caracterizado por um alto tráfego de veículos irregulares e sobrecarregados. Este abuso no uso das rodovias, ao longo dos anos, ocasionou um desgaste de todo o sistema, o que foi agravado pela dificuldade em fazer um acompanhamento sistemático das condições das estruturas. O panorama resultante é preocupante, com as pontes e viadutos sendo diariamente solicitadas acima da capacidade prevista e expostas a danos sem que haja qualquer tipo de controle sistemático ou manutenção preventiva. No Rio Grande do Sul, por exemplo, há cerca de 600 pontes e viadutos em estradas federais, sendo a maior parte delas construída de concreto armado ou protendido e datadas das décadas de 50 e 60. Estas foram calculadas para veículos tipo e volumes de tráfego bem inferiores aos atuais, mas muitas vezes continuam em uso, sem adaptações maiores.

Diversas das manifestações patológicas podem ser registradas em uma simples inspeção visual nas estruturas, o que evidencia alto grau de deterioração que as estruturas se encontram. Ameaça maior são as manifestações pouco aparentes, como a acumulação de danos por fadiga. A política de concessões vem aos poucos mudando este panorama, ao assegurar que sejam feitos investimentos no diagnóstico e solução dos problemas patológicos. Entretanto, há ainda grande oportunidades para avanço.

O desafio da conservação de obras de arte não é exclusividade brasileira. Para auxiliar neste sentido tem se investido muito no desenvolvimento de sistemas de gerenciamento de elementos da infra-estrutura. O grande número de estruturas deterioradas, o significativo impacto econômico da interrupção ou restrição de uso das mesmas e o reduzido volume de recursos para atender às crescentes demandas de manutenção estimulam o desenvolvimento de modelos cada vez mais sofisticados para definir as necessidades e estabelecer prioridades de manutenção. A limitação das verbas para a manutenção, associada ao aumento de demanda e ao grande número de problemas diagnosticados em obras especiais, gera a necessidade de critérios bem definidos para ordenar e priorizar as atividades de manutenção.

A adoção de um esquema estruturado de gerenciamento pode ter um significativo impacto na utilização das verbas existentes, levando à uma distribuição que atenda adequadamente aos critérios de segurança enquanto atua na direção de maximizar os benefícios econômicos obtidos. Ademais, tendo em vista a crescente preocupação com aspectos ambientais e sociais, é necessário estabelecer modelos que levem em consideração fatores desta natureza, incrementando a validade social do processo.

Uma metodologia de inspeção e determinação das condições das obras de arte foi desenvolvida pelos pesquisadores do Laboratório de Ensaios e Modelos Estruturais (LEME) da Universidade Federal do Rio Grande do Sul (UFRGS). A mesma foi elaborada a partir de um modelo teórico desenvolvido por Silva Filho (1999), baseado em um critério de classificação dos danos proposto por Klein et al (1991), tomando como referência procedimentos recomendados pelo DNIT (2004) e pela NBR 9452 (1986).

Inicialmente é feita uma verificação da conformidade, comparando os dados obtidos com os previstos em norma ou com resultados da aplicação de medidas de desempenho. Basicamente, são verificadas a capacidade de carga, a trafegabilidade, a segurança e a funcionalidade. Os elementos não conformes são analisados e, dependendo da importância relativa de seus problemas, colocados em ordem de prioridade para serem submetidos às atividades de manutenção e reabilitação.

A filosofia adotada para organizar os dados consiste em subdividir a obra de arte a ser inspecionada em elementos funcionais. Para cada elemento são definidos os possíveis defeitos e patologias. Estes dados compõem o caderno de inspeção, o qual contém as características gerais da obra em questão e a descrição das possíveis manifestações patológicas em quatro níveis. Durante as vistorias são preenchidos formulários com informações sobre o estado de cada elemento, sendo atribuídas notas para cada lesão observada, em função da intensidade e da importância relativa do dano para o elemento. Cada elemento deve ser vistoriado por pelo menos dois vistoriadores, sendo que a nota do elemento corresponde à média das notas atribuídas.

São empregados dois fatores de ponderação: um fator de intensidade (FI) e um fator de importância relativa (FIR).

O fator de intensidade do dano considera a condição de cada manifestação patológica em uma escala de 0 a 4:

- 0 – elemento em perfeitas condições;
- 1 – elemento em bom estado;
- 2 – elemento em estado razoável;
- 3 – elemento em más condições;
- 4 – elemento em péssimas condições.

Para cada possibilidade de manifestação patológica foi definida a condição aceitável em cada nível. Na tabela 1 apresentam-se, como exemplo, os estágios de deterioração definidos para cada estado, para o caso de infiltração e de corrosão de armadura.

Tabela 1 – Parâmetros para definição do estado de conservação do elemento

<i>Defeito</i>	<i>Condição de conservação</i>							
	0	1	2	3	4			
Infiltração	Perfeitas Condições	Manchas	Sinais de umidade em todo o elemento	Sinais de umidade com gotejamento	Umidade generalizada com escorrimento de água			
Corrosão	Perfeitas Condições	Manchas de óxido de ferro na superfície	Desplacamento do concreto	Corrosão na armadura	Corrosão nas barras principais com acentuada perda de seção			

Além da nota referente ao fator de intensidade do dano (FI), na ocasião da inspeção deve também ser atribuída uma nota relativa ao grau de importância relativa do defeito em relação ao elemento considerado. Esta nota varia na escala de 0 a 100 pontos. As notas finais atribuídas pelos inspetores são convertidas em uma única nota. As notas convertidas são divididas em intervalos associados com o grau de deterioração envolvido.

Tabela 2 – Tabela de conversão das notas atribuídas durante as inspeções.

<i>Estado de conservação</i>	
0	Perfeito
1 - 10	Bom
11 - 25	Aceitável
26 - 50	Tolerável
51 - 75	Inspira cuidado
76 - 99	Exige intervenção
100	Crítico

As notas convertidas na escala 0 a 100 permitem a classificação do estado de conservação do elemento, indicando o grau de deterioração em que este se encontra. A codificação do estado de degradação foi realizada através de uma escala de cores, utilizada durante todo o processo e análise dos dados para facilitar a visualização.

Grau de deterioração do elemento (GDE).

O grau de deterioração do elemento (GDE) é calculado considerando o provável grau de comprometimento estrutural ou de desempenho causado pela manifestação patológica avaliada durante as inspeções. Para tanto, foram estabelecidos os problemas mais relevantes de cada elemento. Para cada um deles foi estabelecida uma nota dentro de uma escala de 0 a 10. Cabe salientar que uma determinada manifestação patológica poderá ter importância diferenciada em função do elemento considerado e de sua relevância em relação ao comportamento estrutural. O GDE corresponde à média ponderada das notas através do uso do fator de gravidade (FG) da manifestação patológica no elemento.

Grau de deterioração família de elementos (GDF).

O grau de deterioração da família de elementos (GDF) é definido pela expressão:

$$GDF = \sum_{i=1}^n \frac{\delta_i \times GDE_i}{n} \quad (\text{Equação 2})$$

Onde: n – número de elementos componentes da família;

GDE – grau de deterioração do elemento;

δ - coeficiente de majoração.

O coeficiente de majoração δ evidencia o elemento altamente danificado, destacando sua contribuição no cálculo do GDF. Este fator foi estabelecido para impedir a possibilidade de dispersão de um elemento em estado crítico dentro de uma família de elementos em bom estado. O coeficiente δ é estabelecido pela Equação 2.

$$\delta = \sqrt{\frac{[(n-m)+2]}{2}} \quad \text{para GDE} > 75 \quad (\text{Equação 3})$$

$$\delta = 1 \quad \text{para GDE} \leq 75$$

Onde m é o número de elementos da família com GDE > 75. O limite de 75 foi estabelecido considerando a escala descrita na Tabela 2. Este valor corresponde ao limite entre o estado que inspira cuidados e o que exige intervenção.

Condição geral da obra de arte

A condição geral da obra de arte é definida pela média ponderada do grau de deterioração das famílias dos elementos (GDF). O valor encontrado classifica a estrutura conforme as condições estabelecidas na Tabela 2. Cabe ressaltar que a condição geral da obra de arte representa uma indicação gerencial de como se encontra o conjunto da obra em função das manifestações patológicas acumuladas em cada elemento. O mesmo serve apenas como indicativo da urgência dos trabalhos de recuperação.

5.2 Inspeção de Fachadas

O final do ano de 1998 marcou a história da cidade de Porto Alegre. O desabamento da marquise das Lojas Arapuá, localizada no centro da cidade, ocorrido em final de Outubro, traumatizou uma cidade que já havia, dois anos antes, vivenciado a queda da marquise do

Banco Lloyd's. Os sessenta e cinco feridos e nove mortos fizeram desta ocorrência a maior tragédia gerada por problemas estruturais na cidade.

A queda de outra marquise, em estrutura metálica, localizada na Garagem Mauá, durante o mês de Novembro, galvanizou as atenções para o problema da falta de conservação destes elementos. A resposta do poder público municipal se deu através da introdução, em Dezembro do mesmo ano, de uma lei de conservação de fachadas que estabeleceu a obrigatoriedade de realização de laudos de estabilidade estrutural das marquises a cada três anos. A Lei Ordinária 6.323 estabelece os critérios para a “Conservação de Elementos nas Fachadas dos Prédios”. Em seu artigo primeiro a lei dispõe que os proprietários são responsáveis pela manutenção e conservação dos elementos construtivos ou de elementos apostos às fachadas dos prédios. Ou seja, o escopo é amplo, indo além das marquises e englobando todos os elementos de fachada cuja deterioração pudesse resultar em riscos aos transeuntes.

O artigo segundo da lei foca na questão das marquises e estabelece que os responsáveis, síndicos ou proprietários, por prédios que possuam marquises projetadas sobre logradouros públicos, deverão apresentar um laudo de estabilidade estrutural da mesma à Secretaria Municipal de Obras e Viação (SMOV), encarregada desta fiscalização.

A validade dos laudos foi fixada em três anos, devendo os mesmos ser atualizados após este período. Para estimular o seu cumprimento, a lei determina que as cartas de habitação só sejam concedidas a prédios que possuam marquises quando os laudos estiverem em dia, e abre a possibilidade de aplicação de multa (50 OTNs) e de interdição, a critério da SMOV, em caso de descumprimento.

O decreto 9.425, de 28 de abril de 1989, regulamentou “a aplicação das medidas de conservação de marquises estabelecidas na Lei no. 6.323”, dando outras providências. Este decreto diz que o Laudo de Estabilidade Estrutural deverá indicar as condições em que se encontra a marquise, especialmente no que concerne a existência de fissuras, deformações, manchas de infiltração de água, defeitos de impermeabilização, cargas adicionais ou qualquer outra anomalia, e recomendar as medidas necessárias para a sua perfeita manutenção e conservação. Define-se, ainda, que o laudo deverá ser elaborado e subscrito por um profissional legalmente habilitado e encaminhado ao Protocolo da SMOV juntamente com a Anotação de Responsabilidade Técnica (ART).

A estrutura do laudo, definida pelo decreto, deve conter dados relativos ao proprietário do imóvel, ou seu representante legal. O prazo para apresentação dos laudos é de 60 dias, decorridos três anos da construção ou da emissão de laudo anterior. Para as marquises antigas deu-se prazo de 60 dias, a partir da vigência do decreto, para apresentação dos laudos. Um prazo adicional de 60 dias é dado para a realização das atividades de conservação e manutenção preconizadas no laudo.

É de responsabilidade do proprietário do imóvel, ou de seu representante legal, encaminhar os laudos nos períodos previstos, executar as recomendações constantes no mesmo e comunicar sua execução à secretaria. Todas as atividades de recuperação e demolição devem ser acompanhadas de anotação de responsabilidade técnica (ART).

A obrigatoriedade de realização de inspeções e avaliações abriu um novo mercado, para o qual o meio técnico não estava suficientemente preparado. Muitas inspeções foram efetuadas, com resultados variados. Soluções inadequadas foram propostas e, em alguns casos, ensaios e escoramentos mal realizados acabaram por prejudicar ainda mais as estruturas. Com o tempo, entretanto, uma cultura de inspeção e conservação começou a se estabelecer. Hoje em dia os usuários, o meio técnico e o poder público municipal estão conscientes de que é necessário monitorar as condições das marquises.

5.3 Inspeção Predial

Uma forte tendência tem sido observada no sentido de ampliar a. Fatos como a ruptura da barragem de Moxotó ou a queda do Edifício Areias Brancas motivam a sociedade e os legisladores a clamar por mais controle sobre o estado das obras civis. A descoberta de que algumas das fundações em Recife se encontram sob ação de um severo ataque álcali-agregado alertam para a necessidade de acompanhar o envelhecimento das obras, especialmente nas áreas menos visíveis. Em dezembro de 2004 o IBRACON lançou um manifesto, com apoio da ABECE e do IBAPE/SP, defendendo a idéia da realização de inspeções prediais amplas.

Embora a idéia de controlar e acompanhar seja meritória, os custos e responsabilidades envolvidas em inspeções globais são de tal monta que sua viabilização, em larga escala, pode se tornar inviável. No panorama atual pode ser mais interessante concentrar os esforços nas zonas onde o risco for maior. Lembrando a teoria, risco pode ser definido como;

$$R \text{ (Risco)} = P \text{ (Prob. Ocorrência)} \times C \text{ (Consequência)} \quad (\text{Equação 4})$$

Ou seja, devemos nos concentrar nas áreas onde os problemas são mais prováveis e podem ter consequências mais danosas. No caso de edifícios, poderia-se sugerir algumas questões importantes:

- Inspeção dos elementos de fachada: pois estão submetidos a ações ambientais mais intensas e geram mais risco aos transeuntes, devido ao perigo de queda;
- Inspeção dos sistemas de proteção ao fogo: embora a ocorrência de incêndios seja rara, suas consequências, em termos de ameaça à integridade física do usuário e danos à edificação são muito elevadas;
- Inspeção dos pilares de subsolo: pois estão submetidos a cargas elevadas e sujeitos à ação de umidade ascensional, gás carbônico e colisões (em garagens) e pouca manutenção.

É importante ressaltar que a tendência atual é transferir a responsabilidade pela realização das inspeções para os administradores do condomínio, em particular o síndico. Muitos deles, todavia, além de leigos, desconhecem totalmente suas responsabilidades. Isto pode começar a causar problemas sérios. Além disto, os condomínios, frequentemente, não se mostram dispostos a investir em atividades de manutenção ou tratamento preventivo. Isto permite que os problemas se agravem, aumentando o risco para a estrutura e seus usuários⁴.

6. COMENTÁRIOS SOBRE CONSERVAÇÃO DE ESTRUTURAS E MODELOS DE PROGNÓSTICO

A conservação de estruturas consiste, basicamente, no estabelecimento e implementação de uma estratégia de intervenção na obra, visando garantir que se atinja a vida útil de projeto ou se amplie a vida útil de serviço.

⁴ A Engenheira Cristiane Oliveira, do Grupo de Pesquisa LEME, está desenvolvendo um estudo sobre Sistemas de Inspecção de Fachadas que inclui um levantamento sobre a percepção de risco e “willingness to pay” por atividades de manutenção de condôminos de edifícios residenciais e comerciais.

Ao ser atingido o limite mínimo de utilização, a estrutura deverá ser desativada ou então sofrer um processo de revitalização que aumente sua vida útil. As atividades de recuperação podem assumir diferentes complexidade e terem diferentes impactos sobre a curva de deterioração e, conseqüentemente, sobre a vida útil, como segue:

- Reparos – quando a operação visa apenas corrigir um problema localizado, impedindo sua progressão ou recuando as condições iniciais;
- Recuperação – reparos de maior complexidade, normalmente com o objetivo de recuperar o desempenho original;
- Reforços – atividades especiais, que buscam elevar o desempenho, normalmente por questões de mudança de uso;

Cabe salientar que, como mostrado na figura 1, nem sempre a decisão tomada pode envolver a realização de uma operação de recuperação. Em muitos casos a alternativa pode ser pela demolição ou pelo simples monitoramento. Teoricamente, a decisão sobre qual a estratégia de intervenção a adotar deveria se basear numa análise de custos e benefícios, a longo prazo, das conseqüências das diferentes alternativas de intervenção. É interessante notar que, dependendo da quantidade de recursos, pode ser necessário retardar as atividades de manutenção, o que pode acarretar em custos adicionais. Para permitir definir quais as atividades prioritárias, é fundamental, portanto, definir a importância relativa de certos mecanismos de deterioração. Quando possível, isto deve ser feito com auxílio de modelos de prognóstico. Todavia, frequentemente não existem dados suficientes nem modelos adequados para tanto. Neste caso é necessário fazer juízos de valor, com base técnica, sobre a importância relativa e conseqüências dos defeitos. Os modelos de previsão da vida útil normalmente se encaixam em uma das seguintes categorias:

- com base nas experiências anteriores
- com base em ensaios acelerados
- através de métodos deterministas
- através de métodos estocásticos ou probabilistas⁵

⁵ O Professor Jairo Andrade, da Ulbra, fez uma excelente revisão sobre alguns modelos de previsão de vida útil em sua tese de doutorado, desenvolvida sob supervisão da Professora Denise Dal Molin, no NORIE/UFRGS.

Hoje em dia busca-se cada vez mais desenvolver modelos probabilísticos, capazes de incorporar a incerteza inerente envolvida com o avanço de processos de degradação. Em geral, pode-se observar que os modelos de carbonatação e de penetração de cloretos⁶ tem sido os mais desenvolvidos e investigados.

Cuidados especiais devem ser tomados quando se aborda a conservação de estruturas históricas. Neste caso o valor histórico adicional destas obras pode alterar a equação de custos e benefícios utilizada para definir a estratégia de manutenção.

O escopo deste trabalho não inclui a discussão das técnicas de modelagem e previsão de desempenho, nem a abordagem das estratégias de conservação. Mais informações sobre estes temas podem ser obtidas junto ao Grupo de Pesquisa LEME (www.ppgec.ufrgs.br/leme).

7. BIBLIOGRAFIA RECOMENDADA

- AÏTCIN, P.C. – CONCRETO DE ALTO DESEMPENHO – ED. PINI – SÃO PAULO – SP, 2000. TRADUÇÃO: GERALDO G. SERRA. 667P.
- ALMEIDA, I. R. SUPERPLASTIFICANTES, MICROSSÍLICA E DURABILIDADE DOS CONCRETOS. TÊCHNE, N. 24, SET/OUT., 1996. SÃO PAULO: PINI. P. 30-33.
- ANDREIS, L, E. A VIDA ÚTIL, NO ASPECTO DA DURABILIDADE, DE UMA OBRA DE ARTE EM CONCRETO ARMADO. IN: DAMSTRUC' 1998 – INTERNATIONAL CONFERENCE ON THE BEHAVIOUR OF DAMAGED STRUCTURES, 1998, NITERÓI. ANAIS ELETRÔNICOS... RIO DE JANEIRO: 1998. 10 P. DISPONÍVEL EM: <HTTP://WWW.INFOHAB.ORG.BR>. ACESSO EM 28 NOV. 2004.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS – ABNT. VISTÓRIAS DE PONTES E VIADUTOS DE CONCRETO. NBR 9452. 1986.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR 6118. PROJETO E EXECUÇÃO DE ESTRUTURAS DE CONCRETO – PROCEDIMENTO. RIO DE JANEIRO, 2003.
- BLANCHARD E FABRYCKY. SYSTEMS ENGINEERING AND ANALYSIS, 3RD EDITION, PRENTICE HALL, ENGLEWOOD CLIFFS, NJ, 1998.
- CÁNOVAS, M. F. PATOLOGIA E TERAPIA DO CONCRETO ARMADO. SÃO PAULO: ED. PINI, 1988. 522 P.
- CARLSON, R.W. – REMARKS ON DURABILITY OF CONCRETE – JOURNAL OF THE AMERICAN CONCRETE INSTITUTE, P. 359-364, 1939.
- DEPARTAMENTO NACIONAL DE INFRA-ESTRUTURA DE TRANSPORTES – DNIT. MANUAL DE CONSERVAÇÃO RODOVIÁRIA. PROPOSTA DE NORMA. 2004.
- HELENE, PAULO R. L., VIDA ÚTIL DAS ESTRUTURAS DE CONCRETO. IN: IV CONGRESSO ÍBERO AMERICANO DE PATOLOGIA DAS CONSTRUÇÕES, 1997, PORTO ALEGRE, 30 P.
- HOUDUSSE, O., HORNAIN, H., MARTINET, G. – PREDICTION OF LONG-TERM DURABILITY OF

⁶ O Professor André Guimarães, da Universidade de Rio Grande, tem tido bastante sucesso com o desenvolvimento de modelos de penetração de cloretos com influência do grau de saturação.

- VASCO DA GAMA BRIDGE IN LISBON – IN: FIFTH INTERNATIONAL CONFERENCE CANMET/ACI – DURABILITY OF CONCRETE – BARCELONA, SPAIN, 2000 – P.1037-1051.
- JOHN, V. M. AVALIAÇÃO DA DURABILIDADE DE MATERIAIS, COMPONENTES E EDIFÍCIOS: CÁLCULO DO CUSTO GLOBAL. IN: SIMPÓSIO DE DESEMPENHO DE MATERIAIS E COMPONENTES DE CONSTRUÇÃO CIVIL, 1º., 1988, FLORIANÓPOLIS. ANAIS ELETRÔNICOS... FLORIANÓPOLIS: 1988. 10 P. DISPONÍVEL EM: <[HTTP://WWW.INFOHAB.ORG.BR](http://www.infohab.org.br)>. ACESSO EM 28 NOV. 2004.
- KLEIN, D. L.; GASTAL, F. P. S. L.; CAMPAGNOLO, J. L.; SILVA FILHO, L. C. P. CRITÉRIOS ADOTADOS NA VISTORIA E AVALIAÇÃO DE OBRAS DE ARTE. XXV JORNADAS SUL-AMERICANAS DE ENGENHARIA ESTRUTURAL, PORTO ALEGRE, RS, 1991.
- LEVY, S. M. CONTRIBUIÇÃO AO ESTUDO DA DURABILIDADE DE CONCRETOS, PRODUZIDOS COM RESÍDUOS DE CONCRETO E ALVENARIA. SÃO PAULO, 2001. 184 P. TESE (DOUTORADO) – ESCOLA POLITÉCNICA DA UNIVERSIDADE DE SÃO PAULO, UNIVERSIDADE DE SÃO PAULO.
- MEHTA, P. K.; MONTEIRO, P. J. M. CONCRETO: ESTRUTURA, PROPRIEDADES E MATERIAIS. 1. ED. SÃO PAULO: PINI, 1994. 573 P. ISBN 85-7266-040-2.
- NEVILLE, A.M. – PROPRIEDADES DO CONCRETO – ED. PINI – SÃO PAULO – SP, 1997. TRADUÇÃO: ENG. SALVADOR E. GIAMMUSO.
- PRUDÊNCIO JR, W. J. A DURABILIDADE DA CONSTRUÇÃO É FATOR DE CUSTO. IN: ENTAC – QUALIDADE E TECNOLOGIA NA HABITAÇÃO, VI., 1995, RIO DE JANEIRO. ANAIS ELETRÔNICOS... SÃO PAULO: ANTAC – ASSOCIAÇÃO NACIONAL DE TECNOLOGIA DO AMBIENTE CONSTRUÍDO, 1995, P. 655-660. DISPONÍVEL EM: <[HTTP://WWW.INFOHAB.ORG.BR](http://www.infohab.org.br)>. ACESSO EM 28 NOV. 2004.
- SEIDLER, N.; DAL MOLIN, D. C. C. EFEITO DA SÍLICA ATIVA NA ALCALINIDADE E CONSUMO DE HIDRÓXIDO DE CÁLCIO DURANTE A HIDRATAÇÃO DO CIMENTO. IN: CONGRESSO BRASILEIRO DO CONCRETO, 43., 2001, FOZ DO IGUAÇU. ANAIS... [CD-ROM]. SÃO PAULO: IBRACON, 2001. 16 P.
- SILVA FILHO, L. C. P. . TOWARDS ADVANCED BRIDGE MANAGEMENT SYSTEMS. PHD THESIS. UNIVERSITY OF LEEDS. 1999.
- SILVA, E.; MORAIS, D.; ANDRADE, R. A.; GUIMARÃES, M. C. N.; ANDRADE, J. J. O. ANÁLISE DA DURABILIDADE DOS MATERIAIS EMPREGADOS PARA REPARO/REFORÇO EM ESTRUTURAS DE CONCRETO ARMADO. IN: DAMSTRUC' 2000 – INTERNATIONAL CONFERENCE ON THE BEHAVIOUR OF DAMAGED STRUCTURES, 2º., 2000, NITERÓI. ANAIS ELETRÔNICOS... RIO DE JANEIRO: 2000. 9 P. DISPONÍVEL EM: <[HTTP://WWW.INFOHAB.ORG.BR](http://www.infohab.org.br)>. ACESSO EM 27 SET. 2004.
- SOUZA, R. H. F.; APPLETON, J. A. S. A UTILIZAÇÃO DE ARGAMASSAS DE REPARAÇÃO PRÉ-EMPACOTADAS NO COMPORTAMENTO ESTRUTURAL DE PILARES DE CONCRETO. IN: JORNADAS SUL-AMERICANAS DE ENGENHARIA ESTRUTURAL, XXX, 2002, BRASÍLIA. ANAIS... [CD-ROM]. BRASÍLIA: UNB, 2002. 16 P.
- TAKEUTI, A. R. REFORÇO DE PILARES DE CONCRETO ARMADO POR MEIO DE ENCAMISAMENTO DE CONCRETO DE ALTO DESEMPENHO. SÃO CARLOS, 1999. 184 P. DISSERTAÇÃO (MESTRADO) – ESCOLA DE ENGENHARIA DE SÃO CARLOS, UNIVERSIDADE DE SÃO PAULO.
- TUTHILL, L.H. – LONG SERVICE LIFE OF CONCRETE – CONCRETE INTERNATIONAL – JUL-1991 – P.15-17.