

## 2 Revisão Bibliográfica

Nesse capítulo é apresentada uma breve descrição de alguns trabalhos publicados na literatura técnica sobre análises de confiabilidade de estruturas existentes, enfatizando aqueles aplicados a pontes. A revisão apresentada faz uma classificação dos trabalhos de acordo com temas específicos, em função dos interesses da pesquisa proposta. Foca-se primeiro no cenário das estruturas existentes, ressaltando a importância da análise probabilística, e a seguir descrevem-se brevemente os níveis de avaliação de segurança das mesmas.

Também são abordados conceitos relacionados com a monitoração e o gerenciamento. Pesquisas de sistemas de gerenciamento de pontes (BMS – Bridge Management System) e monitoração da saúde estrutural (SHM – Structural Health Monitoring) são apresentadas, enfatizando a importância da interação da análise de confiabilidade e a SHM dentro dos sistemas de gerenciamento das pontes.

Estudos realizados para a determinação da vida útil à fadiga e para pontes de concreto são apresentados. Consideram-se conceitos gerais dos códigos de calibração e modelos de carga. Finalmente, são descritos estudos que usaram o FORM como método de análise de confiabilidade, apresentando suas vantagens e desvantagens, ressaltando estudos relacionados com a implementação de programas computacionais.

### 2.1. Estruturas Existentes

Na ausência de informação adequada para a inspeção e avaliação da segurança de pontes existentes, geralmente, afere-se a segurança estrutural utilizando regulamentos dedicados ao dimensionamento de estruturas novas. Infelizmente, tal metodologia pode ser imprópria e demasiado conservadora para algumas estruturas; em alguns casos, pode conduzir à desnecessária substituição ou reforço de uma estrutura, provocando investimentos desnecessários e perturbando o tráfego com todos os custos que advêm, (Cruz *et al*, 2008). A avaliação do estado de uma estrutura existente é uma situação

específica e, portanto, um processo técnico único e difícil de generalizar, (Ellingwood, 1996).

A avaliação de estruturas existentes difere do projeto de novas estruturas, uma vez que as incertezas associadas ao problema podem ser maiores (degradação) ou menores (informações oriundas de ensaios do comportamento dos materiais, e da geometria). De acordo com Faber (2000), a diferença fundamental entre a avaliação de uma estrutura existente e o projeto de novas estruturas é a quantidade de informação disponível sobre a estrutura. Em estruturas existentes sempre é possível incrementar o nível de precisão dos modelos de cálculo através da aquisição de mais dados sobre a estrutura analisada. Por isso, é de muita importância a implementação de métodos probabilísticos modernos na avaliação de confiabilidade de estruturas existentes, (Diamantidis, 1987).

A análise probabilística de estruturas existentes pode ser vista como uma extensão da análise probabilística para o projeto de estruturas. Ela constitui uma ferramenta racional para incorporar a informação adicional e comparar o nível de confiabilidade atual com o nível de confiabilidade assumido (inerente nas normas). Essa flexibilidade em termos de atualização da informação não é possível quando são empregadas normas determinísticas, (Diamantidis, 1987).

Diamantidis e Bazzurro (2007) fizeram um estudo do critério da aceitação da segurança de estruturas existentes, baseados nas normas e metodologias atuais. Os autores ressaltaram que mesmo empregando uma abordagem probabilística não se deve descartar de imediato o nível de segurança das normas vigentes já que aspectos de segurança de estruturas existentes são considerados em padrões e recomendações nacionais e internacionais. As diretrizes do Instituto Americano de Concreto (ACI 2003) e as recomendações da comissão de segurança estrutural (JCSS 2001) são exemplos típicos.

A importância da abordagem probabilística é ressaltada na pesquisa de Wisniewski *et al* (2009), que estudam a avaliação baseada em probabilidade de pontes existentes de concreto armado e protendido, e apresentam novos modelos probabilísticos de resistência última para cisalhamento e flexão de seções típicas. Nesse trabalho, são utilizados métodos de análise avançados e dados mais recentes da geometria da ponte, das propriedades dos materiais e suas variações. A ponte Barrela de Portugal foi considerada como o caso de estudo, o método de confiabilidade de primeira ordem (FORM) é utilizado, além das abordagens dos valores médios e dos coeficientes parciais de segurança. O artigo apresenta claramente os benefícios do uso dos métodos probabilísticos na

avaliação de pontes existentes e demonstra como a análise de confiabilidade pode tornar-se simples quando os modelos apresentados são utilizados.

De acordo com Frangopol *et al* (2003), para determinar a segurança de uma estrutura existente podem-se considerar três abordagens que são: (a) opinião de especialistas, (b) dados de testes de campo e (c) análise de confiabilidade. A opinião de especialistas é altamente incerta e pode demorar muitos anos até reunir as informações necessárias. Os dados de campo são úteis se existe informação suficiente obtida através de testes técnicos de boa precisão. A análise de confiabilidade trata as incertezas e pode ser feita em diferentes níveis variando a complexidade da mesma de acordo com a informação disponível.

Diferentes níveis de avaliação têm sido considerados por diversos estudos na avaliação da segurança de estruturas (Bailes *et al* 1996; Tanner e Ortega 2000; SB-LRA 2007; Wisniewski 2007; Cruz *et al* 2008), tais níveis são classificados a depender da modelagem da capacidade e das solicitações, do método de análise e dos métodos de avaliação.

Cruz *et al* (2008) explicam de forma simples todos os níveis de avaliação de segurança de pontes começando pelo mais simples, onde se utiliza um formato semelhante ao formato padrão atualmente empregado no projeto de estruturas, até o mais sofisticado onde é aplicada uma abordagem totalmente probabilística do sistema estrutural. O procedimento proposto para a avaliação de segurança de uma ponte consiste em recorrer a um nível mais avançado sempre que a ponte não cumprir os requisitos estabelecidos no nível prévio de avaliação. Wisniewski (2007) resume os níveis na Tabela 2.1. Os níveis de avaliação propostos são:

- **Simple:** o método de avaliação mais simples é semelhante ao método que é empregado no projeto de novas estruturas. As propriedades dos materiais e os carregamentos são definidos utilizando valores característicos e de cálculo. As cargas permanentes e móveis são definidas segundo os regulamentos para o tipo de ponte analisada. Os efeitos das cargas são calculados considerando um regime elástico-linear. A verificação da segurança é realizada utilizando os coeficientes parciais de segurança, considerando coeficientes de segurança calibrados para a avaliação de estruturas existentes, ver Tabela 2.1 (Níveis 1 e 2).
- **Intermediário:** Utiliza informação adicional sobre os parâmetros mecânicos dos materiais que podem ser obtidos mediante ensaios e incorporados nos modelos regulamentares através da atualização Bayesiana (Melchers, 2002).

Pode-se ainda utilizar os modelos determinísticos de carga de tráfego, definidos especificamente para uma ponte particular utilizando os resultados de observações e de medições de tráfego “real”. Permite-se considerar a redistribuição parcial ou total dos esforços entre os vários elementos e as diversas seções de uma estrutura. A avaliação de segurança é feita utilizando os coeficientes parciais de segurança, mas com coeficientes calibrados ou ajustados aos casos particulares, ver Tabela 2.1 (Níveis 3 e 4).

- **Avançado:** Combina a análise não-linear com a análise probabilística. Todos os parâmetros mecânicos dos materiais, da geometria e das cargas, são considerados como variáveis probabilísticas, descritas por leis apropriadas de densidade de probabilidade. Os modelos probabilísticos das variáveis podem descrever, com grande rigor, a real variabilidade destas dentro de uma ponte específica. Mesmo as curvas de distribuição probabilística das cargas de tráfego real que atuam em uma ponte específica podem ser definidas com rigor, utilizando resultados da pesagem e do controle do volume de tráfego, obtidos nas estações de pesagem dinâmica (weight-in-motion). Os métodos probabilísticos de avaliação da segurança permitem utilizar toda a informação sobre a variabilidade dos parâmetros mencionados e definir a segurança de uma ponte em termos da probabilidade de ocorrer falha ou, o que é mais comum, em termos do índice de confiabilidade. Este nível de avaliação da segurança pode ser considerado como a última tentativa para evitar a reparação, reforço ou substituição de uma ponte, ver Tabela 2.1 (Nível 5).

Tabela 2.1. Níveis de avaliação da segurança, (Wisniewski, 2007)

Nível	Modelo de Resistência e modelo de carga	Métodos de análise	Métodos de avaliação
1	Modelo de carga e de resistência como definido nos códigos de projeto.	Análise básica, comportamento linear elástico	Análise determinística. Coeficientes parciais de segurança tal como no regulamento
2	Propriedades dos materiais baseadas nas informações de projeto e nos regulamentos		
3	As propriedades dos materiais e os modelos de carga podem ser definidos com base nos resultados dos ensaios e observações	Análise refinada. É permitida a redistribuição de carga sempre que o nível de ductilidade seja suficiente	Análise determinística. Coeficientes parciais de segurança ajustados
4	Modelos totalmente probabilísticos definidos com base nos resultados dos ensaios e no conhecimento prévio		Análise probabilística
5			

## 2.2. Monitoração e Gerenciamento de Pontes

Durante a última década, os conceitos de monitoração para sistemas estruturais foram submetidos a um processo de rápido desenvolvimento. Eles tornaram-se cada vez mais importantes no planejamento da intervenção (manutenção, reparo, reabilitação, substituição) em estruturas novas e existentes. No entanto, ainda há uma forte necessidade para o uso eficiente de dados de monitoração estrutural na avaliação da confiabilidade estrutural e predição de modelos. As medidas contínuas e simultâneas em distintos pontos de um sistema estrutural deteriorado, proporcionadas por monitoração, permitem a avaliação do comportamento da estrutura de acordo aos diferentes estados limites, (Frangopol *et al*, 2008).

Strauss *et al* (2010) estudaram a avaliação de estruturas existentes baseada em identificação. Este estudo apresenta um procedimento de identificação que determina as propriedades mecânicas estruturais usando a resposta de monitoramento estrutural. Uma abordagem de detecção não destrutiva do dano baseada em medidas da resposta estrutural são apresentados e verificados por experimentos de laboratório controlados e por testes na estrutura real. A frequência das medições e sua sensibilidade às mudanças nas características mecânicas, chamados fatores de sensibilidade, são usados para prever o lugar e a magnitude do dano. Este estudo é aplicado a uma ponte existente na Suíça. O estudo conclui que os sistemas de monitoramento se tornaram populares para avaliar o desempenho e a vida útil remanescente tanto em estruturas novas como em estruturas existentes.

Cidades com grandes rodovias e ferrovias experimentam atualmente os efeitos do envelhecimento e deterioração da rede de pontes. De acordo com Casas (1999) para preservar a capacidade de carga e as condições de serviço de pontes existentes, um programa extensivo de inspeção, reparo e reforço é necessário. Ao longo dos anos, algumas instituições estão buscando organizar os dados estruturais necessários para a administração e preservação das pontes. Esta metodologia é conhecida como Sistema de Gerenciamento de Pontes (BMS). A inspeção e avaliação da segurança e funcionalidade baseada em valores reais são ferramentas importantes em um sistema eficiente de gerenciamento de pontes e na otimização da utilização de fundos monetários, (Frangopol *et al*, 2008). As informações armazenadas podem ser utilizadas de

várias formas, com o objetivo final de otimizar a aplicação de recursos e manter níveis de segurança adequados, a curto e a longo prazos.

A importância do gerenciamento é ressaltada em alguns estudos. Entre eles, Hai (2006) estuda o estado atual das pontes ferroviárias existentes no Vietnã, concentrando-se nas deficiências das pontes de aço. São feitas inspeções no local para encontrar os defeitos e problemas das pontes ferroviárias existentes que apresentam condições físicas inadequadas. Além de falhas estruturais, defeitos locais são identificados (corrosão, obsolescência, fadiga e envelhecimento), onde as principais causas são a sobrecarga, os impactos de colisão, as condições climáticas adversas e a manutenção precária. O autor sugere que a manutenção deve ser priorizada para eliminar essas deficiências e rapidamente eliminar as causas de problemas potenciais. Como um objetivo a longo prazo, recomenda-se estabelecer um sistema de gerenciamento adequado das pontes.

Xun e Qiang (2007) apresentam um estudo de avaliação de segurança e previsão de vida útil de pontes existentes. Os resultados da avaliação de segurança e as características dos danos para os diferentes tipos de pontes podem ajudar ao departamento de gestão a obter um nível elevado de segurança para a estrutura e levar adiante planos a médio e longo prazo de transformação de tecnologia para futuras análises.

Dentro das pesquisas direcionadas à avaliação racional da condição da estrutura da ponte, nos BMS, um tema estudado nos últimos anos é a monitoração da saúde estrutural (SHM), (Culshaw 1998; Catbas *et al* 2000; Farrar e Worden 2007; Liu *et al* 2009 a,b), que envolve a observação da estrutura ao longo do tempo usando monitoramento periódico, a partir das quais faz-se a extração das características sensíveis e através de uma análise estatística determina-se o estado atual da saúde do sistema, (Farrar e Worden, 2007).

A SHM tem como propósito obter informação quantificada da saúde estrutural, indicadores do progresso do dano estrutural e abordagens para identificar e diagnosticar a natureza do dano. Uma descrição mais detalhada dos SHM, sua história e a importância de sua aplicação podem ser encontradas nos trabalhos de Auweraer e Peeters (2003), Balageas (2006) e Brownjohn (2007).

De acordo a Dissanayake e Karunananda (2008), conhecimentos insuficientes sobre a monitoração da saúde estrutural e manutenção precária de pontes causam grandes perdas econômicas, inaceitáveis independentemente da riqueza do país. Esse cenário tem motivado muitas pesquisas que buscam uma

formulação geral para otimização de custos na manutenção de pontes e também para a predição da vida útil da ponte. Vantagens da SHM incluem identificação global e local dos parâmetros estruturais, obtendo dados para a identificação estrutural, manutenção efetiva e operação. Os dados e as conclusões podem também ser usados para aperfeiçoar projetos futuros e diagnósticos antes e depois de condições de ameaça.

Segundo Catbas *et al* (2008), os SHM têm sido incrementados nos últimos anos devido à necessidade da administração objetiva dos sistemas estruturais no mundo. Ao mesmo tempo, métodos de análise estrutural probabilístico e ferramentas de otimização são desenvolvidas para estimativa da capacidade da ponte e estimativa do desempenho futuro da estrutura. A utilização da SHM pode ser ampliada se as informações obtidas são empregadas na análise de confiabilidade.

O resultado da interação entre a SHM e a análise de confiabilidade é um assunto importante e relevante dentro dos Sistemas de Gerenciamento das Pontes (BMS), embora só esteja sendo estudado há poucos anos e por tanto ainda não se encontra muito desenvolvido. Neste contexto, é importante considerar as incertezas na análise dos dados, e com previsões precisas é possível estimar o tempo de ocorrência de falha, identificando o tempo adequado para manutenção e proporcionando uma melhor avaliação custo/benefício e análise do ciclo de vida para gerenciamento. Portanto, é necessária a integração de novas técnicas oferecidas pela SHM e métodos numéricos e analíticos, como ilustrado na Figura 2.1, (Catbas *et al*, 2008).

Os resultados da análise de confiabilidade conjuntamente com SHM para pontes ferroviárias podem ser utilizados para prever a vida útil destas estruturas, identificando as datas adequadas para manutenção, e fornecendo as previsões realistas do grau de segurança remanescente na estrutura em função de alterações no carregamento (trem-tipo).

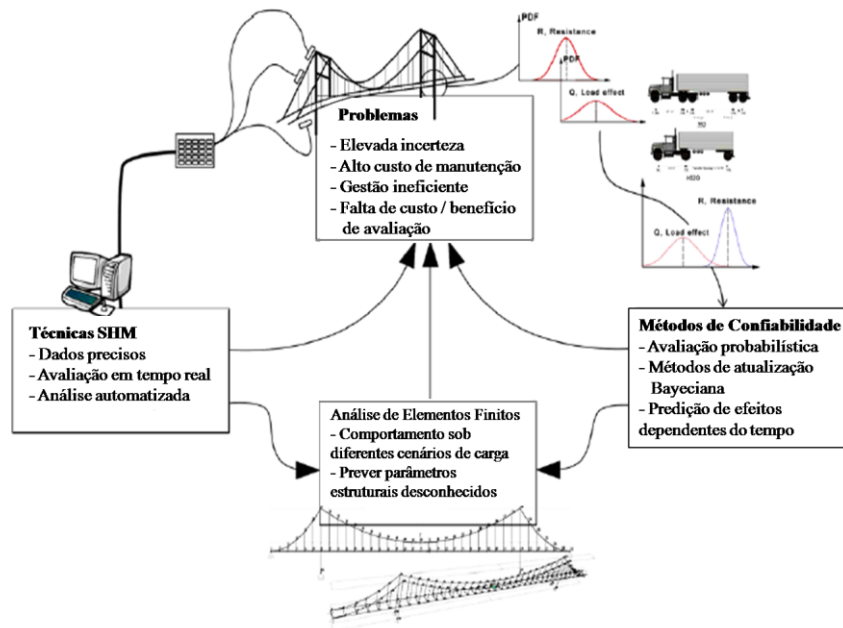


Figura 2.1. Pesquisas necessárias e áreas de estudo envolvidas (adaptado de Catbas *et al* 2008)

Na figura 2.2 é apresentado um esquema simplificado para avaliação da confiabilidade de um sistema estrutural usando dados de sensores. Redes de sensores e sistemas de aquisição de dados, que são elementos essenciais para os sistemas SHM, são estabelecidos e projetados em paralelo com um modelo detalhado da estrutura. Geralmente, um modelo preliminar de elementos finitos é construído para estimar os locais críticos para o projeto de SHM, posteriormente este modelo é refinado e calibrado com os dados do SHM, (Catbas *et al*, 2008).

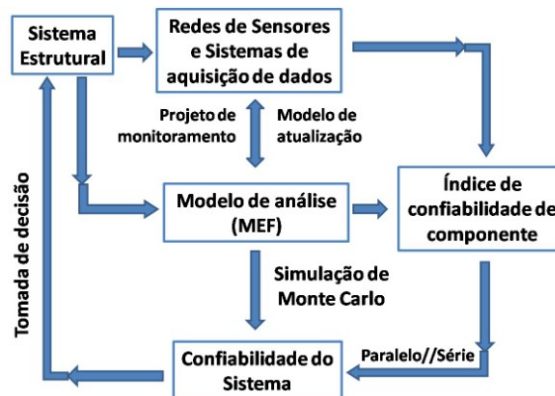


Figura 2.2. Esquema básico para análise de confiabilidade usando SHM (adaptado de Catbas *et al* 2008 ).

A coleta de dados com grande número de sensores tornou-se disponível a baixo custo para aplicações de SHM. Entretanto, com a capacidade de coletar dados mais eficientemente, há uma crescente necessidade de desenvolvimento de sistemas para análise de dados e interpretação de resultados de maneira



rápida e eficiente. Os algoritmos, métodos e abordagens de análise de dados precisam ser desenvolvidos para proporcionar informações críticas num tempo oportuno, (Catbas *et al*, 2008). Dentro das pesquisas de SHM aplicada a pontes, estudos relacionados com a avaliação da fadiga são os mais desenvolvidos.

Frangopol *et al* (2010) apresentam uma abordagem para avaliação da fadiga em pontes de aço, onde modelos de elementos finitos, e dados de monitoração de campo de SHM, são usados para estimar a confiabilidade à fadiga baseadas na metodologia de avaliação de fadiga da AASHTO (American Association of State Highway and Transportation Officials). Os pontos críticos da estrutura são identificados a partir do modelo de elementos finitos e a função de estado limite desenvolvida para a análise de confiabilidade à fadiga leva em conta os dados da monitoração da saúde estrutural. É observada a importância de atualizar os dados originais com os obtidos na monitoração, para representar verdadeiramente os intervalos de deformação devido à fadiga nos locais críticos identificados. Os autores concluem que mais pesquisas ainda são necessárias para a integração dos dados monitorados na avaliação da confiabilidade à fadiga de pontes de aço usando técnicas estatísticas Bayesianas (Melchers, 2002).

### **2.3. Fadiga**

A fadiga é provavelmente o mais importante modo de falha em sistemas estruturais apresentando 80% das falhas de serviço observadas, (Wirsching (1998)), portanto muitas pesquisas relacionadas com a fadiga em pontes têm sido desenvolvidas (Bailey *et al* 1996; Tobias e Foutch 1997; Cho *et al* 2001; Pourzeynali e Datta 2005; Imam *et al* 2006; Kühn *et al* 2008; Frangopol *et al* 2010 ).

Szerszen *et al* (1999) estudaram a confiabilidade a fadiga de pontes de aço, e concluíram que a relação entre o coeficiente de confiabilidade e os anos de serviço da ponte pode ser usada para prever a vida remanescente da ponte.

De acordo com Kim *et al* (2001) os processos para avaliar a vida remanescente à fadiga das pontes existentes de aço são classificados segundo as cargas consideradas nos modelos em três categorias:

- Procedimento simplificado: utiliza o histograma de frequência baseado em dados reais para calcular os danos acumulados de fadiga. Esses danos são avaliados para um número fixo de ciclos de carga e utilizados para estimar a vida remanescente à fadiga.

- Procedimento probabilístico: usa o modelo de distribuição de probabilidade assumido baseado no histograma, é usado para estimar a vida útil remanescente à fadiga com uma confiabilidade predeterminada.
- Procedimento determinístico: usa o modelo de carga obtido a partir do volume equivalente de passageiros.

O procedimento simplificado faz uma estimativa de vida remanescente à fadiga 10 a 20% maior do que a do processo probabilístico. Verifica-se também que o simples método determinístico pode ser adotado para avaliar a vida remanescente à fadiga de uma ponte com precisão aceitável.

Um estudo similar considerando os três níveis de avaliação: determinístico, semi-probabilístico e totalmente probabilístico, é feito para a ponte Padermo da Itália por Pipinato e Modena (2010). O estudo apresenta uma abordagem gradual e prática para a avaliação da integridade estrutural de pontes deterioradas de aço. A avaliação de confiabilidade à fadiga é realizada juntamente com a estimativa de tráfego, a fim de avaliar a vida remanescente à fadiga. A aplicação desses procedimentos mostrou que uma análise detalhada da fadiga ajuda a reduzir os custos necessários para substituições e reparos da ponte, já que a avaliação permite encontrar os cenários mais críticos com o intento de tomar decisões adequadas para o reparo da estrutura considerando o melhor desempenho da ponte e a otimização dos custos.

Kwon e Frangopol (2010) estudaram a avaliação da confiabilidade à fadiga de pontes de aço usando funções de densidade de probabilidade com base em dados de monitoramento de campo. Eles encontraram que esta monitoração pode ser usada satisfatoriamente para a avaliação da confiabilidade à fadiga e a predição da vida remanescente a fadiga de pontes de aço. Uma aproximação usando distribuição probabilística associada com o campo de tensão é proposta para predizer efetivamente o intervalo de tensão equivalente para a avaliação da confiabilidade de fadiga. Essa aproximação é utilizada em duas pontes existentes localizadas na Pensilvânia. O estudo conclui que os dados de monitoramento podem ser utilizados com sucesso na avaliação da confiabilidade à fadiga e previsão da vida remanescente à fadiga de pontes de aço existentes, e que futuros esforços são necessários para estabelecer uma metodologia baseada em risco com o fim de lidar de forma mais adequada com as incertezas associadas à fadiga de pontes existentes de aço.

## 2.4. Pontes de Concreto Armado

Dentro das pesquisas feitas em pontes de concreto destacam-se alguns trabalhos comentados a seguir: Val *et al* (1998) estudam o efeito da corrosão na confiabilidade de pontes, e apresentam um método de avaliação da confiabilidade de lajes de pontes de concreto armado com armadura corroída. São considerados dois tipos de corrosão: geral e localizada. A confiabilidade é calculada usando o método de primeira ordem (FORM). Os resultados mostraram que a corrosão localizada é potencialmente mais perigosa no estado limite último (flexão) e a corrosão geral influencia a confiabilidade da ponte para o estado limite de serviço (deflexão).

Casas (1999) apresenta uma avaliação de pontes de concreto existentes na Espanha, onde considera uma aplicação prática das técnicas de avaliação para três pontes de concreto diferentes. A primeira é uma ponte com arco de alvenaria e concreto simples onde o estado limite mais crítico é o estado limite último de forças axiais e flexão. A segunda é uma ponte com pórtico em concreto armado onde a avaliação se concentra nos estados limites de flexão e cisalhamento e a terceira é uma ponte em concreto protendido onde é analisado o estado limite de flexão e fadiga. Os casos estudados demonstram que a avaliação de pontes existentes de concreto baseada na teoria de confiabilidade é ampla e pode ser aplicada a diferentes tipos de pontes para fornecer uma medida do desempenho estrutural a ser usado na tomada de decisões sobre a atualização e manutenção de pontes.

Frangopol *et al* (1999) apresentam uma abordagem onde são utilizados métodos de confiabilidade com variação no tempo para pontes de concreto armado submetidos a ataques ambientais. No estudo é avaliada a condição das vigas de pontes de concreto armado usando confiabilidade de sistemas com variação no tempo, nos quais tanto as resistências quanto as solicitações são dependentes do tempo. Uma ponte existente de concreto armado com seção em viga T localizada em Colorado é investigada. Os resultados obtidos podem ser usados para guiar a seleção de modelos para análises de confiabilidade de pontes e para o desenvolvimento de estratégias ótimas de manutenção baseadas em confiabilidade para pontes de concreto armado.

Vu e Stewart (2000) estudaram a confiabilidade estrutural de pontes de concreto deterioradas. Modelos de carga variante no tempo são propostos, e o efeito da corrosão é estudado. Como resultado verifica-se que a aplicação de

sais de degelo provoca deterioração significativa a longo prazo e redução da segurança estrutural. Os autores também observaram que a cobertura do concreto e a relação água-cimento têm grande influência na probabilidade de falha estrutural.

Pham e Al-Mahaidi (2008) apresentam um estudo de confiabilidade de vigas de pontes de concreto adaptadas com polímeros reforçados com fibras, com base nas recomendações fornecidas pelo Eurocode 2. O método de Monte Carlo é empregado para avaliar a confiabilidade estrutural à flexão do concreto armado. Essa análise proporciona as bases para recomendações dos fatores de redução da capacidade para os diferentes modos de falha. O estudo é aplicado à ponte Victoria na Austrália.

Hamutçuoğlu e Scott (2009) apresentam um estudo de confiabilidade de vigas de pontes considerando uma interação momento-cisalhamento. O estudo mostra que a predição do comportamento estrutural e a modelagem da resposta dos elementos de viga submetidos às cargas dos veículos em movimento são essenciais no projeto de pontes. Por tanto a análise de confiabilidade é necessária para avaliar o efeito que a variação dos parâmetros terá na resposta da ponte e para determinar quais são os parâmetros que controlam a resposta. Mediante exemplos numéricos, verifica-se que a análise pelo método de primeira ordem (FORM) mostra o efeito que os parâmetros das incertezas têm na interação do momento negativo e a força cortante perto dos suportes de uma viga contínua de uma ponte de concreto armado. A classificação das medidas da importância das variáveis aleatórias indicou a presença da interação do momento-cisalhamento no estado de falha mais provável.

## **2.5. Códigos de Calibração**

Durante o século passado, consideráveis esforços foram dedicados ao desenvolvimento de bases racionais para o projeto de estruturas, resultando em vários códigos de projeto. O objetivo desses códigos, ainda em uso, é garantir um projeto econômico, construção e operação das estruturas em conformidade com as condições operacionais e os requerimentos de segurança considerados. As pesquisas para o desenvolvimento de novas normas e códigos para os projetos estruturais considerando os conceitos de confiabilidade e segurança estrutural são um desafio importante. Por tal motivo o desenvolvimento de códigos modernos de projeto é baseado nos princípios de análise de decisões

econômicas e métodos modernos de confiabilidade. Historicamente, a maior concentração de estudos associados a códigos está concentrada no projeto de estruturas novas. Porém, atualmente, o aumento do número de estruturas importantes que estão envelhecendo justifica o redirecionamento do interesse para abordagem das estruturas existentes, (Faber, 2000). Orientações e códigos para a avaliação das estruturas existentes foram sugeridos, como por exemplo, JCSS (Joint Committee on Structural Safety), ISO (International Organization for Standardization).

A maioria das normas de projeto utiliza fatores parciais de segurança aplicados as cargas e a resistência. Antigamente esses coeficientes eram, basicamente, definidos a partir da experiência de profissionais envolvidos em projetos estruturais. Atualmente, com o auxílio da confiabilidade estrutural, é possível calibrar os fatores de segurança de maneira racional, a partir da definição de um nível de referência aceitável para a probabilidade de falha estrutural. Nesse sentido, a confiabilidade tem sido muito usada na revisão de normas antigas e na elaboração de códigos de projeto para novas concepções estruturais.

Diversas pesquisas têm sido desenvolvidas no estudo das diferentes normas e códigos existentes, alguns fazendo comparações entre elas: Tabsh (1996) estuda a avaliação da confiabilidade de vigas de pontes de aço projetadas usando as especificações LFD (Load Factor Design) e LRFD (Load and Resistance Factor Design) da AASHTO para diferentes condições de carga. Nowak *et al* (2001) também fazem uma comparação dos níveis de confiabilidade de vigas de pontes de concreto protendido projetadas usando três códigos diferentes: Norma Espanhola IAP-98 (1998), o Eurocode1 (1994) e a AASHTO-LRFD (1998). Os modelos estatísticos são baseados em literatura disponível, dados de testes e provas de carga. Nesse estudo, onde a confiabilidade esta associada ao momento fletor e ao esforço de tensão do concreto, observa-se que o Eurocode1 é mais conservador do que os outros dois códigos e AASHTO-LRFD é o código mais permissivo.

Liu (2002) estuda a avaliação de confiabilidade para vigas de pontes de aço projetadas por AASHTO-LRFD, e verifica que o índice de confiabilidade é muito sensível à distribuição lateral das cargas móveis. Pela subestimação da distribuição lateral dessas cargas, no estado limite último, as especificações da AASHTO-LRFD resultam muito conservadoras para flexão, o que não ocorre para cortante.

Já Du *et al* (2004) apresentam uma análise determinística e uma análise de confiabilidade para vigas T simplesmente apoiadas de pontes de concreto protendido projetadas usando três códigos: o código Chinês, o Código de Hong Kong e o código da AASHTO-LRFD. A análise determinística indica que o estado limite de serviço domina o projeto, segundo o código Chinês e o Código da AASHTO-LRFD. Os autores encontraram que os índices de confiabilidade reais para a capacidade de flexão das vigas consideradas de acordo com os três códigos, que são regidos pelo estado limite de serviço, estão próximos um do outro. Com o estudo, concluíram que, para atingir níveis de segurança uniformes no projeto de vigas de pontes de concreto protendido, a calibração de códigos baseada em confiabilidade deve levar em conta não apenas o estado limite último, mais também o estado limite de serviço.

A nova geração de códigos para o projeto de pontes é baseada em análise de confiabilidade usando modelos probabilísticos de carga e resistência. O passo no desenvolvimento desses códigos inclui a seleção de estruturas representativas, formulação do estado limite, desenvolvimento dos modelos das cargas e resistências, seleção do nível de confiabilidade de referência e finalmente a determinação dos fatores de segurança para carga e resistência, (Nowak e Kaszynska, 2003).

## **2.6. Modelos de Carga**

Nas pesquisas feitas para os diferentes tipos de pontes uma tarefa muito importante é a modelagem das incertezas, dentro das quais as mais representativas são as relacionadas com as cargas e a resistência, que devem ser tratadas como variáveis aleatórias. O desenvolvimento racional de códigos para o projeto de pontes e avaliação de estruturas existentes precisa do conhecimento de modelos para essas variáveis aleatórias. Esses modelos são baseados em dados estatísticos disponíveis, testes dos materiais e simulações, (Nowak *et al*, 1998).

Dentro desse cenário, Casas *et al* (1997) apresentam um modelo global para as cargas de tráfego, obtido a partir do tratamento estatístico das variáveis envolvidas mais significativas. O estudo conclui que a ação do tráfego é o efeito mais importante na deterioração e na fadiga em pontes de vãos pequenos e intermediários, além de representar a contribuição mais significativa no valor total das ações externas consideradas para a análise no estado limite último. No

entanto, o valor real da carga de tráfego em pontes é difícil de modelar de forma precisa, por causa de sua alta aleatoriedade. Por isso, é tão importante estabelecer modelos adequados que ajudem a descrever seu comportamento.

## 2.7.

### O FORM Como Método de Avaliação da Probabilidade de Falha

Dentro das análises de confiabilidade um aspecto muito importante é estimar a probabilidade de falha. Diversos métodos têm sido desenvolvidos para esse fim. Um dos métodos mais representativos é o método de confiabilidade de primeira ordem (FORM) que considera o índice de confiabilidade como medida de segurança. As principais deficiências desse método são, principalmente, a precisão e as dificuldades na pesquisa do ponto de projeto por iterações usando as derivadas da função de estado limite, (Zhao *et al*, 2001). Os erros que podem ser encontrados usando o FORM são aceitáveis considerando a grande incerteza na escolha do modelo estocástico adequado e seus parâmetros, (Rackwitz, 2001). Apesar dessas fragilidades o FORM tem sido recomendado pelo Comitê de Segurança Estrutural (JCSS - Joint Committee on Structural Safety) como método para análise de confiabilidade, (Yang *et al*, 2006). Conceitos importantes do FORM podem ser encontrados nos trabalhos de Zhao *et al* (1999), Maiçon (2000) e Kiureghian (2008).

Estudos relacionando os métodos de elementos finitos com o FORM têm sido desenvolvidos, entre eles Sudret e Kiureghian (2002) apresentam um estudo no qual conjugam métodos de elementos finitos estocásticos, com o método para análise de confiabilidade de primeira ordem FORM e a amostragem por importância para análise de confiabilidade. Os resultados são usados para fazer uma comparação dos métodos em termos de precisão e eficiência relativa. Como uma conclusão geral, verifica-se que o método de elementos finitos estocásticos tem aplicabilidade limitada a problemas de confiabilidade envolvendo probabilidades de muito pequenas.

Koduru *et al* (2009) apresentaram uma análise de confiabilidade em conjunção com modelos avançados de elementos finitos, usando o método de primeira ordem FORM devido a sua atrativa interação entre precisão e eficiência computacional. Como conclusão do estudo, observa-se que o FORM em conjunto com análises de elementos finitos estáticos é viável para um intervalo grande de aplicações e proporciona uma boa estimativa para a probabilidade de

falha, mas a aplicação do FORM não é, geralmente, viável para problemas dinâmicos.

Cheng *et al* (2005), apresentam métodos para avaliação de confiabilidade através da combinação do método de superfície de resposta (RSM – Response Surface Methodology) com o método de amostragem por importância, o método de confiabilidade de primeira ordem (FORM) e o método dos elementos finitos. Mediante a combinação de RSM e FORM é possível tornar o cálculo da confiabilidade mais eficiente para estruturas complexas, que exigem análise usando elementos finitos. O uso de técnicas de amostragem por importância aumenta a precisão do método e reduz o número de simulações.

## **2.8. Programas Computacionais**

Nas últimas décadas vários programas computacionais baseados em métodos estocásticos têm sido desenvolvidos e aplicados a diversos problemas de interesse acadêmico de engenharia. Pellissetti *et al* (2005) apresentam uma visão geral dos programas desenvolvidos e descreve o estado atual e a evolução dos mesmos. O estudo conclui que graças a esse tipo de pesquisas tem melhorado muito a integração da análise de confiabilidade com os métodos de elementos finitos.

Kiureghian *et al* (2006) proporcionam uma descrição geral de três programas computacionais desenvolvidos pela Universidade de Califórnia, Berkeley: CalREL (proposta geral de confiabilidade estrutural, feito em FORTRAN), FERUM (coleção de ferramentas de Matlab, arquivos que podem ser usados para confiabilidade estrutural em conjunto com modelos simples de elementos finitos) e OpenSees (código orientado a objetos para a estimação de resposta estrutural não-linear com capacidades de confiabilidade). Nos estudos de Cheng *et al* (2008) e Cheng *et al* (2009) e Bezzazi *et al* (2010) pode-se encontrar a aplicação desses programas computacionais na análise de confiabilidade.