



ESTUDO DA CONFIABILIDADE DE LAJES DE CONCRETO ARMADO EM SITUAÇÃO DE INCÊNDIO VIA SIMULAÇÃO DE MONTE CARLO

Túlio Antunes Pinto Coelho

Sofia Maria Carrato Diniz

tulio_antunes@hotmail.com

diniz@dees.ufmg.br

Universidade Federal de Minas Gerais (UFMG)

Av. Pres. Antônio Carlos nº 6627 - Pampulha, 31270-901, Minas Gerais, Belo Horizonte, Brasil

Abstract. Current standards and specifications for the design of reinforced concrete (RC) structures are based on Limit State Methods, i.e. semi-probabilistic methods. In the last decades, much has been developed in terms of the reliability assessment of structural components in RC such as slabs, beams and columns aimed at the calibration of partial factors in semi-probabilistic methods. On the other hand, studies on the reliability of such structural components under fire are practically nonexistent. Due to the unpredictable nature of the fires and the various uncertainties related to the problem, the reliability of slabs in RC under fire should be investigated. This research aims to present the framework for the reliability analysis of RC structures, in special the slab case, in a fire situation, comprising the concepts, methods, probabilistic description of the relevant variables and definition of the corresponding performance function. As a practical example, the reliability of solid slabs of RC in a fire situation will be evaluated from probabilistic concepts and methods. The probability of failure of slabs to a fully developed fire is obtained via Monte Carlo simulation. This case study very clearly illustrates a situation in which it is a very safe project, by deterministic calculation, it may not necessarily be when structural reliability is assessed.

Keywords: Reinforced concrete, Reliability, Fire, Slabs, Monte carlo simulation.

1 INTRODUÇÃO

A estabilidade estrutural de um edifício durante um incêndio constitui um dos aspectos mais importantes na segurança global do mesmo nesse tipo de situação adversa. O princípio básico é que, em uma situação de incêndio, a construção não deve colapsar prematuramente, causando ferimentos aos ocupantes ou bombeiros que venham a socorrer o local, devendo possibilitar tempo suficiente para que os ocupantes a abandonem ou sejam resgatados. Situações de colapso estrutural normalmente significam extensos danos ao edifício e, portanto, maiores perdas econômicas.

Em geral, as estruturas de concreto têm, historicamente, um bom desempenho nas situações de incêndios (Bailey e Khoury, 2011). Isso porque o concreto é um material não combustível e apresenta uma condutividade térmica relativamente baixa, o que proporciona, além de lenta transferência de calor no interior do mesmo, maior segurança à armação, que não é fortemente afetada pela temperatura.

Projetar estruturas em situação de incêndio é uma das tarefas mais difíceis enfrentadas pelos engenheiros (Fitzgerald, 1997). Isto ocorre, principalmente, devido à natureza extremamente imprevisível, tanto do comportamento do fogo, quanto das respostas estruturais dos elementos frente ao incêndio. As metodologias de projeto baseiam-se predominantemente em estudos empíricos sobre o comportamento do fogo e as respostas estruturais associadas. Considerando-se as várias incertezas pertinentes ao problema (propriedades mecânicas dos materiais a temperaturas elevadas, dimensões, modelos matemáticos empregados, etc.), torna-se evidente que a confiabilidade de estruturas de concreto armado (CA) em situação de incêndio deve ser investigada. Nas seções a seguir são apresentadas metodologias de projeto de estruturas em situação de incêndio. A análise passa então para as áreas de análise de incerteza e confiabilidade estrutural. As ferramentas apresentadas são então utilizadas em estudo de caso envolvendo o desempenho de uma laje de CA em situação de incêndio.

2 RESISTÊNCIA AO FOGO E SEVERIDADE DO FOGO

Na engenharia de incêndio, e particularmente no que diz respeito ao projeto estrutural de incêndio, os termos resistência ao fogo e severidade do fogo são frequentemente utilizados. Assim, uma discussão relativa aos mesmos é apresentada a seguir.

2.1 Resistência ao fogo

A resistência ao fogo é uma medida da capacidade de um componente estrutural em resistir a um incêndio. Mais especificamente, a resistência ao fogo de um componente, ou conjunto de componentes, é a sua capacidade para suportar a exposição ao fogo sem perda de capacidade portante, ou para atuar como uma barreira contra a propagação do fogo - ou ambos. É muitas vezes quantificado como o tempo esperado que os elementos satisfaçam certos critérios quando expostos a um teste padrão de resistência ao fogo.

Na maioria das normas internacionais, estes critérios são: (I) Estabilidade - resistência ao colapso estrutural; (II) Integridade - resistência à transferência de calor; e (III) Isolamento - resistência à temperatura excessiva na face não exposta (interna). Assim, a medida de

resistência ao fogo tem três componentes (estabilidade, integridade e isolamento), todas expressas em unidades de tempo.

Existem na atualidade basicamente três maneiras de classificar a resistência ao fogo de elementos estruturais e combinações dos mesmos (Lie, 1992) conforme descrito a seguir.

Testes laboratoriais

Os testes de laboratório são o método mais comum na classificação da resistência ao fogo. Estes ensaios são realizados em fornos especiais de acordo com procedimentos padronizados. Os mais utilizados estão descritos nos "Métodos Padrão de Ensaio de Incêndio de Construção de Edifícios e Materiais" (ASTM, 2016). Este método de ensaio é usado para avaliar paredes, divisórias, vigas, pilares, lajes e telhados. Procedimentos semelhantes são usados para determinar a resistência ao fogo de conjuntos de portas e janelas. Além da ASTM, outras organizações, como a National Fire Protection Association (NFPA), Underwriters Laboratories Inc (UL) e a British Standard Institution (BSI) também publicam métodos de ensaio de incêndio que são praticamente idênticos aos desenvolvidos pela ASTM. Existem três critérios no método de ensaio padrão: (i) capacidade de carga, (ii) integridade e (iii) isolamento. Em muitos casos, nem todos os critérios têm de ser satisfeitos. Em vigas e pilares, por exemplo, é necessário demonstrar apenas a capacidade portante para o período de resistência ao fogo. As paredes não estruturais, se utilizadas como separação contra incêndio, apenas devem satisfazer a exigência de integridade e isolamento.

Equações empíricas

As equações empíricas que apresentam a relação dos resultados dos testes de resistência ao fogo com importantes parâmetros de projeto começaram a surgir quando se dispôs de resultados de ensaios suficientes para quantificar os efeitos dos parâmetros críticos. Algumas dessas equações foram desenvolvidas com base em previsões teóricas e, posteriormente, foram validadas pelos resultados dos testes. Os pontos importantes a serem considerados na avaliação da adequação da utilização destas equações são: (i) o escopo da base de dados utilizada para validar as equações empíricas, (ii) o nível de confiança nos resultados previstos, e (iii) a aplicabilidade das relações estabelecidas com os materiais e produtos específicos utilizados na prática da construção civil (Lie, 1992).

Cálculos teóricos

Nos últimos anos, foram efetuadas investigações consideráveis com vistas ao desenvolvimento de métodos analíticos para o cálculo da resistência ao fogo de elementos estruturais e da estrutura como um todo. Os procedimentos são então validados com os resultados de ensaios de resistência ao fogo. Métodos analíticos para determinar a resistência ao fogo devem considerar três aspectos básicos do problema: as características do fogo, a transferência de calor, e a resposta da estrutura

As características do fogo referem-se principalmente à sua relação tempo-temperatura e à severidade esperada do incêndio. As relações tempo-temperatura para o incêndio padrão e o incêndio "real" são discutidas na seção seguinte, assim como o conceito de severidade do incêndio. O aquecimento do elemento estrutural pode ser entendido usando-se princípios da transferência de calor: convecção e radiação. O aquecimento dentro do elemento é analisado

por transferência de calor através da condução. As análises de transferência de calor também podem ser facilitadas e analisadas com o auxílio de softwares (por exemplo, o Fire Dynamics Simulator, software desenvolvido pelo National Institute of Standards and Technology, NIST), EUA. A resposta estrutural é determinada através de cálculos semelhantes aos conduzidos para fins de engenharia estrutural à temperatura ambiente, exceto pelo fato de que apenas a carga gravitacional e carga térmica são consideradas e as propriedades do material são avaliadas à temperatura elevada. Softwares comerciais também estão disponíveis para analisar estas respostas estruturais, como por exemplo, o ABAQUS.

Foram desenvolvidas várias fórmulas aproximadas para elementos de CA. As propriedades do concreto variam não apenas com o tempo, mas com a localização na seção, apresentando caráter não uniforme. O CA pode resistir a diferentes temperaturas dentro da mesma seção. Uma elevação média da temperatura de 121 °C na superfície não exposta é considerada na prática americana (ASTM, 2016) como falha. Em uma laje ou viga, a falha ao fogo é definida quando a temperatura do aço atinge 532 °C para armação convencional (Bangash, 2006). A resistência ao fogo de lajes de concreto com base na obtenção de uma elevação média da temperatura de 121 °C na superfície não exposta é dada pela Eq. 1 (Harmathy 1970, Allen e Harmathy 1972, adaptada para unidades SI):

$$R_1 = 0,09 \frac{(\rho c)^{1,2} L^{1,85}}{k^{0,65}} \quad (1)$$

onde R_1 = resistência ao fogo da laje com base no critério de transmissão de calor (hora); L = espessura da laje (m); ρ = densidade do concreto (kg/m^3); c = calor específico do concreto ($\text{kcal/kg } ^\circ\text{C}$); K = condutividade térmica do concreto ($\text{kcal/m.h.}^\circ\text{C}$).

Se não estiverem disponíveis dados sobre as propriedades térmicas do concreto, podem ser utilizados os seguintes valores conservadores para estas propriedades, segundo os próprios autores: $K = 1,49 \text{ Kcal/ m.h.}^\circ\text{C}$ para concreto de peso normal; $K = 0,67 \text{ Kcal/ m.h.}^\circ\text{C}$ para concreto leve, e $c = 0,20 \text{ Kcal/Kg.}^\circ\text{C}$ para os dois tipos de concreto.

Neste caso, a Eq. 1 torna-se, para o concreto de peso normal:

$$R_1 = 0,01 \rho^{1,2} L^{1,85} \quad (2)$$

Em termos de minutos, a Eq. 2 pode ser expressa da seguinte forma:

$$F = 0,57 \rho^{1,2} L^{1,85} \quad (3)$$

onde F = Tempo de resistência ao fogo (minutos).

2.2 Severidade do fogo

A severidade do fogo é uma medida do potencial destrutivo de um incêndio sendo usualmente definida em termos de um período de tempo de exposição ao incêndio padrão. No entanto, os incêndios “reais” têm características do incêndio padrão, o que resulta em vários métodos para determinar a “equivalência” à exposição padrão ao fogo.

A "severidade equivalente do incêndio" é usada para relacionar a severidade de um incêndio real esperado com o incêndio padrão. Os vários métodos de comparação de incêndios reais com o padrão são descritos nas próximas seções.

Área equivalente

A ideia inicial sobre a severidade do incêndio equivalente foi apresentada por Ingberg (1928) que, após uma série de testes de compartimentos com cargas conhecidas de incêndio, sugeriu que a severidade do incêndio poderia ser calculada considerando a equivalência de áreas sob a curva padrão de temperatura de incêndio e a curva de incêndio do compartimento, acima de uma base de 150°C ou 300°C (Fig. 1). Desta forma, Ingberg deduziu uma relação entre a carga de incêndio medida em seus testes com carga por área de piso unitária e os períodos padrão de resistência ao fogo.

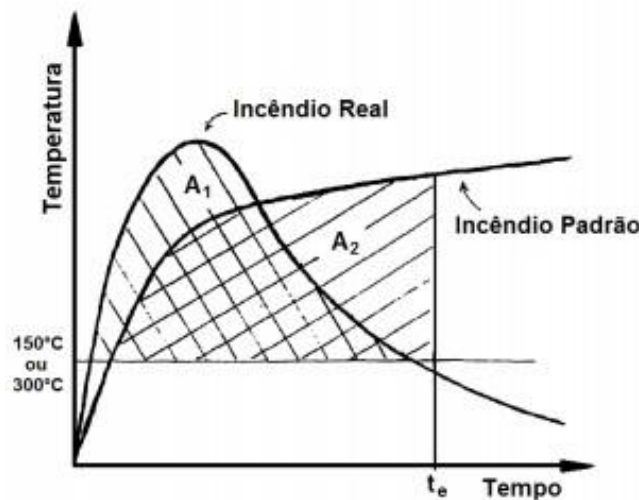


Figura 1: Tempo equivalente pelo conceito de igualdade de áreas sob as curvas (Thomas et. al. 1997)

No entanto, este método tem pouca justificativa teórica porque a unidade de área não é significativa. Este método também não considera o efeito da ventilação que afetaria essa equivalência, na medida em que a temperatura do compartimento é afetada pelo fornecimento de ar e pelo suprimento de combustível.

Temperatura máxima

Uma abordagem mais realista, desenvolvida por Law (1971), Pettersson et. al. (1976) e outros, foi definir que a severidade equivalente do incêndio é o tempo de exposição necessário para que a temperatura de um elemento de aço protegido, determinado por meio da curva de incêndio-padrão, atinja a mesma temperatura máxima do aço de um compartimento com incêndio natural. Este conceito é mostrado na Fig. 2, que compara a temperatura em uma viga de aço exposta ao incêndio padrão com a mesma viga exposta a um incêndio real. Em princípio, este conceito é aplicável a elementos isolantes se a temperatura na face não exposta é utilizada em vez da temperatura do aço e também é aplicável a materiais que têm uma temperatura limite, tal como a temperatura de 300°C à qual a carbonização da madeira em geral se inicia (Buchanan, 1999).

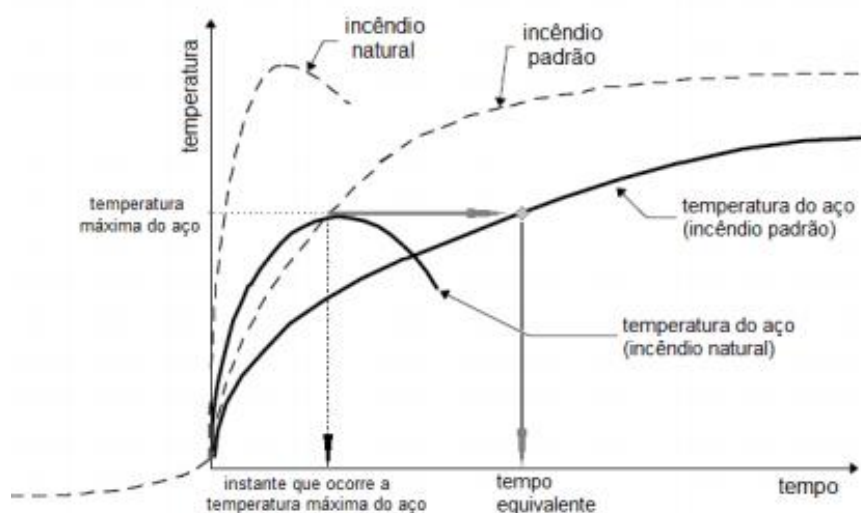


Figura 1: Tempo equivalente pelo conceito de temperatura máxima do aço (Silva, 1997)

Esforço resistente mínimo do aço

Num conceito semelhante baseado na capacidade de carga, a intensidade de incêndio equivalente é o tempo de exposição ao incêndio padrão que resultaria na mesma capacidade portante que o mínimo que ocorreria num esgotamento completo da carga de incêndio. Este conceito é mostrado na Fig. 3, onde a capacidade de carga de um elemento estrutural exposto ao incêndio padrão diminui continuamente, mas o esforço resistente do mesmo elemento exposto a um incêndio real aumenta depois que o incêndio começa a decair e a temperatura do aço diminuir. Este conceito é o mais realista para os elementos estruturais. O conceito de carga mínima pode ser de difícil implementação para um material que não tenha uma capacidade de carga mínima claramente definida, o que pode acontecer para elementos de madeira, por exemplo, nos quais a carbonização continua após a diminuição da temperatura (Buchanan, 1999).

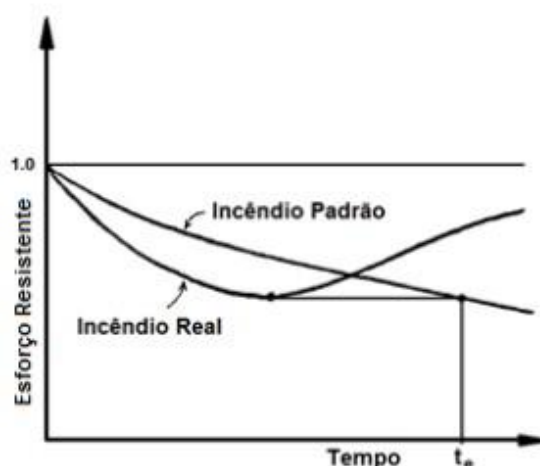


Figura 3: Tempo Equivalente pelo Conceito de esforço resistente mínimo do aço (Thomas et al., 1997)

2.3 Fórmulas de tempo equivalente

Diversas fórmulas do tempo equivalente foram desenvolvidas ajustando curvas empíricas aos resultados de cálculos do tipo mostrado nas Fig. 1-3 para a temperatura máxima de elementos de aço. Algumas destas fórmulas são descritas nas seções seguintes.

Formulação do CIB

A fórmula de tempo equivalente mais utilizada é a do CIB W 14 (CIB, 1986), com base nos parâmetros de ventilação do compartimento e na carga de combustível. O tempo equivalente de exposição T_e (min) a um teste de fogo ISO 834 é dado pela Eq. 4:

$$T_e = k_e w e_f \quad (4)$$

onde e_f é a carga de incêndio (MJ/m² de área de piso); k_e um parâmetro para considerar diferentes revestimentos de compartimento; w o fator de ventilação ($m^{-0,25}$) dado pela Eq. 5:

$$w = \frac{A_f}{(A_v A_t H_v^{0,5})^{0,5}} \quad (5)$$

onde A_f – área do piso do compartimento (m²); A_v – área total de janelas (m²), A_t – área das superfícies limitantes do compartimento (m²); H_v – altura das janelas (m).

Formulação de Law

Uma fórmula semelhante foi desenvolvida por Law com base em testes com pequenos compartimentos e compartimentos maiores (Law, 1973), dada pela Eq. 6

$$T_e = \frac{A_t e_f}{[A_v(A_t - A_v)]^{0,5}} \quad (6)$$

As fórmulas do CIB e de Law só são válidas para compartimentos com aberturas verticais nas paredes. A fórmula de Law dá resultados semelhantes à fórmula CIB, geralmente com valores de tempo equivalente de exposição ligeiramente maiores (Buchanan, 1999).

Formulação do Eurocode e da Instrução Técnica nº 06 do CBMMG

As Eq. 4 e 6 foram posteriormente combinadas, aprimoradas e incorporadas no Eurocode 1 (EC1, 2002), transcritas também na Instrução Técnica de nº 06 do CBMMG, referente à segurança estrutural de edifícios. A nova equação possibilita a obtenção do tempo equivalente de exposição, T_e (min):

$$T_e = k_b w e_f \quad (7)$$

onde k_b substitui k_c (Tabela 1) e o fator de ventilação w é alterado para permitir aberturas de telhado, horizontal sendo dado pela Eq.8:

$$w = \left(\frac{6,0}{H_r}\right)^{0,3} \left[0,62 + \frac{90(0,4-\alpha_v)^4}{1+b_v\alpha_h} \right] > 0,5 \quad (8)$$

onde H_r : a altura do compartimento (m); A_f : Área do piso do compartimento (m²); A_v : Área total de aberturas verticais - janelas (m²); A_h : Área total de aberturas horizontais - telhado (m²); $\alpha_v = A_v / A_f$, (0,05 $\alpha_v \leq 0,25$); $\alpha_h = A_h / A_f$, $\alpha_h \leq 0,20$; e $b_v = 12,5 \alpha_v - \alpha_v^2$.

Uma diferença importante em relação à fórmula CIB é que o tempo equivalente de exposição no Eurocode é independente da altura da abertura, mas dependente da altura ao teto do compartimento, então as duas fórmulas podem dar resultados diferentes para a mesma geometria. Os resultados são semelhantes para compartimentos pequenos com janelas altas, mas a fórmula do Eurocode dá resultados de menor magnitude para compartimentos grandes com tetos altos e baixas alturas de janela (Buchanan, 1999).

Tabela 1: Valores de k_c e k_b usados na fórmula de tempo equivalente

Fórmula	Termo	Unidade	$\sqrt{k_c \rho}$ (Inércia Térmica)			Geral
			Alta >2500	Média 720 - 2500	Baixa <720	
CIB W14	k_c	$m^{2,25}/MJ$	0,05	0,07	0,09	0,10
Eurocode / IT	k_b	m^2/MJ	0,04	0,055	0,07	0,07

k = Condutividade Térmica (W/m°C) ρ = Densidade (kg/m³) c_p = Calor Específico (MJ/kg°C)

3 INCERTEZAS EM UM PROJETO ESTRUTURAL DE INCÊNDIO

Em geral, uma ampla gama de incertezas precisa ser considerada na engenharia de incêndio estrutural podendo incluir várias condições ambientais, mão de obra e erro humano, e previsão de eventos futuros. Várias técnicas quantitativas estão disponíveis para a identificação sistemática de incertezas. Todas elas são essencialmente uma análise crítica do problema a ser analisado, a consideração de todas as consequências e possibilidades imagináveis. A Fig. 4 (Melchers, 1987) apresenta um diagrama esquemático identificando distintos tipos de incertezas.

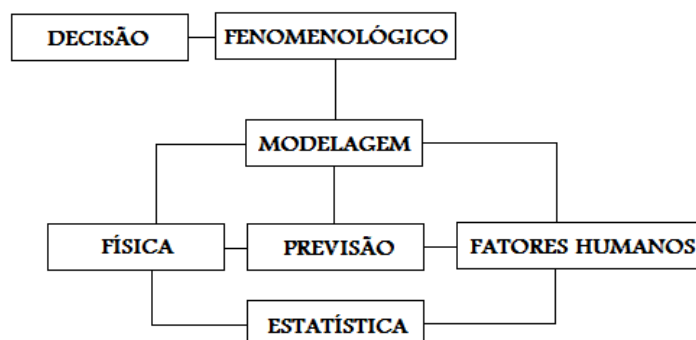


Figura 4: Inter-relação das incertezas na avaliação de confiabilidade (Melchers, 1987)

A incerteza física é aquela identificada com a natureza aleatória inerente de uma variável básica, podendo ser reduzida, mas não eliminada, com maior disponibilidade de dados estatísticos, ou melhor controle de qualidade. A incerteza física deve ser estimada a partir de observações da variável ou ser avaliada subjetivamente. As respostas estruturais de uma estrutura como um todo ou de elementos sob condições de incêndio dependem, em parte, das propriedades do material à temperatura elevada. Essas propriedades não são conhecidas exatamente e isso dá origem à incerteza física. Exemplos específicos para uma estrutura ou elementos estruturais sob condições de incêndio incluem a dimensão física de um elemento estrutural a temperatura elevada (seção transversal), a temperatura do incêndio, o módulo de elasticidade dos materiais envolvidos e as cargas gravitacionais atuantes durante o incêndio.

Na maioria dos casos de projetos de engenharia, valores relativos às propriedades dos materiais usados no cálculo são inferidos a partir de análises estatísticas de observações da variável de interesse. Os dados podem ser coletados com a finalidade de construir um modelo probabilístico dessa variável. Isto implicará na seleção da distribuição de probabilidade adequada e na determinação de seus parâmetros. Na prática, são necessários tamanhos de amostra muito grandes para estabelecer estimativas confiáveis dos valores numéricos dos parâmetros. Portanto, para um determinado conjunto de dados, os parâmetros de distribuição podem ser considerados como variáveis aleatórias, cuja incerteza depende do tamanho da amostra ou de qualquer conhecimento prévio. Esta incerteza é denominada incerteza estatística e, ao contrário da incerteza física, surge unicamente como resultado da falta de informação.

A análise de incêndios estruturais utilizam, em algum momento, modelos matemáticos que relacionam variáveis de saída (por exemplo, a temperatura do aço) com os valores de um conjunto de variáveis de entrada (por exemplo, carga de incêndio, fatores de ventilação). Estes modelos são geralmente determinísticos em sua forma podendo ser baseados numa compreensão da mecânica do problema (por exemplo, modos de transferência de calor) ou altamente empíricos (por exemplo, relação paramétrica tempo- temperatura). No entanto, raramente é possível fazer previsões altamente precisas sobre a resposta estrutural em condições de incêndio. A resposta dos elementos estruturais ao fogo e à carga, em condições de incêndio, contém um componente de incerteza para além das incertezas das próprias variáveis. Tais incertezas na modelagem, decorrem de simplificações, suposições, condições de contorno desconhecidas e também dos efeitos desconhecidos de outras variáveis e sua interação não incluídas no modelo. Em muitos casos, as incertezas na modelagem têm grande efeito na confiabilidade estrutural e não devem ser negligenciadas (Thoft-Christensen & Baker, 1982).

4 CONFIABILIDADE ESTRUTURAL

Em geral, a análise de confiabilidade estrutural está relacionada ao tratamento racional das incertezas no projeto estrutural e à problemática associada à tomada de decisão racional. As incertezas precisam ser identificadas e classificadas para que sua relevância para o problema em questão possa ser apurada. Para efeitos de quantificação de incertezas no campo da engenharia estrutural de incêndio, e para posterior análise de confiabilidade, é necessário definir um conjunto de variáveis básicas que regem a resposta estática ou dinâmica da estrutura. As variáveis básicas são as características mecânicas dos materiais, as características geométricas, as cargas externas, etc.

A confiabilidade de lajes de CA em situação de incêndio pode ser formulada como um problema “Suprimento” versus “Demanda”. No caso em estudo, preocupa-se com o fato de que a resistência ao fogo (Suprimento) de um elemento (estrutural ou não) seja suficiente para suportar a severidade do fogo (Demanda) em um compartimento. A questão da confiabilidade surge da aleatoriedade do suprimento (resistência ao fogo) e da demanda máxima (pior severidade do fogo). Nestes termos, a confiabilidade do componente/sistema estrutural pode ser definida apenas em termos probabilísticos.

Considerando-se as variáveis aleatórias Resistência ao Fogo (R) e Severidade do Fogo (S), a margem de segurança é definida como $M = R - S$. O objetivo do projeto estrutural é assegurar que, dada a incidência de um incêndio, o evento ($M > 0$) ocorra durante toda a vida útil da obra. Esta garantia só pode ser definida em termos da probabilidade $P(M > 0)$, representando, portanto, uma medida da confiabilidade do sistema. Por outro lado, a probabilidade do evento complementar ($M \leq 0$) é a medida correspondente da falha, P_f :

$$P_f = P(R - S \leq 0) = P(M \leq 0) \quad (9)$$

O índice de confiabilidade (β) está relacionado à probabilidade de falha pela Eq.10 (Ang e Tang 1984) e representa a probabilidade de um sistema em cumprir, sem falhas, sua função estrutural, sendo, portanto, um evento complementar à P_f , conforme pode-se perceber em seu equacionamento.

$$\beta = \Phi^{-1}(1 - P_f) \quad (10)$$

onde Φ é a função acumulada da variável normal padrão e Φ^{-1} a sua inversa.

O cálculo da probabilidade de falha pode ser feito através da Simulação de Monte Carlo (SMC). Os resultados obtidos através da SMC são semelhantes aos resultados obtidos experimentalmente. Dois itens são necessários a SMC (Diniz, 2008): uma relação determinística para descrever a resposta da estrutura, e as distribuições de probabilidade de todas as variáveis envolvidas no cálculo. Uma das principais tarefas na SMC é a geração de números aleatórios. A utilização da SMC na avaliação de desempenho da estrutura pode ser feita de duas formas: (i) calculando as estatísticas (média, desvio padrão e tipo de distribuição) da resposta do sistema; (ii) calculando a probabilidade de falha da estrutura. Neste segundo caso, uma função de desempenho é estabelecida e uma amostra dos possíveis resultados é simulada. O número de resultados não satisfatórios é contado, e a probabilidade de falha é obtida pela razão entre o número de resultados não satisfatórios pelo número de simulações realizadas.

5 PROBABILIDADE DE FALHA ACEITÁVEL

Um documento que fornece uma metodologia para o cálculo da probabilidade aceitável de falha é o *Design Guide - Structural Fire Safety publicado pelo Conseil International du Bâtiment* (CIB, 1986). A metodologia que segue foi adaptada do Appendix 5: Safety Factors y and Differentiation Factors yn do documento.

Pode-se definir a probabilidade de falha aceitável para a situação de incêndio (acidental) pela Eq. 11:

$$P_{f,a} = \frac{P_f}{P_a} f(A) \quad (11)$$

onde P_f é a probabilidade de perda de vidas humanas, considerada aceitável para um determinado período de referência. Diferentes valores podem ser atribuídos a diferentes classes de segurança dependendo da consequência da falha, veja-se, por exemplo, os valores listados na Tabela 2 para um período de 50 anos.

Tabela 2: Probabilidade de perda de vidas aceitável (CEB, 1976, adaptado)

Número esperado de fatalidades em caso de incêndio	Perdas Econômicas		
	Baixa	Média	Alta
Baixa	10^{-3}	10^{-4}	10^{-5}
Média	10^{-4}	10^{-5}	10^{-6}
Alta	10^{-5}	10^{-6}	10^{-7}

P_a é a probabilidade de ocorrência de incêndios graves dentro do período de referência considerado. Uma estimativa simples é obtida pela Eq. 12.

$$P_a = P(\text{fogo})P_1P_2\ldots \quad (12)$$

Com $P(\text{fogo})$ representando a probabilidade de surto de incêndio (inicial), que depende da ocupação e tamanho do compartimento. Em uma apresentação geral $P(\text{fogo})$ pode ser modelado pela Eq. 13 (Rutstein & Clarke, 1979):

$$P(\text{fogo}) = pA^X \quad (13)$$

onde p denota a probabilidade de ocorrência por (m^2/ano); A é a área total de compartimentos de incêndio (m^2); X é um índice com valor menor ou igual a 1,0. Assumindo-se $X = 1,0$ tem-se, portanto, um valor conservador. Os valores de p (por m^2/ano) são dados na Tabela 3.

Tabela 3: Probabilidade de ocorrência de Incêndio (Rutstein & Clarke, 1979, adaptado)

Ocupação	Probabilidade por m^2/ano
Habitação	10^{-5}
Escritórios	10^{-6}
Edifícios Industriais	10^{-6}

P1,P2... identificam a diminuição da probabilidade de um incêndio inicial se transformar em um incêndio grave, dependendo dos vários dispositivos de detecção de incêndio e combate a incêndios empregados. Os valores indicativos são apresentados na Tabela 4.

Tabela 4: Fatores de redução da probabilidade de incêndios severos (CIB, 1986, adaptado)

Segurança contra Incêndio	P_i
Atuação do Corpo de Bombeiros	0,1
Sistema de sprinklers com manutenção adequada	0,02
Brigada de Incêndio	0,5 – 0,05
Sistema de detecção e alarme adequadamente mantido	1 – 0,1

No entanto, se forem utilizadas várias disposições de segurança, o produto P₁P₂... deve ser associado a um limite inferior para levar em conta a dependência entre as disposições no que se refere ao seu possível êxito.

Uma função $f(A)$ pode ser introduzida (Eq. 14), se desejado, para contabilizar um risco aumentado à medida que o tamanho do compartimento é aumentado:

$$f(A) = \frac{A^*}{A} \quad (14)$$

Com A* correspondendo, por exemplo, ao tamanho médio do compartimento para um certo tipo de ocupação.

Valendo-se dessa metodologia, será calculada a probabilidade aceitável de falha para um estudo de caso, a ser comparada com a probabilidade de falha de uma laje de concreto, com o auxílio do software @RISK.

6 ESTUDO DE CASO: AVALIAÇÃO DA CONFIABILIDADE DE UMA LAJE DE CONCRETO VIA SIMULAÇÃO DE MONTE CARLO

No projeto estrutural de incêndio, componentes críticos de uma construção como vigas estruturais, pilares, paredes, pisos e portas são projetados para ter resistência ao fogo. A consideração do projeto é de que a avaliação da resistência ao fogo deve ser mais do que suficiente para resistir à pior severidade de incêndio esperada no edifício. As metodologias para quantificar tanto a resistência ao fogo quanto a severidade do fogo foram apresentadas na seção 2 deste artigo. Se um edifício é projetado para segurança contra incêndio, a "resistência ao fogo de projeto" de um componente estrutural é normalmente calculada com base na "severidade ao fogo de projeto" de um compartimento qualquer.

A título de exemplo da utilização dos conceitos apresentados nas seções anteriores, é apresentado a seguir um estudo de caso onde é avaliada a confiabilidade de uma laje monolítica de CA dado o surto de um incêndio totalmente desenvolvido em um

compartimento. O desempenho estrutural sob condições de incêndio é avaliado através de cálculos determinísticos e probabilísticos.

6.1 Desempenho estrutural sob condições de incêndio – Cálculo determinístico

O desempenho estrutural em condições de incêndio de uma laje monolítica de concreto, que forma o piso de um compartimento, será avaliado nesta seção. Os dados relativos ao compartimento são: Profundidade do compartimento = 10 m; Largura do compartimento = 5 m; Altura do compartimento = 2,5m; Altura da janela = 1.5 m; Largura da janela = 3,5m; Material de revestimento interno da superfície: concreto; Carga de Incêndio = 500MJ/m² [Instrução Técnica nº 09 do CBMMG, para risco médio e serviços de hospedagem].

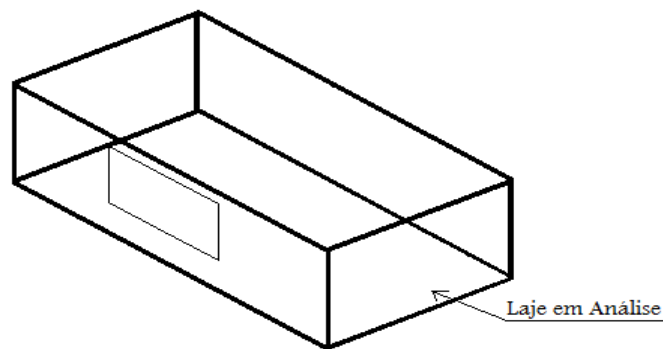


Figura 5: Croqui simplificado do compartimento em análise

A equação de estado limite para o cálculo é então dada por $M = F - T_e$, onde M é a margem de segurança (min). Logo tem-se:

$$M = 0,57 \rho^{1,2} L^{1,85} - k_b w e_f \quad (15)$$

Para uma espessura de laje de concreto de 10 cm e de densidade 2500 kg/m³, valor médio do CA segundo ABNT NBR 6120:2000, a resistência ao fogo é dada por:

$$F = 0,57 \rho^{1,2} L^{1,85} = 0,57 (2500)^{1,2} (0,1)^{1,85} \rightarrow F = 96,3 \text{ min} \quad (16)$$

Valendo-se da Tabela 1, referente à inércia térmica, para a obtenção do coeficiente Kb : $K = 1,49 \text{ Kcal/ m.h.}^\circ\text{C} = 1,73 \text{ W/m }^\circ\text{C}$; $c = 0,20 \text{ Kcal/Kg }^\circ\text{C} = 837,36 \text{ MJ/kg}^\circ\text{C}$. A inércia térmica é dada então por $\sqrt{k\rho c_p} = \sqrt{1,73 * 2500 * 837,36} = 1903,05 \text{ J/m}^2\text{s}^{0,5} \text{ }^\circ\text{C}$. Tem-se, portanto, que o coeficiente k_b , segundo a formulação do Eurocode e da IT nº 06, é $k_b = 0,055$.

O fator de ventilação (Eq. 8) pode então ser calculado ($H_f = 2,5 \text{ m}$; $A_f = 50 \text{ m}^2$; $A_v = 5,25 \text{ m}^2$; $A_h = 0 \text{ m}^2$; $\alpha_v = 0,105$; $\alpha_h = 0$; $b_v = 12,5 (1+10 - \alpha_v^2) \rightarrow b_v = 25,48$). Definidos todos os parâmetros, a severidade ao fogo pode ser determinada:

$$T_e = k_b w e_f = (0,055)(1,69)(500) \rightarrow T_e = 46,5 \text{ min} \quad (17)$$

Resultando numa margem de segurança $M = 49,8$ min.

6.2 Desempenho estrutural sob condições de incêndio – Cálculo probabilístico

Erros na largura, comprimento e altura da sala e da janela devem-se principalmente a erros de construção e medição. Devido à escassez de estudos, estes erros serão estimados em cerca de 1%. Sendo estes dados oriundos de um pequeno número de amostras, eles serão representados por uma distribuição triangular, caracterizada por três parâmetros: o valor mais provável, o mínimo e o máximo. Por exemplo, a profundidade nominal pode ser considerada como o valor mais provável; a adição e subtração de 1% do valor mais provável fornece os valores máximo e mínimo, respectivamente.

Uma classe de risco média é assumida para este compartimento e uma densidade de carga de combustível de 500 MJ/m^2 de área de piso foi usado no cálculo determinístico. Este é o valor de cálculo recomendado na Instrução Técnica nº 09 do CBMMG para serviços de hospedagem. A variação na carga de incêndio pode ser considerada com distribuição normal, com um coeficiente de variação de 25% (CIB, 1986). Como tal, o valor médio da densidade de carga de combustível é 500 MJ/m^2 e desvio padrão de 75 MJ/m^2 .

O valor de k_b depende do valor da inércia térmica $[\sqrt{(k\rho c)}]$ que, para o concreto, pode variar de um valor mínimo de cerca de $420 \text{ J/m}^2\text{s}^{0,5} \text{ }^\circ\text{C}$ a um valor máximo de cerca de $2050 \text{ J/m}^2\text{s}^{0,5} \text{ }^\circ\text{C}$ (Bangash, 2006). O valor de k_b pode então variar de cerca de 0,055 a 0,07 ($\text{min.m}^2/\text{MJ}$), conforme tabelado. Assume-se que a variável aleatória k_b tem distribuição normal com uma média de 0,060 e um coeficiente de variação de 0,10, sendo, portanto, o desvio padrão de 0,006. A distribuição é truncada com um valor mínimo de 0,055 e o valor máximo de $0,070 \text{ min.m}^2/\text{MJ}$.

A densidade do concreto pode variar de 2000 kg/m^3 a 2800 kg/m^3 (ABNT NBR 6120/2000). Pressupõe-se uma distribuição normal truncada entre estes valores, com uma média de 2500 kg/m^3 (concreto armado), coeficiente de variação de 0,15 e desvio padrão de 375 kg/m^3 . Espera-se que a espessura da laje de concreto seja uniforme, com alguma variação devido ao processo de desforma e cura. A espessura nominal da laje de concreto é de 10 cm, tomada como o valor médio. O coeficiente de variação é assumido como 0,02 (Bangash, 2006). Considera-se que a distribuição normal truncada tem um valor mínimo de 9,8 cm e um valor máximo de 10,2 cm. O desvio padrão é 0,2 cm.

Informações relativas aos parâmetros de entrada referentes à resistência ao fogo, F , e à severidade do fogo, T_e , são apresentados nas Tabelas 5 e 6, respectivamente. Estes são os parâmetros de entrada no programa @RISK (Palisade, 2017), para a simulação de um milhão de realizações de F e T_e (Fig. 6) e da margem de segurança. A probabilidade de falha da laje é de aproximadamente 0,0096 ou cerca de 1%, correspondendo a $\beta = 2,34$.

Tabela 5: Resumo dos parâmetros de entrada referentes à resistência ao fogo

$F = 0,57 \rho^{1,2} L^{1,85}$			
VARIÁVEL	μ	σ	DISTRIBUIÇÃO
ρ	2500 Kg/m^3	375 Kg/m^3	Normal
L	$0,10 \text{ cm}$	$0,002 \text{ cm}$	Normal

Tabela 6: Parâmetros de entrada referentes à severidade do fogo

$T_e = k_b w e_f$ $*w = \left(\frac{6,0}{H_r}\right)^{0,3} [0,62 + 90(0,4 - \alpha_v)^4]$ *A equação representativa da ventilação (w) já foi simplificada, considerando-se que $\alpha_v = 0$.					
VARIÁVEL			μ		DISTRIBUIÇÃO
e_f			500 MJ/m ²		Normal
k_b			0,06		Normal
VARIÁVEL			Mínimo	Provável	DISTRIBUIÇÃO
w	H_r		2,47 m	2,50 m	Triangular
	α_v (A_v/A_f)	A_f (P*L)	9,0 m	10 m	Triangular
		Largura (L)	4,95 m	5,0 m	Triangular
		Altura (A)	1,48 m	1,50 m	Triangular
		A_v (A*L)	3,46 m	3,50 m	Triangular

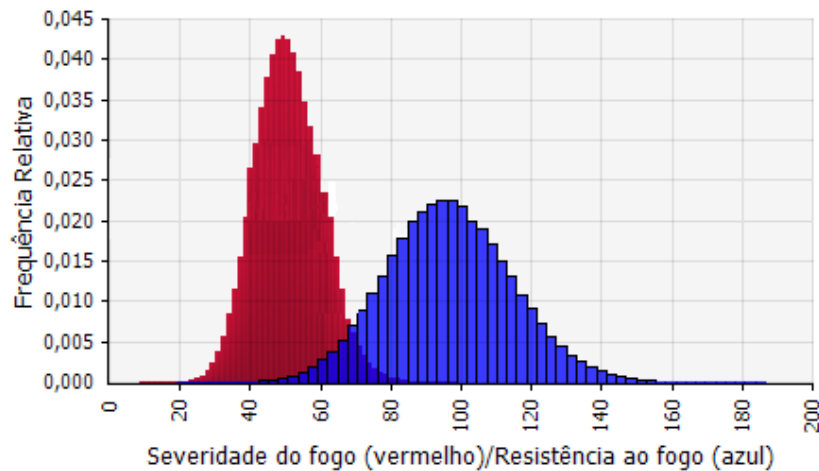


Figura 6: Distribuição de probabilidade da severidade do fogo versus resistência da laje ao fogo

7 CÁLCULO DA PROBABILIDADE DE FALHA ACEITÁVEL

Supõe-se, para possibilitar a aplicação dos conceitos, que o edifício em análise seria um hotel, sendo o caso estudado um quarto do mesmo. Esse hotel teria, por exemplo, 4 andares, sendo que cada andar teria 18 apartamentos iguais ao estudado (50 m²), totalizando-se assim 3600 m², sendo esta, portanto, a estimativa de área do local.

7.1 Perdas de vidas e econômicas (P_f)

- Perdas econômicas → consideradas elevadas para o setor hoteleiro
- Número esperado de mortes → média a alta

Será considerado nessa análise perdas econômicas elevadas e número de mortes em nível médio. Nesse caso, a probabilidade aceitável anual de perda de vidas (P_f) é obtida a partir da Tabela 2, dividindo-se o valor do tempo de vida por 50, o que resulta num valor de 2×10^{-8} .

7.2 Probabilidade de ocorrência de um incêndio severo (P_a)

A partir da Tabela 3, obtém-se a probabilidade de ocorrência de incêndio por m^2 /ano, p , que é considerado como 10^{-5} para habitação. A probabilidade de um incêndio inicial é então:

$$P(\text{fogo}) = pA^X = 10^{-5}(3600)^1 = 0,036 \quad (18)$$

Da Tabela 4 os seguintes fatores de redução de probabilidade serão adotados:

- Atuação dos Bombeiros → $P_1 = 0,1$
- Sistema de sprinklers com manutenção adequada → $P_2 = 0,02$
- Sistema de detecção e alarme com manutenção adequada → $P_3 = 0,01$

A probabilidade anual de ocorrência de um incêndio severo é então:

$$P_a = P(\text{fogo})P_1P_2P_3 = (0,036)(0,1)(0,02)(0,01) = 7,2 \times 10^{-6} \quad (19)$$

7.3 Valor da função $f(A)$

Como os dados sobre o "tamanho médio do compartimento de incêndio" não estão disponíveis, a função $f(A)$ será descartada.

7.4 Probabilidade de falha aceitável e índice de confiabilidade

Substituindo os valores de P_f e P_a calculados acima na Eq. 11 e manipulando a Eq. 10, obtém-se a seguinte probabilidade aceitável de falha e índice de confiabilidade, respectivamente:

$$P_{f,a} = \frac{P_f}{P_a} f(A) = \frac{2 \times 10^{-8}}{7,2 \times 10^{-6}} 1 = 2,77 \times 10^{-3} \quad (20)$$

$$P_{f,a} = \Phi(-\beta_a) \rightarrow \beta_a = \Phi^{-1}(1 - P_{f,a}) = \Phi^{-1}(0,9972) \quad (21)$$

A probabilidade de falha aceitável da laje é de aproximadamente 0,003 ou cerca de 0,3%, correspondendo a $\beta = 2,77$.

7.5 Probabilidade de falha aceitável e índice de confiabilidade

No estudo de caso, o índice de confiabilidade, representativo do desempenho da laje de concreto, foi calculado e o valor obtido foi de 2,34. Este valor de β fica aquém do índice de confiabilidade admissível que foi de 2,77. A laje de concreto é, desta forma, considerada insegura na sua concepção atual.

8 SUMÁRIO E CONCLUSÕES

Este estudo de caso ilustra muito claramente uma situação em que o que parece ser um projeto muito seguro pelo cálculo determinístico pode não necessariamente ser quando a confiabilidade estrutural é avaliada. Por outro lado, a existência mesmo de uma pequena probabilidade de falha não significa que o cálculo não é válido. O que é mais importante é a questão: o que constitui uma probabilidade aceitável de falha ou qual é o índice de confiabilidade mínimo aceitável? As respostas a estas perguntas deveriam ser obtidas nas normas regulamentares.

No entanto, deve-se mencionar que, embora a maioria das normas especifiquem valores aceitáveis para o estado limite final devido à carga de uso, de vento e combinação de cargas, o mesmo não pode ser dito para as situações de incêndio. Seja como for, também deve ser apreciado que a probabilidade aceitável de falha, nesses casos, é normalmente calculada contabilizando-se todas as incertezas, ou a maior parte delas. Assim, a principal razão pela qual a probabilidade aceitável de falha não foi especificada para a confiabilidade estrutural sob condições de incêndio se deve ao fato da existência de demasiadas incertezas nessas situações, que não podem ser facilmente explicadas, sendo os parâmetros probabilísticos das variáveis aleatórias de difícil acesso.

Neste estudo de caso, a probabilidade de falha da laje é condicionada à ocorrência de um incêndio totalmente desenvolvido no compartimento, que poderia muito bem ser um quarto de hotel. De interesse, então, é saber qual a probabilidade de um incêndio se tornar plenamente desenvolvido dada uma determinada probabilidade de ignição ou de flashover. Há ainda a probabilidade do sistema de proteção ativo, como a ativação do sistema de extinção de incêndios – sprinklers, ou a probabilidade da intervenção bem sucedida pelo serviço do Corpo de Bombeiros. A lista pode prosseguir e se a maioria dos eventos for independente, a probabilidade quase absoluta, ou global, de falha da laje de concreto em situação de incêndio, aplicando-se a regra de multiplicação, seria reduzida a praticamente zero.

Isso não significa que a probabilidade condicional de falha não seja útil. Um termo melhor para esta probabilidade condicional é a probabilidade "nominal" (Melchers, 1987). Probabilidade nominal de falha é muito útil para indicar falhas ou deficiência em um projeto ou em um edifício existente. De fato, as medidas nominais de probabilidade de falha podem ser usadas como substitutas de medidas mais precisamente determinísticas, se os efeitos do erro humano, em particular, forem assumidos como semelhantes para situações semelhantes ou componentes estruturais (Melchers, 1987).

Foi também estabelecida uma probabilidade de falha e índice de confiabilidade admissíveis. Com base neste índice de confiabilidade a conclusão que pode ser extraída é a de que a análise determinística ou de "valor único" no projeto pode dar resultados muito

enganosos se a variabilidade de propriedades e toda a gama de possíveis cenários não forem levados em conta.

Isso é especialmente verdadeiro para o caso do incêndio, pela própria razão de que o comportamento do fogo, e seu efeito sobre as propriedades do material, gera enorme dispersão nos dados. Nestas circunstâncias, a aplicação da avaliação da confiabilidade evidenciaria qualquer deficiência ou lacuna na concepção e constituiria uma boa base para a reapreciação do projeto no intuito de satisfazer a exigência de desempenho esperado. Esta dissertação mostrou como um cálculo determinístico simples pode ser facilmente estendido para uma análise de confiabilidade usando softwares de computador.

Por fim, pode-se dizer que serve de arcabouço teórico para a evolução das normas técnicas brasileiras, em especial a ABNT NBR 15200:2012, para o campo probabilístico, o que possibilitaria análises baseadas em desempenho em detrimento de avaliações determinísticas.

AGRADECIMENTOS

Os autores agradecem o importante apoio da agência de pesquisa brasileira FAPEMIG (Fundação de Amparo à Pesquisa do Estado de Minas Gerais).

REFERÊNCIAS

- Ang. A.H.S, Tang, W.H, 1984. *Probability Concepts in Engineering Planning and Design. Volume II: Decision, Risk, and Reliability*. John Wiley & Sons. Pg 206 -216.
- ASTM E119-16a, 2016. *Standard Test Methods for Fire Tests of Building Construction and Materials*, ASTM International.
- Bailey C.G, Khoury G.,2011. *Performance of Concrete Structures in Fire*. MPA The Concrete Centre, Reino Unido.
- Bangash, T., 2006. *Explosion-Resistant Buildings: Design, Analysis, and Case Studies*, Ed. Springer, Pg 158 a 163.
- Buchanan, A.H, 1999. *Structural Design for Fire*. Civil Engineering Department, University of Canterbury.
- CIB 1986, *Design Guide for Structural Fire Safety*, CIB-W14. Fire Safety Journal, vol 10, Fire Commission of the Conseil International du Batiment.
- CEB. 1976. *Common Unified Rules for Different Types of Material and Construction*; Boletim nº 116, Joint Committee for Structural Safety, 1976
- Corpo de Bombeiros Militares de Minas Gerais. Instrução Técnica Nº 06: *Segurança Estrutural das Edificações*. Minas Gerais, 2005.
- Diniz, S.M.C, 2008. *Structural Reliability: Rational Tools for Design Code Development*, 2008 Structures Congress: Crossing Borders.
- European Committee for Standardization, 2002. *Basis of design and actions on structures, actions on structures exposed to fire (parte 2.2)*. Eurocode 1 – ENV 2002- 2-2, Bruxelas.

- Fitzgerald, R.W, 1997. *Structural Integrity During Fire*. Fire Protection Handbook. 18ª Edição. National Fire Protection Association. Quincy, Massachusetts.
- Ingberg, S.H., 1928. *Test of the Severity of Building Fires*. National Fire Protection Quarterly, Vol. 22, No. 1.
- Law, M., 1971. *A Relationship between Fire Grading and Building Design and Contents*. Fire Research Note No 877. Fire Research Station, Reino Unido.
- Law, M., 1973 *Prediction of Fire Resistance, Paper in Symposium No. 5, Fire Resistance Requirement of Buildings, A New Approach*. Department of the Environment and Fire Offices Committee Joint Fire Research Organisation. HMSO. Londres.
- Melchers, R.E, 1987. *Structural Reliability: Analysis and Prediction*. Ellis Horwood Ltd., Chichester.
- Palisade, 2017. *@RISK - Advanced Risk Analysis for Spreadsheets*. Palisade Corporation, Nova York.
- Pettersson, O., Magnuson, S.E., Thor, T., 1976. *Fire Engineering Design of Steel Structures*, Swedish Institute of Steel Construction, Estocolmo.
- RUSTEIN, R. AND CLARKE. M.B., 1979. *The Probability of Fire in Different Sectors of Industry*, Fire Surveyor.
- Silva, V.P., 1997. *Estruturas de aço em situação de incêndio*. Tese de doutorado apresentada à Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, São Paulo.
- Thoft-Christensen, P., Baker, M.J., 1982. *Structural Reliability Theory and Its Applications*. Springer-Verlag, Berlin. Pg 4-7.
- Thomas, G.C., Buchanan, A.N., Fleischmann, C.M., 1997. *Structural Fire Design: The Role of Time Equivalence*, University of Canterbury, Christchurch, New Zealand - Fire Safety Science-Proceedings of The Fifth International Symposium, Pg 607-618.