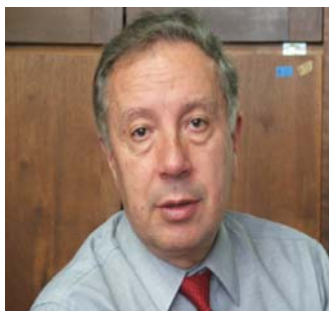


J. D. RIERA



LDEC/ EE / UFRGS

Av. Osvaldo Aranha, 99 / Centro
Porto Alegre, RS - Brasil
riera@cpgec.ufrgs.br

Predição da vida das construções: comentários críticos

JORGE D. RIERA, JOÃO KAMINSKI JR. E LETÍCIA F. F. MIGUEL

Departamento de Engenharia Civil, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, RS, Brasil.

RESUMO

É apresentada uma breve descrição da evolução da Confiabilidade Estrutural, como área da Engenharia Estrutural, e dos fatores que, de acordo com esse enfoque, devem ser considerados na predição da vida das construções. São fornecidos argumentos que justificam a necessidade de substituir os critérios adotados em normas e recomendações de projeto, que usualmente não consideram explicitamente a vida esperada da construção nem as condições de exposição ambiental, por novos esquemas em que a *vida útil ou prevista* seja um parâmetro básico de projeto. Neste contexto, faz-se indispensável uma maior interação entre os profissionais das áreas de Confiabilidade Estrutural e Patologia das Estruturas.

Palavras Chave: Confiabilidade, Risco, Patologia, Erro Humano, Incerteza Fenomenológica.

1. INTRODUÇÃO

A origem da Confiabilidade de Sistemas e Componentes como uma nova disciplina, de fundamental importância em todas as áreas da Engenharia moderna, pode ser identificada com a criação do grupo de consultores AGREE (1957), estabelecido pelas forças armadas dos EUA, preocupadas com a confiabilidade de equipamento eletrônico para aplicações militares. A iniciativa teve um dramático impacto nas indústrias de equipamentos eletrônicos e mecânicos, incluindo a indústria automotriz, que rapidamente reconheceram que uma maior confiabilidade representa uma vantagem considerável na disputa de mercados. Os fundamentos da nova teoria já existiam e até faziam parte da rotina em aplicações de engenharia em que a estimativa do erro de medições, de campo ou de laboratório, são necessárias. Nessas aplicações se admite a validade dos axiomas da Teoria de Probabilidades e uma distribuição gaussiana das observações experimentais (Pugachev, 1973).

A diferença básica entre o novo enfoque e os modelos tradicionais está no reconhecimento da necessidade de levar em conta *a incerteza que afeta todas as informações, modelos e teorias utilizados na engenharia*. Obviamente *a natureza* da incerteza varia significativamente de uma área para outra, sendo também diferentes as necessidades práticas das mesmas. Na Engenharia Civil, entre as primeiras contribuições que apontam a necessidade acima mencionada e propõem formas de resolver o problema, podem ser citados os trabalhos de Freudenthal (1947, 1956), nos quais se descrevem métodos para a determinação do risco, definido como probabilidade de falha, formulados em termos de $Prob(Q > R)$, na qual Q e R são variáveis aleatórias que representam a solicitação e a resistência de uma estrutura (ou de parte de uma estrutura) enquanto $Prob$ denota *probabilidade*. O denominado *estado crítico* ou *critério de falha*, resulta neste caso uma equação linear com apenas duas variáveis:

$$Q - R = 0 \quad (1)$$

A situação acima descrita constitui o problema básico da Confiabilidade Estrutural. O caso mais simples, que admite uma solução analítica imediata, se apresenta quando ambas variáveis, Q e R , são variáveis gaussianas não correlacionadas. As dificuldades teóricas ou computacionais aumentam com o número de variáveis, correlação não nula entre ditas variáveis, não-linearidade do critério de falha e, finalmente, com a forma da distribuição de probabilidade das variáveis relevantes, que podem logicamente ser (e usualmente são) não-gaussianas. Crescentes dificuldades representam um estímulo para a invenção de novos métodos de solução, o que resultou em desenvolvimentos importantes, mas também numa extensa lista de procedimentos e esquemas de cálculo, de utilidade muitas vezes duvidosa.

Aspectos importantes do *tipo* de problema acima mencionado são: (a) o tempo T de vida do sistema ou estrutura não aparece explicitamente no critério de falha nem na descrição das variáveis do problema e (b) a probabilidade de falha $Prob(Q > R)$ é usualmente muito pequena, da ordem de 10^{-5} ou ainda menor. É oportuno mencionar aqui que a probabilidade de falha de estruturas de edifícios de concreto ou aço, projetados e construídos por engenheiros habilitados em países desenvolvidos, por exemplo, nos países escandinavos, é estimada em ao redor de 10^{-6} ou menor¹. A condição (a) implica que a incerteza em relação às variáveis Q e R não varia com o tempo, ou seja, que o modelo (1) considera Q

¹ A vida útil ou esperada da estrutura deve ser considerada na especificação da distribuição de probabilidade de Q , que representa assim a solicitação máxima durante esse período de tempo. A solução é formalmente correta se a resistência R não varia com o tempo. Observe-se que muitas normas não fazem menção desse aspecto.

e R como variáveis aleatórias, não como *processos aleatórios*, e conseqüentemente não é adequado para quantificar a deterioração da estrutura ou construção com o tempo (Figura 1). O aspecto (b) tem uma influência significativa na tomada de decisões: um pequeno erro de, por exemplo, 5×10^{-6} , na estimação de $Prob(Q > R)$, que pode acontecer facilmente devido a diversas causas, implicaria numa diferença de até uma ordem de grandeza entre a probabilidade de falha calculada e o seu valor *real*. Este tópico será discutido em relação à influência da denominada *incerteza de modelo* e da *incerteza fenomenológica*.

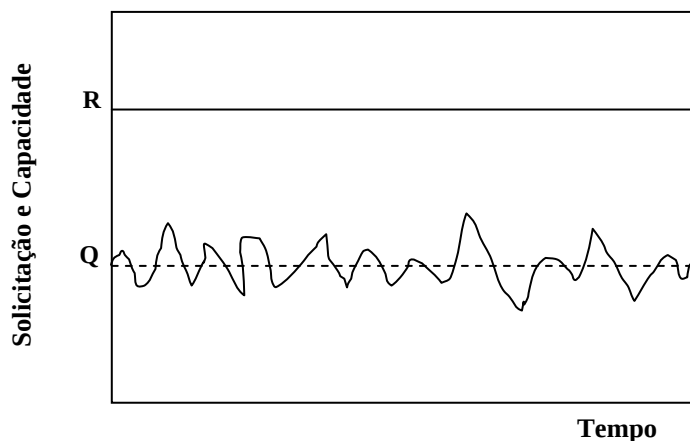


Figura 1: Evolução da solicitação (Q) e da capacidade (R) da estrutura, considerando que a capacidade não varia com o tempo

Ao mesmo tempo, o enfoque adotado na indústria, em geral, foi essencialmente empírico. Primeiro, porque raramente interessa determinar o *risco de falha*, por exemplo, de um pneu ou de um aparelho de TV, mas *quanto dura*. Designando T a vida do sistema ou componente, isto é, o tempo desde o início de operação até a falha, o problema é aqui quantificar a incerteza em relação a T . Sistemas que admitem reparos quando acontece uma falha não serão explicitamente considerados nesta discussão. Agora, se T é uma variável aleatória, o problema se reduz a determinar a sua função densidade de probabilidade $p_T(t)$. A forma mais simples de obter dita densidade é experimental: um conjunto de amostras dos elementos sob consideração, por exemplo, pneus ou aparelhos de TV, é submetido a ensaios, nos quais se tenta simular as condições esperadas de operação (rugosidade das estradas, pressão, carga, temperatura, umidade ambiente, etc.), registrando-se o tempo até a falha de cada amostra. Métodos estatísticos são empregados para escolher uma função distribuição que ajuste satisfatoriamente os dados e os correspondentes parâmetros. O parâmetro mais importante é o valor esperado $E(T)$, conhecido como *tempo médio até a falha*. Observe-se que a viabilidade do enfoque acima descrito depende de que $E(T)$ seja razoavelmente pequeno, já que ele define a duração dos ensaios. Se um novo modelo de aparelho de TV tivesse uma vida média (ainda desconhecida) de 6 anos, dificilmente poderia o fabricante estimar $E(T)$ utilizando ensaios convencionais. Nessa situação são usualmente empregados *ensaios acelerados*, nos quais as condições normais de operação são alteradas para acelerar a falha, por exemplo, testando a temperaturas elevadas. Os problemas descritos neste parágrafo, susceptíveis de tratamento basicamente experimental, pertencem à área da Engenharia de Produção.

Das considerações precedentes surgem várias conclusões: em primeiro lugar, os problemas de risco estrutural na Engenharia Civil não podem ser resolvidos utilizando o enfoque experimental

normalmente empregado nas indústrias eletrônica, metal-mecânica, automotriz, etc². É então essencial o recurso a métodos analítico-numéricos, fortemente desenvolvidos para estimar a confiabilidade de sistemas nos quais o critério de falha depende de um conjunto de *variáveis aleatórias*, ou seja, não estão correlacionadas com o tempo³. Neste contexto, faz-se agora necessário propor e resolver modelos nos quais as ações e também as propriedades que definem as *resistências* sejam descritas como *processos aleatórios não-estacionários* (Figura 2). Adicionalmente, o risco estimado e também os métodos de estimação, devem levar em conta a influência da *incerteza fenomenológica* e da *incerteza de modelo*. Estas tarefas exigem a colaboração de especialistas de áreas que tem permanecido até agora quase sem contato, e simultaneamente uma aproximação aos critérios de *vida esperada* utilizados em outros campos da engenharia. A falha seria definida como o tempo T até que o *risco anual* (de colapso ou de violação de uma condição de serviço) atinja um valor limite especificado. Nesse momento a estrutura deveria ser submetida à revisão e reparos (Figura 3) ou, eventualmente, demolida.

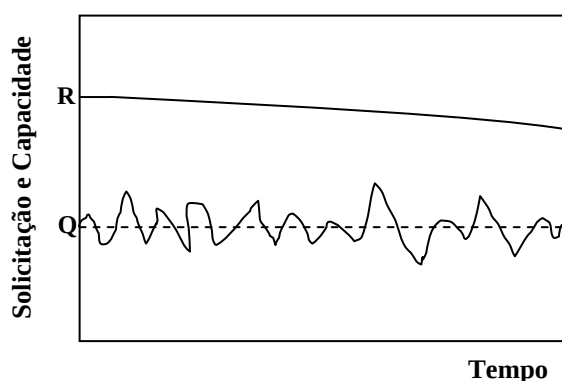


Figura 2: Evolução da solicitação (Q) e da capacidade (R) da estrutura, considerando que a última diminui com o tempo

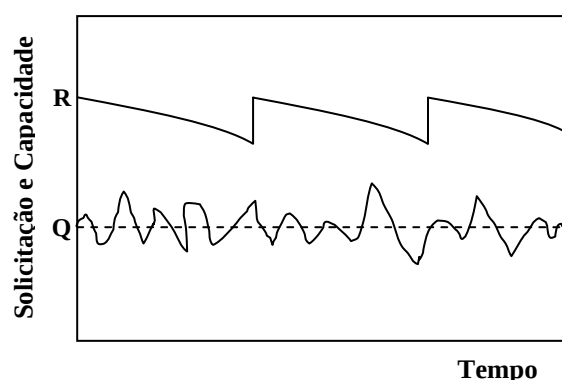


Figura 3: Evolução da solicitação (Q) e da capacidade (R), considerando que periodicamente são realizados reparos na estrutura

² Existem tipos estruturais que apresentam riscos de falha muito superiores aos valores geralmente considerados admissíveis e, portanto uma vida média relativamente pequena, como no caso de pontes rodoviárias. O tempo até a falha de estruturas existentes com essas características poderia ser avaliado por observação direta, mas constitui uma exceção.

³ As soluções disponíveis para casos em que as propriedades da estrutura não variam com o tempo podem ser facilmente aplicadas a situações de dano estrutural, dividindo o tempo, por exemplo, em intervalos de cinco anos, dentro dos quais pode-se admitir que a resistência permanece inalterada.

2. DESCRIÇÃO DAS INCERTEZAS

Neste trabalho, limitações de tempo e espaço permitem apenas uma breve apresentação das incertezas que devem ser consideradas no projeto de estruturas e construções, em geral. Posteriormente será discutida a importância das mesmas no projeto e na avaliação da confiabilidade estrutural.

(1) Incerteza associada à aleatoriedade das ações e propriedades de materiais

Também denominada *incerteza física*, descreve a variabilidade intrínseca que se observa nas ações (vento, sismo, temperatura, precipitação, tráfego de veículos, etc.) e nas características dos sistemas estruturais (a resistência à compressão varia ao longo de um pilar, mesmo que sua seção transversal *nominal* seja constante). É o único tipo de incerteza usualmente considerado em forma explícita em normas ou códigos de projeto.

(2) Incerteza de modelo

Na equação (1) as variáveis Q e R podem representar, por exemplo, a carga axial e a resistência à compressão de um pilar num edifício de concreto armado. A primeira depende das ações externas, tais como peso próprio ou vento, e a sua variabilidade resulta uma consequência lógica da incerteza sobre essas ações, especificadas em normas. O problema aqui é que, se dois engenheiros recebem a tarefa de calcular Q , uma vez definidas completamente as propriedades e dimensões da estrutura e as cargas aplicadas, eles obterão valores *diferentes*, digamos Q_1 e Q_2 da solicitação, decorrentes de diferenças nos programas de análise estrutural utilizados, das hipóteses sobre condições de apoio, etc. Entre a solicitação *real* ou *verdadeira* e a solicitação de projeto existirá uma diferença, o que constitui a denominada incerteza de modelo, que é de difícil avaliação.

(3) Incerteza fenomenológica

Para ilustrar o significado do termo será a seguir utilizado o exemplo do pilar do item (2). Imaginemos que, uma vez definidas as variáveis aleatórias Q e R , seja calculada a probabilidade de falha do pilar (num certo intervalo de tempo). Seria então conhecida a probabilidade de falha do pilar no modo, digamos, 1 (falha por compressão). Uma análise de confiabilidade, da mesma forma que o projeto da estrutura, deve considerar *todos os modos possíveis de falha*. Cada modo de falha contribuirá com uma parcela da probabilidade total de falha. Admita-se agora que um modo relevante de falha não fosse considerado (a hipótese é aplicável tanto ao projeto estrutural quanto a uma análise de confiabilidade). A probabilidade total de falha, ou seja o risco, será maior que o estimado, porque uma contribuição importante não foi considerada. Como a possibilidade de que exista um modo desconhecido de falha é sempre real, mais uma vez resulta que qualquer análise de confiabilidade que não leve em conta dita incerteza estaria *subestimando* o risco (Riera & Rocha, 1998). Aqui é preciso esclarecer um ponto importante: a designação *incerteza fenomenológica* aplica-se a situações nas quais o *modo de falha não considerado é desconhecido para todos*, isto é, não faz parte da bagagem de conhecimentos da Engenharia à época do projeto e construção. Quando o desconhecimento está limitado ao executor (ou executores) do projeto, então constitui um caso de *erro humano*, descrito a seguir.

(4) Erro humano

Sempre existe um risco de erro no projeto ou construção de uma estrutura, devido à incompetência, descuido, ou outras causas, de parte dos engenheiros responsáveis. A incerteza resultante na estimativa de confiabilidade é também de difícil avaliação. O problema é discutido por Melchers (1994), mas de difícil consideração em análise ou projeto de estruturas.

3. A INCERTEZA DE MODELO

O tema, apesar da sua importância, tem recebido pouca atenção na literatura técnica. A título de orientação, pode-se mencionar que o coeficiente de variação dos esforços nas barras, em torres metálicas treliçadas de linhas de transmissão, devido à incerteza de modelo, foi avaliado por Kaminski Jr. (2005) em torno de 3%. Em projeto conduzido pela CIGRÉ (1990) foi determinada a variabilidade na resposta de torres metálicas de linhas de transmissão, introduzida pelo modelo mecânico adotado na análise. Duas torres foram examinadas por vinte e sete projetistas e consultores de vários países. Cada projetista adotou o seu modelo de cálculo para analisar as torres, submetidas a um carregamento especificado.

Os projetistas participantes analisaram as torres e estimaram os esforços e as resistências de algumas barras previamente selecionadas e também a capacidade da torre, em função do carregamento fornecido. Devido à simplicidade do modelo mecânico empregado no projeto de torres metálicas, no qual elementos de treliça espacial e/ou pórtico espacial são normalmente adotados, pode-se esperar uma pequena variabilidade nos resultados. No entanto, os resultados encontrados divergem consideravelmente, como pode ser observado na Tabela 1.

Tabela 1: Dispersão entre os resultados dos participantes (CIGRÉ, 1990).

	Torre 1			Torre 2		
	C.V. mínimo	C.V. máximo	C.V. médio	C.V. mínimo	C.V. máximo	C.V. médio
Esforço estimado nas barras selecionadas	4,4%	22,0%	10,7%	1,2%	42,4%	8,8%
Resistência estimada das barras selecionadas	7,7%	27,9%	14,6%	6,0%	33,2%	18,2%
Resistência estimada da torre	-	-	37,1%	-	-	21,0%

Onde C.V. denota o coeficiente de variação entre os resultados dos participantes. Neste estudo também foram realizados ensaios de protótipo das duas torres, a fim de medir a força axial nas barras selecionadas, bem como a resistência da torre. Na Tabela 2 estão apresentados os resultados em termos da relação entre os valores previstos e os valores medidos.

Tabela 2: Relação entre valores calculados e valores medidos (CIGRÉ, 1990).

	Torre 1	Torre 2
Média do esforço estimado nas barras / esforço medido nas barras	0,99 C.V. = 10,2%	1,01 C.V. = 32,8%
Resistência estimada da torre / resistência medida da torre	0,70	0,64

Baseado nestes resultados fica claro que o modelo escolhido pelo projetista (treliça 3D, pórtico 3D, inclusão de barras redundantes, consideração das excentricidades, análise linear, não-linear, etc.) pode ter um impacto significativo sobre o projeto e conseqüentemente sobre o nível de confiabilidade de uma torre.

Com base nesses antecedentes, estima-se que o coeficiente de variação de variáveis estáticas de cálculo (esforços nas barras, tensões, deslocamentos) devido a erro de modelo oscila entre 3 e 10%, dependendo do tipo de estrutura. Já o correspondente coeficiente de variação para as cargas de ruptura das barras em estruturas em treliça ou pórtico espacial é ainda maior. Em problemas que impliquem cargas dinâmicas, a incerteza de modelo leva a coeficientes de variação significativamente superiores, como verificado, entre outros, por Carqueja (1996), que faz uma análise dinâmica do suporte de um turbogerador de uma Usina Termelétrica, utilizando três modelos mecânicos distintos de elementos finitos. O carregamento é o mesmo nos três modelos, e os resultados revelam um coeficiente de variação médio de 6,5% entre os valores das frequências naturais dos primeiros modos de vibração e coeficientes de variação superiores a 30% entre os deslocamentos máximos encontrados na análise dinâmica.

4. A INCERTEZA FENOMENOLÓGICA

Riera & Rocha (1998) propõem estimar a incerteza fenomenológica a partir da verossimilhança L_{n+1} de que exista um modo de falha desconhecido, que possa influir na confiabilidade do sistema. Entende-se por verossimilhança L_{n+1} o grau de credibilidade na existência desse modo $n+1$, quando há n modos conhecidos (e levados em conta). Um enfoque possível para determinar L_{n+1} seria o recurso à opinião de expertos (Ver, por exemplo, Sundararajan, 1994). Para valores pequenos de L_{n+1} , inferiores a 0.01, Riera & Rocha (1998) demonstram que a expressão:

$$\rho(t) \approx 1 - 0.24 L_{n+1} \quad (2)$$

constitui um limite superior da confiabilidade $R(t)$, isto é, $\rho(t) \geq R(t)$. A consequência imediata do resultado precedente é que, a menos que L_{n+1} seja desprezível, isto é, zero ou muito pequeno, o risco poderá ser grosseiramente subestimado por uma análise de confiabilidade que não considere a incerteza fenomenológica. É obvio que a influência da incerteza fenomenológica é um fator essencial na implementação ou desenvolvimento de novos tipos de estruturas, sistema ou materiais, isto é, *na inovação tecnológica*. Riera & Rocha (1998) provam finalmente, a partir de hipóteses plausíveis sobre as distribuições de probabilidade dos tempos até a falha de cada modo (1 até n), que somente após ensaios de longa duração podem ser realizadas afirmações válidas sobre a confiabilidade de *novos* materiais, métodos ou sistemas.

Um observador inexperiente pode imaginar que L_{n+1} não seria significativo quando o material ou sistema em consideração foi projetado e lançado ao mercado por uma firma conceituada. Estaria muito longe da realidade. Em geral, L_{n+1} está mais próximo de 0.5 que de zero, o que é comprovado pela longa lista de falhas na engenharia *devidas à incerteza fenomenológica*. Basta citar as falhas por fratura nos navios *Liberty* no fim da segunda guerra, do jato comercial inglês *Comet*, por propagação de micro-fraturas devido a vibrações, todos os fenômenos desconhecidos na época. Enfim, talvez os melhores exemplos se encontrem nos programas espaciais dos EUA e da ex-União Soviética, mas as informações não são de domínio público.

Para fechar a discussão, será mencionada uma falha importante na área da Construção Civil. A indústria química Sika desenvolveu um acelerador de pega, para uso em construções de concreto de cimento portland. O produto foi colocado no mercado após exaustivos testes que permitiam garantir a resistência do concreto preparado com o aditivo. Aparentemente ninguém pensou que seria interessante realizar também testes em elementos de concreto *armado* sujeitos a ações ambientais.

Posteriormente, *em obra construída*, verificou-se que sob certas condições a presença do aditivo acelerava o processo de corrosão no aço. O problema foge da nossa área de conhecimentos, mas parece relevante mencionar que na Província de Santa Fé, Argentina, um bairro com aproximadamente cem unidades habitacionais individuais construído na década de 80, com lajes de concreto planas, teve que ser abandonado poucos meses após a inauguração, pelo estado de fissuração das lajes, nas quais tinha sido empregado um acelerador de pega.

5. O ERRO HUMANO

No projeto de estruturas, as incertezas relacionadas com o envolvimento humano podem ser classificadas em dois grupos principais: erros humanos e intervenção humana. Tais incertezas estão presentes não somente no projeto, mas também ao longo de todas as etapas da obra.

Os erros humanos estão vinculados tanto à variabilidade do desempenho humano quanto a atos grosseiramente errôneos, enquanto que a intervenção humana implica na redução ou compensação dos erros humanos através de medidas precativas ou corretivas.

Cabe observar que não existe uma concordância universal de que os aspectos humanos devam ser considerados em uma análise de confiabilidade estrutural. Neste sentido, existem duas linhas de pensamento, como por exemplo, Elms e Turkstra (1992), os quais sugerem que a ação humana não pode ser modelada como uma matéria técnica e que estudos sobre um indivíduo não podem ser prontamente transferidos para outro. Outros autores, incluindo Melchers (1994), acreditam que os erros humanos possam ser modelados dentro da teoria de probabilidade.

Uma investigação detalhada, incluindo a classificação e modelagem dos erros humanos e as estratégias de intervenção humana, é dada por Melchers (1987).

O comportamento humano, pela sua complexidade, ainda não pode ser claramente relacionado aos diversos fatores que o influenciam, entretanto, a variabilidade de desempenho pode ser quantificada e considerada explicitamente em uma análise de confiabilidade estrutural.

6. PATOLOGIA DAS ESTRUTURAS

Nas últimas duas décadas começou a ser reconhecido na Engenharia Civil que fatores ambientais e o próprio uso das construções afetam inevitavelmente as características físicas das mesmas, por exemplo, a resistência a solicitações externas. A situação ilustrada na Figura 1, que mostra resistência ou capacidade constantes no tempo, constitui uma simplificação em geral não aceitável. Assim, a situação real é mostrada esquematicamente pela Figura 2, na qual estão graficadas duas *realizações*, isto é, *amostras*, de $Q(t)$ e $R(t)$. O tempo até a falha T para ambas realizações é definido como o tempo até a primeira ultrapassagem $Q \geq R$. A redução do valor esperado da resistência com o tempo $E(R)$ depende do tipo estrutural e das condições de serviço e/ou ambientais. Julga-se incorreta a consideração de que a redução é resultado de *patologias*. O termo deveria ser reservado para quedas acentuadas da resistência ou outras propriedades devido a influências ou efeitos *anormais*, não presentes invariavelmente nas construções expostas às mesmas condições de serviço.

É claro que a quantificação da redução de $E[R(t)]$ pertence à área da Engenharia de Materiais freqüentemente (auto)designada como *Patologia da Construção*, mesmo quando parte do fenômeno não deva ser incluído no campo das Patologias. Também parece evidente que até agora tem existido pouca ou nenhuma interação entre pesquisadores na área acima mencionada e especialistas em

Confiabilidade Estrutural. Os ramos da Engenharia que possuem os dados experimentais e os modelos físicos dos processos de dano e envelhecimento e os que tem desenvolvido ferramentas teórico-numéricas para avaliar o tempo até a falha T não estão colaborando mutuamente.

Os autores esperam que dita situação seja revertida no futuro próximo, mostrando a seguir algumas aplicações na direção que julgam apropriada.

Augusti *et al.* (1998), observa que percentagem significativa das construções existentes estão em condições sérias de deterioração, o que pode impedir o uso das mesmas ou até mesmo conduzir à ruína ou colapso. A deterioração pode ser devida à exposição a ambientes agressivos ou por ações acidentais, como um terremoto, ou por uso impróprio ou falta de manutenção.

Segundo Ciampoli (1998), entre os tipos mais comuns de efeitos ambientais -*sic patologias*- podem-se citar corrosão, ataques químicos por sulfatos e ácidos, reações alcalinas, carbonatação e ciclos de congelamento-descongelamento para estruturas de concreto armado. Já para estruturas metálicas, o tipo mais freqüente de efeito ambiental é a corrosão.

Na Figura 4, extraída de Val e Melchers (1998), apresenta-se a relação entre a capacidade (R) e a solicitação (Q) em função do tempo (em anos) para duas situações distintas de corrosão, localizada e geral, em uma viga de concreto armado. Conforme se observa na referida figura, quanto mais corrosão há na viga, mais rápido diminui a relação capacidade-solicitação.

Similarmente, Engelund e Sorensen (1998) estudaram a corrosão em estruturas de concreto armado e perceberam que esta inicia quando a concentração de cloro em torno da armadura excede um valor limite. Para evitar que a corrosão alcance um estágio no qual faça com que a capacidade da estrutura tenha uma queda substancial, os autores sugerem que sejam feitos manutenção e reparos periodicamente. O estudo é exemplificado em uma ponte de concreto.

Mizutani (1998) apresentou um método para planejar a manutenção de estruturas de forma a minimizar o custo e garantir a eficiência. O método é denominado MPM, e através de um exemplo numérico foi mostrado que o mesmo é eficaz e apresenta grandes vantagens.

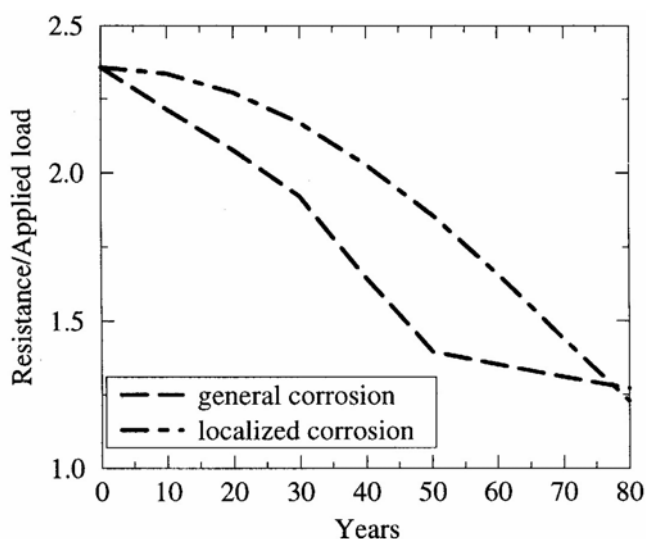


Figura 4: Relação capacidade-solicitação vs. tempo para uma viga de concreto armado com corrosão localizada e geral

7. OUTROS EXEMPLOS DE AVALIAÇÃO DA INCERTEZA DE MODELO

Menezes (1992) apresenta um estudo analítico e computacional para avaliar a influência das incertezas físicas e de modelo mecânico na estimativa da confiabilidade de uma torre metálica de LT, modelada considerando a variabilidade nas condições de contorno dos elementos, nas tensões iniciais e nas propriedades do material. Métodos de elementos finitos estocásticos são utilizados na avaliação probabilística da resposta, os quais permitem levar em consideração a variabilidade espacial e a correlação entre as propriedades mecânicas do material, além das incertezas na geometria. Cabe salientar que esta metodologia pode avaliar apenas um subconjunto de todo o espectro de incertezas que podem estar presentes na resposta real da estrutura. Os resultados demonstram que a variabilidade nas condições de contorno e nas tensões iniciais nas barras pouco influencia o valor da carga crítica da torre. Entretanto, as incertezas nas propriedades do material e a correlação entre estas variáveis, aplicadas a um modelo de elementos finitos que considera grandes deslocamentos e flambagem inelástica, apresentam resultados que sugerem o uso desta metodologia na avaliação da propensão à falha de torres. Os exemplos descritos neste trabalho ilustram que as incertezas de modelo são significativas na avaliação da confiabilidade estrutural e, portanto, devem ser incorporadas na análise.

Camargo (2002) estuda alguns parâmetros de incerteza de modelo mecânico em torres metálicas de LT, entre eles a análise da interação solo-estrutura, ou seja, o efeito dos deslocamentos diferenciais das fundações na distribuição das solicitações nas barras da torre. Quatro torres autoportantes são analisadas, sendo que para três delas se dispõe de resultados de ensaios em verdadeira grandeza. A influência da modelagem hiperestática das torres na redistribuição dos esforços nas barras devido a deslizamentos das ligações é também investigada, onde o deslizamento dos nós de algumas barras pré-selecionadas é simulado através da redução da sua rigidez axial. A incerteza no deslizamento dos nós em estruturas metálicas de torres ocorre principalmente devido a eventuais folgas e grau de torque aplicado nos parafusos, tendo uma maior ou menor influência na redistribuição dos esforços, em função da hiperestaticidade interna do modelo. Este fato é comprovado nos resultados do trabalho, onde no modelo “menos hiperestático” a alteração da rigidez axial não afeta a distribuição de solicitações nas barras. Nos ensaios de deslocamento diferencial de apoio, os esforços medidos em algumas barras importantes resultaram significativamente menores que os valores calculados, fato que pode ser atribuído à deformação das ligações, principalmente a deformação de deslizamento, não considerada no modelo matemático. Os resultados deste trabalho indicam um elevado grau de incertezas na prática atual de previsão do comportamento de torres metálicas, sugerindo um estudo mais aprofundado sobre os aspectos que devem ser considerados no modelo mecânico.

Karadeniz (2001) apresenta um procedimento para considerar as incertezas de modelo na avaliação da confiabilidade à fadiga de estruturas offshore. Neste trabalho, as incertezas de modelo são divididas em incertezas de origem estrutural e incertezas devido ao carregamento e ao ambiente que a estrutura está exposta. As incertezas de origem estrutural são geralmente encontradas nas matrizes de massa, de rigidez e nas razões de amortecimento da estrutura. As incertezas na matriz de rigidez são de particular interesse e são atribuídas as imperfeições na espessura dos membros e as variações na flexibilidade dos nós e nos parâmetros da fundação, ou seja, as constantes de mola, quando a fundação é representada por um sistema de molas. Um exemplo de aplicação de uma estrutura offshore com 62,5m de altura é apresentado, a fim de demonstrar a influência destes fatores no cálculo da confiabilidade à fadiga. Nesta análise, a estrutura é modelada com barras de pórtico espacial, e a fundação representada por um sistema de molas sem massa. Os resultados da análise de confiabilidade mostram que, entre as incertezas de origem estrutural de interesse, os parâmetros da fundação e as imperfeições na espessura dos membros, representam importantes origens de incertezas na estimativa da confiabilidade deste tipo de estrutura.

8. FUTUROS DESENVOLVIMENTOS E CONCLUSÕES

Uma breve descrição da evolução da Confiabilidade Estrutural, incluindo os fatores que na opinião dos autores, devem ser considerados na predição da vida das construções, foi apresentada. Também foram fornecidos argumentos que justificam a necessidade de substituir os critérios adotados em normas e recomendações de projeto, que usualmente não consideram explicitamente a vida esperada da construção nem as condições de exposição ambiental, por novos esquemas em que a vida útil ou prevista seja um parâmetro básico de projeto. Neste contexto, julga-se indispensável uma maior interação entre os profissionais das áreas de Confiabilidade Estrutural e Patologia das Estruturas.

Especificamente, deve ser incrementada a pesquisa para quantificar a evolução da deterioração esperada das construções devido aos efeitos ambientais e de utilização (por exemplo, fadiga em pontes), a identificação e quantificação do risco devido a patologias, e a influência da incerteza de modelo. Em médio prazo, os resultados devem permitir a elaboração de recomendações visando o estabelecimento de prazos para o *habite-se* das construções, em geral, que não pode ser por tempo indefinido, como nos moldes atuais nas cidades sul-e norte-americanas. A exigência de revisões periódicas das construções contribuiria, por outro lado, a evitar o surgimento de bairros com condições sub-estándar de segurança e habitabilidade, hoje comuns na maioria das cidades ocidentais.

AGRADECIMENTOS

Os autores agradecem o apoio do CNPq e CAPES (Brasil).

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

AGREE: **Advisory Group on the Reliability of Electrical Equipment**, Technical Report, Washington, USA, 1957.

AUGUSTI, G.; CIAMPOLI, M. and FRANGOPOL, D.: **Life-cycle reliability-based system management of structures and networks**, in *Structural Safety and Reliability*, Proceedings, 7th. International Conference on Structural Safety and Reliability (ICOSSAR '97), Kyoto, Japan, A.A. Balkem, Rotterdam, Vol. 1, 459-466, 1998.

CAMARGO, F.E.: **Estados limites de fundações considerando a resposta da superestrutura**. Dissertação de Mestrado, PPGECC, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2002.

CARQUEJA, M.H.A. and RIERA, J.D.: **Model uncertainty in the determination of dynamic response of generator foundation**. In: *Transactions of the 14th International Conference on Structural Mechanics in Reactor Technology (SMiRT 14)*, Lyon, France, 1997.

CIAMPOLLI, Marcello: **Reliability assessment of structural systems subject to deterioration over time**, in *Structural Safety and Reliability*, Proceedings, 7th. International Conference on Structural Safety and Reliability (ICOSSAR '97), Kyoto, Japan, A.A. Balkem, Rotterdam, Vol. 1, 81-88, 1998.

CIGRÉ – Conseil International des Grands Réseaux Électriques: **An experiment to measure the variation in lattice tower design.** Report 22-90 (WG08) 17, 1990.

ELMS, D.G. and TURKSTRA, C.J.: **A critique of reliability theory.** In: *Engineering Safety*. D.I. Blockley, Ed. London: McGraw-Hill, pp. 427-445, 1992.

ENGELUND, S. and SORENSEN, J.D.: **Maintenance planning for chloride initiated in concrete structures**, in *Structural Safety and Reliability*, Proceedings, 7th. International Conference on Structural Safety and Reliability (ICOSSAR '97), Kyoto, Japan, A.A. Balkem, Rotterdam, Vol. 1, 435-442, 1998.

FREUDENTHAL, A.M.: **Safety and the probability of structural failure**, *Transactions, ASCE*, Vol. 112, pp. 125-180, 1947.

FREUDENTHAL, A.M.: **The safety of structures**, *Transactions, ASCE*, Vol. 121, pp. 1337-1397, 1956.

KAMINSKI Jr., J.: **Incertezas de modelo na análise de torres metálicas treliçadas de linhas de transmissão**, *Tese de Doutorado*, PPGECC, UFRGS, (em elaboração, 2005).

KARADENIZ, H.: **Uncertainty modeling in the fatigue reliability calculation of offshore structures.** *Reliability Engineering and System Safety*, v. 74, p. 323-335, 2001.

MELCHERS, R.E.: **Human erros in structural reliability.** In: *Probabilistic Structural Mechanics Handbook*, Edited by C.R. Sundararajan, Chapman & Hall, New York, 1994, pp.211-237.

MELCHERS, R.E.: **Structural reliability: analysis and prediction.** Chichester: Ellis Horwood Limited, 1987, 400p.

MENEZES, R.C.R. **Failure-data based reliability assessment considering mechanical model uncertainties.** Ph.D. Thesis, Institut für Mechanik, Universität Innsbruck, Áustria, 1992.

MIZUTANI, M.: **A Maintenance planning method (MPM) for deteriorating structures**, in *Structural Safety and Reliability*, Proceedings, 7th. International Conference on Structural Safety and Reliability (ICOSSAR '97), Kyoto, Japan, A.A. Balkem, Rotterdam, Vol. 1, 443-450, 1998.

PUGACHEV, V.S.: **Introducción a la Teoría de las Probabilidades**, (traduzido do russo), Editorial MIR, Moscú, Russia, 1973.

RIERA, J.D. & ROCHA, M.M.: **Implications of phenomenological uncertainty in engineering reliability assessments**, in: *Structural Safety and Reliability*, Proceedings, 7th. International Conference on Structural Safety and Reliability (ICOSSAR '97), Kyoto, Japan, A.A. Balkem, Rotterdam, Vol. 1, 593-602, 1998.

SUNDARARAJAN, C.: **Expert opinion in probabilistic structural mechanics**, in: *Probabilistic Structural Mechanics Handbook*, Edited by C.R. Sundararajan, Chapman & Hall, New York, 1994, pp.261-279.

VAL, D. and MELCHERS, R.E.: **Reliability analysis of deteriorating concrete frame structures**, in: *Structural Safety and Reliability*, Proceedings, 7th. International Conference on Structural Safety and Reliability (ICOSSAR '97), Kyoto, Japan, A.A. Balkem, Rotterdam, Vol. 1, 105-112, 1998.