



UNIVERSIDADE FEDERAL DE SANTA CATARINA
CENTRO TECNOLÓGICO
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA CIVIL

Alverlando Silva Ricardo

**CONFIABILIDADE DE ELEMENTOS E SISTEMAS ESTRUTURAIS METÁLICOS
EM SITUAÇÃO DE INCÊNDIO UTILIZANDO REDES NEURAIS ARTIFICIAIS
ADAPTATIVAS**

Florianópolis
2022

Alverlando Silva Ricardo

**CONFIABILIDADE DE ELEMENTOS E SISTEMAS ESTRUTURAIS METÁLICOS
EM SITUAÇÃO DE INCÊNDIO UTILIZANDO REDES NEURAIS ARTIFICIAIS
ADAPTATIVAS**

Tese submetida ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil da Universidade Federal de Santa Catarina para a obtenção do título de Doutor em Estruturas.

Orientador: Prof. Dr. Wellison José de Santana Gomes.

Florianópolis

2022

Ficha de identificação da obra elaborada pelo autor,
através do Programa de Geração Automática da Biblioteca Universitária da UFSC.

Ricardo, Alverlando Silva
CONFIABILIDADE DE ELEMENTOS E SISTEMAS ESTRUTURAIS
METÁLICOS EM SITUAÇÃO DE INCÊNDIO UTILIZANDO REDES NEURAIS
ARTIFICIAIS ADAPTATIVAS / Alverlando Silva Ricardo ;
orientador, Wellison José de Santana Gomes, 2022.
184 p.

Tese (doutorado) - Universidade Federal de Santa
Catarina, Centro Tecnológico, Programa de Pós-Graduação em
Engenharia Civil, Florianópolis, 2022.

Inclui referências.

1. Engenharia Civil. 2. Incêndio Estrutural . 3.
Confiabilidade Estrutural. 4. Redes Neurais Artificiais
adaptativas. 5. Custo de Processamento Computacional. I.
Gomes, Wellison José de Santana. II. Universidade Federal
de Santa Catarina. Programa de Pós-Graduação em Engenharia
Civil. III. Título.

Alverlando Silva Ricardo

Confiabilidade de Elementos e Sistemas Estruturais Metálicos em Situação de Incêndio Utilizando Redes Neurais Artificiais Adaptativas

O presente trabalho em nível de doutorado foi avaliado e aprovado por banca examinadora composta pelos seguintes membros:

Prof. Jorge Munaiar Neto, Dr.

Universidade de São Paulo – USP

Prof. Eduardo Toledo de Lima Junior, Dr.

Universidade Federal de Alagoas – UFAL

Prof^a. Poliana Dias de Moraes, Dra.

Universidade Federal de Santa Catarina – UFSC

Prof. Marcos Souza Lenzi, Dr.

Universidade Federal de Santa Catarina – UFSC

Certificamos que esta é a **versão original e final** do trabalho de conclusão que foi julgado adequado para obtenção do título de doutor em Estruturas.

Coordenação do Programa de Pós-Graduação

Prof. Wellison José de Santana Gomes, Dr.

Orientador

Florianópolis, 2022.

In memoriam de Alyne Ricardo, minha querida irmã, vítima
dessa triste pandemia.

AGRADECIMENTOS

A todos os meus professores, em especial, ao Prof. Dr. Wellison José de Santana Gomes, orientador do presente trabalho, pelos valiosos ensinamentos, enorme paciência, e grande atenção dispensada. Além disso, pelos conselhos fundamentais que contribuíram para que eu persistisse na pesquisa.

Ao professor Ronaldo Rigobello pelas dicas primordiais que contribuíram fortemente para a realização do presente trabalho.

Aos pesquisadores, em especial os das áreas de estudo de confiabilidade e de estruturas em situação de incêndio, que com suas ideias e contribuições possibilitaram que a presente tese fosse desenvolvida.

Às Universidades Federais de Santa Catarina e de Alagoas, e o apoio desta pesquisa pela da Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior – Brasil (CAPES) – Código de Financiamento 001. Além do Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico (CNPq).

À minha esposa, Daniele, por todo carinho e incentivo dados durante os estudos.

À Lua por toda parceria e ânimo dados durante as várias horas de leitura.

Aos meus pais, Adeilda e Leonardo, por todo amor e pela forma como educaram e acompanharam seus filhos.

Aos meus irmãos, Alderlando e Alyne, por toda amizade e parceria.

Aos amigos e colegas pelo apoio e pelos momentos de entusiasmo compartilhados.

A todos os médicos e enfermeiros que contribuíram para que eu pudesse vencer a covid-19, principalmente, no momento mais crítico da doença.

E a Deus, pela força espiritual que, de algum modo, contribui para a conclusão desse trabalho, sobretudo nos momentos onde a fé sustentou a razão.

“Coragem, coragem, se o que você quer é aquilo que pensa e faz. Coragem, coragem, que eu sei que você pode mais”

(Raul Seixas, 1979).

RESUMO

Na última década, a teoria da confiabilidade estrutural tem sido aplicada a muitos problemas que consideram estruturas em situação de incêndio. Metodologias que utilizam simulação de Monte Carlo (MCS) associada ao método dos elementos finitos estão entre as mais recomendadas, nesse tipo de problema, sobretudo devido à forte não linearidade da resposta que as estruturas tendem a apresentar quando submetidas a altas temperaturas. Porém, a necessidade de uma representação adequada da resposta estrutural, considerando o MEF, combinada ao número elevado de simulações requeridas pelo MCS, faz com que o custo computacional facilmente se torne proibitivo, mesmo para modelos estruturais simples. Assim, boa parte dos pesquisadores tem utilizado métodos de confiabilidade de transformação, simplificações e investigado apenas a vulnerabilidade de elementos individuais expostos ao fogo, ao invés de sistemas estruturais. Contudo, o uso de métodos de transformação e de simplificações para resolver esse tipo de problema pode levar a erros significativos na resposta final. Além disso, as análises de membros estruturais isolados podem gerar premissas inconsistentes, pois a confiabilidade do sistema raramente será igual à confiabilidade de um de seus elementos. Por outro lado, a literatura tem apontado o uso de metamodelos adaptativos como uma das alternativas mais promissoras para manter o custo computacional de análises de confiabilidade complexas, como é o caso de estruturas expostas ao fogo, em níveis aceitáveis. Desse modo, aplica-se no presente trabalho a abordagem de Redes Neurais Artificiais (RNAs) adaptativas na análise de um sistema estrutural tridimensional de uma edificação de aço em situação de incêndio. A abordagem adaptativa também é empregada na solução de problemas de confiabilidade de estruturas unidimensionais e bidimensionais, encontrados na literatura. O impacto dos modelos de incêndios natural e padronizados na resposta estrutural é investigado. Para tanto, é utilizado um algoritmo programado em linguagem MATLAB, acoplado ao pacote computacional de elementos finitos, ANSYS. A acurácia e a eficiência da abordagem adaptativa são comparadas com as do método de transformação FORM, das RNAs não adaptativas e do MCS (que é usualmente tomado como referência), no chamado exemplo de verificação. As análises de confiabilidade das estruturas levaram a diferenças de até 21,83% entre as probabilidades de falha obtidas via FORM e via MCS. Além disso, enquanto a abordagem não adaptativa via metamodelagem não consegue atingir precisão suficiente, a abordagem adaptativa é confirmada como sendo uma alternativa viável, com diferenças, em média, próximas a 1,00% e tempo computacional até 72 vezes menor do que os apresentados na literatura. Para o sistema estrutural tridimensional, a probabilidade de falha é obtida via RNAs adaptativas com um tempo computacional de 43 horas, enquanto estima-se que as cerca de 100 mil simulações de Monte Carlo necessárias requereriam quase 2 anos de tempo computacional. O estudo indica ainda que a confiabilidade estimada para as estruturas é altamente dependente da interação entre diferentes membros estruturais e do modelo de incêndio adotado. Isto ressalta o cuidado que deve ser tomado ao analisar a confiabilidade de elementos estruturais isolados e ao escolher o modelo de incêndio a ser empregado na análise.

Palavras-chave: Incêndio. Confiabilidade Estrutural. Redes Neurais Artificiais adaptativas. Sistema Estrutural. Custo Computacional.

ABSTRACT

In the last decade, structural reliability theory has been applied to many problems that consider structures subjected to fire. Methodologies that use Monte Carlo Simulation (MCS) associated with the finite element method are among the most recommended in this type of problem, mainly due to the strong nonlinearity of the response that structures tend to present when subjected to high temperatures. However, the need for an adequate representation of the structural response, combined with the high number of simulations required, makes the computational cost easily prohibitive, even for simple structural models. Thus, most researchers have used transformation reliability methods, simplifications and only investigated the vulnerability of individual elements exposed to fire, rather than structural systems. However, the use of approximate methods and simplifications to solve this type of problem can lead to significant errors in the final answer. In addition, analyzes of isolated structural members can lead to inconsistent assumptions, as the reliability of the system will rarely be equal to the reliability of one of its elements. On the other hand, the literature has pointed to the use of adaptive surrogate models as one of the most promising alternatives to keep the computational cost of complex reliability analyzes at acceptable levels, as is the case of structures exposed to fire. Thus, in this thesis, the approach of adaptive Artificial Neural Networks (ANNs) is applied in the analysis of a three-dimensional structural system of a steel building in a fire situation. The adaptive approach is also used to solve reliability problems related to one-dimensional and two-dimensional structures, found in the literature. In addition, the impact of natural and standardized fire models on the structural response is investigated. For that, an algorithm programmed in MATLAB language is used, coupled to the ANSYS finite element computational package. The accuracy and efficiency of the proposed adaptive approach are compared with those of the First-Order Reliability Method (FORM), the non-adaptive ANNs and the MCS (which is usually taken as a reference), in the so-called verification example. The reliability analyzes of the structures led to differences of up to 21,83% between the failure probabilities obtained via FORM and via MCS. In addition, while the non-adaptive approach via surrogate models cannot achieve sufficient accuracy, the adaptive approach is confirmed as a viable alternative, with differences, on average, close to 1,00% and computational time up to 72 times lower than those presented in the literature. For the three-dimensional structural system, the computation of the failure probability via adaptive ANNs took about 43 hours, while the one hundred thousand MCS simulations necessary to compute such failure probability would require almost 2 years. The study also indicates that the estimated reliability of the structures is highly dependent on the interaction between different structural members and on the fire model adopted. Therefore, it is necessary to be careful when analysing the reliability of isolated structural elements, as well as when selecting which fire model to be employed in the analysis.

Keywords: Fire. Structural Reliability. Adaptive Artificial Neural Networks. Structural System. Computational Cost.

LISTA DE FIGURAS

Figura 2.1: Matriz de estimativa de risco	28
Figura 2.2: Curva temperatura \times tempo de um incêndio real.....	29
Figura 2.3: Curvas paramétricas em função dos seus parâmetros.....	34
Figura 2.4: Curvas ISO 834 e hidrocarbonetos	36
Figura 2.5: Curvas paramétricas em função dos seus parâmetros.....	39
Figura 2.6: Modelos probabilísticos para propriedades térmicas de material isolante SFRM: (a) condutividade térmica; (b) calor específico; (c) densidade.	41
Figura 2.7: Fatores de redução das propriedades mecânicas em função da temperatura, para (a) $k_{y,\theta}$; (b) $k_{p,\theta}$; (c) $k_{E,\theta}$	44
Figura 2.8: Diagrama tensão relativa \times deformação específica para os aços estruturais.	47
Figura 2.9: Propriedades térmicas em função da temperatura, para (a) condutividade térmica; (b) alongamento do aço; (c) calor específico.....	50
Figura 2.10: Diagrama tensão-deformação do concreto em função da temperatura.	52
Figura 2.11: Ilustração da aproximação da equação de estado limite pelo FORM.....	59
Figura 2.12: Representação gráfica da simulação de Monte Carlo	61
Figura 2.13: Simulação da estrutura básica do neurônio artificial	63
Figura 2.14: Esquema de uma rede <i>feedforward</i> MLP.....	65
Figura 2.15: Algoritmo das RNAs adaptativas.....	71
Figura 3.1: Módulos acoplados.	76
Figura 3.2: Viga de aço termicamente desprotegida.	77
Figura 3.3: Pilar de aço termicamente desprotegido.	78
Figura 3.4: Exemplo de deslocamentos em função da severidade e da duração do incêndio. .	80
Figura 3.5: Pilar de aço apoiado-engastado.....	84
Figura 3.6: Características geométricas do pórtico.	90
Figura 3.7: Seções das vigas e pilares do pórtico.	97
Figura 3.8: Pórtico tridimensional de aço com seis andares.....	102
Figura 4.1: $P_f \times$ Tempo de incêndio – viga.	107
Figura 4.2: $P_f \times$ Tempo de incêndio - pilar.....	109
Figura 5.1: P_f em função do tempo de incêndio no pilar.....	114
Figura 5.2: Curvas: a) ISO 834 e b) natural obtidas na análise adaptativa	115
Figura 5.3: Curvas deslocamento \times tempo obtidas no procedimento adaptativo.....	116

Figura 5.4: Convergência da probabilidade de falha para o pilar e comparação com a: a) referência obtida via MCS _{LHS} com 230 avaliações da função de estado limite; b) convergência para o valor final fornecido pela RNA adaptativa	117
Figura 5.5: P_f , obtida via RNAs adaptativas, em função do tempo de incêndio no pórtico ..	118
Figura 5.6: Curvas de: a) hidrocarbonetos e b) natural obtidas na análise adaptativa	119
Figura 5.7: Convergência da P_f para o pórtico e comparação com: a) o valor final fornecido pela RNA com 242 avaliações da função de estado limite; b) o valor final fornecido pela RNA com 149 avaliações da função de estado limite.....	120
Figura 5.8: P_f , obtida via RNAs adaptativas, em função do tempo de incêndio no pórtico bidimensional	121
Figura 5.9: Temperatura na viga do compartimento em incêndio considerando as curvas: a) natural e b) ISO 834	122
Figura 5.10: Convergência da P_f para o pórtico bidimensional e comparação com: a) o valor final fornecido pela RNA com 191 avaliações da função de estado limite; b) o valor final fornecido pela RNA com 296 avaliações da função de estado limite.	123
Figura 5.11: P_f , obtida via RNAs adaptativas, em função do tempo de incêndio no edifício: a) considerando ou não a laje e utilizando o modelo de incêndio natural; b) com a consideração da laje e comparando resultados para os diferentes modelos de incêndio.	124
Figura 5.12: Temperatura no perfil W12×26 considerando as curvas: a) natural e b) ISO 834	126
Figura 5.13: Convergência da P_f para o edifício e comparação com: a) o valor final fornecido pela RNA com 270 avaliações da função de estado limite; b) o valor final fornecido pela RNA com 279 avaliações da função de estado limite.....	127

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 – Expressões esquematizadas que representam o comportamento do diagrama tensão-deformação específica dos aços estruturais em situação de incêndio	46
Tabela 2 – Valores das relações $k_{c,\theta} = f_{c,\theta} / f_{ck}$ para concretos silicosos	51
Tabela 3 – Parâmetros aleatórios usados para o estudo da viga e pilar.....	82
Tabela 4 – Resumo dos parâmetros considerados nos problemas – viga e pilar.....	83
Tabela 5 – Variáveis aleatórias do pilar termicamente protegido	87
Tabela 6 – Resumo dos parâmetros considerados no problema – pilar protegido	88
Tabela 7 – Variáveis aleatórias e parâmetros do pórtico em incêndio	93
Tabela 8 – Resumo dos parâmetros considerados para o pórtico de um galpão	94
Tabela 9 – Variáveis aleatórias e parâmetros do edifício em situação de incêndio.	99
Tabela 10 – Resumo dos parâmetros considerados para o pórtico de vários pavimentos.....	100
Tabela 11 – Espessura do material de proteção térmica.....	103
Tabela 12 – Variáveis aleatórias e parâmetros do pórtico tridimensional.....	104
Tabela 13 – Resumo dos parâmetros considerados para o edifício com lajes de concreto	106
Tabela 14 – Resultados para a Viga.	108
Tabela 15 – Resultados para o Pilar	109
Tabela 16 – Resultados para o Pilar com $O = 0,052 \text{ m}^{1/2}$	110
Tabela 17 – Probabilidades de falha do Problema 1.	183
Tabela 18 – Probabilidades de falha do Problema 2.	183
Tabela 19 – Probabilidades de falha do Problema 3.	184
Tabela 20 – Probabilidades de falha do Problema 4.	184

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

ABNT – Associação Brasileira de Normas Técnicas

APDL – ANSYS *Parametric Design Language*

CEN – Comitê Europeu de Normalização (*European Committee for Standardization*)

CFD – Fluidodinâmica Computacional (*Computational Fluid Dynamics*)

FORM – Método de Confiabilidade de Primeira Ordem (*First Order Reliability Method*)

HLLRF – Hasofer, Lind, Rackwitz e Fiessler

iHLLRF – *improved* Hasofer, Lind, Rackwitz e Fiessler

JCSS – Comitê Conjunto de Segurança Estrutural (*Joint Committee on Structural Safety*)

LHS – Amostragem de hipercubo latino (*Latin Hyper-cube Sampling*)

MCS – Simulação de Monte Carlo (*Monte Carlo Simulation*)

MEF – Método dos Elementos Finitos

PDF – Função de Densidade de Probabilidade (*Probability Density Function*)

RNA – Rede Neural Artificial

SFRM – Material resistente ao fogo aplicado por spray (*Spray-applied Fire Resistant Material*)

TRRF – Tempo Requerido de Resistência ao Fogo

VA – Variável Aleatória

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	19
1.1	OBJETIVOS	23
1.1.1	Objetivo geral.....	23
1.1.2	Objetivos específicos	23
1.2	DELIMITAÇÃO DO TRABALHO	24
1.3	ORGANIZAÇÃO DO TRABALHO	25
2	FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA.....	27
2.1	ESTRUTURAS EM SITUAÇÃO DE INCÊNDIO.....	27
2.1.1	Modelagem do incêndio.....	28
2.1.1.1	<i>Modelo de incêndio natural compartimentado.....</i>	30
2.1.1.2	<i>Curvas padronizadas.....</i>	35
2.1.2	Análise termoestrutural	37
2.1.2.1	<i>Análise térmica.....</i>	37
2.1.2.2	<i>Análise estrutural.....</i>	42
2.2	CONFIABILIDADE ESTRUTURAL.....	54
2.2.1	<i>First order reliability method - FORM.....</i>	55
2.2.2	Simulação de Monte Carlo - MCS	60
2.3	REDES NEURAIS ARTIFICIAIS E MÉTODOS ADAPTATIVOS	63
2.3.1	Redes neurais artificiais - RNAs.....	63
2.3.2	Redes neurais artificiais adaptativas	67
3	Módulos computacionais desenvolvidos e descrição dos problemas de confiabilidade.....	73
3.1	MÓDULOS COMPUTACIONAIS DESENVOLVIDOS	75
3.2	EXEMPLOS DE VERIFICAÇÃO DOS MÓDULOS COMPUTACIONAIS: VIGA E PILAR DE AÇO	77
3.2.1	Geometria dos elementos estruturais.....	77
3.2.2	Definição de falha nos elementos.....	78

3.2.3	Elemento finito adotados para a viga e o pilar	79
3.2.4	Simulação do comportamento estrutural	79
3.2.5	Parâmetros estatísticos adotados nos problemas.....	81
3.2.6	Métodos de confiabilidade aplicados aos problemas.....	83
3.3	PROBLEMA 1: PILAR DE AÇO TERMICAMENTE PROTEGIDO.....	84
3.3.1	Geometria do pilar.....	84
3.3.2	Definição da falha e condições de contorno do problema.....	85
3.3.3	Variáveis aleatórias e resumo sobre os parâmetros considerados no problema	86
3.3.4	Tempo computacional gasto no problema original	88
3.4	PROBLEMA 2: PÓRTICO DE UM GALPÃO DE ARMAZENAMENTO	89
3.4.1	Geometria e condições de contorno do galpão.....	89
3.4.2	Definição do modelo de incêndio adequado para o problema.....	91
3.4.3	Definição do modo de falha da estrutura do galpão.....	91
3.4.4	Tipo de elemento finito e variáveis aleatórias consideradas no problema	92
3.5	PROBLEMA 3: SISTEMA ESTRUTURAL BIDIMENSIONAL COM 9 PAVIMENTOS	94
3.5.1	Descrição do problema	94
3.5.2	Geometria, condições de contorno e variáveis aleatórias do problema.....	95
3.6	PROBLEMA 4: SISTEMA ESTRUTURAL tridimensional COM SEIS ANDARES	100
3.6.1	Descrição do sistema estrutural.....	100
3.6.2	Condições de contorno e geometria do sistema estrutural.....	101
3.6.3	Espessura do material de proteção térmica e variáveis aleatórias.....	103
3.6.4	Condições de contorno e tipo de elemento finito adotado para a laje de concreto	105
4	VERIFICAÇÃO DOS MÓDULOS COMPUTACIONAIS	107

4.1	EXEMPLO DE VERIFICAÇÃO 1: VIGA DE AÇO EM SITUAÇÃO DE INCÊNDIO.....	107
4.2	EXEMPLO DE VERIFICAÇÃO 2: PILAR DE AÇO EM SITUAÇÃO DE INCÊNDIO.....	108
4.3	DISCUSSÕES	110
5	RESULTADOS NUMÉRICOS	113
5.1	PROBLEMA 1: PILAR DE AÇO TERMICAMENTE PROTEGIDO.....	113
5.1.1	Análise das P_{fs} em função do método de confiabilidade aplicado e do modelo de incêndio considerado	113
5.1.2	Análise dos deslocamentos no centro do pilar <i>versus</i> tempo de incêndio, obtidos no procedimento adaptativo	115
5.1.3	Análise da convergência da probabilidade de falha em função do número de avaliações da função de estado limite	116
5.1.4	Análise do custo de desempenho computacional requerido	117
5.2	PROBLEMA 2: PÓRTICO DE UM GALPÃO DE ARMAZENAMENTO	118
5.2.1	Análise das P_{fs} em função do modelo de incêndio.....	118
5.2.2	Análise das temperaturas atingidas pelas curvas de incêndio durante o processo adaptativo	119
5.2.3	Convergência da P_f em função do número de avaliações da função de estado limite	119
5.2.4	Custo de desempenho computacional requerido no processo adaptativo	120
5.3	PROBLEMA 3: PÓRTICO DE UMA EDIFICAÇÃO	121
5.3.1	Probabilidades de falha, em função do modelo de incêndio, do pórtico de 9 andares	121
5.3.2	Comparação entre as temperaturas obtidas pelos modelos de incêndio natural e padronizado no processo adaptativo.....	121
5.3.3	Convergência da P_f e o custo computacional requerido.....	122
5.4	PROBLEMA 4: SISTEMA ESTRUTURAL TRIDIMENSIONAL DE UMA EDIFICAÇÃO	124

5.4.1	Probabilidades de falha considerando ou não a laje de concreto e o modelo de incêndio	124
5.4.2	Análise comparativa das temperaturas atingidas pelas curvas de incêndio natural e ISO 834 durante o processo adaptativo	125
5.4.3	Convergência da P_f estimada pelas RNAs adaptativas e o custo de processamento requerido	127
6	CONCLUSÕES.....	129
6.1	SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS.....	131
	REFERÊNCIAS.....	133
	APÊNDICE A: PROGRAMAÇÃO DE MÓDULOS TERMOMECÂNICOS DESENVOLVIDOS EM LINGUAGEM APDL (<i>ANSYS PARAMETRIC DESIGN LANGUAGE</i>).....	143
	A.1. APDL DO PROBLEMA 1: PILAR DE AÇO TERMICAMENTE PROTEGIDO SUBMETIDO AO MODELO DE INCÊNDIO ISO 834	143
	A.2. APDL DO PROBLEMA 4: SISTEMA ESTRUTURAL TRIDIMENSIONAL DE UMA EDIFICAÇÃO SUBMETIDO AO MODELO DE INCÊNDIO NATURAL	159
	APÊNDICE B: TABELAS DE RESULTADOS	183

1 INTRODUÇÃO

A confiabilidade dos sistemas estruturais deve ser verificada para possíveis falhas causadas por efeitos de danos extremos, como aqueles ocasionados por situações de incêndio (BALOGH & VIGH, 2016). Metodologias que utilizam simulação de Monte Carlo (MCS – *Monte Carlo Simulation*) associada ao Método dos Elementos Finitos (MEF) são, geralmente, as mais recomendadas para a avaliação da confiabilidade estrutural em incêndio, devido à complexidade dessa avaliação e ao alto grau de não linearidade comum às funções de estado limite numéricas envolvidas (GUO *et al.*, 2012); (SHI *et al.*, 2013); (GUO & JEFFERS, 2014); (RICARDO, 2015); (BALOGH & VIGH, 2016); (GERNAY *et al.*, 2016); (CHAUDHARY & ROY, 2020); (CHAUDHARY *et al.*, 2021); (RICARDO & GOMES, 2021). No entanto, a necessidade de uma representação adequada da resposta estrutural considerando o MEF, combinada com o elevado número de simulações, que envolve a utilização de números aleatórios, exigidas pelo MCS, torna o chamado custo de processamento computacional, facilmente proibitivo (GOMES, 2018), mesmo para modelos estruturais simples (CHAUDHARY *et al.*, 2021). Assim, parte dos pesquisadores tem utilizado métodos de transformação para analisar a confiabilidade desse tipo de problema, o que pode levar a erros significativos na resposta final (BALOGH & VIGH, 2016).

O método de confiabilidade de primeira ordem (*First Order Reliability Method - FORM*) é o método de transformação mais comumente utilizado para analisar a confiabilidade de estruturas em situação de incêndio (GUO & JEFFERS, 2014); (RICARDO, 2015); (SOUTO, 2015); (BALOGH & VIGH, 2016); (RICARDO & GOMES, 2021), já que muitas das vezes tem custos computacionais aceitáveis. No entanto, como esse método envolve a aproximação da equação de estado limite por um hiperplano, bem como as transformações das variáveis aleatórias (VAs) envolvidas em VAs normais equivalentes, a resposta final pode não ser precisa o suficiente. Desta maneira, dependendo da complexidade do problema, é possível que o FORM subestime (BALOGH & VIGH, 2016) ou superestime (GUO & JEFFERS, 2014) as probabilidades de falha, com erros que podem comprometer uma análise adequada da confiabilidade da estrutura. A avaliação da aplicabilidade desse método a problemas envolvendo estruturas em condição de incêndio é um tópico que ainda precisa ser mais explorado.

Embora, na última década, as análises de confiabilidade tenham se tornado comuns na prática da engenharia estrutural, sua aplicação para sistemas estruturais em situação de incêndio é ainda hoje um assunto que não foi amplamente pesquisado (CHAUDHARY & ROY, 2020). Devido ao alto custo computacional, com a utilização direta do MCS associado ao MEF, e à falta de acurácia nos resultados obtidos pela aplicação do FORM, a maioria dos estudos relacionados a análise de confiabilidade de estruturas tem se limitado a investigar apenas a vulnerabilidade de elementos individuais expostos ao fogo, negligenciando, por exemplo, a interação de diferentes elementos em uma estrutura estaticamente indeterminada (TORATTI, *et al.*, 2007); (WEILERT *et al.*, 2008); (HOSSER *et al.*, 2008); (WANG *et al.*, 2010); (CHEUNG *et al.*, 2012); (EAMON & JENSEN, 2012); (GUO *et al.*, 2012); (SHI *et al.*, 2013); (EAMON & JENSEN, 2013); (GUO & JEFFERS, 2014); (VAN COILE *et al.*, 2014); (ZHANG *et al.*, 2014); (RICARDO, 2015); (SOUTO, 2015); (KHORASANI *et al.*, 2015); (WALLS *et al.*, 2017); (MOHAMMAD, 2018); (KERVALISHVILI & TALVIK, 2019); (QURESHI *et al.*, 2020); (NI *et al.*, 2020); (CHAUDHARY *et al.*, 2021).

Na tentativa de viabilizar o estudo de confiabilidade de estruturas submetidas a altas temperaturas, é comum que alguns trabalhos desconsiderem o uso do MEF e utilizem equações de estado limite analíticas ao invés de numéricas (TORATTI, *et al.*, 2007); (WEILERT *et al.*, 2008); (WANG *et al.*, 2010) (CHEUNG *et al.*, 2012); (EAMON & JENSEN, 2012); (VAN COILE *et al.*, 2014); (ZHANG *et al.*, 2014); (SOUTO, 2015); (MOHAMMAD, 2018); (KERVALISHVILI & TALVIK, 2019). No entanto, as equações de estado limite analíticas, geralmente, não conseguem representar, de maneira adequada, as fortes não linearidades do problema estrutural em incêndio. Também é comum simplificar o problema, assumindo alguns parâmetros como sendo determinísticos. Essa simplificação pode reduzir um pouco a não linearidade do problema, em contrapartida, a contribuição de algumas incertezas na composição da probabilidade de falha é desconsiderada. O desempenho de uma estrutura é influenciado pelas incertezas relacionadas às suas propriedades térmicas e mecânicas (KHORASANI *et al.*, 2015); (QURESHI *et al.*, 2020), às propriedades térmicas do material de proteção (KHORASANI *et al.*, 2015) (se houver), ao modelo de incêndio e ao carregamento (SHRIVASTAVA *et al.*, 2019). Houve tentativas significativas feitas até agora para cobrir uma ampla gama de incertezas (GUO & JEFFERS, 2014); (GERNAY *et al.*, 2016). No entanto, um estudo abrangente que considera as incertezas de todas as fontes juntas ainda está faltando (SHRIVASTAVA *et al.*, 2019).

O custo computacional também dificulta o estudo sobre como os diversos modelos de incêndio impactam na resposta estrutural do cálculo de confiabilidade, e por isso esse assunto ainda não foi abordado em nenhuma pesquisa (SHRIVASTAVA *et al.*, 2019). A modelagem do incêndio pode afetar significativamente a probabilidade de falha de uma estrutura. Por isso, garantir um nível de confiabilidade semelhante considerando o uso de diferentes curvas de incêndio é algo desafiador devido a diferenças, por exemplo, na velocidade de aquecimento e nas temperaturas máximas dos gases no compartimento (BALOGHA & VIGH, 2016). Portanto, a comparação e seleção cuidadosa de modelos de incêndio é necessária para replicar o comportamento mais provável das temperaturas no ambiente em chamas.

Mesmo publicações mais recentes, que analisaram a estrutura em nível de pórtico bidimensional, foram forçadas a simplificar os problemas, uma vez que o tempo computacional dificultou as abordagens probabilísticas. Algumas dessas simplificações cabem ser mencionadas, tal como a realização de uma baixa quantidade de simulações numéricas (GERNAY *et al.*, 2016); (CHAUDHARY & ROY, 2020), a utilização do FORM (BALOGHA & VIGH, 2016) ou a simplificação da equação de estado limite considerando que o pórtico atingiu baixas temperaturas, e por isso a curva tensão deformação ficou na faixa elástico-linear (MOLKENS & ROSSI, 2021). Diante do alto custo computacional para se realizar simulações de incêndio em estruturas, Balogha & Vigh (2016) relataram que ainda seria inviável a análise da confiabilidade de sistemas estruturais tridimensionais em elementos finitos.

Nesse contexto, observa-se que o desenvolvimento da análise de confiabilidade de estruturas submetidas a ações térmicas, típicas de incêndio, depende fortemente dos avanços computacionais e/ou do desenvolvimento de novas estratégias e novos métodos para solução eficiente dos problemas. A literatura tem apontado o uso de modelos substitutos (metamodelos) como uma das alternativas mais promissoras para manter o custo computacional de análises de confiabilidade complexas em níveis aceitáveis (GOMES, 2018); (GOMES, 2019), como é o caso de estruturas expostas ao fogo.

A aplicação dos metamodelos na análise da confiabilidade permite a substituição de um modelo computacional (numérico) mais complexo por um modelo aproximado mais simples. Entre os metamodelos disponíveis na literatura, destacam-se: os métodos de superfície de respostas polinomiais (Regressão polinomial) (FARAVELLI, 1989); (SOARES, *et al.*, 2002), krigagem (STEIN, 1999); (DUBOURG, *et al.*, 2013), expansões em polinômios de caos

(GHANEM & SPANOS, 1991); (BLATMAN & SUDRET, 2010) e Redes Neurais Artificiais (RNAs) (BUCHER & MOST, 2008); (GOMES & BECK, 2013).

O fato de as RNAs serem aplicadas em várias áreas associadas à Inteligência Artificial é um dos grandes atrativos das mesmas. Por conta disso, vários pesquisadores têm trabalhado no desenvolvimento das redes, o que leva a uma evolução mais rápida do que a de vários outros metamodelos. Assim, as RNAs têm sido um dos métodos mais comumente aplicados no campo da confiabilidade (CHAPMAN & CROSSLAND, 1995); (PAPADRAKAKIS *et al.*, 1996); (SHAO & MUROTSU, 1997); (SASAKI, 2001); (HURTADO & ALVAREZ, 2001); (HURTADO *et al.*, 2001); (PAPADRAKAKIS & LAGAROS, 2002); (HURTADO, 2004); (DENG *et al.*, 2005); (SCHUEREMANS & VAN GEMERT, 2005); (LEMAIRE, 2009); (LEE, 2010); (TAN *et al.*, 2011); (GOMES *et al.*, 2011); (PAPADOPOULOS, *et al.*, 2012); (CHOJACZYK *et al.*, 2015).

Recentemente, metamodelos de regressão polinomial foram aplicados para a construção de curvas de fragilidade (curva de distribuição de probabilidade usada para indicar a probabilidade de ocorrência de um determinado nível de dano) de pilares de concreto sujeitos a altas temperaturas (CHAUDHARY *et al.*, 2021) e diferentes metamodelos foram aplicados para identificar as características que governam a tendência de fragmentação induzida pelo fogo em pilares de concreto (NASER, 2021). Apesar de reduzir o custo computacional das análises, os resultados encontrados obtiveram erros entre 5% (CHAUDHARY *et al.*, 2021) a 28% (NASER, 2021). Erros de magnitude semelhante são observados também na aplicação de RNAs não adaptativas, apresentados em Ricardo e Gomes (2021). Entretanto, atualmente, há uma tendência de usar metamodelos adaptativos, que são refinados durante o processo de análise de confiabilidade, o que tende a aumentar a eficiência e a acurácia do metamodelo (SHAO & MUROTSU, 1997); (SCHUEREMANS & VAN GEMERT, 2005); (ECHARD *et al.*, 2011); (MARELLI & SUDRET, 2016); (GOMES, 2018); (GOMES, 2019).

O uso de RNAs adaptativas, por exemplo, tem levado a resultados muito precisos em diversos problemas de confiabilidade estrutural, exigindo um número muito pequeno de avaliações das funções de estado limite originais (GOMES, 2018). As aplicações desse tipo de abordagem para problemas estruturais envolvendo análise de confiabilidade de elementos ou sistemas estruturais em situações de incêndio ainda não apareceram na literatura.

Em condições normais de temperatura, uma análise isolada de um elemento crítico pode fornecer bons resultados. Porém, uma análise simplificada de elementos estruturais

isolados, para a situação de incêndio, pode gerar premissas inconsistentes. Pois, no caso de sistemas estruturais complexos, a confiabilidade da estrutura raramente é igual à confiabilidade de um de seus elementos (BALOGHA & VIGH, 2016); (CHAUDHARY & ROY, 2020). Assim, mais informações precisas poderiam ser obtidas com a modelagem de toda a estrutura, em elementos finitos por exemplo, considerando as incertezas do problema para diferentes modelos de curvas de incêndio e utilizando metamodelos adaptativos para viabilizar as análises probabilísticas. Isso leva, no presente trabalho, a uma abordagem empregando RNAs adaptativas para a análise de elementos e sistemas estruturais de aço em situação de incêndio.

1.1 OBJETIVOS

1.1.1 Objetivo geral

O objetivo geral deste trabalho é avaliar a confiabilidade de elementos e de sistemas estruturais de aço submetidos aos modelos de incêndios natural e padronizado, empregando as RNAs adaptativas para viabilizar essa análise.

1.1.2 Objetivos específicos

Os objetivos específicos são:

(1) – desenvolver, acoplar e verificar a acurácia e eficiência de algoritmos que permitam simulação rápida e eficaz utilizando a representação em RNAs adaptativas para a análise da confiabilidade estrutural em situação de incêndio;

(2) – considerar as incertezas no comportamento do material de proteção e no comportamento das propriedades térmicas e mecânicas da estrutura de aço em função da temperatura;

(3) – analisar a confiabilidade de um pilar de aço termicamente protegido;

(4) – analisar a confiabilidade de um pórtico de um galpão de armazenamento;

(5) – analisar a confiabilidade de um sistema estrutural bidimensional, com vários pavimentos;

- (6) – analisar a confiabilidade de um sistema estrutural tridimensional de uma edificação de aço, com e sem lajes de concreto;
- (7) – determinar probabilidades de falha, dos problemas, em função do tempo de incêndio;
- (8) – avaliar o custo de processamento computacional exigido nas análises dos problemas;
- (9) – analisar os impactos do modelo de incêndio na probabilidade de falha estrutural;
- (10) – avaliar a convergência da probabilidade de falha estimada pelas RNAs adaptativas em relação ao número de avaliações da função de estado limite.

1.2 DELIMITAÇÃO DO TRABALHO

Neste trabalho, a abordagem de RNAs adaptativas é aplicada na análise de confiabilidade de um sistema estrutural tridimensional de uma edificação de aço com 6 pavimentos e em situação de incêndio. A abordagem adaptativa também é aplicada a exemplos da literatura que abordam a confiabilidade de estruturas de aço, unidimensionais e bidimensionais, submetidas ao fogo.

A opção em considerar estruturas metálicas, ao invés de outro tipo de material, deve-se ao fato de a literatura apresentar uma quantidade expressiva de informações sobre as incertezas relacionadas com as propriedades térmicas e mecânicas desse tipo de estruturas e de alguns de seus materiais de proteção térmica. No entanto, frisa-se que o método adaptativo proposto pode ser aplicado na avaliação da confiabilidade de estruturas constituídas por outros tipos de materiais.

As análises feitas no presente trabalho não consideram a probabilidade da ocorrência de um incêndio, nem a probabilidade do sinistro ser extinto por algum dispositivo de proteção e combate ao fogo. As probabilidades de falha encontradas pressupõem que o incêndio já ocorreu e os meios de proteção foram insuficientes em sua finalidade. Ou seja, trata-se de probabilidades de falha condicionais a ocorrência do incêndio.

Em todos os problemas, as conexões não são representadas nos modelos, portanto, implicitamente, assumi-se que a falha no membro ocorre antes da falha de conexão, da mesma forma que em Gernay *et al.* (2016). Outro fato é que, apesar de elementos e sistemas estruturais apresentarem, geralmente, múltiplos modos de falha, é comum que a análise de confiabilidade

de sistemas estruturais em situação de incêndio seja realizada considerando uma única equação de estado limite, o que corresponde a um único modo de falha. Dessa forma, considera-se nesse trabalho que a falha localizada de um elemento estrutural corresponde a falha global da estrutura, do mesmo modo que foi feito em Balogha & Vigh (2016), Gernay *et al.* (2016), Chaudhary & Roy (2020) e Molkens & Rossi (2021). Em contrapartida, em todos os exemplos as incertezas no comportamento do material de proteção e no comportamento das propriedades térmicas e mecânicas da estrutura de aço são consideradas em função da temperatura, conforme sugerem Khorasani *et al.* (2015) e Qureshi *et al.* (2020). Além disso, o impacto dos modelos de incêndio natural e padronizados na resposta da confiabilidade estrutural é investigado.

Para o estudo dos problemas, um algoritmo é programado em linguagem MATLAB e é acoplado a um pacote computacional de elementos finitos (ANSYS). Para validar o programa desenvolvido e investigar a acurácia e eficiência da abordagem adaptativa proposta, o algoritmo é aplicado, inicialmente, na análise de dois elementos de aço sujeitos ao modelo de incêndio natural. O restante deste trabalho está organizado conforme segue na Seção 1.3.

1.3 ORGANIZAÇÃO DO TRABALHO

O Capítulo 2 fornece a fundamentação básica sobre o estudo das estruturas em incêndio, sobre a teoria da confiabilidade estrutural e a metamodelagem utilizando redes neurais artificiais adaptativas.

No Capítulo 3, são apresentadas as características e as incertezas referentes aos problemas analisados no presente trabalho. Nesse capítulo, apresenta-se também a caracterização dos módulos computacionais desenvolvidos, os quais permitem as análises dos problemas.

No Capítulo 4, a acurácia e eficiência da abordagem adaptativa proposta são avaliadas em relação aos métodos FORM, RNAs não adaptativas e MCS (que é usualmente tomado como referência).

No Capítulo 5, as RNAs adaptativas são aplicadas a problemas da literatura, incluindo um sistema estrutural de uma edificação de aço com lajes de concreto. Os resultados obtidos são discutidos e comparados em termos de eficiência e de acurácia em relação a alguns resultados encontrados na literatura.

Finalmente, as considerações finais a respeito da pesquisa, bem como as sugestões para trabalhos futuros, são apresentadas no Capítulo 6.

2 FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

No presente capítulo, é abordada a fundamentação teórica essencial para o entendimento do presente trabalho, o que envolve análise de estruturas em incêndio, teoria da confiabilidade estrutural e redes neurais artificiais adaptativas. Para um maior embasamento nos temas, sugere-se que o leitor consulte as referências citadas no capítulo, em especial os trabalhos de Silva (2004), Silva (2012), Buchanan (2017), Silva *et al.* (2017), Gomes (2018) e Beck (2019).

2.1 ESTRUTURAS EM SITUAÇÃO DE INCÊNDIO

O objetivo da segurança contra incêndios é a proteção eficaz de pessoas e de bens. Mais especificamente, das vidas dos ocupantes do edifício, das vidas dos bombeiros, da integridade do edifício em chamas e dos edifícios adjacentes. A segurança dos ocupantes depende de uma série de fatores na concepção e na construção de edifícios, como por exemplo, dos meios de proteção passivos ou ativos. Esses meios de proteção buscam, dentre outros objetivos, minimizar a propagação das chamas, garantir a resistência do edifício ao fogo, facilitar a desocupação e permitir a entrada da equipe de bombeiros para combater o fogo. Muitas das vezes, nos projetos de engenharia, o foco das medidas de proteção está no combate ao incêndio, na discipação da fumaça e/ou na fuga das pessoas do edifício em chamas. Porém, o acesso às vias de desocupação pelos ocupantes e pelos bombeiros só é possível se o edifício e as partes dele não entrarem em colapso (BUCHANAN, 2017).

Recentemente, a legislação de diversos estados brasileiros vem exigindo que as estruturas das edificações sejam dimensionadas para suportar uma possível situação de incêndio, (IN14, 2020); (IT8, 2021). Porém, muitas das edificações já construídas, no país, não foram previamente verificadas para suportar altas temperaturas (TAVARES, 2009). A falsa sensação de que a baixa probabilidade de ocorrência de um incêndio está associada à segurança da estabilidade do edifício, durante o incêndio, contribuiu erroneamente para a propagação desta cultura. A probabilidade de ocorrência de um incêndio grave em qualquer edifício é relativamente baixa (ELLINGWOOD, 2005); (SILVA, 2012), mas as possíveis consequências, de tal incêndio, podem ser enormes. Conforme ilustra a Figura 2.1, uma baixa probabilidade de ocorrência associada com um evento de consequências graves, pode resultar em situações de

risco moderado a alto (BECK, 2019). Dessa forma, uma análise com base no risco da edificação deve ser considerada.

Estudos para a aplicação de confiabilidade estrutural na avaliação quantitativa dos riscos em segurança contra incêndios ainda estão em fase inicial. A maioria dos projetos de engenharia de incêndio são determinísticos ou semi-probabilísticos (BUCHANAN, 2017). O presente trabalho busca analisar os riscos aos quais os usuários das edificações estarão submetidos durante o incêndio com base na análise da confiabilidade estrutural. Para isso, primeiramente, uma análise do desempenho das estruturas em situação de incêndio deve ser realizada.

Figura 2.1: Matriz de estimativa de risco

Gravidade do Evento	Grave		Alto Risco	
	Sério		Moderado	
	Menor	Baixo Risco		
		Baixa	Moderada	Alta
		Probabilidade de Ocorrência		

Fonte: Elaborado pelo autor com base em Beck (2019).

A análise de estruturas em situação de incêndio pode ser dividida em duas etapas fundamentais: a análise da temperatura dos gases no compartimento, definida como modelagem do incêndio, e a sua propagação e a influência no comportamento da estrutura, denominada análise termoestrutural. Essas etapas são abordadas nos tópicos seguintes.

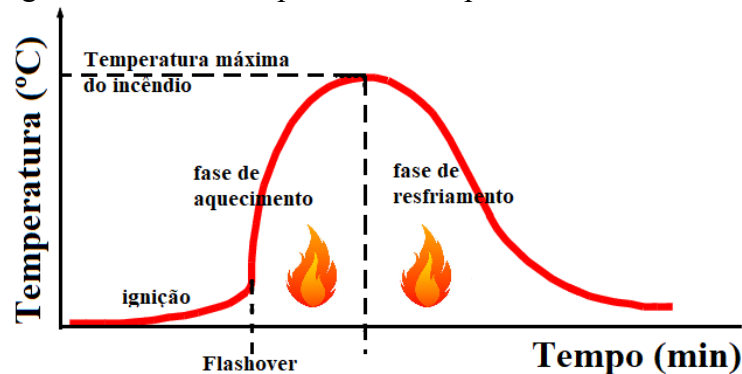
2.1.1 Modelagem do incêndio

A modelagem do incêndio visa obter a evolução das temperaturas dos gases no ambiente em função do tempo e/ou os fluxos de calor por radiação e por convecção que ocorrem em um compartimento em chamas. Essa modelagem pode ser realizada por meio de curvas que

forneçam a intensidade do incêndio em função da sua duração (HURLEY & ROSENBAUM, 2015). A intensidade de um incêndio pode ser medida em termos de temperatura.

A Figura 2.2 ilustra um exemplo de uma curva de incêndio típica de um modelo de incêndio real. Nela, é possível distinguir três estágios distintos: o primeiro estágio, estágio *pré-flashover*, possui baixas temperaturas. Nesse estágio, o incêndio é considerado de pequenas proporções sem risco ao usuário ou à estrutura. O segundo estágio é o estágio de aquecimento, que se dá a partir do ponto denominado *flashover*, ou incêndio generalizado, onde se tem uma ignição súbita generalizada. A temperatura dos gases se eleva rapidamente e o incêndio se torna totalmente desenvolvido. O *flashover* ocorre quando todos os elementos combustíveis dentro de um ambiente se inflamam (SILVA, 2012). Se não houver intervenção antes do *flashover*, o incêndio pode atingir seu tamanho máximo, que é uma função da quantidade de combustível no compartimento, da quantidade de ventilação disponível e dependente das propriedades do material de revestimento do ambiente (CEN, 2002). Por fim, o terceiro estágio é o do resfriamento, no qual o incêndio decai e, eventualmente, extingue-se. A redução gradativa da temperatura dos gases nesse estágio pode ocorrer devido ao esgotamento de combustível, à falta de ventilação ou pela supressão manual ou automática do incêndio.

Figura 2.2: Curva temperatura × tempo de um incêndio real



Fonte: adaptado de Vargas e Silva (2003).

A estimativa da curva real de incêndio é uma parte essencial do projeto estrutural para segurança contra incêndios. Assim, modelos aproximados foram propostos para simular o comportamento de incêndios em compartimentos. Os modelos de curva de incêndio foram desenvolvidos por meio de ensaios em grande e pequena escala, testes numéricos ou por abordagens analíticas (SILVA, 2012). Cada modelo tem suas vantagens e desvantagens.

Embora eles sejam usualmente empregados para determinar curvas de incêndio determinísticas, eles também podem ser usados para selecionar valores para análises de risco (probabilísticas) (HURLEY & ROSENBAUM, 2015).

Dentre as opções de modelos disponíveis para a modelagem do incêndio, Franssen *et al.* (2009), Caldas *et al.* (2010), e Rigobello (2011) destacam a modelagem em Fluidodinâmica Computacional (*Computational Fluid Dynamics - CFD*), modelagem por zonas e os modelos analíticos. Os modelos de zona e *CFD* requerem conhecimento especializado de modelagem e têm sido usados principalmente para prever a produção e a movimentação de fumaça e de gases tóxicos durante o incêndio (LI & WANG, 2013). Alternativamente, na análise térmica, é comum a aplicação dos modelos analíticos.

Os modelos analíticos são modelos aplicados na fase pós-*flashover* do incêndio e exigem, normalmente, poucas informações sobre os parâmetros de entrada (por exemplo, tempo, carga de incêndio, ventilação e/ou inércia térmica do compartimento) e a temperatura dos gases é adotada como sendo uniforme (porém variável ao longo do tempo) e é representada por uma curva tempo \times temperatura (RIGOBELLO, 2011). Dois modelos analíticos comumente utilizados na análise de confiabilidade em situação de incêndio, são as curvas de incêndio natural compartimentado (HOSSER *et al.*, 2008); (GUO *et al.*, 2012); (GUO & JEFFERS, 2014); (RICARDO, 2015); (GERNAY *et al.*, 2016); (NI *et al.*, 2020); (CHAUDHARY & ROY, 2020); (MOLKENS & ROSSI, 2021) e as curvas de incêndio padronizado (WANG *et al.*, 2010), (EAMON & JENSEN, 2012); (VAN COILE, 2014); (SOUTO, 2015) e (CHAUDHARY *et al.*, 2021), descritas a seguir.

2.1.1.1 Modelo de incêndio natural compartimentado

O modelo de incêndio natural compartimentado, também denominado como parametrizado, possui um ramo de temperaturas ascendentes e outro de temperaturas em redução. A curva parametrizada pode ser obtida com base em três fatores que influenciam a elevação de temperatura em incêndios compartimentados, como: a carga de incêndio, o grau de ventilação e a inércia térmica das vedações do compartimento (DENOEL, 2007). Além disso, a curva considera a transição entre incêndio controlado pela ventilação e pelo combustível (FRANSEN *et al.*, 2009).

O anexo A do Eurocode 1 (CEN, 2002) fornece uma equação para incêndios “paramétricos”, permitindo que uma curva tempo \times temperatura, mais realista do que os métodos padronizados, seja produzida. O modelo descrito naquele anexo é válido para compartimentos com até 500 m² de área útil, com altura máxima do compartimento de 4 m e sem aberturas no teto. Presume-se que a carga de incêndio é composta, principalmente, de materiais celulósicos e que a combustão é completa. As mesmas equações são apresentadas aqui de uma maneira sequenciada, conforme apresentam Fransen *et al.*, (2009) e Ricardo (2015). Os parâmetros de entrada são:

- $q_{fi,d}$ – valor de cálculo da carga de incêndio relacionada à área total do compartimento, respeitando os limites de $50 \leq q_{fi,d} \leq 1000$ [MJ/m²];
- b – inércia térmica das vedações do compartimento em J/m²s^{1/2}°C, calculado por $b = \sqrt{\rho \cdot c \cdot \lambda}$, sendo ρ a massa específica, em kg/m³, c o calor específico, em J/kg°C, e λ a condutividade térmica, em W/m°C, do material de vedação do ambiente, o intervalo $100 < \sqrt{\rho \cdot c \cdot \lambda} \leq 2200$ deve ser atendido;
- $O_{máx}$ – grau de ventilação, também expresso como fator de abertura, $O_{máx} = (A_v / A_t) \cdot \sqrt{h}$ [m^{1/2}], sendo h a altura média das aberturas no compartimento, A_v a área de ventilação e A_t a área total do compartimento avaliado. Deve-se respeitar os limites: $0,02 \leq O_{máx} \leq 0,20$;

Embora o grau de ventilação do compartimento tenha um valor fixo devido às características da construção, a quantidade de ventilação disponível durante o incêndio é incerta, e depende da porcentagem de janelas abertas durante o incêndio (SHRIVASTAVA *et al.*, 2019). Ao contrário da carga de combustível e da inércia térmica, há menos dados disponíveis sobre a área de ventilação, o que varia amplamente entre ocupações diferentes. O Código do *Joint Committee Structural Safety* (JCSS, 2001) sugere a Equação 2.1 para considerar a variação do grau de ventilação durante um incêndio. Esta equação usa o fator de abertura máximo do compartimento e sugere um valor de ventilação disponível (ou seja, após quebrar os vidros das janelas) durante o evento de incêndio, que é uma fração da ventilação total disponível

$$O_v = O_{máx} \cdot (1 - \xi), \quad (2.1)$$

onde, O_v é o fator de abertura disponível, ξ é um fator de redução, com uma distribuição lognormal, de média 0,2 e desvio padrão de 0,2 (ξ é limitado em 1 para manter o grau de abertura sempre positivo, ou seja, a distribuição de probabilidades é truncada em 1). $O_{máx}$ é o fator de abertura máximo do compartimento.

- t_{lim} – tempo-limite mínimo, determinado pela velocidade de desenvolvimento do incêndio: 25 min para lento (espaço público), 20 min para médio (residência, hospital, hotel, escritório, sala de aula) e 15 min para rápido (biblioteca, *shopping*, cinema, teatro);

Na primeira etapa, determina-se o tempo em que ocorre a temperatura máxima dos gases ($t_{máx}$) dentro de um compartimento, segundo a Equação 2.2:

$$t_{max} = 0,2 \cdot 10^{-3} \cdot \left(\frac{q_{fi,d}}{O_v} \right) \geq t_{lim} \quad (2.2)$$

Nos casos em que $t_{max} = t_{lim}$, o incêndio é considerado como controlado pelo combustível e quando $t_{max} > t_{lim}$, o incêndio é considerado controlado pela ventilação.

No segundo passo, determina-se o ramo ascendente da curva natural até o tempo t_{max} , conforme a Equação 2.3:

$$\theta_g = 20 + 1325 \cdot \left(1 - 0,324 \cdot e^{-0,2t^*} - 0,204 \cdot e^{-1,7t^*} - 0,472 \cdot e^{-19t^*} \right) \quad (2.3)$$

Na Equação 2.3, o θ_g é a temperatura dos gases dentro do compartimento, expressa em °C, e t^* é o tempo fictício em horas, calculado segundo a Equação 2.4 (para incêndio controlado pela ventilação) e calculado conforme a Equação 2.5 (para incêndio controlado pelo combustível)

$$t^* = t \cdot \Gamma, \quad (2.4)$$

$$t^* = t \cdot \Gamma_{lim}, \quad (2.5)$$

onde t é o tempo em horas e os parâmetros Γ e Γ_{lim} são determinados pelas equações 2.6 e 2.7:

$$\Gamma = \frac{(O_v/b)^2}{(0,04/1160)^2}, \quad (2.6)$$

$$\Gamma_{\text{lim}} = k \cdot \frac{(O_{\text{lim}}/b)^2}{(0,04/1160)^2}, \quad (2.7)$$

O_{lim} é o grau de ventilação-limite determinado por $O_{\text{lim}} = 0,1 \cdot 10^{-3} \cdot (q_{fi,d}/t_{\text{lim}})$ e k é um coeficiente que é tomado igual a 1, ou calculado conforme Equação 2.8 caso sejam atendidas todas as seguintes condições: $O_v > 0,04$; $q_{fi,d} < 75$; e $b < 1160$.

$$k = 1 + \left(\frac{O - 0,04}{0,04} \right) \cdot \left(\frac{q_{fi,d} - 75}{75} \right) \cdot \left(\frac{1160 - b}{1160} \right), \quad (2.8)$$

No terceiro passo, determina-se o ramo de resfriamento descendente da curva paramétrica, conforme as equações 2.9, 2.10 ou 2.11:

$$\theta_g = \theta_{g,\text{max}} - 625 \cdot (t \cdot \Gamma - \phi \cdot \chi), \quad \text{para } \phi \leq 0,5; \quad (2.9)$$

$$\theta_g = \theta_{g,\text{max}} - 250 \cdot (3 - t_d) \cdot (t \cdot \Gamma - \phi \cdot \chi), \quad \text{para } 0,5 < \phi \leq 2; \quad (2.10)$$

$$\theta_g = \theta_{g,\text{max}} - 250 \cdot (t \cdot \Gamma - \phi \cdot \chi), \quad \text{para } \phi > 2; \quad (2.11)$$

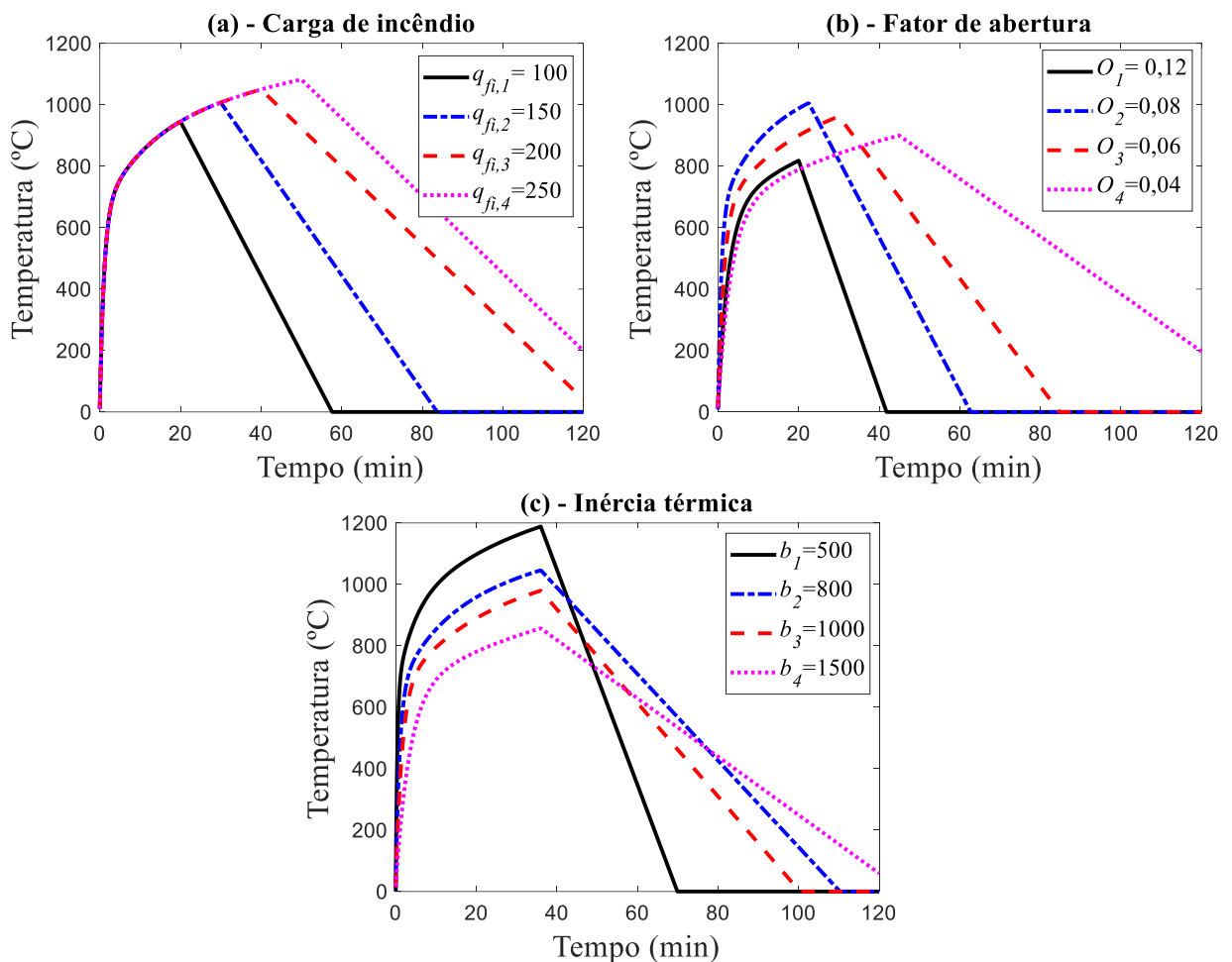
sendo o parâmetro $\chi = 1$, para o incêndio controlado pela ventilação, ou dado pela Equação 2.12, caso o incêndio seja controlado pelo combustível. O parâmetro ϕ é determinado pela Equação 2.13 e $\theta_{g,\text{max}}$ é a temperatura máxima dos gases obtida adotando o tempo $t_{\text{máx}}$.

$$\chi = \frac{t_{\text{lim}}}{0,2 \cdot 10^{-3} \cdot \left(\frac{q_{fi,d}}{O} \right)}, \quad (2.12)$$

$$\phi = 0,2 \cdot 10^{-3} \cdot \left(\frac{q_{fi,d}}{O} \right) \cdot \Gamma, \quad (2.13)$$

A Figura 2.3 apresenta curvas naturais compartimentadas, de um incêndio com desenvolvimento médio, em função da variação da carga de incêndio ($q_{fi,d}$), do fator de abertura (O_v) e da inércia térmica do ambiente (b). As curvas de incêndio, ilustradas pela Figura 2.3, explicitam que as equações paramétricas conseguem representar as possíveis variações na temperatura dos gases quando se modificam $q_{fi,d}$, O_v , e /ou b .

Figura 2.3: Curvas paramétricas em função dos seus parâmetros



Fonte: Elaborado pelo autor.

Nota-se na Figura 2.3 (a) que a temperatura máxima aumenta com o aumento da carga de incêndio. Observa-se também que a duração do sinistro é proporcional ao aumento da carga de incêndio, tendo em vista que há mais material para ser consumido. A Figura 2.3 (b) ilustra que a temperatura máxima dos gases aumenta com a ventilação. Por outro lado, a duração do incêndio é reduzida. O tempo de incêndio é inversamente proporcional ao aumento do fator de

abertura. Isso ocorre pois o aumento do grau de ventilação permite uma maior entrada de oxigênio no ambiente, conseqüentemente, há um desenvolvimento mais rápido e severo do incêndio. Se o grau de ventilação for relativamente alto, o incêndio passa a ser controlado pelo combustível, e desse modo, as temperaturas podem diminuir devido a presença de mais ar frio no compartimento. A Figura 2.3 (c) mostra que a temperatura máxima dos gases em um ambiente em chamas é menor em um compartimento com maior inércia térmica. Compartimentos com alta inércia térmica permitem com maior facilidade a troca de calor do ambiente com o meio externo, por isso, há uma redução nas temperaturas e, conseqüentemente, um aumento na duração do incêndio quando a inércia aumenta.

2.1.1.2 *Curvas padronizadas*

Por simplicidade, as normas técnicas de projetos estruturais permitem a utilização de curvas de aquecimento obtidas em ensaios laboratoriais em fornos a altas temperaturas com uma elevação padronizada de temperatura. Esse modelo é comumente chamado de modelo de incêndio padrão. A ABNT NBR 14432 (2000) e o Eurocode 1 (CEN, 2002) apresentam a curva padrão fundamentada na curva ISO 834 (1990) como sendo a elevação padronizada de temperatura dos gases do ambiente em função do tempo, dada pela Equação 2.14:

$$\theta_g = \theta_{amb} + 345 \cdot \log_{10}(8t + 1), \quad (2.14)$$

onde t é o tempo expresso em min; θ_{amb} é a temperatura do ambiente antes do início do aquecimento, em °C, geralmente tomada igual a 20 °C; e θ_g é a temperatura dos gases em °C no instante t .

Em contraste com o modelo de incêndio natural compartimentado, a curva padronizada possui, como característica principal, o fato de representar apenas o ramo ascendente de temperatura, admitindo assim que a temperatura dos gases seja sempre crescente com o tempo e independente das características do ambiente e da carga de incêndio. Como a curva padrão não representa um incêndio real e, conseqüentemente, não permite calcular a máxima temperatura atingida pelas peças estruturais, é comum associar a curva padrão a Tempos Requeridos de Resistência ao Fogo (TRRF) com a finalidade de fornecer parâmetros de projeto. O TRRF é um tempo fictício mínimo de resistência ao fogo de um elemento estrutural que se

supõe submetido ao modelo de incêndio padrão. Assim, quaisquer conclusões que tenham por base essa curva, devem ser analisadas com cuidado (WANG, 2002).

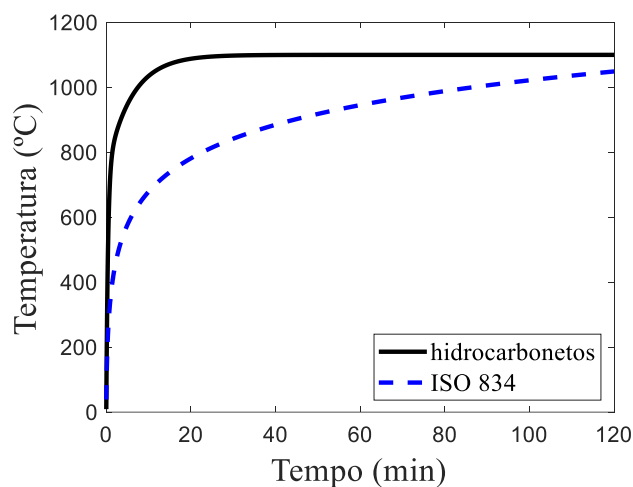
A curva-padrão é empregada em incêndios à base de materiais celulósicos, onde a carga de incêndio é, em termos de potencial calorífico, similar à madeira. Há casos em que o material combustível armazenado no compartimento provoca um incêndio de maior intensidade do que o incêndio-padrão, devido à presença de hidrocarbonetos (derivados do petróleo). Nesse caso, utiliza-se uma curva de incêndio chamada de curva de hidrocarbonetos. O Eurocode 1 (CEN, 2002) recomenda para esses casos a Equação 2.15

$$\theta_g = \theta_{amb} + 1080 \cdot \left(1 - 0,33e^{-0,17t} - 0,68e^{-2,50t}\right), \quad (2.15)$$

onde t é o tempo (min), θ_{amb} é a temperatura do ambiente ($^{\circ}\text{C}$) e θ_g é a temperatura dos gases ($^{\circ}\text{C}$).

A Figura 2.4 ilustra as curvas padronizadas ISO 834 e de hidrocarbonetos. Ambas apresentam temperaturas relativamente severas para tempos de incêndio relativamente baixos, porém, observa-se que a curva de hidrocarbonetos atinge temperaturas acima de 1000°C , facilmente, nos instantes iniciais do incêndio.

Figura 2.4: Curvas ISO 834 e hidrocarbonetos



Fonte: Elaborado pelo autor.

As curvas de incêndio padronizadas ISO 834 e de hidrocarbonetos são claramente modelos que não representam de uma forma realista o fenômeno do incêndio. Porém, por

simplificação e a favor da segurança, são largamente indicadas nas normas de projetos estruturais. Ambas as curvas são, aqui, avaliadas em comparação com o modelo de incêndio natural compartimentado nas análises de confiabilidade.

2.1.2 Análise termoestrutural

As propriedades de uma estrutura sofrem mudanças e degradação mecânica com o aumento da temperatura. Em condições de incêndio, as estruturas são submetidas a elevadas temperaturas e, conseqüentemente, os elementos estruturais perdem sua capacidade resistente (PIERIN *et al.*, 2015). Sendo assim, é necessário avaliar as temperaturas nos elementos estruturais e seus efeitos nas propriedades dos mesmos.

A análise termoestrutural busca, a partir da relação temperatura-tempo dos gases, avaliar a elevação da temperatura nos elementos estruturais e considerar as alterações em suas propriedades termomecânicas e as implicações no comportamento estrutural (RIGOBELLO, 2011). A análise da resposta termomecânica em um componente estrutural pode ser subdividida em duas partes: análise térmica e análise estrutural.

2.1.2.1 Análise térmica

A análise térmica deve ser baseada em hipóteses da transferência de calor e pode ser subdividida em duas partes. Uma delas é a transferência de calor do compartimento em chamas para a superfície do elemento estrutural, que ocorre por meio da combinação de convecção e de radiação (geralmente trata-se, como uma condição de contorno, o ambiente com temperatura uniformemente distribuída). O outro é a transferência de calor dentro do elemento estrutural, que ocorre por meio da condução (SILVA, 2004).

A análise de transferência de calor pode ser realizada por técnicas numéricas avançadas, como análise em elementos finitos, ou usando modelos de cálculo mais simples que estão disponíveis na literatura e têm se mostrado eficientes para calcular a evolução da temperatura nas estruturas de aço termicamente protegidas. Aqui, o modelo de cálculo recomendado pelo Eurocode 3 (CEN, 2005) e pela ABNT NBR 14323 (2013) é adotado, considerando sua ampla aceitação e aplicação na análise de confiabilidade de estruturas em incêndio (GERNAY *et al.*, 2016); (BALOGHA & VIGH, 2016); (MOLKENS & ROSSI, 2021).

A Equação 2.16 apresenta a fórmula recomendada pelo Eurocode 3 (CEN, 2005) e ABNT NBR 14323 (2013) para o cálculo da temperatura do aço termicamente protegido (θ_a). A Equação 2.16 foi construída considerando o equilíbrio térmico envolvendo o calor emitido pelos gases quentes, a absorção de calor pelo material de revestimento e a absorção de calor pelo elemento estrutural (SILVA, 2004). A Equação 2.16 considera que a temperatura é uniformemente distribuída na seção transversal da estrutura de aço em cada etapa de tempo

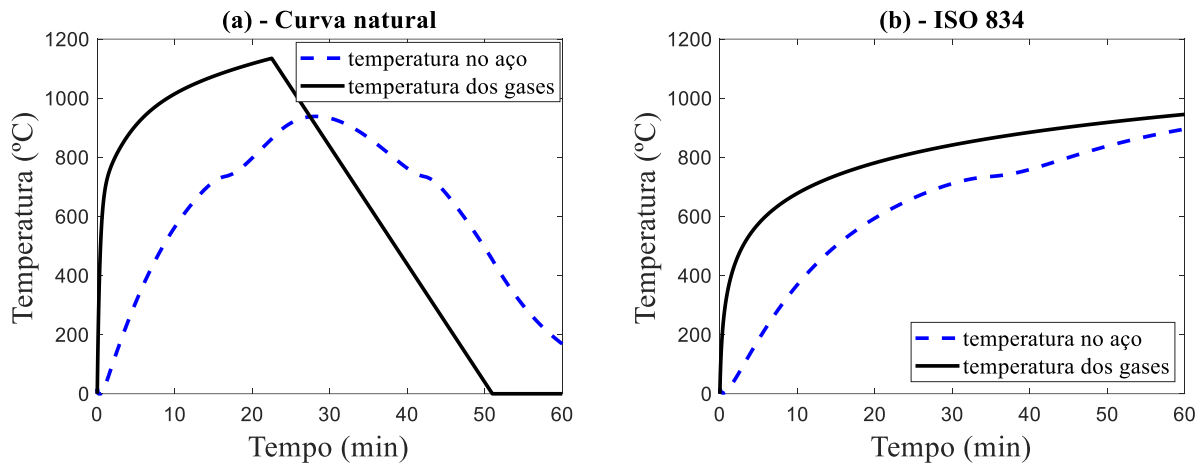
$$\theta_a(t + \Delta t) - \theta_a(t) = \frac{\left(F \cdot [\theta_g(t) - \theta_a(t)] \cdot \Delta t \right)}{\left(\frac{t_m}{\lambda_m} \right) \cdot \rho_a \cdot c_a \cdot \left(1 + \frac{\Phi}{3} \right)} - [\theta_g(t + \Delta t) - \theta_g(t)] \cdot \left(e^{\varphi/10} - 1 \right), \quad (2.16)$$

onde F é o fator de massividade do elemento protegido, em m^{-1} . O fator de massividade pode ser expresso pela relação entre o perímetro, exposto ao fogo, e a área da seção transversal do elemento. Ainda na Equação 2.16, c_a é o calor específico do aço, ($J/(kg^\circ C)$), ρ_a é a massa específica do aço, em kg/m^3 , Δt é o intervalo de tempo, em min, onde a norma recomenda tomar-se $\Delta t \leq 5$ segundos. Ainda nessa Equação, $\varphi = [(\rho_m \cdot c_m) / (\rho_a \cdot c_a)] t_m \cdot F$, sendo t_m a espessura do material de proteção (m), λ_m é a condutividade térmica do material de proteção térmica ($W/m^\circ C$), c_m é o calor específico do material de proteção, ($J/(kg^\circ C)$), e ρ_m é a massa específica do material de proteção, em kg/m^3 . A temperatura dos gases, no instante t , ($\theta_g(t)$) é determinada conforme o modelo de incêndio adotado.

A Figura 2.5 ilustra as temperaturas atingidas pelos gases no ambiente em chamas e as transferidas para a estrutura de aço, em função do tempo e das características térmicas do material de proteção. Essa Figura apresenta as temperaturas considerando os modelos de incêndio natural (Figura 2.5 (a)) e ISO 834 (Figura 2.5 (b)). Nota-se que o modelo de incêndio natural permite a determinação de uma temperatura máxima, enquanto que o modelo padronizado não permite essa determinação. Por isso, é necessária a consideração do tempo fictício de resistência ao fogo (TRRF) para se encontrar na curva padronizada uma temperatura máxima. Além disso, observa-se que o modelo de incêndio natural, no exemplo representado pela Figura 2.5, permite que os gases e a estrutura atinjam maiores temperaturas (até 30 min de incêndio) do que quando a curva padronizada é considerada (para um TRRF de 60 min). Porém, cabe mencionar que a depender dos parâmetros de entrada que controlam o comportamento do modelo natural de incêndio e do TRRF adotado, a estrutura submetida ao modelo natural de

incêndio também poderá atingir temperaturas máximas menores do que quando a estrutura for submetida a curva ISO 834 (BALOGH & VIGH, 2016).

Figura 2.5: Curvas paramétricas em função dos seus parâmetros



Fonte: Elaborado pelo autor.

O aço é um material incombustível, porém sua resistência e rigidez se degradam rapidamente em altas temperaturas quando nenhuma proteção contra incêndio é aplicada. Estruturas de aço desprotegidas tendem a ter um desempenho insatisfatório em incêndios em comparação com concreto armado ou estruturas de madeira, porque os membros de aço são geralmente muito mais delgados e o aço tem uma condutividade térmica mais alta do que a maioria dos outros materiais. Logo, os materiais de proteção térmica são fundamentais para evitar o colapso das estruturas de aço para tempos de incêndio relativamente baixos (BUCHANAN, 2017).

Existe uma série de materiais de proteção que podem ser utilizados. Por exemplo, tintas intumescentes, mantas de fibra cerâmica ou lã de rocha, placas de gesso acartonado, argamassas de vermiculita ou argamassas projetadas (SILVA, 2004). Dentre esses materiais, as argamassas cimentícias resistentes ao fogo e aplicadas por jateamento (*Spray-applied Fire Resistant Material* - SFRM) são as mais comumente utilizadas nos projetos por serem, geralmente, mais econômicas (SILVA, 2004). Talvez por isso, é comum se considerar esse tipo de material em análises de confiabilidade de estruturas termicamente protegidas em situação de incêndio (CARINO *et al.* 2005); (GARLOCK & QUIEL, 2007); (GUO & JEFFERS, 2014); (KHORASANI *et al.*, 2015); (GERNAY *et al.*, 2016).

As propriedades do SFRM variam de tipo para tipo, sendo recomendado que a variação dos seus parâmetros seja considerada como VAs em função da temperatura (KHORASANI *et al.*, 2015). Desse modo, Khorasani *et al.* (2015) elaboraram modelos matemáticos probabilísticos para tentar descrever as incertezas relacionadas às propriedades térmicas do material isolante SFRM. As três principais propriedades térmicas consideradas, e que influenciam, significativamente, a transferência de calor, são: a densidade, a condutividade térmica e o calor específico. Os modelos probabilísticos propostos por Khorasani *et al.* (2015) foram modelados a partir de uma análise estatística de dados disponíveis na literatura. As equações determinadas pelos autores e que modelam a condutividade térmica, o calor específico e a densidade, em função da temperatura (°C), são fornecidas nas equações 2.17, 2.18 e 2.19, respectivamente

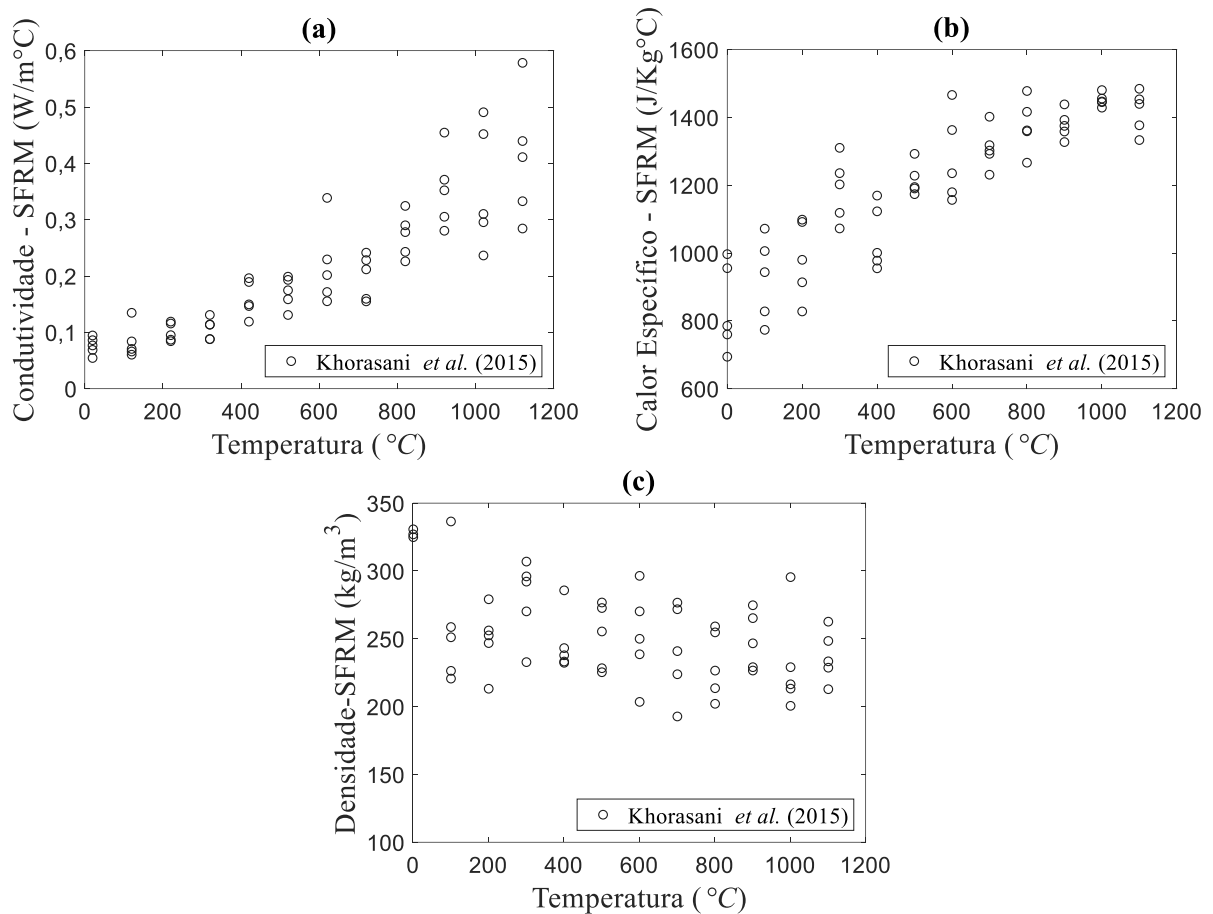
$$k_i = \exp\left(-2,72 + 1,89 \times 10^{-3}T - 0,195 \times 10^{-6}T^2 + 2,09 \times \varepsilon\right), \quad (2.17)$$

$$c_i = 1700 - \exp\left(6,81 - 1,61 \times 10^{-3}T + 0,44 \times 10^{-6}T^2 + 2,13 \times \varepsilon\right), \quad (2.18)$$

$$\rho_i = \exp\left(-2,028 + 7,83 \times T^{-0,0065} + 0,122 \times \varepsilon\right), \quad (2.19)$$

onde T é a temperatura (°C) e ε é uma variável aleatória com distribuição normal padrão. A Figura 2.6 ilustra, graficamente, os modelos probabilísticos apresentados nas equações.

Figura 2.6: Modelos probabilísticos para propriedades térmicas de material isolante SFRM: (a) condutividade térmica; (b) calor específico; (c) densidade.



Fonte: Elaborado pelo autor.

Nas Figura 2.6 (a) e (b), observa-se que a condutividade térmica e o calor específico do SFRM aumentam com o aumento da temperatura. A Figura 2.6 (c) ilustra que a densidade dos materiais isolantes diminui com o aumento da temperatura. Isso é esperado, pois com o aumento da temperatura, o volume do material aumenta enquanto a umidade do material evapora e, conseqüentemente, a densidade diminui (KHORASANI *et al.*, 2015). A literatura indica que, a partir de 600 °C, a densidade do material tende a aumentar (KHORASANI *et al.*, 2015). Devido à natureza incerta dos dados acima de 600 °C, Khorasani *et al.* (2015) preferiram não incluir os pontos de dados com temperaturas superiores a 600 °C. No entanto, dado que o modelo proposto para a densidade indica diminuição da mesma com o aumento da temperatura, se o modelo probabilístico for usado para temperaturas superiores a 600 °C, as previsões devem ser conservadoras em comparação com os dados disponíveis (KHORASANI *et al.*, 2015). No

presente estudo, as propriedades térmicas do material de isolamento são consideradas como variáveis aleatórias, conforme as equações apresentadas por Khorasani *et al.* (2015).

2.1.2.2 Análise estrutural

A resistência da estrutura dependente da temperatura é um dos parâmetros mais impactantes nas simulações estruturais para projeto de estruturas resistentes ao fogo. Segundo Buchanan (2017), o passo fundamental na análise do projeto é verificar se a resistência (R_f) da estrutura, considerando a degradação das propriedades mecânicas, é maior que a solicitação (S_f) atuante durante o incêndio. Esta verificação exige que a Equação 2.20 seja satisfeita.

$$R_f > S_f \quad (2.20)$$

Na Equação 2.20 a resistência ao incêndio da estrutura pode ser interpretada como a capacidade de resistir ao colapso e de prevenir a propagação do incêndio. Por outro lado, a solicitação durante o incêndio pode ser interpretada como um efeito destrutivo do sinistro, que pode ser mensurada por tempo, temperatura ou forças que poderiam causar a falha da estrutura.

A resistência das estruturas é altamente afetada pela elevação da temperatura. Uma maneira comum de descrever a perda de resistência sob o calor é definir um fator de redução de resistência (k), que é dado pela razão entre a resistência do material a uma temperatura específica e um valor predefinido medido à temperatura ambiente determinísticos (CEN, 2005); (ABNT NBR 14323, 2013).

Geralmente, os códigos normativos apresentam os fatores de redução do módulo de elasticidade ($k_{E,\theta} = E_{a,\theta}/E$), do limite de escoamento ($k_{y,\theta} = f_{yk,\theta}/f_{yk}$) e do limite de proporcionalidade do aço ($k_{p,\theta} = f_{p,\theta}/f_p$) como sendo determinísticos (CEN, 2005); (ABNT NBR 14323, 2013). Sendo que $f_{yk,\theta}$ e $f_{p,\theta}$ são os limites de escoamento e de proporcionalidade dos aços estruturais a uma temperatura θ , respectivamente; f_{yk} é o valor característico da resistência ao escoamento do aço a 20°C; f_p é a resistência limite em que a tensão é proporcional a deformação do aço; $E_{a,\theta}$ é o módulo de elasticidade dos aços estruturais a uma temperatura θ ; e E é o módulo de elasticidade a 20°C.

Contudo, é comum que existam incertezas relacionadas com as propriedades de resistência do material, devido, por exemplo, a diferenças na composição do material, tamanho

dos grãos cristalinos e se o aço foi laminado, temperado, etc (QURESHI *et al.*, 2020). A avaliação do risco estrutural contra incêndio requer modelos robustos de materiais que levem em consideração a incerteza no comportamento do material para uma faixa de temperaturas elevadas (QURESHI *et al.*, 2020). Nesse sentido, tanto Khorasani *et al.* (2015) quanto Qureshi *et al.* (2020) desenvolveram modelos probabilísticos que permitem quantificar as incertezas nas resistências do aço quando exposto ao fogo. Para isso, os autores coletaram centenas de dados experimentais na literatura para uma faixa de temperatura de 20 a 1000 °C. Em seguida, identificaram os modelos probabilísticos que melhor modelavam os dados estudados para a resistência do aço. Esses modelos foram aplicados na análise de pilares em situação de incêndio e levaram a resultados próximos aos encontrados na realidade. Os referidos modelos são funções contínuas de distribuição de probabilidade, com representações matemáticas simples e de simples implementação em códigos computacionais.

Como Qureshi *et al.* (2020) e Khorasani *et al.* (2015) obtiveram equações diferentes, porém, que levam a resultados semelhantes, aqui optou-se por utilizar os modelos do trabalho de Qureshi *et al.* (2020), exclusivamente, por ser um trabalho mais recente, e utilizar mais dados na modelagem do que os outros autores. No entanto, Qureshi *et al.* (2020) apresentam apenas modelos para os fatores de redução do limite de escoamento ($k_{y,\theta}$) e do limite de proporcionalidade ($k_{p,\theta}$). Logo, o modelo proposto por Khorasani *et al.* (2015) foi utilizado para considerar as incertezas dos fatores de redução do módulo de elasticidade ($k_{E,\theta}$) em função da temperatura. As equações indicadas pelos autores para os aços estruturais são fornecidas nas equações 2.21 a 2.23. As incertezas nos fatores de redução do concreto também foram estudadas por Qureshi *et al.* (2020), porém por não ser escopo desse trabalho, não são aqui apresentadas.

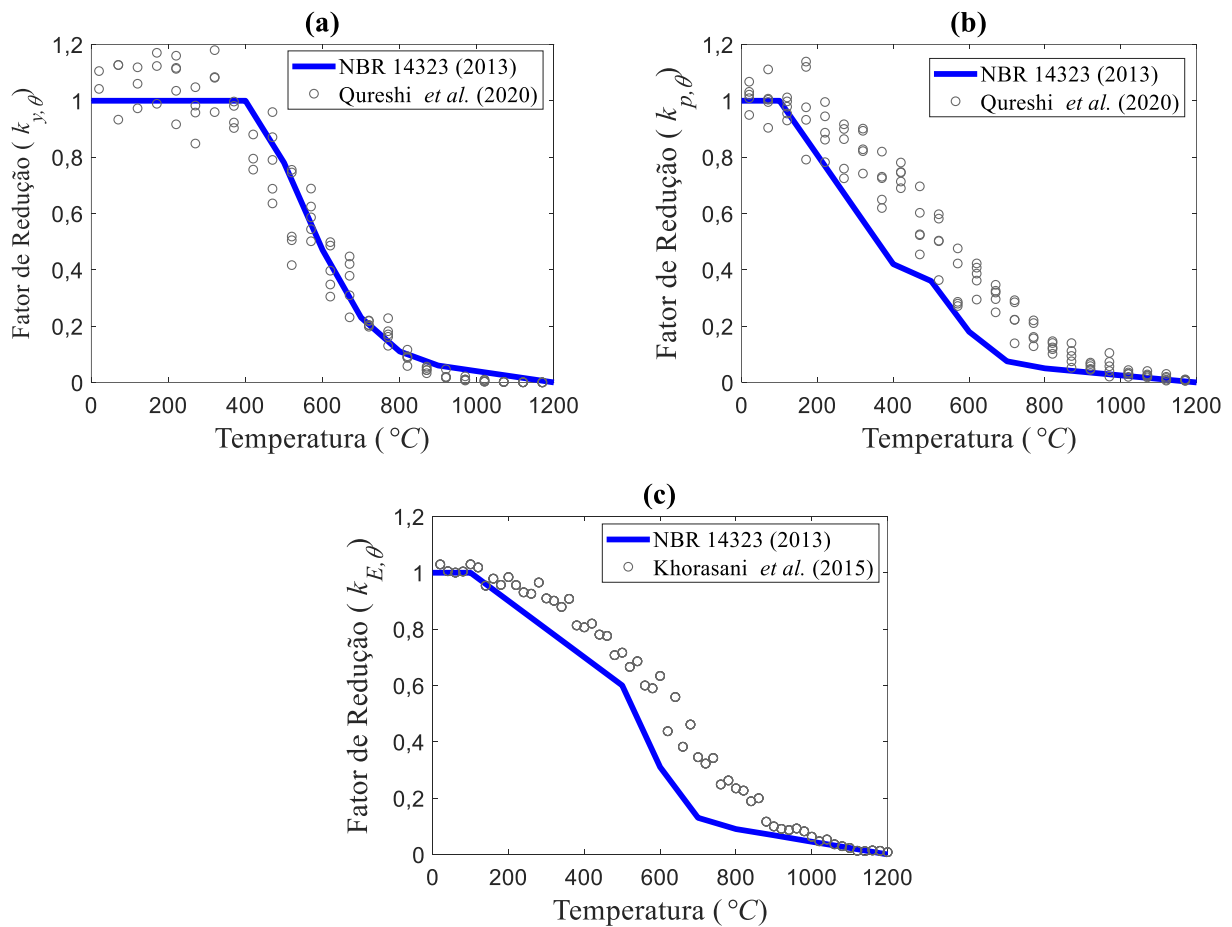
$$\begin{aligned} \mu(T)^{k_{y,\theta}} &= -6,89 \times 10^{-9} T^3 + 1,84 \times 10^{-6} T^2 - 8,39 \times 10^{-5} T + 1,48 \times 10^{-1} \\ \sigma(T)^{k_{y,\theta}} &= 2,41 \times 10^{-7} T^2 + 1,07 \times 10^{-4} T + 9,77 \times 10^{-2} \end{aligned}, \quad (2.21)$$

$$\begin{aligned} \mu(T)^{k_{p,\theta}} &= -1,45 \times 10^{-9} T^3 - 1,78 \times 10^{-6} T^2 - 2,50 \times 10^{-5} T + 1,19 \times 10^{-2} \\ \sigma(T)^{k_{p,\theta}} &= 1,895 \times 10^{-7} T^2 + 1,15 \times 10^{-4} T + 5,62 \times 10^{-2} \end{aligned}, \quad (2.22)$$

$$k_{E,\theta} = 1,1 \times \left(\frac{\exp\left(2,54 - 2,69 \times 10^{-3} T - 2,83 \times 10^{-6} T^2 + 0,36 \times \varepsilon\right)}{\exp\left(2,54 - 2,69 \times 10^{-3} T - 2,83 \times 10^{-6} T^2 + 0,36 \times \varepsilon\right) + 1} \right), \quad (2.23)$$

onde μ e σ são, respectivamente, a média e o desvio padrão de $k_{y,\theta}$ na Equação 2.21 e de $k_{p,\theta}$ na Equação 2.22, ambos os fatores dependentes da temperatura (T em $^{\circ}\text{C}$) e com distribuições de probabilidade lognormais. Na Equação 2.23, ε é uma variável aleatória com distribuição normal padrão. A Figura 2.7 ilustra, graficamente, as incertezas nos fatores de redução descritos nas equações.

Figura 2.7: Fatores de redução das propriedades mecânicas em função da temperatura, para (a) $k_{y,\theta}$; (b) $k_{p,\theta}$; (c) $k_{E,\theta}$.



Fonte: Elaborado pelo autor.

Na Figura 2.7, os resultados obtidos com os modelos propostos por Qureshi *et al.* (2020) e Khorasani *et al.* (2015) são comparados com a curva determinística recomendada pela ABNT NBR 14323 (2013). Observa-se a acentuada variação (em função da temperatura) dos fatores que influenciam o limite de escoamento, de proporcionalidade e do módulo de elasticidade dos aços estruturais.

A partir dos fatores de redução do módulo de elasticidade, do limite de escoamento e do limite de proporcionalidade, pode-se obter o diagrama tensão \times deformação dos aços estruturais para temperaturas elevadas, considerando o regime elastoplástico, segundo o Eurocode 3 (CEN, 2005) e tendo por base ensaios realizados pelas siderúrgicas *British Steel* (Reino Unido) e ARBED (Luxemburgo) (SILVA, 2004). A Tabela 1 apresenta o conjunto de expressões que representam o comportamento do diagrama tensão (σ) \times deformação (ϵ) do aço a temperaturas elevadas.

Tabela 1 – Expressões esquematizadas que representam o comportamento do diagrama tensão-deformação específica dos aços estruturais em situação de incêndio

Fase	Expressão
Fase Elástica	$\sigma = \varepsilon \cdot E_{a,\theta}$, se $\varepsilon \leq \varepsilon_{p,\theta}$
Fase Inelástica	$\sigma = f_{p,\theta} - c + \frac{b}{a} \sqrt{a^2 - (\varepsilon_{y,\theta} - \varepsilon)^2}$, se $\varepsilon_{p,\theta} \leq \varepsilon \leq \varepsilon_{y,\theta}$
Escoamento	$\sigma = f_{yk,\theta}$, se $\varepsilon_{y,\theta} \leq \varepsilon \leq \varepsilon_{t,\theta}$
Trecho decrescente	$\sigma = f_{yk,\theta} \left[1 - \left(\frac{\varepsilon_{s,\theta} - \varepsilon_{t,\theta}}{\varepsilon_{u,\theta} - \varepsilon_{t,\theta}} \right) \right]$, se $\varepsilon_{t,\theta} \leq \varepsilon \leq \varepsilon_{u,\theta}$
Ruptura	$\sigma = 0$, se $\varepsilon = \varepsilon_{u,\theta}$

Parâmetros

$$a^2 = (\varepsilon_{y,\theta} - \varepsilon_{p,\theta}) \cdot \left(\varepsilon_{y,\theta} - \varepsilon_{p,\theta} + \frac{c}{E_{a,\theta}} \right)$$

$$b^2 = c \cdot (\varepsilon_{y,\theta} - \varepsilon_{p,\theta}) \cdot E_{a,\theta} + c^2$$

$$c = \frac{(f_{yk,\theta} - f_{p,\theta})^2}{(\varepsilon_{y,\theta} - \varepsilon_{p,\theta}) \cdot E_{a,\theta} - 2 \cdot (f_{yk,\theta} - f_{p,\theta})}$$

$$\varepsilon_{p,\theta} = \frac{f_{p,\theta}}{E_{a,\theta}}$$

$$\varepsilon_{y,\theta} = 0,02$$

$$\varepsilon_{t,\theta} = 0,15$$

$$\varepsilon_{u,\theta} = 0,20$$

Onde:

$f_{yk,\theta}$ = limite de escoamento do aço a uma temperatura θ ;

$f_{p,\theta}$ = limite de proporcionalidade do aço a uma temperatura θ ;

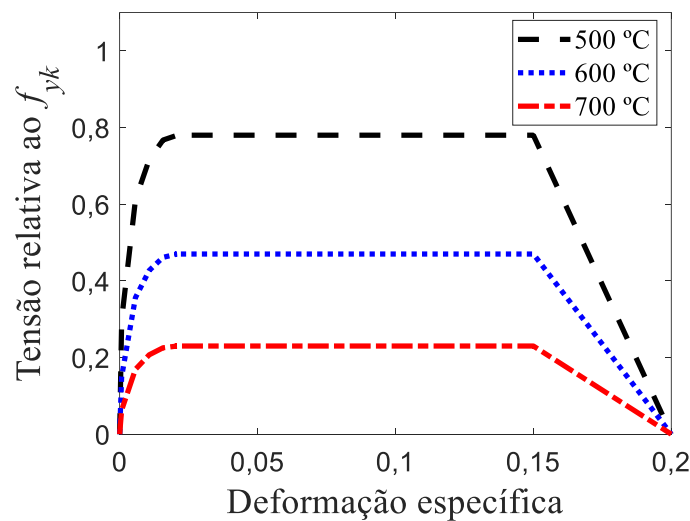
$E_{a,\theta}$ = módulo de elasticidade do aço a uma temperatura θ ;

Fonte: Eurocode 3 (CEN, 2005).

A Figura 2.8 ilustra três diagramas tensão relativa \times deformação dos aços a altas temperaturas, em que a tensão relativa é definida por $f_{yk,\theta}/f_{yk}$. A Figura 2.8 ilustra quatro estágios

distintos da curva tensão×deformação específica. No primeiro estágio nota-se um comportamento linear da relação constitutiva, até que a estrutura alcance a tensão de proporcionalidade. Na segunda parte, a curva segue o comportamento elasto-plástico com encruamento. O terceiro trecho representa o escoamento da barra. E o quarto estágio do diagrama é caracterizado pelo decrescimento linear da tensão. Na Figura, nota-se também uma acentuada redução da resistência do aço à medida que a temperatura aumenta.

Figura 2.8: Diagrama tensão relativa × deformação específica para os aços estruturais.



Fonte: Elaborado pelo autor.

Variações nas propriedades térmicas do aço também ocorrem e seus efeitos sobre a resistência da estrutura devem ser considerados. O Eurocode 3 (CEN, 2005) e a ABNT NBR 14323 (2013) apresentam uma descrição determinística de tais propriedades considerando os efeitos da variação da temperatura na dilatação térmica, no calor específico e na condutividade térmica. No entanto, Khorasani *et al.* (2015) propõem modelos probabilísticos para consideração das incertezas relacionadas com as propriedades térmicas do aço submetidas a altas temperaturas. As equações seguintes apresentam o modelo probabilístico proposto por Khorasani *et al.* (2015) para considerar as incertezas na condutividade térmica (Equação 2.24) e no alongamento específico do aço (Equação 2.25)

$$k_s = \left\{ \begin{array}{l} 60 - \exp \left[\ln \left(60 - k_s^* \right) + 145,4 \times 10^{-3} - 0,5 \times 10^{-3} T + 0,206 \times \varepsilon \right] \text{ para } T \leq 800 \text{ } ^\circ\text{C} \\ 60 - \exp \left[3,23 + 0,206 \times \varepsilon \right] \text{ para } T > 800 \text{ } ^\circ\text{C} \end{array} \right\}, \quad (2.24)$$

$$\frac{\Delta l}{l} = \left\{ \begin{array}{l} \left(\sqrt{\frac{\Delta l^*}{l}} - 1,28 \times 10^{-3} + 3,96 \times 10^{-6} T + 0,0039 \times \varepsilon \right)^2 \text{ para } T < 750 \text{ }^\circ\text{C} \\ \left\{ \sqrt{\frac{\Delta l^*}{l}} + \left[1,69 + 0,64(T - 750) - 1,7(T - 750)^{0,81} + 3,7 \times \varepsilon \right] \times 10^{-3} \right\}^2 \text{ para } 750 \leq T < 860 \text{ }^\circ\text{C} \\ \left[\sqrt{\frac{\Delta l^*}{l}} - 2,32 \times 10^{-3} + 0,173 \times 10^{-6} \times (T - 860) + 0,0037 \times \varepsilon \right]^2 \text{ para } 860 \leq T < 1200 \text{ }^\circ\text{C} \end{array} \right. , \quad (2.25)$$

onde em ambas as equações, T é a temperatura em graus celsius e ε é uma variável aleatória com distribuição normal padrão. Para utilizar a Equação 2.24, k_s^* , é obtido conforme a Equação 2.26 e para utilizar a Equação 2.25, $\frac{\Delta l^*}{l}$, é obtido conforme a Equação 2.27.

$$k_s^* = \left\{ \begin{array}{l} (54 - 3,33 \times 10^{-2} T) \text{ para } T \leq 800 \text{ }^\circ\text{C} \\ 27,3 \text{ para } T > 800 \text{ }^\circ\text{C} \end{array} \right\}, \quad (2.26)$$

$$\frac{\Delta l^*}{l} = \left\{ \begin{array}{l} (1,2 \times 10^{-5} T + 0,4 \times 10^{-8} T^2 - 2,416 \times 10^{-4}) \text{ para } T < 750 \text{ }^\circ\text{C} \\ (1,1 \times 10^{-2}) \text{ para } 750 \leq T < 860 \text{ }^\circ\text{C} \\ (2 \times 10^{-5} T - 6,2 \times 10^{-3}) \text{ para } 860 \leq T < 1200 \text{ }^\circ\text{C} \end{array} \right\}, \quad (2.27)$$

Para temperaturas próximas de 730 °C ocorre uma mudança cristalográfica de fase (a perlita do aço começa a se transformar em austenita) (SILVA, 2012); (KHORASANI *et al.*, 2015). Nessa mudança, os átomos do aço se reorganizam e, portanto, absorvem uma energia considerável (KHORASANI *et al.*, 2015). Durante a mudança de fase, a energia é absorvida sem aumento de temperatura. Não foram encontrados dados medidos na literatura para determinar a extensão de energia necessária na mudança de fase a partir de 730 °C. Por isso, Khorasani *et al.* (2015) recomendam que os valores determinísticos, dados comumente por códigos normativos, sejam utilizados para considerar o calor específico do aço. A Equação 2.28, ilustra a formulação apresentada na ABNT NBR 14323 (2013) para o calor específico

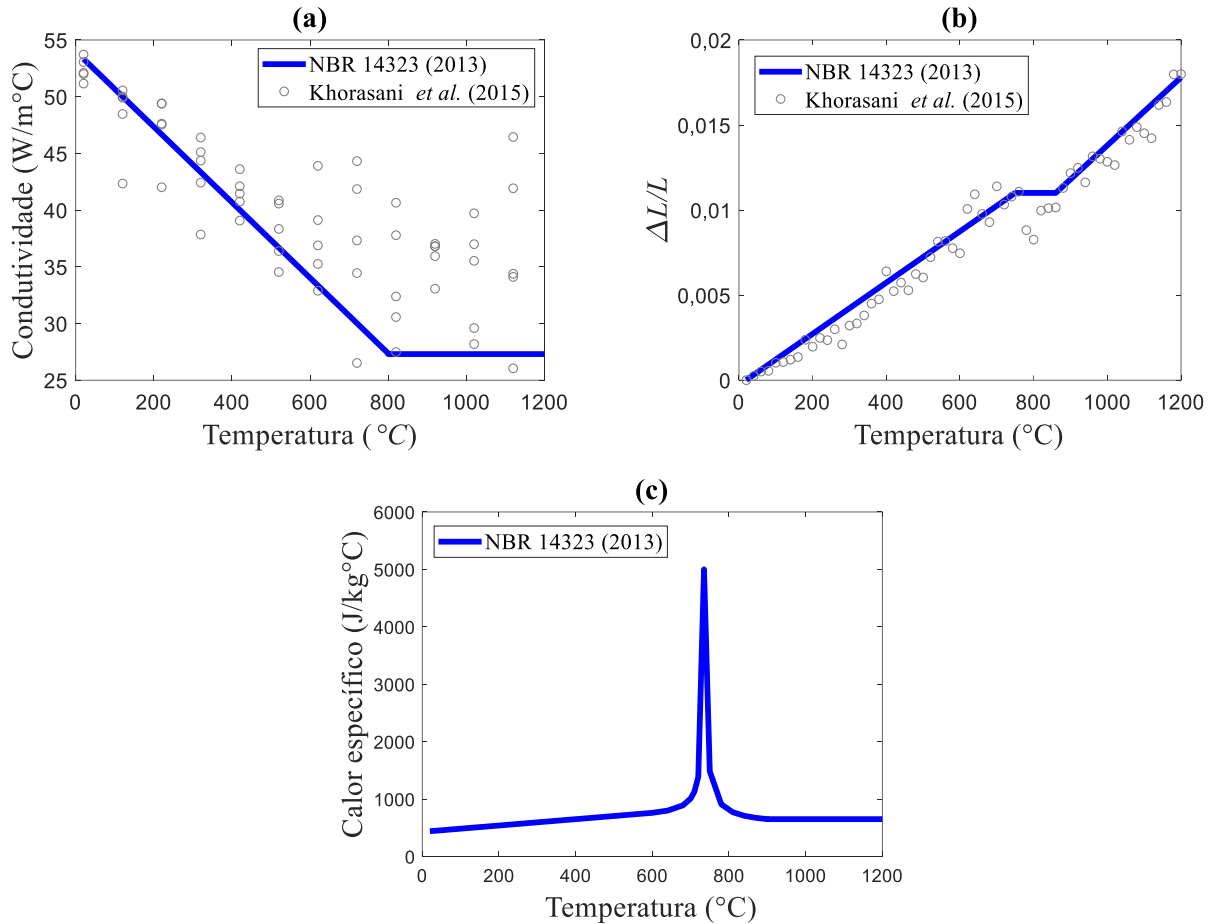
$$c_a = \left\{ \begin{array}{l} \left(425 + 7,37 \times 10^{-1} T - 1,69 \times 10^{-3} T^2 + 2,22 \times 10^{-6} T^3 \right) \text{ para } T < 600 \text{ } ^\circ\text{C} \\ \left(666 + \frac{13002}{738 - T} \right) \text{ para } 600 \leq T < 735 \text{ } ^\circ\text{C} \\ \left(545 + \frac{17820}{T - 731} \right) \text{ para } 735 \leq T < 900 \text{ } ^\circ\text{C} \\ (650) \text{ para } 900 \leq T < 1200 \text{ } ^\circ\text{C} \end{array} \right\}, \quad (2.28)$$

onde T é a temperatura em graus ($^\circ\text{C}$).

As figuras 2.9 (a) e (b) ilustram as incertezas nas propriedades térmicas do aço descritas nas equações 2.24 e 2.25. A Figura 2.9 (c) apresenta a curva determinística para o calor específico recomendada pela ABNT NBR 14323 (2013) (Equação 2.28).

A condutividade térmica do aço diminui com o aumento da temperatura, tornando-se constante para valores acima de $800 \text{ } ^\circ\text{C}$, conforme sugere a ABNT NBR 14323 (2013) (Figura 2.9 (a)). A relação entre a deformação específica do aço e a temperatura (Figura 2.9 (b)) apresenta um aspecto aproximadamente linear, com exceção no intervalo entre $750 \text{ } ^\circ\text{C}$ e $860 \text{ } ^\circ\text{C}$, onde o alongamento do elemento não varia devido a mudanças em sua composição química (CEN, 2005); (ABNT NBR 14323, 2013). O calor específico, representado na Figura 2.9 (c), tem um comportamento aproximadamente constante em função da temperatura, exceto para valores na faixa de $735 \text{ } ^\circ\text{C}$ a $900 \text{ } ^\circ\text{C}$ (CEN, 2005); (ABNT NBR14323, 2013).

Figura 2.9: Propriedades térmicas em função da temperatura, para (a) condutividade térmica; (b) alongamento do aço; (c) calor específico.



Fonte: Elaborado pelo autor.

Apesar do presente trabalho focar na análise de estruturas de aço, uma laje de concreto é considerada no problema que envolve o sistema estrutural tridimensional, descrito na Seção 3.6. Os parâmetros que definem a laje são considerados como sendo determinísticos, porém o fator de redução da resistência dos concretos, preparados predominantemente com agregados silicosos, é considerado em função da temperatura, conforme indica a ABNT NBR 15200 (2012) e apresenta-se na Tabela 2.

Tabela 2 – Valores das relações $k_{c,\theta} = f_{c,\theta} / f_{ck}$ para concretos silicosos

Temperatura do concreto (°C)	Relação $k_{c,\theta} = f_{c,\theta} / f_{ck}$
20	1,00
100	1,00
200	0,95
300	0,85
400	0,75
500	0,60
600	0,45
700	0,30
800	0,15
900	0,08
1000	0,04
1100	0,01
1200	0,00

Fonte: ABNT NBR 15200 (2012).

A Tabela 2 fornece a relação entre a resistência à compressão do concreto submetido a diferentes temperaturas ($f_{c,\theta}$) e a resistência característica à compressão do concreto à temperatura ambiente ($f_{c,k}$). Para valores intermediários de temperatura pode ser feita interpolação linear.

O diagrama tensão-deformação do concreto a temperaturas elevadas foi considerado conforme a Equação 2.29 (SILVA, 2012); (ABNT NBR 15200, 2012):

$$\sigma_{c,\theta} = f_{c,\theta} \cdot \frac{3 \left(\frac{\varepsilon_{c,\theta}}{\varepsilon_{c1,\theta}} \right)}{2 + \left(\frac{\varepsilon_{c,\theta}}{\varepsilon_{c1,\theta}} \right)^3}, \quad (2.29)$$

onde:

$\sigma_{c,\theta}$ = valor da tensão à compressão do concreto à temperatura elevada θ (MPa);

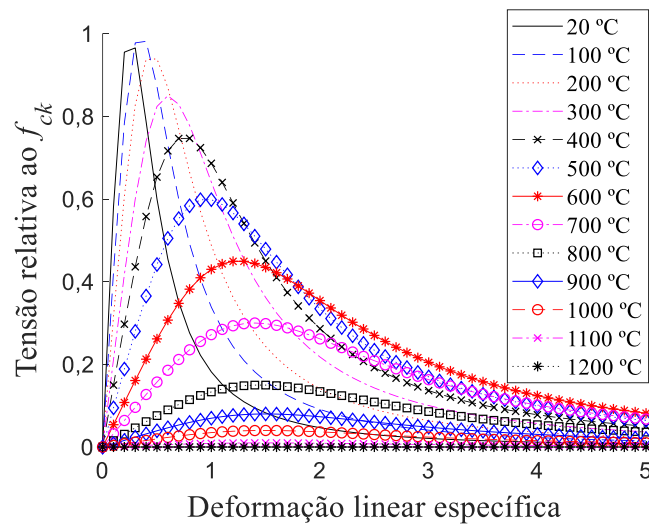
$f_{c,\theta}$ = valor da resistência à compressão do concreto à temperatura elevada θ (MPa);

$\varepsilon_{c,\theta}$ = deformação linear específica correspondente do concreto à temperatura elevada θ (adimensional);

$\varepsilon_{c1,\theta}$ = deformação linear específica correspondente à tensão de resistência máxima do concreto à temperatura elevada θ (adimensional);

O diagrama tensão deformação obtido empregando-se a Equação 2.29 é apresentado na Figura 2.10.

Figura 2.10: Diagrama tensão-deformação do concreto em função da temperatura.



Fonte: Elaborado pelo autor.

É possível considerar a resistência de escoamento à tração do concreto para temperaturas superiores a 100 °C, porém essa resistência geralmente é desprezada tanto na temperatura ambiente quanto na temperatura elevada (SILVA, 2012). Desse modo, aqui a resistência à tração do concreto, também é desprezada.

Além das propriedades térmicas e mecânicas da estrutura sob alta temperatura, a resposta estrutural depende também, fortemente, das ações permanentes, variáveis ou excepcionais aplicadas durante o evento de incêndio. Os projetistas estruturais devem considerar combinações dessas ações ao projetar estruturas de edifícios. Para a situação excepcional de incêndio, a ABNT NBR 14323 (2013), no item 6.3, indica a utilização da combinação última, apresentada na Equação 2.30:

$$F_{sd,fi} = \sum_{i=1}^n \gamma_g \cdot F_{Gi} + F_{Q,exc} + \psi \cdot F_Q, \quad (2.30)$$

sendo, $F_{sd,fi}$ o esforço solicitante de cálculo em situação de incêndio; F_G o valor nominal da ação permanente; $F_{Q,exc}$ o valor nominal das ações térmicas; F_Q o valor nominal das ações variáveis

devidas às ações acidentais; γ_s é o coeficiente de ponderação das ações permanentes dado como sendo igual a 1 pela ABNT NBR 14323 e ψ é uma constante que depende das condições de aplicação dos carregamentos.

Para uma análise determinística, a Equação 2.30 é bastante útil. Porém, para uma análise de confiabilidade, uma avaliação probabilística das combinações específicas de ações se torna mais apropriada, pois as ações atuantes nas estruturas podem variar aleatoriamente ao longo do tempo.

No trabalho de Ellingwood (2005), observa-se que há uma baixa probabilidade de que a ação variável máxima e a carga térmica (que pode surgir ao se restringir o movimento da estrutura) ocorram ao mesmo tempo. Como o incêndio é um evento excepcional com uma duração relativamente pequena e de grande intensidade, a probabilidade de que um incêndio ocorra simultaneamente com a máxima ação variável é insignificante, na ordem de 10^{-9} /ano (ELLINGWOOD, 2005). Além disso, durante um incêndio, nem o vento e nem os efeitos sísmicos precisam ser considerados na combinação de ações, uma vez que a probabilidade de ocorrência de um incêndio durante a vida útil de uma edificação é relativamente pequena e ocorrendo sua duração seria curta. Portanto, não há necessidade de combinar o efeito da ação térmica com valores elevados das ações variáveis (SILVA, 2004). Logo, uma estrutura é susceptível de ser carregada com apenas uma fração da carga de projeto, quando um incêndio ocorre. Neste contexto, Iqbal & Harichandran (2010), baseados no trabalho de Ellingwood (2005), sugerem a aplicação da Equação 2.31, como uma alternativa para a previsão da parcela de ações média atuante na estrutura submetida ao fogo (U_{fi})

$$U_{fi} = 1,05U_{per} + 0,24U_{var}, \quad (2.31)$$

onde (U_{per}) representa as ações nominais permanentes e (U_{var}) as ações nominais variáveis, ponderadas, respectivamente, pelos fatores 1,05 e 0,24, que representam as possíveis parcelas das ações médias atuantes.

Para se considerar as incertezas na transformação das ações em efeitos de carga (GERNAY *et al.*, 2016), pode-se adicionar à Equação 2.31 os parâmetros aleatórios E_a , A_a e B_a que representam a variabilidade das ações e de sua combinação, conforme indicados na Equação 2.32 (RAVINDRA & GALAMBOS, 1978):

$$U_{fi} = E_a \left[A_a (1,05U_{per}) + B_a (0,24U_{var}) \right] \quad (2.32)$$

Os parâmetros de distribuição para A_a , B_a e E_a são fornecidos no Capítulo 3 da presente tese.

A Equação 2.32 é largamente aceita e utilizada nos trabalhos de análise de confiabilidade de estruturas em situação de incêndio (IQBAL & HARICHANDRAN, 2010); (IQBAL & HARICHANDRAN, 2011); (GUO & JEFFERS, 2014); (RICARDO, 2015); (GERNAY *et al.*, 2016); (RICARDO & GOMES, 2021). Neste trabalho, a Equação 2.32 é utilizada em todos os problemas apresentados no Capítulo 3.

Aplicando as etapas de modelagem do incêndio, de análise termoestrutural e considerando as incertezas associadas ao problema, é possível realizar uma avaliação quantitativa da segurança das estruturas submetidas ao fogo. Isso pode ser feito com o auxílio da teoria da confiabilidade estrutural.

2.2 CONFIABILIDADE ESTRUTURAL

Comumente, os códigos normativos de dimensionamento estruturais consideram a solicitação S (carregamentos ou os efeitos dos carregamentos, por exemplo: momento de flexão, força de cisalhamento, etc.) e a resistência R (capacidade ou resistência) como valores semi-probabilísticos. O valor característico de R geralmente representa o quinto percentil inferior da função de densidade de probabilidade. Em outras palavras, considera-se como a resistência de cálculo do elemento estrutural aquela que possui uma probabilidade de 95% de ser superada. Já a solicitação de projeto (S), normalmente, representa um alto percentual do carregamento, que possui uma alta probabilidade de ser excedido no período de retorno (BUCHANAN, 2017). Além disso, coeficientes de minoração de R e de majoração de S são aplicados a fim de garantir a segurança estrutural.

A utilização de coeficientes na elaboração de um projeto estrutural usualmente leva a níveis satisfatórios de segurança, porém não permite quantificar o grau de segurança, ao não levar em conta as várias fontes de incerteza e configurações espaciais possíveis. A quantificação da segurança em termos de probabilidades de falha pode ser realizada por meio da análise de confiabilidade estrutural.

Na análise de confiabilidade, é comum representar todos os parâmetros aleatórios ou incertos de um sistema estrutural por meio de um vetor de variáveis aleatórias (VAs), \mathbf{X} . O conjunto das realizações de tais variáveis é usualmente representado pelo vetor \mathbf{x} . Os requisitos básicos de funcionalidade das estruturas são, geralmente, definidos por funções de estado limite, $g(\mathbf{x})$, de modo que o domínio de falha (Ω_f) é dado pela Equação 2.33

$$\Omega_f = \{\mathbf{x} | g(\mathbf{x}) \leq 0\} \quad (2.33)$$

Para cada modo de falha existe um respectivo domínio de falha Ω_f . A probabilidade de respostas estruturais indesejáveis, conhecida como probabilidade de falha (P_f), é expressa pela Equação 2.34

$$P_f = P[\mathbf{X} \in \Omega_f] = \int_{\Omega_f} f_{\mathbf{X}}(\mathbf{x}) d\mathbf{x} , \quad (2.34)$$

onde $f_{\mathbf{X}}(\mathbf{x})$ é a função de densidade de probabilidade conjunta do vetor \mathbf{X} . Na literatura, muitos métodos foram propostos para resolver a integral multidimensional presente na Equação 2.34, dentre eles se destacam os métodos FORM e MCS (EL-REEDY, 2013); (MELCHERS & BECK, 2018); (BECK, 2019).

2.2.1 *First order reliability method - FORM*

Em resumo, o método FORM se baseia na construção da função conjunta de distribuição de probabilidades, $f_{\mathbf{X}}(\mathbf{x})$, bem como na transformação do problema para o espaço normal padrão, onde as VAs possuem distribuição conjunta normal padrão. Nesse espaço, determina-se o chamado ponto de projeto, que consiste no ponto sobre a equação de estado limite, ou seja, sobre $g(\mathbf{x})=0$, que corresponde à mínima distância à origem. No ponto de projeto, é construída uma aproximação linear para a equação de estado limite, um hiperplano para o caso n -dimensional. A estimativa da probabilidade de falha é obtida no espaço transformado e considerando esta aproximação. Como a própria função de estado limite no espaço original pode apresentar não-linearidade significativa e também as conversões para o espaço normal padrão podem induzir não-linearidades, a resposta do método pode não ser precisa o suficiente.

i) *Construção da função conjunta de distribuição de probabilidades e transformação para o espaço normal padrão*

A aplicação do FORM requer que o vetor das variáveis aleatórias \mathbf{X} , seja transformado em um conjunto de variáveis aleatórias independentes \mathbf{Y} com distribuição normal padrão (BECK, 2019). A ideia fundamental consiste na construção da função conjunta de distribuição de probabilidades (PDF – *Probability Density Function*), $f_{\mathbf{x}}(\mathbf{x})$, a partir das distribuições de probabilidades marginais de cada uma das VAs do problema, e a partir de uma matriz de correlação formada pelos coeficientes de correlação entre pares de variáveis (BECK, 2019).

A transformação das variáveis aleatórias \mathbf{X} para o espaço padrão pode ser realizada de várias maneiras. Para o caso simples de variáveis normais independentes, a transformação é simplesmente a transformação de Hasofer e Lind (1974), dada pela Equação 2.35, onde a equação transforma um conjunto de n VAs normais \mathbf{X} , com média (μ_{x_i}) e desvios-padrão (σ_{x_i}) quaisquer, em um conjunto \mathbf{Y} de VAs normais padrão, com média nula e desvio padrão unitário.

$$Y_i = \frac{X_i - \mu_{X_i}}{\sigma_{X_i}}, \quad i = 1, \dots, n \quad (2.35)$$

No caso em que as funções de densidade conjunta não são diretamente conhecidas, pode-se aplicar a transformação de Rosenblatt (1952) ou de Nataf (1962). Geralmente, adota-se a segunda opção, uma vez que esta requer menos informação estatística a respeito da variação conjunta das VAs. Além disto, a transformação de Rosenblatt só pode ser aplicada em alguns casos particulares, limitada a problemas com poucas VAs (HURTADO, 2004); (MELCHERS & BECK, 2018).

No modelo de Nataf, é feita uma transformação das distribuições marginais envolvidas em distribuições normais equivalentes, bem como a determinação de coeficientes de correlação equivalentes para as distribuições normais. Se as variáveis forem correlacionadas, a conversão para o espaço padrão envolve também uma transformação linear a partir da decomposição ortogonal ou pela chamada fatoração de Cholesky da matriz de correlação. No fim desse processo, a função original $f_{\mathbf{x}}(\mathbf{x})$ é transformada em uma distribuição normal padrão multivariada $f_{\mathbf{y}}(\mathbf{y})$ (BECK, 2019).

- ii) *Otimização para encontrar o ponto de projeto, definição do índice de confiabilidade e obtenção da aproximação da equação de estado limite.*

A resolução do problema de otimização consiste em encontrar o ponto de projeto \mathbf{y}^* no espaço padrão e substituir a função de estado limite real por sua expansão de Taylor de primeira ordem em torno desse ponto. Deve-se notar que a transformação das VAs do espaço original \mathbf{X} para o espaço padrão \mathbf{Y} implica também na transformação da equação de estado limite $g(\mathbf{x})=0$ em uma função $g(\mathbf{y})=0$ (MELCHERS & BECK, 2018).

O ponto de projeto \mathbf{y}^* é a solução do problema de otimização com restrições da Equação 2.36. Nessa Equação, d é a distância entre um ponto \mathbf{y} qualquer e a origem do espaço padrão (BECK, 2019).

$$\begin{aligned} \text{encontrar o ponto: } & \mathbf{y}^* \\ \text{que minimiza: } & d = \|\mathbf{y}\| = \sqrt{\mathbf{y}^T \cdot \mathbf{y}} \\ \text{sujeito a: } & g(\mathbf{y}) = 0 \end{aligned} \quad (2.36)$$

A solução da Equação 2.36 pode se realizada pelo algoritmo de Hasofer, Lind, Rackwitz e Fiessler (HLRF) (BECK, 2019). No procedimento de busca do ponto de projeto via método HLRF é feita uma aproximação da equação de estado limite ($g(\mathbf{y})$) pela expansão de Taylor de primeira ordem em torno de um ponto \mathbf{y}_k qualquer. A expansão de Taylor é apresentada na equação 2.37

$$g(\mathbf{y}_{k+1}) \simeq g(\mathbf{y}_{k+1}) = g(\mathbf{y}_k) + \nabla g(\mathbf{y}_k)^t \cdot (\mathbf{y}_{k+1} - \mathbf{y}_k), \quad (2.37)$$

onde $\nabla g(\mathbf{y}_k)$ é o gradiente da equação de estado limite (no espaço normal padrão), avaliado no ponto \mathbf{y}_k . Um novo ponto \mathbf{y}_{k+1} é encontrado pela equação linearizada fazendo $\tilde{g}(\mathbf{y}_{k+1}) = 0$ na Equação 2.37.

Aplicando a Equação 2.37 na 2.36 e desenvolvendo, encontra-se a Equação 2.38 que pode ser utilizada de maneira iterativa, adotando arbitrariamente um ponto inicial \mathbf{y}_k qualquer, para encontrar \mathbf{y}^* (BECK, 2019). O valor de \mathbf{y}^* é determinado quando os valores de \mathbf{y}_{k+1} se tornam estacionários durante as iterações.

$$\mathbf{y}_{k+1} = \frac{\nabla g(\mathbf{y}_k)^t \mathbf{y}_k - g(\mathbf{y}_k)}{\|\nabla g(\mathbf{y}_k)\|^2} \nabla g(\mathbf{y}_k) \quad (2.38)$$

O algoritmo HLRF não garante a convergência e nem que o ponto encontrado seja o ponto de mínimo (BECK, 2019). Porém, o algoritmo pode ser melhorado por meio de uma busca linear para ajuste do passo λ_k . No HLRF original, o ponto de projeto é determinado para $\lambda_k = 1$, tal que $\lambda_k \mathbf{d}_k = (\mathbf{y}_{k+1} - \mathbf{y}_k)$. No algoritmo HLRF melhorado, ou *iHLRF* (*improved Hasofer, Lind, Rackwitz e Fiessler*) (HASOFER & LIND, 1974) e (RACKWITZ & FIESSLER, 1978), realiza-se uma busca por um passo ótimo que minimiza uma função mérito $m(\mathbf{y})$. Zhang e Der Kiureghian (1997) sugerem a utilização da Equação 2.39 como uma função mérito:

$$m(\mathbf{y}) = \frac{1}{2} \|\mathbf{y}\|^2 + c |g(\mathbf{y})| \quad (2.39)$$

Adotando a Equação 2.39, a convergência ao ponto de projeto será garantida, desde que a Equação 2.40 seja obedecida:

$$c > \frac{\|\mathbf{y}\|}{\|\nabla g(\mathbf{y})\|} \quad (2.40)$$

O algoritmo *iHLRF* foi desenvolvido especificamente para a solução do problema de otimização em confiabilidade estrutural e apresenta garantia de convergência (MELCHERS & BECK, 2018). Uma descrição detalhada do algoritmo pode ser encontrada em Beck (2019) e Melchers & Beck (2018).

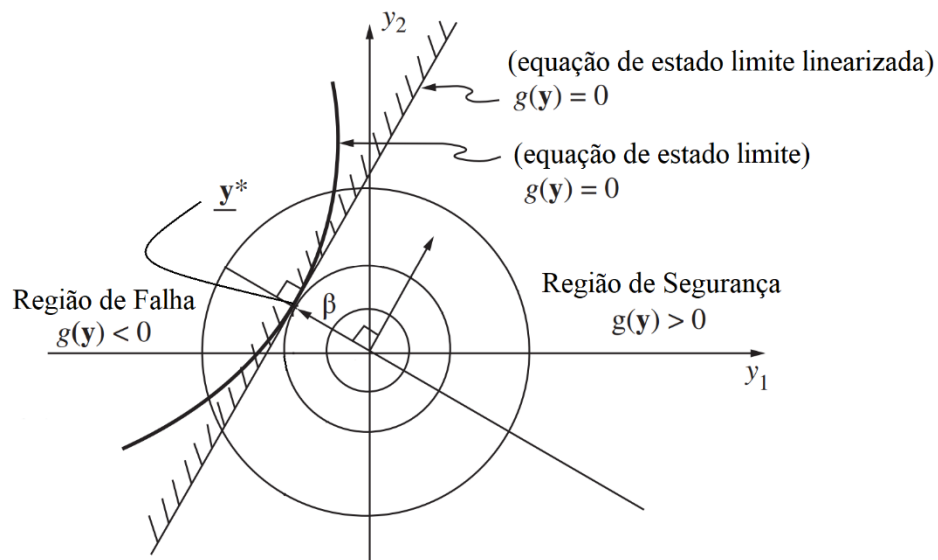
Após a determinação do ponto de projeto (\mathbf{y}^*) e a construção da aproximação linear da equação de estado limite, é possível determinar a mínima distância entre a equação de estado limite no espaço normal padrão, e a origem desse espaço. Esta mínima distância consiste no chamado índice de confiabilidade β . O índice de confiabilidade pode ser utilizado na função de distribuição acumulada normal padrão ($\Phi(\cdot)$) para determinar a probabilidade de falha (P_f). O β e a P_f são relacionados pela Equação 2.41:

$$\beta = \|\mathbf{y}^*\| \quad (2.41)$$

$$P_f = \Phi(-\beta)$$

Cabe salientar que a aproximação da equação de estado limite no ponto de projeto pode levar a erros na estimativa da probabilidade de falha (BECK, 2019). Apesar do FORM não fornecer estimativas para o erro cometido pela linearização da equação de estado limite, esse erro pode ser entendido com base na Figura 2.11. Nessa figura, nota-se que a precisão dos resultados do método de primeira ordem dependerá do grau de não-linearidade da equação de estado limite, sobretudo na vizinhança do ponto de projeto. Por exemplo, se a equação de estado limite tiver um aspecto côncavo em relação à origem, como é o caso da Figura 2.11, a estimativa do FORM será conservadora, ou seja, a P_f estimada será maior do que a real. Caso a equação de estado limite seja convexa em relação a origem, a P_f estimada será menor do que a real. Outro detalhe sobre o método de transformação FORM é que a exatidão desse método depende de duas questões críticas: da maneira como a função de densidade conjunta $f_{\mathbf{y}}(\mathbf{y})$ é determinada e do número de variáveis aleatórias envolvidas no problema, bem como de seus parâmetros.

Figura 2.11: Ilustração da aproximação da equação de estado limite pelo FORM



Fonte: Adaptado de Melchers & Beck (2018).

Quando a equação de estado limite é fortemente não linear, como pode ser o caso das equações de estado limite das estruturas em incêndio, a aproximação pelo FORM perde muito

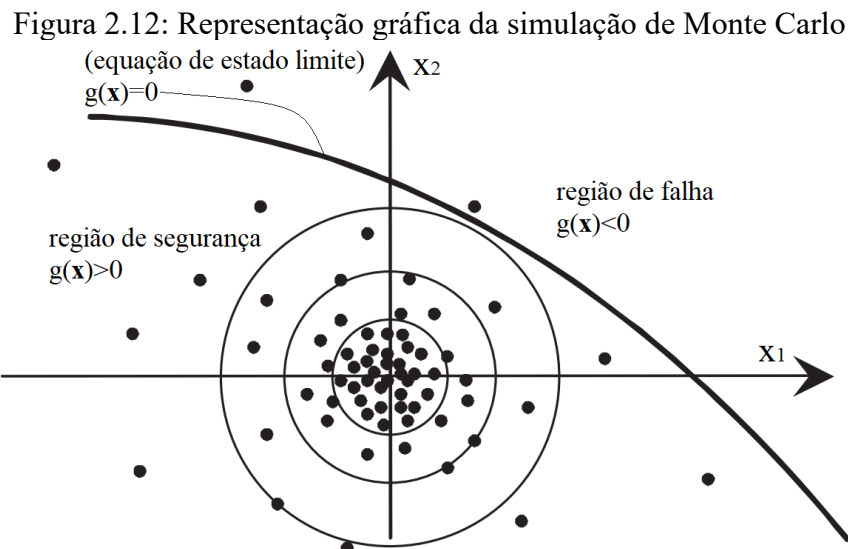
em qualidade. Como alternativa, o método de Monte Carlo Simples pode ser utilizado, sobretudo na análise de estruturas complexas, para evitar as aproximações ou verificar as soluções do FORM (MELCHERS & BECK, 2018).

2.2.2 Simulação de Monte Carlo - MCS

A simulação de Monte Carlo (MCS – *Monte Carlo Simulation*) é um método que realiza simulações baseadas em conjuntos de amostragem gerados aleatoriamente para as variáveis aleatórias envolvidas (MELCHERS & BECK, 2018). Nesse método, a P_f pode ser determinada conforme a Equação 2.42, a partir da geração aleatória de n_{MC} realizações de \mathbf{X} , de acordo com sua distribuição conjunta $f_{\mathbf{x}}(\mathbf{x})$ (BECK, 2019). Na Equação, considera-se a chamada função indicadora $I[\mathbf{x}]$, que é igual a um se \mathbf{x} pertencer ao domínio da falha e zero caso contrário. É possível mostrar que a probabilidade de falha corresponde ao valor esperado da função indicadora ($E[I[\mathbf{X}]]$):

$$P_f = E[I[\mathbf{X}]] \cong \frac{1}{n_{MC}} \sum_{i=1}^{n_{MC}} I[\mathbf{x}_i] \quad (2.42)$$

A Equação 2.42 indica que uma estimativa da P_f por MCS pode ser obtida a partir da divisão do número de simulações que resultaram dentro do domínio de falha pelo número total de simulações realizadas. Por exemplo, analisando a Figura 2.12, nota-se que $n_f = 2$ pontos se encontram dentro do domínio de falha, dentre os $n_{MC} = 67$ pontos simulados. Logo, para esse caso hipotético, a estimativa da probabilidade de falha resulta igual a 2,985%.



Fonte: Adaptado de Lemaire (2009).

A aplicação da Equação 2.42 requer uma avaliação da função de estado limite por ponto amostral, e o erro associado à estimativa diminui à medida que se aumenta o tamanho da amostra. Beck (2019) indica que para se obter uma estimativa com 95% de confiança, com coeficiente de variação menor que 0,1, para uma P_f da ordem de 10^{-p} , são necessárias cerca de $4 \times 10^{p+2}$ simulações. Desta forma, o tempo computacional necessário para uma análise de confiabilidade de estruturas em situação de incêndio pode se tornar facilmente proibitivo, por exigir milhares ou até milhões de simulações do modelo numérico, a depender da acurácia da P_f a ser estimada.

O método de Monte Carlo assim formulado é conhecido como método de Monte Carlo simples ou bruto, por não utilizar técnicas que permitem a redução do número de simulações (BECK, 2019). A literatura aponta várias alternativas ao MCS simples, que requerem amostras de tamanho menor para atingirem nível de precisão semelhante. Dentre elas, pode-se citar as técnicas de redução de variância apresentadas em Borgund & Bucher (1986), Bucher (1988), Karamchandani *et al.* (1989), Helton & Davis (2003), Olsson *et al.* (2003), Helton *et al.* (2005), Au *et al.* (2007) e Bucher (2009). A técnica de amostragem por hipercubo latino (*Latin Hypercube Sampling* ou LHS) é uma das técnicas de redução de variância geralmente utilizada na análise de confiabilidade de estruturas em incêndio (GUO & JEFFERS, 2014); (BALOGHA & VIGH, 2016). Na amostragem por LHS, o domínio de cada VA é dividido em faixas equiprováveis (HELTON & DAVIS, 2003); (OLSSON *et al.*, 2003), (HELTON *et al.*, 2005),

onde cada faixa é amostrada apenas uma vez durante a simulação, resultando numa distribuição esparsa dos pontos no domínio avaliado (BECK, 2019).

Mesmo que técnicas de redução de variância sejam utilizadas, é possível que ainda seja necessário avaliar a função de estado limite milhares de vezes (MELCHERS & BECK, 2018), o que pode levar a demandas computacionais muito elevadas. Para tentar contornar esse tipo de problema, pode-se utilizar os chamados metamodelos (FARAVELLI, 1989); (GHANEM & SPANOS, 1991); (STEIN, 1999); (SOARES *et al.*, 2002); (BUCHER & MOST, 2008); (BLATMAN & SUDRET, 2010); (DUBOURG *et al.*, 2013); (GOMES & BECK, 2013).

Um metamodelo pode ser interpretado como uma função algébrica que permite ajustar pontos (\mathbf{x} , \mathbf{y}) por meio de técnicas de minimização dos erros, sendo \mathbf{x} o parâmetro de entrada do problema (por exemplo, o vetor de variáveis aleatórias) e \mathbf{y} o vetor que reúne as repostas de interesse (por exemplo, os resultados das simulações numéricas). Neste contexto, os metamodelos podem representar, de forma aproximada, a resposta de modelos computacionais mais complexos, como a análise de estruturas em situação de incêndio. Em problemas de confiabilidade estrutural, o modelo computacional a ser aproximado corresponde usualmente à função de estado limite ou parte dela, e pode envolver, por exemplo, um ou mais modelos em elementos finitos (MELCHERS & BECK, 2018).

O metamodelo pode ser chamado de estático (ou não adaptativo), quando os seus parâmetros são fixos durante a solução do problema. Porém, o metamodelo pode ser dito adaptativo quando o mesmo for construído de forma adaptativa, ou seja, para reduzir o erro em determinada região, pontos de suporte são adicionados, e os parâmetros são atualizados durante a solução (BECK, 2019).

Nos últimos anos, alternativas baseadas em metamodelos adaptativos e no emprego tanto do MCS simples quanto de outros métodos vêm sendo investigadas e aplicadas a vários problemas (SHAO & MUROTSU, 1997); (SCHUEREMANS & VAN GEMERT, 2005); (ECHARD *et al.*, 2011) (MARELLI & SUDRET, 2016); (GOMES, 2018); (GOMES, 2019), e têm levado a uma redução significativa do número de simulações necessárias. As RNAs consistem em um dos metamodelos mais utilizados nesse contexto (GOMES, 2018); (GOMES, 2019).

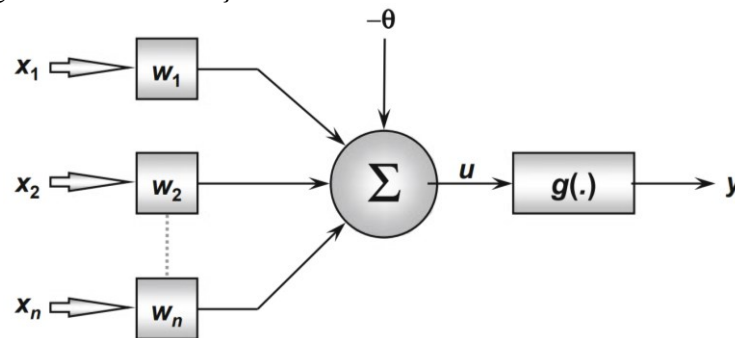
O método adaptativo utilizando redes neurais artificiais aqui empregado foi desenvolvido em Gomes (2018). Nas seções que seguem, o método é brevemente descrito, em conjunto com uma apresentação sucinta de alguns conceitos envolvidos.

2.3 REDES NEURAIS ARTIFICIAIS E MÉTODOS ADAPTATIVOS

2.3.1 Redes neurais artificiais - RNAs

As RNAs são modelos computacionais abstratos baseados em uma analogia simplificada do comportamento do cérebro humano (SILVA *et al.*, 2017). Nesse modelo simplificado, as informações são processadas por pequenas unidades de processamento, correspondentes aos neurônios, que são matematicamente representados por funções, como a linear ou sigmoide (BUCHER & MOST, 2008). O modelo de neurônio artificial mais simples que inclui as principais características de uma rede neural é ilustrado na Figura 2.13.

Figura 2.13: Simulação da estrutura básica do neurônio artificial



Fonte: Silva *et al.* (2017).

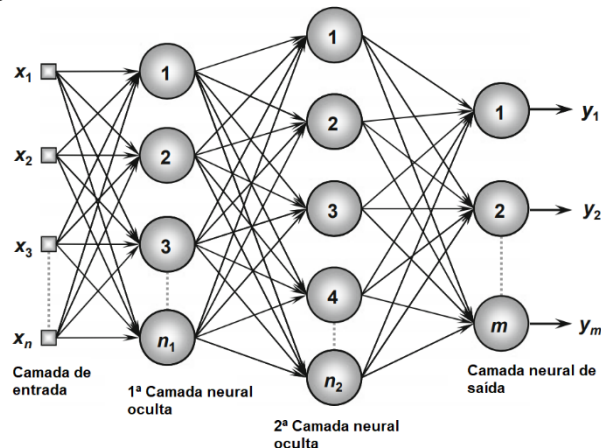
O neurônio artificial é constituído pelos elementos básicos: sinais de entrada $\{x_1, x_2, x_3, \dots, x_n\}$, pesos sinápticos $\{w_1, w_2, w_3, \dots, w_n\}$, combinador linear (Σ), limiar de ativação ou fator de *bias* (viés) (θ), potencial de ativação (u), função de ativação ($g(\cdot)$) e sinal de saída (y). Os sinais de entrada representam os dados/variáveis/amostras do problema a ser analisado. Recomenda-se que os sinais sejam normalizados para que se aumente a eficiência computacional dos algoritmos de aprendizado (SILVA *et al.*, 2017). Os pesos sinápticos são utilizados para ponderar as variáveis de entrada, trabalhando como um dispositivo quantitativo da importância das variáveis em relação à funcionalidade do neurônio. Seus valores são iniciados aleatoriamente, porém, recomenda-se que se inicialize todos os pesos com pequenos valores aleatórios entre $-0,5$ e $0,5$ (SILVA *et al.*, 2017), por exemplo. O combinador linear reúne todos os sinais de entrada ponderados pelos pesos sinápticos para produzir o potencial de ativação. O fator de *bias* é uma variável utilizada para a especificação do limite apropriado que

o resultado produzido pelo agregador linear deve ter para gerar um valor que convirja em direção à saída do neurônio (SILVA *et al.*, 2017). É um valor iniciado aleatoriamente. O potencial de ativação é o resultado produzido pela diferença entre o combinador linear e o limiar de ativação. A função de ativação traduz sinais de entrada para sinais de saída. Ele age como uma função de confinamento de tal forma que a saída (y) da rede neural fica entre certos valores (geralmente entre 0 e 1, ou -1 e 1) (SILVA *et al.*, 2017). O sinal de saída consiste no valor final produzido pelo neurônio.

A função de ativação pode ser linear ou não linear, ou ainda, diferenciável ou não. Normalmente, seleciona-se uma função de ativação adequada em relação ao problema. Algumas das funções de ativação amplamente utilizadas são: a função degrau (*heaviside*), função bipolar (*symmetric hard limiter*), função rampa, função logística, função tangente hiperbólica, função gaussiana e a função linear (SILVA *et al.*, 2017). Por serem funções não-lineares, estritamente crescentes e continuamente diferenciáveis, as funções sigmóides: logística e tangente hiperbólica (ou tangente sigmoideal) são mais comumente utilizadas para aproximação de funções com pequenas descontinuidades (BUCHER & MOST, 2008).

Diferentes topologias podem ser construídas variando o número de camadas de neurônios, ou escolhendo diferentes tipos e números de neurônios em cada camada, ou ainda, por diferentes tipos de conexão entre os neurônios (GOMES, 2018). A maneira como os neurônios são ligados entre si e como a informação flui ao longo dos mesmos define a chamada arquitetura da rede. Um exemplo de arquitetura para redes de múltiplas camadas de neurônios é a denominada *feedforward*, na qual a informação é transmitida em direção à camada de saída da rede, a partir da camada de entrada (SILVA *et al.*, 2017). Entre as principais redes que usam arquiteturas *feedforward* de múltiplas camadas destaca-se a *Multilayer Perceptron* (MLP) construída com uma camada de entrada que possui um neurônio para cada parâmetro de entrada, uma camada de saída com um neurônio para cada parâmetro de saída e um número arbitrário de camadas intermediárias com um ou mais neurônios em cada uma (BECK, 2019). A Figura 2.14, ilustra um exemplo de uma rede *feedforward* de múltiplas camadas.

Figura 2.14: Esquema de uma rede *feedforward* MLP



Fonte: Silva *et al.* (2017).

O número de camadas intermediárias e sua respectiva quantidade de neurônios dependem da natureza e complexidade do problema que está sendo mapeado pela rede, e da quantidade e qualidade dos dados disponíveis sobre o problema (SILVA *et al.*, 2017). Porém, existe prova matemática de que as redes *feedforward* de múltiplas camadas compostas com apenas uma camada de entrada, uma intermediária e uma de saída, são suficientes para aproximar qualquer função derivável, desde que funções de ativação suficientemente suaves sejam utilizadas (HORNIK *et al.*, 1990). Dessa maneira, no presente trabalho, apenas uma camada intermediária é utilizada.

O tipo de neurônio em cada camada é determinado pelas funções de ativação utilizadas. Neste trabalho, funções de ativação lineares são usadas para a camada de entrada e funções tangente sigmoide são aplicadas às camadas intermediária e de saída. Deve-se adotar, preferencialmente, a função de ativação tangente sigmoide para os neurônios das camadas escondidas, pois a sua característica antissimétrica (função ímpar) contribui para melhorar o processo de convergência da rede durante seu treinamento (SILVA *et al.* 2017).

Como as funções de ativação da camada de entrada são lineares, os dados de entrada são multiplicados por determinados pesos e repassados para os neurônios da camada intermediária. À soma ponderada que é transmitida para cada neurônio é adicionado um fator de *bias*, que permite que um neurônio seja ativado mesmo se um valor nulo for repassado para ele (SILVA *et al.*, 2017), e em seguida aplica-se a função de ativação. Para funções de ativação tangente sigmoide, a saída dos neurônios resulta em valores entre -1 e 1 , que são repassados aos neurônios da camada de saída. Nos neurônios da camada de saída um processamento

semelhante ocorre, envolvendo a adição de *bias* à soma ponderada que chega em cada neurônio e a aplicação das respectivas funções de ativação, resultando nas saídas da rede. A título de ilustração, considerando um vetor de dados de entrada $\mathbf{x} = \{x_1, x_2, \dots, x_{n_1}\}$ e uma rede MLP com uma única saída e uma única camada intermediária, com n_k neurônios em cada uma das k -ésimas camadas, a resposta da rede, y_{RNA} , seria dada pela Equação 2.43:

$$y_{RNA} = \text{tansig} \left(\theta_1^{(3)} + \sum_{i=1}^{n_2} \left(w_{i1}^{(3)} \cdot \text{tansig} \left(\theta_1^{(2)} + \sum_{j=1}^{n_1} w_{ji}^{(2)} x_j \right) \right) \right), \quad (2.43)$$

onde $\text{tansig}(\cdot)$ é a função tangente sigmoide; $w_{ji}^{(k)}$ é o peso entre o neurônio i da camada k e o neurônio j da camada $k-1$; e $\theta_i^{(k)}$ é o fator de *bias* do neurônio i da camada k .

Os fatores de *bias* e os pesos que caracterizam a conexão entre os neurônios são determinados pelas regras de treinamento ou algoritmos de treinamento/aprendizado. O aprendizado é dito supervisionado quando o conjunto de dados é rotulado, e não supervisionado caso contrário. No presente trabalho o aprendizado supervisionado é aplicado, pois cada configuração estrutural é relacionada ao respectivo valor da função de estado limite, que a rede deve tentar aprender a prever. Isso é discutido a seguir, sobretudo na Seção 2.3.2.

Embora existam vários tipos de regras de treinamento, a regra denominada *Backpropagation* (RUMELHART *et al.*, 1986) é a mais frequentemente utilizada no processo de treinamento de redes MLP (SILVA *et al.*, 2017). Na tentativa de tornar o processo de convergência do *Backpropagation* mais eficiente pode-se incorporar ao algoritmo uma técnica de otimização. Dentre as técnicas existentes destaca-se o método de Levenberg–Marquardt (HAGAN & MENHAJ, 1994), que é utilizado neste trabalho. Esse método é uma modificação do método de Gauss-Newton com base no método dos mínimos quadrados para modelos não lineares, que tem sido aplicado com sucesso na literatura relacionada às redes MLP.

De maneira geral, o algoritmo *Backpropagation* consiste na realização de iterações sucessivas de ajuste dos pesos e dos fatores de *bias*, denominadas épocas (SILVA *et al.*, 2017) e baseadas nos erros obtidos na camada de saída e na retropropagação desses erros em direção à camada de entrada. Para isso é necessário haver um conjunto de dados conhecidos que contemplem as entradas e as respectivas saídas.

É comum separar os dados de entrada e saída em três grupos: dados de treinamento, de validação e de teste. O conjunto de treinamento é o único usado pelos algoritmos de treinamento para o ajuste dos parâmetros; o segundo conjunto é utilizado entre épocas para interromper o processo de treinamento se o erro da rede começar a aumentar devido ao *overfitting*. O chamado *overfitting* ocorre quando o modelo se ajusta muito bem ao conjunto de dados de treinamento, porém, se mostra ineficaz para prever novos resultados. O terceiro conjunto, dados de teste, serve para verificar se os parâmetros encontrados ao final do treinamento estão levando a respostas com erros pequenos o suficiente. Quando a rede é utilizada em conjunto com alguma estratégia adaptativa, é comum não usar o conjunto de testes (GOMES, 2018), uma vez que é de se esperar que a rede continue evoluindo ao longo do processo adaptativo. No presente trabalho, 80% dos dados disponíveis são utilizados para treinamento e 20% para validação das redes, permitindo um máximo de 100 épocas a cada vez que o metamodelo é construído, do mesmo modo, como usualmente é empregado nos trabalhos associado ao tema e como foi adotado por Gomes (2018).

2.3.2 Redes neurais artificiais adaptativas

Uma opção para a análise de confiabilidade estrutural com aplicação de metamodelos consiste em avaliar as funções de estado limite em um número fixo de pontos, construir os metamodelos com base nesta informação e em seguida utilizá-los em substituição às funções de estado limite originais na análise propriamente dita. Porém, nos últimos anos tem se optado por utilizar os metamodelos em conjunto com alguma estratégia adaptativa que tenda a melhorar a precisão do metamodelo nas regiões mais importantes para a análise. Neste sentido, Gomes (2018), com base na abordagem apresentada em Marelli & Sudret (2016) para o caso de polinômios de caos, desenvolveu um procedimento adaptativo para análise de confiabilidade estrutural utilizando RNAs. Ao longo do presente trabalho, esses metamodelos são denominados RNAs adaptativas.

A construção e a adaptação do metamodelo são baseadas na seleção dos pontos de suporte nos quais as funções de estado limite originais são avaliadas e nos respectivos valores das funções, que constituem o aqui chamado plano de experimentos, a ser enriquecido ao longo do processo. O procedimento apresentado em Gomes (2018) é baseado em 7 passos, conforme apresentado de maneira sucinta a seguir.

1. Geração de uma população de Monte Carlo no espaço de variáveis aleatórias. Uma população de n_{MC} realizações de \mathbf{X} é gerada aleatoriamente, de acordo com a distribuição conjunta $f_{\mathbf{X}}(\mathbf{x})$. Essa população permanece a mesma durante todo o processo de aprendizagem e os pontos que constituem o plano de experimentos são sempre selecionados a partir dessa população;

2. Definição do plano de experimentos inicial. O plano de experimentos inicial compreende n_{ED} pontos (sendo adotado igual a 50 em todos os casos estudados no presente trabalho) $\{\mathbf{x}_{ED}^{(1)}, \mathbf{x}_{ED}^{(2)}, \dots, \mathbf{x}_{ED}^{(n_{ED})}\}$, com $\mathbf{x}_{ED}^{(i)} \in \mathbb{R}^n$, selecionados da população e inclui as respectivas avaliações da função de estado limite, $y_{ED}^{(i)} = g(\mathbf{x}_{ED}^{(i)}) \in \mathbb{R}$. A seleção dos n_{ED} pontos é realizada por meio de um algoritmo, que busca um subconjunto de amostras da população, considerando somas de distâncias euclidianas. Assim, seleciona-se primeiro a amostra mais próxima da média da população e depois disso, um processo iterativo é adotado para selecionar os pontos restantes $n_{ED} - 1$. Em cada iteração, a amostra mais distante daquelas já incluídas no plano de experimentos inicial é escolhida;

3. Inicialização das RNAs. Um total de $B=50$ RNAs diferentes são geradas e treinadas considerando o plano de experimentos inicial. Uma vez que um número maior de neurônios aumenta a capacidade de aproximação da rede, mas pode levar a *overfitting*, as B RNAs são igualmente divididas em grupos, cada um com um número diferente de neurônios na camada oculta;

4. Estimativa da probabilidade de falha por RNAs. As previsões das RNAs são obtidas para todos os pontos da população. A partir daí, estimativas de probabilidade de falha são obtidas para cada metamodelo, dividindo o número de previsões da RNA que resultaram menores ou iguais a zero por n_{MC} , conforme a Equação 2.44, onde $b = 1, 2, \dots, B$;

$$P_f^{(b)} = \frac{n_{y_{RNA} \leq 0}}{n_{MC}} \quad (2.44)$$

5. Avaliação do critério de convergência. O critério de convergência é baseado na estabilidade da probabilidade de falha estimada, \hat{P}_f , na iteração atual, e é dado pela Equação 2.45:

$$\frac{P_f^+ - P_f^-}{P_f} \leq \varepsilon_{P_f}, \quad (2.45)$$

onde \hat{P}_f^+ e \hat{P}_f^- são, respectivamente, as estimativas mais alta e mais baixa calculadas usando as B RNAs na iteração atual, e a tolerância ε_{P_f} é considerada como 0,015. A convergência é alcançada quando o critério é satisfeito na iteração atual. Se o critério for satisfeito, o algoritmo é finalizado e a P_f resultante é calculada pela média de todas as probabilidades de falha dadas pela Equação 2.44. Caso contrário, o algoritmo continua.

6. Avaliação da função de aprendizagem e identificação dos pontos a serem incluídos no plano de experimentos. Uma função de aprendizagem adequada é avaliada na população (MARELLI & SUDRET, 2016); (GOMES, 2018); (GOMES, 2019) e um ou mais pontos pertencentes à população são escolhidos de acordo com os valores apresentados pela função de aprendizagem. A função de aprendizagem, dada pela Equação 2.46, considera as incertezas de classificação das amostras populacionais

$$U_{FBR} = \left| \frac{B_s(\mathbf{x}^{(i)}) - B_f(\mathbf{x}^{(i)})}{B} \right|, \quad (2.46)$$

onde $U_{FBR}(\mathbf{x}^{(i)})$ é a chamada fração de réplicas de *bootstrap* com falha, $B_s(\mathbf{x}^{(i)})$ e $B_f(\mathbf{x}^{(i)})$ são as quantidades de metamodelos que identificam a amostra $\mathbf{x}^{(i)}$ como estando na região segura e na região de falha, respectivamente. Valores de $U_{FBR}(\mathbf{x}^{(i)})$ próximos de zero implicam maior incerteza na classificação do ponto, pois aproximadamente metade dos metamodelos estariam indicando a ocorrência de falha para esse ponto e a outra metade de segurança. Valores unitários implicam que todos os B metamodelos estão levando à mesma classificação, portanto menos incerteza na classificação. O U_{FBR} é avaliado em toda a população e n_{ADD} pontos são selecionados, dentre os que apresentam o menor valor do U_{FBR} , e adicionado ao plano de experimentos. A função de estado limite é avaliada nesses pontos e as novas informações são adicionadas ao plano de experimentos. O número de pontos amostrais a serem adicionados em cada etapa de enriquecimento (n_{ADD}) é adotado como sendo $n_{ADD} = 3$.

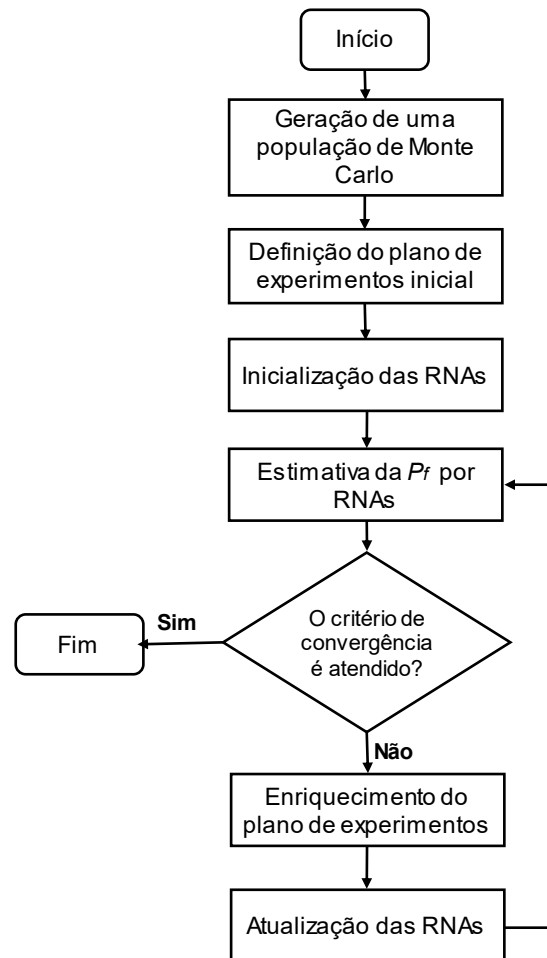
7. Atualização das RNAs. A atualização das RNAs é basicamente um novo treinamento das redes neurais existentes usando o plano de experimentos enriquecido.

Primeiramente, as n_{REP} redes com piores desempenho são melhoradas ou substituídas e as n_{REP} primeiras RNAs são escolhidas como candidatas a substituir as piores. Durante o processo de melhoria, o número de neurônios na camada oculta das n_{REP} redes com piores desempenhos é aumentado em um (+1). Em seguida, as novas redes são treinadas e são calculados seus desempenhos. Se o desempenho de uma rede for melhorado, a nova RNA (com aumento do número de neurônios na camada oculta) substitui a pior. Porém, caso o desempenho não melhore, ou se a j -ésima pior rede neural já tenha atingido o número máximo de neurônios na camada oculta, então essa rede é substituída pela j -ésima melhor. Por fim, o algoritmo retorna ao passo 4. O número n_{REP} de RNAs a serem possivelmente melhoradas ou substituídas em cada iteração é dado pelo número de metamodelos com um erro maior que um certo limite. O limite é tomado como sendo o menor erro obtido pelas RNAs mais α vezes o seu desvio padrão, com $\alpha = 1,5$. Além disso, n_{REP} é sempre tomado como maior ou igual a um e menor ou igual a $B/2$, de modo que pelo menos uma e no máximo metade das RNAs são substituídas por iteração.

O fluxograma do algoritmo é apresentado na Figura 2.15. Maiores detalhes sobre a construção e a adaptação do metamodelo podem ser consultados em Gomes (2018) e Gomes (2019).

A estratégia adaptativa proposta em Gomes (2018) é aplicada aos exemplos apresentados no próximo capítulo. O procedimento não adaptativo também é considerado para fins de comparação no Capítulo 4, e corresponde ao adaptativo sendo que com um número maior de pontos iniciais e uma única iteração, o que corresponde à aplicação de uma tolerância ε_{Pf} muito grande. A metodologia adaptativa apresentada em Gomes (2018) foi posteriormente explorada em Gomes (2020), no contexto de redes neurais artificiais com muitas camadas, conhecidas na literatura como *deep neural networks*, mas estas não são consideradas aqui.

Figura 2.15: Algoritmo das RNAs adaptativas



Fonte: Elaborado pelo autor.

3 MÓDULOS COMPUTACIONAIS DESENVOLVIDOS E DESCRIÇÃO DOS PROBLEMAS DE CONFIABILIDADE

Este capítulo apresenta o modo de funcionamento dos módulos computacionais desenvolvidos e as características e incertezas dos problemas analisados no presente trabalho. Para o estudo, foram selecionados alguns dos principais problemas encontrados na literatura e que abordam a análise de confiabilidade de estruturas de aço em situação de incêndio.

Os exemplos escolhidos possuem em comum a tentativa de analisar o problema de uma maneira mais completa, porém, nesses casos, os autores se depararam com um alto custo computacional. Assim, esses autores foram obrigados a reduzirem significativamente o número de simulações de MCS, a ignorar a fase de resfriamento dos gases e/ou a ignorar algumas fontes de incertezas (GERNAY *et al.*, 2016). Em outros casos, o método FORM foi utilizado, no intuito de ser ter um custo computacional aceitável (BALOGHA & VIGH, 2016); (GUO & JEFFERS, 2014).

Houve ainda situações onde a proteção térmica dos elementos foi ignorada (RICARDO, 2015), ou se utilizou uma grande quantidade de computadores em paralelo para solucionar o problema (GUO & JEFFERS, 2014). No entanto, com os resultados promissores das RNAs adaptativas encontrados no exemplo de verificação no Capítulo 4, as análises desses problemas foram realizadas, aqui, sem desconsiderar parâmetros importantes para a modelagem dos problemas. Além disso, apenas um computador pessoal foi utilizado.

Na literatura disponível, até o momento, a maioria dos estudos foi realizada para determinar a confiabilidade das estruturas de aço submetidas ao fogo em nível de membros individuais ou, em raros casos, empregando modelos estruturais bidimensionais com significativas simplificações. Entretanto, não foram encontrados trabalhos que apresentem análises a nível de sistema estrutural (global), muito provavelmente, devido a alta demanda computacional desse tipo de problema. Portanto, no presente estudo, também um sistema estrutural tridimensional de uma edificação de aço é apresentado e avaliado. Como a laje pode gerar um efeito benéfico para a confiabilidade, devido ao aumento da rigidez do sistema estrutural (GERNAY *et al.*, 2016), os resultados são comparados para o problema modelado considerando uma laje de concreto e sem considerar a mesma laje.

O primeiro exemplo é utilizado para verificar a acurácia e a eficiência dos módulos computacionais desenvolvidos. Por esse motivo, tal exemplo é resolvido considerando os

mesmos parâmetros adotados em Ricardo (2015). Todavia, os demais problemas são adaptados de maneira a considerar um maior número de incertezas, incluindo as incertezas sobre o material de proteção térmica e sobre as propriedades térmicas e mecânicas da estrutura de aço em função da temperatura. A inclusão de mais fontes de incertezas torna o problema mais complexo, porém permite quantificar a resposta estrutural de maneira mais realística.

Um processador Intel Core I3, CPU 2365@1.40 GHz, com 4 Gb de memória RAM, foi utilizado para a análise dos exemplos de verificação, descritos na Seção 3.2, do mesmo modo que em Ricardo (2015). Porém, como os demais problemas, descritos nas seções 3.3 a 3.6, tendem a apresentar custos computacionais maiores do que os exemplos de verificação, esses problemas são resolvidos empregando um processador Intel® Core™ i5-10400 CPU@2.90 GHz, com 16 Gb de memória RAM. Esses custos podem ser atribuídos tanto à baixa probabilidade de falha do problema para tempos de incêndios relativamente altos, o que tende a requerer um maior número de simulações, quanto à complexidade da análise termoestrutural e ao grande número de parâmetros assumidos como VAs dependentes da temperatura.

Uma malha altamente refinada, ou seja, com uma alta discretização do elemento finito, oferece resultados mais precisos, porém pode acarretar no aumento do custo de processamento computacional do problema. Por isso, em todos os exemplos desse trabalho, a malha foi adequadamente refinada para obter uma resposta suficientemente precisa. Para isso, teste preliminares foram realizados diminuindo o refinamento da malha até que o erro relativo do resultado começasse a divergir daqueles esperados para uma malha bem refinada.

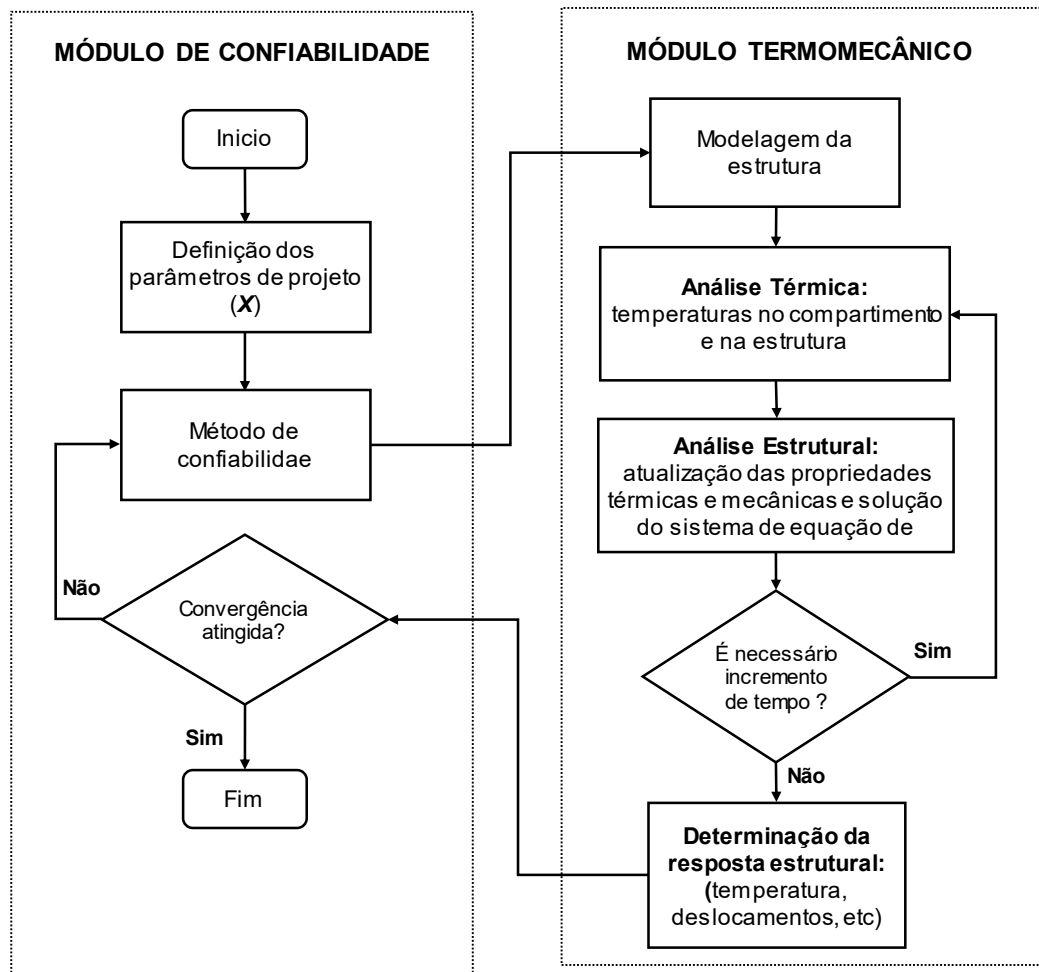
Nos exemplos das Seções 3.2 e 3.3, que se consideram elementos finitos do tipo sólido, o comando DESIZE (ANSYS versão 19.2) foi utilizado para controlar o refinamento da malha. Onde ao longo do comprimento do elemento, dividiu-o em 100 partes ($L/100$) e nas outras direções, o ANSYS, recursivamente, defini o número de elementos adequados. Nos demais exemplos, apresentados nas Seções 3.4, 3.5 e 3.6, e que se considera o elemento finito do tipo BEAM, aplica-se o comando SECTYPE (ANSYS versão 19.2), e define-se o nível de refinamento da malha para seções de vigas de paredes finas com bom nível de refinamento de malha. Para a laje de concreto do último exemplo, apresentado na Seção 3.6, dividiu-se o elemento SHELL em 6 partes ao longo da seção transversal e em 100 partes no plano da laje.

3.1 MÓDULOS COMPUTACIONAIS DESENVOLVIDOS

A fundamentação teórica apresentada no capítulo anterior foi utilizada para desenvolver e acoplar módulos computacionais, que foram aplicados na resolução dos problemas descritos no presente capítulo. Nos referidos módulos foram inseridas as propriedades térmicas e mecânicas dos problemas, bem como os parâmetros determinísticos, as VAs e as funções de estado limite. Os problemas foram resolvidos por meio de um módulo de confiabilidade estrutural desenvolvido em MATLAB, que inclui os métodos FORM e MCS, além de redes neurais artificiais. Para o caso das RNAs, foi utilizada a caixa de ferramentas específica do MATLAB. O módulo de confiabilidade foi acoplado ao pacote computacional de elementos finitos ANSYS (ANSYS versão 19.2). Os modelos de elementos finitos foram implementados em um módulo termomecânico, que utiliza a linguagem APDL (*ANSYS Parametric Design Language*). Alguns códigos computacionais do módulo termomecânico são fornecidos em linguagem APDL no Apêndice A, do presente trabalho.

O acoplamento dos módulos de confiabilidade e termomecânico é realizado por meio de arquivos de texto (.txt), onde a rotina no MATLAB altera os parâmetros do problema em um arquivo que serve de entrada para o ANSYS e as respostas são retornadas ao MATLAB por meio de outro arquivo de saída. A Figura 3.1 mostra o diagrama resumido da operação dos módulos acoplados. Dependendo do caso, o método de confiabilidade, mencionado na Figura 3.1, pode ser o FORM, o MCS ou o MCS combinado com as RNAs adaptativas.

Figura 3.1: Módulos acoplados.



Fonte: Adaptado de Ricardo & Gomes (2021).

Os módulos computacionais foram, a princípio, aplicados a exemplos da literatura (RICARDO, 2015); (CHEUNG *et al.*, 2012); (MARCOLAN JÚNIOR, 2016), levando a resultados consistentes com os apresentados nesses trabalhos. Porém, no capítulo 4, apresentam-se apenas os resultados da análise de confiabilidade de uma viga e de um pilar, ambos de aço e sem proteção térmica, apresentados originalmente em Ricardo (2015) e descritos na Seção 3.2, da presente tese.

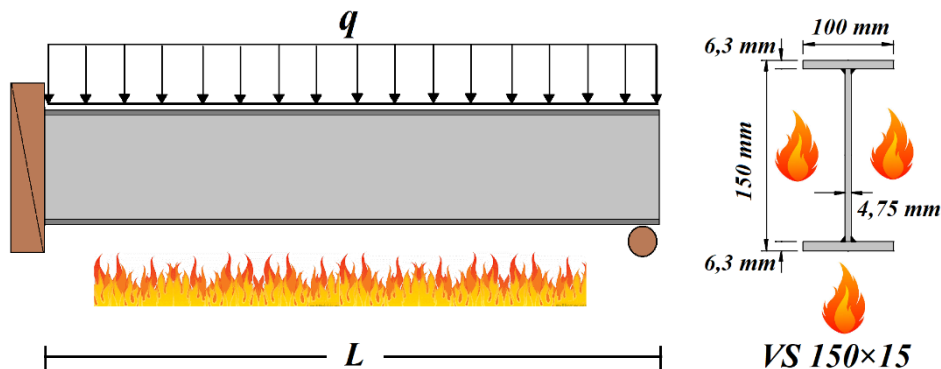
3.2 EXEMPLOS DE VERIFICAÇÃO DOS MÓDULOS COMPUTACIONAIS: VIGA E PILAR DE AÇO

Para verificar os módulos computacionais desenvolvidos, uma viga e um pilar de aço, termicamente desprotegidos foram avaliados. A viga e o pilar de aço foram previamente dimensionados de acordo com a norma brasileira de dimensionamento de estruturas metálicas, ABNT NBR 8800 (2008). A opção pela não inclusão da proteção térmica está de acordo com a realidade brasileira da maioria dos projetos estruturais dimensionados antes da criação da norma ABNT NBR 14323:2013. Além disso, o estudo de segurança contra incêndio, geralmente, não faz parte do currículo acadêmico dos cursos de graduação em engenharia no Brasil. Além disso, muitas cidades não exigem verificações de segurança estrutural para a situação de incêndio. Conseqüentemente, ainda hoje, muitos projetos de estruturas de aço são verificados apenas para a temperatura ambiente, sem considerar uma possível necessidade de proteção térmica.

3.2.1 Geometria dos elementos estruturais

A viga de aço, apresentada em Ricardo (2015), de comprimento $L = 3$ m, é considerada engastada-apoiada e sujeita a um carregamento distribuído (q). O carregamento consiste em uma parcela permanente (N_{per}) e outra variável (N_{var}), com valores nominais de 13,953 e 8,372 kN/m, respectivamente. A viga possui perfil I soldado VS 150×15 com limite de escoamento médio de 380 MPa e está sujeita ao incêndio nas laterais e na parte inferior, conforme mostrado na Figura 3.2. O topo da viga é considerado uma superfície adiabática.

Figura 3.2: Viga de aço termicamente desprotegida.

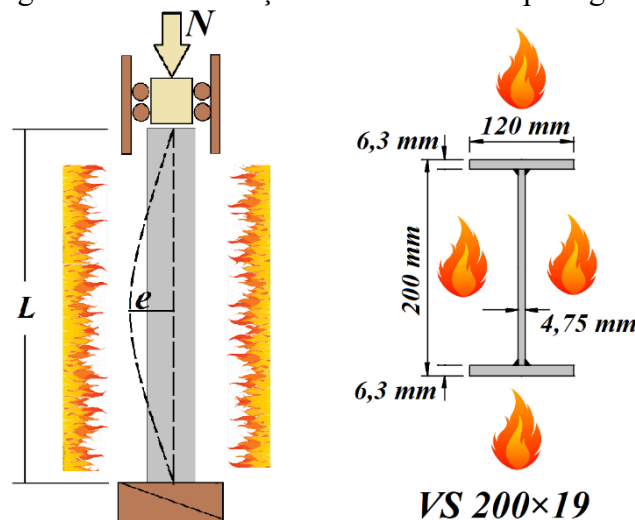


Fonte: Adaptado de Ricardo & Gomes (2021).

O pilar de aço, apresentado também em Ricardo (2015), com altura $L = 3$ m, é considerado engastado-apoiado, e está sujeito a um carregamento concentrado N em uma de suas extremidades. Esse carregamento é composto por parcelas permanente e variável, com valores nominais de 69,750 e 41,875 kN, respectivamente. Esses valores de carregamentos e os apresentados para a viga são aplicados à Equação 2.32 para simular o possível carregamento que poderá estar atuando sobre a estrutura em um caso de incêndio.

O pilar em questão tem um perfil I soldado VS 200×19 com limite de escoamento médio de 380 MPa. A coluna é submetida ao fogo em suas quatro faces, conforme indica a Figura 3.3.

Figura 3.3: Pilar de aço termicamente desprotegido.



Fonte: Adaptado de Ricardo & Gomes (2021).

3.2.2 Definição de falha nos elementos

A falha no pilar foi considerada ocorrendo por flambagem global, e a estabilidade local da seção transversal foi verificada durante o dimensionamento à temperatura ambiente, como também foi feito por Guo & Jeffers (2014). Para considerar numericamente a possibilidade de ocorrência de falha por flambagem global, é aplicada uma imperfeição geométrica (e) no centro do pilar, gerada por uma perturbação na direção de menor inércia, equivalente a 0,05 da ação atuante na extremidade da coluna (RICARDO, 2015), conforme mostrado na Figura 3.3.

3.2.3 Elemento finito adotados para a viga e o pilar

Em ambos os problemas, as condições de contorno dos apoios foram consideradas restringindo os movimentos dos nós em três direções para os apoios engastados e limitando o movimento em um de suas direções para as extremidades apoiadas.

Os elementos estruturais são modelados no *software* ANSYS usando o método dos elementos finitos. Tanto para viga quanto para o pilar, nas análises térmicas e estruturais optou-se por utilizar o elemento finito SOLID45 (ANSYS versão 19.2), que possui capacidade de condução térmica tridimensional

O elemento SOLID45 é definido por oito nós com três graus de liberdade em cada nó, que correspondem às translações, e permite a análise de problemas de natureza não linear (física e geométrica). A solução usando SOLID45 pode ser obtida em termos de deslocamento nodal, tensão ou deformação usando a formulação baseada em deslocamentos. Esse elemento permite a aplicação de forças concentradas nos nós e forças distribuídas ao longo de seu comprimento. Mais detalhes sobre esses e outros tipos de elementos podem ser encontrados no ANSYS.

3.2.4 Simulação do comportamento estrutural

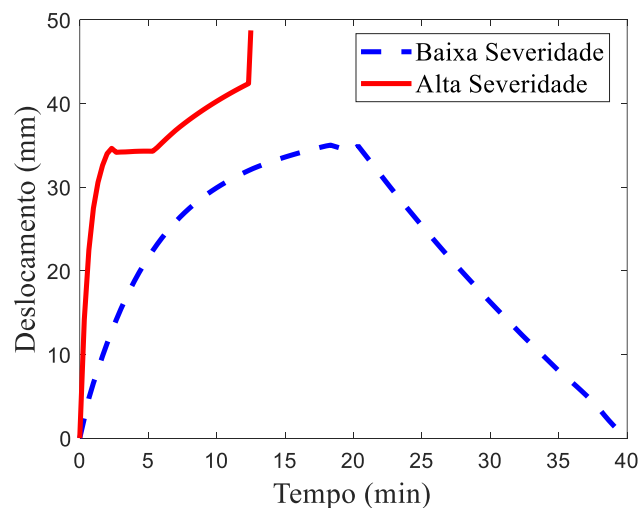
Em todos os problemas deste trabalho, a simulação do comportamento estrutural é realizada aplicando inicialmente ações constantes a cada um dos elementos estruturais. Em seguida, as superfícies expostas ao fogo são consideradas aquecidas uniformemente (RICARDO, 2015); (ABNT NBR 14323, 2013), e então os campos de deslocamento nos elementos são determinados, em incrementos de tempo, levando em consideração as variações nas propriedades térmicas e mecânicas. Para a viga e o pilar em questão, adota-se 10 s de incremento e para os demais problemas, 30 s.

O método iterativo de Newton-Raphson é usado para resolver o problema de equilíbrio em cada etapa de tempo. Esse processo continua até que o incêndio termine ou o elemento estrutural apresente um escoamento generalizado. Isso pode ser verificado nos gráficos de deslocamento *versus* duração do incêndio, que representam o comportamento do elemento estrutural (Figura 3.4), considerando, por exemplo, o deslocamento em um ponto representativo em função da duração e da severidade do incêndio e das ações aplicadas. O ponto escolhido pode ser um ponto central inferior para o caso da viga e um ponto no centroide a meia altura

para o caso do pilar. Esta verificação deve ser realizada para cada instante de tempo, considerando o respectivo campo de temperatura e seu efeito nas propriedades mecânicas do material ao longo do elemento estrutural, bem como a aleatoriedade das variáveis que definem a resistência dos elementos, e a severidade do incêndio e do carregamento.

Em algumas análises não lineares, onde o método de Newton-Raphson é utilizado, a matriz de rigidez pode apresentar problemas de convergência. Nesses casos, o ANSYS ativa, recursivamente, o método de comprimento de arco.

Figura 3.4: Exemplo de deslocamentos em função da severidade e da duração do incêndio.



Fonte: adaptado de Ricardo & Gomes (2021).

Os modos de falha, normalmente, estão relacionados à resistência do material, à estabilidade dos elementos estruturais e aos limites de serviço aplicáveis (GUO *et al.*, 2012). No entanto, como a determinação das funções de estado limite para a situação de incêndio não é simples, é comum adotar critérios simplificados de estado limite (GUO & JEFFERS, 2014). Assim, o presente estudo adota um critério de falha baseado em um limite de tempo de resistência ao fogo. Esse critério contempla indiretamente a resistência, a estabilidade e os requisitos de serviço, pois os modelos numéricos usados tentam considerar a resistência e a estabilidade do elemento estrutural, e os requisitos de serviço são, geralmente, limitados à necessidade da estrutura suportar as ações por tempo suficiente para que o edifício seja desocupado ou para que medidas de contenção e de extinção de incêndio sejam aplicadas. Assim, considera-se a ocorrência de falha quando o elemento de aço perde sua capacidade de

carga em um tempo de fogo menor que o mínimo requerido. A respectiva função de estado limite é dada pela Equação 3.1:

$$g(\mathbf{x}) = T_{falha}(\mathbf{x}) - T_{incêndio}(\mathbf{x}), \quad (3.1)$$

onde $T_{falha}(\mathbf{x})$ é uma função das VAs e seu valor representa o tempo de incêndio necessário para causar a falha do elemento de aço, e $T_{incêndio}(\mathbf{x})$ representa a duração do incêndio. Esse tipo de função de estado limite, que considera indiretamente a falha definida em termos de deformação limite, por exemplo, tem sido comumente utilizada na literatura (GUO *et al.*, 2012); (SHI *et al.*, 2013); (RICARDO, 2015); (BALOGHA & VIGH, 2016); (GERNAY *et al.*, 2016).

3.2.5 Parâmetros estatísticos adotados nos problemas

Existe um grande número de parâmetros incertos que podem ser considerados no modelo estrutural em situação de incêndio, tais como aqueles relacionados à curva paramétrica de incêndio, às ações, às propriedades térmicas e mecânicas do aço, à temperatura e à geometria. Porém, dependendo do coeficiente de sensibilidade e da variância, os parâmetros podem ser considerados como variáveis aleatórias ou determinísticas. Assim, com base na literatura e em análise prévia dos coeficientes de sensibilidade e de variância, os parâmetros apresentados na Tabela 3 foram definidos como VAs. Todas as VAs foram consideradas independentes, da mesma forma que foi assumido em Wang *et al.* (2010), Cheung *et al.* (2012), Guo *et al.* (2012), Eamon & Jensen (2012), Shi *et al.* (2013), Guo & Jeffers (2014), Van Coile *et al.* (2014), Ricardo (2015) e Balogh & Vigh (2016).

Tabela 3 – Parâmetros aleatórios usados para o estudo da viga e pilar

Tipo de análise	Parâmetro	Média	Unid.	Desvio Padrão	Tipo de distribuição	Referência
Modelo incêndio natural	Carga de incêndio (q_{fi})	213,02	$\frac{MJ}{m^2}$	$0,57 \times \text{média}$	Lognormal	Assis (2001)
	Inércia térmica (b)	423,5	$\frac{Ws^{1/2}}{m^2} K$	$0,09 \times \text{média}$	Normal	Guo & Jeffers (2014)
Carregamento	ação permanente (N_{per})	$1,05 \times \text{Nominal}$	N	$0,10 \times \text{média}$	Normal	Ellingwood (2005),
	ação variável (N_{var})	$0,24 \times \text{Nominal}$	N	$0,80 \times \text{média}$	Gama	Iqbal & Harichandran (2010)
	A_a	1,0	---	$0,04 \times \text{média}$	Normal	Ravindra & Galambos (1978)
	B_a	1,0	---	$0,20 \times \text{média}$	Normal	
	E_a	1,0	---	$0,05 \times \text{média}$	Normal	
Resistência do aço	Resistência ao escoamento (f_y)	$1,04 \times \text{Nominal}$	MPa	$0,08 \times \text{média}$	Normal	Guo & Jeffers (2014) e (Guo <i>et al.</i> , 2012)

Fonte: Elaborado pelo autor.

A carga média de combustível por área de piso é considerada como 901,02 MJ/m² (ASSIS, 2001). Assim, para um compartimento com dimensões de piso de 4,00 m × 6,00 m e altura de 2,80 m (RICARDO, 2015), e um fator de abertura $O_{max} = 0,04 \text{ m}^{1/2}$ (GUO & JEFFERS, 2014); (SHI *et al.*, 2013); (GUO *et al.*, 2012); (RICARDO, 2015), obtém-se uma carga de combustível por área de superfície total de 213,02 MJ/m². No cálculo da carga média de combustível por área do piso, apenas a carga de incêndio dividida pela área do piso do compartimento é considerada, mas na determinação da carga de combustível por área de superfície total, áreas do piso, parede e teto são consideradas, e as aberturas do compartimento são excluídas. Também se assume que as paredes e o teto são revestidos com gesso, cuja inércia térmica média é de 423,5 Ws^{1/2}/m²K (IQBAL & HARICHANDRAN, 2010), (GUO & JEFFERS, 2014). A carga de combustível (q_{fi}) e a inércia térmica (b) são consideradas como VAs e definem a aleatoriedade da curva de fogo natural. As outras VAs ilustradas governam a resistência (f_y) e a solitação atuando na estrutura (N_{per} , N_{var} , A_a , B_a , E_a).

Admite-se que o coeficiente de Poisson e a densidade do aço são determinísticos e iguais a 0,3 e 7850 kg/m³, respectivamente (RICARDO & GOMES, 2021). Do mesmo modo, o coeficiente de transferência de calor por convecção e a emissividade são adotados como constantes e iguais a 35 W/m²·K e 0,70, respectivamente (CEN, 2005).

Os parâmetros relacionados às propriedades mecânicas e térmicas da estrutura, tais como limite de escoamento, diagrama tensão-deformação específica, deformação térmica

específica, calor específico e condutividade térmica, são considerados determinísticos, porém se alteram com a variação da temperatura, conforme sugere a norma ABNT NBR 14323 (2013) e conforme apresentado, anteriormente, na Seção 2.1.2.

A Tabela 4 apresenta um resumo sobre os parâmetros variáveis (que não foram apresentados de maneira direta na Tabela 3) e determinísticos, considerados nos problemas e descritos ao longo da presente seção.

Tabela 4 – Resumo dos parâmetros considerados nos problemas – viga e pilar

Elemento de aço	Parâmetro	Valor	Unid.	Determinístico ou variável aleatória?	Referência
viga	ação permanente nominal (N_{per})	13,953	kN/m	variável	Ricardo (2015)
	ação variável nominal (N_{var})	8,372	kN/m	variável	Ricardo (2015)
pilar	ação permanente nominal (N_{per})	69,750	kN	variável	Ricardo (2015)
	ação variável nominal (N_{var})	41,875	kN	variável	Ricardo (2015)
viga e pilar	limite de escoamento médio (f_y)	380	MPa	variável	Ricardo (2015)
	coeficiente de Poisson	0,3	---	determinístico	ABNT NBR 8800 (2008)
	densidade	7850	Kg/m ³	determinístico	ABNT NBR 8800 (2008)
	coeficiente de transferência de calor por convecção	35	W/m ² K	determinístico	CEN (2005)
	emissividade	0,7	---	determinístico	CEN (2005)
	comprimento	3	m	determinístico	Ricardo (2015)
	fator de abertura nominal	0,04	m ^{1/2}	determinístico	Guo & Jeffers (2014)

3.2.6 Métodos de confiabilidade aplicados aos problemas

O método MCS simples foi utilizado em cada caso considerando mil simulações, o que permite o cálculo da P_f dentro de intervalos de confiança aceitáveis para as comparações feitas no presente trabalho. Os resultados obtidos via MCS foram tomados como referência. As probabilidades de falha também foram determinadas pelo método FORM, e o MCS combinado com RNAs adaptativas e não adaptativas, com os metamodelos sendo usados para substituir a função de estado limite dada pela Equação 3.1.

As probabilidades de falha calculadas pelas RNAs adaptativas e não adaptativas foram obtidas empregando a mesma população de Monte Carlo, utilizando as mesmas cadeias de números pseudo-aleatórios. Além disso, o tamanho do projeto experimental inicial do caso não adaptativo foi considerado igual ao tamanho final do caso adaptativo, como em Gomes (2018), de forma que os dois casos fossem comparados em condições semelhantes.

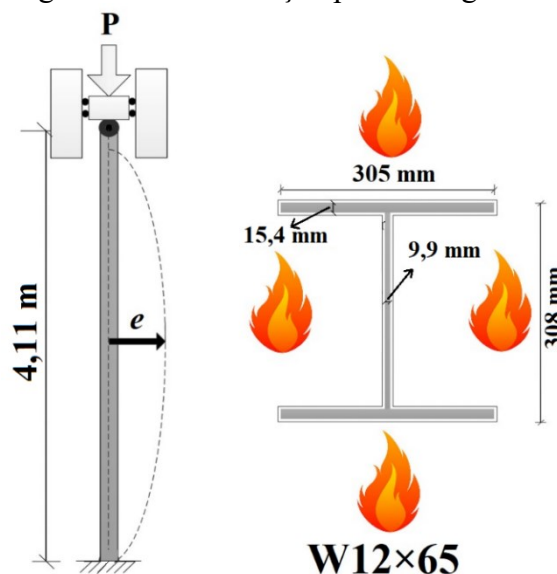
3.3 PROBLEMA 1: PILAR DE AÇO TERMICAMENTE PROTEGIDO

Este exemplo consiste na análise de confiabilidade de um pilar de aço (apoiado-engastado) termicamente protegido por uma argamassa cimentícia resistente ao fogo e aplicada por jateamento SFRM. O problema, proposto em Guo & Jeffers (2014), considera o incêndio modelado pela curva natural compartimentada (equações 2.1–2.13). No entanto, para fins de comparação, aqui o pilar é também submetido à curva de incêndio padronizada ISO 834 (Equação 2.14) considerando um TRRF de 120 min.

3.3.1 Geometria do pilar

De acordo com os requisitos de projeto, uma seção W12×65 mostrou-se adequada para suportar aos carregamentos impostos à estrutura. As propriedades geométricas da seção são mostradas na Figura 3.5.

Figura 3.5: Pilar de aço apoiado-engastado.



Fonte: Adaptado de Guo & Jeffers (2014).

3.3.2 Definição da falha e condições de contorno do problema

Assim como na Seção 3.2, aqui a falha foi definida em termos de uma deformação limite generalizada em um determinado tempo de incêndio (isto é, o colapso global do elemento), conforme Equação 3.1. Essa definição fornece uma maneira mais conveniente de estimar a resposta estrutural porque é o resultado típico de uma simulação não linear via elementos finitos (GUO & JEFFERS, 2014). A estabilidade local da seção transversal foi verificada à temperatura ambiente (GUO & JEFFERS, 2014). Novamente uma imperfeição geométrica (e) é aplicada no centro do pilar, equivalente a 0,05 da carga atuante na extremidade da coluna, no intuito de capturar a possível falha por instabilidade global.

As condições de contorno dos apoios são as mesmas do pilar descrito na seção anterior.

Uma espessura nominal de 28,6 mm para o SFRM é considerada para fornecer uma resistência ao fogo de 120 min (GUO & JEFFERS, 2014). Originalmente, a densidade, a condutividade térmica e o calor específico médios do SFRM foram considerados como sendo iguais a 300 kg/m³, 0,12 W/(m·K) e 1200 J/(kg·K), respectivamente (IQBAL & HARICHANDRAN, 2010), (GUO & JEFFERS, 2014). Porém, para o elemento estrutural em questão, os modelos probabilísticos apresentados em Khorasani *et al.* (2015) são adotados para que se possa levar em consideração a incerteza no comportamento do material de proteção em função das elevadas temperaturas, conforme as equações 2.17–2.19.

No problema original, Guo & Jeffers (2014) consideram as propriedades térmicas e mecânicas da estrutura de aço dependentes da temperatura, conforme as recomendações do Eurocode 3 (CEN, 2005) Aqui, tais propriedades são consideradas seguindo as recomendações do *European Committee for Standardization* (CEN, 2005) e da ABNT NBR 14323 (2013), conforme apresentado na Seção 2.1.2, do presente trabalho. Além disso, os modelos probabilísticos apresentados em Khorasani *et al.* (2015) e Qureshi *et al.* (2020) são adotados para que se possa levar em consideração as incertezas no comportamento das propriedades térmicas e mecânicas da estrutura de aço, conforme se apresentam nas equações 2.21–2.28.

Os carregamentos permanente e variável determinados a partir do projeto à temperatura ambiente são de 1226 e 605 kN, respectivamente. Assim como em Guo & Jeffers (2014) e Ricardo (2015), os carregamentos são inseridos na Equação 2.32.

O limite de escoamento nominal adotado para o aço foi de 345 MPa. Com base no fato de que a resistência ao escoamento real tende a exceder a resistência nominal assumida no

projeto, um fator de 1,04 foi utilizado, multiplicando o valor nominal (GUO & JEFFERS, 2014). O módulo de elasticidade à temperatura ambiente adotado é de 200 GPa (GUO & JEFFERS, 2014). Admite-se que o coeficiente de Poisson e a densidade do aço são constantes e iguais a 0,3 e 7850 kg/m³, respectivamente (RICARDO & GOMES, 2021).

Considera-se, conforme Guo & Jeffers (2014), que a coluna está localizada em um compartimento com dimensões de piso de 4,75 m × 6,70 m e uma altura de 3,04 m. A carga média de combustível por área de piso é considerada como sendo igual a 564 MJ/m², resultando em uma carga de combustível por área de superfície total de 132,9 MJ/m².

As paredes e o teto foram considerados revestidos com placas de gesso, que possui uma inércia térmica média $b = 423,5 \text{ W s}^{1/2}/\text{m}^2\text{K}$ (IQBAL & HARICHANDRAN, 2010), (GUO & JEFFERS, 2014). O fator de abertura médio nominal foi assumido como sendo 0,04 m^{1/2} (GUO *et al.*, 2012); (SHI *et al.*, 2013); (GUO & JEFFERS, 2014); (RICARDO & GOMES, 2021) e é aplicado à Equação 2.1 para considerar as incertezas do fator.

A coluna foi considerada aquecida uniformemente em todos os lados. O fator de massividade para o perfil exposto em 4 lados é igual a 149,62 m⁻¹. O coeficiente de transferência de calor por convecção e a emissividade são adotados como sendo determinísticos e iguais a 35 W/m²·K e 0,70, respectivamente, (CEN, 2005). Quando a curva ISO é utilizada, adota-se o coeficiente de transferência de calor por convecção igual a 25 W/m²·K, conforme recomenda a ABNT NBR 14323 (2013).

Nas análises térmicas e estruturais, utilizou-se, novamente, o elemento finito SOLID45 (ANSYS versão 19.2).

3.3.3 Variáveis aleatórias e resumo sobre os parâmetros considerados no problema

Os parâmetros de incerteza relacionados à curva natural de incêndio, aos carregamentos, às propriedades térmicas e mecânicas do aço, à geometria do compartimento e às propriedades do material de proteção térmica são definidos como variáveis aleatórias, conforme resumido na Tabela 5.

Tabela 5 – Variáveis aleatórias do pilar termicamente protegido

Tipo de análise	Parâmetro	Média	Unid.	Desvio Padrão	Tipo de distribuição	Referência
Modelo incêndio natural	Carga de incêndio (q_f)	132,9	$\frac{MJ}{m^2}$	$0,62 \times \text{média}$	Gumbel	Guo & Jeffers (2014)
	Inércia térmica (b)	423,5	$\frac{W_s^{1/2}}{m^2} K$	$0,09 \times \text{média}$	Normal	Guo & Jeffers (2014)
	Fator de abertura	Equação 2.1	$m^{1/2}$	0,2	Lognormal	JCSS (2001)
Propriedades do SFRM	Espessura	$Nominal + 1,6$	mm	$0,2 \times \text{média}$	Lognormal	Guo & Jeffers (2014)
	Condutividade	Equação 2.17	W/(m·K)	1	Normal	Khorasani <i>et al.</i> (2015)
	Calor específico	Equação 2.18	J/(kg·K)	1	Normal	Khorasani <i>et al.</i> (2015)
	Densidade	Equação 2.19	Kg/m ³	1	Normal	Khorasani <i>et al.</i> (2015)
Propriedades do aço	Condutividade em função da temperatura	Equação 2.24	W/(m·K)	1	Normal	Khorasani <i>et al.</i> (2015)
	Coefficiente de dilatação em função da temperatura	Equação 2.25	°C ⁻¹	1	Normal	Khorasani <i>et al.</i> (2015)
Carregamento	ação permanente (N_{per})	$1,05 \times Nominal$	N	$0,10 \times \text{média}$	Normal	Ellingwood (2005),
	ação variável (N_{var})	$0,24 \times Nominal$	N	$0,80 \times \text{média}$	Gama	Iqbal & Harichandran (2010)
	A_a	1,0	---	$0,04 \times \text{média}$	Normal	Ravindra & Galambos (1978)
	B_a	1,0	---	$0,20 \times \text{média}$	Normal	
	E_a	1,0	---	$0,05 \times \text{média}$	Normal	
Resistência do aço	Resistência ao escoamento (f_y)	$1,04 \times Nominal$	MPa	$0,08 \times \text{média}$	Normal	Guo & Jeffers (2014) e (Guo <i>et al.</i> , 2012)
	Fator de redução da resistência ao escoamento	Equação 2.21	---	Equação 2.21	Lognormal	Qureshi <i>et al.</i> (2020)
	Fator de redução do limite de proporcionalidade	Equação 2.22	---	Equação 2.22	Lognormal	Qureshi <i>et al.</i> (2020)
	Fator de redução do módulo de elasticidade	Equação 2.23	---	1	Normal	Khorasani <i>et al.</i> (2015)

Fonte: Elaborado pelo autor.

A Tabela 6 apresenta o resumo de alguns dos parâmetros aleatórios, que são indiretamente citados na Tabela 5, e os determinísticos, apresentado ao longo da Seção 3.3.

Tabela 6 – Resumo dos parâmetros considerados no problema – pilar protegido

Parâmetro	Valor	Unid.	Determinístico ou variável aleatória?	Referência
ação permanente nominal (N_{per})	1226	kN	variável	Guo & Jeffers (2014)
ação variável nominal (N_{var})	605	kN	variável	Guo & Jeffers (2014)
limite de escoamento médio (f_y)	345	MPa	variável	Guo & Jeffers (2014)
coeficiente de Poisson	0,3	---	determinístico	ABNT NBR 8800 (2008)
densidade	7850	Kg/m ³	determinístico	ABNT NBR 8800 (2008)
módulo de elasticidade	200	GPa	determinístico	Guo & Jeffers (2014)
coeficiente de transferência de calor por convecção	35 (natural) 25 (ISO 834)	W/m ² K	determinístico	CEN (2005); ABNT NBR 14323 (2013)
emissividade	0,7	---	determinístico	CEN (2005)
comprimento do pilar	4,11	m	determinístico	Guo & Jeffers (2014)
fator de abertura nominal	0,04	m ^{1/2}	variável	Guo & Jeffers (2014); JCSS (2001)
espessura nominal do SFRM	28,6	mm	variável	Guo & Jeffers (2014)
fator de massividade	149,62	m ⁻¹	determinístico	calculado pelo autor
TRRF	120	min	determinístico	Guo & Jeffers (2014)

3.3.4 Tempo computacional gasto no problema original

Uma análise preliminar realizada por Guo & Jeffers (2014) indicou que a probabilidade de falha era provavelmente maior que 0,01, indicando que dez mil pontos amostrais permitiriam que a probabilidade de falha fosse calculada dentro de um nível razoável de precisão. Dessa forma, no presente problema considerou-se $n_{MCS} = 10$ mil.

Para tentar reduzir o tamanho da amostra necessária, Guo & Jeffers (2014) utilizaram a técnica de redução de variância denominada amostragem por hipercubo latino (LHS). As 10 mil simulações foram realizadas no cluster NYX no Centro de Computação Avançada da Universidade de Michigan. O tempo total de computação, utilizando 40 CPUs em paralelo (Intel® Core™ i7), para MCS com amostragem por LHS foi de 173,7 h.

3.4 PROBLEMA 2: PÓRTICO DE UM GALPÃO DE ARMAZENAMENTO

Neste exemplo, as informações para a análise de confiabilidade em situação de incêndio de um pórtico pertencente ao sistema estrutural de um galpão de armazenamento são apresentadas.

3.4.1 Geometria e condições de contorno do galpão

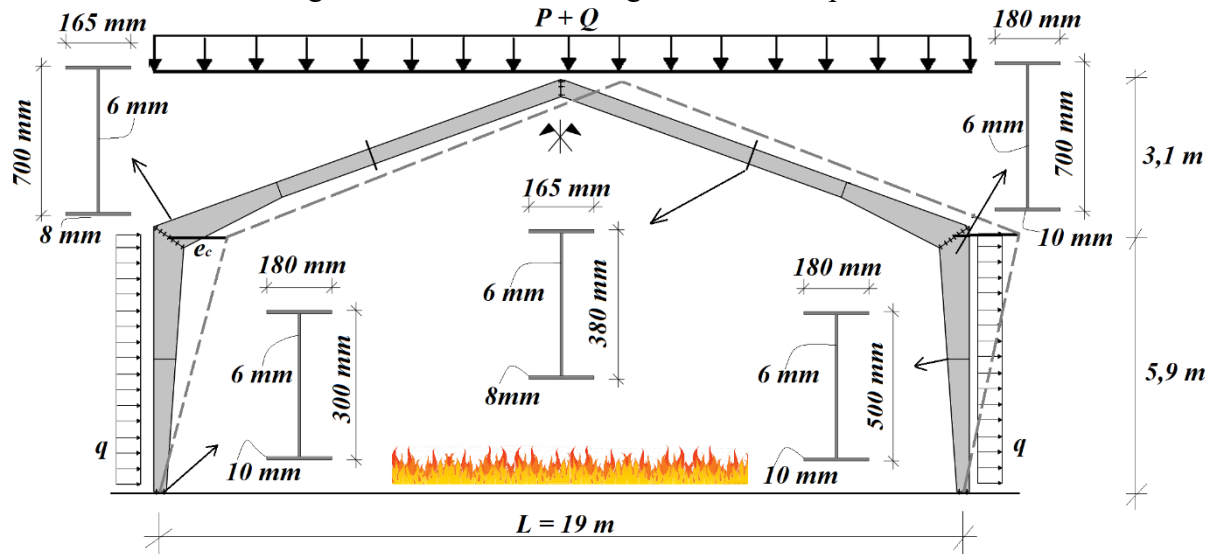
Originalmente, o pórtico, estudado por Balogh & Vigh (2016), é termicamente protegido por uma tinta intumescente e foi projetado para suportar um incêndio de 30 min de duração. Porém, para que se possa considerar o modelo que expressa a incerteza no comportamento do material de proteção em função da temperatura (KHORASANI *et al.*, 2015), a tinta intumescente foi aqui substituída por uma proteção de SFRM com uma espessura nominal de 11 mm, que também garante 30 min de resistência ao fogo, conforme apresenta o catálogo do fabricante Grace (2021), que fornece a espessura (mm) da argamassa projetada Monokote MK6 em função do fator de massividade e do TRRF, assumindo uma temperatura crítica de 550 °C (SILVA, 2004).

O galpão investigado é formado por 8 pórticos igualmente espaçados a cada 6 m, e possui dimensões de 36 m × 19 m × 9 m. No entanto, apenas o pórtico que faz parte da sala de armazenamento é analisado. Esse pórtico possui seções transversais variáveis e é modelado considerando uma imperfeição geométrica no topo do pilar, $e_c = 0,092$ m, conforme adotado por Balogh & Vigh (2016) e ilustrado na Figura 3.6.

De acordo com os dados fornecidos por Balogh & Vigh (2016), definiu-se o carregamento distribuído permanente (P) e variável (Q) médios, atuantes nas vigas do pórtico, como sendo iguais a 2,4 e 11 kN/m, respectivamente. O carregamento lateral médio (q) é considerado variável e igual a 3,48 kN/m. Os valores de carregamentos são aqui aplicados à Equação 2.32 para simular o possível carregamento na situação de incêndio.

Os apoios foram considerados engastados restringindo os movimentos dos nós nas três direções. As seções transversais do pórtico, bem como os carregamentos impostos ao sistema estrutural, são ilustradas na Figura 3.6.

Figura 3.6: Características geométricas do pórtico.



Fonte: Elaborado pelo autor.

Os fatores de redução de resistência do pórtico foram considerados em função da temperatura. Esses fatores foram calculados para rigidez e para resistência de acordo com as recomendações do Eurocode 3. Considera-se, também, as propriedades térmicas em função da temperatura, conforme proposto pelo CEN (2005) e pela norma ABNT NBR 14323 (2013), e as incertezas no comportamento das propriedades térmicas e mecânicas (KHORASANI *et al.*, 2015) (QURESHI *et al.*, 2020).

O limite de escoamento nominal adotado para o aço foi de 388 MPa (BALOGHA & VIGH, 2016). O módulo de elasticidade à temperatura ambiente é adotado como sendo 200 GPa (GUO & JEFFERS, 2014). Além disso, assume-se que o coeficiente de Poisson e a densidade do aço são iguais aos apresentados no problema anterior (0,3 e 7850 kg/m³, respectivamente).

Admite-se, conforme Balogha & Vigh (2016), que o compartimento armazena pneus de borracha em 450 m², possuindo uma carga média de combustível por área de piso igual a 1500 MJ/m², resultando em uma carga média de combustível por área de superfície total de 420 MJ/m². As paredes foram consideradas revestidas por concreto, com uma inércia térmica média $b = 1800\text{ W s}^{1/2}/\text{m}^2\text{K}$ (CHAUDHARY & ROY, 2020). O fator de abertura médio nominal foi assumido como sendo 0,048 m^{1/2} (BALOGHA & VIGH, 2016). Admite-se que o material combustível armazenado está quase uniformemente distribuído sob a estrutura modelada,

portanto, a temperatura dos gases pode ser considerada uniformemente distribuída (BALOGHA & VIGH, 2016).

Os três lados internos de cada elemento do pórtico foram considerados, uniformemente, aquecidos. O coeficiente de transferência de calor por convecção e a emissividade são constantes e iguais a $35 \text{ W/m}^2\cdot\text{K}$ e $0,70$, respectivamente (CEN, 2005). Como o pórtico possui seções transversais variáveis, os fatores de massividade, para 3 lados dos elementos expostos ao fogo, variam entre $210\text{-}280 \text{ m}^{-1}$ (BALOGHA & VIGH, 2016). Assim, adotou-se o fator de massividade médio igual a 245 m^{-1} .

3.4.2 Definição do modelo de incêndio adequado para o problema

Balogha & Vigh (2016) modelaram o incêndio conforme o modelo de zona, utilizando, para isso, o programa computacional Ozone (CADORIN *et al.*, 2001). O Ozone considera o compartimento dividido em 2 camadas com diferentes temperaturas, permitindo, assim, considerar a variação espacial de temperatura aplicada na estrutura.

Uma vez que Ozone não é um programa apropriado para se efetuar um grande número de simulações (BALOGHA & VIGH, 2016), as incertezas relacionadas às temperaturas no compartimento foram calculadas, por Balogha & Vigh (2016), por meio do modelo natural compartimentado. Porém, tecnicamente, a curva natural não poderia ter sido utilizada nesse caso, uma vez que o modelo apresentado no Eurocode 1 (CEN, 2002) é válido apenas para compartimentos de até 500 m^2 de área de piso e altura máxima de 4 m , e não para as dimensões do galpão em questão. Além disso, o modelo natural assume que a carga de incêndio é formada, principalmente, por materiais celulósicos. Mas ao contrário, o referido compartimento armazena uma grande quantidade de pneus, tendo parte da sua composição derivados do petróleo (hidrocarbonetos). Nesse caso, a utilização da curva de hidrocarbonetos é recomendada (Equação 2.15) e, por isso, aplicada no presente problema considerando até 50 min de incêndio. Aqui, o pórtico é também submetido a curva natural de incêndio para fins de comparação.

3.4.3 Definição do modo de falha da estrutura do galpão

Balogha & Vigh (2016) definem a falha em termos de uma deformação limite generalizada em um determinado tempo de incêndio (Equação 3.1). Segundo os autores, é

prático utilizar o tempo como parâmetro da falha, devido ao fato de que o interesse do projetista está, geralmente, voltado para a confiabilidade de acordo com a estabilidade da estrutura dentro do tempo requerido de desocupação, conforme indicado nos códigos normativos. Como a falha pode ocorrer tanto na viga quanto no pilar, o ANSYS, recursivamente, fornece o tempo em que ocorre o deslocamento crítico de um dos elementos do pórtico e os máximos deslocamentos do sistema estrutural em função da duração e da severidade do incêndio e das ações aplicadas. Beck (2019) explica que, na engenharia estrutural, é comum a avaliação da equação de estado limite em termos de deslocamentos críticos, quando a estrutura é avaliada de maneira global.

3.4.4 Tipo de elemento finito e variáveis aleatórias consideradas no problema

Para as análises térmicas e estruturais, optou-se por utilizar o elemento finito BEAM189, que é um elemento adequado para analisar estruturas compostas por vigas e pilares (ANSYS versão 19.2). O BEAM189 é um elemento de viga quadrático de três nós e tridimensional. Ele possui seis graus de liberdade em cada nó, incluindo translações e rotações nas direções x , y e z . O elemento é adequado para análises não lineares. Propriedades de elasticidade, assim como plasticidade, fluência e outras propriedades relacionadas a análises não lineares são possíveis de serem consideradas utilizando o elemento.

O elemento BEAM permite a consideração de um gradiente de temperatura variando linearmente ao longo da seção transversal e ao longo do comprimento do elemento, todavia, não permite a consideração de um material de proteção térmica envolvendo os elementos. Desse modo, optou-se por fazer a transferência de calor do ambiente para o pórtico conforme a Equação 2.16 (BALOGHA & VIGH, 2016), (GERNAY *et al.*, 2016), (MOLKENS & ROSSI, 2021). Mais detalhes sobre esse elemento podem ser consultados no ANSYS (ANSYS versão 19.2).

Para verificar a acurácia dos resultados do FORM para este problema, Balogha & Vigh (2016) compararam os resultados obtidos com os resultados do MCS. Uma população de Monte Carlo com $n_{MCS} = 100$ mil pontos foi considerada. Nas análises, os referidos autores necessitaram de 80 horas para determinar a probabilidade de falha resultante usando MCS com amostragem por LHS. Os autores não informaram as especificações do computador utilizado.

As VAs consideradas na análise de confiabilidade são apresentadas, juntamente com seus parâmetros, na Tabela 7.

Tabela 7 – Variáveis aleatórias e parâmetros do pórtico em incêndio

Tipo de análise	Parâmetro	Média	Unid.	Desvio Padrão	Tipo de distribuição	Referência
Modelo incêndio natural	Carga de incêndio (q_{fi})	420	$\frac{MJ}{m^2}$	$0,3 \times \text{média}$	Gumbel	Balogha & Vigh (2016)
	Inércia térmica (b)	1800	$\frac{Ws^{1/2}}{m^2} K$	$0,1 \times \text{média}$	Normal	Chaudhary & Roy (2020)
	Fator de abertura	Equação 2.1	$m^{1/2}$	0,2	Lognormal	JCSS (2001)
Propriedades do SFRM	Espessura	$Nominal + 1,6$	mm	$0,2 \times \text{média}$	Lognormal	Guo & Jeffers (2014)
	Condutividade	Equação 2.17	W/(m·K)	1	Normal	Khorasani <i>et al.</i> (2015)
	Calor específico	Equação 2.18	J/(kg·K)	1	Normal	Khorasani <i>et al.</i> (2015)
	Densidade	Equação 2.19	Kg/m ³	1	Normal	Khorasani <i>et al.</i> (2015)
Propriedades do aço	Condutividade em função da temperatura	Equação 2.24	W/(m·K)	1	Normal	Khorasani <i>et al.</i> (2015)
	Coefficiente de dilatação em função da temperatura	Equação 2.25	°C ⁻¹	1	Normal	Khorasani <i>et al.</i> (2015)
Carregamento	ação permanente (N_{per})	$1,05 \times Nominal$	N	$0,10 \times \text{média}$	Normal	Ellingwood (2005), Iqbal & Harichandran (2010), Ravindra & Galambos (1978)
	ação variável (N_{var})	$0,24 \times Nominal$	N	$0,80 \times \text{média}$	Gama	
	A_a	1,0	---	$0,04 \times \text{média}$	Normal	
	B_a	1,0	---	$0,20 \times \text{média}$	Normal	
	E_a	1,0	---	$0,05 \times \text{média}$	Normal	
Resistência do aço	Resistência ao escoamento (f_y)	388	MPa	$0,07 \times \text{média}$	Lognormal	Balogha & Vigh (2016)
	Fator de redução da resistência ao escoamento	Equação 2.21	---	Equação 2.21	Lognormal	Qureshi <i>et al.</i> (2020)
	Fator de redução do limite de proporcionalidade	Equação 2.22	---	Equação 2.22	Lognormal	Qureshi <i>et al.</i> (2020)
	Fator de redução do módulo de elasticidade	Equação 2.23	---	1	Normal	Khorasani <i>et al.</i> (2015)

Fonte: Elaborado pelo autor.

A Tabela 8 apresenta um resumo com alguns parâmetros aleatórios, que são indiretamente citados na Tabela 7, e os determinísticos, apresentado ao longo da Seção 3.4.

Tabela 8 – Resumo dos parâmetros considerados para o pórtico de um galpão

Parâmetro	Valor	Unid.	Determinístico ou variável aleatória?	Referência
ação permanente nominal (P)	2,4	kN/m	variável	Balogha & Vigh (2016)
ação variável nominal (Q)	11	kN/m	variável	Balogha & Vigh (2016)
ação variável lateral (q)	3,48	kN/m	variável	Balogha & Vigh (2016)
limite de escoamento médio (f_y)	388	MPa	variável	Balogha & Vigh (2016)
coeficiente de Poisson	0,3	---	determinístico	ABNT NBR 8800 (2008)
densidade	7850	Kg/m ³	determinístico	ABNT NBR 8800 (2008)
módulo de elasticidade	200	GPa	determinístico	Guo & Jeffers (2014); Balogha & Vigh (2016)
coeficiente de transferência de calor por convecção	35 (natural) 25 (ISO 834)	W/m ² K	determinístico	CEN (2005); ABNT NBR 14323 (2013)
emissividade	0,7	---	determinístico	CEN (2005)
fator de abertura nominal	0,048	m ^{1/2}	variável	Balogha & Vigh (2016); JCSS (2001)
espessura nominal do SFRM	11	mm	variável	Grace (2021)
fator de massividade	248	m ⁻¹	determinístico	calculado pelo autor
TRRF	30	min	determinístico	Balogha & Vigh (2016)

3.5 PROBLEMA 3: SISTEMA ESTRUTURAL BIDIMENSIONAL COM 9 PAVIMENTOS

3.5.1 Descrição do problema

O terceiro problema é adaptado do estudo feito por Gernay *et al.* (2016), onde são construídas curvas de fragilidade (curva de distribuição de probabilidade usada para indicar a probabilidade de ocorrência de um determinado nível de dano) para uma estrutura bidimensional de aço com 9 pavimentos, em situação de incêndio. Para simplificar o problema, os autores usaram o domínio da temperatura em suas análises.

A utilização do domínio da temperatura é possível apenas em casos onde se considera a temperatura uniformemente distribuída ao longo da estrutura (GERNAY *et al.*, 2016), como é o caso do exemplo analisado. Entretanto, no presente trabalho é considerado o domínio do tempo ao invés do domínio da temperatura, para que possam ser considerados possíveis gradientes de temperaturas ao longo dos elementos. Desse modo, a metodologia proposta pode

ser aplicada futuramente a outros tipos de estruturas, como as de concreto ou madeira, onde nesses tipos de estruturas não é correto assumir uma distribuição uniforme de temperatura.

Dentre as estruturas de aço em situação de incêndio, analisadas na literatura do ponto de vista da confiabilidade estrutural, esta apresentada em Gernay *et al.* (2016) parece ser a mais complexa até então. Porém, para que fosse possível analisar esta estrutura, várias simplificações foram impostas, conforme relatado anteriormente. O custo computacional foi o fator determinante para que os autores limitassem consideravelmente o número de simulações para executar a análise estrutural em elementos finitos da estrutura até a falha (GERNAY *et al.*, 2016). Nas 11 análises feitas pelos autores, foram utilizadas apenas 20 simulações de MCS com amostragem por LHS, por análise. Porém, os autores reconhecem que para uma avaliação mais precisa do problema, um maior número de simulações deve ser empregado. Além disso, os autores explicam que o objetivo do artigo é criar uma metodologia para determinar funções de fragilidade de sistemas estruturais em situação de incêndio, e que para obter funções de fragilidade a serem utilizadas na prática, também um maior número de simulações é recomendado.

Como sugestão para trabalhos futuros, Gernay *et al.* (2016) indicam a investigação de modelos simplificados para caracterizar a curvas de fragilidade. Pois, segundo esses autores, alguns modelos simplificados oferecem a vantagem de serem muito mais eficientes do ponto de vista computacional do que o MEF, o que poderia os tornar mais adequados para utilização junto ao MCS. No entanto, a perda na precisão de modelos simplificados em comparação com modelos em elementos finitos deve ser considerada em relação ao ganho na avaliação das curvas de fragilidade em uma análise de custo-benefício (GERNAY *et al.*, 2016). Aqui, as RNAs adaptativas são empregadas como uma alternativa para viabilizar a análise.

3.5.2 Geometria, condições de contorno e variáveis aleatórias do problema

O edifício de aço tem $45,72 \text{ m} \times 45,72 \text{ m}$ de planta, com cinco vãos de $9,144 \text{ m}$ nas duas direções. A estrutura é composta por quatro pórticos resistentes a terremotos, dispostos no perímetro da edificação. Quando carregados lateralmente por vento ou terremoto, os pórticos internos apoiam-se nos pórticos do perímetro, mantendo a estabilidade do edifício. Os pilares dos pórticos internos são contínuos nos nove andares, mas as vigas são consideradas simplesmente apoiadas. A altura total do edifício é de $37,182 \text{ m}$, dividido em um 1º pavimento

de 5,486 m e os outros 8 pavimentos de 3,962 m de altura. Assume-se que a compartimentação contra incêndio do edifício é baseada em uma subdivisão em compartimentos de 9,144 m de comprimento por 6,096 m de largura, portanto, com uma área de 55,74 m² por compartimento (GERNAY *et al.*, 2016).

Os pórticos de perímetro (elementos estruturais que compõem o entorno da edificação) são feitos de seções de aço termicamente protegidas por SFRM e relativamente robustas. Devido à sua robustez, não é provável que sejam afetados significativamente por um incêndio nem por ações laterais (GERNAY *et al.*, 2016). Por isso, apenas um pórtico interno da edificação (que representa um compartimento diferente daqueles que compõem o perímetro da edificação) é avaliado submetido ao fogo, apesar de o modelo estrutural considerar todas as vigas e pilares.

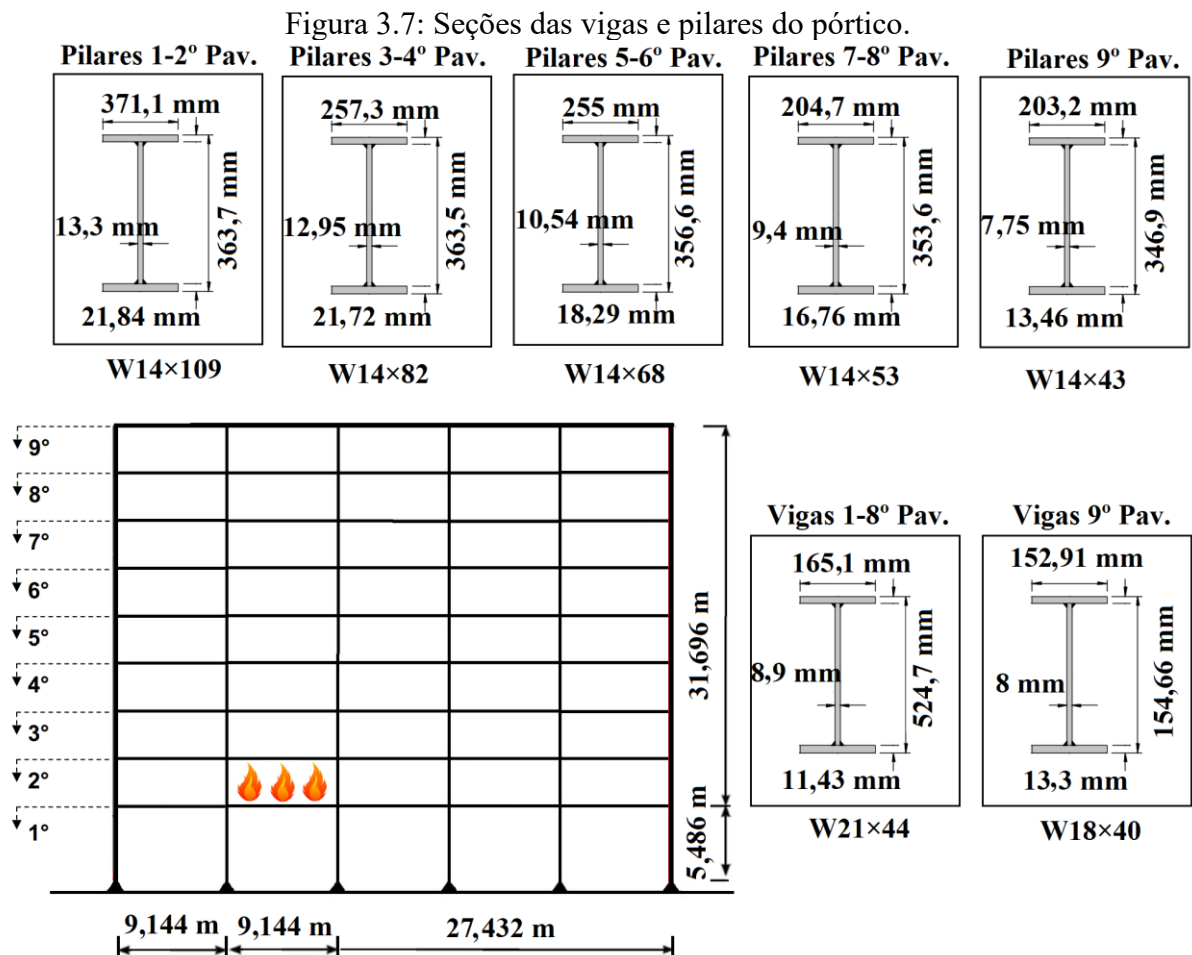
O local onde ocorre o incêndio tem uma grande influência na probabilidade de falha, pois as seções e os carregamentos dos pilares variam entre os compartimentos. Segundo Gernay *et al.* (2016) a edificação terá uma maior chance de falhar se o incêndio ocorrer nos primeiros pavimentos, devido à esbeltez e ao grande carregamento atuante nos pilares desse andar. Desse modo, assumiu-se que o incêndio ocorrerá no segundo compartimento do segundo pavimento. Nesse compartimento os pilares (W14×109) possuem um fator de massividade de 88,64 m⁻¹ e as vigas (W21×44) de 185,29 m⁻¹. Optou-se por considerar o segundo pavimento ao invés do primeiro, pois a altura do primeiro pavimento é maior do que 4 m, o que impede, tecnicamente, a utilização do modelo de incêndio natural, nesse caso.

As dimensões das seções das vigas e pilares do pórtico interno são apresentadas na Figura 3.7 em função do pavimento.

Os carregamentos permanente (P_{9°) e variável (Q_{9°) atuantes nas vigas do 9º pavimento são diferentes dos que atuam nas vigas do 1º ao 8º pavimento. Para o 9º pavimento, o carregamento permanente nominal é de 43,72 kN/m e o carregamento variável é de 5,25 kN/m. As ações nominais, permanente (P_{1-8°) e variável (Q_{1-8°), atuante nas demais vigas são de 41,88 kN/m e 13,21 kN/m, respectivamente. Esses carregamentos são aplicados na Equação 2.32 para simular o provável carregamento na situação de incêndio. Os apoios foram considerados engastados restringindo os movimentos dos nós.

Os valores nominais da resistência ao escoamento do aço e do módulo de elasticidade são 345 MPa e 200 GPa, respectivamente (GERNAY *et al.*, 2016). Além disso, assume-se que

o coeficiente de Poisson e a densidade do aço são iguais aos apresentados nos problemas anteriores.



Fonte: Adaptado de Gernay *et al.* (2016).

A falha é considerada ocorrendo por instabilidades globais (do pilar ou da viga) e é definida conforme a Equação 3.1. Desse modo, desconsidera-se possíveis falhas nas ligações, assumindo que a falha nos elementos estruturais ocorre antes da falha na conexão (GERNAY *et al.*, 2016). Assume-se também que não haverá instabilidade lateral do pórtico no plano das lajes (GERNAY *et al.*, 2016). Como a falha pode ocorrer tanto na viga quanto no pilar, o ANSYS, recursivamente, fornece os máximos deslocamentos do sistema estrutural durante a simulação do incêndio.

Originalmente, as análises são conduzidas para vários níveis de carga média de combustível por área de piso, fixados entre 100 e 2000 MJ/m². Aqui, adota-se uma carga média

de combustível por área de piso de 800 MJ/m^2 . Logo, para as dimensões do compartimento e para um fator de abertura médio nominal de $0,0424 \text{ m}^{1/2}$ (GERNAY *et al.*, 2016), obtém-se uma carga média de combustível por área de superfície total de $200,51 \text{ MJ/m}^2$, com 0,30 de coeficiente de variação (JCSS, 2001).

As propriedades térmicas do compartimento são consideradas, assumindo que as paredes e o teto do edifício são revestidos com placas de gesso. Essa suposição é conservadora em comparação com paredes de concreto, porque paredes de concreto têm uma inércia térmica maior do que gesso. Portanto, a temperatura do gás no compartimento seria mais baixa se paredes de concreto fossem usadas em vez de gesso. Assim, adota-se uma inércia térmica média $b = 762 \text{ W s}^{1/2}/\text{m}^2\text{K}$ (GERNAY *et al.*, 2016). Aplica-se, novamente, o modelo de incêndio natural e a curva ISO-834 (considerando um TRRF de 120 min) para modelar a temperatura dos gases no compartimento e efetuar comparações.

Presume-se que os membros são expostos ao fogo em três lados (GERNAY *et al.*, 2016). O coeficiente de transferência de calor por convecção e a emissividade são constantes e iguais aos valores apresentados nos problemas anteriores.

A evolução da tensão de escoamento do aço e o módulo de elasticidade com a temperatura é avaliado usando modelos probabilísticos, para levar em conta as incertezas nesses parâmetros, conforme definido por Khorasani *et al.* (2015) e Qureshi *et al.* (2020). As incertezas nas propriedades térmicas do aço e do material de proteção SFRM também são consideradas (KHORASANI *et al.*, 2015).

As estruturas são protegidas com um material resistente ao fogo (SFRM) de espessura nominal de 39 mm. Essa espessura é também considerada como parâmetro aleatório no problema.

Utiliza-se novamente nas análises o elemento finito BEAM189 (ANSYS versão 19.2) e $n_{MCS} = 100$ mil.

As variáveis aleatórias consideradas no presente problema estão resumidas na Tabela 9.

Tabela 9 – Variáveis aleatórias e parâmetros do edifício em situação de incêndio.

Tipo de análise	Parâmetro	Média	Unid.	Desvio Padrão	Tipo de distribuição	Referência
Modelo incêndio natural	Carga de incêndio (q_{fi})	200,51	$\frac{MJ}{m^2}$	$0,3 \times \text{média}$	Lognormal	JCSS (2001)
	Inércia térmica (b)	762	$\frac{W_s^{1/2}}{m^2} K$	$0,09 \times \text{média}$	Normal	Gernay <i>et al.</i> (2016)/Guo&Jeffers (2014)
	Fator de abertura	Equação 2.1	$m^{1/2}$	0,2	Lognormal	JCSS (2001)
Propriedades do SFRM	Espessura	$Nominal + 1,6$	mm	$0,2 \times \text{média}$	Lognormal	Gernay <i>et al.</i> (2016)
	Condutividade	Equação 2.17	W/(m·K)	1	Normal	Khorasani <i>et al.</i> (2015)
	Calor específico	Equação 2.18	J/(kg·K)	1	Normal	Khorasani <i>et al.</i> (2015)
	Densidade	Equação 2.19	Kg/m ³	1	Normal	Khorasani <i>et al.</i> (2015)
Propriedades do aço	Condutividade em função da temperatura	Equação 2.24	W/(m·K)	1	Normal	Khorasani <i>et al.</i> (2015)
	Coefficiente de dilatação em função da temperatura	Equação 2.25	°C ⁻¹	1	Normal	Khorasani <i>et al.</i> (2015)
Carregamento	ação permanente (N_{per})	$1,05 \times Nominal$	N	$0,10 \times \text{média}$	Normal	Ellingwood (2005), Iqbal & Harichandran (2010), Ravindra & Galambos (1978)
	ação variável (N_{var})	$0,24 \times Nominal$	N	$0,80 \times \text{média}$	Gama	
	A_a	1,0	---	$0,04 \times \text{média}$	Normal	
	B_a	1,0	---	$0,20 \times \text{média}$	Normal	
	E_a	1,0	---	$0,05 \times \text{média}$	Normal	
Resistência do aço	Resistência ao escoamento (f_y)	345	MPa	$0,07 \times \text{média}$	Normal	Gernay <i>et al.</i> (2016)/Guo&Jeffers (2014)
	Fator de redução da resistência ao escoamento	Equação 2.21	---	Equação 2.21	Lognormal	Qureshi <i>et al.</i> (2020)
	Fator de redução do limite de proporcionalidade	Equação 2.22	---	Equação 2.22	Lognormal	Qureshi <i>et al.</i> (2020)
	Fator de redução do módulo de elasticidade	Equação 2.23	---	1	Normal	Khorasani <i>et al.</i> (2015)

Fonte: Elaborado pelo autor.

A Tabela 10 apresenta o resumo dos parâmetros aleatórios, que foram indiretamente mencionados na Tabela 9, e os determinísticos, apresentado ao longo da Seção 3.5.

Tabela 10 – Resumo dos parâmetros considerados para o pórtico de vários pavimentos

Parâmetro	Valor	Unid.	Determinístico ou variável aleatória?	Referência
ação permanente nominal no pavimento (P_{90})	43,72	kN/m	variável	Gernay <i>et al.</i> (2016)
ação variável nominal no pavimento (Q_{90})	5,25	kN/m	variável	Gernay <i>et al.</i> (2016)
ação permanente nominal demais pavimentos (P_{1-80})	41,88	kN/m	variável	Gernay <i>et al.</i> (2016)
ação variável nominal demais pavimento (Q_{1-80})	13,21	kN/m	variável	Gernay <i>et al.</i> (2016)
limite de escoamento médio (f_y)	345	MPa	variável	Gernay <i>et al.</i> (2016)
coeficiente de Poisson	0,3	---	determinístico	ABNT NBR 8800 (2008)
densidade	7850	Kg/m ³	determinístico	ABNT NBR 8800 (2008)
módulo de elasticidade	200	GPa	determinístico	Gernay <i>et al.</i> (2016)
coeficiente de transferência de calor por convecção	35 (natural) 25 (ISO 834)	W/m ² K	determinístico	CEN (2005); ABNT NBR 14323 (2013)
emissividade	0,7	---	determinístico	CEN (2005)
fator de abertura nominal	0,0424	m ^{1/2}	variável	Gernay <i>et al.</i> (2016); JCSS (2001)
espessura nominal do SFRM	39	mm	variável	Gernay <i>et al.</i> (2016)
fator de massividade	88,64 (pilar) 185,29 (viga)	m ⁻¹	determinístico	calculado pelo autor
TRRF	120	min	determinístico	Gernay <i>et al.</i> (2016)

3.6 PROBLEMA 4: SISTEMA ESTRUTURAL TRIDIMENSIONAL COM SEIS ANDARES

3.6.1 Descrição do sistema estrutural

O último exemplo apresenta um sistema estrutural de aço com seis andares, submetido a um incêndio no terceiro pavimento, cuja geometria e as condições de carregamento foram utilizadas, anteriormente, nos trabalhos de Liew *et al.* (2000), em Jiang *et al.* (2002), Ngo-Huu *et al.* (2007) e Rigobello (2011). Inicialmente, uma análise dos deslocamentos do ponto “A” em função do carregamento foi realizada a temperatura ambiente para verificar se o edifício foi corretamente modelado. Os resultados obtidos foram bem próximos daqueles apresentados em Rigobello (2011). O ponto “A” se encontra no topo da edificação e está ilustrado na Figura 3.8 (b).

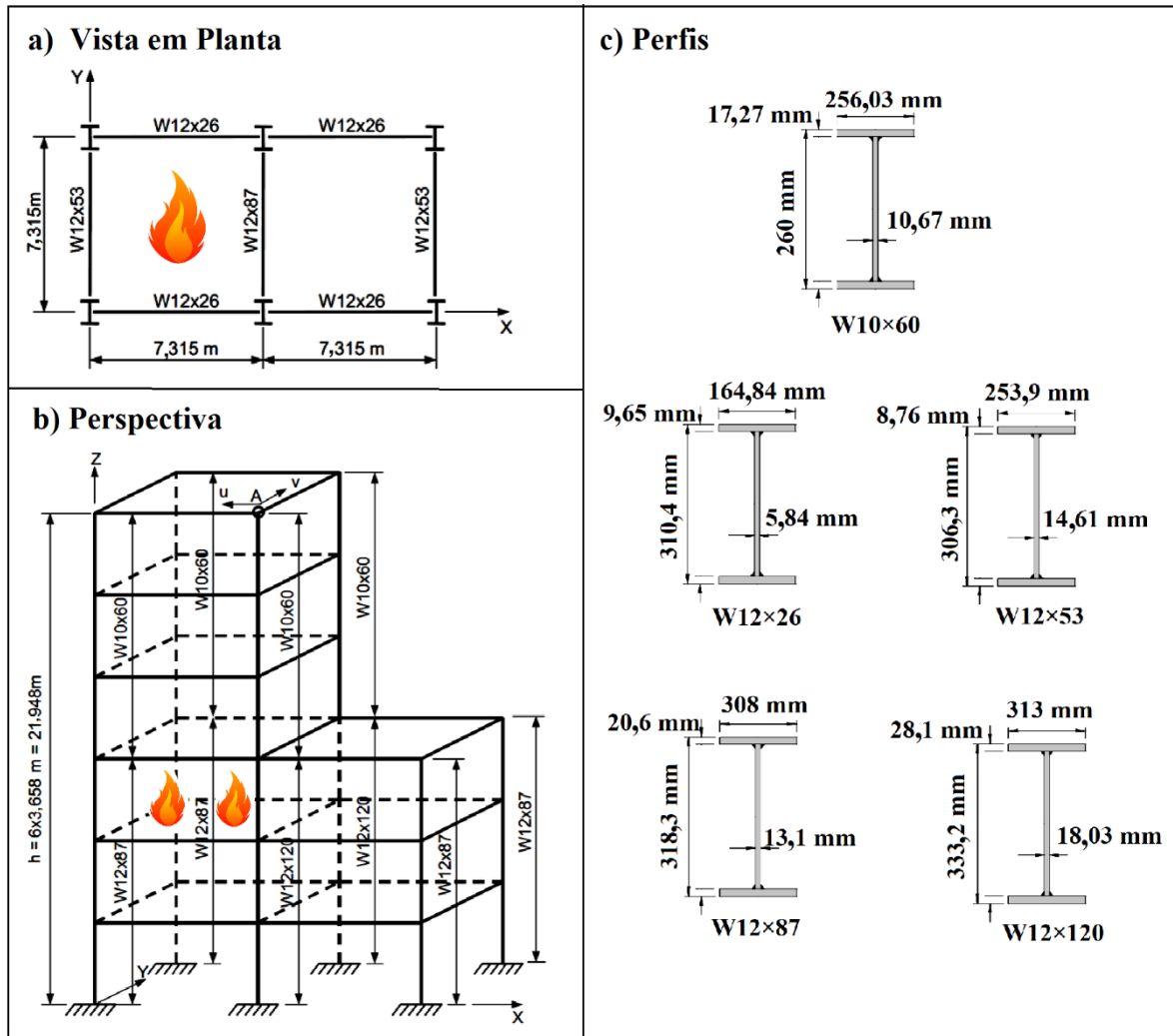
3.6.2 Condições de contorno e geometria do sistema estrutural

A estrutura de aço possui resistência nominal ao escoamento igual a 250 MPa e módulo de elasticidade é igual 206,85 MPa (NGO-HUU *et al.*, 2007). Assume-se que o coeficiente de Poisson e a densidade do aço são iguais aos apresentados nos problemas anteriores.

Originalmente, o sistema está submetido a um carregamento nominal de piso igual a 9,6 kN/m², o qual é convertido em forças distribuídas equivalentes aplicadas nas vigas de cada andar ($F=17,556$ kN/m) (RIGOBELLO, 2011). Considera-se que metade do carregamento é permanente e a outra metade é variável. O carregamento horizontal atuante (carregamento totalmente variável) é aplicado por forças concentradas iguais a 53,376 kN na direção Y , aplicadas em cada junção do pilar com as vigas.

O edifício de aço tem 7,315 m \times 14,630 m de planta, e altura máxima de 21,95 m. Considera-se os compartimentos com dimensões de 7,315 m \times 7,315 m \times 3,658 m. Os pilares do edifício são considerados contínuos em toda a estrutura e as vigas são consideradas simplesmente apoiadas. As dimensões da edificação e dos perfis de aço das vigas e pilares são ilustradas na Figura 3.8.

Figura 3.8: Pórtico tridimensional de aço com seis andares



Fonte: Adaptado de Ngo-Huu *et al.* (2007).

A falha é definida conforme a Equação 3.1, ocorrendo por instabilidade global da viga, do pilar e/ou da laje do compartimento em chamas. Considera-se que a falha no membro ocorre antes da falha na conexão.

A carga média de combustível por área de piso é considerada como $901,02 \text{ MJ/m}^2$ (ASSIS, 2001). Logo, para as dimensões do compartimento e para um fator de abertura de $0,04 \text{ m}^{1/2}$ (GUO & JEFFERS, 2014); (SHI *et al.*, 2013); (GUO *et al.*, 2012); (RICARDO, 2015), obtém-se uma carga de combustível por área de superfície total de $205,50 \text{ MJ/m}^2$. O fator de abertura é aplicado à Equação 2.1 para considerar sua incerteza. As paredes e o teto foram considerados revestidos por gesso, de inércia térmica média $b = 423,5 \text{ W s}^{1/2}/\text{m}^2\text{K}$ (GUO & JEFFERS, 2014).

A densidade, condutividade térmica e o calor específico médios do SFRM foram considerados VAs conforme as equações 2.17–2.19. As incertezas no comportamento das propriedades térmicas e mecânicas da estrutura de aço também são consideradas conforme apresenta-se nas equações 2.21 a 2.25.

O compartimento é considerado aquecido uniformemente, onde os elementos estruturais são aquecidos em 3 de seus lados. O fator de massividade é diferente para cada perfil, sendo $F(W10 \times 60) = 148,52 \text{ m}^{-1}$; $F(W12 \times 26) = 226,09 \text{ m}^{-1}$; $F(W12 \times 53) = 155,18 \text{ m}^{-1}$; $F(W12 \times 87) = 94,02 \text{ m}^{-1}$ e $F(W12 \times 120) = 69,49 \text{ m}^{-1}$. O coeficiente de transferência de calor por convecção e a emissividade são adotados como sendo constantes e iguais a 35 ou 25 $\text{W/m}^2 \cdot \text{K}$ (para os modelos de incêndio natural e ISO 834, respectivamente) e 0,70 para a emissividade (CEN, 2005). Para um edifício de 21,95 m e para ocupação do tipo residencial ou comercial, a ABNT NBR 14432 (2001) recomenda um TRRF de 60 min.

3.6.3 Espessura do material de proteção térmica e variáveis aleatórias

Uma vez que a espessura do material de proteção depende do fator de massividade e sendo o fator de massividade diferente para cada perfil, foram adotadas espessuras diferentes para cada perfil, conforme a Tabela 11. Estas espessuras são determinadas seguindo o catálogo do fabricante Grace (2021) para argamassa projetada Monokote MK6 em função do fator de massividade e do TRRF = 60 min, assumindo uma temperatura crítica de 550 °C (SILVA, 2004).

Tabela 11 – Espessura do material de proteção térmica

Perfil	Espessura (mm)
W10×60	17
W12×26	21
W12×53	17
W12×87	13
W12×120	10

Fonte: Elaborado pelo autor.

O fogo é modelado pela curva ISO 834 até 120 min e pela curva natural compartimentada e o elemento finito BEAM189 é utilizado para modelagem da edificação. Considera-se $n_{MCS} = 100 \text{ mil}$.

A Tabela 12 apresenta os parâmetros de incerteza relacionados ao incêndio, aos carregamentos, às propriedades térmicas e mecânicas do aço e às propriedades do SFRM.

Tabela 12 – Variáveis aleatórias e parâmetros do pórtico tridimensional.

Tipo de análise	Parâmetro	Média	Unid.	Desvio Padrão	Tipo de distribuição	Referência
Modelo incêndio natural	Carga de incêndio (q_{fi})	205,5	$\frac{MJ}{m^2}$	$0,57 \times \text{média}$	Lognormal	Assis (2001)
	Inércia térmica (b)	423,5	$\frac{W_s^{1/2}}{m^2} K$	$0,09 \times \text{média}$	Normal	Guo & Jeffers (2014)
	Fator de abertura	Equação 2.1	$m^{1/2}$	0,2	Lognormal	JCSS (2001)
Propriedades do SFRM	Espessura	$Nominal + 1,6$	mm	$0,2 \times \text{média}$	Lognormal	Gernay <i>et al.</i> (2016)/Guo & Jeffers (2014)
	Condutividade	Equação 2.17	W/(m·K)	1	Normal	Khorasani <i>et al.</i> (2015)
	Calor específico	Equação 2.18	J/(kg·K)	1	Normal	Khorasani <i>et al.</i> (2015)
Propriedades do aço	Densidade	Equação 2.19	Kg/m ³	1	Normal	Khorasani <i>et al.</i> (2015)
	Condutividade em função da temperatura	Equação 2.24	W/(m·K)	1	Normal	Khorasani <i>et al.</i> (2015)
Carregamento	Coefficiente de dilatação em função da temperatura	Equação 2.25	°C ⁻¹	1	Normal	Khorasani <i>et al.</i> (2015)
	ação permanente (N_{per})	$1,05 \times Nominal$	N	$0,10 \times \text{média}$	Normal	Ellingwood (2005), Iqbal & Harichandran (2010), Ravindra & Galambos (1978)
	ação variável (N_{var})	$0,24 \times Nominal$	N	$0,80 \times \text{média}$	Gama	
	A_a	1,0	---	$0,04 \times \text{média}$	Normal	
B_a	1,0	---	$0,20 \times \text{média}$	Normal		
Resistência do aço	E_a	1,0	---	$0,05 \times \text{média}$	Normal	
	Resistência ao escoamento (f_y)	250	MPa	$0,07 \times \text{média}$	Normal	Ngo-Huu <i>et al.</i> (2007)/Guo&Jeffers (2014)
	Fator de redução da resistência ao escoamento	Equação 2.21	---	1	Lognormal	Qureshi <i>et al.</i> (2020)
	Fator de redução do limite de proporcionalidade	Equação 2.22	---	1	Lognormal	Qureshi <i>et al.</i> (2020)
	Fator de redução do módulo de elasticidade	Equação 2.23	---	1	Normal	Khorasani <i>et al.</i> (2015)

Fonte: Elaborado pelo autor.

3.6.4 Condições de contorno e tipo de elemento finito adotado para a laje de concreto

O sistema estrutural apresentado é também avaliado considerando a modelagem de lajes de concreto com agregados siliciosos com 180 mm de espessura. Nesse caso, o carregamento nominal de piso não é convertido em forças distribuídas equivalentes aplicadas nas vigas de cada andar. Porém, o carregamento horizontal atuante ainda é aplicado por forças concentradas. Assume-se que a laje está unida às vigas e transmite forças horizontais no plano, permitindo que os pórticos trabalhem juntos.

O teto e o piso do pavimento são considerados aquecidos nas faces expostas ao fogo. Porém, a fissuração na laje devido às altas temperaturas não é considerada.

A laje é modelada usando o elemento finito SHELL281 (ANSYS versão 19.2), que é adequado para analisar estruturas de casca finas a moderadamente espessas. O elemento tem oito nós com seis graus de liberdade em cada nó: translações e rotações sobre os eixos x , y e z . O SHELL281 é adequado para aplicações não lineares, com possibilidade de grandes rotações e/ou de grandes deformações. O elemento permite ainda a modelagem de cascas compostas. No elemento SHELL281, a temperatura se propaga de maneira linear ao longo da espessura, e bilinear no plano do elemento (ANSYS versão 19.2).

Considera-se que o concreto possui uma resistência característica de 35 MPa, módulo de elasticidade de 33 GPa e coeficiente de Poisson igual a 0,2. O calor específico e a densidade do concreto são consideradas iguais a 1000 (J/kg°C) e 2300 (kg/m³) (ABNT NBR 15200, 2012), respectivamente. Adota-se uma condutividade térmica de 1,3 W/m°C e um coeficiente de dilatação de $1,2 \times 10^{-5} \text{ C}^{-1}$ (ABNT NBR 15200, 2012).

Os parâmetros que definem a laje são considerados determinísticos, porém o fator de redução da resistência e o diagrama tensão deformação do concreto são considerados em função da temperatura, conforme apresentado na Seção 2.1.2, da presente tese.

A Tabela 13 trás, em resumo, os parâmetros aleatórios, que foram indiretamente abordados na Tabela 12, e os determinísticos, apresentado ao longo da presente seção.

Tabela 13 – Resumo dos parâmetros considerados para o edifício com lajes de concreto

Estrutura	Parâmetro	Valor	Unid.	Determinístico ou variável aleatória?	Referência
vigas e pilares de aço	carregamento nominal de piso	9,6	kN/m ²	variável	Rigobello (2011)
	ação variável horizontal	53,376	kN	variável	Rigobello (2011)
	limite de escoamento médio (f_y)	250	MPa	variável	Ngo-Huu <i>et al.</i> (2007)
	coeficiente de Poisson	0,3	---	determinístico	ABNT NBR 8800 (2008)
	densidade	7850	Kg/m ³	determinístico	ABNT NBR 8800 (2008)
	módulo de elasticidade	206,85	MPa	determinístico	Ngo-Huu <i>et al.</i> (2007)
	coeficiente de transferência de calor por convecção	35 (natural) 25 (ISO 834)	W/m ² K	determinístico	CEN (2005); ABNT NBR 14323 (2013)
	emissividade	0,7	---	determinístico	CEN (2005)
	fator de abertura nominal	0,04	m ^{1/2}	variável	Guo & Jeffers (2014); JCSS (2001)
	espessura nominal do SFRM	10 – 21	mm	variável	Grace (2021)
	fator de massividade	69,49 – 226,09	m ⁻¹	determinístico	calculado pelo autor
	TRRF	60	min	determinístico	ABNT NBR 14432 (2001)
lajes de concreto	resistência característica (f_{ck})	35	MPa	determinístico	adotado pelo autor
	módulo de elasticidade	33	GPa	determinístico	adotado pelo autor
	coeficiente de Poisson	0,2	---	determinístico	ABNT NBR 15200 (2012)
	calor específico	1000	J/kg°C	determinístico	ABNT NBR 15200 (2012)
	densidade	2300	kg/m ³	determinístico	ABNT NBR 15200 (2012)
	condutividade térmica	1,3	W/m°C	determinístico	ABNT NBR 15200 (2012)
	coeficiente de dilatação	1,2×10 ⁻⁵	C ⁻¹	determinístico	ABNT NBR 15200 (2012)
	espessura da laje	180	mm	determinístico	adotado pelo autor

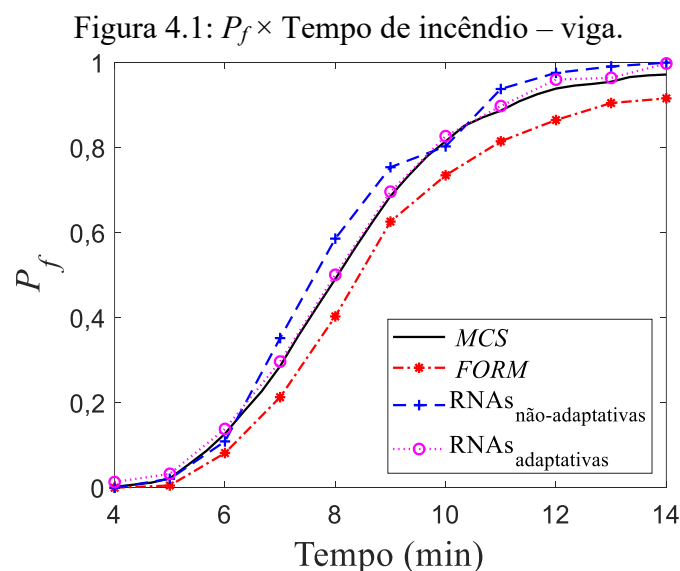
4 VERIFICAÇÃO DOS MÓDULOS COMPUTACIONAIS

No presente capítulo, os módulos computacionais são aplicados aos exemplos de verificação, descritos na Seção 3.2, para avaliar a acurácia e eficiência dos algoritmos desenvolvidos. Os resultados obtidos via MCS são tomados como referência e as P_{fs} são comparadas, em termos de diferença absoluta e tempo computacional, com os métodos FORM, e o MCS combinado com RNAs adaptativas e não adaptativas.

Cabe salientar que os resultados encontrados nessa seção foram publicados em Ricardo & Gomes (2021).

4.1 EXEMPLO DE VERIFICAÇÃO 1: VIGA DE AÇO EM SITUAÇÃO DE INCÊNDIO

A Figura 4.1 ilustra a probabilidade de falha da viga de aço em função do tempo de incêndio e do método de confiabilidade. Embora todas as curvas apresentem comportamento semelhante, os resultados obtidos pelas RNAs adaptativas são os mais próximos dos de referência (MCS).



Fonte: Elaborado pelo autor.

A Tabela 14 apresenta os resultados para esse exemplo em termos das diferenças absolutas e do tempo computacional em relação ao método de MCS. Nota-se que as soluções via FORM, RNAs e RNAs adaptativas apresentam tempo computacional significativamente

menores do que a solução via MCS. Por outro lado, o método FORM apresenta respostas subestimadas com diferenças superiores a 10%, em comparação com a referência, enquanto as diferenças resultam menores que 7,5% para as RNAs e menores que 1,2% para as RNAs adaptativas. Nota-se que os resultados obtidos com o auxílio das RNAs poderiam ser ainda melhores, se mais pontos fossem utilizados para a construção dos metamodelos, porém implicando em maior tempo computacional.

Tabela 14 – Resultados para a Viga.

Tempo (<i>min</i>)	<i>MCS</i>	<i>FORM</i>	<i>RNAs não-adaptativas</i>	<i>RNAs adaptativas</i>
	(<i>P_f</i>)	(diferença [%])	(diferença [%])	(diferença [%])
4	0,023	2,30	2,30	0,97
5	0,043	3,80	2,18	1,03
6	0,148	6,60	3,90	0,97
7	0,307	9,40	4,50	1,03
8	0,512	10,90	7,40	1,10
9	0,707	8,10	4,70	1,06
10	0,836	10,10	3,30	0,89
11	0,908	9,30	3,00	1,01
12	0,960	9,50	1,60	0,02
13	0,976	7,10	1,50	1,18
14	0,993	7,70	0,70	0,50
15	0,998	6,20	0,20	0,10
Tempo computacional (<i>min</i>)	5040	90	70	70

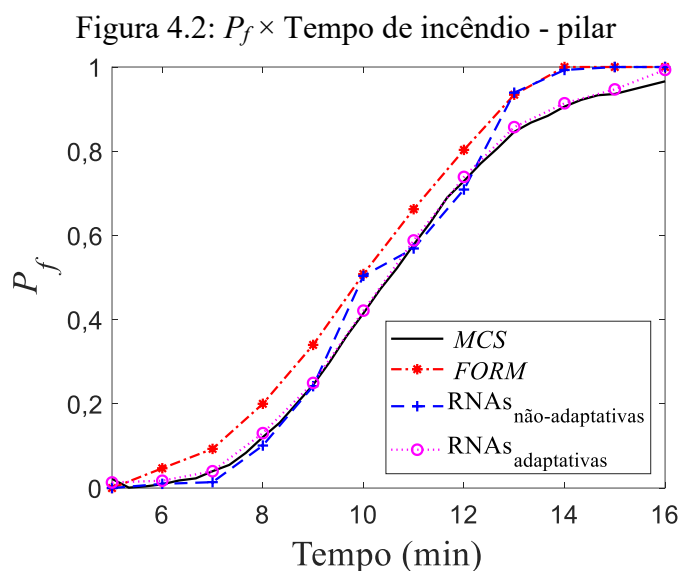
Fonte: Elaborado pelo autor.

4.2 EXEMPLO DE VERIFICAÇÃO 2: PILAR DE AÇO EM SITUAÇÃO DE INCÊNDIO

Os resultados das probabilidades de falha do pilar, termicamente desprotegido, são ilustrados na Figura 4.2, considerando o tempo de incêndio e os métodos de confiabilidade FORM, MCS, RNA adaptativas e não adaptativas. Novamente, os resultados obtidos pelas RNAs adaptativas se apresentam mais próximos dos valores de referência conforme indicado pelas diferenças percentuais absolutas apresentadas na Tabela 15.

Também neste caso, os três métodos requerem muito menos esforço computacional do que o MCS. Neste caso, as diferenças percentuais entre os resultados e a referência são menores ou iguais a 7,3% para FORM, menores ou iguais a 7,1% para RNAs, e menores que 2% para RNAs adaptativas para todos os tempos de incêndio considerados, com a exceção de 7 min,

para o qual a diferença relacionada às RNAs adaptativas chega a 2,2%. Exemplos em que FORM também apresenta níveis semelhantes de imprecisão podem ser encontrados na literatura (BALOGH & VIGH, 2016); (GUO & JEFFERS 2014), onde diferenças de até 8,9% são relatadas.



Fonte: Elaborado pelo autor.

Tabela 15 – Resultados para o Pilar

Tempo (<i>min</i>)	<i>MCS</i> (P_f)	<i>FORM</i> (diferença [%])	<i>RNAs não-adaptativas</i> (diferença [%])	<i>RNAs adaptativas</i> (diferença [%])
5	0,022	2,20	2,20	0,87
6	0,031	1,60	2,10	1,36
7	0,062	3,10	4,80	2,20
8	0,143	5,70	4,20	1,26
9	0,267	7,30	2,50	1,73
10	0,437	7,10	6,70	1,56
11	0,600	6,20	3,10	1,19
12	0,751	5,20	4,20	1,20
13	0,868	6,60	7,10	1,08
14	0,928	7,20	6,50	1,41
15	0,958	4,20	4,20	1,11
16	0,988	1,20	1,20	0,53
Tempo computacional (<i>min</i>)	5760	100	90	90

Fonte: Elaborado pelo autor.

Para avaliar o nível de imprecisão das respostas que pode resultar da linearização associada ao método FORM, o pilar foi analisado novamente, considerando um fator de abertura 30% maior que o inicialmente adotado. Essa mudança no fator de abertura aumenta a incerteza da ocorrência de incêndios controlados por ventilação com temperaturas mais altas e menor duração, e de incêndios controlados por combustível com níveis de temperatura mais baixos. Consequentemente, a não linearidade e as incertezas do problema aumentam.

O comportamento das curvas de respostas, P_f versus tempo de incêndio, permanece semelhante e não é aqui ilustrado. As diferenças percentuais absolutas são apresentadas na Tabela 16, onde se nota que, enquanto as RNAs adaptativas apresentam diferenças da mesma ordem de grandeza dos casos anteriores, as RNAs não adaptativas apresentam diferenças de até 32,0% e o método FORM passa a apresentar diferenças de até 21,83%.

Tabela 16 – Resultados para o Pilar com $O = 0,052 \text{ m}^{1/2}$

Tempo (min)	MCS (P_f)	FORM (diferença [%])	RNAs não- adaptativas (diferença [%])	RNAs adaptativas (diferença [%])
5	0,028	2,80	1,20	0,99
6	0,050	5,00	32,0	1,40
7	0,136	11,35	11,0	1,96
8	0,312	8,25	14,2	1,78
9	0,526	19,92	3,00	0,03
10	0,678	21,83	9,40	1,28
11	0,834	18,54	0,20	1,39
12	0,916	10,19	8,00	1,54
13	0,946	14,35	0,40	1,65
14	0,962	3,44	11,0	0,14
15	0,966	3,04	1,40	0,23
16	0,968	3,00	2,40	1,52
Tempo computacional (min)	5750	180	85	85

Fonte: Elaborado pelo autor.

4.3 DISCUSSÕES

O fato de a viga e o pilar terem sido dimensionados apenas para as condições normais de uso, sem considerar nenhuma proteção térmica, e das análises não assumirem as probabilidades de ocorrência e extinção do incêndio, por algum dispositivo de segurança, são os principais fatores para a baixa confiabilidade em tempos de incêndio inferiores a 20 min, o

que não é aceitável em termos de projeto. Por esse e outros fatores, a aplicação dos códigos de segurança contra incêndio deveria ser exigida em todas as cidades no Brasil e seu uso deveria ser reforçado, com a comunidade acadêmica desempenhando um papel importante nesse processo.

Comparando os resultados obtidos segundo os métodos FORM, RNAs adaptativas e não adaptativas, nota-se, em alguns casos, que as diferenças percentuais entre os métodos podem ser relativamente pequenas. No entanto, cabe ressaltar que a depender do tipo e complexidade do problema, o FORM pode não convergir. Além disso, a análise de confiabilidade de sistemas estruturais, a partir da combinação dos resultados obtidos por meio da análise individual dos elementos, pode ser inviabilizado pelo FORM. Porém, essas limitações não existem na aplicação de metamodelos.

Os resultados aqui apresentados indicam que tanto o FORM quanto as RNAs não adaptativas podem ser usados para obter uma estimativa rápida da P_f de elementos estruturais em condições de incêndio; no entanto, eles podem levar a resultados significativamente imprecisos. Por outro lado, as RNAs adaptativas provaram ser uma alternativa capaz de combinar níveis aceitáveis de acurácia com tempos computacionais exigidos semelhantes aos do método FORM. O nível de acurácia também pode ser facilmente controlado, aumentando, por exemplo, o número de pontos usados para a construção do metamodelo.

Como os resultados obtidos com o metamodelo adaptativo são interessantes em termos de custo computacional e acurácia, na próxima seção, aplica-se RNAs adaptativas na solução de problemas mais complexos de engenharia de segurança estrutural contra incêndio.

5 RESULTADOS NUMÉRICOS

No presente capítulo, as RNAs adaptativas são aplicadas aos problemas descritos nas seções 3.3 a 3.6. Aqui, as P_{fs} , em função do tempo de incêndio, e o custo de processamento computacional exigido para as análises são comparados com alguns resultados disponíveis na literatura e que consideram os métodos FORM e MCS. Além disso, os impactos do modelo de incêndio na probabilidade de falha estrutural são avaliados e discutidos. Em todos os problemas, a convergência da probabilidade de falha estimada pelas RNAs adaptativas é analisada em relação ao número de avaliações da função de estado limite. As probabilidades de falha de um sistema estrutural tridimensional, obtidas pelas RNAs adaptativas, também são apresentadas e comparadas, considerando ou não a modelagem de lajes de concreto.

O apêndice B, do presente trabalho, apresenta detalhadamente tabelas com os resultados encontrados, bem como resultados dos trabalhos de referência. No que segue, os pontos principais relacionados aos resultados são mostrados e discutidos.

5.1 PROBLEMA 1: PILAR DE AÇO TERMICAMENTE PROTEGIDO

5.1.1 Análise das P_{fs} em função do método de confiabilidade aplicado e do modelo de incêndio considerado

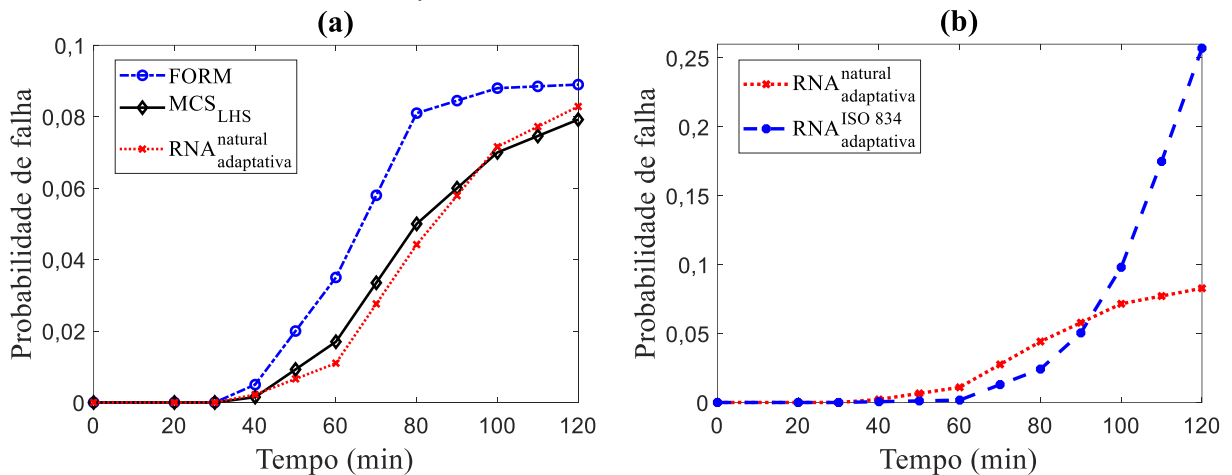
No problema original, estudado por Guo & Jeffers (2014) e apresentado na Seção 3.3, o pilar submetido ao modelo de incêndio natural apresenta uma probabilidade de falha de 7,92% para 120 min de incêndio, obtido pelo método de Monte Carlo com amostragem por hipercubo latino (MCS_{LHS}). As P_{fs} em função da duração do incêndio, calculadas por MCS_{LHS} , bem como os resultados encontrados com a utilização do FORM e das RNAs adaptativas, são apresentados na Figura 5.1 (a). As P_{fs} estimadas pelo metamodelo adaptativo em função dos modelos de incêndio ISO 834 e natural compartimentado são comparadas na Figura 5.1 (b).

Nota-se na Figura 5.1 (a) que as probabilidades de falha obtidas pelas RNAs adaptativas variam de 0 a 8,286%, quando o modelo natural de incêndio é considerado. Apesar do presente exemplo considerar 9 VAs a mais do que problema original, observa-se que as probabilidades de falha foram semelhantes às encontradas por Guo & Jeffers (2014).

Conforme os resultados indicam, a consideração das incertezas em função da temperatura, tanto nas propriedades do material de proteção quanto nas propriedades térmicas e mecânicas do aço, não contribui significativamente na composição da P_f do pilar em questão. Essa pouca contribuição na composição da P_f foi prevista por Guo & Jeffers (2014) num estudo simplificado de sensibilidade feito para identificar os parâmetros que mais influenciam na resposta da estrutura.

O método FORM levou a diferenças maiores do que as encontradas pelas RNAs adaptativas, com diferenças absolutas de até 3.1%, em comparação com 0,6% para as RNAs.

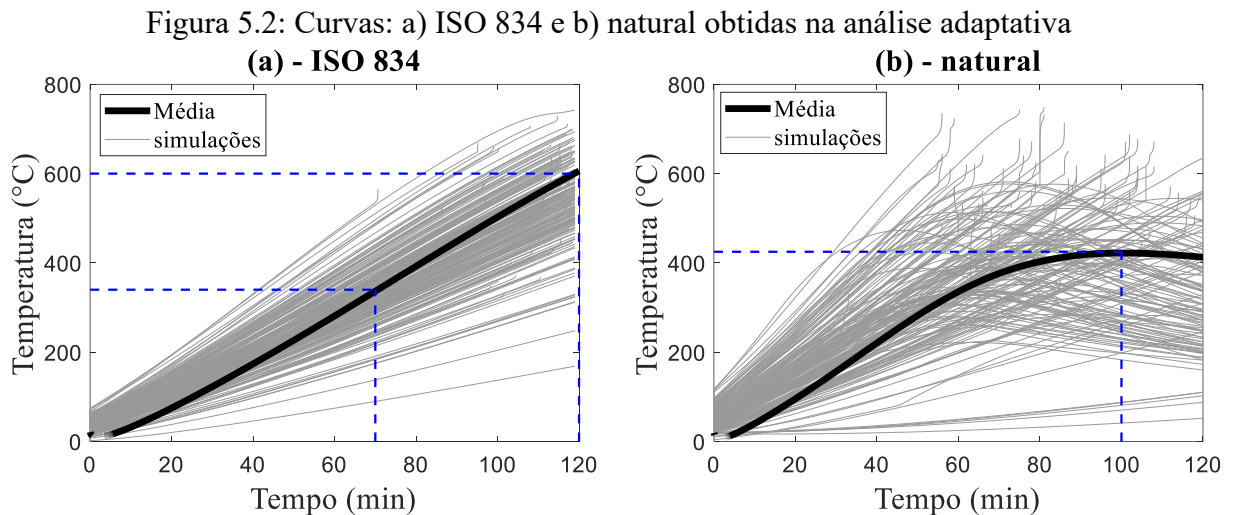
Figura 5.1: P_f em função do tempo de incêndio no pilar



Fonte: Elaborado pelo autor.

Vê-se na Figura 5.1 (b) que as P_{fs} encontradas considerando a curva ISO 834 diferiram significativamente dos resultados encontrados segundo a curva natural, com uma P_f três vezes maior em 120 min. Nota-se ainda que a partir de 70 min as P_{fs} começam a se tornar significativas para ambas as curvas. Porém, depois de 90 min de incêndio a curva ISO passa a levar a uma maior P_f do que quando o modelo natural de incêndio é considerado. O ramo de temperatura sempre crescente, característico da curva padronizada, tende a elevar a probabilidade de falha à medida que o tempo passa. Ao contrário, a curva natural tende a levar a uma probabilidade de falha máxima próximo do instante onde a temperatura máxima na estrutura é atingida. Depois há reduções devido à redução gradativa da temperatura na estrutura, no estágio de resfriamento dos gases.

A curva padronizada permitiu que o pilar atingisse temperaturas médias superiores a 350 °C, a partir de 70 min de incêndio, chegando até a 600 °C a 120 min. Enquanto isso, as temperaturas médias no membro estrutural não ultrapassaram 420 °C, quando o modelo natural foi considerado, conforme ilustram as curvas tempo × temperatura obtidas no processo adaptativo para determinar a falha antes de 120 min (ver Figura 5.2).

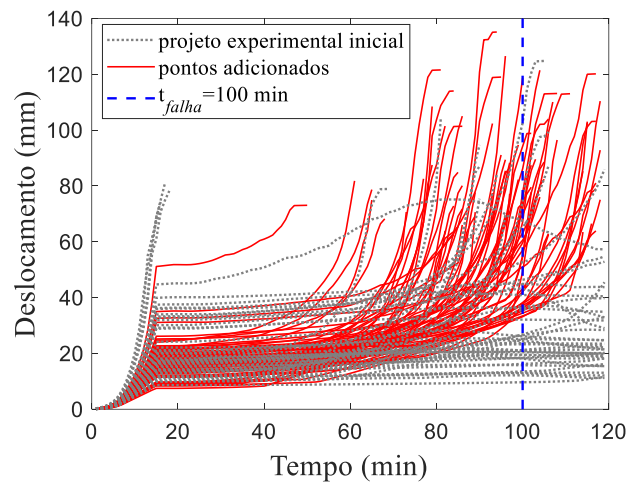


Fonte: Elaborado pelo autor.

5.1.2 Análise dos deslocamentos no centro do pilar *versus* tempo de incêndio, obtidos no procedimento adaptativo

As curvas deslocamento × tempo obtidas por meio da amostra do projeto experimental inicial e pelos pontos adicionados a ele durante o procedimento adaptativo, considerando um tempo de incêndio de 100 min necessário para causar a falha, são apresentados na Figura 5.3 para o caso de incêndio modelado pela curva natural. A Figura 5.3 indica que as RNAs identificam corretamente simulações que estão mais próximas da equação de estado limite. Por isso, observa-se que os pontos adicionados durante a fase de enriquecimento geraram uma série de curvas com escoamento generalizado no intervalo de 50 a 120 min, mas principalmente em torno de $t_{falha} = 100$ min.

Figura 5.3: Curvas deslocamento \times tempo obtidas no procedimento adaptativo



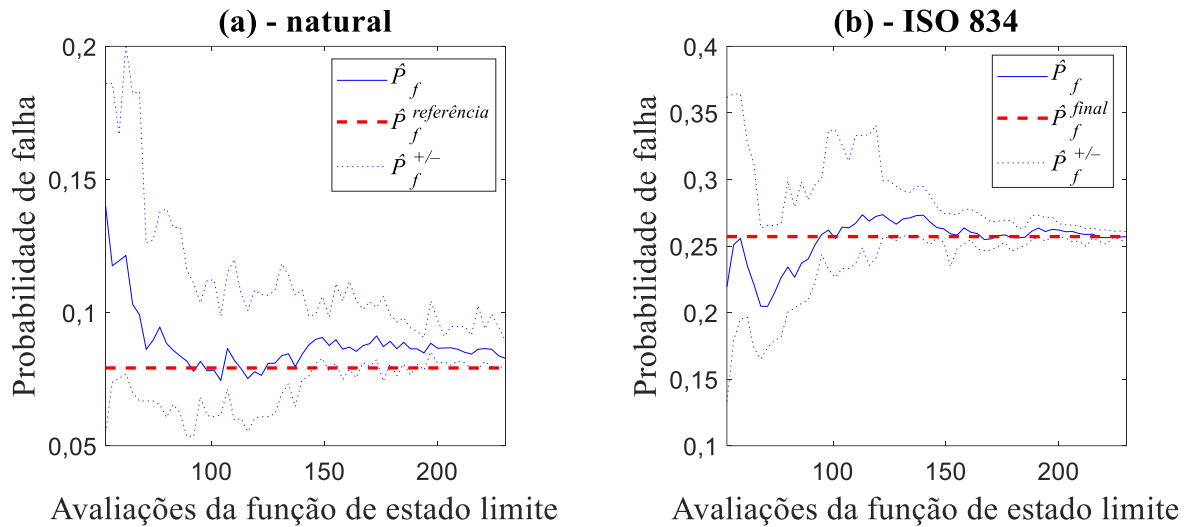
Fonte: Elaborado pelo autor.

5.1.3 Análise da convergência da probabilidade de falha em função do número de avaliações da função de estado limite

As convergências da probabilidade de falha estimada pelas RNAs, para o tempo de incêndio de 120 min, são ilustradas na Figura 5.4, considerando a curva natural (a) e ISO 834 (b). A Figura 5.4 mostra a convergência da probabilidade de falha estimada (\hat{P}_f) em relação ao número de avaliações da função de estado limite. As linhas pontilhadas representam as estimativas mais alta e mais baixa ($\hat{P}_f^{+/-}$) calculadas usando as RNAs adaptativas. A linha tracejada horizontal representa, na Figura 5.4 (a), a probabilidade de falha de referência (obtida via MCS_{LHS}) e na Figura 5.4 (b) a probabilidade de falha final (\hat{P}_f^{final}) encontrada com a RNA no fim do processo adaptativo.

Na Figura 5.4 a probabilidade de falha estimada pelas RNAs adaptativas aproxima-se do seu valor médio para um número pequeno de chamadas da função de estado limite, cerca de 150 chamadas. Embora a convergência não seja alcançada nestas 150 chamadas, de acordo com o critério de convergência adotado, nota-se que até o fim do processo iterativo, o valor estimado da probabilidade de falha média pouco oscila.

Figura 5.4: Convergência da probabilidade de falha para o pilar e comparação com a: a) referência obtida via MCS_{LHS} com 230 avaliações da função de estado limite; b) convergência para o valor final fornecido pela RNA adaptativa.



5.1.4 Análise do custo de desempenho computacional requerido

A comparação do esforço computacional é feita considerando o tempo computacional requerido. O tempo médio de cada avaliação da função de estado limite foi de 1,75 min. Para obter as probabilidades de falha durante os 120 min de incêndio, as RNAs utilizaram 230 chamadas da função de estado limite, com um tempo total de 6,71 horas. Comparativamente, o tempo total para o treinamento das RNAs é de apenas 3,08 min.

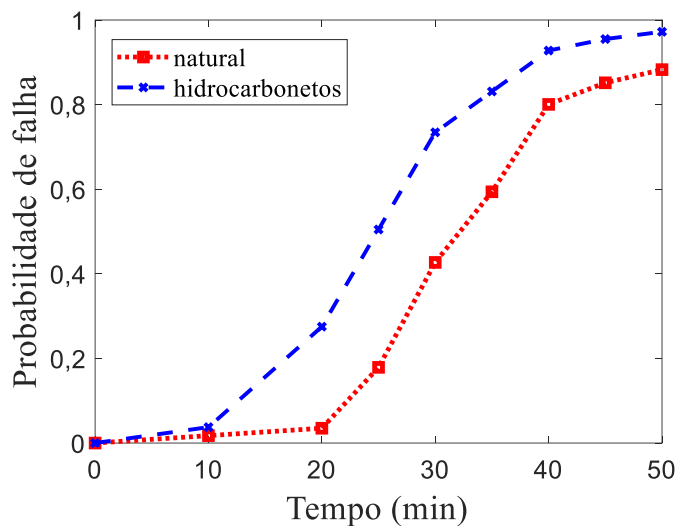
Embora o custo computacional total pareça ser significativo para esse exemplo, cabe salientar que caso 10 mil simulações de MCS fossem realizadas, seriam necessárias cerca de 291 horas (mais de 12 dias) para obter a resposta do problema. Além disso, no problema original o tempo de análise foi de 173,7 h, considerando a amostragem por LHS e a utilização de um *cluster* de computadores constituído por 40 CPUs em paralelo. Em contraste, ao se utilizar aqui o procedimento com metamodelo adaptativo em apenas um computador, foi possível obter uma solução próxima e com um custo computacional cerca de 26 vezes menor do que o apresentado em Guo & Jeffers (2014).

5.2 PROBLEMA 2: PÓRTICO DE UM GALPÃO DE ARMAZENAMENTO

5.2.1 Análise das P_{fs} em função do modelo de incêndio

Os resultados da análise de confiabilidade do pórtico descrito na Seção 3.4 são apresentados na Figura 5.5, onde as P_{fs} são apresentadas em função da duração do incêndio e do modelo de incêndio.

Figura 5.5: P_f , obtida via RNAs adaptativas, em função do tempo de incêndio no pórtico



Fonte: Elaborado pelo autor.

Nota-se na Figura 5.5 que o pórtico apresenta uma probabilidade de falha em 50 min de até 88,27% para o caso do modelo de incêndio natural, e de até 97,22% considerando o modelo de incêndio de hidrocarbonetos. Os resultados obtidos com as RNAs adaptativas são comparáveis aos encontrados no problema original, onde Balogh & Vigh (2016) resolveram esse problema considerando o modelo de incêndio de duas zonas com o MCS_{LHS}, encontrando uma P_f de 85,10% para 50 min de incêndio.

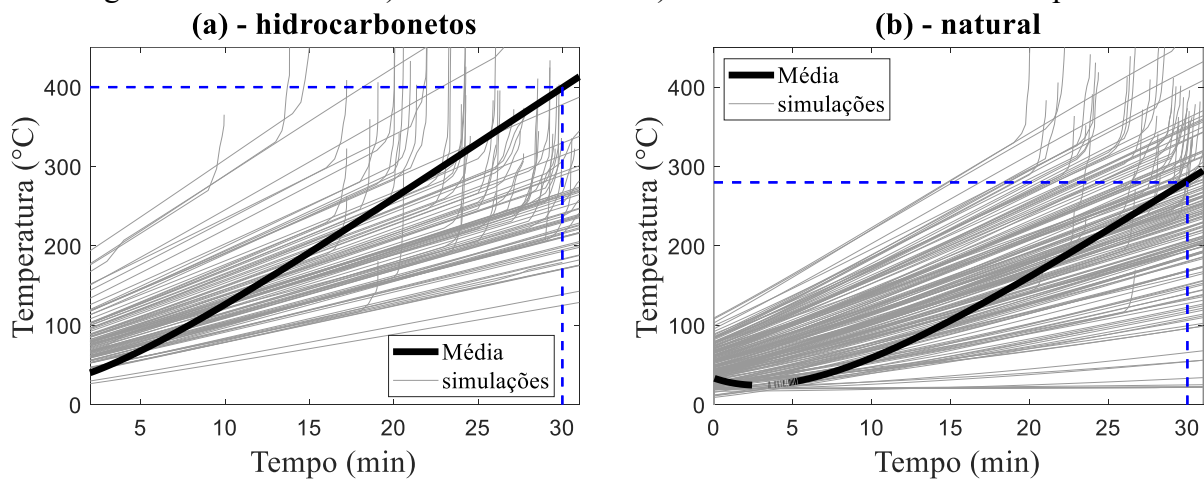
Observa-se, também na Figura 5.5, que a confiabilidade do pórtico resultou bem maior ao considerar o modelo de incêndio natural do que ao se considerar o modelo de hidrocarbonetos. A diferença absoluta entre as P_{fs} chegou a 30,75% (em 30 min), sendo que a curva de hidrocarbonetos é aquela recomendada pelo Eurocode 1 para o tipo do problema em questão.

5.2.2 Análise das temperaturas atingidas pelas curvas de incêndio durante o processo adaptativo

A temperatura dos gases, modelada pela curva de incêndio de hidrocarbonetos, facilmente atinge valores próximos de 1000 °C, conforme indica a Equação 2.15. Conseqüentemente, a estrutura de aço tende a atingir uma temperatura crítica mais rapidamente do que quando outras curvas são consideradas.

Nota-se, na Figura 5.6 (a), que no processo adaptativo para determinar a probabilidade de falha em 30 min de incêndio, o pórtico atingiu a temperatura média de aproximadamente 400 °C (considerando a curva de hidrocarbonetos), enquanto que atingiu aproximadamente 300 °C quando a curva natural foi considerada (Figura 5.6 (b)). É nessa faixa entre 300 a 400 °C que os fatores de redução das propriedades mecânicas em função da temperatura começam a ter valores menores que 1, conforme nota-se na Figura 2.7 (a), da Seção 2.1.2 desse trabalho. Na Figura 5.6, o aumento súbito na temperatura para uma leve variação no tempo de incêndio indica o instante em que ocorre a falha da estrutura.

Figura 5.6: Curvas de: a) hidrocarbonetos e b) natural obtidas na análise adaptativa



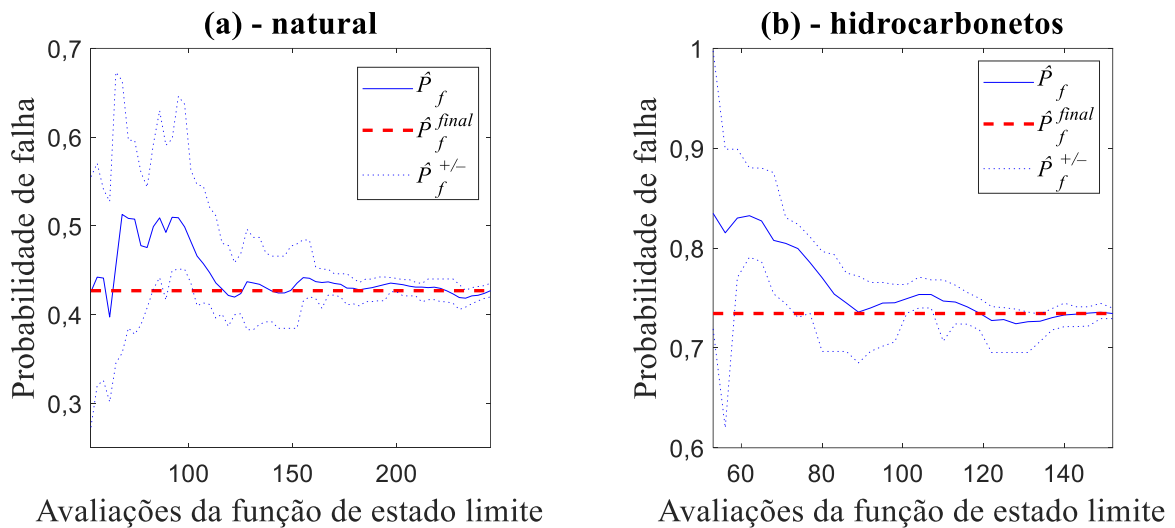
Fonte: Elaborado pelo autor.

5.2.3 Convergência da P_f em função do número de avaliações da função de estado limite

As convergências da probabilidade de falha estimada (\hat{P}_f), considerando um tempo de incêndio de 30 min necessário para causar a falha, são ilustradas na Figura 5.7, considerando a

curva natural (a) e a de hidrocarbonetos (b). Observa-se na Figura 5.7 (a) que probabilidade de falha estimada pelas RNAs adaptativas converge com 242 chamadas à função de estado limite, e com 149 chamadas para o caso da Figura 5.7 (b).

Figura 5.7: Convergência da P_f para o pórtico e comparação com: a) o valor final fornecido pela RNA com 242 avaliações da função de estado limite; b) o valor final fornecido pela RNA com 149 avaliações da função de estado limite.



Fonte: Elaborado pelo autor.

5.2.4 Custo de desempenho computacional requerido no processo adaptativo

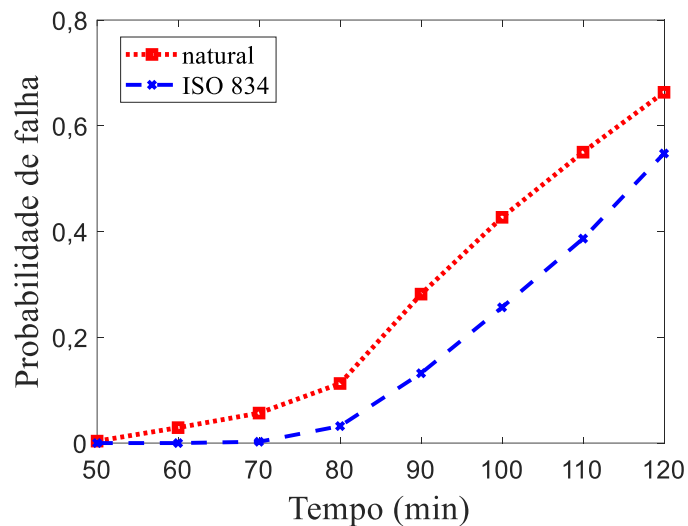
O tempo médio de cada avaliação da função de estado limite foi de 2,30 min. Para obter as probabilidades de falha durante 30 min de incêndio, as RNAs adaptativas utilizaram 242 chamadas da função de estado limite (considerando a curva natural), com um tempo total de 9,29 horas (8,61 vezes menor do que Balogh & Vigh (2016) e sem aplicar simplificações ao problema). O tempo total para o treinamento das RNAs continuou próximo de 3 min. Caso o método bruto de Monte Carlo fosse aplicado ao presente exemplo considerando 100 mil simulações, seriam necessárias cerca de 3837,2 horas, o que equivaleria a quase 6 meses de simulação computacional, o que é inviável em termos práticos.

5.3 PROBLEMA 3: PÓRTICO DE UMA EDIFICAÇÃO

5.3.1 Probabilidades de falha, em função do modelo de incêndio, do pórtico de 9 andares

A Figura 5.8 compara as probabilidades de falha do pórtico de 9 andares, descrito na Seção 3.5, considerando os modelos de incêndio natural e ISO 834. Ao contrário dos exemplos anteriores, a curva padronizada levou a uma maior confiabilidade se comparada com o modelo natural, para os 120 min de incêndio analisados. A diferença entre as probabilidades de falha entre as duas curvas chegou a 17,03%, no tempo de 100 min.

Figura 5.8: P_f , obtida via RNAs adaptativas, em função do tempo de incêndio no pórtico bidimensional

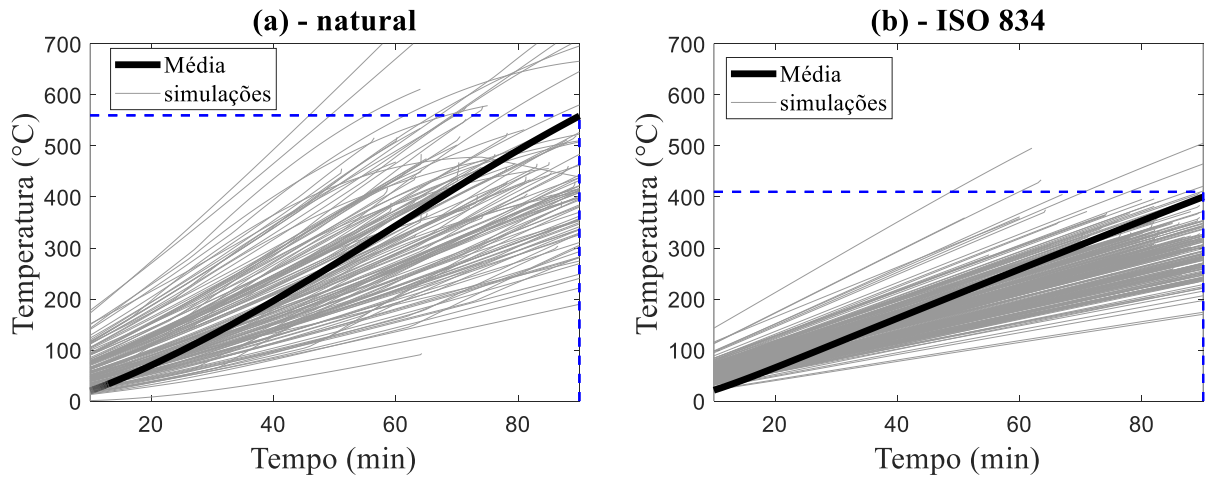


Fonte: Elaborado pelo autor.

5.3.2 Comparação entre as temperaturas obtidas pelos modelos de incêndio natural e padronizado no processo adaptativo

O comportamento das curvas de incêndio no processo adaptativo, que determina a probabilidade de falha em 90 min de incêndio, é ilustrado na Figura 5.9. Na Figura nota-se que a curva padronizada teve menor variação de temperaturas e atingiu temperaturas médias relativamente menores do que o modelo natural.

Figura 5.9: Temperatura na viga do compartimento em incêndio considerando as curvas: a) natural e b) ISO 834

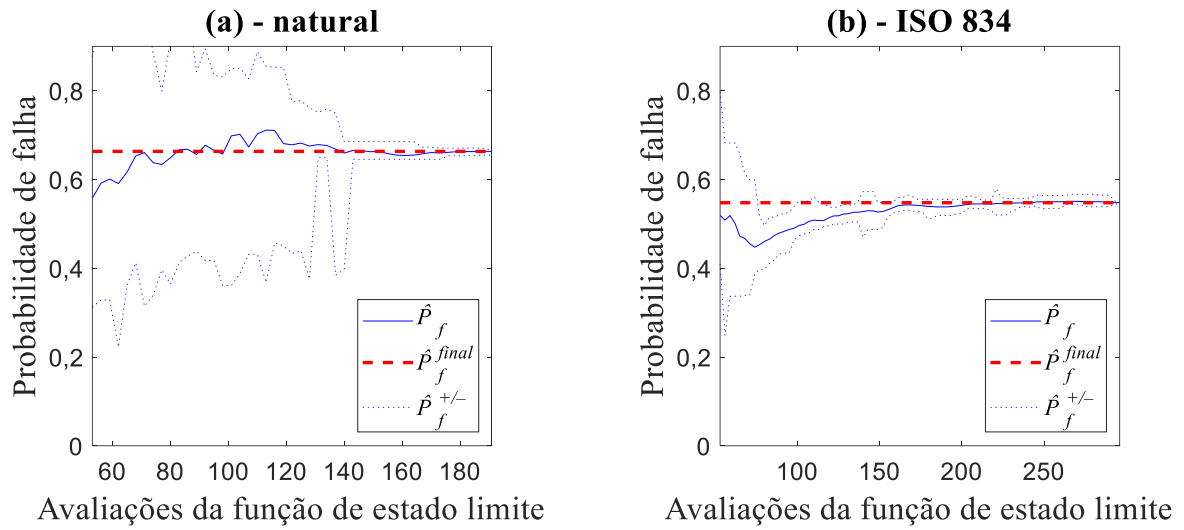


Fonte: Elaborado pelo autor.

5.3.3 Convergência da P_f e o custo computacional requerido

A convergência da probabilidade de falha é alcançada após 191 avaliações da função de estado limite, considerando a curva de incêndio natural, e 296 avaliações, segundo a curva padronizada ISO, considerando um tempo de incêndio de 120 min necessário para causar a falha. A convergência descrita na Figura 5.10 (a), é alcançada para um tempo total de 23,84 horas. Nesse exemplo, precisou-se de aproximadamente 6 min para o treinamento das RNAs adaptativas.

Figura 5.10: Convergência da P_f para o pórtico bidimensional e comparação com: a) o valor final fornecido pela RNA com 191 avaliações da função de estado limite; b) o valor final fornecido pela RNA com 296 avaliações da função de estado limite.



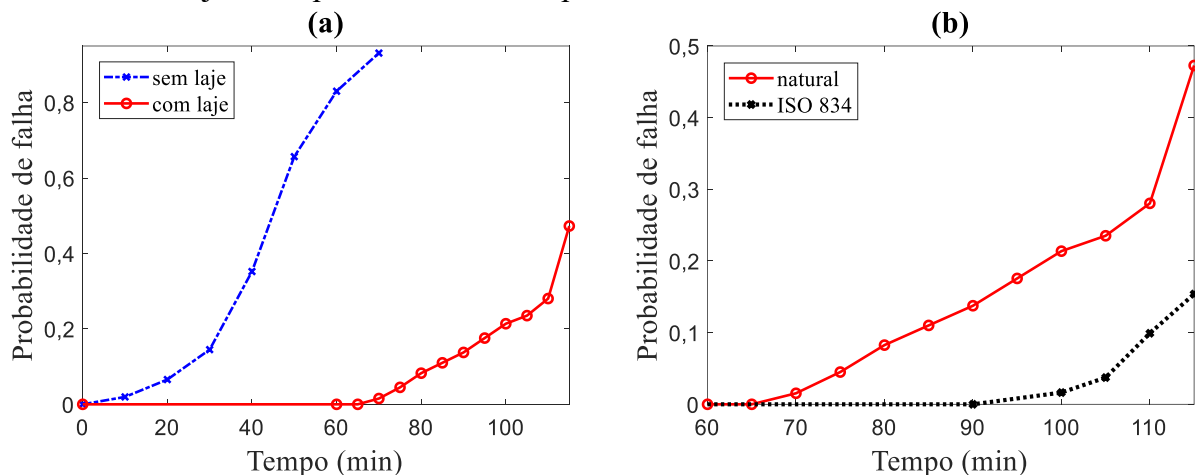
Fonte: Elaborado pelo autor.

5.4 PROBLEMA 4: SISTEMA ESTRUTURAL TRIDIMENSIONAL DE UMA EDIFICAÇÃO

5.4.1 Probabilidades de falha considerando ou não a laje de concreto e o modelo de incêndio

O último exemplo analisado é o edifício de aço submetido a um incêndio no terceiro pavimento, conforme descrito na Seção 3.6. As probabilidades de falha do edifício, obtidas pelas RNAs adaptativas, são apresentadas na Figura 5.11 (a), considerando ou não as lajes de concreto. As P_f s em função das curvas ISO 834 e natural são ilustradas na Figura 5.11 (b), para o edifício modelado com as lajes.

Figura 5.11: P_f , obtida via RNAs adaptativas, em função do tempo de incêndio no edifício: a) considerando ou não a laje e utilizando o modelo de incêndio natural; b) com a consideração da laje e comparando resultados para os diferentes modelos de incêndio.



Fonte: Elaborado pelo autor.

As curvas das P_f s ilustradas na Figura 5.11 (a) indicam que o sistema estrutural modelado com as lajes de concreto tem a capacidade de resistir ao incêndio por um período significativamente maior do que o sistema estrutural sem lajes. Para 60 min, de um incêndio modelado pela curva natural, o sistema estrutural sem as lajes chegou a uma P_f de 83,01%, enquanto que obteve uma P_f menor que 1,00% quando as lajes foram consideradas.

Pode-se atribuir o ganho na confiabilidade do edifício ao aumento da rigidez do sistema estrutural proporcionado pelas lajes de concreto. Nota-se, portanto, que a interação entre os diferentes membros estruturais (vigas, pilares e laje) pode ter influência significativa na resistência das estruturas submetidas ao fogo, conforme observado também por Chaudhary

& Roy (2020). Chaudhary & Roy (2020) obtiveram diferenças de probabilidade na mesma ordem de grandeza das aqui observadas quando realizaram uma comparação entre as P_{fs} de um pórtico simples em relação aos seus membros (viga e pilar). Isso reforça a necessidade de se analisar a confiabilidade dos sistemas estruturais e não apenas dos elementos em separado ou que desconsideram a análise da estrutura como um todo.

A Figura 5.11 (b) mostra que quando a curva padronizada (ISO 834) foi adotada para modelar o incêndio, as probabilidades de falha resultaram relativamente baixas até 100 min de duração do incêndio. Todavia, quando o modelo natural foi considerado, as probabilidades para 100 min chegaram a 21,37 %. A diferença máxima entre as P_{fs} obtidas pelas as duas curvas ilustradas na Figura 5.11 (b), foi de 31,89% no tempo de 115 min.

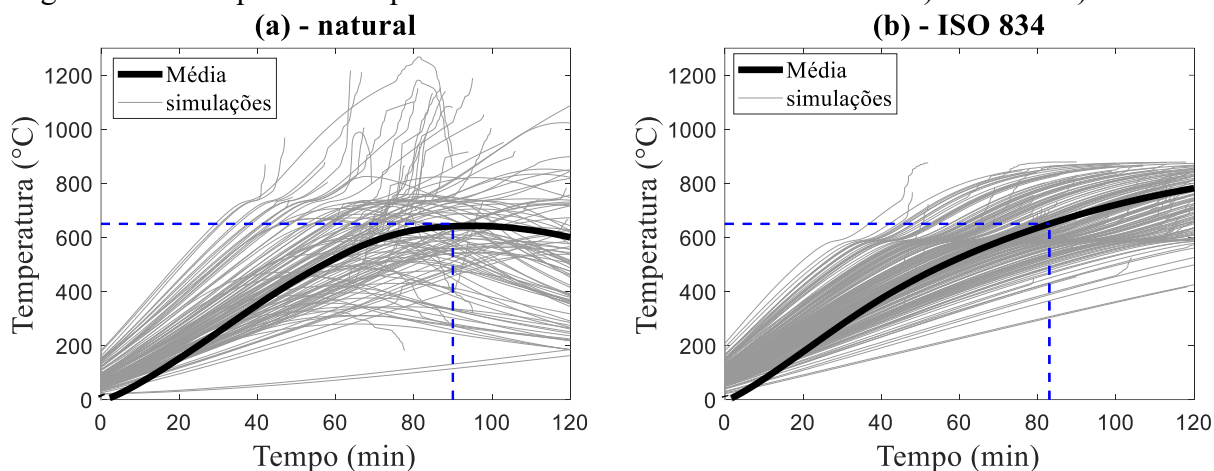
5.4.2 Análise comparativa das temperaturas atingidas pelas curvas de incêndio natural e ISO 834 durante o processo adaptativo

As características geométricas do compartimento, a duração do incêndio e as VAs que definem a temperatura na estrutura permitiram que a viga com perfil W12×26 atingisse, até 90 min, temperatura média de 650 °C, quando a curva natural foi considerada. Por outro lado, a temperatura média de 650 °C foi alcançada próximo de 80 min de incêndio, quando a curva ISO 834 foi adotada, conforme ilustram as linhas tracejadas na Figura 5.12.

Comparando-se as figuras 5.12 (a) e 5.12 (b), nota-se também que as temperaturas no perfil de aço, considerando o modelo natural, tiveram uma maior variação durante o procedimento adaptativo do que as temperaturas observadas no mesmo perfil, considerando a curva padronizada.

Na Figura 5.12 (a), observa-se simulações onde o perfil de aço ultrapassou a temperatura de 1200 °C, enquanto que na Figura 5.12 (b), as temperaturas na ultrapassaram 870°C. A curva ISO é geralmente relatada na literatura como sendo excessivamente conservadora em comparação com o incêndio natural. Porém, nota-se que a depender das VAs que controlam a elevação de temperatura na estrutura e da duração do incêndio, a confiabilidade estrutural do sistema, considerando a curva ISO 834, pode ser menor do que a encontrada quando o modelo natural é aplicado.

Figura 5.12: Temperatura no perfil W12×26 considerando as curvas: a) natural e b) ISO 834



Fonte: Elaborado pelo autor.

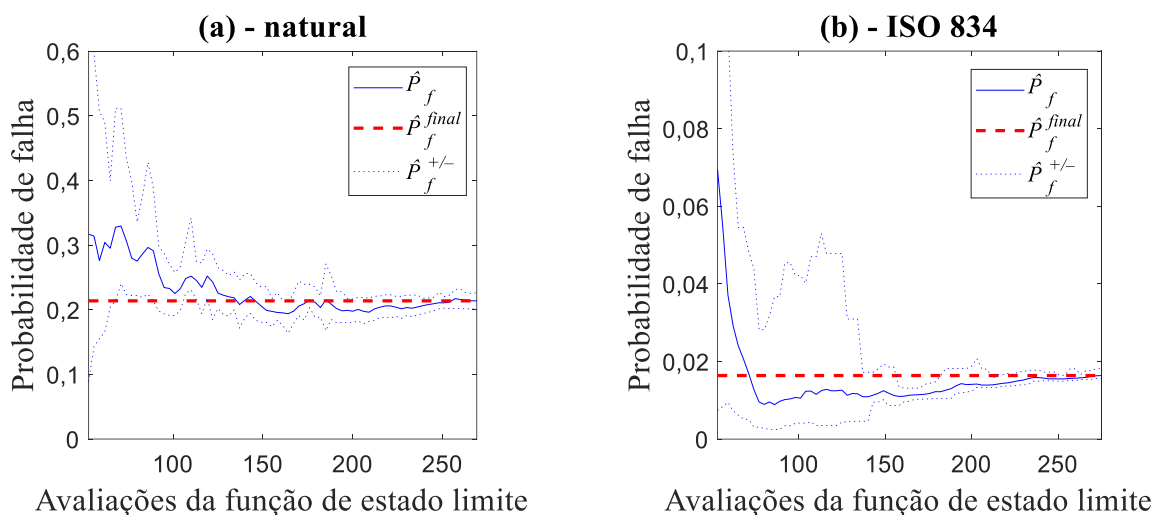
Nota-se, a partir dos resultados obtidos na presente seção e nas anteriores, que o modelo de incêndio pode afetar significativamente a probabilidade de falha estrutural estimada. A confiabilidade estrutural de um elemento ou sistema estrutural, em situação de incêndio, depende, dentre outros fatores, da função da edificação e das dimensões, propriedades de revestimento, aberturas e da quantidade de materiais combustíveis disponível, do compartimento. Por esta razão, as probabilidades de falha obtida pela curva de incêndio ISO 834, podem divergir significativamente dos resultados obtidos pelo modelo natural compartimentado (BALOGH & VIGH, 2016), tendo em vista a grande variabilidade que pode ter a curva natural. Portanto, a seleção cuidadosa da curva de incêndio é necessária para representar da melhor maneira possível o provável incêndio que pode ocorrer em um compartimento.

Uma possível alternativa, que permitiria ignorar o tipo de modelo de incêndio, seria avaliar a probabilidade de falha em função da temperatura uniformemente distribuída no perfil de aço. Nesse caso, onde o domínio da temperatura é considerado, ao invés do domínio do tempo, as propriedades térmicas da transferência de calor e do material de proteção poderiam ser ignoradas. Esta suposição simplificadora é razoável para estruturas de aço protegidas, pois a inércia térmica do material de proteção suaviza o gradiente de temperatura no perfil de aço (GERNAY *et al.*, 2016). Porém, esta simplificação não seria válida para outros tipos de estruturas, como as de concreto ou madeira, por exemplo.

5.4.3 Convergência da P_f estimada pelas RNAs adaptativas e o custo de processamento requerido

A convergência da probabilidade de falha estimada pelas RNAs é ilustrada na Figura 5.13 (a) e (b), para o sistema estrutural em questão, e ocorreu após 270 avaliações da função de estado limite para o caso que considera o incêndio modelado pela curva natural e em 279, no caso do modelo padronizado, considerando um tempo de incêndio de 100 min necessário para causar a falha.

Figura 5.13: Convergência da P_f para o edifício e comparação com: a) o valor final fornecido pela RNA com 270 avaliações da função de estado limite; b) o valor final fornecido pela RNA com 279 avaliações da função de estado limite.



Fonte: Elaborado pelo autor.

Para chegar à convergência descrita na Figura 5.13 (a) as RNAs adaptativas demandaram um tempo total de 43,34 horas. O tempo total para o treinamento das RNAs foi de 10,79 min. A análise da confiabilidade de uma edificação tridimensional em situação de incêndio, conforme aqui é abordada, modelada em elementos finitos e considerando diversas incertezas, incluído algumas VAs em função da temperatura, seria inviável sem a utilização da abordagem adaptativa aqui considerada. Uma análise de MCS considerando 100 mil simulações iria requerer cerca de 22,30 meses (quase dois anos) de avaliação caso um computador com as mesmas características do aqui considerado fosse utilizado.

6 CONCLUSÕES

Nesse trabalho, uma abordagem utilizando Redes Neurais Artificiais (RNAs) adaptativas foi empregada para viabilizar a análise de confiabilidade de elementos e sistemas estruturais de aço em situação de incêndio. Detalhes sobre a análise de estruturas submetidas ao fogo, confiabilidade estrutural, redes neurais artificiais adaptativas, entre outros aspectos, foram apresentados e discutidos. Em seguida, módulos computacionais foram desenvolvidos e verificados em termos de eficiência e acurácia considerando diferentes métodos de confiabilidade, incluindo a abordagem com simulação de Monte Carlo e RNAs adaptativas. O método foi empregado na solução de problemas de confiabilidade apresentados na literatura, considerando as incertezas no comportamento do material de proteção e no comportamento das propriedades térmicas e mecânicas da estrutura de aço em função da temperatura. Além disso, o impacto dos modelos de incêndio natural e padronizado, na resposta estrutural, também foi investigado.

Os resultados obtidos nos exemplos de verificação indicaram que o FORM e as RNAs não adaptativas podem ser usados para obter uma estimativa rápida da P_f , todavia, esses métodos podem levar a resultados imprecisos. Para os casos aqui investigados, as diferenças entre os resultados desses métodos e os de referência, obtidos via MCS, foram de até 21,83% para o FORM e de até 32,0% para as RNAs não adaptativas, apesar de em média as RNAs não adaptativas apresentarem erros menores que o FORM. Por outro lado, as RNAs adaptativas mostraram-se uma alternativa capaz de combinar níveis aceitáveis de acurácia, com diferenças absolutas abaixo de 2% em praticamente todos os casos, e com tempos computacionais exigidos semelhantes aos do método FORM.

Em todos os casos em que havia resultados disponíveis na literatura, os resultados obtidos com as RNAs adaptativas foram consistentes com esses. Por exemplo, as probabilidades de falha obtidas pelas RNAs adaptativas na análise de um pilar de aço termicamente protegido foram semelhantes às encontradas na literatura, tendo uma diferença absoluta máxima de 0,6%. Na análise de um pórtico de um galpão a diferença entre as probabilidades de falha foi de 3,17% para 50 min de incêndio, considerando o modelo natural de incêndio, ao invés do modelo de duas zonas, considerado na literatura. Além disso, o nível de acurácia das RNAs adaptativas pode ser ainda controlado, aumentando, por exemplo, o número de pontos usados para a construção do metamodelo.

A probabilidade de falha estimada com as RNAs adaptativas, alcançada a partir de relativamente poucas avaliações da função de estado limite, permitiram que de maneira inédita problemas como uma edificação bidimensional e um sistema estrutural tridimensional de aço com lajes de concreto fossem solucionados. Até então, uma avaliação mais precisa desse tipo de problema requereria um maior número de simulações utilizando o método de MCS associado ao MEF, levantando desafios em termos de tempo computacional. Tanto que, se o método de MCS bruto, considerando 100 mil simulações, fosse utilizado, ao invés do método adaptativo, a estimativa é de que seriam necessários cerca de 2 anos de simulações ao invés de 43 horas, para analisar o sistema estrutural tridimensional, algo inviável em termos de praticidade. Até mesmo, os exemplos mais simples, aqui analisados, precisariam de dias ou meses para serem resolvidos se o MCS fosse aplicado.

A análise do pilar termicamente protegido indicou que as incertezas em função da temperatura das propriedades do material de proteção e das propriedades térmicas e mecânicas do aço não contribuíram significativamente na composição da P_f . Desse modo, pode ser interessante considerar apenas as fontes mais significativas de incertezas, diminuindo, assim, a complexidade do problema.

Os resultados obtidos com a análise do pórtico de um galpão considerando os modelos de incêndio natural e de hidrocarbonetos mostraram que este último pode levar a níveis confiabilidade bem menores. A diferença absoluta entre as P_{fs} encontradas com os dois modelos de incêndio foi de até 30,75%. Por outro lado, notou-se, nos demais exemplos, que a depender das VAs que controlam a elevação de temperatura em incêndios compartimentados e da duração do incêndio, a curva natural pode gerar soluções com probabilidades de falhas tanto menores quanto maiores do que quando o modelo padronizado ISO 834 é considerado. A norma NBR 14323 (2012) recomenda a utilização da curva ISO, independente da situação, porém as análises aqui apresentadas mostram que nem sempre esta escolha leva a resultados conservadores. Assim, uma seleção cuidadosa do modelo de incêndio é imprescindível para melhor simular a temperatura dos gases no interior de uma edificação, pois é a partir do modelo de incêndio que se definem as máximas temperaturas que a estrutura pode atingir.

A análise do sistema estrutural tridimensional permitiu concluir que o sistema estrutural modelado com as lajes de concreto tende a resistir ao incêndio por um período maior do que o sistema estrutural sem lajes. Para 60 min, de um incêndio modelado pela curva natural, o sistema estrutural sem as lajes chegou a uma P_f de 83,01%, enquanto que a P_f se manteve abaixo

de 1,00% quando as lajes foram consideradas. Possivelmente, o aumento da rigidez do sistema estrutural, proporcionado pelas lajes de concreto, contribuiu para a diminuição das P_{fs} . Desse modo, percebe-se que estudos de problemas que consideram apenas membros estruturais, ou que desconsideram a análise da estrutura como um todo, podem levar a conclusões inadequadas quanto à segurança da estrutura. Por isso, a resposta da análise de confiabilidade desses problemas deve ser avaliada com cautela.

6.1 SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS

Algumas sugestões de trabalhos futuros, de maneira que dê continuidade ao que foi desenvolvido nessa tese, são apresentadas a seguir:

a) como o local onde ocorre o incêndio pode ter uma grande influência na resposta da estrutura, uma vez que, por exemplo, as seções dos membros estruturais e os carregamentos suportados pelos pilares variam entre os compartimentos, logo, sugere-se aplicar RNAs adaptativas em pesquisas futuras, para avaliar a probabilidade de falha considerando o incêndio ocorrendo, individualmente, em diferentes compartimentos;

b) uma vez que a análise de confiabilidade estrutural em situação de incêndio é em grande parte realizada a nível de membro/componente, e considerando os resultados aqui encontrados que indicam que a confiabilidade dos sistemas estruturais como um todo pode ser significativamente maior em comparação com o sistema sem lajes, assim sugere-se um estudo comparativo entre a confiabilidade de um sistema estrutural, como um todo, e dos membros individuais desse sistema (laje, viga e pilar);

c) os problemas abordados na presente tese envolvem uma única equação de estado limite. Porém, como os membros e sistemas estruturais, em geral, pode envolver múltiplos modos de falha, sugere-se, em trabalhos futuros, determinar a probabilidade de falha de elementos e sistemas estruturais em situação de incêndio sujeitos a múltiplos modos de falhas.

d) no estudo da confiabilidade das estruturas submetidas ao fogo, a carga de incêndio pode variar significativamente de um compartimento para o outro, e a inércia térmica e o fator de abertura podem variar significativamente de uma edificação para outra. Portanto, para se chegar

a uma análise mais abrangente, pode ser interessante determinar a probabilidade de falha considerando uma faixa de valores para a carga de incêndio, a inércia térmica e/ou o fator de abertura.

e) como a redução do número de variáveis aleatórias no estudo da segurança de estruturas em incêndio pode diminuir a não linearidade e complexidade do problema, logo, uma avaliação da contribuição relativa de cada variável aleatória na composição da probabilidade de falha também pode ser objeto de estudo futuro.

f) sugere-se o estudo da análise de confiabilidade de estruturas em situação de incêndio por meio da utilização de árvores de falha. Para isso, deve-se considerar, por exemplo, probabilidades de ocorrência do incêndio, de extinção do mesmo e de falha da estrutura. A partir da árvore de falha, é possível verificar se o sistema estrutural respeita, ou não, os limites de risco aceitáveis propostos na literatura;

g) sugere-se investigar a confiabilidade de sistemas estruturais de concreto, madeira, alvenaria estrutural e estruturas mistas. Além disso, o estudo da confiabilidade de ligações estruturais é recomendado, sobretudo devido a escassez de pesquisas relacionadas ao tema.

h) melhorias no processo adaptativo e investigação de outros metamodelos também podem ser objeto de estudos futuros.

REFERÊNCIAS

- ABNT (Associação Brasileira de Normas Técnicas). 2000, Exigências de resistência ao fogo de elementos construtivos de edificações. NBR 14432. Procedimento. Rio de Janeiro, Brasil: ABNT.
- ABNT (Associação Brasileira de Normas Técnicas). 2008. Projeto de estruturas de aço e de estruturas mistas de aço e concreto de edifícios. NBR 8800, Rio de Janeiro, Brasil: ABNT.
- ABNT (Associação Brasileira de Normas Técnicas). 2012. Projetos de Estruturas de Concreto em Situação de Incêndio. NBR 15200, Procedimento. Rio de Janeiro, Brasil: ABNT.
- ABNT (Associação Brasileira de Normas Técnicas). 2013. Projeto de estruturas de aço e estruturas mistas de aço e concreto de edifícios em situação de incêndio. NBR 14323. Rio de Janeiro, Brasil: ABNT.
- ANSYS, Theory Reference for the Mechanical APDL and Mechanical Applications. Release 19.2. [S.l.]: Ansys Inc., Canonburg, november 2019.
- Assis, V. T. 2001. “Carga de incêndio em edifícios de escritórios estudo de caso: Belo Horizonte (MG).” Mestrado, Dissertação, Departamento de Engenharia Civil, Universidade Federal de Ouro Preto.
- Au, S. K., J. Ching, and J. L. Beck. 2007. “Application of subset simulation methods to reliability benchmark problems.” *Struct. Saf.* 29 (3): 183–193. <https://doi.org/10.1016/j.strusafe.2006.07.008>.
- Balogha, T., and L. G. Vighb. 2016. “Complex and comprehensive method for reliability calculation of structures under fire exposure.” *Fire Saf. J.* 86 (8): 41–52. <https://doi.org/10.1016/j.firesaf.2016.09.002>.
- Beck, A. T., *Confiabilidade e Segurança das Estruturas*. 1ª edição. Rio de Janeiro: Elsevier 2019. ISBN 978-85-352-8688-5.
- Blatman, G., and B. Sudret. 2010. “An adaptive algorithm to build up sparse polynomial chaos expansions for stochastic finite element analysis.” *Probab. Eng. Mech.* 25 (2): 183–197. <https://doi.org/10.1016/j.probengmech.2009.10.003>.
- Borgund, U., and C. G. Bucher. 1986. *Importance sampling procedure using design point: ISPUD user’s manual*. Innsbruck, Austria: Institute für Mechanik, Universität Innsbruck.
- Buchanan, A. H. *Structural Design Fire Safety*. J Second edition. Chichester, West Sussex, United Kingdom: John Wiley & Sons Inc., 2017.
- Bucher, C. G. 1988. “Adaptive sampling: An iterative fast Monte Carlo procedure.” *Struct. Saf.* 5 (2): 119–126. [https://doi.org/10.1016/0167-4730\(88\)90020-3](https://doi.org/10.1016/0167-4730(88)90020-3).
- Bucher, C. G. 2009. “Asymptotic sampling for high-dimensional reliability analysis.” *Probab. Eng. Mech.* 24 (4): 504–510. <https://doi.org/10.1016/j.probengmech.2009.03.002>.

- Bucher, C., and T. Most. 2008. "A comparison of approximate response functions in structural reliability analysis." *Probab. Eng. Mech.* 23 (2–3): 154–163. <https://doi.org/10.1016/j.probengmech.2007.12.022>.
- Cadorin, J. F., D. Pintea, J. M. Franssen, The Design Fire Tool OZone V2.0 – Theoretical Description and Validation On Experimental Fire Tests, 1st draft, University of Liege, Belgium, 2001.
- Caldas R. B.; Rodrigues F.C.; Marinho A. C. B.; Fakury R. H., Simulação Computacional do Comportamento de um Incêndio Real em um Apartamento de Edificação Popular. Associação Brasileira de Métodos Computacionais em Engenharia. Nono Simpósio de Mecânica Computacional. 2010.
- Carino, N. J., *et al.* (2005). "Federal building and fire safety investigation of the World Trade Center disaster—Passive fire protection." NIST NCSTAR 1–6A.
- CEN (European Committee for Standardization). 2002. Actions on structures exposed to fire, part 1.2. Eurocode 1. Brussels, Belgium: CEN.
- CEN (European Committee for Standardization). 2005. General rules: Structural fire design, part 1.2. Eurocode 3. Brussels, Belgium: CEN.
- Chapman, O. J., and A. D. Crossland. 1995. "Neural networks in probabilistic structural mechanics." In *Probabilistic structural mechanics handbook*, 317–330. New York: Chapman and Hall.
- Chaudhary, R. K., and Roy, T.. 2020. "Member and structural fragility of reinforced concrete structure under fire". *Journal of Structural Fire Engineering* Vol. 11, No. 4, 2020. pp. 409-435. doi 10.1108/JSFE-02-2019-0015.
- Chaudhary, R. K., R. Van Coile, and T. Gernay. 2021. "Potential of surrogate modelling for probabilistic fire analysis of structures." *Fire Technol.* 57 (3): 1–27. <https://doi.org/10.1007/s10694-021-01126-w>.
- Cheung, A. B., E. M. Pinto, and C. Calil Junior. 2012. "Confiabilidade estrutural de vigas de madeiras submetidas à flexão em condições normais e em situação de incêndio." In *Encontro Brasileiro em Madeiras e em Estruturas de Madeira EBRAMEM*, Vitória. Anais do Encontro Brasileiro em Madeiras e em Estruturas de Madeira EBRAMEM. Vitória, Brazil: Universidade Federal do Espírito Santo.
- Chojaczyk, A. A., A. P. Teixeira, L. C. Neves, J. B. Cardoso, and C. G. Soares. 2015. "Review and application of artificial neural networks models in reliability analysis of steel structures." *Struct. Saf.* 52 (Part A): 78–89. <https://doi.org/10.1016/j.strusafe.2014.09.002>.
- Deng, J., D. Gu, X. Li, and Z. Q. Yue. 2005. "Structural reliability analysis for implicit performance functions using artificial neural network." *Struct. Saf.* 27 (1): 25–48. <https://doi.org/10.1016/j.strusafe.2004.03.004>.

- Denoel, J. F. 2007. Fire safety and concrete structures. Translated by J.-P. Jacobs. Brussels, Belgium: Federation of Belgian Cement Industry. Dubourg, V., B. Sudret, and F. Deheeger. 2013. "Metamodel-based importance sampling for structural reliability analysis." *Probab. Eng. Mech.* 33 (Jul): 47–57. <https://doi.org/10.1016/j.probangmech.2013.02.002>.
- Dubourg, V., Sudret, B. And Deheeger, F., 2013, Metamodel-based importance sampling for structural reliability analysis, *Probabilistic Engineering Mechanics*, 33: 47–57. <http://doi.org/10.1016/j.probangmech.2013.02.002>
- Eamon C. D.; Jensen E. Reliability analysis of reinforced concrete columns exposed to fire. *Fire safety Journal*. v. 62, p. 221-229. 2013.
- Eamon, C. D., and E. Jensen. 2012. "Reliability analysis of prestressed concrete beams exposed to fire." *Eng. Struct.* 43 (Oct): 69–77. <https://doi.org/10.1016/j.engstruct.2012.05.016>.
- Echard, B., N. Gayton, and M. Lemaire. 2011. "AK-MCS: An active learning reliability method combining Kriging and Monte Carlo Simulation." *Struct. Saf.* 33 (2): 145–154. <https://doi.org/10.1016/j.strusafe.2011.01.002>.
- Ellingwood, B. R. 2005. "Load combination requirements for fire-resistant structural design." *J. Fire Prot. Eng.* 15 (1): 43–61. <https://doi.org/10.1177/1042391505045582>.
- El-Reedy, M. A. 2013. Reinforced concrete structural reliability. Boca Raton, FL: Taylor & Francis.
- Faravelli, L. 1989. "Response-surface approach for reliability analysis." *J. Eng. Mech.* 115 (12): 2763–2781. [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)0733-9399\(1989\)115:12\(2763\)](https://doi.org/10.1061/(ASCE)0733-9399(1989)115:12(2763)).
- Franssen, J.-M., V. K. R. Kodur, and R. Zaharia. 2009. Designing steel structures for fire safety. Leiden, Netherlands: CRC Press. Ghanem, R. G., and P. D. Spanos. 1991. Stochastic finite elements: A spectral approach. New York: Springer.
- Garlock, M., and Quiel, S. E. (2007). "The behavior of steel perimeter columns in a high-rise building under fire." *Eng. J.*, 44(4), 359–372.
- Gernay, T., Khorasani, N. E., Garlock, M., 2016. "Fire fragility curves for steel buildings in a community context: A methodology, *Engineering Structures*". Volume 113, Pages 259-276, ISSN 0141-0296. <https://doi.org/10.1016/j.engstruct.2016.01.043>.
- Ghanem, R.G. and Spanos, P.D., 1991, Stochastic finite elements –a spectral approach, Springer Verlag.
- Gomes, H. M., A. M. Awruch, and P. A. M. Lopes. 2011. "Reliability based optimization of laminated composite structures using genetic algorithms and artificial neural networks." *Struct. Saf.* 33 (3): 186–195. <https://doi.org/10.1016/j.strusafe.2011.03.001>.
- Gomes, W. J. D. S. 2020. "Shallow and deep artificial neural networks for structural reliability analysis." *ASME J. Risk Uncertainty Part B* 6 (4): 041006. <https://doi.org/10.1115/1.4047636>.

- Gomes, W. J. D. S. 2019. "Structural Reliability Analysis Using Adaptive Artificial Neural Networks." ASME. ASME J. Risk Uncertainty Part B. December 2019; 5(4): 041004. <https://doi.org/10.1115/1.4044040>
- Gomes, W. J. S. 2018. "Structural reliability analysis using artificial neural networks and bootstrap techniques." In Proc., Joint ICVRAM ISUMA UNCERTAINTIES Conf. Reston, VA: ASCE.
- Gomes, W. J. S., and A. T. Beck. 2013. "Global structural optimization considering expected consequences of failure and using ANN surrogates." Comput. Struct. 126 (Dec): 56–68. <https://doi.org/10.1016/j.compstruc.2012.10.013>.
- Grace Construction Products (2021). Fire Proofing Products. Disponível em: <<https://gcpat.com.br/pt-br/solutions/products/monokote-fireproofing> >. Acesso em: 30 dezembro, 2021.
- Guo, Q., and A. E. Jeffers. 2014. "Finite-element reliability analysis of structures subjected to fire." J. Struct. Eng. 141 (4): 04014129. [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)ST.1943-541X.0001082](https://doi.org/10.1061/(ASCE)ST.1943-541X.0001082).
- Guo, Q., K. Shi, Z. Jia, and A. Jeffers. 2012. "Probabilistic evaluation of structural fire resistance." Fire Technol. 49 (3): 793–811. <https://doi.org/10.1007/s10694-012-0293-6>.
- Hagan, M. T., and M. B. Menhaj. 1994. "Training feedforward networks with the Marquardt algorithm." IEEE Trans. Neural Networks 5 (6): 989–993. <https://doi.org/10.1109/72.319697>.
- Hasofer, A. M.; Lind, N. C. Exact and invariant second moment code format, J. Eng. Mech. ASCE100. 111-121. 1974.
- Helton, J. C. and Davis F. J.. 2003. "Latin hypercube sampling and the propagation of uncertainty in analyses of complex systems". Reliability Engineering & System Safety 81, 23-69. 2003
- Helton, J. C.; Davis F. J., and Johnson J. D.. 2005. "A comparison of uncertainty and sensitivity analysis results obtained with random and Latin hypercube sampling". Reliability Engineering & System Safety 89, 305-330. 2005
- Hornik, K., M. Stinchcombe, and H. White. 1990. "Universal approximation of an unknown mapping and its derivatives using multilayer feedforward networks." Neural Networks 3 (5): 551–560. [https://doi.org/10.1016/0893-6080\(90\)90005-6](https://doi.org/10.1016/0893-6080(90)90005-6).
- Hosser, D., R. Schnetgöke, and C. Klinzmann. 2008. "Probabilistische Bewertung von Stahlbetonbauteilen unter Naturbrandbeanspruchung." Beton- Stahlbetonbau 103 (2): 112–118. <https://doi.org/10.1002/best.200700601>.
- Hurley, M. J., and E. R. Rosenbaum. 2015. Performance-based fire safety design. London: CRC Press.

- Hurtado, J. E. 2004. Lecture notes in applied and computational mechanics: Structural reliability. Amsterdam, Netherlands: A.A. Balkema.
- Hurtado, J. E., D. A. Alvarez, and A. H. Barbat. 2001. “Monte Carlo analysis of structural systems using neural networks.” In Proc., Int. Conf. on Monte Carlo simulation, MCS-2000: Monte Carlo Simulation, 265–271.
- Hurtado, J., and D. Alvarez. 2001. “Neural-network-based reliability analysis: A comparative study.” *Comput. Methods Appl. Mech. Eng.* 191 (1–2):113–132. [https://doi.org/10.1016/S0045-7825\(01\)00248-1](https://doi.org/10.1016/S0045-7825(01)00248-1).
- International Organization for Standardization. ISO 834: fire-resistance tests: elements of Building constructions: part 1.1: general requirements for fire resistance testing. Geneva, 1990. Revision of first edition (ISO: 834:1975).
- IN 14 (Normas de Segurança Contra Incêndio). Santa Catarina (Estado). Secretaria de Estado da Segurança Pública. Corpo de Bombeiros Militar. *Instrução Normativa n. 14*. Compartimentação, Tempo de Resistência ao Fogo e Isolamento de Risco. Santa Catarina, 2020.
- Iqbal S.; Harichandran R. S. Capacity reduction and fire load factors for LRFD of steel columns exposed to fire. *Fire Saf. J.* 46:234–242. 2011.
- Iqbal, S., and R. S. Harichandran. 2010. “Capacity reduction and fire load factors for design of steel members exposed to fire.” *J. Struct. Eng.* 136 (12): 1554–1562. [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)ST.1943-541X.0000256](https://doi.org/10.1061/(ASCE)ST.1943-541X.0000256).
- IT 8 (Instrução Técnica). Alagoas (Estado). Secretaria de Estado da Segurança Pública. Corpo de Bombeiros Militar. *Instrução Técnica n. 8*. Segurança estrutural contra incêndio. Alagoas, 2021.
- JCSS (Joint Committee on Structural Safety). Probabilistic Model Code – Part 2 – Load models. 99-COM-DYN/M0037, 72 p, 2001.
- Jiang, X. M., Chen H., Liew J. Y. R. (2002). Spread-of-plasticity analysis of three dimensional steel frames. *Journal of Constructional Steel Research*, 58(2): 193–212.
- Karamchandani, A., B. Bjerager, and C. A. Cornell. 1989. “Adaptive importance sampling.” In Proc., 5th Int. Conf. on Structural Safety and Reliability, edited by A. H.-S. Mg, M. Shinozuka, and G. I. Schuëller, 855–862. Reston, VA: ASCE.
- Kervalishvili, Andrei & Talvik, Ivar. (2019). Reliability based design method for buckling of steel columns in fire. *Journal of Structural Fire Engineering*. ahead-of-print. 10.1108/JSFE-12-2018-0041.
- Khorasani, N. E., Gardoni, P., and Garlock, M., 2015. “Probabilistic Fire Analysis: Material Models and Evaluation of Steel Structural Members” *J. Struct. Eng.*, 2015, 141(12): 04015050. [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)ST.1943-541X.0001285](https://doi.org/10.1061/(ASCE)ST.1943-541X.0001285).

- Lee, E. W. M. 2010. "Application of artificial neural network to fire safety engineering." In Vol. 4 of Handbook on decision making. Intelligent systems reference library, edited by L. C. Jain and C. P. Lim. Berlin: Springer.
- Lemaire, M. 2009. Structural reliability. Hoboken, NJ: Wiley.
- Li, G. and Wang P. Advanced Analysis and Design for Fire Safety of Steel Structures. Springer Heidelberg New York Dordrecht London, 2013.
- Liew J. Y. R.; Chen, H; Shanmugam N. E.; Chen W. F. (2000). Improved nonlinear plastic hinge analysis of space frame structures. Engineering Structures, 22(10): 1324–38. Lisse, Netherlands: A.A. Balkema.
- Marcolan Júnior, A. C. 2016. "Influência de distribuições de probabilidade ajustadas a propriedades mecânicas sobre probabilidades de falha estrutural." Dissertação de mestrado – Florianópolis, SC. Accessed September 13, 2020. <https://repositorio.ufsc.br/xmlui/handle/123456789/175851>.
- Marelli, S., and B. Sudret. 2016. "Bootstrap-polynomial chaos expansions and adaptive designs for reliability analysis." In Proc., 6th Asian-Pacific Symp. on Structural Reliability and its Applications (APSSRA6), edited by H. W. Huang, J. Li, J. Zhang, and J. B. Chen. Zurich, Switzerland: ETH Library. <https://doi.org/10.3929/ethz-a-010671460>.
- Melchers, R. E., and A. T. Beck. 2018. Structural reliability analysis and prediction. 3rd ed. New York: Wiley.
- Naser, M. Z. 2021. "Observational analysis of fire-induced spalling of concrete through ensemble machine learning and surrogate modeling." J. Mater. Civ. Eng. 33 (1): 04020428. [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)MT.1943-5533.0003525](https://doi.org/10.1061/(ASCE)MT.1943-5533.0003525).
- Mohammad, H.. "Probabilistic Study of the Resistance of a Simply-Supported Reinforced Concrete Slab According to Eurocode Parametric Fire". Fire Technology [0015-2684], p.:1 -28. 2018.
- Molkens, T., and Rossi, B.. 2021. "Reliability-based structural response of single-bay steel frames in case of fire and in post-fire conditions". Structural Safety Volume 93, November 2021, 102132. <https://doi.org/10.1016/j.strusafe.2021.102132>.
- Naser, M. Z. "Observational Analysis of Fire-Induced Spalling of Concrete through Ensemble Machine Learning and Surrogate Modeling". Journal of Materials in Civil Engineering. Vol. 33, Issue 1 (2021). [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)MT.1943-5533.0003525](https://doi.org/10.1061/(ASCE)MT.1943-5533.0003525)
- Nataf A.. Détermination des distributions de probabilités dont les marges sont données. C. R. Helbd SeÂances Acad Sci 255, 42-43.1962.
- Ngo-Huu, C.; Kim, S.-E.; Oh, J. R. (2007). Nonlinear analysis of space steel Frames using fiber plastic hinge concept. Engineering Structures, 29: 649–657.
- Ni, Shuna & Van Coile, Ruben & Elhami Khorasani, Negar & Hopkin, Danny & Gernay, Thomas. (2020). Lifetime economically optimum position of steel reinforcement in a concrete column exposed to natural fire. 10.14264/985c79e.

- Olsson A.; Sandberg G.; and Dahlblom O.. 2003. “On Latin hypercube sampling for structural reliability analysis”. *Structural Safety* 25, 47-68. 2003.
- Papadopoulos, V., D. G. Giovanis, N. D. Lagaros, and M. Papadrakakis. 2012. “Accelerated subset simulation with neural networks for reliability analysis.” *Comput. Methods Appl. Mech. Eng.* 223–224 (1): 70–80. <https://doi.org/10.1016/j.cma.2012.02.013>.
- Papadrakakis, M., and N. D. Lagaros. 2002. “Reliability-based structural optimization using neural networks and Monte Carlo simulation.” *Comput. Methods Appl. Mech. Eng.* 191 (32): 3491–3507. [https://doi.org/10.1016/S0045-7825\(02\)00287-6](https://doi.org/10.1016/S0045-7825(02)00287-6).
- Papadrakakis, M., V. Papadopoulos, and N. D. Lagaros. 1996. “Structural reliability analysis of elastic-plastic structures using neural networks and Monte Carlo simulation.” *Comput. Methods Appl. Mech. Eng.* 136 (1–2): 145–163. [https://doi.org/10.1016/0045-7825\(96\)01011-0](https://doi.org/10.1016/0045-7825(96)01011-0).
- Pierin, I.; Silva, V. P. and Rovere, H. L. La. Thermal analysis of two-dimensional structures in fire. *IBRACON structures and materials journal*. volume 8, Number 1, p. 25-48. 2015.
- Qureshi, R.; Ni, S.; Khorasani, N. E.; Van Coile, R.; Hopkin, D. and Gernay, T.. “Probabilistic Models for Temperature-Dependent Strength of Steel and Concrete” . *J. Struct. Eng.*, 2020. 146(6): 04020102. DOI: 10.1061/(ASCE)ST.1943-541X.0002621.
- Rackwitz R.; Fiessler B. *Structural Reliability under combined load sequences*, *Computers & Structures* 9, 489-494. 1978.
- Ravindra, M. K., and T. V. Galambos. 1978. “Load and resistance factor design for steel.” *J. Struct. Div.* 104 (9): 1337–1353. <https://doi.org/10.1061/JSDEAG.0004981>.
- Ricardo, A. S. 2015. “Análise da Confiabilidade Estrutural de Elementos de aço em Situação de Incêndio.” Accessed September 27, 2020. <https://repositorio.ufsc.br/xmlui/handle/123456789/169441>.
- Ricardo, A., S., and Gomes W., J., S.. 2021. “Structural Reliability Methods Applied in Analysis of Steel Elements Subjected to Fire” *J. Eng. Mech.*, 2021, 147(12): 04021108. [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)EM.1943-7889.0002023](https://doi.org/10.1061/(ASCE)EM.1943-7889.0002023).
- Rigobello, R.. “Desenvolvimento e aplicação de código computacional para análise de estruturas de aço aporticadas em situação de incêndio”. 272 p. Tese (Doutorado) - Escola de engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Carlos, 2011.
- Rosenblatt M. Remarks on a multivariate transformation, *Ann Math Stat* 23, 470-472. 1952.
- Rumelhart, D. E., G. E. Hinton, and J. L. McClelland. 1986. *Parallel distributed processing*. Cambridge, MA: MIT Press.
- Sasaki, T. 2001 “A neural network-based response surface approach for computing failure probabilities.” In *Proc. Int. Conf. on Structural Safety and Reliability, ICASSAR 01: Structural Safety and Reliability*, edited by R. B. Corotis, G. Schueller, and M. Shinozuka, 257. Lisse, Netherlands: A.A. Balkema.

- Schueremans, L., and D. Van Gemert. 2005. "Benefit of splines and neural networks in simulation based structural reliability analysis." *Struct. Saf.* 27 (3): 246–261. <https://doi.org/10.1016/j.strusafe.2004.11.001>.
- Shao, S., and Y. Murotsu. 1997. "Structural reliability analysis using a neural network." *JSME Int. J. Ser. A Solid Mech. Mater. Eng.* 40 (3): 242–246. <https://doi.org/10.1299/jsmea.40.242>.
- Shi, K., Q. Guo, and A. Jeffers. 2013. "Stochastic analysis of structures in fire by Monte Carlo simulation." *J. Struct. Fire Eng.* 4 (1): 37–46. <https://doi.org/10.1260/2040-2317.4.1.37>.
- Shrivastava, M.; Abu, A; Dhakal, R. and Moss, P.. "State-of-the-art of probabilistic performance based structural fire engineering". *Journal of Structural Fire Engineering*. Vol. 10 No. 2, 2019. pp. 175-192. 2040-2317. DOI 10.1108/JSFE-02-2018-0005
- Silva, I. N., D. H. Spatti, R. A. Flauzino, L. H. B. Liboni, and S. F. R. Alves. 2017. *Artificial neural networks: A practical course*. New York: Springer.
- Silva, V. P. *Estruturas de aço em Situação de Incêndio*. Zigurate Editora. São Paulo. 2004.
- Silva, V. P. *Projeto de estruturas de concreto em Situação de Incêndio: conforme ABNT NBR 15200:2012*. Editora Blucher. São Paulo. 2012.
- Soares, R. C., A. Mohamed, W. S. Venturini, and M. Lemaire. 2002. "Reliability analysis of non-linear reinforced concrete frames using the response surface method." *Reliab. Eng. Syst. Saf.* 75 (1): 1–16. [https://doi.org/10.1016/S0951-8320\(01\)00043-6](https://doi.org/10.1016/S0951-8320(01)00043-6).
- Souto, N., A., de O.. *Aplicação de confiabilidade ao estudo de elementos de aço comprimidos em situação de incêndio*. 2015. 121 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil: Estruturas) – Centro de Tecnologia, Programa de Pós Graduação em Engenharia Civil, Universidade Federal de Alagoas, Maceió, 2015.
- Stein, M. 1999. *Statistical interpolation of spatial data: Some theory for Kriging*. New York: Springer.
- Tavares, R. M., *An analysis of the fire safety codes in Brazil: Is the performance-based approach the best practice?*, *Fire Safety Journal* 44 (2009) 749–755. 2009.
- Tan, X.-H., W.-H. Bi, X.-L. Hou, and W. Wang. 2011. "Reliability analysis using radial basis function networks and support vector machines." *Comput. Geotech.* 38 (2): 178–186. <https://doi.org/10.1016/j.compgeo.2010.11.002>.
- Toratti, T.; Schnabl, S.; Turk, G. *Reliability analysis of a glulam beam*. *Structural Safety*, v. 29, n. 4, p. 279–293, out. 2007.
- Van Coile, R., R. Caspeele, and L. Taerwe. 2014. "Reliability-based evaluation of inherent safety presumptions in common fire safety design." *Eng. Struct.* 77 (1): 181–192. <https://doi.org/10.1016/j.engstruct.2014.06.007>.

- Vargas M. R. e Silva, V. P. Resistência ao Fogo das Estruturas de Aço. (Instituto Brasileiro de Siderurgia - IBS / Centro Brasileiro da Construção em Aço) Rio de Janeiro, 2003.
- Walls, Richard; Viljoen, Celeste; and de Clercq, Hennie. (2017). Reliability analysis of the slab panel method (SPM) for the design of composite steel floors in severe fires. *Journal of Structural Fire Engineering* Vol. 8 No. 1, 2017 pp. 84-103 © Emerald Publishing Limited 2040-2317. DOI 10.1108/JSFE-01-2017-0008.
- Wang, Y. C.. *Steel and Composite Structures - Behaviour and Design for Fire Safety*. London: Spon Press, 2002.
- Wang, Z., M. Qiao, Y. Han, and D. Zhu. 2010. "A time-variant reliability analysis of steel structures at high temperature." *Int. J. Appl. Electromagn. Mech.* 33 (3–4): 1607–1613. <https://doi.org/10.3233/JAE-2010-1291>.
- Weilert, A.; Hosser, D.; Klinzmann, C. Probabilistic Safety Concept for Fire Safety Engineering based on Natural Fires. *Beton- und Stahlbetonbau*, v. 103, n. S1, p. 29–36, abr. 2008.
- Zhang, C.; Li, G.-Q.; Wang, Y.-C. Probabilistic analysis of steel columns protected by intumescent coatings subjected to natural fires. *Structural Safety*, v. 50. p. 16–26, set. 2014.
- Zhang, Y. and Kiureghian, A. D.. *Finite Element Reliability Methods for Inelastic Structures*. Report UCB/SEMM-97/05, Department of Civil and Environmental Engineering, University of California, Berkeley, 1997.

APÊNDICE A: PROGRAMAÇÃO DE MÓDULOS TERMOMECÂNICOS DESENVOLVIDOS EM LINGUAGEM APDL (*ANSYS PARAMETRIC DESIGN LANGUAGE*)

Neste apêndice, são fornecidos códigos computacionais programados em linguagem APDL e que foram utilizados na modelagem termomecânica do pilar de aço termicamente protegido (submetido ao modelo de incêndio padronizado) e na modelagem do sistema estrutural tridimensional de aço submetido a curva natural de incêndio. Os demais dados, modelos ou códigos que deram suporte para as descobertas observadas na presente tese estão disponíveis com o autor e podem ser disponibilizados mediante razoável solicitação.

A.1. APDL DO PROBLEMA 1: PILAR DE AÇO TERMICAMENTE PROTEGIDO SUBMETIDO AO MODELO DE INCÊNDIO ISO 834

```

!
/BATCH
!
=====
! APDL DO PROBLEMA 1: PILAR DE AÇO TERMICAMENTE PROTEGIDO - CURVA ISO 834
=====
!
FINISH      ! (Estes dois comandos limpam os dados atuais)
/CLEAR
/NOPR      ! Suprime a impressao de dados de entrada interpretados
/NOLIST    ! Suprime a entrada de dados listados
!
!
=====
! ***** DADOS DO ARQUIVO *****
=====
!
! NORSTGM=1 NAO ESCREVER OS DADOS DE GEOMETRIA
! NPROC - NUMERO DE PROCESSADORES
! NOELDB=1, NAO ESCREVER RESULTADOS NA DATABASE
/CONFIG,NORSTGM,1,NOELDB,1,NPROC,8
!
! MSGPOP=3 - Mostrar apenas erros ocorridos
! UNDO=2 - Nao escreve comentarios e comandos nao essenciais
! REplot=0 - No automatic replot
!
/UIS, MSGPOP, 3, UNDO, 2, REplot, 0
!
/CWD,'C:\Users\Pichau\Área de Trabalho\Adaptive_ANN'      ! DIRETORIO
/TITLE,ZFEA
/FILNAME,ZFEA,0      ! TITULO DO TRABALHO
/PREP7      ! TIPO DE ANALISE
/COM, Structural      ! ANALISE ESTRUTURAL
/COM, Thermal      ! ANALISE TERMICA
!
!
=====
! ***** PARAMETROS DE ENTRADA *****
=====
!
bm = 305/1000      ! comprimento da mesa (m)
em = 15.4/1000    ! espessura da mesa (m)
ea = 9.9/1000     ! espessura da alma (m)
ap = 308/1000    ! altura do pefil (m)
L = 4.11          ! comprimento do pilar (m)

```

```

malha = L/100      ! refinamento da malha
passo_tempo = 30  ! passo de tempo (s)
Pinst = 0.05      ! porcentagem de carga aplicada na lateral do pilar
!
=====
! ***** VARIÁVEIS ALEATORIAS *****
!
!VA1
P = 1432500      ! CARGA 'P' (N)
!
!VA2
fy = 345000000  ! TENSAO LIMITE DE PROPORCIONALIDADE (N/m²)
!
!VA3
epsil = 0.44129 ! PARAMETRO CONDUTIVIDADE TERMICA (Khorasani et al., 2015)
!
!VA4
epsi = 0.67002  ! PARAMETRO COEFICIENTE DE DILATAÇAO (Khorasani et al., 2015)
!
!VA5
FRR = 0.52045   ! FATORES DE REDUÇAO DA RESISTENCIA AO ESCOAMENTO (Qureshi et al., 2020)
!
!VA6
FRP = 0.3664    ! FATORES DE REDUÇÃO DO LIMITE DE PROPORCIONALIDADE (Qureshi et al., 2020)
!
!VA7
FRE = -0.77544  ! FATORES DE REDUÇÃO DO MODULO DE ELASTICIDADE (Khorasani et al., 2015)
!
!VA8
CES = 0.022099 ! PARAMETRO CALOR ESPECIFICO DO SFRM (Khorasani et al., 2015)
!
!VA9
CSF = 0.11624   ! PARAMETRO CONDUTIVIDADE DO SFRM (Khorasani et al., 2015)
!
!VA10
DSF = 1.1277    ! PARAMETRO DENSIDADE DO SFRM (Khorasani et al., 2015)
!
!VA11
tmp = 0.020     ! ESPESSURA DO MATERIAL DE PROTECAO TERMICA (m)
!
=====
! ***** PARAMETROS DETERMINISTICOS DO PROBLEMA *****
!
t_incendio = 7500 ! PERIODO DE INCENDIO AVALIADO (s)
d = 7850          ! DENSIDADE DO ACO (kg/m3)
ME = 200E+09      ! MODULO DE ELASTICIDADE para 20C (N/m2)
v = 0.3          ! COEFICIENTE DE POISSON (adimensional)
Tamb = 20         ! TEMPERATURA AMBIENTE (C)
tlim = 20/60     ! TEMPO LIMITE AUXILIAR (20 min) EM HORAS - EUROCODE
fpp = 1*fy       ! RESISTENCIA AO ESCOAMENTO DO ACO PARA 20 C (N/m2)
E = fy/(fpp/ME)
!
!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!
!
EMI = 0.7         ! EMISSIVIDADE (adimensional)
txcon_natural = 35 ! FLUXO CONVECTIVO (COEFICIENTE DE TRANSFERÊNCIA DE CALOR DE CONVECÇÃO) (W/m².K)
txcon_padrao = 25 ! FLUXO CONVECTIVO (COEFICIENTE DE TRANSFERÊNCIA DE CALOR DE CONVECÇÃO) (W/m².K)
txcon = txcon_natural ! FLUXO CONVECTIVO (COEFICIENTE DE TRANSFERÊNCIA DE CALOR DE CONVECÇÃO) (W/m².K)
CF = txcon       ! COEFICIENTE DE FILME (W/m².C)
!
=====
! ***** FATOR DE MASSIVIDADE *****
!
FM4 = (2*bm+4*em+2*(ap-2*em)+2*(bm-ea))/(2*(bm*em)+(ea*(ap-2*em))) ! FATOR DE MASSIVIDADE 4 LADOS (m^-1)
FM3 = (2*bm+4*em+2*(ap-2*em)+2*(bm-ea)-bm)/(2*(bm*em)+(ea*(ap-2*em))) ! FATOR DE MASSIVIDADE 3 LADOS (m^-1)
!

```

```

Fmb4 = (2*(ap+bm))/((2*(bm*em)+(ea*(ap-2*em))))           ! FATOR DE MASSIVIDADE 4 LADOS (m^-1)
Fmb3 = ((2*ap+bm))/((2*(bm*em)+(ea*(ap-2*em))))           ! FATOR DE MASSIVIDADE 3 LADOS (m^-1)
!
FM = FM4             ! FATOR DE MASSIVIDADE ADOTADO
Fmb= Fmb4
!
=====
! ***** PROPRIEDADES DO ELEMENTO (NBR 14323/2013) *****
! =====
!
ET,1,SOLID45        ! Tipo de Elemento
TREF,Tamb
TOFFST,273          ! TEMPERATURA (C)
!
! DENSIDADE DO ACO (kg/m3)
MPTEMP,,,,,,,,
MPTEMP,1,0
MPDATA,DENS,1,,d
!
=====
! ***** CALOR ESPECIFICO EM FUNCAO DA TEMPERATURA (J/kgC) *****
! =====
!
MPTEMP,,,,,,,,
MPTEMP,1,0
MPTEMP,2,20
MPTEMP,3,100
MPTEMP,4,200
MPTEMP,5,300
MPTEMP,6,400
MPTEMP,7,500
MPTEMP,8,600
MPTEMP,9,700
MPTEMP,10,735
MPTEMP,11,800
MPTEMP,12,900
MPTEMP,13,1000
MPTEMP,14,1100
MPTEMP,15,1200
MPDE,C,1
MPDATA,C,1,,425
MPDATA,C,1,,439.78
MPDATA,C,1,,485.4
MPDATA,C,1,,529.76
MPDATA,C,1,,564.74
MPDATA,C,1,,605.88
MPDATA,C,1,,666.5
MPDATA,C,1,,759.92
MPDATA,C,1,,1008.2
MPDATA,C,1,,5000
MPDATA,C,1,,803.26
MPDATA,C,1,,650.44
MPDATA,C,1,,650
MPDATA,C,1,,650
!
!EMISSIVIDADE (adimensional)
MPDATA,EMIS,1,,EMI
!
!COEFICIENTE DE FILME (W/m2C)
MPDATA,HF,1,,CF
!
=====
! ***** CONDUTIVIDADE TERMICA EM FUNCAO DA TEMPERATURA (W/mC) (Khorasani ET AL (2015))*****
! =====
!
Taco=0
kx=54-3.33E-02*Taco
kx0 = 60 - EXP(LOG(60-kx) + (145.4E-03) - ((5E-04)*Taco) + (2.06E-01*epsil))
!
Taco=20
kx=54-3.33E-02*Taco
kx20 = 60 - EXP(LOG(60-kx) + (145.4E-03) - ((5E-04)*Taco) + (2.06E-01*epsil))

```

```

!
kx800 = 60 - EXP(3.23 + 2.06E-01*epsil)
kx1200 = 60 - EXP(3.23 + 2.06E-01*epsil)
!
MPTEMP,,,,,,,,
MPTEMP,1,0
MPTEMP,2,20
MPTEMP,3,800
MPTEMP,4,1200
MPDATA,KXX,1,,kx0
MPDATA,KXX,1,,kx20
MPDATA,KXX,1,,kx800
MPDATA,KXX,1,,kx1200
!
=====
!***** COEFICIENTE DE DILATAAO EM FUNCAO DA TEMPERATURA (Khorasani ET AL (2015))*****
=====
!
ks=(1.2E-05)*50 + (4E-09)*(50**2)-(2.416E-04)
Dila20 = ((SQRT(ks)-(1.28E-03)+(3.96E-06)*50 + (3.9E-03)*epsi)**2)/(50-Tamb)
!
Taco=100
ks=(1.2E-05)*Taco + (4E-09)*(Taco**2)-(2.416E-04)
Dila100 = ((SQRT(ks)-(1.28E-03)+(3.96E-06)*Taco + (3.9E-03)*epsi)**2)/(Taco-Tamb)
!
Taco=200
ks=(1.2E-05)*Taco + (4E-09)*(Taco**2)-(2.416E-04)
Dila200 = ((SQRT(ks)-(1.28E-03)+(3.96E-06)*Taco + (3.9E-03)*epsi)**2)/(Taco-Tamb)
!
Taco=300
ks=(1.2E-05)*Taco + (4E-09)*(Taco**2)-(2.416E-04)
Dila300 = ((SQRT(ks)-(1.28E-03)+(3.96E-06)*Taco + (3.9E-03)*epsi)**2)/(Taco-Tamb)
!
Taco=400
ks=(1.2E-05)*Taco + (4E-09)*(Taco**2)-(2.416E-04)
Dila400 = ((SQRT(ks)-(1.28E-03)+(3.96E-06)*Taco + (3.9E-03)*epsi)**2)/(Taco-Tamb)
!
Taco=500
ks=(1.2E-05)*Taco + (4E-09)*(Taco**2)-(2.416E-04)
Dila500 = ((SQRT(ks)-(1.28E-03)+(3.96E-06)*Taco + (3.9E-03)*epsi)**2)/(Taco-Tamb)
!
Taco=600
ks=(1.2E-05)*Taco + (4E-09)*(Taco**2)-(2.416E-04)
Dila600 = ((SQRT(ks)-(1.28E-03)+(3.96E-06)*Taco + (3.9E-03)*epsi)**2)/(Taco-Tamb)
!
Taco=750
ks=(1.2E-05)*Taco + (4E-09)*(Taco**2)-(2.416E-04)
Dila750 = ((SQRT(ks)-(1.28E-03)+(3.96E-06)*Taco + (3.9E-03)*epsi)**2)/(Taco-Tamb)
!
!
Taco=760
ks=(1.1E-02)
Dila760 = ((SQRT(ks)+(1.69+(6.4E-01)*(Taco-750)-1.7*(Taco-750)**(8.1E-01) + 3.7*epsi)*(1E-03))**2)/(Taco-Tamb)
!
Taco=800
ks=(1.1E-02)
Dila800 = ((SQRT(ks)+(1.69+(6.4E-01)*(Taco-750)-1.7*(Taco-750)**(8.1E-01) + 3.7*epsi)*(1E-03))**2)/(Taco-Tamb)
!
Taco=860
ks=(1.1E-02)
Dila860 = ((SQRT(ks)+(1.69+(6.4E-01)*(Taco-750)-1.7*(Taco-750)**(8.1E-01) + 3.7*epsi)*(1E-03))**2)/(Taco-Tamb)
!
Taco=900
ks=(2E-05)*Taco-(6.2E-03)
Dila900 = ((SQRT(ks)-(2.32E-03)+(1.73E-07)*(Taco-860)+(3.7E-03)*epsi)**2)/(Taco-Tamb)
!
Taco=1000
ks=(2E-05)*Taco-(6.2E-03)
Dila1000 = ((SQRT(ks)-(2.32E-03)+(1.73E-07)*(Taco-860)+(3.7E-03)*epsi)**2)/(Taco-Tamb)
!
Taco=1100
ks=(2E-05)*Taco-(6.2E-03)

```

```

Dila1100 = ((SQRT(ks)-(2.32E-03)+(1.73E-07)*(Taco-860)+(3.7E-03)*epsi)**2)/(Taco-Tamb)
!
Taco=1200
ks=(2E-05)*Taco-(6.2E-03)
Dila1200 = ((SQRT(ks)-(2.32E-03)+(1.73E-07)*(Taco-860)+(3.7E-03)*epsi)**2)/(Taco-Tamb)
!
! COEFICIENTE DE DILATAÇÃO EM FUNÇÃO DA TEMPERATURA (1/C)
!
MPTEMP,,,,,,,,
MPTEMP,1,20
MPTEMP,2,100
MPTEMP,3,200
MPTEMP,4,300
MPTEMP,5,400
MPTEMP,6,500
MPTEMP,7,600
MPTEMP,8,750
MPTEMP,9,760
MPTEMP,10,800
MPTEMP,11,860
MPTEMP,12,900
MPTEMP,13,1000
MPTEMP,14,1100
MPTEMP,15,1200
!
UIMP,1,REFT,,,20
MPDATA,ALPX,1,,Dila20
MPDATA,ALPX,1,,Dila100
MPDATA,ALPX,1,,Dila200
MPDATA,ALPX,1,,Dila300
MPDATA,ALPX,1,,Dila400
MPDATA,ALPX,1,,Dila500
MPDATA,ALPX,1,,Dila600
MPDATA,ALPX,1,,Dila750
MPDATA,ALPX,1,,Dila760
MPDATA,ALPX,1,,Dila800
MPDATA,ALPX,1,,Dila860
MPDATA,ALPX,1,,Dila900
MPDATA,ALPX,1,,Dila1000
MPDATA,ALPX,1,,Dila1100
MPDATA,ALPX,1,,Dila1200
!
=====
!***** GERACAO DOS GRAFICOS TENSAO-DEFORMACAO EM FUNCAO DA TEMPERATURA DO INCENDIO *****
=====
!
=====
!***** FATORES DE REDUÇÃO DA RESISTENCIA AO ESCOAMENTO CONFORME (FRR) Qureshi ET AL (2020)*****
=====
!
Teta = 20
mu = ((-6.89E-09)*(Teta**3))+((1.84E-06)*Teta**2)-((8.39E-05)*Teta)+(1.48E-01)
sigma = ((2.41E-07)*Teta**2)+((1.07E-04)*Teta)+(9.77E-02)
Ky_20 = EXP((FRR*sigma) + mu) ! PDF Lognormal, media=mu e desvio=sigma
=====
!
Teta = 200
mu = ((-6.89E-09)*(Teta**3))+((1.84E-06)*Teta**2)-((8.39E-05)*Teta)+(1.48E-01)
sigma = ((2.41E-07)*Teta**2)+((1.07E-04)*Teta)+(9.77E-02)
Ky_200 = EXP((FRR*sigma) + mu) ! PDF Lognormal, media=mu e desvio=sigma
=====
!
Teta = 300
mu = ((-6.89E-09)*(Teta**3))+((1.84E-06)*Teta**2)-((8.39E-05)*Teta)+(1.48E-01)
sigma = ((2.41E-07)*Teta**2)+((1.07E-04)*Teta)+(9.77E-02)
Ky_300 = EXP((FRR*sigma) + mu) ! PDF Lognormal, media=mu e desvio=sigma
=====
!
Teta = 400
mu = ((-6.89E-09)*(Teta**3))+((1.84E-06)*Teta**2)-((8.39E-05)*Teta)+(1.48E-01)
sigma = ((2.41E-07)*Teta**2)+((1.07E-04)*Teta)+(9.77E-02)
Ky_400 = EXP((FRR*sigma) + mu) ! PDF Lognormal, media=mu e desvio=sigma

```

```

!
!=====
!
!
Teta = 500
mu = ((-6.89E-09)*(Teta**3))+((1.84E-06)*Teta**2)-((8.39E-05)*Teta)+(1.48E-01)
sigma = ((2.41E-07)*Teta**2)+((1.07E-04)*Teta)+(9.77E-02)
Ky_500 = EXP((FRR*sigma) + mu)          ! PDF Lognormal, media=mu e desvio=sigma
!
!=====
!
!
Teta = 600
mu = ((-6.89E-09)*(Teta**3))+((1.84E-06)*Teta**2)-((8.39E-05)*Teta)+(1.48E-01)
sigma = ((2.41E-07)*Teta**2)+((1.07E-04)*Teta)+(9.77E-02)
Ky_600 = EXP((FRR*sigma) + mu)          ! PDF Lognormal, media=mu e desvio=sigma
!
!=====
!
!
Teta = 700
mu = ((-6.89E-09)*(Teta**3))+((1.84E-06)*Teta**2)-((8.39E-05)*Teta)+(1.48E-01)
sigma = ((2.41E-07)*Teta**2)+((1.07E-04)*Teta)+(9.77E-02)
Ky_700 = EXP((FRR*sigma) + mu)          ! PDF Lognormal, media=mu e desvio=sigma
!
!=====
!
!
Teta = 800
mu = ((-6.89E-09)*(Teta**3))+((1.84E-06)*Teta**2)-((8.39E-05)*Teta)+(1.48E-01)
sigma = ((2.41E-07)*Teta**2)+((1.07E-04)*Teta)+(9.77E-02)
Ky_800 = EXP((FRR*sigma) + mu)          ! PDF Lognormal, media=mu e desvio=sigma
!
!=====
!
!
Teta = 900
mu = ((-6.89E-09)*(Teta**3))+((1.84E-06)*Teta**2)-((8.39E-05)*Teta)+(1.48E-01)
sigma = ((2.41E-07)*Teta**2)+((1.07E-04)*Teta)+(9.77E-02)
Ky_900 = EXP((FRR*sigma) + mu)          ! PDF Lognormal, media=mu e desvio=sigma
!
!=====
!
!
Teta = 1000
mu = ((-6.89E-09)*(Teta**3))+((1.84E-06)*Teta**2)-((8.39E-05)*Teta)+(1.48E-01)
sigma = ((2.41E-07)*Teta**2)+((1.07E-04)*Teta)+(9.77E-02)
Ky_1000 = EXP((FRR*sigma) + mu)         ! PDF Lognormal, media=mu e desvio=sigma
!
!=====
!
!
Teta = 1100
mu = ((-6.89E-09)*(Teta**3))+((1.84E-06)*Teta**2)-((8.39E-05)*Teta)+(1.48E-01)
sigma = ((2.41E-07)*Teta**2)+((1.07E-04)*Teta)+(9.77E-02)
Ky_1100 = EXP((FRR*sigma) + mu)         ! PDF Lognormal, media=mu e desvio=sigma
!
!=====
!
!
*****FATORES DE REDUÇÃO DO LIMITE DE PROPORCIONALIDADE (FRP) CONFORME Qureshi ET AL (2020)*****
!=====
!
!
Teta = 20
mu = ((-1.45E-09)*(Teta**3))-((1.78E-06)*Teta**2)-((2.5E-05)*Teta)+(1.19E-02)
sigma = ((1.895E-07)*Teta**2)+((1.15E-04)*Teta)+(5.62E-02)
Kp_20 = EXP((FRP*sigma) + mu)
!
!=====
!
!
Teta = 200
mu = ((-1.45E-09)*(Teta**3))-((1.78E-06)*Teta**2)-((2.5E-05)*Teta)+(1.19E-02)
sigma = ((1.895E-07)*Teta**2)+((1.15E-04)*Teta)+(5.62E-02)
Kp_200 = EXP((FRP*sigma) + mu)
!
!=====
!
!
Teta = 300
mu = ((-1.45E-09)*(Teta**3))-((1.78E-06)*Teta**2)-((2.5E-05)*Teta)+(1.19E-02)
sigma = ((1.895E-07)*Teta**2)+((1.15E-04)*Teta)+(5.62E-02)

```

```

Kp_300 = EXP((FRP*sigma) + mu)
!
=====
!
Teta = 400
mu = ((-1.45E-09)*(Teta**3))-((1.78E-06)*Teta**2)-((2.5E-05)*Teta)+(1.19E-02)
sigma = ((1.895E-07)*Teta**2)+((1.15E-04)*Teta)+(5.62E-02)
Kp_400 = EXP((FRP*sigma) + mu)
!
=====
!
Teta = 500
mu = ((-1.45E-09)*(Teta**3))-((1.78E-06)*Teta**2)-((2.5E-05)*Teta)+(1.19E-02)
sigma = ((1.895E-07)*Teta**2)+((1.15E-04)*Teta)+(5.62E-02)
Kp_500 = EXP((FRP*sigma) + mu)
!
=====
!
Teta = 600
mu = ((-1.45E-09)*(Teta**3))-((1.78E-06)*Teta**2)-((2.5E-05)*Teta)+(1.19E-02)
sigma = ((1.895E-07)*Teta**2)+((1.15E-04)*Teta)+(5.62E-02)
Kp_600 = EXP((FRP*sigma) + mu)
!
=====
!
Teta = 700
mu = ((-1.45E-09)*(Teta**3))-((1.78E-06)*Teta**2)-((2.5E-05)*Teta)+(1.19E-02)
sigma = ((1.895E-07)*Teta**2)+((1.15E-04)*Teta)+(5.62E-02)
Kp_700 = EXP((FRP*sigma) + mu)
!
=====
!
Teta = 800
mu = ((-1.45E-09)*(Teta**3))-((1.78E-06)*Teta**2)-((2.5E-05)*Teta)+(1.19E-02)
sigma = ((1.895E-07)*Teta**2)+((1.15E-04)*Teta)+(5.62E-02)
Kp_800 = EXP((FRP*sigma) + mu)
!
=====
!
Teta = 900
mu = ((-1.45E-09)*(Teta**3))-((1.78E-06)*Teta**2)-((2.5E-05)*Teta)+(1.19E-02)
sigma = ((1.895E-07)*Teta**2)+((1.15E-04)*Teta)+(5.62E-02)
Kp_900 = EXP((FRP*sigma) + mu)
!
=====
!
Teta = 1000
mu = ((-1.45E-09)*(Teta**3))-((1.78E-06)*Teta**2)-((2.5E-05)*Teta)+(1.19E-02)
sigma = ((1.895E-07)*Teta**2)+((1.15E-04)*Teta)+(5.62E-02)
Kp_1000 = EXP((FRP*sigma) + mu)
!
=====
!
Teta = 1100
mu = ((-1.45E-09)*(Teta**3))-((1.78E-06)*Teta**2)-((2.5E-05)*Teta)+(1.19E-02)
sigma = ((1.895E-07)*Teta**2)+((1.15E-04)*Teta)+(5.62E-02)
Kp_1100 = EXP((FRP*sigma) + mu)
!
=====
!
!*** ***** FATORES DE REDUÇÃO DO MODULO DE ELASTICIDADE CONFORME (Khorasani ET AL (2015))*****
!
=====
!
Teta = 20
cte1=EXP(2.54-((2.69E-03)*Teta)-((2.83E-06)*(Teta**2)) + 3.6E-01*FRE)
cte2=cte1+1
KE_20 = 1.1*((cte1)/(cte2))
!
=====
!
Teta = 200
cte1=EXP(2.54-((2.69E-03)*Teta)-((2.83E-06)*(Teta**2)) + 3.6E-01*FRE)
cte2=cte1+1

```

```

KE_200 = 1.1*((cte1)/(cte2))
!=====
!
Teta = 300
cte1=EXP(2.54-((2.69E-03)*Teta)-((2.83E-06)*(Teta**2)) + 3.6E-01*FRE)
cte2=cte1+1
KE_300 = 1.1*((cte1)/(cte2))
!=====
!
Teta = 400
cte1=EXP(2.54-((2.69E-03)*Teta)-((2.83E-06)*(Teta**2)) + 3.6E-01*FRE)
cte2=cte1+1
KE_400 = 1.1*((cte1)/(cte2))
!=====
!
Teta = 500
cte1=EXP(2.54-((2.69E-03)*Teta)-((2.83E-06)*(Teta**2)) + 3.6E-01*FRE)
cte2=cte1+1
KE_500 = 1.1*((cte1)/(cte2))
!=====
!
Teta = 600
cte1=EXP(2.54-((2.69E-03)*Teta)-((2.83E-06)*(Teta**2)) + 3.6E-01*FRE)
cte2=cte1+1
KE_600 = 1.1*((cte1)/(cte2))
!=====
!
Teta = 700
cte1=EXP(2.54-((2.69E-03)*Teta)-((2.83E-06)*(Teta**2)) + 3.6E-01*FRE)
cte2=cte1+1
KE_700 = 1.1*((cte1)/(cte2))
!=====
!
Teta = 800
cte1=EXP(2.54-((2.69E-03)*Teta)-((2.83E-06)*(Teta**2)) + 3.6E-01*FRE)
cte2=cte1+1
KE_800 = 1.1*((cte1)/(cte2))
!=====
!
Teta = 900
cte1=EXP(2.54-((2.69E-03)*Teta)-((2.83E-06)*(Teta**2)) + 3.6E-01*FRE)
cte2=cte1+1
KE_900 = 1.1*((cte1)/(cte2))
!=====
!
Teta = 1000
cte1=EXP(2.54-((2.69E-03)*Teta)-((2.83E-06)*(Teta**2)) + 3.6E-01*FRE)
cte2=cte1+1
KE_1000 = 1.1*((cte1)/(cte2))
!=====
!
Teta = 1100
cte1=EXP(2.54-((2.69E-03)*Teta)-((2.83E-06)*(Teta**2)) + 3.6E-01*FRE)
cte2=cte1+1
KE_1100 = 1.1*((cte1)/(cte2))
!=====
!
! MODULO DE ELASTICIDADE E POISSON para 20C (N/m2)
!
MPTEMP,,,,,,,,
MPTEMP,1,20
MPTEMP,2,200
MPTEMP,3,300

```



```

Kp_1000 = Ky_1000
*ENDIF
!
*IF, Kp_1100, GT, Ky_1100, THEN
Kp_1100 = Ky_1100
*ENDIF
!
!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!
!
fy_20 = fy*Ky_20
fy_200 = fy*Ky_200
fy_300 = fy*Ky_300
fy_400 = fy*Ky_400
fy_500 = fy*Ky_500
fy_600 = fy*Ky_600
fy_700 = fy*Ky_700
fy_800 = fy*Ky_800
fy_900 = fy*Ky_900
fy_1000 = fy*Ky_1000
fy_1100 = fy*Ky_1100
!
fp_20 = fpp*Kp_20
fp_200 = fpp*Kp_200
fp_300 = fpp*Kp_300
fp_400 = fpp*Kp_400
fp_500 = fpp*Kp_500
fp_600 = fpp*Kp_600
fp_700 = fpp*Kp_700
fp_800 = fpp*Kp_800
fp_900 = fpp*Kp_900
fp_1000 = fpp*Kp_1000
fp_1100 = fpp*Kp_1100
!
E_20 = E*KE_20
E_200 = E*KE_200
E_300 = E*KE_300
E_400 = E*KE_400
E_500 = E*KE_500
E_600 = E*KE_600
E_700 = E*KE_700
E_800 = E*KE_800
E_900 = E*KE_900
E_1000 = E*KE_1000
E_1100 = E*KE_1100
!
eps_e = 0.2          ! VALORES SEGUNDO O EUROCODE 3
eps_u = 0.15
eps_y = 0.02
!
eps_p20 = fp_20/E_20
eps_p200 = fp_200/E_200
eps_p300 = fp_300/E_300
eps_p400 = fp_400/E_400
eps_p500 = fp_500/E_500
eps_p600 = fp_600/E_600
eps_p700 = fp_700/E_700
eps_p800 = fp_800/E_800
eps_p900 = fp_900/E_900
eps_p1000 = fp_1000/E_1000
eps_p1100 = fp_1100/E_1100
!
c20 = (((fy_20-fp_20)**2)/((E_20*(eps_y-eps_p20))-(2*(fy_20-fp_20))))
c200 = (((fy_200-fp_200)**2)/((E_200*(eps_y-eps_p200))-(2*(fy_200-fp_200))))
c300 = (((fy_300-fp_300)**2)/((E_300*(eps_y-eps_p300))-(2*(fy_300-fp_300))))
c400 = (((fy_400-fp_400)**2)/((E_400*(eps_y-eps_p400))-(2*(fy_400-fp_400))))
c500 = (((fy_500-fp_500)**2)/((E_500*(eps_y-eps_p500))-(2*(fy_500-fp_500))))
c600 = (((fy_600-fp_600)**2)/((E_600*(eps_y-eps_p600))-(2*(fy_600-fp_600))))
c700 = (((fy_700-fp_700)**2)/((E_700*(eps_y-eps_p700))-(2*(fy_700-fp_700))))
c800 = (((fy_800-fp_800)**2)/((E_800*(eps_y-eps_p800))-(2*(fy_800-fp_800))))
c900 = (((fy_900-fp_900)**2)/((E_900*(eps_y-eps_p900))-(2*(fy_900-fp_900))))
c1000 = (((fy_1000-fp_1000)**2)/((E_1000*(eps_y-eps_p1000))-(2*(fy_1000-fp_1000))))
c1100 = (((fy_1100-fp_1100)**2)/((E_1100*(eps_y-eps_p1100))-(2*(fy_1100-fp_1100))))

```

```

!
b20 = ((c20*(eps_y-eps_p20)*E_20)+(c20**2))**(1/2)
b200 = ((c200*(eps_y-eps_p200)*E_200)+(c200**2))**(1/2)
b300 = ((c300*(eps_y-eps_p300)*E_300)+(c300**2))**(1/2)
b400 = ((c400*(eps_y-eps_p400)*E_400)+(c400**2))**(1/2)
b500 = ((c500*(eps_y-eps_p500)*E_500)+(c500**2))**(1/2)
b600 = ((c600*(eps_y-eps_p600)*E_600)+(c600**2))**(1/2)
b700 = ((c700*(eps_y-eps_p700)*E_700)+(c700**2))**(1/2)
b800 = ((c800*(eps_y-eps_p800)*E_800)+(c800**2))**(1/2)
b900 = ((c900*(eps_y-eps_p900)*E_900)+(c900**2))**(1/2)
b1000 = ((c1000*(eps_y-eps_p1000)*E_1000)+(c1000**2))**(1/2)
b1100 = ((c1100*(eps_y-eps_p1100)*E_1100)+(c1100**2))**(1/2)
!
a20 = ((eps_y-eps_p20)*((eps_y-eps_p20)+(c20/E_20)))*(1/2)
a200 = ((eps_y-eps_p200)*((eps_y-eps_p200)+(c200/E_200)))*(1/2)
a300 = ((eps_y-eps_p300)*((eps_y-eps_p300)+(c300/E_300)))*(1/2)
a400 = ((eps_y-eps_p400)*((eps_y-eps_p400)+(c400/E_400)))*(1/2)
a500 = ((eps_y-eps_p500)*((eps_y-eps_p500)+(c500/E_500)))*(1/2)
a600 = ((eps_y-eps_p600)*((eps_y-eps_p600)+(c600/E_600)))*(1/2)
a700 = ((eps_y-eps_p700)*((eps_y-eps_p700)+(c700/E_700)))*(1/2)
a800 = ((eps_y-eps_p800)*((eps_y-eps_p800)+(c800/E_800)))*(1/2)
a900 = ((eps_y-eps_p900)*((eps_y-eps_p900)+(c900/E_900)))*(1/2)
a1000 = ((eps_y-eps_p1000)*((eps_y-eps_p1000)+(c1000/E_1000)))*(1/2)
a1100 = ((eps_y-eps_p1100)*((eps_y-eps_p1100)+(c1100/E_1100)))*(1/2)
!
sigma1_20 = eps_p20*E_20
sigma2_20 = (fp_20-c20)+(b20/a20)*((a20**2)-(eps_y-(eps_p20+(1*0.005))))**2**(1/2)
sigma3_20 = (fp_20-c20)+(b20/a20)*((a20**2)-(eps_y-(eps_p20+(0.005*2))))**2**(1/2)
sigma4_20 = (fp_20-c20)+(b20/a20)*((a20**2)-(eps_y-(eps_p20+(0.005*3))))**2**(1/2)
sigma5_20 = (fp_20-c20)+(b20/a20)*((a20**2)-(eps_y-(eps_p20+(0.005*4))))**2**(1/2)
sigma6_20 = fy_20
sigma7_20 = fy_20
!
sigma1_200 = eps_p200*E_200
sigma2_200 = (fp_200-c200)+(b200/a200)*((a200**2)-(eps_y-(eps_p200+(1*0.005))))**2**(1/2)
sigma3_200 = (fp_200-c200)+(b200/a200)*((a200**2)-(eps_y-(eps_p200+(0.005*2))))**2**(1/2)
sigma4_200 = (fp_200-c200)+(b200/a200)*((a200**2)-(eps_y-(eps_p200+(0.005*3))))**2**(1/2)
sigma5_200 = (fp_200-c200)+(b200/a200)*((a200**2)-(eps_y-(eps_p200+(0.005*4))))**2**(1/2)
sigma6_200 = fy_200
sigma7_200 = fy_200
!
sigma1_300 = eps_p300*E_300
sigma2_300 = (fp_300-c300)+(b300/a300)*((a300**2)-(eps_y-(eps_p300+0.005)))*2**(1/2)
sigma3_300 = (fp_300-c300)+(b300/a300)*((a300**2)-(eps_y-(eps_p300+(0.005*2)))*2**(1/2)
sigma4_300 = (fp_300-c300)+(b300/a300)*((a300**2)-(eps_y-(eps_p300+(0.005*3)))*2**(1/2)
sigma5_300 = (fp_300-c300)+(b300/a300)*((a300**2)-(eps_y-(eps_p300+(0.005*4)))*2**(1/2)
sigma6_300 = fy_300
sigma7_300 = fy_300
!
sigma1_400 = eps_p400*E_400
sigma2_400 = (fp_400-c400)+(b400/a400)*((a400**2)-(eps_y-(eps_p400+0.005)))*2**(1/2)
sigma3_400 = (fp_400-c400)+(b400/a400)*((a400**2)-(eps_y-(eps_p400+(0.005*2)))*2**(1/2)
sigma4_400 = (fp_400-c400)+(b400/a400)*((a400**2)-(eps_y-(eps_p400+(0.005*3)))*2**(1/2)
sigma5_400 = (fp_400-c400)+(b400/a400)*((a400**2)-(eps_y-(eps_p400+(0.005*4)))*2**(1/2)
sigma6_400 = fy_400
sigma7_400 = fy_400
!
sigma1_500 = eps_p500*E_500
sigma2_500 = (fp_500-c500)+(b500/a500)*((a500**2)-(eps_y-(eps_p500+0.005)))*2**(1/2)
sigma3_500 = (fp_500-c500)+(b500/a500)*((a500**2)-(eps_y-(eps_p500+(0.005*2)))*2**(1/2)
sigma4_500 = (fp_500-c500)+(b500/a500)*((a500**2)-(eps_y-(eps_p500+(0.005*3)))*2**(1/2)
sigma5_500 = (fp_500-c500)+(b500/a500)*((a500**2)-(eps_y-(eps_p500+(0.005*4)))*2**(1/2)
sigma6_500 = fy_500
sigma7_500 = fy_500
!
sigma1_600 = eps_p600*E_600
sigma2_600 = (fp_600-c600)+(b600/a600)*((a600**2)-(eps_y-(eps_p600+0.005)))*2**(1/2)
sigma3_600 = (fp_600-c600)+(b600/a600)*((a600**2)-(eps_y-(eps_p600+(0.005*2)))*2**(1/2)
sigma4_600 = (fp_600-c600)+(b600/a600)*((a600**2)-(eps_y-(eps_p600+(0.005*3)))*2**(1/2)
sigma5_600 = (fp_600-c600)+(b600/a600)*((a600**2)-(eps_y-(eps_p600+(0.005*4)))*2**(1/2)
sigma6_600 = fy_600
sigma7_600 = fy_600
!

```

```

sigma1_700 = eps_p700*E_700
sigma2_700 = (fp_700-c700)+(b700/a700)*((a700**2)-(eps_y-(eps_p700+0.005))**2)**(1/2)
sigma3_700 = (fp_700-c700)+(b700/a700)*((a700**2)-(eps_y-(eps_p700+(0.005*2)))**2)**(1/2)
sigma4_700 = (fp_700-c700)+(b700/a700)*((a700**2)-(eps_y-(eps_p700+(0.005*3)))**2)**(1/2)
sigma5_700 = (fp_700-c700)+(b700/a700)*((a700**2)-(eps_y-(eps_p700+(0.005*4)))**2)**(1/2)
sigma6_700 = fy_700
sigma7_700 = fy_700
!
sigma1_800 = eps_p800*E_800
sigma2_800 = (fp_800-c800)+(b800/a800)*((a800**2)-(eps_y-(eps_p800+0.005))**2)**(1/2)
sigma3_800 = (fp_800-c800)+(b800/a800)*((a800**2)-(eps_y-(eps_p800+(0.005*2)))**2)**(1/2)
sigma4_800 = (fp_800-c800)+(b800/a800)*((a800**2)-(eps_y-(eps_p800+(0.005*3)))**2)**(1/2)
sigma5_800 = (fp_800-c800)+(b800/a800)*((a800**2)-(eps_y-(eps_p800+(0.005*4)))**2)**(1/2)
sigma6_800 = fy_800
sigma7_800 = fy_800
!
sigma1_900 = eps_p900*E_900
sigma2_900 = (fp_900-c900)+(b900/a900)*((a900**2)-(eps_y-(eps_p900+0.005))**2)**(1/2)
sigma3_900 = (fp_900-c900)+(b900/a900)*((a900**2)-(eps_y-(eps_p900+(0.005*2)))**2)**(1/2)
sigma4_900 = (fp_900-c900)+(b900/a900)*((a900**2)-(eps_y-(eps_p900+(0.005*3)))**2)**(1/2)
sigma5_900 = (fp_900-c900)+(b900/a900)*((a900**2)-(eps_y-(eps_p900+(0.005*4)))**2)**(1/2)
sigma6_900 = fy_900
sigma7_900 = fy_900
!
sigma1_1000 = eps_p1000*E_1000
sigma2_1000 = (fp_1000-c1000)+(b1000/a1000)*((a1000**2)-(eps_y-(eps_p1000+0.005))**2)**(1/2)
sigma3_1000 = (fp_1000-c1000)+(b1000/a1000)*((a1000**2)-(eps_y-(eps_p1000+(0.005*2)))**2)**(1/2)
sigma4_1000 = (fp_1000-c1000)+(b1000/a1000)*((a1000**2)-(eps_y-(eps_p1000+(0.005*3)))**2)**(1/2)
sigma5_1000 = (fp_1000-c1000)+(b1000/a1000)*((a1000**2)-(eps_y-(eps_p1000+(0.005*4)))**2)**(1/2)
sigma6_1000 = fy_1000
sigma7_1000 = fy_1000
!
sigma1_1100 = eps_p1100*E_1100
sigma2_1100 = (fp_1100-c1100)+(b1100/a1100)*((a1100**2)-(eps_y-(eps_p1100+0.005))**2)**(1/2)
sigma3_1100 = (fp_1100-c1100)+(b1100/a1100)*((a1100**2)-(eps_y-(eps_p1100+(0.005*2)))**2)**(1/2)
sigma4_1100 = (fp_1100-c1100)+(b1100/a1100)*((a1100**2)-(eps_y-(eps_p1100+(0.005*3)))**2)**(1/2)
sigma5_1100 = (fp_1100-c1100)+(b1100/a1100)*((a1100**2)-(eps_y-(eps_p1100+(0.005*4)))**2)**(1/2)
sigma6_1100 = fy_1100
sigma7_1100 = fy_1100
!
! GRAFICO TENSAO X DEFORMACAO em FUNCAO da TEMPERATURA
/REP,FAST
TB,MELA,1,11,8,
!
TBTEMP,20
TBPT,,0,0
TBPT,,eps_p20,sigma1_20
TBPT,,(eps_p20+0.005),sigma2_20
TBPT,,(eps_p20+(2*0.005)),sigma3_20
TBPT,,(eps_p20+(3*0.005)),sigma4_20
TBPT,,eps_y,sigma6_20
TBPT,,eps_u,sigma7_20
TBPT,,eps_e,0
!
TBTEMP,200
TBPT,,0,0
TBPT,,eps_p200,sigma1_200
TBPT,,(eps_p200+0.005),sigma2_200
TBPT,,(eps_p200+(2*0.005)),sigma3_200
TBPT,,(eps_p200+(3*0.005)),sigma4_200
TBPT,,eps_y,sigma6_200
TBPT,,eps_u,sigma7_200
TBPT,,eps_e,0
!
TBTEMP,300
TBPT,,0,0
TBPT,,eps_p300,sigma1_300
TBPT,,(eps_p300+0.005),sigma2_300
TBPT,,(eps_p300+(2*0.005)),sigma3_300
TBPT,,(eps_p300+(3*0.005)),sigma4_300
TBPT,,eps_y,sigma6_300
TBPT,,eps_u,sigma7_300

```

```

TBPT,,eps_e,0
!
TBTEMP,400
TBPT,,0,0
TBPT,,eps_p400,sigma1_400
TBPT,,(eps_p400+0.005),sigma2_400
TBPT,,(eps_p400+(2*0.005)),sigma3_400
TBPT,,(eps_p400+(3*0.005)),sigma4_400
TBPT,,eps_y,sigma6_400
TBPT,,eps_u,sigma7_400
TBPT,,eps_e,0
!
TBTEMP,500
TBPT,,0,0
TBPT,,eps_p500,sigma1_500
TBPT,,(eps_p500+0.005),sigma2_500
TBPT,,(eps_p500+(2*0.005)),sigma3_500
TBPT,,(eps_p500+(3*0.005)),sigma4_500
TBPT,,eps_y,sigma6_500
TBPT,,eps_u,sigma7_500
TBPT,,eps_e,0
!
TBTEMP,600
TBPT,,0,0
TBPT,,eps_p600,sigma1_600
TBPT,,(eps_p600+0.005),sigma2_600
TBPT,,(eps_p600+(2*0.005)),sigma3_600
TBPT,,(eps_p600+(3*0.005)),sigma4_600
TBPT,,eps_y,sigma6_600
TBPT,,eps_u,sigma7_600
TBPT,,eps_e,0
!
TBTEMP,700
TBPT,,0,0
TBPT,,eps_p700,sigma1_700
TBPT,,(eps_p700+0.005),sigma2_700
TBPT,,(eps_p700+(2*0.005)),sigma3_700
TBPT,,(eps_p700+(3*0.005)),sigma4_700
TBPT,,eps_y,sigma6_700
TBPT,,eps_u,sigma7_700
TBPT,,eps_e,0
!
TBTEMP,800
TBPT,,0,0
TBPT,,eps_p800,sigma1_800
TBPT,,(eps_p800+0.005),sigma2_800
TBPT,,(eps_p800+(2*0.005)),sigma3_800
TBPT,,(eps_p800+(3*0.005)),sigma4_800
TBPT,,eps_y,sigma6_800
TBPT,,eps_u,sigma7_800
TBPT,,eps_e,0
!
TBTEMP,900
TBPT,,0,0
TBPT,,eps_p900,sigma1_900
TBPT,,(eps_p900+0.005),sigma2_900
TBPT,,(eps_p900+(2*0.005)),sigma3_900
TBPT,,(eps_p900+(3*0.005)),sigma4_900
TBPT,,eps_y,sigma6_900
TBPT,,eps_u,sigma7_900
TBPT,,eps_e,0
!
TBTEMP,1000
TBPT,,0,0
TBPT,,eps_p1000,sigma1_1000
TBPT,,(eps_p1000+0.005),sigma2_1000
TBPT,,(eps_p1000+(2*0.005)),sigma3_1000
TBPT,,(eps_p1000+(3*0.005)),sigma4_1000
TBPT,,eps_y,sigma6_1000
TBPT,,eps_u,sigma7_1000
TBPT,,eps_e,0
!
TBTEMP,1100

```

```

TBPT,0,0
TBPT,eps_p1100,sigma1_1100
TBPT,(eps_p1100+0.005),sigma2_1100
TBPT,(eps_p1100+(2*0.005)),sigma3_1100
TBPT,(eps_p1100+(3*0.005)),sigma4_1100
TBPT,eps_y,sigma6_1100
TBPT,eps_u,sigma7_1100
TBPT,eps_e,0
!
!
=====
! ***** NOS DO ELEMENTO *****
=====
!
K,1,0,0,0,
K,2,bm/2,0,0,
K,3,bm,0,0,
K,4,bm,em,0,
K,5,((bm/2)+(ea/2)),em,0,
K,6,((bm/2)+(ea/2)),(ap-em),0,
K,7,bm,(ap-em),0,
K,8,bm,ap,0,
K,9,(bm/2),ap,0,
K,10,0,ap,0,
K,11,0,(ap-em),0,
K,12,((bm/2)-(ea/2)),(ap-em),0,
K,13,((bm/2)-(ea/2)),em,0,
K,14,0,em,0,
!
FLST,2,14,3
FITEM,2,1
FITEM,2,2
FITEM,2,3
FITEM,2,4
FITEM,2,5
FITEM,2,6
FITEM,2,7
FITEM,2,8
FITEM,2,9
FITEM,2,10
FITEM,2,11
FITEM,2,12
FITEM,2,13
FITEM,2,14
A,P51X
/VIEW,1,1,1,1
/ANG,1
/REP,FAST
aplot
!*
VOFFST,1,L, , ! COMPRIMENTO DO PILAR
!
=====
! ***** MALHA DO PILAR *****
=====
!
DESIZE,3,2,15,15,28,malha,malha,1,4,
MOPT,TETEXPND,0.5,
SMRT,6
SMRT,1
CM,_Y,VOLU
VSEL, , , , 1
CM,_Y1,VOLU
CHKMSH,'VOLU'
CMSEL,S,_Y
!*
VSWEEP,_Y1
!*
CMDELE,_Y
CMDELE,_Y1
CMDELE,_Y2
!*

```

```

=====
! ***** CONDICAOES DE CONTORNO DOS APOIOS *****
=====
!
FLST,2,14,3,ORDE,2
FITEM,2,1
FITEM,2,-14
!*
/GO
DK,P51X,, ,0,ALL,, , , ,
FLST,2,14,3,ORDE,2
FITEM,2,15
FITEM,2,-28
!*
/GO
DK,P51X,, ,0,UX,UY,, , ,
!
!
=====
! ***** ANALISE TERMO-ESTRUTURAL *****
=====
!
! APLICACAO DA CARGA NA EXTREMIDADE DO ELEMENTO
!
FLST,2,1,5,ORDE,1
FITEM,2,2
/GO
!*
SFA,P51X,1,PRES,-P
!
FLST,2,1,1,ORDE,1
FITEM,2,3112
!*
/GO
F,P51X,FX,Pinst*P          !APLICA 0.5% DE CARREGAMENTO LATERAL PARA PROVOCAR INSTABILIDADE
!
!ACEL,0,0,-9.81,
!
FINISH
/SOL
!
! ** opções para processamento **
!
ALLSEL,ALL
TUNIF,Tamb ! Temperatura uniforme em todos os nós
TREF,Tamb ! Temperatura de referência
!
=====
! ***** OPCOES PARA PROCESSAMENTO *****
=====
!
ANTYPE,0! Definição do tipo de analise - Estatica
!
NLGEOM,ON! opções de processamento
KBC,0
AUTOTS,1
LNSRCH,1
TIME,0.000001
DELTIM,0.000001/100,0.000001/1000,0.000001/10,
OUTRES,ERASE
OUTRES,NSOL,LAST
OUTRES,RSOL,LAST
OUTRES,STRS,LAST
OUTRES,EPEL,LAST
OUTRES,EPH,LAST
OUTRES,EPPL,LAST
!
ALLSEL,ALL
/REPLOT
!
=====
! ***** OPCOES PARA ESCRITA DAS TEMPERATURAS NO PERFIL *****
=====

```

```

!
LSWRITE,1,
!
Taco = 20
Ca=600
*DO,i,1,t_incendio,1
!
  AUTOTS,1
  TIME,i
  DELTIM,passo_tempo,0.001,passo_tempo
  OUTRES,ERASE
  OUTRES,NSOL,LAST
  OUTRES,RSOL,LAST
  OUTRES,STRS,LAST
  OUTRES,EPEL,LAST
  OUTRES,EPTH,LAST
  OUTRES,EPPL,LAST
!
  ALLSEL,ALL
!
  BFEDELE,ALL,TEMP
!
! =====
! CONSTROI A TABELA COM AS TEMPERATURAS DO ELEMENTO PROTEGIDO TERMICAMENTE - INCENDIO ISO 834
! =====
!
tempo=(i-1)
tmina=tempo/60
tminb=(tempo + 1)/60
Tgasesa = Tamb+345*LOG10(((8*tmina))+1)
Tgasesb = Tamb+345*LOG10(((8*tminb))+1)
!
!
*IF, Taco, LE, 600, THEN
  Ca=425+((7.73E-1)*Taco)-((1.69E-3)*((Taco)**2))+((2.22E-6)*((Taco)**3))
*ELSEIF, Taco, GT, 600, AND, Taco, LE, 735
  Ca=666+(13002/(738-Taco))
*ELSEIF, Taco, GT, 735, AND, Taco, LE, 900
  Ca=545+(17820/(Taco-731))
*ELSE,
  Ca=650
*ENDIF
!
! =====
! ***** CALOR ESPECIFICO DO SFRM EM FUNCAO DA TEMPERATURA (Khorasani ET AL (2015))*****
! =====
!
txesp = 1700-EXP(6.81-(1.6E-03)*Taco + (4.40E-07)*((Taco)**2) + (2.13E-01)*CES)
!
!
! =====
! ***** CONDUTIVIDADE DO SFRM EM FUNCAO DA TEMPERATURA (Khorasani ET AL (2015))*****
! =====
!
condu = EXP(-2.72 + (1.89E-03)*Taco - (1.95E-07)*((Taco)**2) + (2.09E-01)*CSF)
!
!
! =====
! ***** DENSIDADE DO SFRM EM FUNCAO DA TEMPERATURA (Khorasani ET AL (2015))*****
! =====
!
dmp = EXP(-2.028 + 7.83*((Taco)**(6.5E-03)) + (1.22E-01)*DSF)
!
!
! =====
!
FI=((dmp*txesp)/(d*Ca))*tmp*FM
Daco = (FM*(Tgasesa-Taco)*1)/((tmp/condu)*Ca*d*(1+FI/3))-((Tgasesb-Tgasesa)*(EXP(FI/10)-1))
!
*IF, Taco, LT, 0, THEN
  Taco = 0
*ENDIF

```



```

!
Taco=Taco+Daco
!
!
  BFE,ALL,TEMP,,Taco
  ALLSEL,ALL
  LSWRITE,i+1,
!
!
*ENDDO
!
ALLSEL,ALL
/REPLOT
!
=====
!***** SOLUCAO *****
!=====
!
/solu
LSSOLVE,1, t_incendio, passo_tempo      ! resolver o modelo
FINISH
SOLVE
!
=====
!***** END *****
!=====

```

A.2. APDL DO PROBLEMA 4: SISTEMA ESTRUTURAL TRIDIMENSIONAL DE UMA EDIFICAÇÃO SUBMETIDO AO MODELO DE INCÊNDIO NATURAL

```

/BATCH
!
=====
! APDL DO PROBLEMA 4: SISTEMA ESTRUTURAL TRIDIMENSIONAL - CURVA NATURAL
!=====
!
FINISH      ! (Estes dois comandos limpam os dados atuais)
/CLEAR
!
/NOPR      ! Suprime a impressao de dados de entrada interpretados
/NOLIST    ! Suprime a entrada de dados listados
!
!
=====
!***** DADOS DO ARQUIVO *****
!=====
!
! NORSTGM=1 NAO ESCREVER OS DADOS DE GEOMETRIA
! NPROC - NUMERO DE PROCESSADORES
! NOELDB=1, NAO ESCREVER RESULTADOS NA DATABASE
!
/CONFIG,NORSTGM,1,NOELDB,1,NPROC,6
!
! MSGPOP=3 - Mostrar apenas erros ocorridos
! UNDO=2 - NAO escreve comentarios e comandos nao essenciais
! REPLOT=0 - NO AUTOMATIC REPLOT
!
/UIS, MSGPOP, 3, UNDO, 2, REPLOT,0
!
/CWD,'C:\Users\Pichau\Área de Trabalho\Adaptive_ANN'      ! DIRETORIO
/TITLE,ZFEA
/FILNAME,ZFEA,0      ! TITULO DO TRABALHO
/PREP7      ! TIPO DE ANALISE
/COM, Structural      ! ANALISE ESTRUTURAL
/COM, Thermal      ! ANALISE TERMICA
!
=====
!***** PARAMETROS DE ENTRADA *****

```

```

=====
!
bm = 0.16484      ! comprimento da mesa (m)
em = 0.00965     ! espessura da mesa (m)
ea = 0.00584     ! espessura da alma (m)
ap = 0.3104      ! altura do perfil (m)
!
La=7.315
ha=3.658
!
hw1 = 0.3183
bw1 = 0.3080
tw1 = 0.01308
tf1 = 0.020574
!
hw2 = 0.3332
bw2 = 0.31293
tw2 = 0.01803
tf2 = 0.028067
!
hw3 = 0.3104
bw3 = 0.16484
tw3 = 0.005842
tf3 = 0.009652
!
hw4 = 0.3063
bw4 = 0.2539
tw4 = 0.008763
tf4 = 0.014605
!
hw5 = 0.259588
bw5 = 0.256032
tw5 = 0.010668
tf5 = 0.017272
!
!
passo_tempo=30
!
!
=====
! ***** VARIAVEIS ALEATORIAS *****
!
!VA1
P1= 10000          ! CARGA 'P'
!
!VA2
fy = 250000000    ! TENSAO LIMITE DE PROPORCIONALIDADE(N/m²)
!
!VA3
rcl = 423.5       ! CARACTER. MATER. DE VEDACAO-J°C/(m²s¹/2)
!
!VA4
qfi_d = 205       ! CARGA DE INCENDIO (MJ/m²)
!
!VA5
tal = 0.50        ! PARAMETRO DE ALEAT. DO FATOR DE ABERTURA
!
!VA6
epsil = 1         ! PARAMETRO CONDUTIVIDADE TERMICA (Khorasani ET AL (2015))
!
!VA7
epsi = 1          ! PARAMETRO COEFICIENTE DE DILATACAO (Khorasani ET AL (2015))
!
!VA8
FRR = 1           ! FATOR DE REDUCAO DA RESISTENCIA AO ESCOAMENTO Qureshi ET AL (2020)
!
!VA9
FRP = 1           !FATOR DE REDUCAO DO LIMITE DE PROPORCIONALIDADE CONFORME Qureshi ET AL (2020)
!
!VA10
FRE = 1           !FATORES DE REDUCAO DO MODULO DE ELASTICIDADE CONFORME (Khorasani ET AL (2015))

```

```

!
!VA11
CES = 1          !CALOR ESPECIFICO DO SFRM EM FUNCAO DA TEMPERATURA (Khorasani ET AL (2015))
!
!VA12
CSF = 1          !CONDUTIVIDADE DO SFRM EM FUNCAO DA TEMPERATURA (Khorasani ET AL (2015))
!
!VA13
DSF = 1          ! DENSIDADE DO SFRM EM FUNCAO DA TEMPERATURA (Khorasani ET AL (2015))
!
!VA14
tmp = 0.021      ! espessura do material de protecao (m)
!
!VA15
P2= 11465        ! CARGA 'Q'
!
=====
! ***** PARAMETROS DETERMINISTICOS DO PROBLEMA *****
=====
!
vtt = 0.04        ! GRAU DE VENTILACAO MAXIMO DO AMBIENTE ANALISADO (m^1/2)
t_incendio = 7200 ! PERIODO DE INCENDIO AVALIADO (segundos)
d = 7850          ! DENSIDADE DO ACO (kg/m3)
ME = 206.850E+09 ! MODULO DE ELASTICIDADE para 20C (N/m2)
v = 0.3          ! COEFICIENTE DE POISSON (adimensional)
Tamb = 20        ! TEMPERATURA AMBIENTE (C)
tlim = 20/60     ! TEMPO LIMITE AUXILIAR (20 min) EM HORAS - EUROCODE
fpp = 1*fy       ! RESISTENCIA AO ESCOAMENTO DO ACO PARA 20 C (N/m2)
E = fy/(fpp/ME)
!
!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!! MATERIAL DE PROTECAO TERMICA - SFRM !!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!
!
dmp = 300        ! DENSIDADE DO MATERIAL DE PROTEÇÃO (kg/m3)
txesp = 1200     ! TAXA ESPECIFICA (J/kg°C)
condu = 0.12     ! CONDUTIVIDADE DO MATERIAL (W/m°C)
!
!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!! PARAMETROS TRANSFERENCIA DE CALOR !!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!
!
EMI = 0.7        ! EMISSIVIDADE (adimensional)
txcon_natural = 35 ! FLUXO CONVECTIVO (COEFICIENTE DE TRANSFERÊNCIA DE CALOR DE CONVECÇÃO) (W/m^2.K)
txcon_padrao = 25 ! FLUXO CONVECTIVO (COEFICIENTE DE TRANSFERÊNCIA DE CALOR DE CONVECÇÃO) (W/m^2.K)
txcon = txcon_natural ! FLUXO CONVECTIVO (COEFICIENTE DE TRANSFERÊNCIA DE CALOR DE CONVECÇÃO) (W/m^2.K)
CF = txcon       ! COEFICIENTE DE FILME (W/m^2C)
!
*IF, tal, GT, 1, THEN
tal = 0.9999
*ENDIF
vt=vtt*(1-tal)   ! VALORES de tal>1 devem ser suprimidos (JCSS PROBABILISTIC MODEL CODE PART 2: LOAD MODELS)
!
=====
! ***** FATOR DE MASSIVIDADE *****
=====
!
FM4 = (2*bm+4*em+2*(ap-2*em)+2*(bm-ea))/(2*(bm*em)+(ea*(ap-2*em))) ! FATOR DE MASSIVIDADE 4 LADOS (m^-1)
FM3 = (2*bm+4*em+2*(ap-2*em)+2*(bm-ea)-bm)/(2*(bm*em)+(ea*(ap-2*em))) ! FATOR DE MASSIVIDADE 3 LADOS (m^-1)
!
FMb4 = (2*(ap+bm))/((2*(bm*em)+(ea*(ap-2*em)))) ! FATOR DE MASSIVIDADE 4 LADOS (m^-1)
FMb3 = ((2*ap+bm))/((2*(bm*em)+(ea*(ap-2*em)))) ! FATOR DE MASSIVIDADE 3 LADOS (m^-1)
!
FM = FM3         ! FATOR DE MASSIVIDADE ADOTADO
FMb= FMb3
!
Ksh = 0.9*Fmb/FM ! Fator de correção para efeito de sombreamento para perfis I e H
!
=====
! ***** PROPRIEDADES DO ELEMENTO (NBR 14323/2013)*****
=====
!
ET,1,BEAM189     ! Tipo de Elemento (Element type)
!*
KEYOPT,1,1,1

```

```

KEYOPT,1,2,0
KEYOPT,1,4,2
KEYOPT,1,6,0
KEYOPT,1,7,0
KEYOPT,1,9,0
KEYOPT,1,11,0
KEYOPT,1,12,0
!*
TREF,Tamb
TOFFST,273      ! TEMPERATURA EM GRAUS CELSIUS (C)
!
! DENSIDADE DO ACO (kg/m3)
MPTEMP,,,,,,,,
MPTEMP,1,0
MPDATA,DENS,1,,d
!
=====
! CALOR ESPECIFICO EM FUNCAO DA TEMPERATURA (J/kgC)
MPTEMP,,,,,,,,
MPTEMP,1,0
MPTEMP,2,20
MPTEMP,3,100
MPTEMP,4,200
MPTEMP,5,300
MPTEMP,6,400
MPTEMP,7,500
MPTEMP,8,600
MPTEMP,9,700
MPTEMP,10,735
MPTEMP,11,800
MPTEMP,12,900
MPTEMP,13,1000
MPTEMP,14,1100
MPTEMP,15,1200
MPDE,C,1
MPDATA,C,1,,425
MPDATA,C,1,,439.78
MPDATA,C,1,,485.4
MPDATA,C,1,,529.76
MPDATA,C,1,,564.74
MPDATA,C,1,,605.88
MPDATA,C,1,,666.5
MPDATA,C,1,,759.92
MPDATA,C,1,,1008.2
MPDATA,C,1,,5000
MPDATA,C,1,,803.26
MPDATA,C,1,,650.44
MPDATA,C,1,,650
MPDATA,C,1,,650
MPDATA,C,1,,650
!
!EMISSIVIDADE (adimensional)
MPDATA,EMIS,1,,EMI
!
!COEFICIENTE DE FILME (W/m2C)
MPDATA,HF,1,,CF
!
=====
!***** CONDUCTIVIDADE TERMICA EM FUNCAO DA TEMPERATURA (W/mC) (Khorasani ET AL (2015))*****
!
!
Taco=0
kx=54-3.33E-02*Taco
kx0 = 60 - EXP(LOG(60-kx) + (145.4E-03) - ((5E-04)*Taco) + (2.06E-01*epsil))
!
Taco=20
kx=54-3.33E-02*Taco
kx20 = 60 - EXP(LOG(60-kx) + (145.4E-03) - ((5E-04)*Taco) + (2.06E-01*epsil))
!
kx800 = 60 - EXP(3.23 + 2.06E-01*epsil)
kx1200 = 60 - EXP(3.23 + 2.06E-01*epsil)
!

```

```

MPTEMP,,,,,,,,
MPTEMP,1,0
MPTEMP,2,20
MPTEMP,3,800
MPTEMP,4,1200
MPDATA,KXX,1,,kx0
MPDATA,KXX,1,,kx20
MPDATA,KXX,1,,kx800
MPDATA,KXX,1,,kx1200
!
!=====
!***** COEFICIENTE DE DILATAÇÃO EM FUNÇÃO DA TEMPERATURA (Khorasani ET AL (2015))*****
!=====
!
ks=(1.2E-05)*50 + (4E-09)*(50**2)-(2.416E-04)
Dila20 = ((SQRT(ks)-(1.28E-03)+(3.96E-06)*50 + (3.9E-03)*epsi)**2)/(50-Tamb)
!
Taco=100
ks=(1.2E-05)*Taco + (4E-09)*(Taco**2)-(2.416E-04)
Dila100 = ((SQRT(ks)-(1.28E-03)+(3.96E-06)*Taco + (3.9E-03)*epsi)**2)/(Taco-Tamb)
!
Taco=200
ks=(1.2E-05)*Taco + (4E-09)*(Taco**2)-(2.416E-04)
Dila200 = ((SQRT(ks)-(1.28E-03)+(3.96E-06)*Taco + (3.9E-03)*epsi)**2)/(Taco-Tamb)
!
Taco=300
ks=(1.2E-05)*Taco + (4E-09)*(Taco**2)-(2.416E-04)
Dila300 = ((SQRT(ks)-(1.28E-03)+(3.96E-06)*Taco + (3.9E-03)*epsi)**2)/(Taco-Tamb)
!
Taco=400
ks=(1.2E-05)*Taco + (4E-09)*(Taco**2)-(2.416E-04)
Dila400 = ((SQRT(ks)-(1.28E-03)+(3.96E-06)*Taco + (3.9E-03)*epsi)**2)/(Taco-Tamb)
!
Taco=500
ks=(1.2E-05)*Taco + (4E-09)*(Taco**2)-(2.416E-04)
Dila500 = ((SQRT(ks)-(1.28E-03)+(3.96E-06)*Taco + (3.9E-03)*epsi)**2)/(Taco-Tamb)
!
Taco=600
ks=(1.2E-05)*Taco + (4E-09)*(Taco**2)-(2.416E-04)
Dila600 = ((SQRT(ks)-(1.28E-03)+(3.96E-06)*Taco + (3.9E-03)*epsi)**2)/(Taco-Tamb)
!
Taco=750
ks=(1.2E-05)*Taco + (4E-09)*(Taco**2)-(2.416E-04)
Dila750 = ((SQRT(ks)-(1.28E-03)+(3.96E-06)*Taco + (3.9E-03)*epsi)**2)/(Taco-Tamb)
!
!
Taco=760
ks=(1.1E-02)
Dila760 = ((SQRT(ks)+(1.69+(6.4E-01)*(Taco-750)-1.7*(Taco-750)**(8.1E-01) + 3.7*epsi)*(1E-03))**2)/(Taco-Tamb)
!
Taco=800
ks=(1.1E-02)
Dila800 = ((SQRT(ks)+(1.69+(6.4E-01)*(Taco-750)-1.7*(Taco-750)**(8.1E-01) + 3.7*epsi)*(1E-03))**2)/(Taco-Tamb)
!
Taco=860
ks=(1.1E-02)
Dila860 = ((SQRT(ks)+(1.69+(6.4E-01)*(Taco-750)-1.7*(Taco-750)**(8.1E-01) + 3.7*epsi)*(1E-03))**2)/(Taco-Tamb)
!
Taco=900
ks=(2E-05)*Taco-(6.2E-03)
Dila900 = ((SQRT(ks)-(2.32E-03)+(1.73E-07)*(Taco-860)+(3.7E-03)*epsi)**2)/(Taco-Tamb)
!
Taco=1000
ks=(2E-05)*Taco-(6.2E-03)
Dila1000 = ((SQRT(ks)-(2.32E-03)+(1.73E-07)*(Taco-860)+(3.7E-03)*epsi)**2)/(Taco-Tamb)
!
Taco=1100
ks=(2E-05)*Taco-(6.2E-03)
Dila1100 = ((SQRT(ks)-(2.32E-03)+(1.73E-07)*(Taco-860)+(3.7E-03)*epsi)**2)/(Taco-Tamb)
!
Taco=1200
ks=(2E-05)*Taco-(6.2E-03)
Dila1200 = ((SQRT(ks)-(2.32E-03)+(1.73E-07)*(Taco-860)+(3.7E-03)*epsi)**2)/(Taco-Tamb)

```

```

!
! COEFICIENTE DE DILATAÇÃO EM FUNÇÃO DA TEMPERATURA (1/C)
MPTEMP,,,,,,,,
MPTEMP,1,20
MPTEMP,2,100
MPTEMP,3,200
MPTEMP,4,300
MPTEMP,5,400
MPTEMP,6,500
MPTEMP,7,600
MPTEMP,8,750
MPTEMP,9,760
MPTEMP,10,800
MPTEMP,11,860
MPTEMP,12,900
MPTEMP,13,1000
MPTEMP,14,1100
MPTEMP,15,1200
!
UIMP,1,REFT,,,20
MPDATA,ALPX,1,,Dila20
MPDATA,ALPX,1,,Dila100
MPDATA,ALPX,1,,Dila200
MPDATA,ALPX,1,,Dila300
MPDATA,ALPX,1,,Dila400
MPDATA,ALPX,1,,Dila500
MPDATA,ALPX,1,,Dila600
MPDATA,ALPX,1,,Dila750
MPDATA,ALPX,1,,Dila760
MPDATA,ALPX,1,,Dila800
MPDATA,ALPX,1,,Dila860
MPDATA,ALPX,1,,Dila900
MPDATA,ALPX,1,,Dila1000
MPDATA,ALPX,1,,Dila1100
MPDATA,ALPX,1,,Dila1200
!
=====
!***** GERACAO DOS GRAFICOS TENSAO-DEFORMACAO EM FUNCAO DA TEMPERATURA DO INCENDIO *****
=====
!
=====
!*** FATORES DE REDUÇÃO DA RESISTÊNCIA AO ESCOAMENTO CONFORME (FRR) Qureshi ET AL (2020)* *****
=====
!
Teta = 20
mu = ((-6.89E-09)*(Teta**3))+((1.84E-06)*Teta**2)-((8.39E-05)*Teta)+(1.48E-01)
sigma = ((2.41E-07)*Teta**2)+((1.07E-04)*Teta)+(9.77E-02)
Ky_20 = EXP((FRR*sigma) + mu) ! PDF Lognormal, media=mu e desvio=sigma
=====
!
Teta = 200
mu = ((-6.89E-09)*(Teta**3))+((1.84E-06)*Teta**2)-((8.39E-05)*Teta)+(1.48E-01)
sigma = ((2.41E-07)*Teta**2)+((1.07E-04)*Teta)+(9.77E-02)
Ky_200 = EXP((FRR*sigma) + mu) ! PDF Lognormal, media=mu e desvio=sigma
=====
!
Teta = 300
mu = ((-6.89E-09)*(Teta**3))+((1.84E-06)*Teta**2)-((8.39E-05)*Teta)+(1.48E-01)
sigma = ((2.41E-07)*Teta**2)+((1.07E-04)*Teta)+(9.77E-02)
Ky_300 = EXP((FRR*sigma) + mu) ! PDF Lognormal, media=mu e desvio=sigma
=====
!
Teta = 400
mu = ((-6.89E-09)*(Teta**3))+((1.84E-06)*Teta**2)-((8.39E-05)*Teta)+(1.48E-01)
sigma = ((2.41E-07)*Teta**2)+((1.07E-04)*Teta)+(9.77E-02)
Ky_400 = EXP((FRR*sigma) + mu) ! PDF Lognormal, media=mu e desvio=sigma
=====
!
Teta = 500
mu = ((-6.89E-09)*(Teta**3))+((1.84E-06)*Teta**2)-((8.39E-05)*Teta)+(1.48E-01)

```

```

sigma = ((2.41E-07)*Teta**2)+((1.07E-04)*Teta)+(9.77E-02)
Ky_500 = EXP((FRR*sigma) + mu)          ! PDF Lognormal, media=mu e desvio=sigma
!
=====
!
Teta = 600
mu = ((-6.89E-09)*(Teta**3))+((1.84E-06)*Teta**2)-((8.39E-05)*Teta)+(1.48E-01)
sigma = ((2.41E-07)*Teta**2)+((1.07E-04)*Teta)+(9.77E-02)
Ky_600 = EXP((FRR*sigma) + mu)          ! PDF Lognormal, media=mu e desvio=sigma
!
=====
!
Teta = 700
mu = ((-6.89E-09)*(Teta**3))+((1.84E-06)*Teta**2)-((8.39E-05)*Teta)+(1.48E-01)
sigma = ((2.41E-07)*Teta**2)+((1.07E-04)*Teta)+(9.77E-02)
Ky_700 = EXP((FRR*sigma) + mu)          ! PDF Lognormal, media=mu e desvio=sigma
!
=====
!
Teta = 800
mu = ((-6.89E-09)*(Teta**3))+((1.84E-06)*Teta**2)-((8.39E-05)*Teta)+(1.48E-01)
sigma = ((2.41E-07)*Teta**2)+((1.07E-04)*Teta)+(9.77E-02)
Ky_800 = EXP((FRR*sigma) + mu)          ! PDF Lognormal, media=mu e desvio=sigma
!
=====
!
Teta = 900
mu = ((-6.89E-09)*(Teta**3))+((1.84E-06)*Teta**2)-((8.39E-05)*Teta)+(1.48E-01)
sigma = ((2.41E-07)*Teta**2)+((1.07E-04)*Teta)+(9.77E-02)
Ky_900 = EXP((FRR*sigma) + mu)          ! PDF Lognormal, media=mu e desvio=sigma
!
=====
!
Teta = 1000
mu = ((-6.89E-09)*(Teta**3))+((1.84E-06)*Teta**2)-((8.39E-05)*Teta)+(1.48E-01)
sigma = ((2.41E-07)*Teta**2)+((1.07E-04)*Teta)+(9.77E-02)
Ky_1000 = EXP((FRR*sigma) + mu)         ! PDF Lognormal, media=mu e desvio=sigma
!
=====
!
Teta = 1100
mu = ((-6.89E-09)*(Teta**3))+((1.84E-06)*Teta**2)-((8.39E-05)*Teta)+(1.48E-01)
sigma = ((2.41E-07)*Teta**2)+((1.07E-04)*Teta)+(9.77E-02)
Ky_1100 = EXP((FRR*sigma) + mu)         ! PDF Lognormal, media=mu e desvio=sigma
!
=====
!*****FATORES DE REDUÇÃO DO LIMITE DE PROPORCIONALIDADE (FRP) CONFORME Qureshi ET AL (2020)*****
!
=====
!
Teta = 20
mu = ((-1.45E-09)*(Teta**3))-((1.78E-06)*Teta**2)-((2.5E-05)*Teta)+(1.19E-02)
sigma = ((1.895E-07)*Teta**2)+((1.15E-04)*Teta)+(5.62E-02)
Kp_20 = EXP((FRP*sigma) + mu)
!
=====
!
Teta = 200
mu = ((-1.45E-09)*(Teta**3))-((1.78E-06)*Teta**2)-((2.5E-05)*Teta)+(1.19E-02)
sigma = ((1.895E-07)*Teta**2)+((1.15E-04)*Teta)+(5.62E-02)
Kp_200 = EXP((FRP*sigma) + mu)
!
=====
!
Teta = 300
mu = ((-1.45E-09)*(Teta**3))-((1.78E-06)*Teta**2)-((2.5E-05)*Teta)+(1.19E-02)
sigma = ((1.895E-07)*Teta**2)+((1.15E-04)*Teta)+(5.62E-02)
Kp_300 = EXP((FRP*sigma) + mu)
!
=====
!
Teta = 400
mu = ((-1.45E-09)*(Teta**3))-((1.78E-06)*Teta**2)-((2.5E-05)*Teta)+(1.19E-02)
sigma = ((1.895E-07)*Teta**2)+((1.15E-04)*Teta)+(5.62E-02)
Kp_400 = EXP((FRP*sigma) + mu)

```

```

!
!=====
!
Teta = 500
mu = ((-1.45E-09)*(Teta**3))-((1.78E-06)*Teta**2)-((2.5E-05)*Teta)+(1.19E-02)
sigma = ((1.895E-07)*Teta**2)+((1.15E-04)*Teta)+(5.62E-02)
Kp_500 = EXP((FRP*sigma) + mu)
!
!=====
!
Teta = 600
mu = ((-1.45E-09)*(Teta**3))-((1.78E-06)*Teta**2)-((2.5E-05)*Teta)+(1.19E-02)
sigma = ((1.895E-07)*Teta**2)+((1.15E-04)*Teta)+(5.62E-02)
Kp_600 = EXP((FRP*sigma) + mu)
!
!=====
!
Teta = 700
mu = ((-1.45E-09)*(Teta**3))-((1.78E-06)*Teta**2)-((2.5E-05)*Teta)+(1.19E-02)
sigma = ((1.895E-07)*Teta**2)+((1.15E-04)*Teta)+(5.62E-02)
Kp_700 = EXP((FRP*sigma) + mu)
!
!=====
!
Teta = 800
mu = ((-1.45E-09)*(Teta**3))-((1.78E-06)*Teta**2)-((2.5E-05)*Teta)+(1.19E-02)
sigma = ((1.895E-07)*Teta**2)+((1.15E-04)*Teta)+(5.62E-02)
Kp_800 = EXP((FRP*sigma) + mu)
!
!=====
!
Teta = 900
mu = ((-1.45E-09)*(Teta**3))-((1.78E-06)*Teta**2)-((2.5E-05)*Teta)+(1.19E-02)
sigma = ((1.895E-07)*Teta**2)+((1.15E-04)*Teta)+(5.62E-02)
Kp_900 = EXP((FRP*sigma) + mu)
!
!=====
!
Teta = 1000
mu = ((-1.45E-09)*(Teta**3))-((1.78E-06)*Teta**2)-((2.5E-05)*Teta)+(1.19E-02)
sigma = ((1.895E-07)*Teta**2)+((1.15E-04)*Teta)+(5.62E-02)
Kp_1000 = EXP((FRP*sigma) + mu)
!
!=====
!
Teta = 1100
mu = ((-1.45E-09)*(Teta**3))-((1.78E-06)*Teta**2)-((2.5E-05)*Teta)+(1.19E-02)
sigma = ((1.895E-07)*Teta**2)+((1.15E-04)*Teta)+(5.62E-02)
Kp_1100 = EXP((FRP*sigma) + mu)
!
!=====
!
***** FATORES DE REDUÇÃO DO MODULO DE ELASTICIDADE CONFORME (Khorasani ET AL (2015))*****
!=====
!
Teta = 20
cte1=EXP(2.54-((2.69E-03)*Teta)-((2.83E-06)*(Teta**2)) + 3.6E-01*FRE)
cte2=cte1+1
KE_20 = 1.1*((cte1)/(cte2))
!
!=====
!
Teta = 200
cte1=EXP(2.54-((2.69E-03)*Teta)-((2.83E-06)*(Teta**2)) + 3.6E-01*FRE)
cte2=cte1+1
KE_200 = 1.1*((cte1)/(cte2))
!
!=====
!
Teta = 300
cte1=EXP(2.54-((2.69E-03)*Teta)-((2.83E-06)*(Teta**2)) + 3.6E-01*FRE)
cte2=cte1+1
KE_300 = 1.1*((cte1)/(cte2))

```



```

!
!=====
!
Teta = 400
cte1=EXP(2.54-((2.69E-03)*Teta)-((2.83E-06)*(Teta**2)) + 3.6E-01*FRE)
cte2=cte1+1
KE_400 = 1.1*((cte1)/(cte2))
!
!=====
!
Teta = 500
cte1=EXP(2.54-((2.69E-03)*Teta)-((2.83E-06)*(Teta**2)) + 3.6E-01*FRE)
cte2=cte1+1
KE_500 = 1.1*((cte1)/(cte2))
!
!=====
!
Teta = 600
cte1=EXP(2.54-((2.69E-03)*Teta)-((2.83E-06)*(Teta**2)) + 3.6E-01*FRE)
cte2=cte1+1
KE_600 = 1.1*((cte1)/(cte2))
!
!=====
!
Teta = 700
cte1=EXP(2.54-((2.69E-03)*Teta)-((2.83E-06)*(Teta**2)) + 3.6E-01*FRE)
cte2=cte1+1
KE_700 = 1.1*((cte1)/(cte2))
!
!=====
!
Teta = 800
cte1=EXP(2.54-((2.69E-03)*Teta)-((2.83E-06)*(Teta**2)) + 3.6E-01*FRE)
cte2=cte1+1
KE_800 = 1.1*((cte1)/(cte2))
!
!=====
!
Teta = 900
cte1=EXP(2.54-((2.69E-03)*Teta)-((2.83E-06)*(Teta**2)) + 3.6E-01*FRE)
cte2=cte1+1
KE_900 = 1.1*((cte1)/(cte2))
!
!=====
!
Teta = 1000
cte1=EXP(2.54-((2.69E-03)*Teta)-((2.83E-06)*(Teta**2)) + 3.6E-01*FRE)
cte2=cte1+1
KE_1000 = 1.1*((cte1)/(cte2))
!
!=====
!
Teta = 1100
cte1=EXP(2.54-((2.69E-03)*Teta)-((2.83E-06)*(Teta**2)) + 3.6E-01*FRE)
cte2=cte1+1
KE_1100 = 1.1*((cte1)/(cte2))
!
!=====
!
! MODULO DE ELASTICIDADE E POISSON para 20C (N/m2)
MPTEMP,,,,,,,,
MPTEMP,1,20
MPTEMP,2,200
MPTEMP,3,300
MPTEMP,4,400
MPTEMP,5,500
MPTEMP,6,600
MPTEMP,7,700
MPTEMP,8,800
MPTEMP,9,900
MPTEMP,10,1000
MPTEMP,11,1100
MPDE,EX,1
MPDE,PRXY,1

```

```
MPDATA,EX,1,,KE_20*E
MPDATA,EX,1,,KE_200*E
MPDATA,EX,1,,KE_300*E
MPDATA,EX,1,,KE_400*E
MPDATA,EX,1,,KE_500*E
MPDATA,EX,1,,KE_600*E
MPDATA,EX,1,,KE_700*E
MPDATA,EX,1,,KE_800*E
MPDATA,EX,1,,KE_900*E
MPDATA,EX,1,,KE_1000*E
MPDATA,EX,1,,KE_1100*E
MPDATA,PRXY,1,,v
MPDATA,PRXY,1,,v
MPDATA,PRXY,1,,v
MPDATA,PRXY,1,,v
MPDATA,PRXY,1,,v
MPDATA,PRXY,1,,v
MPDATA,PRXY,1,,v
MPDATA,PRXY,1,,v
MPDATA,PRXY,1,,v
MPDATA,PRXY,1,,v
MPDATA,PRXY,1,,v
```

```
!
```

```
=====
! CONDICAO NECESSARIA PARA GERAR GRAFICO TENSAO DERFORMACAO
```

```
!
```

```
*IF, Kp_20, GT, Ky_20, THEN
```

```
Kp_20 = Ky_20
```

```
*ENDIF
```

```
!
```

```
*IF, Kp_200, GT, Ky_200, THEN
```

```
Kp_200 = Ky_200
```

```
*ENDIF
```

```
!
```

```
*IF, Kp_300, GT, Ky_300, THEN
```

```
Kp_300 = Ky_300
```

```
*ENDIF
```

```
!
```

```
*IF, Kp_400, GT, Ky_400, THEN
```

```
Kp_400 = Ky_400
```

```
*ENDIF
```

```
!
```

```
*IF, Kp_500, GT, Ky_500, THEN
```

```
Kp_500 = Ky_500
```

```
*ENDIF
```

```
!
```

```
*IF, Kp_600, GT, Ky_600, THEN
```

```
Kp_600 = Ky_600
```

```
*ENDIF
```

```
!
```

```
*IF, Kp_700, GT, Ky_700, THEN
```

```
Kp_700 = Ky_700
```

```
*ENDIF
```

```
!
```

```
*IF, Kp_800, GT, Ky_800, THEN
```

```
Kp_800 = Ky_800
```

```
*ENDIF
```

```
!
```

```
*IF, Kp_900, GT, Ky_900, THEN
```

```
Kp_900 = Ky_900
```

```
*ENDIF
```

```
!
```

```
*IF, Kp_1000, GT, Ky_1000, THEN
```

```
Kp_1000 = Ky_1000
```

```
*ENDIF
```

```
!
```

```
*IF, Kp_1100, GT, Ky_1100, THEN
```

```
Kp_1100 = Ky_1100
```

```
*ENDIF
```

```
!
```

```
=====
```

```
!
```

```

fy_20 = fy*Ky_20
fy_200 = fy*Ky_200
fy_300 = fy*Ky_300
fy_400 = fy*Ky_400
fy_500 = fy*Ky_500
fy_600 = fy*Ky_600
fy_700 = fy*Ky_700
fy_800 = fy*Ky_800
fy_900 = fy*Ky_900
fy_1000 = fy*Ky_1000
fy_1100 = fy*Ky_1100
!
fp_20 = fpp*Kp_20
fp_200 = fpp*Kp_200
fp_300 = fpp*Kp_300
fp_400 = fpp*Kp_400
fp_500 = fpp*Kp_500
fp_600 = fpp*Kp_600
fp_700 = fpp*Kp_700
fp_800 = fpp*Kp_800
fp_900 = fpp*Kp_900
fp_1000 = fpp*Kp_1000
fp_1100 = fpp*Kp_1100
!
E_20 = E*KE_20
E_200 = E*KE_200
E_300 = E*KE_300
E_400 = E*KE_400
E_500 = E*KE_500
E_600 = E*KE_600
E_700 = E*KE_700
E_800 = E*KE_800
E_900 = E*KE_900
E_1000 = E*KE_1000
E_1100 = E*KE_1100
!
eps_e = 0.2           ! VALORES SEGUNDO O EUROCODE 3
eps_u = 0.15
eps_y = 0.02
!
eps_p20 = fp_20/E_20
eps_p200 = fp_200/E_200
eps_p300 = fp_300/E_300
eps_p400 = fp_400/E_400
eps_p500 = fp_500/E_500
eps_p600 = fp_600/E_600
eps_p700 = fp_700/E_700
eps_p800 = fp_800/E_800
eps_p900 = fp_900/E_900
eps_p1000 = fp_1000/E_1000
eps_p1100 = fp_1100/E_1100
!
c20 = (((fy_20-fp_20)**2)/((E_20*(eps_y-eps_p20))-(2*(fy_20-fp_20))))
c200 = (((fy_200-fp_200)**2)/((E_200*(eps_y-eps_p200))-(2*(fy_200-fp_200))))
c300 = (((fy_300-fp_300)**2)/((E_300*(eps_y-eps_p300))-(2*(fy_300-fp_300))))
c400 = (((fy_400-fp_400)**2)/((E_400*(eps_y-eps_p400))-(2*(fy_400-fp_400))))
c500 = (((fy_500-fp_500)**2)/((E_500*(eps_y-eps_p500))-(2*(fy_500-fp_500))))
c600 = (((fy_600-fp_600)**2)/((E_600*(eps_y-eps_p600))-(2*(fy_600-fp_600))))
c700 = (((fy_700-fp_700)**2)/((E_700*(eps_y-eps_p700))-(2*(fy_700-fp_700))))
c800 = (((fy_800-fp_800)**2)/((E_800*(eps_y-eps_p800))-(2*(fy_800-fp_800))))
c900 = (((fy_900-fp_900)**2)/((E_900*(eps_y-eps_p900))-(2*(fy_900-fp_900))))
c1000 = (((fy_1000-fp_1000)**2)/((E_1000*(eps_y-eps_p1000))-(2*(fy_1000-fp_1000))))
c1100 = (((fy_1100-fp_1100)**2)/((E_1100*(eps_y-eps_p1100))-(2*(fy_1100-fp_1100))))
!
b20 = ((c20*(eps_y-eps_p20)*E_20)+(c20**2))**(1/2)
b200 = ((c200*(eps_y-eps_p200)*E_200)+(c200**2))**(1/2)
b300 = ((c300*(eps_y-eps_p300)*E_300)+(c300**2))**(1/2)
b400 = ((c400*(eps_y-eps_p400)*E_400)+(c400**2))**(1/2)
b500 = ((c500*(eps_y-eps_p500)*E_500)+(c500**2))**(1/2)
b600 = ((c600*(eps_y-eps_p600)*E_600)+(c600**2))**(1/2)
b700 = ((c700*(eps_y-eps_p700)*E_700)+(c700**2))**(1/2)
b800 = ((c800*(eps_y-eps_p800)*E_800)+(c800**2))**(1/2)
b900 = ((c900*(eps_y-eps_p900)*E_900)+(c900**2))**(1/2)

```

```

b1000 = ((c1000*(eps_y-eps_p1000)*E_1000)+(c1000**2))**(1/2)
b1100 = ((c1100*(eps_y-eps_p1100)*E_1100)+(c1100**2))**(1/2)
!
a20 = ((eps_y-eps_p20)*(((eps_y-eps_p20)+(c20/E_20))))**(1/2)
a200 = ((eps_y-eps_p200)*(((eps_y-eps_p200)+(c200/E_200))))**(1/2)
a300 = ((eps_y-eps_p300)*(((eps_y-eps_p300)+(c300/E_300))))**(1/2)
a400 = ((eps_y-eps_p400)*(((eps_y-eps_p400)+(c400/E_400))))**(1/2)
a500 = ((eps_y-eps_p500)*(((eps_y-eps_p500)+(c500/E_500))))**(1/2)
a600 = ((eps_y-eps_p600)*(((eps_y-eps_p600)+(c600/E_600))))**(1/2)
a700 = ((eps_y-eps_p700)*(((eps_y-eps_p700)+(c700/E_700))))**(1/2)
a800 = ((eps_y-eps_p800)*(((eps_y-eps_p800)+(c800/E_800))))**(1/2)
a900 = ((eps_y-eps_p900)*(((eps_y-eps_p900)+(c900/E_900))))**(1/2)
a1000 = ((eps_y-eps_p1000)*(((eps_y-eps_p1000)+(c1000/E_1000))))**(1/2)
a1100 = ((eps_y-eps_p1100)*(((eps_y-eps_p1100)+(c1100/E_1100))))**(1/2)
!
sigma1_20 = eps_p20*E_20
sigma2_20 = (fp_20-c20)+(b20/a20)*((a20**2)-(eps_y-(eps_p20+(1*0.005))))**2**(1/2)
sigma3_20 = (fp_20-c20)+(b20/a20)*((a20**2)-(eps_y-(eps_p20+(0.005*2))))**2**(1/2)
sigma4_20 = (fp_20-c20)+(b20/a20)*((a20**2)-(eps_y-(eps_p20+(0.005*3))))**2**(1/2)
sigma5_20 = (fp_20-c20)+(b20/a20)*((a20**2)-(eps_y-(eps_p20+(0.005*4))))**2**(1/2)
sigma6_20 = fy_20
sigma7_20 = fy_20
!
sigma1_200 = eps_p200*E_200
sigma2_200 = (fp_200-c200)+(b200/a200)*((a200**2)-(eps_y-(eps_p200+(1*0.005))))**2**(1/2)
sigma3_200 = (fp_200-c200)+(b200/a200)*((a200**2)-(eps_y-(eps_p200+(0.005*2))))**2**(1/2)
sigma4_200 = (fp_200-c200)+(b200/a200)*((a200**2)-(eps_y-(eps_p200+(0.005*3))))**2**(1/2)
sigma5_200 = (fp_200-c200)+(b200/a200)*((a200**2)-(eps_y-(eps_p200+(0.005*4))))**2**(1/2)
sigma6_200 = fy_200
sigma7_200 = fy_200
!
sigma1_300 = eps_p300*E_300
sigma2_300 = (fp_300-c300)+(b300/a300)*((a300**2)-(eps_y-(eps_p300+0.005)))**2**(1/2)
sigma3_300 = (fp_300-c300)+(b300/a300)*((a300**2)-(eps_y-(eps_p300+(0.005*2))))**2**(1/2)
sigma4_300 = (fp_300-c300)+(b300/a300)*((a300**2)-(eps_y-(eps_p300+(0.005*3))))**2**(1/2)
sigma5_300 = (fp_300-c300)+(b300/a300)*((a300**2)-(eps_y-(eps_p300+(0.005*4))))**2**(1/2)
sigma6_300 = fy_300
sigma7_300 = fy_300
!
sigma1_400 = eps_p400*E_400
sigma2_400 = (fp_400-c400)+(b400/a400)*((a400**2)-(eps_y-(eps_p400+0.005)))**2**(1/2)
sigma3_400 = (fp_400-c400)+(b400/a400)*((a400**2)-(eps_y-(eps_p400+(0.005*2))))**2**(1/2)
sigma4_400 = (fp_400-c400)+(b400/a400)*((a400**2)-(eps_y-(eps_p400+(0.005*3))))**2**(1/2)
sigma5_400 = (fp_400-c400)+(b400/a400)*((a400**2)-(eps_y-(eps_p400+(0.005*4))))**2**(1/2)
sigma6_400 = fy_400
sigma7_400 = fy_400
!
sigma1_500 = eps_p500*E_500
sigma2_500 = (fp_500-c500)+(b500/a500)*((a500**2)-(eps_y-(eps_p500+0.005)))**2**(1/2)
sigma3_500 = (fp_500-c500)+(b500/a500)*((a500**2)-(eps_y-(eps_p500+(0.005*2))))**2**(1/2)
sigma4_500 = (fp_500-c500)+(b500/a500)*((a500**2)-(eps_y-(eps_p500+(0.005*3))))**2**(1/2)
sigma5_500 = (fp_500-c500)+(b500/a500)*((a500**2)-(eps_y-(eps_p500+(0.005*4))))**2**(1/2)
sigma6_500 = fy_500
sigma7_500 = fy_500
!
sigma1_600 = eps_p600*E_600
sigma2_600 = (fp_600-c600)+(b600/a600)*((a600**2)-(eps_y-(eps_p600+0.005)))**2**(1/2)
sigma3_600 = (fp_600-c600)+(b600/a600)*((a600**2)-(eps_y-(eps_p600+(0.005*2))))**2**(1/2)
sigma4_600 = (fp_600-c600)+(b600/a600)*((a600**2)-(eps_y-(eps_p600+(0.005*3))))**2**(1/2)
sigma5_600 = (fp_600-c600)+(b600/a600)*((a600**2)-(eps_y-(eps_p600+(0.005*4))))**2**(1/2)
sigma6_600 = fy_600
sigma7_600 = fy_600
!
sigma1_700 = eps_p700*E_700
sigma2_700 = (fp_700-c700)+(b700/a700)*((a700**2)-(eps_y-(eps_p700+0.005)))**2**(1/2)
sigma3_700 = (fp_700-c700)+(b700/a700)*((a700**2)-(eps_y-(eps_p700+(0.005*2))))**2**(1/2)
sigma4_700 = (fp_700-c700)+(b700/a700)*((a700**2)-(eps_y-(eps_p700+(0.005*3))))**2**(1/2)
sigma5_700 = (fp_700-c700)+(b700/a700)*((a700**2)-(eps_y-(eps_p700+(0.005*4))))**2**(1/2)
sigma6_700 = fy_700
sigma7_700 = fy_700
!
sigma1_800 = eps_p800*E_800

```

```

sigma2_800 = (fp_800-c800)+(b800/a800)*((a800**2)-(eps_y-(eps_p800+0.005))**2)**(1/2)
sigma3_800 = (fp_800-c800)+(b800/a800)*((a800**2)-(eps_y-(eps_p800+(0.005*2)))**2)**(1/2)
sigma4_800 = (fp_800-c800)+(b800/a800)*((a800**2)-(eps_y-(eps_p800+(0.005*3)))**2)**(1/2)
sigma5_800 = (fp_800-c800)+(b800/a800)*((a800**2)-(eps_y-(eps_p800+(0.005*4)))**2)**(1/2)
sigma6_800 = fy_800
sigma7_800 = fy_800
!
sigma1_900 = eps_p900*E_900
sigma2_900 = (fp_900-c900)+(b900/a900)*((a900**2)-(eps_y-(eps_p900+0.005))**2)**(1/2)
sigma3_900 = (fp_900-c900)+(b900/a900)*((a900**2)-(eps_y-(eps_p900+(0.005*2)))**2)**(1/2)
sigma4_900 = (fp_900-c900)+(b900/a900)*((a900**2)-(eps_y-(eps_p900+(0.005*3)))**2)**(1/2)
sigma5_900 = (fp_900-c900)+(b900/a900)*((a900**2)-(eps_y-(eps_p900+(0.005*4)))**2)**(1/2)
sigma6_900 = fy_900
sigma7_900 = fy_900
!
sigma1_1000 = eps_p1000*E_1000
sigma2_1000 = (fp_1000-c1000)+(b1000/a1000)*((a1000**2)-(eps_y-(eps_p1000+0.005))**2)**(1/2)
sigma3_1000 = (fp_1000-c1000)+(b1000/a1000)*((a1000**2)-(eps_y-(eps_p1000+(0.005*2)))**2)**(1/2)
sigma4_1000 = (fp_1000-c1000)+(b1000/a1000)*((a1000**2)-(eps_y-(eps_p1000+(0.005*3)))**2)**(1/2)
sigma5_1000 = (fp_1000-c1000)+(b1000/a1000)*((a1000**2)-(eps_y-(eps_p1000+(0.005*4)))**2)**(1/2)
sigma6_1000 = fy_1000
sigma7_1000 = fy_1000
!
sigma1_1100 = eps_p1100*E_1100
sigma2_1100 = (fp_1100-c1100)+(b1100/a1100)*((a1100**2)-(eps_y-(eps_p1100+0.005))**2)**(1/2)
sigma3_1100 = (fp_1100-c1100)+(b1100/a1100)*((a1100**2)-(eps_y-(eps_p1100+(0.005*2)))**2)**(1/2)
sigma4_1100 = (fp_1100-c1100)+(b1100/a1100)*((a1100**2)-(eps_y-(eps_p1100+(0.005*3)))**2)**(1/2)
sigma5_1100 = (fp_1100-c1100)+(b1100/a1100)*((a1100**2)-(eps_y-(eps_p1100+(0.005*4)))**2)**(1/2)
sigma6_1100 = fy_1100
sigma7_1100 = fy_1100
!
! GRAFICO TENSAO X DEFORMACAO em FUNCAO da TEMPERATURA
/REP,FAST
TBDE,MISO,1,, ! aço do perfil - propriedades plásticas
TB,MISO,1,11,
!
TBTEMP,20
TBPT,,eps_p20,sigma1_20
TBPT,,(eps_p20+0.005),sigma2_20
TBPT,,(eps_p20+(2*0.005)),sigma3_20
TBPT,,(eps_p20+(3*0.005)),sigma4_20
TBPT,,eps_y,sigma6_20
TBPT,,eps_u,sigma7_20
!
TBTEMP,200
TBPT,,eps_p200,sigma1_200
TBPT,,(eps_p200+0.005),sigma2_200
TBPT,,(eps_p200+(2*0.005)),sigma3_200
TBPT,,(eps_p200+(3*0.005)),sigma4_200
TBPT,,eps_y,sigma6_200
TBPT,,eps_u,sigma7_200
!
TBTEMP,300
TBPT,,eps_p300,sigma1_300
TBPT,,(eps_p300+0.005),sigma2_300
TBPT,,(eps_p300+(2*0.005)),sigma3_300
TBPT,,(eps_p300+(3*0.005)),sigma4_300
TBPT,,eps_y,sigma6_300
TBPT,,eps_u,sigma7_300
!
TBTEMP,400
TBPT,,eps_p400,sigma1_400
TBPT,,(eps_p400+0.005),sigma2_400
TBPT,,(eps_p400+(2*0.005)),sigma3_400
TBPT,,(eps_p400+(3*0.005)),sigma4_400
TBPT,,eps_y,sigma6_400
TBPT,,eps_u,sigma7_400
!
TBTEMP,500
TBPT,,eps_p500,sigma1_500
TBPT,,(eps_p500+0.005),sigma2_500
TBPT,,(eps_p500+(2*0.005)),sigma3_500
TBPT,,(eps_p500+(3*0.005)),sigma4_500

```

```

TBPT,eps_y,sigma6_500
TBPT,eps_u,sigma7_500
!
TBTEMP,600
TBPT,eps_p600,sigma1_600
TBPT,(eps_p600+0.005),sigma2_600
TBPT,(eps_p600+(2*0.005)),sigma3_600
TBPT,(eps_p600+(3*0.005)),sigma4_600
TBPT,eps_y,sigma6_600
TBPT,eps_u,sigma7_600
!
TBTEMP,700
TBPT,eps_p700,sigma1_700
TBPT,(eps_p700+0.005),sigma2_700
TBPT,(eps_p700+(2*0.005)),sigma3_700
TBPT,(eps_p700+(3*0.005)),sigma4_700
TBPT,eps_y,sigma6_700
TBPT,eps_u,sigma7_700
!
TBTEMP,800
TBPT,eps_p800,sigma1_800
TBPT,(eps_p800+0.005),sigma2_800
TBPT,(eps_p800+(2*0.005)),sigma3_800
TBPT,(eps_p800+(3*0.005)),sigma4_800
TBPT,eps_y,sigma6_800
TBPT,eps_u,sigma7_800
!
TBTEMP,900
TBPT,eps_p900,sigma1_900
TBPT,(eps_p900+0.005),sigma2_900
TBPT,(eps_p900+(2*0.005)),sigma3_900
TBPT,(eps_p900+(3*0.005)),sigma4_900
TBPT,eps_y,sigma6_900
TBPT,eps_u,sigma7_900
!
TBTEMP,1000
TBPT,eps_p1000,sigma1_1000
TBPT,(eps_p1000+0.005),sigma2_1000
TBPT,(eps_p1000+(2*0.005)),sigma3_1000
TBPT,(eps_p1000+(3*0.005)),sigma4_1000
TBPT,eps_y,sigma6_1000
TBPT,eps_u,sigma7_1000
!
TBTEMP,1100
TBPT,eps_p1100,sigma1_1100
TBPT,(eps_p1100+0.005),sigma2_1100
TBPT,(eps_p1100+(2*0.005)),sigma3_1100
TBPT,(eps_p1100+(3*0.005)),sigma4_1100
TBPT,eps_y,sigma6_1100
TBPT,eps_u,sigma7_1100
!
!
=====
! ***** CONSTROI O PORTICO *****
=====
!
PREP7
!
K,1,0,0,0,
K,2,0,ha,0,
K,3,0,2*ha,0,
K,4,0,3*ha,0,
K,5,0,4*ha,0,
K,6,0,5*ha,0,
K,7,0,6*ha,0,
!
K,8,La,0,0,
K,9,La,ha,0,
K,10,La,2*ha,0,
K,11,La,3*ha,0,
!
K,12,2*La,0,0,

```

K,13,2*La,ha,0,
 K,14,2*La,2*ha,0,
 K,15,2*La,3*ha,0,
 !
 K,16,0,0,La,
 K,17,0,ha,La,
 K,18,0,2*ha,La,
 K,19,0,3*ha,La,
 K,20,0,4*ha,La,
 K,21,0,5*ha,La,
 K,22,0,6*ha,La,
 !
 K,23,La,0,La,
 K,24,La,ha,La,
 K,25,La,2*ha,La,
 K,26,La,3*ha,La,
 !
 K,27,2*La,0,La,
 K,28,2*La,ha,La,
 K,29,2*La,2*ha,La,
 K,30,2*La,3*ha,La,
 !
 K,31,La,4*ha,0,
 K,32,La,5*ha,0,
 K,33,La,6*ha,0,
 !
 K,34,La,4*ha,La,
 K,35,La,5*ha,La,
 K,36,La,6*ha,La,
 !
 LSTR, 1, 2
 LSTR, 2, 3
 LSTR, 3, 4
 LSTR, 4, 5
 LSTR, 5, 6
 LSTR, 6, 7
 LSTR, 8, 9
 LSTR, 9, 10
 LSTR, 10, 11
 LSTR, 12, 13
 LSTR, 13, 14
 LSTR, 14, 15
 LSTR, 16, 17
 LSTR, 17, 18
 LSTR, 18, 19
 LSTR, 19, 20
 LSTR, 20, 21
 LSTR, 21, 22
 LSTR, 23, 24
 LSTR, 24, 25
 LSTR, 25, 26
 LSTR, 26, 34
 LSTR, 34, 35
 LSTR, 35, 36
 LSTR, 11, 31
 LSTR, 31, 32
 LSTR, 32, 33
 LSTR, 27, 28
 LSTR, 28, 29
 LSTR, 29, 30
 LSTR, 7, 33
 LSTR, 6, 32
 LSTR, 5, 31
 LSTR, 4, 11
 LSTR, 3, 10
 LSTR, 2, 9
 LSTR, 24, 9
 LSTR, 25, 10
 LSTR, 26, 11
 LSTR, 34, 31
 LSTR, 35, 32
 LSTR, 36, 33
 LSTR, 22, 7

```

LSTR, 21, 6
LSTR, 20, 5
LSTR, 19, 4
LSTR, 18, 3
LSTR, 17, 2
LSTR, 17, 24
LSTR, 18, 25
LSTR, 19, 26
LSTR, 20, 34
LSTR, 21, 35
LSTR, 22, 36
LSTR, 15, 11
LSTR, 14, 10
LSTR, 13, 9
LSTR, 15, 30
LSTR, 14, 29
LSTR, 13, 28
LSTR, 30, 26
LSTR, 29, 25
LSTR, 28, 24

```

```
!
```

```
!
```

```
=====
! ***** ATRIBUICAO DAS PROPRIEDADES *****
=====
```

```
!
```

```

SECTYPE, 1, BEAM, I, W12x87, 2
SECOFFSET, CENT
SECDDATA,bw1,bw1,hw1,tf1,tf1,tw1,0,0,0,0,0,0
!
```

```

SECTYPE, 2, BEAM, I, W12x120, 2
SECOFFSET, CENT
SECDDATA,bw2,bw2,hw2,tf2,tf2,tw2,0,0,0,0,0,0
!
```

```

SECTYPE, 3, BEAM, I, W12x26, 2
SECOFFSET, CENT
SECDDATA,bw3,bw3,hw3,tf3,tf3,tw3,0,0,0,0,0,0
!
```

```

SECTYPE, 4, BEAM, I, W12x53, 2
SECOFFSET, CENT
SECDDATA,bw4,bw4,hw4,tf4,tf4,tw4,0,0,0,0,0,0
!
```

```

SECTYPE, 5, BEAM, I, W10x60, 2
SECOFFSET, CENT
SECDDATA,bw5,bw5,hw5,tf5,tf5,tw5,0,0,0,0,0,0
!
```

```
!
```

```
FLST,5,9,4,ORDE,4
```

```
FITEM,5,31
```

```
FITEM,5,-36
```

```
FITEM,5,55
```

```
FITEM,5,-57
```

```
CM,_Y,LINE
```

```
LSEL,,,P51X
```

```
CM,_Y1,LINE
```

```
CMSEL,S,_Y
```

```
!*
!*

```

```
CMSEL,S,_Y1
```

```
LATT,1,,1,, 12,,3
```

```
CMSEL,S,_Y
```

```
CMDELE,_Y
```

```
CMDELE,_Y1
```

```
!*

```

```
FLST,5,9,4,ORDE,4
```

```
FITEM,5,49
```

```
FITEM,5,-54
```

```
FITEM,5,61
```

```
FITEM,5,-63
```

```
CM,_Y,LINE
```

```
LSEL,,,P51X
```

```
CM,_Y1,LINE
```



```

CMSEL,S,_Y
!*
!*
CMSEL,S,_Y1
LATT,1,,1,, 16,,3
CMSEL,S,_Y
CMDELE,_Y
CMDELE,_Y1
!*
FLST,5,3,4,ORDE,2
FITEM,5,58
FITEM,5,-60
CM,_Y,LINE
LSEL,,,P51X
CM,_Y1,LINE
CMSEL,S,_Y
!*
!*
CMSEL,S,_Y1
LATT,1,,1,, 27,,4
CMSEL,S,_Y
CMDELE,_Y
CMDELE,_Y1
!*
FLST,5,6,4,ORDE,2
FITEM,5,43
FITEM,5,-48
CM,_Y,LINE
LSEL,,,P51X
CM,_Y1,LINE
CMSEL,S,_Y
!*
!*
CMSEL,S,_Y1
LATT,1,,1,, 16,,4
CMSEL,S,_Y
CMDELE,_Y
CMDELE,_Y1
!*
FLST,5,6,4,ORDE,2
FITEM,5,37
FITEM,5,-42
CM,_Y,LINE
LSEL,,,P51X
CM,_Y1,LINE
CMSEL,S,_Y
!*
!*
CMSEL,S,_Y1
LATT,1,,1,, 23,,1
CMSEL,S,_Y
CMDELE,_Y
CMDELE,_Y1
!*
FLST,5,12,4,ORDE,6
FITEM,5,1
FITEM,5,-3
FITEM,5,10
FITEM,5,-15
FITEM,5,28
FITEM,5,-30
CM,_Y,LINE
LSEL,,,P51X
CM,_Y1,LINE
CMSEL,S,_Y
!*
!*
CMSEL,S,_Y1
LATT,1,,1,,1
CMSEL,S,_Y
CMDELE,_Y
CMDELE,_Y1
!*

```

```

FLST,5,6,4,ORDE,4
FITEM,5,7
FITEM,5,-9
FITEM,5,19
FITEM,5,-21
CM,_Y,LINE
LSEL,, , ,P51X
CM,_Y1,LINE
CMSEL,S,_Y
!*
!*
CMSEL,S,_Y1
LATT,1, ,1, , , ,2
CMSEL,S,_Y
CMDELE,_Y
CMDELE,_Y1
!*
FLST,5,12,4,ORDE,6
FITEM,5,4
FITEM,5,-6
FITEM,5,16
FITEM,5,-18
FITEM,5,22
FITEM,5,-27
CM,_Y,LINE
LSEL,, , ,P51X
CM,_Y1,LINE
CMSEL,S,_Y
!*
!*
CMSEL,S,_Y1
LATT,1, ,1, , , ,5
CMSEL,S,_Y
CMDELE,_Y
CMDELE,_Y1
!*
FLST,5,63,4,ORDE,2
FITEM,5,1
FITEM,5,-63
CM,_Y,LINE
LSEL,, , ,P51X
CM,_Y1,LINE
CMSEL,,_Y
!*
LESIZE,_Y1, , ,10, , , , ,1
!*
FLST,2,63,4,ORDE,2
FITEM,2,1
FITEM,2,-63
LMESH,P51X
/UL,MESH,OFF
!
/SHRINK,0
/ESHAPE,1.0
/EFACET,1
/RATIO,1,1,1
/CFORMAT,32,0
/REPLOT
!*
=====
! ***** CONDICÕES DE CONTORNO DOS APOIOS E CARREGAMENTOS *****
=====
!
FLST,2,6,3,ORDE,6
FITEM,2,1
FITEM,2,8
FITEM,2,12
FITEM,2,16
FITEM,2,23
FITEM,2,27
!*
/GO

```

```

DK,P51X, , , 0,ALL, , , , ,
!
! Acoplamento dos graus de liberdade
!
CPINTF,UX,
CPINTF,UY,
CPINTF,UZ,
CPINTF,ROTX,
CPINTF,ROTY,
CPINTF,ROTZ,
!
FLST,2,15,3,ORDE,8
FITEM,2,17
FITEM,2,-22
FITEM,2,24
FITEM,2,-26
FITEM,2,28
FITEM,2,-30
FITEM,2,34
FITEM,2,-36
!*
/GO
FK,P51X,FZ,-P2
!
FLST,2,300,2,ORDE,4
FITEM,2,301
FITEM,2,-360
FITEM,2,391
FITEM,2,-630
SFBEAM,P51X,1,PRES,-P1,-P1, , , , 0
FLST,2,30,2,ORDE,2
FITEM,2,361
FITEM,2,-390
SFBEAM,P51X,1,PRES,-2*P1,-2*P1, , , , 0
!
=====
!***** ANALISE TERMO-ESTRUTURAL *****
=====
!
! ** opções para processamento **
!
ALLSEL,ALL
TUNIF,20 ! Temperatura uniforme em todos os nós
TREF,20 ! Temperatura de referência
!
=====
!***** OPCOES PARA PROCESSAMENTO *****
=====
!
ANTYPE,0! Definição do tipo de análise - Estática
!
NLGEOM,ON! opções de processamento
KBC,0
AUTOTS,1
LNSRCH,1
TIME,0.00000001
DELTIM,0.00000001/100,0.00000001/1000,0.00000001/10,
OUTRES,ERASE
OUTRES,NSOL,LAST
OUTRES,RSOL,LAST
OUTRES,STRS,LAST
OUTRES,EPEL,LAST
OUTRES,EPTH,LAST
OUTRES,EPPL,LAST
!
ALLSEL,ALL
/REPLOT
!
!
=====
!***** OPCOES PARA ESCRITA DAS TEMPERATURAS NO PERFIL *****
=====
!

```

```

LSWRITE,1,
!
Taco = 20
Taco60 = 20
Taco87 = 20
Taco120 = 20
Taco26 = 20
Taco53 = 20
Ca=600
!
!
tm = (0.0002*(qfi_d/vt))      !horas
tlim = 20/60                  !horas
!
*IF, tlim, LE, tm, THEN      ! VAL1 (tlim) <= VAL2 (tm).
tmax = tm                    ! Incendio controlado pela ventilação
psi = ((vt/rc1)**2)/(0.04/(1160))**2
dtmax = tmax*psi
!
*ELSE,
tmax = tlim                  ! Incendio controlado pelo combustivel
O_lim = 0.0001*(qfi_d/tlim)
!
psi = ((O_lim/rc1)**2)/(0.04/(1160))**2
dtmax = tmax*psi
!
*ENDIF
!
Tf_max = Tamb+ 1325*(1 - 0.324*(EXP(-0.2*dtmax))-0.204*(EXP(-1.7*dtmax))-0.472*(EXP(-19*dtmax)))
!
*DO,i,1,t_incendio,1
!
AUTOTS,1
TIME,i
DELTIM,passo_tempo,1,passo_tempo
OUTRES,ERASE
OUTRES,NSOL,LAST
OUTRES,RSOL,LAST
OUTRES,STRS,LAST
OUTRES,EPEL,LAST
OUTRES,EPTH,LAST
OUTRES,EPPL,LAST
!
ALLSEL,ALL
!
BFEDELE,ALL,TEMP
!
=====
! CONSTROI A TABELA COM AS TEMPERATURAS DO ELEMENTO PROTEGIDO TERMICAMENTE - INCENDIO NATURAL
! =====
!
tempo=(i-1)
tmina=tempo
tminb=(tempo + 1)
!
dta=(tmina/3600)*psi
dtb=(tminb/3600)*psi
!
*IF, dta, LE, dtmax, THEN
Tgasesa = Tamb + 1325*(1 - 0.324*(EXP(-0.2*dta))-0.204*(EXP(-1.7*dta))-0.472*(EXP(-19*dta)))
*ELSE,
!
*IF, tlim, LE, tm, THEN
x=1                          ! incendio controlado pela ventilacao
*ELSE,
x = (tlim*psi)/dtmax         ! incendio controlado pelo combustivel
*endif
!
*IF, dtmax, LE, 0.5, THEN
Tgasesa = Tf_max - 625*(dta-dtmax*x)
*ELSEIF, dtmax, GT, 2
Tgasesa = Tf_max - 250*(dta-dtmax*x)

```

```

*ELSEIF, dtmax, LE, 2, AND, dtmax, GT, 0.5
Tgasesa = Tf_max - 250*(3-dtmax)*(dta-dtmax*x)
*ENDIF
*IF, Tgasesa, LT, 0, THEN
Tgasesa = 0
*ENDIF
*ENDIF
!
*IF, dtb, LE, dtmax, THEN
Tgasesb = Tamb + 1325*(1 - 0.324*(EXP(-0.2*dtb))-0.204*(EXP(-1.7*dtb))-0.472*(EXP(-19*dtb)))
*ELSE,
!
!
*IF, tlim, LE, tm, THEN
x=1 !incendio controlado pela ventilacao
*ELSE,
x = (tlim*psi)/dtmax ! incendio controlado pelo combustivel
*endif
!
*IF, dtmax, LE, 0.5, THEN
Tgasesb = Tf_max - 625*(dtb-dtmax*x)
*ELSEIF, dtmax, GT, 2
Tgasesb = Tf_max - 250*(dtb-dtmax*x)
*ELSEIF, dtmax, LE, 2, AND, dtmax, GT, 0.5
Tgasesb = Tf_max - 250*(3-dtmax)*(dtb-dtmax*x)
*ENDIF
*IF, Tgasesb, LT, 0, THEN
Tgasesb = 0
*ENDIF
*ENDIF
!
*IF, Taco, LE, 600, THEN
Ca=425+((7.73E-1)*Taco)-((1.69E-3)*((Taco)**2))+((2.22E-6)*((Taco)**3))
*ELSEIF, Taco, GT, 600, AND, Taco, LE, 735
Ca=666+(13002/(738-Taco))
*ELSEIF, Taco, GT, 735, AND, Taco, LE, 900
Ca=545+(17820/(Taco-731))
*ELSE,
Ca=650
*ENDIF
!
=====
! ***** CALOR ESPECIFICO DO SFRM EM FUNCAO DA TEMPERATURA (Khorasani ET AL (2015))*****
=====
!
txesp60 = 1700-EXP(6.81-(1.6E-03)*Taco60 + (4.40E-07)*((Taco60)**2) + (2.13E-01)*CES)
txesp87 = 1700-EXP(6.81-(1.6E-03)*Taco87 + (4.40E-07)*((Taco87)**2) + (2.13E-01)*CES)
txesp120 = 1700-EXP(6.81-(1.6E-03)*Taco120 + (4.40E-07)*((Taco120)**2) + (2.13E-01)*CES)
txesp26 = 1700-EXP(6.81-(1.6E-03)*Taco26 + (4.40E-07)*((Taco26)**2) + (2.13E-01)*CES)
txesp53 = 1700-EXP(6.81-(1.6E-03)*Taco53 + (4.40E-07)*((Taco53)**2) + (2.13E-01)*CES)
!
!
=====
! ***** CONDUTIVIDADE DO SFRM EM FUNCAO DA TEMPERATURA (Khorasani ET AL (2015))*****
=====
!
condu60 = EXP(-2.72 + (1.89E-03)*Taco60 - (1.95E-07)*((Taco60)**2) + (2.09E-01)*CSF)
condu87 = EXP(-2.72 + (1.89E-03)*Taco87 - (1.95E-07)*((Taco87)**2) + (2.09E-01)*CSF)
condu120 = EXP(-2.72 + (1.89E-03)*Taco120 - (1.95E-07)*((Taco120)**2) + (2.09E-01)*CSF)
condu26 = EXP(-2.72 + (1.89E-03)*Taco26 - (1.95E-07)*((Taco26)**2) + (2.09E-01)*CSF)
condu53 = EXP(-2.72 + (1.89E-03)*Taco53 - (1.95E-07)*((Taco53)**2) + (2.09E-01)*CSF)
!
!
=====
! ***** DENSIDADE DO SFRM EM FUNCAO DA TEMPERATURA (Khorasani ET AL (2015))*****
=====
!
dmp60 = EXP(-2.028 + 7.83*((Taco60)**(6.5E-03)) + (1.22E-01)*DSF)
dmp87 = EXP(-2.028 + 7.83*((Taco87)**(6.5E-03)) + (1.22E-01)*DSF)
dmp120 = EXP(-2.028 + 7.83*((Taco120)**(6.5E-03)) + (1.22E-01)*DSF)
dmp26 = EXP(-2.028 + 7.83*((Taco26)**(6.5E-03)) + (1.22E-01)*DSF)
dmp53 = EXP(-2.028 + 7.83*((Taco53)**(6.5E-03)) + (1.22E-01)*DSF)
!

```

```

!
!=====
!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!! FATORES DE MASSIVIDADE !!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!
FM60=148.52
FM87=94.02
FM120=69.49
FM26=226.05
FM53=155.20
!
!
!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!! ESPESSURA DO SRFM !!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!
tmp60 = tmp-(4/1000)
tmp87 = tmp-(8/1000)
tmp120 = tmp-(11/1000)
tmp26 = tmp
tmp53 = tmp-(4/1000)
!
!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!
!
FI60=((dmp60*txesp60)/(d*Ca))*tmp60*FM60
Daco60 = (FM60*(Tgasesa-Taco60)*1)/((tmp60/condu60)*Ca*d*(1+FI60/3))-((Tgasesb-Tgasesa)*(EXP(FI60/10)-1))
!
*IF, Taco60, LT, 0, THEN
Taco60 = 0
*ENDIF
!
Taco60=Taco60+Daco60
!
!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!
!
FI87=((dmp87*txesp87)/(d*Ca))*tmp87*FM87
Daco87 = (FM87*(Tgasesa-Taco87)*1)/((tmp87/condu87)*Ca*d*(1+FI87/3))-((Tgasesb-Tgasesa)*(EXP(FI87/10)-1))
!
*IF, Taco87, LT, 0, THEN
Taco87 = 0
*ENDIF
!
Taco87=Taco87+Daco87
!
!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!
!
FI120=((dmp120*txesp120)/(d*Ca))*tmp120*FM120
Daco120 = (FM120*(Tgasesa-Taco120)*1)/((tmp120/condu120)*Ca*d*(1+FI120/3))-((Tgasesb-Tgasesa)*(EXP(FI120/10)-1))
!
*IF, Taco120, LT, 0, THEN
Taco120 = 0
*ENDIF
!
Taco120=Taco120+Daco120
!
!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!
!
FI26=((dmp26*txesp26)/(d*Ca))*tmp26*FM26
Daco26 = (FM26*(Tgasesa-Taco26)*1)/((tmp26/condu26)*Ca*d*(1+FI26/3))-((Tgasesb-Tgasesa)*(EXP(FI26/10)-1))
!
*IF, Taco26, LT, 0, THEN
Taco26 = 0
*ENDIF
!
Taco26=Taco26+Daco26
!
!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!
!
FI53=((dmp53*txesp53)/(d*Ca))*tmp53*FM53
Daco53 = (FM53*(Tgasesa-Taco53)*1)/((tmp53/condu53)*Ca*d*(1+FI53/3))-((Tgasesb-Tgasesa)*(EXP(FI53/10)-1))
!
*IF, Taco53, LT, 0, THEN
Taco53 = 0
*ENDIF
!
Taco53=Taco53+Daco53

```

```
!  
FLST,2,2,4,ORDE,2  
FITEM,2,34  
FITEM,2,51  
!*  
BFL,P51X,TEMP,Taco26  
FLST,2,1,4,ORDE,1  
FITEM,2,46  
!*  
BFL,P51X,TEMP,Taco53  
FLST,2,1,4,ORDE,1  
FITEM,2,39  
!*  
BFL,P51X,TEMP,Taco87  
FLST,2,2,4,ORDE,2  
FITEM,2,3  
FITEM,2,15  
!*  
BFL,P51X,TEMP,Taco87  
FLST,2,2,4,ORDE,2  
FITEM,2,9  
FITEM,2,21  
!*  
BFL,P51X,TEMP,Taco120  
!  
!  
  ALLSEL,ALL  
  LSWRITE,i+1,  
!  
*ENDDO  
!  
ALLSEL,ALL  
/REPLOT  
!  
!=====  
!***** SOLUCAO *****  
!=====  
/solu  
LSSOLVE, 1, t_incendio, passo_tempo      ! resolver o modelo  
FINISH  
SOLVE  
!  
!=====  
!***** END *****  
!=====
```


APÊNDICE B: TABELAS DE RESULTADOS

As tabelas, a seguir, apresentam as probabilidades de falha em função do tempo de incêndio para os problemas solucionados no Capítulo 5 da presente tese. A Tabela 17 apresenta os resultados do problema 1, obtidos pelas RNAs adaptativas e considerando os modelos de incêndio natural e ISO 834. Os resultados obtidos por Guo & Jeffers (2014), considerando os métodos de MCS_{LHS} e FORM, também são apresentados na tabela. A Tabela 18 exibe os resultados encontrados com o uso das RNAs no problema 2, para os modelos de incêndio natural e de hidrocarbonetos. Os resultados encontrados por Balogh & Vigh (2016), considerando os métodos de MCS_{LHS} e FORM e a curva de incêndio de duas zonas, também são ilustrados na Tabela 18. A Tabela 19 apresenta os resultados do problema 3, obtidos, exclusivamente, pelas RNAs adaptativas e considerando os modelos natural e ISO 834. A Tabela 20 apresenta os resultados do problema 4, obtidos considerando as curvas natural e ISO, e a modelagem ou não das lajes de concreto. Salienta-se que as P_{fs} apresentadas nas seguintes Tabelas não consideram árvores de falha, ou seja, são valores condicionais a ocorrência do incêndio.

Tabela 17 – Probabilidades de falha do Problema 1.

Tempo (min)	MCS_{LHS} (modelo natural)	FORM (modelo natural)	RNAs adaptativa (modelo natural)	RNAs adaptativa (modelo ISO 834)
40	0,0015	0,0050	0,0022	0,0006
50	0,0093	0,0200	0,0066	0,0011
60	0,0170	0,0350	0,0110	0,0017
70	0,0335	0,0580	0,0276	0,0130
80	0,0500	0,0810	0,0442	0,0242
90	0,0600	0,0845	0,0579	0,0505
100	0,0700	0,0880	0,0716	0,0981
110	0,0746	0,0885	0,0772	0,1749
120	0,0792	0,0890	0,0829	0,2571

Tabela 18 – Probabilidades de falha do Problema 2.

Tempo (min)	MCS_{LHS} (modelo de zonas)	FORM (modelo de zonas)	RNAs adaptativa (modelo natural)	RNAs adaptativa (hidrocarbonetos)
20	0,0420	0,0280	0,0350	0,2751
25	0,0970	0,0810	0,1789	0,5048
30	0,3040	0,2760	0,4270	0,7345
35	0,5410	0,4520	0,5939	0,8312
40	0,7000	0,6260	0,8005	0,9278
45	0,7960	0,7430	0,8516	0,9550
50	0,8510	0,8190	0,8827	0,9722

Tabela 19 – Probabilidades de falha do Problema 3.

Tempo (min)	<i>RNAs adaptativa</i> (modelo natural)	<i>RNAs adaptativa</i> (modelo ISO 834)
50	0,0036934	---
60	0,0291727	---
70	0,0567116	0,0025753
80	0,1126476	0,0321358
90	0,2816595	0,1320300
100	0,4269296	0,2566572
110	0,5501240	0,3866694
120	0,6633276	0,5476342

Tabela 20 – Probabilidades de falha do Problema 4.

Tempo (min)	<i>RNAs adaptativa</i> (curva natural sem laje)	<i>RNAs adaptativa</i> (curva natural com laje)	<i>RNAs adaptativa</i> (curva ISO 834 com laje)
10	0,0196158	---	---
20	0,0656490	---	---
30	0,1450162	---	---
40	0,3520806	---	---
50	0,6566638	---	---
60	0,8301124	0,0043588	---
70	0,9312013	0,0153740	---
75	---	0,0449911	---
80	---	0,0846082	---
85	---	0,1100815	---
90	---	0,1375548	---
95	---	0,1756351	---
100	---	0,2137166	0,0163818
105	---	0,2351843	0,0173028
110	---	0,2604123	0,0991288
115	---	0,4727725	0,1538390