

5

Monitoreo en la Construcción Civil
Monitoração na Construção Civil
Monitoring in Civil Construction

Boletín Técnico

Gilberto Nery

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



Elaboración de:



PREFÁCIO

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

Mérida - México, março de 2013

Prof. Paulo Helene
Presidente ALCONPAT Internacional

Prof. Bernardo Tutikian
Coordenador Comisión Temática de Procedimientos Recomendables

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

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

Sede permanente ALCONPAT:

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

Presidente Congreso CONPAT 2013

Prof. Sérgio Espejo

Comisiones Temáticas:

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

Missão da ALCONPAT Internacional:

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

Visão da ALCONPAT Internacional:

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

Valores de ALCONPAT Internacional:

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

Objetivos da ALCONPAT Internacional:

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



05

ALCONPAT Internacional

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

Boletín Técnico

¿Qué es el monitoreo en la construcción?
O que é monitoração na construção civil?
What is monitoring in construction?

Gilberto Nery
USP. BRASIL

Introdução

Quando se constrói uma estrutura, na maioria das vezes, não se sabe ao certo até quando esta será necessária, útil ou ainda, segura. (vide Fig. 1).

No projeto utilizam-se características conhecidas dos materiais, como resistência à compressão, resistência a ataques químicos e a intempéries, além de expectativas de carregamento e condições de exposição em uso. Porém, as reais interações entre a estrutura e o ambiente no qual ela está inserida são difíceis de prever ou simular. Além do carregamento em uso, que pode variar de forma diferente do previsto (incremento de tráfego sobre uma ponte ou modificação de uso de um edifício, por exemplo), outra questão são as sobrecargas acidentais, como terremotos, inundações, etc. Todas estas incertezas fazem com que a uma previsão precisa da degradação da estrutura ao longo do tempo seja difícil (quase impossível). Para

confirmar a segurança e a fidelidade da estrutura em relação ao projeto são feitas inspeções, que avaliam a degradação, a segurança e as condições gerais da estrutura. Podem-se citar como principais usos do monitoramento estrutural na engenharia civil: auxiliar as inspeções provendo ao especialista um histórico de degradação e comportamento que possibilita um melhor entendimento de possíveis problemas e a identificação de causas; certificar uma estrutura em relação à fidelidade ao projeto; avaliar a segurança de uma estrutura antiga ou num dado momento em que condições especiais se apresentem; e otimizar programas de manutenção.

O conceito de monitoramento estrutural já era conhecido e utilizado principalmente na indústria aeronáutica e mecânica, mas foi no início dos anos 90 que o monitoramento estrutural ou SHM (sigla que vem do inglês *Structural Health Monitoring*)



Figura 1. Exemplos de estruturas que provavelmente ultrapassaram ou não alcançaram a vida útil que os projetistas imaginaram.

começou um desenvolvimento considerável na área da construção civil. A partir de então, vários centros de pesquisa no mundo foram criados ou se especializaram neste campo de conhecimento tornando o tema uma nova especialidade da engenharia. Um exemplo do uso do monitoramento na Engenharia Civil pode ser encontrado no trabalho de Branco e Paulo (2012) no qual é apresentada toda a sequência de projetos e ações para a construção de pontes com vida útil de projeto de mais de 100 anos.

Uma definição simples e direta para monitoramento (ou monitoração) é uma sequência de observações ou mensurações sistemáticas devidamente registradas e acompanhadas de avaliação. No caso do monitoramento estrutural parâmetros relativos à condição e desempenho da estrutura são observados, gravados e avaliados com o intuito de fornecer de forma precisa e ágil a situação na qual a estrutura se encontra. O monitoramento estrutural pode ser considerado uma ferramenta e pode ser usada para aumentar a segurança, durabilidade e otimização de manutenção de estruturas. Graças ao monitoramento ao longo do tempo, que permite considerar o histórico completo da estrutura, é possível também a composição

de um prognóstico (evolução do dano, vida útil residual, etc.) (BALAGEAS *et al.*, 2006).

O monitoramento pode ter duas abordagens básicas que podem ser usadas em conjunto em alguns casos, relativo ao comportamento estrutural ou ao material. A diferença entre as abordagens vem desde os tipos de sensores usados até o tipo de informação que se obtém.

O monitoramento do comportamento estrutural fornece informações relativas à resposta da estrutura a cargas aplicadas, confirmação de comportamento previsto em projeto, modificações no sistema estrutural, entre outras. Normalmente é usado em conjunto com modelos matemáticos da estrutura para comparação de valores teóricos com valores medidos. Este tipo de monitoramento pode auxiliar ainda em outras questões como, por exemplo, a abordada por Helene (2011), onde um pilar pode ter recebido um concreto de resistência abaixo da de projeto. Neste caso, o pilar com menor resistência deformará mais que o previsto em projeto e isso sobrecarregará os pilares adjacentes causando também uma deformação diferenciada. Fazendo-se um teste de carga e comparando o comportamento da estrutura com um modelo matemático é possível mensurar o efeito da inconformidade

no funcionamento da estrutura, dando mais ferramentas ao calculista para analisar o caso. Outros exemplos são a análise de uma estrutura após um acidente onde os dados do monitoramento antes e depois do acidente forneceriam informações importantes sobre o quanto à estrutura foi afetada e em casos de reforço estrutural para avaliação do comportamento da estrutura após o reforço.

O monitoramento de material dá informações relativas ao material (concreto) e às condições ambientais as quais ele esteja inserido, como: envelhecimento, estado de degradação, modificação química de componentes, umidade, temperatura,

2. Conceitos

Não existe material perfeito e o concreto não é uma exceção à regra, por isso tem defeitos. Estes defeitos, que podem ser poros, fissuras, vazios, etc. diminuem o desempenho do material e sua durabilidade. Para usar o concreto como componente estrutural o engenheiro utiliza-se do conhecimento dessas imperfeições para projetar uma estrutura considerando, para efeitos de cálculo, o mínimo desempenho que o concreto utilizado pode apresentar dadas as imperfeições. Ao longo da sua utilização, agentes agressivos do ambiente e o uso degradam o material, diminuindo seu desempenho. Neste contexto, para especificar o significado de alguns termos, usou-se aqui a relação hierárquica entre Defeito, Dano e Falha, proposta por *Worden e Manson (1999)* e utilizada ainda hoje, que as descreveram da seguinte forma:

- Defeito: é inerente ao material e uma estrutura será considerada em condição ideal mesmo que o elemento apresente defeitos (ex. poros);
- Dano: acontece quando a estrutura já não opera em sua condição ideal, porém, continua

3. Projeto de monitoramento

É importante destacar que o monitoramento estrutural, como qualquer outra parte da estrutura, carece de estudo, pesquisa, projeto e adequação do projeto, em outras palavras, um especialista envolvido em todos os passos de implantação. É importante acabar com a crença de que é apenas a ação de se instalar sensores e verificar

entre outras. É normalmente usado em conjunto com modelos de previsão e os conhecimentos relativos aos efeitos de certas modificações de características no concreto (ex. efeito da variação de pH do concreto na probabilidade de corrosão da armadura).

Resumidamente, o monitoramento produz informações úteis relativas ao desempenho do material, mas pouca informação relativa ao comportamento da estrutura, e o inverso é verdadeiro para o monitoramento do comportamento estrutural (*GLISIC & INAUDI, 2002*).

funcionando de maneira satisfatória, apenas numa maneira não otimizada (ex. fissuras aceitáveis do ponto de vista da durabilidade);

- Falha: acontece quando a estrutura já não se comporta de forma satisfatória em relação às exigências de uso ou há uma modificação no sistema que produz uma redução inaceitável de qualidade (ex. deslocamento de partes do concreto devido a corrosão de armaduras).

Assim, pode-se deduzir que:

- Uma estrutura não está necessariamente em risco ou necessita de intervenção imediata apenas pela presença de dano;
- O sistema de monitoramento é responsável por acompanhar o desenvolvimento de uma grandeza que permita avaliar o dano, garantindo que este não provoque uma falha e fornecendo informações relevantes para a manutenção da estrutura;
- A informação gerada pelo sistema de monitoramento permite a composição de um prognóstico do problema facilitando o planejamento e otimização de uma intervenção.

resultados é suficiente.

O projeto de monitoramento é composto por várias etapas e a primeira delas é a definição clara e sucinta do objetivo do monitoramento. Como exemplos de objetivos possíveis pode-se citar:

- Verificação de integridade da estrutura após um terremoto;

- Confirmação da eficácia de uma determinada solução para um problema existente na estrutura;
- Acompanhamento da evolução de um problema para planejamento e otimização de intervenção;
- Certificação da estrutura em relação ao projeto.

E pode-se continuar por mais páginas e páginas, pois os possíveis objetivos são incontáveis. Na maioria dos casos, o objetivo vai determinar a abordagem a ser usada.

Com a abordagem definida é possível determinar o tempo de aplicação, as grandezas e a abrangência do monitoramento e só de posse destas informações pode-se escolher os sensores de acordo com a durabilidade, tecnologia, precisão, resolução e

exigências do local de aplicação.

A Fig. 2 mostra esquematicamente um exemplo de relação de dependência entre as etapas do projeto de monitoramento. Pode haver mais ou menos etapas dependendo da complexidade da estrutura e do monitoramento que se deseja aplicar. As cores representam a influência da equipe de monitoramento na etapa. A cor roxa representa dados de entrada do projeto, aos quais a equipe não tem influência. A cor azul representa as etapas definidas em conjunto com outros profissionais envolvidos com a estrutura e finalmente a cor verde representa as etapas que são de responsabilidade da equipe de projeto de monitoramento.

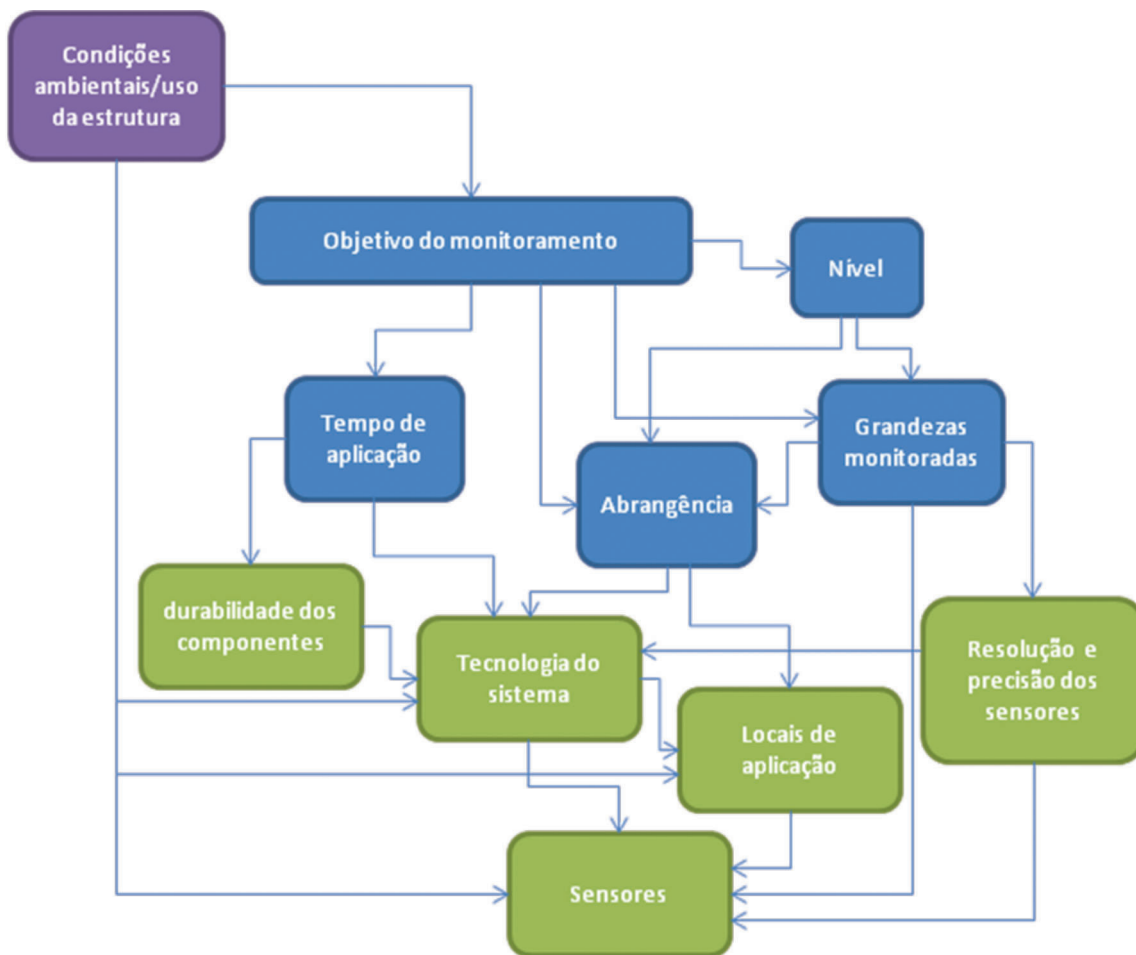


Figura 2. Relação de dependência nas etapas do projeto de monitoramento estrutural até definição dos sensores.

A partir da definição do objetivo e abordagem, cada uma das etapas é comentada a seguir.

3.1 Nível

Qualquer estrutura está sujeita à degradação, imposta por uso, ambiente ou acidente. O início

do projeto de monitoramento é exatamente definir quais os agentes de degradação são os mais

relevantes para a estrutura e, principalmente, quais os danos que poderão surgir derivados do acúmulo de influências dos diversos agentes de degradação. Refere-se por nível a quantidade, qualidade e frequência de informações coletadas, em outras palavras, o nível de diagnóstico que será conseguido a partir dos dados gerados pelo monitoramento. Os níveis comumente usados como referência no SHM são:

Nível 1 - Detecção da existência de dano;

Nível 2 - Detecção e localização do dano;

Nível 3 - Detecção, localização e quantificação do dano;

Nível 4 – Estimativa da vida útil remanescente da estrutura (prognóstico);

Nível 5 - Auto diagnóstico;

Nível 6 - Auto reabilitação (reparo).

Sendo os níveis 5 e 6 metas dos pesquisadores, mas que atualmente não são uma realidade.

3.2 O tempo de aplicação

As definições de defeito, dano e falha introduzem a ideia de escala de gravidade no SHM. É importante também considerar a escala de tempo, pois um dano pode ser agravado lentamente ao longo de anos ou pode ocorrer em uma fração de segundos (*WORDEN et. al., 2007*), exemplos dos dois casos são a corrosão de armadura como dano lento e um choque de um caminhão na estrutura ou um terremoto como dano rápido.

O monitoramento estrutural pode ser aplicado

de forma permanente, contínua, periódica ou periodicamente contínua. Na forma que melhor representar a performance da estrutura (*GLISIC & INAUDI, 2003*). O tempo de aplicação será determinado pelo processo de degradação que se quer monitorar e do uso da estrutura e pode variar desde alguns dias até toda a vida útil da estrutura. O tempo de aplicação influenciará os materiais e métodos usados no monitoramento.

3.3 Grandezas monitoradas

A escolha dos parâmetros que serão objeto do monitoramento depende de uma série de fatores, tais quais: tipo e propósito da estrutura, material utilizado, condições ambientais e fenômeno de degradação esperado. Estes parâmetros podem ser de natureza mecânica, física ou química.

Nos sistemas de monitoramento, a medição de grandezas como deformação, deslocamentos, temperatura, entre outras, é usada para se inferir sobre o estado da estrutura (*ASSIS, 2007*).

As grandezas a serem monitoradas são uma das mais importantes decisões para o desempenho do monitoramento. São definidas basicamente pelo objetivo e nível do monitoramento e devem representar da maneira mais direta e fiel possível o dano que se deseja acompanhar. As grandezas podem ser de natureza mecânica, física ou química

e as que são monitoradas com maior frequência são:

Mecânicas

- Deformação;
- Tensão;
- Deslocamento;
- Abertura de fissuras;
- Carga.

Físicas

- Temperatura;
- Umidade;
- Poro pressão.

Químicas

- Penetração de cloretos;
- Penetração de sulfatos;
- pH;
- Frente de carbonatação;
- Potencial de corrosão.

3.4 Abrangência

A abrangência diz respeito à escala e distribuição dos sensores e tem a mesma importância que a

definição da grandeza ou a tecnologia utilizada. Os sensores podem ser divididos em duas categorias

relativas à escala, os pontuais ou discretos e os contínuos ou distribuídos (*CLISIC & INAUDI, 2007*).

O sensor pontual é normalmente usado em situações onde a ação do agente de degradação é homogênea ou próxima disso, por exemplo, frente de carbonatação numa face de uma peça estrutural. O sensor distribuído tem seu uso justificado nos casos

onde é de suma importância a identificação do local no qual o dano é causado ou quando o dano pode se apresentar apenas em um ponto da estrutura e é importante cobrir um maior número de pontos. Por exemplo, monitoramento da estrutura da asa de um avião.

3.5 Durabilidade dos componentes

É o período de tempo durante o qual os componentes precisam se manter funcionando e confiáveis, é determinado pelo tempo de aplicação definido anteriormente. Normalmente é

interessante ter componentes que durem além do tempo previsto do monitoramento, para haver a possibilidade de uma possível continuação no caso de uma necessidade.

3.4 Locais de aplicação

Como o nome sugere, é a etapa na qual os locais exatos para aplicação dos sensores serão definidos. Para isso serão levadas em consideração as condições ambientais e de uso da estrutura, o tempo de aplicação, a tecnologia do sistema e a durabilidade exigida. O maior desafio na definição

do local de aplicação é encontrar a melhor forma de aplicar os sensores na estrutura conseguindo a maior representação possível do dano, com o menor número possível de sensores. Para tal, o projetista faz uso de métodos estatísticos, simulação numérica, experiência própria, etc.

3.5 Resolução dos sensores

É imprescindível definir a resolução ideal para o projeto. Isso evitará que seja utilizado um sensor que não perceba mudanças na grandeza de interesse

e, no outro extremo, evitar gastos supérfluos com sensores mais precisos do que o necessário, sendo estes mais sujeitos a interferências e ruídos.

3.6 Tecnologia do sistema

Com todo o avanço observado na área do monitoramento estrutural, é de se esperar que as tecnologias utilizadas também avançassem. Hoje há uma grande gama de possibilidades no que diz

respeito às tecnologias utilizadas no SHM. Cada tecnologia tem suas vantagens, desvantagens, potencialidades e limitações e devem ser testadas e avaliadas no uso que se deseja colocá-las.

3.7 Sensores

Segundo o Vocabulário Internacional de Metrologia (VIM, 2008), publicado pelo INMETRO, um sensor é um instrumento que é diretamente afetado por um fenômeno, corpo ou substância que carrega a quantidade a ser medida e converte em um sinal que pode ser lido por um observador ou um instrumento. As etapas anteriores culminam na decisão por um sensor que deve corresponder às exigências definidas.

Hoje, existem diversas tecnologias usadas para

o SHM. Na engenharia civil, as mais comuns são a elétrica, a óptica e a eletroquímica. Cada tecnologia tem suas vantagens e desvantagens e precisa ser entendida antes de ser usada pelo engenheiro, pois só assim poderão prever as interferências e a durabilidade do sistema. Um maior aprofundamento nas tecnologias não será contemplado neste capítulo por ser um assunto extenso e que demanda vários conceitos.

3.8 Sistema de monitoramento

Como já foi citado anteriormente, o monitoramento estrutural tem por finalidade fazer leituras periódicas de características/grandezas importantes para a estrutura, de forma a fornecer informações seguras sobre danos sofridos e possibilitar um melhor planejamento de manutenção e previsão de vida útil, além de garantir a segurança dos usuários. Já foi dito também que isso é feito através de sensores. A leitura desses sensores é feita com o uso de um interrogador ou sistema de aquisição de

dados, que verifica o estado do sensor, transforma essa medida de estado em números e os organiza da forma que for programado. Estes dados passam por um tratamento e análise. A análise dos dados auxilia na tomada de decisão e segue para um banco de dados, para, posteriormente, ser usada na retroalimentação, melhorando o tratamento dos dados e servindo como base de comparação dinâmica da análise. A Fig. 3 apresenta um fluxograma típico de um sistema de monitoramento.



Figura 3: fluxograma de sistema de monitoramento

3.9 Rede de sensores

A rede de sensores é o ponto inicial do sistema de monitoramento, o tipo e distribuição são definidos pelos parâmetros citados no item 3. Todo o sistema de monitoramento está baseado na premissa de que o sensor foi bem escolhido e distribuído na

estrutura. Assim, fica claro que qualquer engano ou erro na escolha e distribuição dos sensores dificilmente poderá ser corrigida/compensada através do sistema.

3.10 Sistema de aquisição

O sistema de aquisição de dados é o instrumento que receberá os sinais enviados pelo sensor. Estes sinais serão influenciados por mudanças na propriedade física do sensor que é afetada pela grandeza de interesse. O sistema de aquisição de dados é responsável por traduzir o valor lido num valor representativo da grandeza monitorada, processar os dados, organizar as informações e armazená-las ou transmiti-las.

Dependendo da tecnologia utilizada, os sistemas de aquisição de dados podem ter diferentes componentes. O mais comum é que o sistema seja composto de:

Condicionador de sinais – O condicionador de sinais é responsável por preparar o sinal recebido e enviá-lo ao conversor A/D, na forma em que o

conversor seja mais eficiente. Podem fazer parte do condicionamento de sinais:

- Amplificador de sinais – Amplifica tensão;
- Atenuador de sinais – Atenua tensão;
- Isolamento – Protege o equipamento de descargas elétricas;
- Filtro – Rejeitam ruídos causados por interferências;
- Excitação – Alguns sensores necessitam de excitação para leitura;
- Linearização – Lineariza o sinal do sensor com a grandeza de interesse (pode ser feita na análise de dados);
- Compensação de junta fria – Necessária para utilização de termopares;
- Complemento de ponte – Complementos de

ponte de Wheatstone auxiliam no uso de *strain gauges*;

Conversor A/D - O conversor analógico para digital ou conversor A/D é um circuito responsável por transformar o sinal analógico recebido do sensor em sinal digital para transmissão e análise;

Central de processamento – Responsável pelo processamento dos dados, organizando-os em dados eletrônicos.

Programa de interface/aquisição – Através

3.11 Tratamento de dados

O tratamento dos dados é a fase onde os dados são organizados de forma a apresentar informações relativas à estrutura monitorada de forma mais clara possível. Gráficos, barras, relógios marcadores, várias são as maneiras de tornar os dados mais claros e rápidos de serem lidos / entendidos. Um bom tratamento de dados

3.12 Análise de dados

A análise e gestão dos dados gerados pelo monitoramento é a peça final do sistema e vai definir o sucesso deste. Trata-se de inferir sobre a segurança, condição e vida útil da estrutura, através dos dados tratados. Além disso, uma boa gestão destes dados garante uma fonte de informação confiável de condição da estrutura

3.13 Impactos do SHM

O SHM influencia diretamente aspectos do gerenciamento da estrutura, segurança e durabilidade. Cada um dos aspectos é comentado a seguir.

- Gerenciamento da estrutura – desde a construção o SHM pode ser útil no gerenciamento do movimento de fôrmas, por exemplo, indicando quando o concreto já pode ser desmoldado ou confirmando distribuições de tensão durante a montagem de pontes com estruturas estaiadas e evitando problemas com o tabuleiro. Todavia, é durante a vida útil da estrutura que o SHM vai contribuir mais no gerenciamento de inspeções e intervenções. Exemplo disto é a empresa que administra o metrô de Seul, a *Seoul Metropolitan*

do programa é possível controlar as funções do sistema, definir parâmetros e como os dados serão organizados para posterior análise.

A transferência dos dados do sistema de aquisição para o banco de dados, central de monitoramento ou computador pessoal do responsável pode ser feita de inúmeras formas. Download direto do sistema, transmissão wireless, por fibra óptica ou protocolo de internet são algumas opções.

facilita a análise e diminui a probabilidade de uma má interpretação. Normalmente esse papel é exercido por um programa computacional, que recebe os dados e os organiza. Esses programas podem ser desenvolvidos especificamente para cada monitoramento ou possuírem características gerais dos sensores.

durante a utilização, facilitando inspeções e planejamento de manutenção e intervenções. Os dados analisados e organizados servem de base para tomada de decisão e são armazenados num banco de dados para auxiliar em futuras análises e no melhoramento do tratamento.

Rapid Transit Corporation (SMRT), que criou o *Automatic Tunnel Monitoring System (ATMS)*, um sistema de alta tecnologia que desde 2001 monitora 24h por dia a segurança das linhas subterrâneas do metrô. Os dados obtidos nos túneis são enviados através da internet e armazenados no escritório central de monitoramento em tempo real. O programa integrado ao sistema analisa automaticamente a estabilidade do túnel. Os limites máximos dos valores que garantem a estabilidade do túnel foram calculados através de análise numérica. Assim, se as leituras se aproximarem destes limites o sistema de alarme é ativado e as medidas de segurança são tomadas. Os dados obtidos no metrô de Seul possibilitam a geração de

um maior conhecimento do comportamento do túnel a longo prazo. Segundo *Chung et al. (2006)* isso está permitindo uma otimização da manutenção

preventiva, evitando acidentes e diminuindo custos (vide Fig. 4).



Figura 4: componente do ATMS (*AUTOMATIC TUNNEL MONITORING SYSTEM, 2011*).

- Segurança - apesar do SHM não ser capaz de evitar acidentes, os parâmetros lidos pelo sistema e as análises que se fazem dinamicamente evitam um acúmulo de danos e, conseqüentemente, diminuem a probabilidade de falhas. Outra questão importante é a capacidade de aviso na eminência de um colapso, que pode evitar mortes e a avaliação da condição da estrutura depois de um acidente. Foi o que aconteceu na ponte I-20 que atravessa o rio Mississipe, nos Estados Unidos da América. *Holland (2011)* relata que após o choque de uma balsa cheia de grãos com a ponte em abril

de 2011, o SHM foi usado para verificar o estado da estrutura e rapidamente fornecer informações sobre danos. Desta maneira a ponte foi interditada por apenas 2 horas e os engenheiros ficaram atentos ao comportamento da ponte nas semanas seguintes (vide Fig. 5).

- Durabilidade – O histórico de comportamento criado pelo SHM proporciona uma condição favorável à identificação das causas de problemas, além de permitir a rápida identificação do dano, auxiliando na correção do fato.



Figura 5. Ponte I-20 e imagem do programa de monitoramento, mostrando inclusive a operação de desencalhe da balsa (*HOLLAND, 2011*).

4. Exemplos de uso do SHM

Para melhor ilustrar o uso e as potencialidades do SHM, alguns exemplos de estruturas dotadas do

sistema serão dados a seguir.

4.1 Ponte I-35W, EUA

A foto inferior à direita da Fig. 1, mostrada no

início do título, mostra a ponte I-35W, que passava

sobre o rio Mississippi e colapsou no dia primeiro de agosto de 2007. Era composta por uma estrutura mista de aço e concreto armado e desmoronou, matando 13 pessoas e deixando mais 121 feridos. Inaugurada em 1967, a ponte I-35W foi projetada para ter uma vida útil mínima de 50 anos e tinha a sua reconstrução agendada para 2020-25. A ponte desmoronou depois de 40 anos em serviço, ao longo dos quais sofreu inspeções bienais até 1996 e anuais a partir de então (ESTADOS UNIDOS, 2007; STAMBAUGH e COHEN, 2007). A ponte

que a substituiu ganhou vários prêmios e foi concebida com SHM desde a construção (vide Fig. 6). Projetada para uma vida útil de mais de 100 anos, a ponte foi instrumentada com um sistema dotado de 323 sensores, que a monitoram em tempo real e que guarda informações relativas ao seu comportamento durante toda a sua vida útil (vide Fig. 7). O SHM é parte importante do projeto no que diz respeito à segurança e a durabilidade, para que a ponte possa chegar aos 100 anos previstos.



Figura 6. Nova ponte I-35W (à direita da foto).

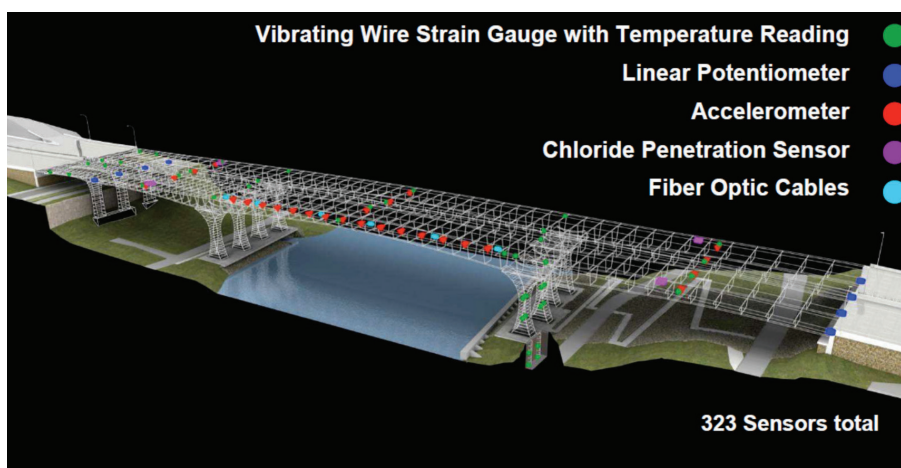


Figura 7. Distribuição dos sensores na nova ponte I-35W (GLISIC, 2009).

Entre os sensores utilizados no sistema, pode-se observar acelerômetros, sensores de corrosão e sensores de umidade (vide Fig. 8), sensores de

corda vibrante (vide Fig. 9), entre outros. A Fig. 9 mostra ainda um exemplo de sistema de aquisição usado na ponte (INAUDI *et. al.*, 2009).

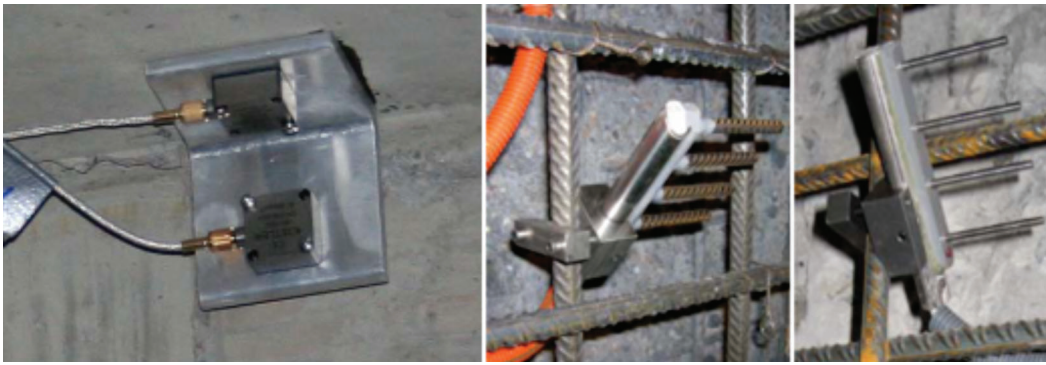


Figura 8. Esquerda - Acelerômetros; Centro - Sensor de corrosão; Direita - Sensor de umidade. (INAUDI et. al., 2009)



Figura 9. Sensor de corda vibrante e sistema de aquisição de dados. (INAUDI et. al., 2009)

4.2 Igreja Gandria, Suíça

Uma outra utilização do SHM na engenharia civil é a confirmação de segurança de estruturas antigas, das quais não se tem projeto ou um histórico preciso de intervenções. A igreja Gandria, na Suíça, foi construída por volta de 1650 e faz parte do Diretório Nacional de Monumentos Históricos da Suíça. Depois de algumas intervenções na cobertura, uma grande fissura surgiu no centro de sua abóbada (vide Fig. 10). Para acompanhar o comportamento da fissura e variações na curvatura da abóbada, um

sistema de monitoramento foi aplicado, utilizando-se sensores de deformação longos (30 e 50 cm). A maneira que os sensores foram aplicados está demonstrada na Fig. 11. Por questões de custo, como as variações esperadas eram lentas, foi decidido não se instalar um sistema de aquisição de dados fixo. Ao invés disso, os dados são colhidos em campanhas de no mínimo 1 semana com intervalos de 3 meses (INAUDI; CASANOVA; GLISIC, 2001).



Figura 10. Esquerda - vista geral do interior da igreja; Direita - detalhe da fissura com sensor instalado (INAUDI; CASANOVA; GLISIC, 2001).

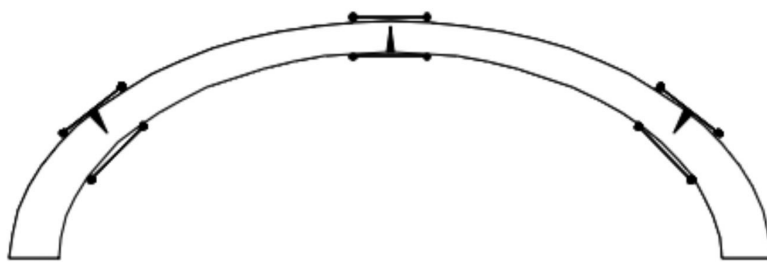


Figura 11. Desenho representando a abóbada da igreja com os sensores aplicados (INAUDI; CASANOVA; GLISIC, 2001).

4.3 Ponte JK, Brasil

O SHM pode ser usado ainda na montagem de estruturas especiais, principalmente, quando é necessário um controle de forças. A ponte JK em Brasília é um bom exemplo deste caso. O tabuleiro

central é suspenso por estais, que são fixados em 3 arcos metálicos, que por sua vez acompanham o eixo da ponte, cruzando-a em diagonal (vide Fig. 12).



Figura 12. Ponte JK em Brasília-DF, Brasil.

A montagem foi idealizada colocando-se o tabuleiro apoiado em uma estrutura provisória, abaixo dos arcos e içando-se o tabuleiro com os estais dos arcos. O desafio na montagem foi manter os esforços causados pelo carregamento

dos estais bem distribuídos nos arcos e, ao mesmo tempo, equilibrados para o tabuleiro, evitando tanto deformações nos arcos quanto desníveis no tabuleiro. A Fig. 13 mostra um desenho esquemático da ponte.

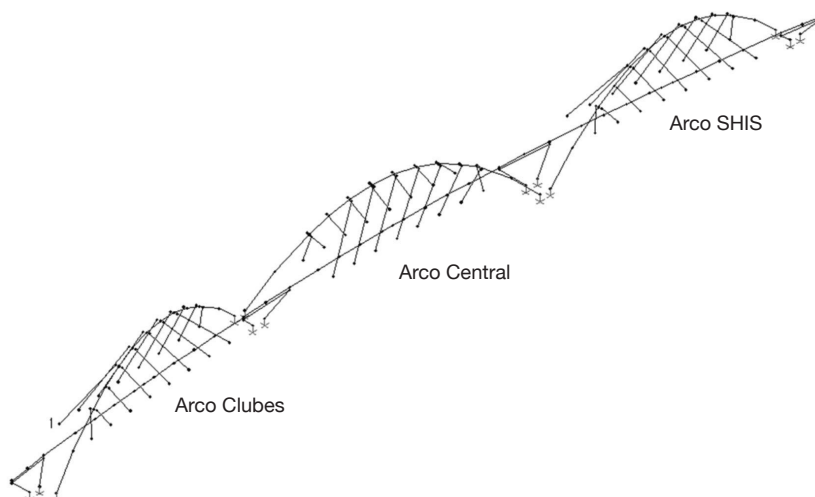


Figura 13. Desenho esquemático da ponte JK (ALMEIDA et. al., 2006).

Para monitorar todo esse processo de montagem, o SHM contou com células de carga instaladas nos apoios dos cabos para monitoramento de cargas, strain gauges na seção dos arcos (vide Fig. 14) para monitoramento de deformações específicas,

monitoramento topográfico de deslocamentos dos blocos e dos arcos e anemômetros (vide Fig. 15) para monitoramento da velocidade do vento (ALMEIDA *et. al.*, 2006).



Figura 14. Célula de carga instalada num dos cabos e os strains gauge aplicados na seção do arco (ALMEIDA *et. al.*, 2006).



Figura 15. Monitoramento topográfico e o anemômetro instalado no arco central (ALMEIDA *et. al.*, 2006).

5. Considerações finais

Este título é apenas uma introdução ao assunto, servindo apenas de base de conhecimento para um estudo mais específico. Ainda há muitas facetas do monitoramento que não foram tratadas pelo simples fato de não ser possível em um pequeno artigo. O SHM tem diversas correntes de idéia e vem se desenvolvendo em várias frentes de pesquisa, mas

ainda tem muito a ser explorado, principalmente em termos de mercado. São poucos os especialistas e ainda é pequena a divulgação da tecnologia. Espera-se que o texto tenha retratado o assunto de uma maneira interessante o suficiente para cultivar no leitor o interesse e consequentemente a busca por mais informações sobre o assunto.

Referências Bibliográficas

- ALMEIDA, P. A. O. ; SÁ, Alex Barros de ; ONISHI, Minoru ; STUCCHI, F. R. **Stress with Real Time Load (SRTL) to installation the Stay Cable in the Brasilia Bridge.** In: The Second fib Congress, 2006, Naples, Italy, 2006.
- ASSIS, W. S. **Sistemas computacionais de apoio à monitoração de estruturas de engenharia civil.** 2007. 265 p. Tese (Doutorado) – Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, São Paulo. 2007.
- AUTOMATIC TUNNEL MONITORING SYSTEM. Disponível em: <http://www.wisescan.com/atms/> > acesso em 06/07/2011.
- BALAGEAS, D.; FRITZEN, C.P.; GÜEMES A. **Structural health monitoring.** ISTE, USA, 2006, 495 p. ISBN 10: 1-905209-01-0.
- BRANCO, F. A.; PAULO, P. V. **O projecto de pontes para vidas superiores a 100 anos.** Revista ALCONPAT, Volumen 2, Número 1, Enero-Abril 2012. 1 - 9

- CHUNG, H.; CHUN, B.; KIM, B.; LEE, Y. **Measurement and analysis of long-term behavior of Seoul metro tunnels using the Automatic Tunnel Monitoring Systems.** Tunnelling and Underground Space Technology 21. Elsevier, 2006. 316-317.
- ESTADOS UNIDOS. **Minnesota Department of Transportation.** Interstate 35W Mississippi River Bridge, Minneapolis. Fact Sheet - Oct. 16, 2007.
- GLISIC, B. **Projeto de monitoramento estrutural.** New Jersey, Princeton University, 2 de Nov. de 2009. Apresentação proferida por ocasião do mini-curso em monitoramento estrutural (SHM short course), New Jersey, 2009.
- GLISIC, B.; INAUDI, D. **Whole lifespan monitoring of concrete bridges.** IABMAS'02, First International Conference on Bridge Maintenance, Safety and Management, Resumo em CD, Barcelona, Espanha, 2002. 487-488.
- GLISIC, B.; INAUDI, D. **Components of structural monitoring process and selection of monitoring system.** 6th International Symposium on Field Measurements in GeoMechanics (FMGM 2003), Oslo, Norway, 2003. 755-761.
- GLISIC, B.; INAUDI, D. **Fibre optic methods for structural health monitoring.** Wiley, England, 2007, 262 p. ISBN 978-0470-06142-8.
- HELENE, P. **Análise da resistência à compressão do concreto em estruturas acabadas com vistas à revisão da segurança estrutural.** Revista ALCONPAT, Volumen 1, Número 1, Enero-Abril 2011. 67 - 92
- HOLLAND, M. **Bridge monitoring technology plays critical role following Mississippi river barge crash.** Disponível em: <http://www.cecer.army.mil/td/tips/index.cfm> > acesso em 06/07/2011.
- INAUDI, D.; BOLSTER, M.; DEBLOIS, R.; FRENCH, C.; PHIPPS, A.; SEBASKY, J.; WESTERN, K. **Structural health monitoring system for the new I-35W St. Anthony falls bridge.** 4th International Conference on Structural Health Monitoring on Intelligent Infrastructure (SHMII-4). Zurich, Suíça. 2009.
- INAUDI, D.; CASANOVA, N.; GLISIC, B. **Long-term deformation monitoring of historical constructions with fiber optic sensors.** 3rd International Seminar on Structural Analysis of historical Constructions. Guimarães, Portugal. 2001.
- INMETRO. **Vocabulário Internacional de Metrologia: conceitos fundamentais e gerais e termos associados (VIM 2008).** 1ª Edição Brasileira. Rio de Janeiro, 2009. 78 p.
- STAMBAUGH, H.; COHEN, H. **I-35W Bridge Collapse and Response Minneapolis, Minnesota.** U.S. Fire Administration/Technical Report Series. USFA-TR-166 / August 2007, Minneapolis, Minnesota, Estados Unidos, 2007.
- WENZEL, H. **Health monitoring of bridges.** Wiley, England, 2009, 621 p. ISBN 9780470031735.
- WORDEN, K.; FARRAR, C. R.; MANSON, G.; PARK, G. **The fundamental axioms of structural health monitoring.** Proceedings of The Royal Society A. London. 2007.
- WORDEN, K.; MANSON, G. **Visualisation and dimension reduction of high-dimensional data for damage detection.** 17th Int. Modal Analysis Conf., Proceedings. Orlando, Florida. 1999.

Boletins Técnicos Alconpat

BT 01 – Bernardo Tutikian e Marcelo Pacheco

Inspección, Diagnóstico y Prognóstico en la Construcción Civil

Inspeção, Diagnóstico e Prognóstico na Construção Civil
Civil Construction Assessment

Boletim técnico 02 – Raúl Husni

Reparación y Refuerzo

Reparo e Reforço
Repair and Strengthening

Boletim técnico 03 – Antônio Carmona Filho e Thomas Carmona

Grietas en Estructuras de Hormigón

Fisuração nas Estruturas de Concreto
Cracking in Concrete Structures

BT 04 – Fernando Branco, Pedro Paulo e Mário Garrido

Vida Útil en la Construcción Civil

Vida Útil na Construção Civil
Service Life in Civil Construction

BT 05 – Gilberto Nery

Monitoreo en la Construcción Civil

Monitoração na Construção Civil
Monitoring in Civil Construction

BT 06 – Enio Pazini Figueiredo e Gibson Meira

Corrosión de armadura de estructuras de hormigón

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

BT 07 – Alicia Mimbacas

Sostenibilidad en la Construcción

Sustentabilidade na Construção
Construction Sustainability

BT 08 – Paulo Helene e Salomon Levy

Curado del Hormigón

Cura do Concreto
Concrete Curing

BT 09 – Paulo Helene e Jéssika Pacheco

Controle da Resistência do Concreto

Control de la Resistencia del Hormigón
Conformity control for compressive strength

BT 10 – Hênio Tinoco

Responsabilidad Social en Construcción

Responsabilidade Social na Construção Civil
Social Responsibility in Civil Construction

Patrocínio de: