

MINISTÉRIO DA EDUCAÇÃO  
UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO GRANDE - FURG  
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM MODELAGEM COMPUTACIONAL

**ANÁLISE PROBABILÍSTICA DE CONFIABILIDADE DE VIGAS  
DE CONCRETO ARMADO EM SITUAÇÃO DE INCÊNDIO:  
PROPOSTA DE CALIBRAÇÃO DOS COEFICIENTES PARCIAIS  
DE SEGURANÇA DA ABNT NBR 15200**

Lillian Gonçalves Baptista  
Engenheira Civil

Rio Grande  
2024

Lillian Gonçalves Baptista

**“ANÁLISE PROBABILÍSTICA DE CONFIABILIDADE DE VIGAS DE CONCRETO ARMADO EM SITUAÇÃO DE INCÊNDIO: PROPOSTA DE CALIBRAÇÃO DOS COEFICIENTES PARCIAIS DE SEGURANÇA DA ABNT NBR 15200”**

Tese apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Modelagem Computacional da Universidade Federal do Rio Grande - FURG, como requisito parcial para obtenção do Grau de Doutor. Área de concentração: Modelagem Computacional.

Aprovado em:

**BANCA EXAMINADORA**

Documento assinado digitalmente  
 **MAURO DE VASCONCELLOS REAL**  
Data: 09/02/2024 18:06:15-0300  
Verifique em <https://validar.iti.gov.br>

---

Prof. Dr. Mauro de Vasconcellos Real (Orientador - FURG)

Documento assinado digitalmente  
 **VIVIANE LEITE DIAS DE MATTOS**  
Data: 09/02/2024 18:30:03-0300  
Verifique em <https://validar.iti.gov.br>

---

Profa. Dra. Viviane Leite Dias de Mattos (FURG)

Documento assinado digitalmente  
 **MARCIO WRAGUE MOURA**  
Data: 12/02/2024 11:56:40-0300  
Verifique em <https://validar.iti.gov.br>

---

Prof. Dr. Márcio Wrague Moura (FURG)

Documento assinado digitalmente  
 **CHARLEI MARCELO PALIGA**  
Data: 09/02/2024 20:41:54-0300  
Verifique em <https://validar.iti.gov.br>

---

Prof. Dr. Charlei Marcelo Paliga (UFPel)

## Ficha Catalográfica

B222a    Baptista, Lillian Gonçalves.

Análise probabilística de confiabilidade de vigas de concreto armado em situação de incêndio: proposta de calibração dos coeficientes parciais de segurança da ABNT NBR 15200 / Lillian Gonçalves Baptista. – 2024.

106 f.

Tese (doutorado) – Universidade Federal do Rio Grande – FURG, Programa de Pós-Graduação em Modelagem Computacional, Rio Grande/RS, 2024.

Orientador: Dr. Mauro de Vasconcellos Real.

1. Incêndio 2. Análise térmica 3. Confiabilidade 4. Calibração  
5. Modelagem computacional I. Real, Mauro de Vasconcellos  
II. Título.

CDU 004

Catálogo na Fonte: Bibliotecário José Paulo dos Santos CRB 10/2344

“Nunca tenha certeza de nada, porque a sabedoria começa com a dúvida.”

*Sigmund Freud*

## **AGRADECIMENTOS**

Ao Prof. Dr. Mauro de Vasconcellos Real pela orientação ao longo da execução deste trabalho e por ser inspiração ao longo da minha vida acadêmica.

À Diretoria de Obras da PROINFRA/FURG, por conceder o afastamento parcial para minha qualificação profissional.

Aos meus familiares e amigos, pela presença, compreensão, apoio e incentivo.

À psicanálise, por me mostrar que a maior forma de cuidar quem amamos, é cuidando de nós mesmos.

## RESUMO

BAPTISTA, L. G. **Análise probabilística de confiabilidade de vigas de concreto armado em situação de incêndio: Proposta de calibração dos coeficientes parciais de segurança da ABNT NBR 15200.** Tese (Doutorado em Modelagem Computacional) - Programa de Pós-Graduação em Modelagem Computacional, FURG, Rio Grande, 2024.

A avaliação de estruturas em situação de incêndio envolve metodologias de projeto predominantemente baseadas em estudos empíricos do comportamento do fogo e das respostas estruturais associadas. Considerando as incertezas pertinentes ao assunto, a confiabilidade de estruturas de concreto expostas ao fogo deve ser investigada para determinar o grau de segurança que reflete os modelos físicos, matemáticos e estatísticos utilizados em cálculos e na quantificação de incertezas. Neste contexto, este trabalho tem como objetivo determinar, através de uma análise térmica computacional baseada no Método dos Elementos Finitos, a capacidade resistente de um grupo de vigas de concreto armado submetidas ao Estado Limite Último de flexão simples e expostas ao incêndio padrão ISO 834. Posteriormente, os índices de confiabilidade são determinados através do *First Order Reliability Method* (FORM) e uma análise paramétrica determina as variáveis aleatórias críticas presentes na função falha. As análises mostram uma dispersão significativa nos resultados obtidos e sugerem uma proposta de calibração dos coeficientes parciais de segurança indicados nas principais normas brasileiras para a combinação última excepcional de ações para verificação de estruturas de concreto armado em situação de incêndio. A metodologia é desenvolvida com base na otimização estrutural baseada em confiabilidade (RBDO) e resolvida através de um algoritmo heurístico de enxame de partículas (PSO). O processo de calibração resultou na diminuição do coeficiente de segurança da carga permanente, que foi compensado pelo aumento do coeficiente de ponderação para ações variáveis, e que conduziram a uma confiabilidade mais uniforme para diferentes situações de projeto e diferentes relações de carregamentos.

**Palavras-chave:** Incêndio, Análise térmica, Confiabilidade, Calibração, Modelagem computacional.

## ABSTRACT

BAPTISTA, L. G. **Probabilistic reliability analysis of reinforced concrete beam in fire situations: Proposal for calibration of safety partial coefficients according to ABNT NBR 15200.** Thesis (PhD in Computer Modeling) - Pos-Graduate Program in Computer Modeling, FURG, Rio Grande, 2024.

The evaluation of structures in fire situations involves predominantly project methodologies based on empirical studies of fire behavior and associated structural responses. Considering the uncertainties inherent to the subject, the reliability of concrete structures exposed to fire must be investigated to determine the degree of safety that reflects the physical, mathematical, and statistical models used in calculations and uncertainty quantification. In this context, this work aims to determine, through a computational thermal analysis based on the Finite Element Method, the resistance capacity of a group of reinforced concrete beams subjected to the Ultimate Limit State of simple bending and exposed to the ISO 834 standard fire. Subsequently, reliability indices are determined through the First Order Reliability Method, and a parametric analysis identifies the critical random variables in the failure function. The analyses show significant dispersion in the results obtained and suggest a proposal for calibrating the partial safety factors indicated in the main Brazilian standards for the exceptional ultimate combination of actions for verification of reinforced concrete structures in fire situations.

The methodology is developed based on Reliability Based Design Optimization and solved through a heuristic particle swarm optimization algorithm. The calibration process resulted in a reduction of the dead load safety factor, compensated by an increase in the weighting coefficient for accidental or live load, leading to a more uniform reliability for different design situations and load combinations.

**Keywords:** Fire, Thermal analysis, Reliability, Calibration, Computational modeling.

# SUMÁRIO

|                                                                               |           |
|-------------------------------------------------------------------------------|-----------|
| <b>1. INTRODUÇÃO .....</b>                                                    | <b>16</b> |
| 1.1. MOTIVAÇÃO .....                                                          | 18        |
| 1.2. JUSTIFICATIVA .....                                                      | 18        |
| 1.3. OBJETIVOS .....                                                          | 19        |
| 1.3.1. Objetivo Geral .....                                                   | 19        |
| 1.3.2. Objetivos específicos .....                                            | 19        |
| <b>2. REVISÃO DA LITERATURA .....</b>                                         | <b>21</b> |
| 2.1. FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA.....                                               | 21        |
| 2.1.1 Incêndio real .....                                                     | 21        |
| 2.1.2 Incêndio padrão .....                                                   | 22        |
| 2.1.3 Propriedades dos materiais em situação de incêndio.....                 | 23        |
| a) Resistência à compressão do concreto .....                                 | 24        |
| b) Calor específico do concreto .....                                         | 25        |
| c) Condutividade térmica do concreto.....                                     | 26        |
| d) Massa específica do concreto .....                                         | 27        |
| a) Resistência ao escoamento do aço .....                                     | 28        |
| 2.1.4 Análise térmica em estruturas de concreto armado .....                  | 29        |
| 2.1.5 Verificação das estruturas de concreto armado em situação de incêndio.. | 31        |
| a) Determinação dos esforços solicitantes em situação de incêndio .....       | 33        |
| b) Determinação das resistências de cálculo dos materiais .....               | 35        |
| 2.1.6 Confiabilidade de estruturas de concreto em situação de incêndio .....  | 37        |
| a) Variáveis aleatórias de resistência.....                                   | 45        |
| b) Variáveis aleatórias de solicitação .....                                  | 46        |
| 2.1.7 Calibração dos coeficientes parciais de segurança .....                 | 50        |
| 2.2. ESTADO DA ARTE .....                                                     | 53        |

|                                                                                |            |
|--------------------------------------------------------------------------------|------------|
| <b>3. METODOLOGIA .....</b>                                                    | <b>58</b>  |
| 3.1. ANÁLISE TÉRMICA COMPUTACIONAL.....                                        | 58         |
| 3.1.1. Pré-processamento.....                                                  | 59         |
| 3.1.2. Processamento .....                                                     | 60         |
| 3.1.3. Pós-processamento .....                                                 | 63         |
| 3.1.4. Teste de convergência de malha.....                                     | 63         |
| 3.2. MOMENTO RESISTENTE EM SITUAÇÃO DE INCÊNDIO .....                          | 64         |
| 3.3. ANÁLISE PROBABILÍSTICA DE CONFIABILIDADE EM SITUAÇÃO DE<br>INCÊNDIO.....  | 67         |
| 3.3.1. Função Estado Limite Último .....                                       | 68         |
| 3.3.2. Índice de confiabilidade .....                                          | 70         |
| 3.3.3. Índice de confiabilidade alvo.....                                      | 71         |
| 3.4. CALIBRAÇÃO DOS COEFICIENTES PARCIAIS DE SEGURANÇA .....                   | 71         |
| <b>4. RESULTADOS.....</b>                                                      | <b>73</b>  |
| 4.1. ANÁLISE TÉRMICA COMPUTACIONAL.....                                        | 73         |
| 4.1.1. Verificação das temperaturas.....                                       | 74         |
| 4.2. MOMENTO RESISTENTE EM SITUAÇÃO DE INCÊNDIO .....                          | 75         |
| 4.2.1. Verificação do momento resistente de cálculo em situação de incêndio .. | 77         |
| 4.3. ANÁLISE PROBABILÍSTICA DE CONFIABILIDADE EM SITUAÇÃO DE<br>INCÊNDIO.....  | 79         |
| 4.4. CALIBRAÇÃO DOS COEFICIENTES PARCIAIS DE SEGURANÇA .....                   | 83         |
| <b>5. CONCLUSÕES .....</b>                                                     | <b>86</b>  |
| <b>REFERÊNCIAS.....</b>                                                        | <b>89</b>  |
| <b>APÊNDECE A .....</b>                                                        | <b>95</b>  |
| <b>APÊNDECE B .....</b>                                                        | <b>97</b>  |
| <b>APÊNDECE C.....</b>                                                         | <b>103</b> |

## LISTA DE FIGURAS

|                                                                                                                                                 |    |
|-------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----|
| Figura 1.1 – Incêndio no edifício Andraus em 1972 .....                                                                                         | 16 |
| Figura 1.2 - Incêndio no edifício Joelma em 1974 .....                                                                                          | 16 |
| Figura 2.1 - Curva incêndio real .....                                                                                                          | 21 |
| Figura 2.2 - Curva-padrão tempo x temperatura ISO 834 .....                                                                                     | 23 |
| Figura 2.3 - Fator redutor da resistência dos concretos em função da temperatura .....                                                          | 25 |
| Figura 2.4 - Calor específico do concreto .....                                                                                                 | 26 |
| Figura 2.5 - Condutividade térmica do concreto .....                                                                                            | 27 |
| Figura 2.6 - Densidade do concreto .....                                                                                                        | 28 |
| Figura 2.7 - Fator de redução da resistência do aço de armadura passiva em função da temperatura .....                                          | 29 |
| Figura 2.8 - Distribuição da margem de segurança $Z=R-S$ .....                                                                                  | 39 |
| Figura 2.9 - Domínios de um estado limite bidimensional .....                                                                                   | 40 |
| Figura 2.10 - Interpretação geométrica bidimensional do Método FORM .....                                                                       | 44 |
| Figura 2.11 - Índice de confiabilidade alvo para elementos estruturais expostos ao fogo .....                                                   | 49 |
| Figura 4.1 - Geometria do elemento finito quadilátero PLANE55 (2-D Thermal Solid) .....                                                         | 60 |
| Figura 4.2 - Condições de contorno para análise térmica computacional .....                                                                     | 61 |
| Figura 4.3 - Discretização do modelo 2-D das seções 20x50 cm (a) e 25x70 cm (b) de concreto .....                                               | 64 |
| Figura 4.4 - Equilíbrio das forças de flexão simples em situação de incêndio .....                                                              | 66 |
| Figura 6.1 - Isotermas na seção transversal da viga V101 em t=30 min(a), 60 min(b), 90 min(c) e 120 min(d), através da modelagem no ANSYS ..... | 73 |
| Figura 6.2 - Índice de confiabilidade para vigas com $f_{ck}=25\text{MPa}$ , CAA-II e agregado silicoso .....                                   | 80 |
| Figura 6.3 - Índice de confiabilidade para vigas com $f_{ck}=35\text{MPa}$ , CAA-II e agregado silicoso .....                                   | 81 |
| Figura 6.4 - Índice de confiabilidade para vigas com $f_{ck}=25\text{MPa}$ , CAA-II e agregado calcário .....                                   | 82 |
| Figura 6.5 - Índice de confiabilidade para vigas com $f_{ck}=25\text{MPa}$ , CAA-I e agregado silicoso .....                                    | 82 |
| Figura 6.6 - Variabilidade da segurança das vigas antes do processo de calibração .....                                                         | 83 |
| Figura 6.7 - Comparação índices de confiabilidade máximos e mínimos antes e após calibração .....                                               | 84 |

|                                                                                            |    |
|--------------------------------------------------------------------------------------------|----|
| Figura 6.8 - Variabilidade da segurança das vigas projetadas após o processo de calibração |    |
| .....                                                                                      | 85 |

## LISTA DE TABELAS

|                                                                                                                        |    |
|------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----|
| Tabela 2.1 - Valores do fator redutor da resistência à compressão do concreto .....                                    | 25 |
| Tabela 2.2 - Valores das relações $k_s$ e $k_E$ s para aços de armadura passiva .....                                  | 29 |
| Tabela 2.3 – Coeficientes de ponderação para ações permanentes diretas agrupadas .....                                 | 34 |
| Tabela 2.4 – Coeficientes de ponderação para ações variáveis consideradas conjuntamente..                              | 34 |
| Tabela 2.5 - Fatores de combinação .....                                                                               | 34 |
| Tabela 2.6 - Variável aleatória $f_c$ .....                                                                            | 45 |
| Tabela 2.7 - Variável aleatórias $f_y$ .....                                                                           | 45 |
| Tabela 2.8 - Variáveis aleatórias geométricas .....                                                                    | 46 |
| Tabela 2.9 - Estatísticas da variável aleatória $E_m, r$ .....                                                         | 46 |
| Tabela 2.10 - Estatísticas de ações variáveis .....                                                                    | 48 |
| Tabela 2.11 - Estatísticas da variável aleatória $E_m, s$ .....                                                        | 48 |
| Tabela 2.12 - Cálculo de $\beta_t$ para edificações com diferentes classes de uso e consequência ..                    | 49 |
| Tabela 2.13 - Pesos de ponderação para estruturas de concreto armado.....                                              | 50 |
| Tabela 3.1 - Características geométricas da seção de concreto .....                                                    | 58 |
| Tabela 3.2 - Teste de convergência de malha.....                                                                       | 64 |
| Tabela 3.3 - Resumo dos parâmetros estatísticos das variáveis aleatórias .....                                         | 69 |
| Tabela 4.1 - Verificação da temperatura na superfície de concreto ( $^{\circ}\text{C}$ ) .....                         | 74 |
| Tabela 4.2 - Verificação da temperatura no interior do concreto ( $^{\circ}\text{C}$ ).....                            | 74 |
| Tabela 4.3 -Momento resistente de cálculo em situação de incêndio Grupo I.....                                         | 75 |
| Tabela 4.4 - Momento resistente de cálculo em situação de incêndio Grupo II.....                                       | 76 |
| Tabela 4.5 -Verificação do Momento Resistente de Cálculo em situação de incêndio Grupo I .....                         | 78 |
| Tabela 4.6 - Verificação do Momento Resistente de Cálculo em situação de incêndio Grupo II .....                       | 79 |
| Tabela 4.7 - Coeficientes parciais de segurança calibrados e o impacto nos carregamentos solicitantes de cálculo ..... | 83 |

## LISTA DE ABREVIATURAS

|       |                                                                                       |
|-------|---------------------------------------------------------------------------------------|
| ABNT  | Associação Brasileira de Normas Técnicas                                              |
| APDL  | <i>ANSYS Parametric Design Language</i>                                               |
| APPCI | Alvará de Prevenção e Proteção Contra Incêndio                                        |
| ASTM  | <i>American Society for Testing and Materials</i>                                     |
| BS    | <i>British Standards</i>                                                              |
| CA    | Concreto Armado                                                                       |
| CAA   | Classe de Agressividade Ambiental                                                     |
| CG    | Centro de Gravidade                                                                   |
| DPR   | Diferença Percentual Relativa                                                         |
| ELU   | Estado Limite Último                                                                  |
| EN    | Norma Européia ( <i>Europäische Norma</i> )                                           |
| FORM  | Método de Confiabilidade de Primeira Ordem ( <i>First Order Reliability Method</i> )  |
| FOSM  | Método de Confiabilidade de Segunda Ordem ( <i>First Order Second Moment</i> )        |
| ISO   | <i>International Organization for Standardization</i>                                 |
| JCSS  | <i>Joint Committee on Structural Safety</i>                                           |
| MEF   | Método dos Elementos Finitos                                                          |
| NBR   | Norma Brasileira                                                                      |
| NFSC  | <i>Natural Fire Safety Concept</i>                                                    |
| PSO   | Otimização por Enxame de Partículas ( <i>Particle Swarm Optimization</i> )            |
| RBDO  | Otimização Baseado em Confiabilidade ( <i>Reliability Based Design Optimization</i> ) |
| TRF   | Tempo de Resistência ao fogo                                                          |
| TRRF  | Tempo Requerido de Resistência ao fogo                                                |

## LISTA DE SÍMBOLOS

|                     |                                                                                   |
|---------------------|-----------------------------------------------------------------------------------|
| $M_{R,fi}$          | Momento resistente de cálculo em situação de incêndio                             |
| $\beta$             | Índice de confiabilidade                                                          |
| $\beta_{t,fi}$      | Índice de confiabilidade alvo em situação de incêndio                             |
| $\theta_g$          | Temperatura dos gases no ambiente em chamas                                       |
| $t$                 | Tempo                                                                             |
| $\theta_{g,0}$      | Temperatura dos gases no instante de tempo zero                                   |
| $f_{ck}$            | Resistência à compressão característica do concreto                               |
| $f_{ck,\theta}$     | Resistência à compressão característica do concreto em função da temperatura      |
| $\theta$            | Temperatura                                                                       |
| $k_{c,\theta}$      | Coefficiente redutor de resistência do concreto em função da temperatura          |
| $c_p(\theta)$       | Calor específico do concreto em função da temperatura                             |
| $u$                 | Umidade                                                                           |
| $c_{p,top}$         | Calor específico constante do concreto                                            |
| $\theta_c$          | Temperatura do concreto                                                           |
| $\lambda$           | Condutividade térmica do concreto                                                 |
| $\rho(\theta)$      | Massa específica do concreto em função da temperatura                             |
| $f_{yk,\theta}$     | Resistência característica ao escoamento do aço em função da temperatura          |
| $k_{s,\theta}$      | Fator de redução da resistência do aço em função da temperatura                   |
| $f_{yk}$            | Resistência característica ao escoamento do aço em temperatura ambiente           |
| $\varepsilon_{y,i}$ | Deformação de escoamento do aço                                                   |
| $\theta_w$          | Temperatura na superfície do concreto                                             |
| $n_w$               | Fator que relaciona a temperatura dos gases à temperatura da superfície           |
| $\theta_{c,xy}$     | Temperatura coordenada no interior do concreto                                    |
| $x$                 | Coordenada do eixo cartesiano x                                                   |
| $y$                 | Coordenada do eixo cartesiano y                                                   |
| $n_{x,y}$           | Fator que relaciona a temperatura da superfície do concreto com a em seu interior |
| $S_{d,fi}$          | Esforço solicitante de cálculo em situação de incêndio                            |
| $R_{d,fi}$          | Esforço resistente de cálculo em situação de incêndio                             |

|                  |                                                                          |
|------------------|--------------------------------------------------------------------------|
| $F_{d,fi}$       | Ação excepcional de cálculo                                              |
| $\gamma_{q,fi}$  | Coefficiente de ponderação das ações permanentes em incêndio             |
| $F_{Gi,k}$       | Ação permanente característica                                           |
| $\gamma_{q,fi}$  | Coefficiente de ponderação das ações variáveis em incêndio               |
| $F_{Q,fi}$       | Ação térmica                                                             |
| $\psi_2$         | Fator de combinação reduzido das ações variáveis                         |
| $F_{Qj,k}$       | Ação variável característica                                             |
| $M_{Sd,fi}$      | Momento solicitante de cálculo em situação de incêndio                   |
| $M_{gk}$         | Momento solicitante permanente característico                            |
| $M_{q,k}$        | Momento solicitante variável característico                              |
| $l$              | Vão de cálculo                                                           |
| $f_{cd,\theta}$  | Resistência à compressão de cálculo do concreto em função da temperatura |
| $\gamma_{c,fi}$  | Coefficiente de segurança do concreto em situação de incêndio            |
| $f_{yd,\theta}$  | Resistência de cálculo ao escoamento do aço em função da temperatura     |
| $\gamma_{s,fi}$  | Coefficiente de segurança do aço em situação de incêndio                 |
| $\alpha$         | Redutor do valor de cálculo da resistência à compressão                  |
| $Z$              | Margem de segurança                                                      |
| $R$              | Variável aleatória de resistência                                        |
| $S$              | Variável aleatória de solicitação                                        |
| $p_f$            | Probabilidade de falha                                                   |
| $F_Z(0)$         | Função densidade de probabilidade                                        |
| $\mu$            | Média                                                                    |
| $\sigma$         | Desvio padrão                                                            |
| $\Phi$           | Função de distribuição cumulativa normal padrão                          |
| $g(X)$           | Função estado limite                                                     |
| $\Omega_s$       | Domínio de segurança                                                     |
| $\Omega_f$       | Domínio de falha                                                         |
| $w$              | Peso da importância relativa                                             |
| $F_{X_i}(x)$     | Função de distribuição cumulativa de probabilidades                      |
| $x_i^*$          | Ponto de projeto                                                         |
| $\mu_{X_i}^{eq}$ | Média da distribuição normal equivalente                                 |

|                     |                                                             |
|---------------------|-------------------------------------------------------------|
| $\sigma_{x_i}^{eq}$ | Desvio padrão da distribuição normal equivalente            |
| $f_{x_i}(x)$        | Função densidade de probabilidades                          |
| $\alpha_i$          | Cosseno diretor                                             |
| $z_i^*$             | Ponto de projeto no espaço normal padronizado               |
| c.v.                | Coeficiente de variação                                     |
| $f_c$               | Variável aleatória de resistência à compressão do concreto  |
| $f_y$               | Variável aleatória de escoamento do aço                     |
| $b$                 | Variável aleatória de largura                               |
| $d$                 | Variável aleatória de altura útil                           |
| $b_n$               | Largura nominal                                             |
| $d_n$               | Altura útil nominal                                         |
| $E_{m,r}$           | Erro de modelo de resistência                               |
| $E_{m,s}$           | Erro de modelo de solicitação                               |
| $F_k$               | Esforço característico                                      |
| $p_{fi}$            | Probabilidade anual de um incêndio totalmente desenvolvido  |
| $\Psi$              | Conjunto coeficientes parciais de segurança                 |
| $r_{D0}$            | Resistência de projeto                                      |
| $r$                 | Razão de carregamento                                       |
| $A_c$               | Área de concreto                                            |
| $\varphi$           | Diâmetro estribo                                            |
| $A_s$               | Área de aço                                                 |
| $\rho$              | Taxa de armadura                                            |
| $F_{sd,fi}$         | Força resultante de cálculo na armadura                     |
| $F_{cd,fi}$         | Força resultante de cálculo no bloco de concreto comprimido |
| $h$                 | Altura da seção transversal                                 |
| $Z_{fi}$            | Braço de alavanca referente ao bloco de concreto            |
| $y_{fi}$            | Altura do bloco de concreto comprimido                      |

# 1. INTRODUÇÃO

Os incêndios em edifícios têm recebido cada vez mais atenção devido à concentração da população residencial e o rápido desenvolvimento de edifícios altos. Segundo as estatísticas, mais de 763.000 incêndios em edifícios ocorreram em 24 países somente em 2021, resultando em aproximadamente 12,5 mil mortes de civis, quase 25,7 mil civis feridos e perdas materiais significativas (ARIOZ, 2007).

De acordo com Silva (2016), uma sequência de incêndios históricos no Brasil, a partir da década de 70, causaram grande impacto social, dando início ao processo de reformulação das normas brasileiras referente às medidas de prevenção e proteção contra incêndio no país. Dentre as principais tragédias pode-se destacar o incêndio no edifício Andraus (Figura 1.1) e o incêndio no edifício Joelma (Figura 1.2), ambos em São Paulo.



**Figura 1.1 – Incêndio no edifício Andraus em 1972**

Fonte: RTB – Rescue Training Brasil. Disponível em: <<http://www.rtbrasil.com.br/site/casos-famosos/casos-famosos-edificio-andraus>>



**Figura 1.2 - Incêndio no edifício Joelma em 1974**

Fonte: O Povo. Disponível em: <<https://www.opovo.com.br/noticias/curiosidades/2021/04/12/edificio-joelma--o-predio-mais-assombrado-do-mundo-fica-no-brasil.html>>

Até o início dos anos 70, a regulamentação brasileira relativa ao tema de prevenção e proteção contra incêndio era contida nos códigos de obras dos municípios, e se limitava acerca de recomendações de largura de saídas de emergência em edificações. O Corpo de Bombeiros possuía uma regulamentação, proveniente da área de seguros, onde indicava a obrigatoriedade do combate ao incêndio com hidrantes e extintores, e a correta sinalização destes. A Associação Brasileira de Normas Técnicas (ABNT) possuía apenas normas relacionadas à produção de extintores de incêndio (SILVA, 2016).

No que diz respeito à segurança estrutural contra incêndio, de acordo com Bacarji (1993), pesquisas relacionadas ao assunto foram desenvolvidas a partir da publicação da Norma Brasileira 503 (NB, 1977): Exigências particulares das obras de concreto armado e protendido em relação à resistência ao fogo, onde iniciou-se a recomendação de condições de segurança que devem ser atendidas pelos elementos estruturais que integram as edificações, para que, em situação de incêndio, seja evitado o colapso estrutural por tempo suficiente para possibilitar a saída segura das pessoas e o acesso para as operações do Corpo de Bombeiros.

Somente em 2004, a publicação da NBR 15200 (ABNT, 2012) trouxe as exigências para o projeto de estruturas de concreto armado, requerendo o uso de métodos de cálculo apropriados para avaliar a capacidade resistente das estruturas em função do Tempo Requerido de Resistência ao Fogo (TRRF) exigido pela NBR 14432 (ABNT, 2001).

De acordo com Santos *et al.* (2014), a NBR 15200 (ABNT, 2012), assim como as demais normas brasileiras para o projeto de estruturas, é formulada com base no Método dos Estados Limites. Incertezas inerentes à estrutura, às ações e à resistência dos materiais são consideradas indiretamente por meio do uso de coeficientes parciais de ponderação que devem garantir a segurança adequada para a estrutura. Hoje em dia, é reconhecido que a forma mais racional de avaliar a segurança de uma estrutura é avaliando-a probabilisticamente.

No início dos anos 70 foi criado um comitê formado por profissionais de países de todo o mundo com vista a desenvolver pesquisas na área de confiabilidade e segurança estrutural, o JCSS – *Joint Committe on Structural Safety* (2001). Os estudos realizados por este grupo permitiram que, nos anos 80, as normas americanas de estruturas fossem as primeiras a terem os coeficientes parciais de segurança calibrados com base nas publicações de dados estatísticos de carregamentos, bem como de combinações de ações apresentados por Ellingwood *et al.* (1980).

De acordo com Beck (2022), a confiabilidade estrutural é uma medida do grau de confiança em que uma estrutura ou sistema estrutural atenda aos requisitos técnicos de projeto

(função, resistência, equilíbrio), dentro de uma vida de projeto especificada, respeitadas as condições de operação e de projeto. Este grau de confiança reflete os modelos físicos, matemáticos e de engenharia utilizados no cálculo, bem como os modelos estatísticos utilizados na quantificação das incertezas.

Conforme Coelho (2018), projetar estruturas em situação de incêndio é uma das tarefas mais difíceis enfrentadas pelos engenheiros. Isto ocorre, principalmente, porque as metodologias de projeto baseiam-se, predominantemente, em estudos empíricos sobre o comportamento do fogo e as respostas estruturais associadas. Considerando-se as várias incertezas pertinentes ao problema (propriedades mecânicas dos materiais à temperatura elevada, dimensões, modelos matemáticos empregados, etc.), torna-se evidente que a confiabilidade de estruturas de concreto armado em situação de incêndio deve ser investigada.

## **1.1. MOTIVAÇÃO**

Atualmente, conforme Legislação específica e vigente, para obtenção do Alvará de Prevenção e Proteção Contra Incêndio (APPCI) de edificações existentes, há a necessidade de elaboração de um Laudo Estrutural de Resistência ao Fogo, onde seja comprovado que o Tempo de Resistência ao Fogo (TRF) da estrutura seja superior ao Tempo Requerido de Resistência ao Fogo (TRRF).

Ao se deparar com este problema, diversos profissionais da área encontram estruturas que, ao serem verificadas através do método tabular presente na NBR 15200 (ABNT, 2012), não atendem a este quesito, fazendo-se necessário uma análise mais apurada para a verificação da segurança estrutural em situação de incêndio.

Assim sendo, pensou-se em, além de apresentar um modelo numérico baseado no Método dos Elementos Finitos de verificação da resistência ao fogo de vigas de concreto em situação de incêndio, propor a calibração dos coeficientes parciais de segurança exigidos nas normas brasileiras para combinação última excepcional de ações, para que, desta forma, seja possível considerar um carregamento nominal solicitante que forneça uma confiabilidade mais uniforme na verificação em situação de incêndio.

## **1.2. JUSTIFICATIVA**

Devido aos altos custos de equipamentos e materiais envolvidos em ensaios experimentais, busca-se cada vez mais, através da análise numérica, modelos computacionais

capazes de representar de forma satisfatória e, com maior economia de recursos e rapidez, o comportamento das estruturas em elevadas temperaturas.

O dimensionamento de elementos estruturais expostos ao fogo é bastante complexo porque tanto uma análise térmica quanto uma estrutural devem ser realizadas. As suposições e aproximações usadas em análises térmicas adicionam mais incerteza ao projeto, por isso, a determinação da capacidade resistente e dos coeficientes parciais de segurança para projetos em situação de incêndio devem ser baseados em uma análise de confiabilidade rigorosa, com o objetivo de incluir as incertezas associadas aos parâmetros de projeto.

Devido à natureza imprevisível dos incêndios e às várias incertezas pertinentes ao problema (propriedades mecânicas dos materiais submetidos às temperaturas elevadas, dimensões, modelos matemáticos empregados, etc.), a confiabilidade de elementos estruturais de concreto armado em situação de incêndio deve ser investigada através de uma análise probabilística que envolva as variáveis aleatórias de resistência e solicitação presentes na função falha da estrutura.

Desta forma, tem-se como proposição investigativa deste trabalho, a análise de estruturas de concreto armado em situação de incêndio baseada em confiabilidade estrutural, a fim de propor a calibração dos coeficientes parciais de segurança atualmente empregados nas normas brasileiras de projeto.

### **1.3. OBJETIVOS**

Os objetivos deste trabalho podem ser discriminados em geral e específicos.

#### **1.3.1. Objetivo Geral**

Avaliar numericamente o nível de segurança da norma brasileira de projeto de estruturas de concreto armado em situação de incêndio através de uma análise probabilística de confiabilidade e propor a calibração dos coeficientes parciais de segurança referente à combinação última excepcional de ações, a fim de obter maior uniformidade nos índices de confiabilidade das estruturas.

#### **1.3.2. Objetivos específicos**

- I. Realizar a análise térmica bidimensional com base no Método dos Elementos Finitos (MEF), implementada através do software *ANSYS Mechanical APDL*, para determinar a distribuição de temperaturas na seção transversal de um grupo de vigas usuais de edifícios residenciais submetidas à ação da curva de incêndio padrão ISO 834 (1999);

- II. Determinar a capacidade resistente das estruturas em análise através de um método simplificado de verificação das estruturas de concreto armado em situação de incêndio, conforme NBR 15200 (ABNT, 2012);
- III. Realizar a verificação do modelo de ação do incêndio: verificação das temperaturas na face e no interior da seção transversal do elemento de concreto e verificação do momento resistente de cálculo em situação de incêndio ( $M_{R,fi}$ );
- IV. Investigar estatisticamente as variáveis aleatórias básicas de resistências e de solicitações presentes na função de falha do elemento estrutural e realizar a análise de confiabilidade em nível 3 através do *First Order Reliability Method* (FORM) dos elementos estruturais no Estado Limite Último (ELU) de flexão para determinar os índices de confiabilidade ( $\beta$ ) atingidos na verificação das vigas em situação de incêndio, considerando variados pontos de calibração propostos através de uma análise paramétrica das estruturas;
- V. Determinar o índice de confiabilidade alvo ( $\beta_{t,fi}$ ) com base nos valores obtidos nas análises de confiabilidade realizadas na etapa anterior e valores sugeridos na literatura;
- VI. Propor a calibração dos coeficientes parciais de segurança referentes à combinação última excepcional de ações através do algoritmo heurístico *Particle Swarm Optimization* (PSO), em busca de valores que reflitam a realidade das obras brasileiras e que minimizem a diferença entre os índices de confiabilidade individuais ( $\beta$ ) e o índice de confiabilidade alvo ( $\beta_{t,fi}$ ) para os diferentes pontos de calibração.

## 2. REVISÃO DA LITERATURA

Nesse capítulo será apresentada a fundamentação teórica com os conceitos utilizados para o aprofundamento do tema proposto. Posteriormente apresenta-se o Estado da Arte elaborado através de uma pesquisa científica, de natureza exclusivamente bibliográfica, de outros trabalhos científicos publicados sobre o tema em estudo.

### 2.1. FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

A seguir apresenta-se a fundamentação teórica presente na bibliografia especializada da área, abordando os principais conceitos e métodos utilizados no presente estudo.

#### 2.1.1 Incêndio real

Segundo Silva (2016), o fogo gera uma ação térmica na estrutura descrita por meio de um fluxo de calor, por radiação e por convecção, provocado pela diferença de temperaturas entre os gases quentes do ambiente em chamas e os componentes da estrutura. Logo, a principal característica de um incêndio, no que concerne ao estudo das estruturas, é a curva que fornece a temperatura média dos gases quentes em função do tempo de incêndio, conforme Figura 2.1.

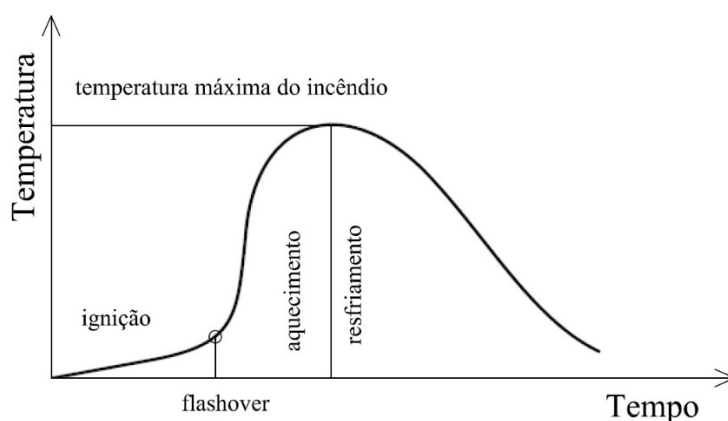


**Figura 2.1 - Curva incêndio real**

Fonte: elaborada pela autora

Conforme Costa e Silva (2006), na curva da Figura 2.1 é possível visualizar a fase inicial de ignição do incêndio com baixas temperaturas, também chamada de *pré-flashover*, na qual o incêndio é considerado de pequenas proporções, sem riscos à vida humana e à estrutura. Caso o incêndio não seja extinto nessa fase, haverá o aumento brusco da temperatura a partir do instante conhecido com *flashover*, ou instante de inflamação generalizada, que ocorre quando a superfície de toda a carga combustível presente no ambiente entra em ignição. O incêndio

assume grandes proporções, tomando todo o compartimento, e a temperatura dos gases eleva-se rapidamente até todo o material combustível extinguir-se, e então há a redução gradativa da temperatura dos gases.

Em incêndios reais, a evacuação dos ocupantes da edificação deve ocorrer antes do *flashover*, pois pode ser razoavelmente presumido que, após o *flashover*, todos os ocupantes restantes morrerão (BUCHANAN E ABU, 2016).

Segundo Martins (2000), ensaios experimentais realizados em áreas compartimentadas procuram simular a real situação de um ambiente em chamas, e demonstraram que a elevação da temperatura dos gases depende da carga de incêndio, grau de ventilação, características físico-térmicas dos materiais componentes da vedação, entre outros, ou seja, cada compartimento de cada edificação deveria ser projetado para uma curva de temperatura média dos gases quentes em função do tempo de incêndio diferente.

De acordo com Coile (2015), a evolução do incêndio após o *flashover* foi codificado em um conjunto de curvas padrões de incêndio. Essas curvas de incêndio padrão fixam a temperatura dos gases no compartimento em função do tempo de exposição ao fogo, e são usadas para testes de fogo padronizados de elementos estruturais de acordo com as normas europeias. Para fins de modelagem, a distribuição de temperatura no elemento estrutural exposto ao fogo padrão é derivada da temperatura dos gases, integrando as equações diferenciais para a transferência de calor (radiação, convecção e condução).

### **2.1.2 Incêndio padrão**

Ao projetar uma estrutura para resistir à exposição ao fogo, muitas vezes é necessário selecionar um incêndio de projeto. Métodos alternativos de obtenção de incêndios de projeto incluem cálculos manuais, curvas publicadas ou equações de fogo paramétricas. As curvas padronizadas publicadas na literatura são representadas por equações e aplicadas a qualquer compartimento, com o intuito de representar a evolução real do fogo a partir da fase de inflamação generalizada e facilitar o projeto de estruturas (BUCHANAN E ABU, 2016).

A característica principal das curvas padronizadas é a de possuir apenas um ramo ascendente, admitindo que a temperatura dos gases é sempre crescente com o tempo e, além disso, independente das características do ambiente e da carga de incêndio. A favor da segurança, é usual admitir-se que a temperatura do ambiente em chamas atinge seu valor máximo, e a estrutura deve ser verificada para tal situação (SILVA, 2016).

As normas brasileiras NBR 14432 (ABNT, 2001) e NBR 5628 (ABNT, 2001) recomendam a Equação (2.1) para elevação da temperatura em função do tempo, com base na ISO 834 (1999):

$$\theta_g = 345 \log_{10}(8t + 1) + \theta_{g,0} \quad (2.1)$$

onde  $\theta_g$  é a temperatura dos gases no ambiente em chamas (°C);  $\theta_{g,0}$  é a temperatura dos gases no instante  $t = 0$ , geralmente admitida como 20°C; e  $t$  é o tempo (min).

A partir da Equação (2.1) pode-se construir a Figura 2.2:

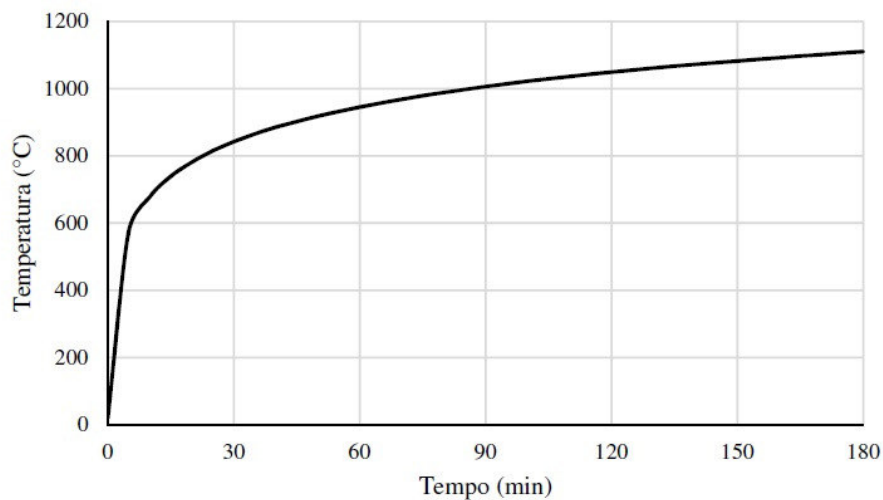


**Figura 2.2 - Curva-padrão tempo x temperatura ISO 834**

Fonte: elaborada pela autora

A curva ISO 834 (1999) é o resultado da uniformização de duas curvas padrão tradicionais: a americana ASTM E-119 (1918) e a britânica BS 476 (1932), ambas similares e de mesma origem. Esta curva é usada em diversos países para simular o processo térmico normalizado ao qual são sujeitos os elementos ou sistemas de construção durante ensaios, sendo utilizada também na avaliação dos materiais segundo classes de resistência ao fogo (COSTA, 2008).

### 2.1.3 Propriedades dos materiais em situação de incêndio

De acordo com Ferreira (2019), quando uma estrutura de concreto armado é exposta a um incêndio, as temperaturas do concreto e do aço aumentam conforme a temperatura dos gases a que são submetidos por ação do fogo. Com o aumento da temperatura, observa-se uma variação nas propriedades mecânicas e térmicas destes materiais, as resistências tanto à compressão quanto à tração diminuem, bem como a rigidez do material.

Conforme Tariq (2021), a resistência à tração da armadura diminui muito quando ela é submetida à temperatura de 600 °C, e a resistência à compressão do concreto é de apenas 10% da temperatura ambiente quando a temperatura exposta é de até 900 °C.

A seguir, serão apresentadas as variações com a temperatura das principais propriedades mecânicas e térmicas do concreto e do aço consideradas neste estudo.

### **2.1.3.1 Concreto**

As informações deste item são válidas para concretos com resistência característica à compressão do grupo I, de acordo com a NBR 6118 (ABNT, 2023), ou seja,  $f_{ck}$  menor ou igual a 50 MPa.

#### **a) Resistência à compressão do concreto**

A redução desta propriedade em função do aumento da temperatura pode ser estimada, conforme preconizado pela NBR 15200 (ABNT, 2012), através de um coeficiente redutor ( $k_{c,\theta}$ ) de acordo com a Equação (2.2):

$$f_{ck,\theta} = k_{c,\theta} * f_{ck} \quad (2.2)$$

onde  $f_{ck,\theta}$  é a resistência característica à compressão do concreto em função da temperatura  $\theta$  (MPa);  $k_{c,\theta}$  é o coeficiente redutor (adimensional) e  $f_{ck}$  é a resistência característica à compressão do concreto à temperatura ambiente (MPa).

O coeficiente redutor mencionado acima também é um valor tabelado que varia em conformidade com o tipo de agregado presente no concreto e com o aumento da temperatura. A NBR 15200 (ABNT, 2012) especifica apenas os coeficientes para concretos preparados predominantemente com agregados silicosos e com massa específica entre 2000 kg/m<sup>3</sup> e 2800 kg/m<sup>3</sup>, indicando o uso da norma europeia EN 1992-1-2 (2004) caso o material em análise não esteja em conformidade com estes limitantes.

Os valores dos coeficientes redutores da resistência dos concretos silicosos e calcário são apresentados na Figura 2.3 e na Tabela 2.1. Para valores em temperaturas intermediárias, basta interpolar linearmente os respectivos valores.

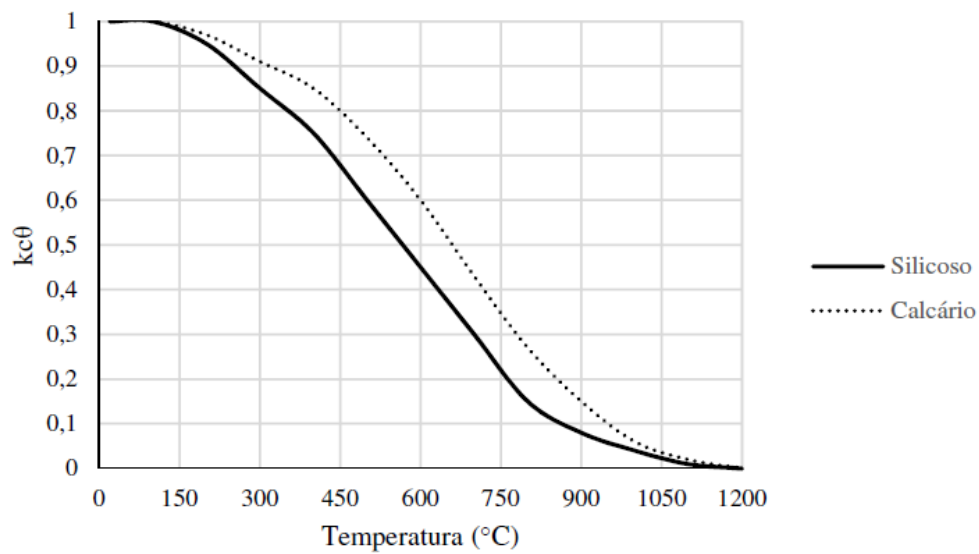


**Figura 2.3 - Fator redutor da resistência dos concretos em função da temperatura**  
 Fonte: elaborada pela autora

**Tabela 2.1 - Valores do fator redutor da resistência à compressão do concreto**

| Temperatura do concreto °C | NBR 15200 (2012)<br>kc,θ | EN 1992-1-2 (2004)<br>kc,θ |
|----------------------------|--------------------------|----------------------------|
| 20                         | 1,00                     | 1,00                       |
| 100                        | 1,00                     | 1,00                       |
| 200                        | 0,95                     | 0,97                       |
| 300                        | 0,85                     | 0,91                       |
| 400                        | 0,75                     | 0,85                       |
| 500                        | 0,60                     | 0,74                       |
| 600                        | 0,45                     | 0,60                       |
| 700                        | 0,30                     | 0,43                       |
| 800                        | 0,15                     | 0,27                       |
| 900                        | 0,08                     | 0,15                       |
| 1000                       | 0,04                     | 0,06                       |
| 1100                       | 0,01                     | 0,02                       |
| 1200                       | 0,00                     | 0,00                       |

#### b) Calor específico do concreto

Conforme a NBR 15200 (ABNT, 2012), o calor específico  $c_p(\theta)$  do concreto seco ( $u = 0\%$ ) silicoso ou calcário pode ser determinado pela Equação (2.3):

$$\begin{aligned}
 c_p(\theta) &= 900 \left( \frac{J}{kg} ^\circ C \right) \text{ para } 20^\circ C \leq \theta \leq 100^\circ C \\
 c_p(\theta) &= 900 + (\theta - 100) \left( \frac{J}{kg} ^\circ C \right) \text{ para } 100^\circ C < \theta \leq 200^\circ C \\
 c_p(\theta) &= 1000 + \frac{\theta - 200}{2} \left( \frac{J}{kg} ^\circ C \right) \text{ para } 200^\circ C < \theta \leq 400^\circ C
 \end{aligned} \tag{2.3}$$

$$c_p(\theta) = 1100 \left( \frac{J}{kg} ^\circ C \right) \text{ para } 400^\circ C < \theta \leq 1200^\circ C$$

Quando a umidade não for considerada explicitamente no método de cálculo, a função do calor específico do concreto silicoso ou calcário pode ser modelada por um valor constante  $c_{p,top}$  situado entre  $100^\circ C$  e  $115^\circ C$  com decréscimo linear entre  $115^\circ C$  e  $200^\circ C$ , sendo:

- $c_{p,top} = 900 \left( \frac{J}{kg} ^\circ C \right)$  para umidade de 0% em peso;
- $c_{p,top} = 1470 \left( \frac{J}{kg} ^\circ C \right)$  para umidade de 1,5% em peso;
- $c_{p,top} = 2020 \left( \frac{J}{kg} ^\circ C \right)$  para umidade de 3% em peso.

De forma simplificada, a relação entre o calor específico do concreto e a temperatura pode ser considerada constante. Nesse caso, pode ser considerada igual a  $1000 \left( \frac{J}{kg} ^\circ C \right)$ .

A variação do calor específico do concreto com a temperatura pode ser vista na Figura 2.4.

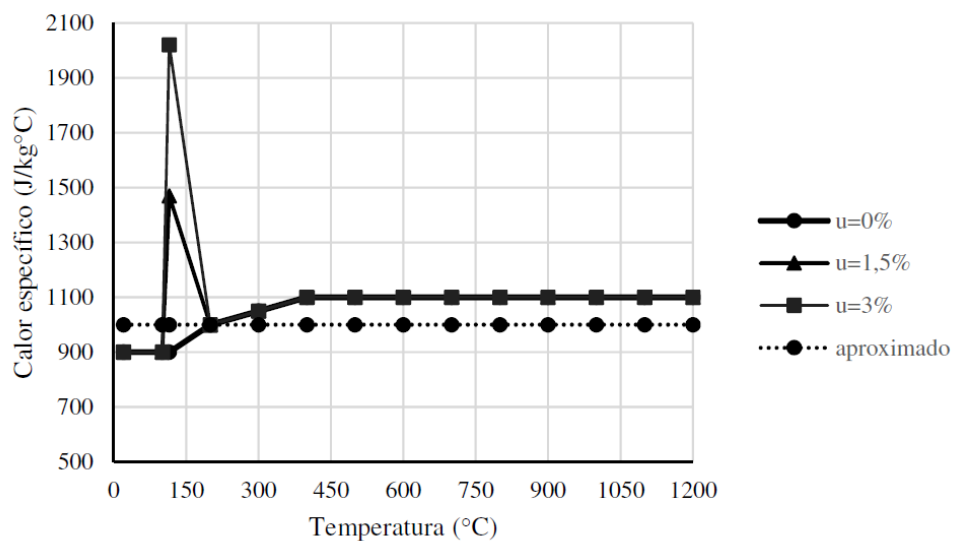


**Figura 2.4 - Calor específico do concreto**

Fonte: elaborada pela autora

### c) Condutividade térmica do concreto

Conforme Buchanan e Abu (2016), as estruturas de concreto em situação de incêndio apresentam um bom comportamento. O concreto é incombustível e possui baixa condutividade térmica. A pasta de cimento no concreto sofre uma reação endotérmica quando aquecida, que auxilia na redução do aumento de temperatura no concreto exposto ao fogo.

A condutividade térmica do concreto de densidade normal com agregado silicoso ou calcário pode ser determinada, para  $20^{\circ}\text{C} \leq \theta_c \leq 1200^{\circ}\text{C}$  pela Equação (2.4), conforme a NBR 15200 (ABNT, 2012):

$$\lambda = 1,36 - 0,136 \frac{\theta_c}{100} + 0,0057 \left( \frac{\theta_c}{100} \right)^2 \quad (2.4)$$

onde  $\theta_c$  é a temperatura do concreto ( $^{\circ}\text{C}$ ).

Ainda conforme a NBR 15200 (ABNT, 2012), de forma simplificada, a relação entre a condutividade térmica do concreto e a temperatura pode ser considerada constante. Neste caso pode ser considerada igual a  $1,3 \text{ W/m}^2\text{C}$ . A variação da condutividade do concreto com a temperatura pode ser vista na Figura 2.5.

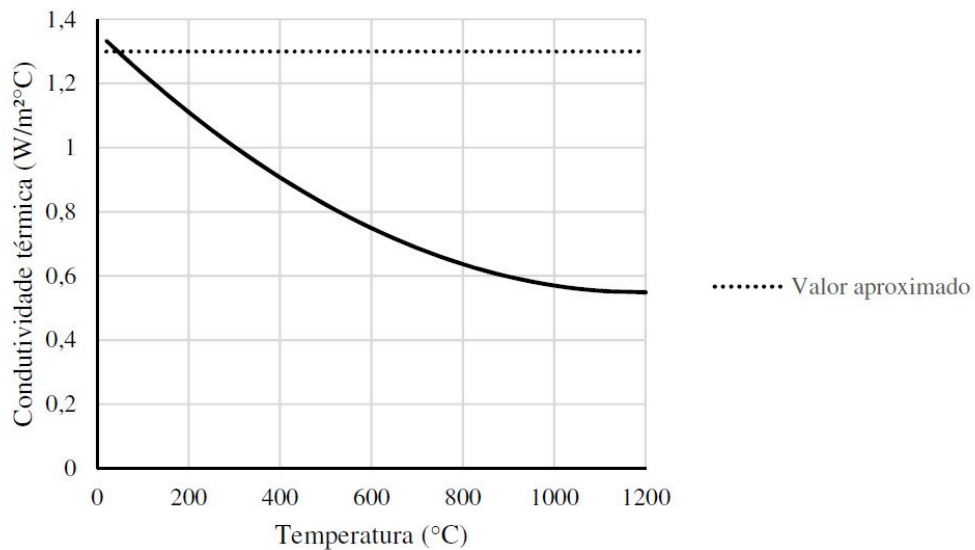


**Figura 2.5 - Condutividade térmica do concreto**

Fonte: elaborada pela autora

#### **d) Massa específica do concreto**

Conforme a NBR 15200 (ABNT, 2012), a variação da densidade (massa específica) com a temperatura é influenciada pela perda de água e pode ser determinada conforme a Equação (2.5):

$$\begin{aligned} \rho(\theta) &= \rho(20^{\circ}\text{C}) \text{ para } 20^{\circ}\text{C} \leq \theta \leq 115^{\circ}\text{C} \\ \rho(\theta) &= \rho(20^{\circ}\text{C}) * \left( 1 - \frac{0,02(\theta - 115)}{85} \right) \text{ para } 115^{\circ}\text{C} < \theta \leq 200^{\circ}\text{C} \\ \rho(\theta) &= \rho(20^{\circ}\text{C}) * \left( 0,98 - \frac{0,03(\theta - 200)}{200} \right) \text{ para } 200^{\circ}\text{C} < \theta \leq 400^{\circ}\text{C} \end{aligned} \quad (2.5)$$

$$\rho(\theta) = \rho(20^{\circ}\text{C}) * \left( 0,95 - \frac{0,07(\theta - 400)}{800} \right) \text{ para } 500^{\circ}\text{C} < \theta \leq 1200^{\circ}\text{C}$$

A variação da densidade do concreto com a temperatura pode ser vista na Figura 2.6.

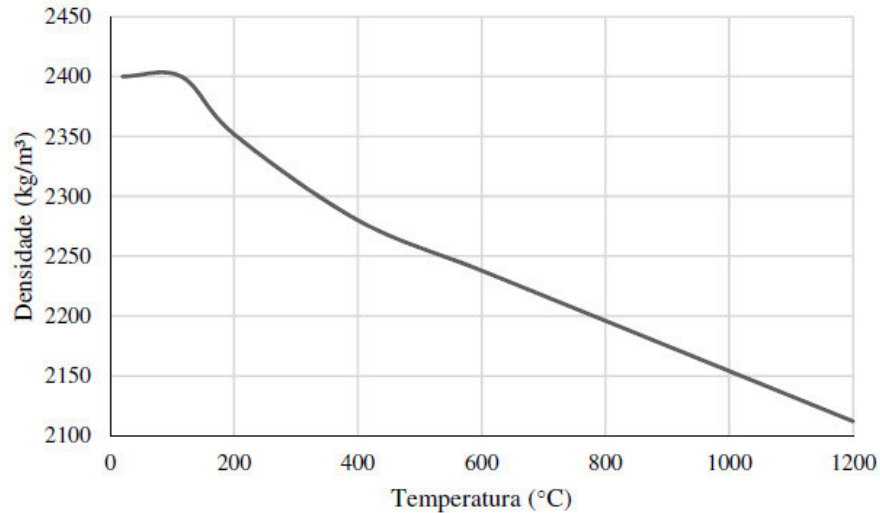


**Figura 2.6 - Densidade do concreto**

Fonte: elaborada pela autora

### 2.1.3.2 Aço

As informações deste item são conforme especificações da NBR 15200 (ABNT, 2012) e são válidas para armaduras passivas em estruturas de concreto armado, ou seja, qualquer armadura que não seja usada para produzir forças de protensão, isto é, que não seja previamente alongada.

#### a) Resistência ao escoamento do aço

A resistência ao escoamento do aço decresce com o aumento da temperatura, conforme mostrado na Figura 2.7, podendo ser obtida pela Equação (2.6):

$$f_{yk,\theta} = k_{s,\theta} f_{yk} \quad (2.6)$$

onde  $f_{yk}$  é a resistência característica do aço de armadura passiva em temperatura ambiente (MPa);  $k_{s,\theta}$  é o fator de redução da resistência do aço na temperatura  $\theta$ , conforme Tabela 2.2, sendo:

- curva cheia:  $k_{s,\theta}$  aplicável quando  $\varepsilon_{y,i} \geq 2\%$ , usualmente armaduras tracionadas de vigas, lajes ou tirantes;
- curva tracejada:  $k_{s,\theta}$  aplicável quando  $\varepsilon_{y,i} < 2\%$ , usualmente armaduras comprimidas de pilares, vigas ou lajes.

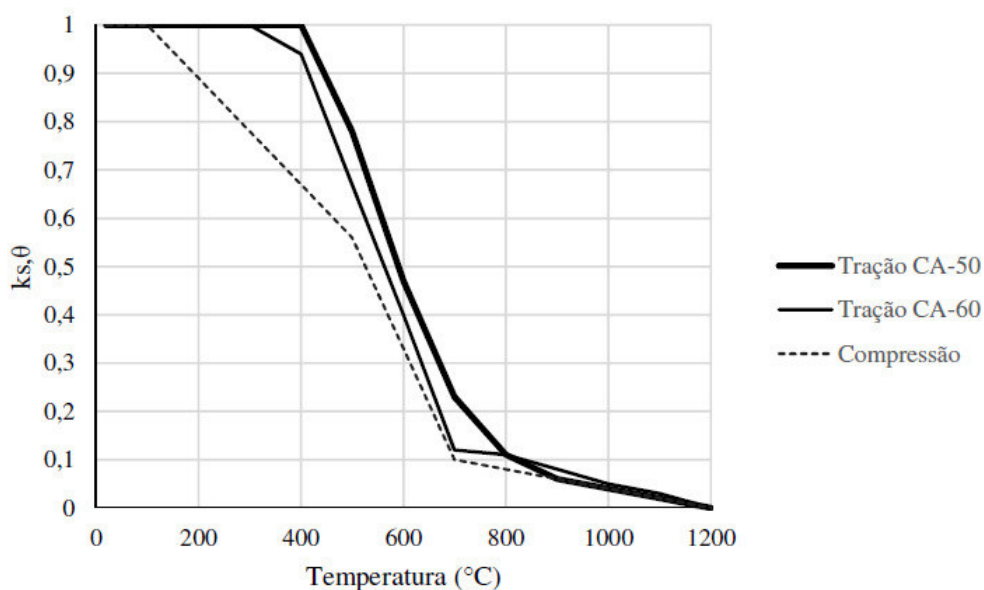


**Figura 2.7 - Fator de redução da resistência do aço de armadura passiva em função da temperatura**

Fonte: elaborada pela autora

**Tabela 2.2 - Valores das relações  $k_s$  e  $k_E$  para aços de armadura passiva**

| Temperatura do aço °C | $k_{s,\theta}$ |       |                              |
|-----------------------|----------------|-------|------------------------------|
|                       | Tração         |       | Compressão<br>CA-50 ou CA-60 |
|                       | CA-50          | CA-60 |                              |
| 20                    | 1,00           | 1,00  | 1,00                         |
| 100                   | 1,00           | 1,00  | 1,00                         |
| 200                   | 1,00           | 1,00  | 0,89                         |
| 300                   | 1,00           | 1,00  | 0,78                         |
| 400                   | 1,00           | 0,94  | 0,67                         |
| 500                   | 0,78           | 0,67  | 0,56                         |
| 600                   | 0,47           | 0,40  | 0,33                         |
| 700                   | 0,23           | 0,12  | 0,10                         |
| 800                   | 0,11           | 0,11  | 0,08                         |
| 900                   | 0,06           | 0,08  | 0,06                         |
| 1000                  | 0,04           | 0,05  | 0,04                         |
| 1100                  | 0,02           | 0,03  | 0,02                         |
| 1200                  | 0,00           | 0,00  | 0,00                         |

#### 2.1.4 Análise térmica em estruturas de concreto armado

A análise térmica de um elemento estrutural em situação de incêndio consiste em determinar a variação da temperatura na seção transversal de interesse a partir das condições de contorno provenientes do incêndio de projeto adotado. Segundo a NBR 15200 (ABNT, 2012), essa distribuição de temperatura pode ser obtida de forma analítica conforme orientações

contidas na literatura técnica ou através da modelagem em programas de computador específicos.

#### **2.1.4.1 Métodos analíticos para a determinação dos perfis de temperatura**

Dentre os métodos disponíveis na literatura, Wickström (1986) propôs um método empírico, para elementos simples de concreto de peso normal, baseado em técnicas de ajuste de curva a partir de dados derivados de testes experimentais e análises térmicas computacionais, onde é possível determinar a temperatura de uma estrutura de concreto, sujeita à ação do fogo padrão ISO 834.

Conforme o Método de Wickström, a temperatura na superfície do concreto pode ser calculada pela Equação (2.7):

$$\theta_w = n_w \theta_g \quad (2.7)$$

onde  $\theta_w$  é a temperatura na superfície do concreto ( $^{\circ}\text{C}$ );  $\theta_g$  é a temperatura do incêndio padrão ISO 834, conforme Equação (2.1) ( $^{\circ}\text{C}$ ) e  $n_w$  é o fator que relaciona a temperatura dos gases à temperatura da superfície (adimensional), dado pela Equação (2.8):

$$n_w = 1 - 0,0616t^{-0,88} \quad (2.8)$$

onde  $t$  é o tempo em horas.

Wickström (1986) também propôs fórmulas para determinar as temperaturas no interior de vigas, considerando a transferência de calor bidimensional, conforme a Equação (2.9):

$$\theta_{c,xy} = [n_w(n_x + n_y - 2n_x n_y) + n_x n_y] \theta_g \quad (2.9)$$

onde  $\theta_{c,xy}$  é a temperatura no interior do concreto, considerando transferência de calor bidimensional, em uma profundidade com coordenadas  $x$  e  $y$  ( $^{\circ}\text{C}$ );  $n_x$  é o fator que relaciona a temperatura da superfície do concreto com a temperatura em seu interior (adimensional), considerando uma profundidade  $x$  em metros, no sentido horizontal da seção, dado pela Equação (2.10),  $n_y$  é o fator que relaciona a temperatura da superfície do concreto com a temperatura em seu interior (adimensional), considerando uma profundidade  $y$  em metros, no sentido vertical da seção, calculado de forma análoga ao  $n_x$ , conforme Equação (2.11):

$$n_x = 0,18 \ln \left( \frac{t}{x^2} \right) - 0,81 \quad (2.10)$$

$$n_y = 0,18 \ln \left( \frac{t}{y^2} \right) - 0,81 \quad (2.11)$$

Assim, a temperatura no interior de uma viga pode ser calculada em função, apenas, das coordenadas  $x$  e  $y$  do interior da viga e do tempo de incêndio padrão ISO 834.

#### **2.1.4.2 Métodos computacionais para a determinação dos perfis de temperatura**

Existem atualmente no mercado diversos programas capazes de realizar análises termoestruturais, alguns específicos para este tipo de análise e outros genéricos. De acordo com Buchanann (2016), dentre os pacotes computacionais genéricos mais comuns, estão *ABAQUS*, *ANSYS* e *DIANA*. Estes *softwares* não foram desenvolvidos exclusivamente para análise de estruturas em situação de incêndio, mas eles permitem atribuir as mais diversas propriedades dos materiais em análise e isto possibilita a criação adequada dos modelos para tal finalidade. Os programas são capazes de realizar tanto a análise estrutural quanto térmica e alguns ainda permitem esta análise de maneira acoplada (termoestrutural).

De acordo com Lin *et al.* (2020), a análise térmica computacional baseada no Método dos Elementos Finitos (MEF) começa pela definição da geometria da seção transversal a ser analisada, que é então discretizada em segmentos menores. Os segmentos formam a malha de elementos finitos usados na análise. As temperaturas são calculadas nos cantos desses elementos, que são chamados de nós. Dependendo da sofisticação do software, a definição de nós e elementos finitos pode ser feita automaticamente através de uma interface gráfica pelo usuário ou através um arquivo de texto de entrada. A temperatura de um elemento finito é uma média das temperaturas em seus nós. Assim, melhores aproximações da temperatura em qualquer local de um elemento estrutural são obtidas com malhas mais refinadas.

Para proceder com esta pesquisa, adotou-se como principal ferramenta de análise térmica o *software ANSYS Mechanical*. De acordo com o *ANSYS Mechanical APDL Thermal Analysis Guide* (2013), o *software* considera os efeitos da condução, convecção e radiação na transferência de calor do modelo, assim como a análise térmica transiente da estrutura, objeto de interesse do presente estudo.

#### **2.1.5 Verificação das estruturas de concreto armado em situação de incêndio**

Conforme relatado anteriormente e, de acordo com Coelho (2018), o concreto armado perde gradualmente suas propriedades mecânicas e térmicas sob temperaturas elevadas, sendo necessário assegurar que os elementos estruturais, projetados à temperatura ambiente, possuam uma capacidade resistente reduzida, devido à ação do fogo, suficiente para suportar as cargas aplicadas durante o período projetado de exposição ao fogo, ou seja, durante o Tempo Requerido de Resistência do Fogo (TRRF).

No Brasil, basicamente cinco normas compõe o acervo técnico sobre verificação de estruturas de concreto armado em situação de incêndio:

- NBR 8681 (ABNT, 2004) – Ações e segurança nas estruturas: estabelece os fatores parciais de segurança, em função do tipo de combinação e estrutura analisada;
- NBR 6120 (ABNT, 2019) – Cargas para o cálculo de estruturas de edificações: estabelece as cargas a serem utilizadas no cálculo de estruturas, em função dos materiais utilizados;
- NBR 6118 (ABNT, 2023) – Projeto de estruturas de concreto: estabelece os requisitos básicos exigíveis para projeto de estruturas de concreto;
- NBR 14432 (ABNT, 2001) – Exigências de resistência ao fogo de elementos construtivos de edificações: estabelece as condições a serem atendidas pelos elementos estruturais e de compartimentação que integram os edifícios para que, em situação de incêndio, seja evitado o colapso estrutural;
- NBR 15200 (ABNT, 2012) – Projeto de estruturas de concreto em situação de incêndio: estabelece os critérios de projeto de estruturas de concreto em situação de incêndio.

De acordo com a NBR 15200 (ABNT, 2012), o projeto de estruturas de concreto em situação de incêndio tem por base a correlação entre o comportamento dos materiais e da estrutura à temperatura ambiente (considerada próxima a 20°C) com o que ocorre em situação de incêndio.

#### ***2.1.5.1 Tempo requerido de resistência ao fogo (TRRF)***

Conforme Rodrigues e Oliveira (2021), a primeira etapa de verificação de uma estrutura em situação de incêndio é a determinação do TRRF, que é o tempo mínimo de resistência ao fogo de um elemento construtivo quando sujeito ao incêndio padrão. O TRRF depende da altura da edificação, do tipo de uso e ocupação, da existência de sistemas de proteção ativa e da presença de aberturas laterais, entre outros parâmetros. Ele é dado em minutos e cresce à medida que o risco à vida e a dificuldade de evacuação aumentam, variando de 30 min a 120 min, em intervalos de 30 min.

A NBR 14432 (ABNT, 2001) apresenta, em seu Anexo A, um método tabular simplificado para a determinação do TRRF em função apenas da altura e do tipo de ocupação da edificação. A norma também apresenta um método analítico para a determinação de um TRRF equivalente, que pode ser inferior ao TRRF tabelado, por levar em consideração demais características construtivas e térmicas da edificação. Neste trabalho, as estruturas serão analisadas considerando o TRRF tabelado.

### 2.1.5.2 Avaliação da segurança estrutural

De acordo as normas de projeto, em situação de incêndio, as condições de segurança são expressas conforme a Inequação (2.12):

$$S_{d,fi} \leq R_{d,fi} \quad (2.12)$$

onde  $S_{d,fi}$  é o valor de cálculo do esforço solicitante, reduzido em relação àquele utilizado à temperatura ambiente, pois é determinado a partir da combinação última excepcional das ações, conforme a NBR 8681 (ABNT, 2004) e  $R_{d,fi}$  é o valor de cálculo da capacidade resistente reduzida em função do aumento da temperatura.

Conforme Beck (2022), a verificação das estruturas de concreto armado em situação de incêndio se dá de acordo com o formato dos Estados Limites, adotado nas principais normas de projeto, de forma determinística, isto é, sem utilizar diretamente a Teoria de Confiabilidade. No contexto das normas brasileiras de projeto estrutural, são utilizados coeficientes parciais de segurança aplicados aos valores característicos de resistência e de ações.

#### a) Determinação dos esforços solicitantes em situação de incêndio

Os esforços solicitantes são determinados a partir das ações atuantes na estrutura. Essas ações ou forças podem ser classificadas em permanentes (peso próprio), variáveis (forças decorrentes de vento, sobrecargas) e variáveis excepcionais (incêndio, choques, etc.). A ação térmica tem duração extremamente curta e baixa probabilidade de ocorrer durante a vida útil de uma estrutura, podendo ser tratada como uma ação excepcional (Silva, 2016).

De acordo com a NBR 15200 (ABNT, 2012), em condições usuais, as estruturas são projetadas à temperatura ambiente e, dependendo das suas características e uso, devem ser verificadas em situação de incêndio. Essa verificação deve ser feita no Estado Limite Último (ELU) para a combinação excepcional de carregamento. A NBR 8681 (ABNT, 2004) recomenda, para combinação última excepcional de ações, a Equação (2.13):

$$F_{d,fi} = \sum_{i=1}^m \gamma_{g,fi} F_{Gi,k} + \gamma_{q,fi} F_{Q,fi} + \gamma_{q,fi} \sum_{j=1}^n \psi_2 F_{Qj,k} \quad (2.13)$$

sendo  $F_{d,fi}$  o valor de cálculo da ação na combinação excepcional;  $F_{Gi,k}$  o valor característico da ação permanente  $i$ ;  $F_{Q,fi}$  o valor representativo da ação térmica (ação excepcional);  $F_{Qj,k}$  valor característico da ação variável  $j$ ;  $\gamma_{g,fi}$  o coeficiente de ponderação das ações permanentes em incêndio conforme Tabela 2.3;  $\gamma_{q,fi}$  o coeficiente de ponderação das ações variáveis em incêndio conforme Tabela 2.4 e  $\psi_2$  o fator de combinação utilizado para determinação dos valores reduzidos das ações variáveis conforme Tabela 2.5.

A NBR 8681 (ABNT, 2004) recomenda que na situação de incêndio o valor de  $\psi_2$  seja reduzido para  $0,7\psi_2$ .

**Tabela 2.3 – Coeficientes de ponderação para ações permanentes diretas agrupadas**

| Combinação                                                                                            | Tipo de estrutura                        | Efeito       |           |
|-------------------------------------------------------------------------------------------------------|------------------------------------------|--------------|-----------|
|                                                                                                       |                                          | Desfavorável | Favorável |
| Normal                                                                                                | Grandes pontes (a)                       | 1,30         | 1,00      |
|                                                                                                       | Edificações tipo 1 e pontes em geral (b) | 1,35         | 1,00      |
|                                                                                                       | Edificações tipo 2 (c)                   | 1,40         | 1,00      |
| Especial ou de construção                                                                             | Grandes pontes (a)                       | 1,20         | 1,00      |
|                                                                                                       | Edificações tipo 1 e pontes em geral (b) | 1,25         | 1,00      |
|                                                                                                       | Edificações tipo 2 (c)                   | 1,30         | 1,00      |
| Excepcional                                                                                           | Grandes pontes (a)                       | 1,10         | 1,00      |
|                                                                                                       | Edificações tipo 1 e pontes em geral (b) | 1,15         | 1,00      |
|                                                                                                       | Edificações tipo 2 (c)                   | 1,20         | 1,00      |
| (a) Grandes pontes são aquelas em que o peso próprio da estrutura supera 75% da totalidade das ações. |                                          |              |           |
| (b) Edificações tipo 1 são aquelas onde as cargas acidentais superam 5 kN/m².                         |                                          |              |           |
| (c) Edificações tipo 2 são aquelas onde as cargas acidentais não superam 5 kN/m².                     |                                          |              |           |

**Tabela 2.4 – Coeficientes de ponderação para ações variáveis consideradas conjuntamente**

| Combinação                | Tipo de estrutura           | Coeficiente de ponderação |
|---------------------------|-----------------------------|---------------------------|
| Normal                    | Pontes e edificações tipo 1 | 1,5                       |
|                           | Edificações tipo 2          | 1,4                       |
| Especial ou de construção | Pontes e edificações tipo 1 | 1,3                       |
|                           | Edificações tipo 2          | 1,2                       |
| Excepcional               | Estruturas em geral         | 1,0                       |

**Tabela 2.5 - Fatores de combinação**

|                                                                                                                                                                                                                    |                |
|--------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----------------|
| Cargas acidentais nos edifícios                                                                                                                                                                                    | 0,7 x $\Psi_2$ |
| Locais em que não há predominância de pesos e de equipamentos que permanecem fixos por longos períodos de tempo, nem de elevadas concentrações de pessoas (Edificações residenciais, de acesso restrito)           | 0,21           |
| Locais em que há predominância de pesos e de equipamentos que permanecem fixos por longos períodos de tempo, nem de elevadas concentrações de pessoas (Edificações comerciais, de escritórios e de acesso público) | 0,28           |
| Bibliotecas, arquivos, depósitos, oficinas e garagens                                                                                                                                                              | 0,42           |
| Pressão dinâmica do vento nas estruturas em geral                                                                                                                                                                  | 0,00           |

Conforme as normas brasileiras e internacionais, os esforços adicionais decorrentes da deformação térmica ( $F_{Q,fi}$ ) podem, em geral, ser desprezados, caso se empregue a ação do incêndio padrão ISO 834.

Logo, segundo a NBR 15200 (ABNT, 2012), a verificação de vigas de concreto armado em situação de incêndio deve ser feita no ELU para a combinação excepcional de ações, e a Equação (2.13) pode ser reescrita em termos do momento solicitante de projeto, conforme Equação (2.14), sendo que os esforços decorrentes de deformações impostas, por serem muito reduzidos e pelas grandes deformações plásticas que ocorrem em situação de incêndio, são desprezados:

$$M_{Sd,fi} = \gamma_{g,fi} M_{g,k} + \gamma_{q,fi} 0,7\psi_2 M_{q,k} \quad (2.14)$$

onde  $M_{g,k}$  é o momento solicitante relativo às cargas permanentes e  $M_{q,k}$  o momento solicitante relativo às cargas variáveis.

Para vigas biapoiadas, sujeitas a cargas uniformemente distribuídas, os momentos  $M_{g,k}$  e  $M_{q,k}$  são dados pela Equação (2.15) e pela Equação (2.16) :

$$M_{g,k} = \frac{F_{G,k} l^2}{8} \quad (2.15)$$

$$M_{q,k} = \frac{F_{Q,k} l^2}{8} \quad (2.16)$$

onde  $l$  é o vão de cálculo da viga entre apoios em metros.

Logo, tem-se a Equação (2.17) que define o momento solicitante de cálculo em situação de incêndio para uma edificação residencial, onde as cargas acidentais não superam 5 kN/m<sup>2</sup>:

$$M_{Sd,fi} = 1,2 M_{g,k} + 0,21 M_{q,k} \quad (2.17)$$

Conforme Wit (2011), pode-se notar que os coeficientes de ponderação de carga nas combinações de ações são consideravelmente mais baixas em caso de incêndio, em comparação com a temperatura ambiente. Esta redução é com base no fato de que a probabilidade de ocorrência de um incêndio juntamente com condições extremas de carregamento é extremamente pequena.

#### **b) Determinação das resistências de cálculo dos materiais**

De acordo com Rodrigues e Oliveira (2021), os esforços resistentes de cálculo em situação de incêndio devem ser determinados com base na distribuição de temperatura na seção transversal dos elementos estruturais, considerando a exposição ao fogo conforme TRRF, determinado pela NBR 14432 (ABNT, 2001). Tal distribuição pode ser obtida na literatura técnica ou calculada numericamente a partir do fluxo de calor com auxílio de métodos

computacionais, conforme apresentado no item 2.1.4.2, e com base nas propriedades térmicas dos materiais, indicadas no item 2.1.3.

Para a determinação dos valores de cálculo das resistências do concreto e do aço em situação de incêndio, a NBR 15200 (ABNT, 2012) determina que os valores dos coeficientes de segurança devem ser  $\gamma_{c,fi} = \gamma_{s,fi} = 1,0$ , conforme a Equação (2.18) e a Equação (2.19):

$$f_{cd,\theta} = \frac{f_{ck,\theta}}{\gamma_{c,fi}} = f_{ck,\theta} \quad (2.18)$$

$$f_{yd,\theta} = \frac{f_{yk,\theta}}{\gamma_{s,fi}} = f_{yk,\theta} \quad (2.19)$$

### **2.1.5.3 Tempo de resistência ao fogo**

A resistência ao fogo é a propriedade de um elemento estrutural de resistir à ação do fogo por determinado período de tempo, mantendo sua segurança estrutural, estanqueidade e isolamento, onde aplicável. Sendo assim, a resistência ao fogo, em geral, é avaliada pelo tempo que decorre desde o início da elevação padronizada da temperatura a que o elemento é submetido, até o momento em que ele deixa de satisfazer as funções para que foi projetado (AMARAL, 2018).

A NBR 15200 (ABNT, 2012) apresenta métodos de cálculo apropriados para avaliar a capacidade resistente das estruturas em função do TRRF exigido pela NBR 14432 (ABNT, 2001). São eles: método tabular, método simplificado, método avançado e método experimental.

Com relação ao método simplificado de verificação de estruturas em situação de incêndio, alvo deste trabalho, ele pode ser aplicado se as seguintes hipóteses forem consideradas:

- As solicitações de cálculo em situação de incêndio ( $S_{d,fi}$ ) devem ser calculadas conforme item 2.1.5.2;
- O esforço resistente de cálculo em situação de incêndio de cada elemento pode ser calculado com base na distribuição de temperaturas obtida para a sua seção transversal, considerando a exposição ao fogo conforme o TRRF. Essa distribuição de temperatura pode ser obtida na literatura técnica ou calculada em programas específicos de computador a partir do fluxo de calor devido à convecção e à radiação;
- Os esforços resistentes podem ser calculados pelos critérios estabelecidos na NBR 6118 (ABNT, 2023) para situação normal (à temperatura ambiente), adotando para o concreto e o aço a resistência média em situação de incêndio. Essa média se obtém distribuindo uniformemente na parte comprimida da seção de concreto e na armadura total a perda

total de resistência por aquecimento do concreto ou das armaduras, respectivamente. Em situação de incêndio o valor de  $f_{cd,\theta}$  não precisa ser afetado pelo coeficiente  $\alpha=0,85$  como na temperatura ambiente.

### **2.1.6 Confiabilidade de estruturas de concreto em situação de incêndio**

Conforme Araújo (2014), e dentro do que foi apresentado anteriormente, a segurança estrutural em situação de incêndio garantida pelas normas brasileiras é obtida através da introdução de coeficientes de ponderação no projeto (Método dos Coeficiente Parciais de Segurança). A adoção deste método, apesar de ser conveniente do ponto de vista prático, não é suficiente para que se tenha uma ideia clara a respeito do nível de segurança obtido no projeto. Uma avaliação consistente do nível de segurança requer o cálculo da probabilidade de o estado limite último ser alcançado, ou a probabilidade de falha.

Ainda de acordo com Araújo (2014), uma alternativa para a avaliação do nível de segurança de uma estrutura consiste na determinação do Índice de Confiabilidade ( $\beta$ ). Esse índice leva em conta todas as variáveis aleatórias envolvidas e, principalmente, a maneira como a estrutura se comporta frente às ações. Logo, a segurança de uma estrutura pode ser avaliada comparando-se sua capacidade de carga com as ações que lhe são impostas. A diferença entre elas é uma medida da distância ao estado limite último.

#### **2.1.6.1 Incertezas**

Conforme Beck (2022), incertezas são inerentes a qualquer projeto de engenharia. Quando existe incerteza nos parâmetros de entrada, esta se propaga para a resposta. Portanto, a resposta de sistemas de engenharia também é afetada pelas incertezas, e não há como garantir, de forma determinística, que a resposta do sistema será sempre a resposta desejada. Portanto, uma consequência importante das incertezas é a existência de uma possibilidade do sistema não responder conforme o esperado. Quando esta possibilidade é medida em termos de probabilidades, fala-se em probabilidade de falha.

A seguir, descreve-se os tipos de incertezas presentes na elaboração de projetos de engenharia, com base nas definições de Melchers e Beck (2018):

- a) Incertezas físicas: presente nas dimensões, ações, propriedades dos materiais, etc;
- b) Incertezas estatísticas: provenientes da extrapolação de parâmetros estatísticos de populações finitas do modelo empregado;

- c) Incertezas devido a fatores humanos: ação do homem, intencional ou não, no comportamento do sistema estrutural (ex.: medições em laboratório);
- d) Incertezas de cunho fenomenológico: existência de eventos não previsíveis e levados em consideração;
- e) Incertezas na modelagem: proveniente das hipóteses simplificativas adotadas para a modelagem do fenômeno que descreve o comportamento estrutural.

#### 2.1.6.2 Problema básico de confiabilidade

Conforme Coelho (2018), a confiabilidade de estruturas de concreto armado em situação de incêndio pode ser formulada como um problema “Resistência ( $R$ )” versus “Solicitação ( $S$ )”. Nesse caso, preocupa-se com o fato de que a capacidade resistente de uma viga de seção retangular submetida à flexão, seja suficiente para suportar o carregamento solicitante. A questão da confiabilidade surge da aleatoriedade do suprimento e da demanda máxima, devendo ser representados como variáveis aleatórias. Nestes termos, a confiabilidade do componente/sistema estrutural pode ser definida apenas em termos probabilísticos.

Considerando o caso de  $R$  e  $S$  serem variáveis aleatórias normais, o problema fundamental pode ser resolvido através da margem de segurança, diferença entre  $R$  e  $S$ . Representando por  $Z$  a margem de segurança, conforme Equação (2.20), o evento de falha acontece quando a resistência é superada pela solicitação.:

$$Z = R - S \quad (2.20)$$

Como  $R$  e  $S$  são variáveis que seguem uma distribuição normal, a margem de segurança também terá distribuição normal e a probabilidade de falha será dada conforme a Equação (2.21):

$$p_f = P[Z \leq 0] = \int_{-\infty}^0 f_Z(z) dz = F_Z(0) \quad (2.21)$$

Conforme Haldar e Mahadevan (2000), pela Teoria de Probabilidade, a média e o desvio padrão da margem de segurança  $Z$ , considerando  $R$  e  $S$  com uma distribuição normal de probabilidade e não correlacionadas, são dados pela Equação (2.22) e Equação (2.23):

$$\mu_Z = \mu_R - \mu_S \quad (2.22)$$

$$\sigma_Z = \sqrt{(\sigma_R^2 + \sigma_S^2)} \quad (2.23)$$

Neste contexto, conforme Melchers e Beck (2018), a probabilidade de falha pode ser reescrita conforme Equação (2.24):

$$p_f = P[Z \leq 0] = \Phi\left(-\frac{\mu_R - \mu_S}{\sqrt{(\sigma_R^2 + \sigma_S^2)}}\right) = \Phi(-\beta) = 1 - \Phi(\beta) \quad (2.24)$$

Na Equação (2.24), a função  $\Phi$  é referente à distribuição normal padronizada, indicando que a probabilidade  $P[Z \leq 0]$  é uma Função de Distribuição Acumulada (FDA) de  $Z(F_Z(0))$ , conforme ilustra a Figura 2.8, onde  $\beta$  é denominado Índice de Confiabilidade e relaciona as posições relativas e os desvios padrões de  $R$  e  $S$  em termos de margem de segurança  $Z$ .

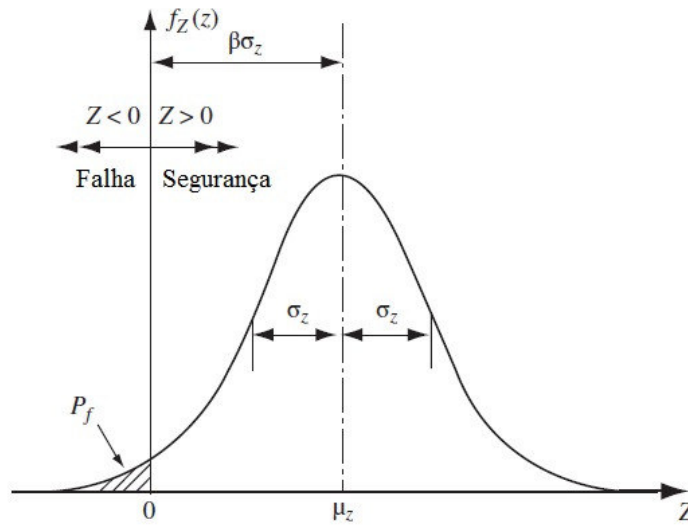


**Figura 2.8 - Distribuição da margem de segurança  $Z=R-S$**

Fonte: (Melchers & Beck, 2018)

### 2.1.6.3 Função estado limite

Generalizado o problema, conforme Nowak e Collins (2000), um dos aspectos iniciais a ser definido em uma análise de confiabilidade é a função estado limite, ou função performance, a ser verificada. A função estado limite tradicionalmente usa o formato margem de segurança, adotada no problema fundamental apresentado anteriormente, relacionando duas grandezas de mesma unidade no estilo resistência versus solicitação.

De acordo com Beck (2022), os diversos modos de falha de uma estrutura ou de elementos estruturais podem ser descritos através de equações chamadas de equações de estado limite. Seja  $X \in \mathbb{R}^n$  um vetor que reúne todas as variáveis aleatórias do problema. Para cada modo de falha, uma equação de estado limite  $g(X)$  é escrita conforme a Equação (2.25):

$$g(X) = g(X_1, X_2, \dots, X_n) = 0 \quad (2.25)$$

Usualmente a função estado limite é representada por  $g(X)$ , sendo  $X$  o vetor de variáveis aleatórias do problema e cuja a probabilidade de falha é idêntica a

probabilidade de violação do estado limite. Conforme a Figura 2.9, a função pode assumir três estados:

- $g(X) = 0$ : localização da superfície de falha;
- $g(X) > 0$ : domínio de segurança ( $\Omega_s$ );
- $g(X) < 0$ : domínio de falha ( $\Omega_f$ ).

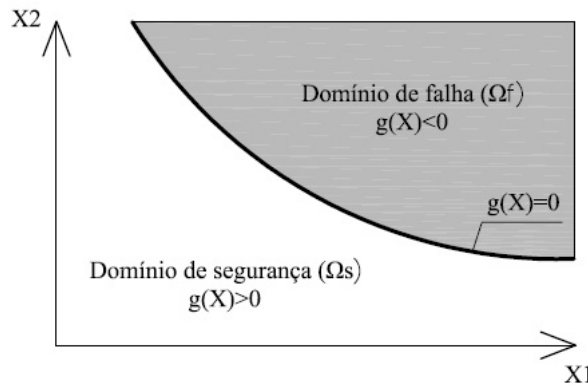


**Figura 2.9 - Domínios de um estado limite bidimensional**

Fonte: elaborada pela autora

A probabilidade de falha para uma função estado limite é obtida integrando a função densidade de probabilidade conjunta de todas variáveis do problema no domínio de falha, conforme Equação (2.26):

$$p_f = P[g(X) \leq 0] = \int \dots \int_{\Omega_f} f_X(X_1, X_2, \dots, X_n) dx_1, dx_2, \dots, dx_n \quad (2.26)$$

Considerada a equação fundamental da confiabilidade, sua solução é praticamente inviável, sendo que são raros os casos onde é possível determinar a distribuição conjunta de todas as variáveis e, em posse dessa seria ainda necessário um grande processo de integração múltipla (HALDAR E MAHADEVAN, 2000).

Logo, métodos de avaliação de confiabilidade podem ser empregados para a solução do problema, e são apresentados nas seções seguintes.

#### **2.1.6.4 Métodos de avaliação de confiabilidade**

Para avaliação da confiabilidade de uma estrutura é necessária a identificação e caracterização das incertezas associadas a essa. Após a caracterização do problema, a confiabilidade estrutural é avaliada fazendo uso de métodos probabilísticos para confiabilidade. Diniz (2013) classificou os métodos de confiabilidade estrutural em cinco níveis, baseados na quantidade de informação empregada e disponível sobre o problema:

- Métodos de Nível 0: utilizam o formato onde todas as cargas são tratadas similarmente e as tensões elásticas são reduzidas por meio de um fator de segurança. Exemplo: Método das Tensões Admissíveis e emprego de coeficiente global de segurança.
- Método de Nível 1: empregam um valor característico para cada valor dito “incerto”. O Método dos Estados Limites ou dos Coeficientes de Ponderação é exemplo deste nível.
- Métodos de Nível 2: empregam dois valores característicos para cada valor dito “incerto” (usualmente média e variância) e uma medida que correlacione os parâmetros (geralmente covariância). Exemplo: Método de Primeira Ordem Segundo Momento (*First Order Second Moment - FOSM*).
- Métodos de Nível 3: empregam a probabilidade de ocorrência de falha da estrutura como medida de confiabilidade da mesma. Para estes métodos as funções de densidade de probabilidade das variáveis aleatórias básicas envolvidas se fazem necessárias, podendo o Método de Confiabilidade de Primeira Ordem (*First Order Reliability Method – FORM*) ser utilizado para tal. O método FORM envolve uma transformação das variáveis aleatórias para o espaço normal padrão, e uma aproximação linear da equação de estado limite. Os métodos de integração numérica e de simulação (exemplo Método de Monte Carlo) também fazem uso completo das distribuições de probabilidades.

Um método de confiabilidade se justifica em cima de outro método de nível mais elevado, uma vez que para a aplicação prática de índices de confiabilidade é necessário expressar este como um valor objetivo de modo a compará-lo com outro pré-estabelecido. Assim para se obter os parâmetros utilizados em um determinado dimensionamento estrutural, estes são determinados por Métodos de Nível 1, o que por sua vez são calibrados por Métodos de Níveis 2 ou 3 (BECK, 2022).

A seguir o detalhamento da metodologia do Método de Nível 3 FORM, que será utilizado neste estudo para a análise de confiabilidade do nível de segurança da norma brasileira utilizada na verificação de estruturas de concreto armado em situação de incêndio.

#### ***2.1.6.5 First Order Reliability Method – FORM***

Como alternativa ao cálculo da probabilidade de falha, o índice de confiabilidade pode ser obtido diretamente através do *First Order Reliability Method* (FORM). Segundo Melchers e Beck (2018), o método FORM foi desenvolvido como uma extensão do método FOSM onde é removida a restrição ao segundo momento das variáveis, porém é mantida a aproximação de primeira ordem da função estado limite. Conforme Beck (2022), o método FORM permite

incorporar à análise as funções densidade de probabilidade, bem como dependência linear (correlação) entre as variáveis aleatórias do problema.

A aplicação do método FORM envolve a construção de uma função de distribuição conjunta de probabilidades, e a transformação dessa em uma distribuição normal reduzida multivariada. Conforme Beck (2022), aplicando o modelo de Nataf, é feita uma transformação prática para o espaço de trabalho a partir de um espaço de projeto. Inicialmente as distribuições são transformadas em distribuições de probabilidade normais equivalentes, onde são empregados coeficientes de correlação normais equivalentes. Posteriormente é eliminada a correlação entre as variáveis.

Ainda de acordo com Beck (2022), considera-se o princípio da aproximação normal, que consiste em determinar, para um ponto  $x_i^*$ , uma distribuição normal equivalente que preserve o conteúdo de probabilidades da distribuição original  $F_{X_i}(x_i^*)$  neste ponto. Como a distribuição normal equivalente está definida no espaço  $\mathbb{X}$ , escreve-se a Equação (2.27):

$$F_{X_i}(x_i^*) = F_{X_i}^{eq}(x_i^*) = \Phi\left(\frac{x_i^* - \mu_{X_i}^{eq}}{\sigma_{X_i}^{eq}}\right) \quad (2.27)$$

A distribuição normal equivalente possui dois parâmetros, que são a média e o desvio padrão equivalentes. Para determinar esses dois parâmetros, é necessária uma segunda equação. O critério para estabelecer esta segunda equação é arbitrário, mas uma condição natural é igualar também as funções de densidade, conforme Equação (2.28):

$$f_{X_i}(x_i^*) = \frac{\phi(z_i^*)}{\sigma_{X_i}^{eq}} \quad (2.28)$$

sendo  $z_i^*$  obtido conforme a transformação de Rackwitz e Fiessler detalhada em Beck (2022):

$$z_i^* = \frac{x_i^* - \mu_{X_i}^{eq}}{\sigma_{X_i}^{eq}} \quad (2.29)$$

O conjunto de variáveis  $Z = \{Z_1, Z_2, Z_3, \dots, Z_n\}$  assim obtido apresenta distribuições marginais normais padrão, mas possivelmente linearmente dependentes (correlacionadas). Escrevendo a Equação (2.27) em termos de  $z_i^*$ , obtém-se:

$$z_i^* = \Phi^{-1}(F_{X_i}(x_i^*)) \quad (2.30)$$

Da Equação (2.28) obtém-se uma expressão para o desvio padrão da distribuição normal equivalente:

$$\sigma_{X_i}^{eq} = \frac{\phi(z_i^*)}{f_{X_i}(x_i^*)} \quad (2.31)$$

E, finalmente, da Equação (2.29) obtém-se uma expressão para a média da distribuição normal equivalente:

$$\mu_{x_i}^{eq} = x_i^* - z_i^* \sigma_{x_i}^{eq} \quad (2.32)$$

Nota-se que esta transformação é realizada para cada uma das distribuições marginais, e é válida para um ponto  $x^*$ . Desta forma, a transformação deve ser refeita à medida que um algoritmo de busca do ponto de projeto avança.

Considerando a distância entre a origem e um dado ponto no sistema das variáveis normais padronizadas, o índice de confiabilidade  $\beta$  é definido como a menor distância entre a origem do sistema ao hiperplano  $g(Z) = 0$ , sendo obtido pela Equação (2.33):

$$\beta = - \frac{\sum_{i=1}^n z_i^* \left( \frac{\partial g}{\partial Z_i} \right)^*}{\sqrt{\sum_{i=1}^n \left( \frac{\partial g}{\partial Z_i} \right)^{2*}}} \quad (2.33)$$

Na Equação (2.33), a notação “\*” indica que o vetor das variáveis aleatórias e as derivadas parciais são avaliadas no chamado ponto de projeto. Como este ponto não é conhecido a priori,  $\beta$  é obtido por aproximações sucessivas. O cosseno diretor ( $\alpha_i$ ) e o ponto de projeto no espaço normal padronizado ( $z_i^*$ ) de cada variável aleatória são obtidos respectivamente pela Equação (2.34) e Equação (2.35):

$$\alpha_i = - \frac{\left( \frac{\partial g}{\partial Z_i} \right)^*}{\sqrt{\sum_{i=1}^n \left( \frac{\partial g}{\partial Z_i} \right)^{2*}}} \quad (2.34)$$

$$z_i^* = -\alpha\beta \quad (2.35)$$

A Figura 2.10 auxilia na interpretação geométrica bidimensional do índice de confiabilidade obtido pelo FORM.

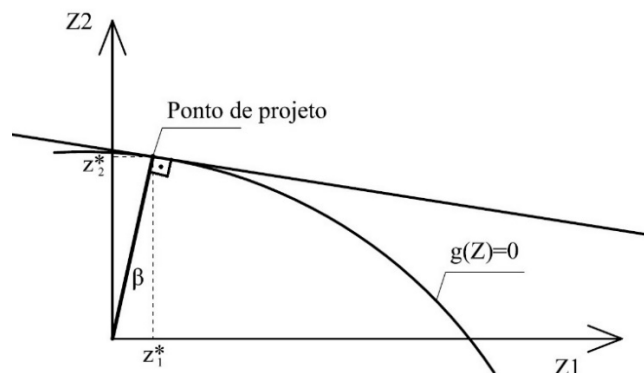


**Figura 2.10 - Interpretação geométrica bidimensional do Método FORM**

Fonte: elaborada pela autora

#### 2.1.6.6 Variáveis aleatórias

Para realizar a análise de confiabilidade, é necessário a determinação das propriedades estatísticas das variáveis aleatórias típicas envolvidas no projeto de estruturas de concreto em situação de incêndio.

As variáveis aleatórias são utilizadas para representar numericamente resultados de experimentos aleatórios, podendo ser definidas como funções que associam números reais à ocorrência de conjuntos de resultados possíveis de um fenômeno (MEDEIROS, 2009).

De acordo com Beck (2022), o grupo de trabalho, chamado de *Joint Committee on Structural Safety*, publicou em 2001 um documento intitulado *Probabilistic Model Code*. Esta norma modelo tem como objetivo principal servir como referência para a formulação (ou revisão) de normas técnicas de projeto estrutural, com embasamento na teoria de confiabilidade estrutural. Além disto, se coloca como referência para a eventual criação de uma norma de projeto estrutural totalmente probabilística: ao invés de especificar coeficientes parciais de segurança, a norma probabilística especificaria apenas índices de confiabilidade a serem respeitados.

O documento do JCSS (2001) criou uma biblioteca de referência para resistência de materiais e elementos estruturais, incertezas geométricas, modelos de ações, distribuições de ações, erros de modelo, etc.

No Brasil, conforme Ribeiro (2022), atualmente, não existe um padrão previamente definido, no que diz respeito à adoção das variáveis aleatórias e de suas respectivas distribuições de probabilidades para a elaboração de estudos de confiabilidade estrutural. Em cada pesquisa, selecionam-se as variáveis que sejam mais significativas e procuram-se distribuições que as representem de modo conveniente.

Como um avanço nas pesquisas envolvendo a análise de confiabilidade no país, os estudos de Santiago (2019) e Beck *et al.* (2023) servem como referência para a obtenção desses parâmetros conforme a realidade das obras locais. A seguir é apresentado um panorama das variáveis aleatórias relacionadas à resistência e à solicitação das estruturas de concreto armado deste estudo.

#### a) Variáveis aleatórias de resistência

- Resistência à compressão do concreto ( $f_c$ )

Os valores da variável aleatória  $f_c$  foram obtidos através do estudo realizado por Santiago (2019), construído com base em resultados de ensaios de resistência à compressão axial aos 28 dias de idade realizados em mais de 39 mil corpos de prova cilíndricos moldados *in loco* em obras das cinco regiões do Brasil entre os anos de 2011 e 2016, conforme apresentado na Tabela 2.6:

**Tabela 2.6 - Variável aleatória  $f_c$**

| Variável | Classe | Distribuição | $\mu$    | c.v. |
|----------|--------|--------------|----------|------|
| $f_c$    | C20    | normal       | 1,30 fck | 0,20 |
|          | C25    | normal       | 1,25 fck | 0,17 |
|          | C30    | normal       | 1,22 fck | 0,15 |
|          | C35    | normal       | 1,19 fck | 0,13 |
|          | C40    | normal       | 1,16 fck | 0,11 |
|          | C45    | normal       | 1,13 fck | 0,10 |
|          | C50    | normal       | 1,11 fck | 0,10 |
|          | C55    | normal       | 1,10 fck | 0,09 |
|          | C60    | normal       | 1,10 fck | 0,09 |

- Resistência ao escoamento das barras de aço ( $f_y$ )

As características da variável aleatória  $f_y$  tiveram como base os estudos realizados por Santiago (2019), obtidos de ensaios de tração realizados em mais de 8,7 mil barras de aço CA-50 oriundas de diferentes lotes produzidos no Brasil ao longo do ano de 2016, conforme apresentado na Tabela 2.7:

**Tabela 2.7 - Variáveis aleatórias  $f_y$**

| Variável | $\phi$ (mm) | Distribuição | $\mu$         | c.v. |
|----------|-------------|--------------|---------------|------|
| $f_y$    | qualquer    | normal       | 1,22 $f_{yk}$ | 0,04 |

O fator de *bias* ficou em média 1,22, com c.v. = 0,04. O fator de *bias* está um pouco acima de valores internacionais; o coeficiente de variação está dentro do observado internacionalmente. A distribuição normal se mostrou apropriada.

- Características geométricas da seção transversal

A largura e a altura útil da viga foram consideradas como sendo variáveis aleatórias pelo fato de serem suscetíveis ao erro humano no momento da execução. Os parâmetros estatísticos considerados foram os mesmos propostos por Eamon e Jensen (2013a) e são apresentados na Tabela 2.8, em função das dimensões nominais ( $b_n$ ,  $d_n$ ), estando de acordo com as prescrições da NBR 14931 (ABNT, 2004).

**Tabela 2.8 - Variáveis aleatórias geométricas**

| Variável | Distribuição | $\mu$      | c.v  | Fonte                  |
|----------|--------------|------------|------|------------------------|
| b        | normal       | 1,01 $b_n$ | 0,04 | Eamon e Jensen (2013a) |
| d        | normal       | 0,99 $d_n$ | 0,04 |                        |

- Erro de modelo de resistência ( $E_{m,r}$ )

A variável aleatória relativa ao erro de modelo exprime a diferença entre o comportamento real de um elemento estrutural e o comportamento previsto para ele a partir do modelo de cálculo empregado em seu dimensionamento (SANTIAGO, 2019).

A Tabela 2.9 apresenta os resultados relativos a variável  $E_{m,r}$  levantados a partir do estudo de Nowak *et al.* (2011) e Santos (2012), que estudaram modelos de flexão de vigas em concreto armado incluindo resultados experimentais para 144 vigas com diferentes alturas, taxas de armadura e resistências do concreto.

**Tabela 2.9 - Estatísticas da variável aleatória  $E_{m,r}$**

| Variável  | Situação de projeto                        | Distribuição | $\mu$ | c.v.  | Fonte                      |
|-----------|--------------------------------------------|--------------|-------|-------|----------------------------|
| $E_{m,r}$ | Vigas de concreto armado sujeitas à flexão | Normal       | 1,02  | 0,060 | Nowak <i>et al.</i> (2011) |
| $E_{m,r}$ | Vigas de concreto armado sujeitas à flexão | Lognormal    | 0,99  | 0,024 | Santos (2012)              |

Neste estudo, foram considerados os valores apresentados por Nowak *et al.* (2011).

#### **b) Variáveis aleatórias de solicitação**

A obtenção das estatísticas correspondentes ao momento solicitante em situação de incêndio ( $M_{sd,fi}$ ) passa pela obtenção das estatísticas das variáveis aleatórias relacionadas às ações permanentes ( $M_{g,fi}$ ) e ações variáveis ( $M_{q,fi}$ ).

De acordo com a NBR 8681 (ABNT, 2004), as ações permanentes ocorrem com valores constantes ou de pequena variação em torno de sua média, durante praticamente toda a vida da construção. A variabilidade das ações permanentes é medida num conjunto de construções análogas. Os pesos próprios dos elementos da construção, incluindo-se o peso próprio da estrutura e de todos os elementos construtivos permanentes, os pesos dos equipamentos fixos e os empuxos de terra são exemplos de ações permanentes.

Usualmente, um projetista terá grande confiança em relação ao peso próprio de uma estrutura em particular. Ainda assim, a variabilidade decorre de diferenças entre o volume estimado e o volume final de cada um dos materiais, e de diferenças entre pesos específicos tabelados e pesos específicos verdadeiros dos materiais (BECK, 2022).

Com base em estudos comparativos, Ellingwood *et al.* (1980) verificaram que projetistas subestimam o peso próprio das estruturas, em 5% na média, e erram com um coeficiente de variação de 10%. A variável que descreve o erro em relação ao peso próprio real segue uma distribuição normal, de forma que pode-se escrever  $F_g \sim N(1,05F_k, 10\%)$ , sendo  $F_k$  o valor característico. Resultados semelhantes foram obtidos por Santiago (2019) em um experimento limitado com projetistas brasileiros.

Sobre as ações variáveis, de acordo com a NBR 8681 (ABNT, 2004), elas ocorrem com valores que apresentam variações significativas em torno de sua média, durante a vida da construção. Consideram-se como ações variáveis as cargas acidentais das construções, bem como efeitos, tais como forças de frenação, de impacto e centrífugas, os efeitos do vento, das variações de temperatura, do atrito nos aparelhos de apoio e, em geral, as pressões hidrostáticas e hidrodinâmicas.

Beck *et al.* (2023) realizaram extensas simulações de Monte Carlo e determinaram as distribuições de ponto arbitrário e de extremos de 50 anos mostradas na Tabela 2.10. Estas distribuições foram normalizadas com respeito aos valores nominais estabelecidos na norma NBR 6120 (ABNT, 2019) para os diferentes tipos de uso. São apresentados os valores de *bias* (média em relação ao valor nominal), bem como os coeficientes de variação. Também é apresentada uma média, que é comparada com os valores propostos por Santiago *et al.* (2020) e os utilizados por Ellingwood *et al.* (1980) na calibração das normas americanas. As distribuições de probabilidade apropriadas são Gamma, para as distribuições de ponto arbitrário, e a distribuição de Gumbel, para valores extremos de 50 anos.

**Tabela 2.10 - Estatísticas de ações variáveis**

|                                 |            | Instante arbitrário ao longo do tempo |             | Extremo vida útil de 50 anos |             |
|---------------------------------|------------|---------------------------------------|-------------|------------------------------|-------------|
| Uso                             | Fk (kN/m²) | $\mu F/F_k$                           | c.v.        | $\mu F/F_k$                  | c.v.        |
| Escritórios                     | 2,5        | 0,20                                  | 0,94        | 0,93                         | 0,26        |
| Residencial                     | 1,5        | 0,20                                  | 0,75        | 0,93                         | 0,22        |
| Hotel                           | 1,5        | 0,20                                  | 0,24        | 0,95                         | 0,14        |
| Hospital                        | 2,0        | 0,20                                  | 1,16        | 0,89                         | 0,35        |
| Sala de aula                    | 3,0        | 0,20                                  | 0,61        | 0,92                         | 0,24        |
| Varejo                          | 4,0        | 0,22                                  | 0,86        | 0,92                         | 0,28        |
| <b>média</b>                    | <b>-</b>   | <b>0,21</b>                           | <b>0,76</b> | <b>0,92</b>                  | <b>0,25</b> |
| Santiago <i>et al.</i> (2020)   |            | 0,25                                  | 0,55        | 1,00                         | 0,40        |
| Ellingwood <i>et al.</i> (1980) |            | 0,25                                  | 0,55        | 1,00                         | 0,25        |

- Erro de modelo de solicitação  $E_{m,s}$

A Tabela 2.11 apresenta os resultados relativos à variável  $E_{m,s}$  adotados e levantados a partir do estudo de Beck *et al.* (2014) para modelos de cálculo de carregamentos:

**Tabela 2.11 - Estatísticas da variável aleatória  $E_{m,s}$**

| Variável  |                         | Distribuição | $\mu$ | c.v. | Fonte                     |
|-----------|-------------------------|--------------|-------|------|---------------------------|
| $E_{m,s}$ | Efeitos do carregamento | log-normal   | 1,00  | 0,05 | Beck <i>et al.</i> (2014) |

#### 2.1.6.7 Índice de confiabilidade alvo

Dado que muito pouco se tem na bibliografia sobre índices de confiabilidade alvo comumente aceitos para a avaliação de estruturas expostas ao fogo, a possível aplicação de valores alvo em temperatura ambiente foi pesquisada por Rush e Hopkin (2017). Concluiu-se que um escalonamento direto da confiabilidade alvo em temperatura ambiente em função da taxa de ocorrência de eventos significativos de incêndios não é estritamente apropriado.

De acordo com Hopkin e Fu (2023), como parte de um programa de investigação colaborativo europeu, o *Natural Fire Safety Concept* (NFSC) considerou o papel do modo de evacuação na mitigação das consequências da falha estrutural induzida pelo fogo. Nele, considera-se que o índice de confiabilidade alvo para uma estrutura exposta ao fogo pode ser racionalizado dependendo da dificuldade de evacuação, ou seja, para um período de referência de um ano, sendo:

- Normal evacuação:  $\beta_{t,fi} = 3,65$ ;
- Difícil evacuação:  $\beta_{t,fi} = 4,21$ ;

- Sem possibilidade de evacuação:  $\beta_{t,fi} = 4,70$ .

Coile *et al.* (2012) apresentaram um procedimento de cálculo para diferentes tipos de edifícios e para diferentes classes de consequências de falha, baseado no conceito de segurança desenvolvido por Weilert & Albrecht (2009). A Tabela 2.12 ilustra os valores de  $\beta_{t,fi}$ , sendo o cálculo realizado com base em um armazém de 1000 m<sup>2</sup> de área compartimentada e para edifícios onde não há sistema de sprinklers disponível.

**Tabela 2.12 - Cálculo de  $\beta_t$  para edificações com diferentes classes de uso e consequência**

| Uso         | Consequências de falha | $\beta_{t,fi}$ |
|-------------|------------------------|----------------|
| Hospital    | elevada                | 3,12           |
| Escritório  | moderada               | 1,87           |
| Residencial | moderada               | 2,2            |
| Armazém     | mínima                 | 2,34           |

Para uso prático, Coile *et al.* (2012) apresentaram, também, a Figura 2.11, onde é possível determinar  $\beta_{t,fi}$  como uma função da classe de consequência de falha e da probabilidade anual de um incêndio totalmente desenvolvido  $p_{fi}$ , calculada considerando a probabilidade anual de início de incêndio, a probabilidade de o incêndio não ser extinto pelos usuários da edificação nem pelo corpo de bombeiros, e a probabilidade de falha do sistema de sprinklers, quando houver.

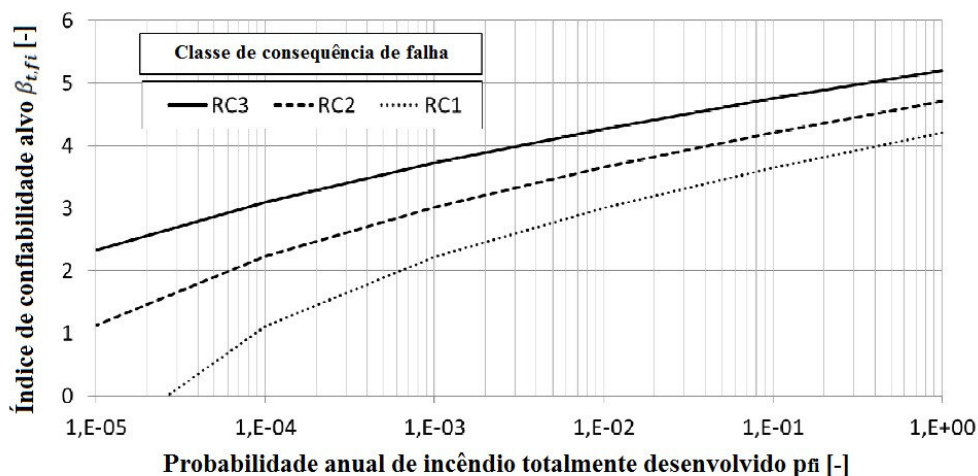


**Figura 2.11 - Índice de confiabilidade alvo para elementos estruturais expostos ao fogo**

Fonte: Coile *et al.* (2012)

Outra alternativa para determinação do  $\beta_{t,fi}$  é sugerida por Beck (2022), que relata a importância de que o valor seja escolhido de forma a ser compatível com o nível de segurança empregado pelas normas baseadas no Método dos Coeficiente Parciais de Segurança,

representando uma espécie de consenso a respeito do nível de segurança estrutural, consenso este atingido através de um processo gradual de otimização, ao longo dos anos. Alguma variação de  $\beta_{t,fi}$  é admitida, em função de modo/consequência de falhas ou de material estrutural.

Uma maneira de fazer isto, é escolher  $\beta_{t,fi}$  como uma média ponderada dos índices de confiabilidade obtidos nas análises de confiabilidade baseadas nas verificações de norma, considerando o peso correspondente de cada razão entre ações variáveis e permanentes, que deve refletir a frequência relativa na prática. Segundo Beck (2022), prédios de concreto armado apresentam valores típicos da razão entre os valores nominais de ações variáveis e o peso próprio na faixa  $0,5 \leq r \leq 1,0$ , e, baseados em Ellingwood e Galambos (1982), os pesos de ponderação ( $w_{ij}$ ) são apresentados na Tabela 2.13:

**Tabela 2.13 - Pesos de ponderação para estruturas de concreto armado**

| $r$  | Peso de ponderação $w_{ij}$ |
|------|-----------------------------|
| 0,25 | 0,10                        |
| 0,50 | 0,45                        |
| 1,00 | 0,30                        |
| 1,50 | 0,10                        |
| 2,00 | 0,05                        |

### 2.1.7 Calibração dos coeficientes parciais de segurança

De acordo com Beck (2022), o problema de confiabilidade dito direto consiste em encontrar o índice de confiabilidade ( $\beta$ ) de uma estrutura, projetada por meio de determinado conjunto de coeficientes parciais de segurança, conforme proposto pelas normas brasileiras. O problema inverso consiste em determinar os coeficientes parciais de segurança que resultam no índice de confiabilidade desejado, também chamado de índice de confiabilidade alvo ( $\beta_t$ ). Esta é a base do chamado problema de calibração de normas.

O projeto de estruturas em situação de incêndio com combinação de ações permanentes e ações variáveis, é feito a partir da equação de estado limite dada pela Equação (2.36):

$$R_{d,fi} \geq S_{d,fi}$$

$$R \left( \frac{f_{ck}}{\gamma_{c,fi}}, \frac{f_{yk}}{\gamma_{s,fi}} \right) \geq \gamma_{g,fi} M_{g,k} + \gamma_{q,fi} \psi_2 M_{q,k} \quad (2.36)$$

Nesta equação,  $\{\gamma_{c,fi}, \gamma_{s,fi}, \gamma_{g,fi}, \gamma_{q,fi}\}$  é um conjunto de coeficientes parciais de segurança,  $\{\psi_2\}$  é o coeficiente de combinação para ações variáveis,  $\{f_{ck}, f_{yk}\}$  é um conjunto representativo das variáveis de resistência dos materiais.

Os valores de  $M_{g,k}$  e  $M_{q,k}$  correspondem ao período de retorno usual de 50 anos. O coeficiente de combinação  $\psi_2$  é utilizado para reduzir o valor extremo do carregamento variável para o valor de ponto arbitrário no tempo, devido à ação do incêndio.

O processo de calibração do conjunto de coeficientes parciais de segurança  $\Psi = \{\gamma_{c,fi}, \gamma_{s,fi}, \gamma_{g,fi}, \gamma_{q,fi}, \psi_2\}$  pode ser determinado ou calibrado a partir das análises de confiabilidade.

Ainda conforme Beck (2022), no procedimento usual de projeto de estruturas de concreto armado em situação de incêndio, as ações são conhecidas, e a partir delas, utilizando os coeficientes parciais de segurança e a Equação (2.37), é determinada a resistência necessária para o elemento estrutural. No procedimento de calibração de norma, é conveniente inverter esta ordem, ou seja: definida a resistência do elemento, as equações de projeto são utilizadas para “projetar” o carregamento admissível. O processo de calibração é feito para diversos pontos de razão entre as ações variáveis e as ações permanentes.

O processo é iterativo, e se inicia com a definição de valores iniciais  $\Psi_0$  (tentativa) para os coeficientes parciais de segurança, para iteração zero. Deve ser definida uma seção transversal típica e calculada a resistência de projeto:

$$r_{D0} = R \left( \frac{f_{ck}}{\gamma_{c0}}, \frac{f_{yk}}{\gamma_{s0}} \right) \quad (2.37)$$

Com estas preliminares, a equação de projeto pode ser dividida pela ação permanente característica, ainda desconhecida:

$$\frac{r_{D0}}{M_{g,k}} \geq \gamma_{g,fi} + \frac{\gamma_{q,fi} \psi_2 M_{q,k}}{M_{g,k}} \quad (2.38)$$

O índice de confiabilidade será determinado para razões de carregamento ( $r$ ) pré-determinadas. Logo, a única incógnita na Equação (2.38) é  $M_{g,k}$ :

$$(M_{g,k})_{ij} = \frac{r_{D0}}{\gamma_{g,fi} + \gamma_{q,fi} \psi_2 r} \quad (2.39)$$

E o valor característico da ação variável é definido por:

$$M_{q,k} = r M_{g,k} \quad (2.40)$$

Conhecidos os valores característicos das ações, as funções de distribuição de probabilidades são reconstruídas, a partir das estatísticas mostradas no item 2.1.6. Os valores característicos das resistências foram definidos inicialmente, e as distribuições de probabilidade são reconstruídas também a partir dos modelos também discutidos no item 2.1.6. Neste ponto pode-se iniciar a avaliação da confiabilidade.

A equação de estado limite do problema de calibração é equivalente à Equação (2.36), com as seguintes alterações: os valores característicos são substituídos pelas variáveis aleatórias correspondentes, e os fatores parciais de segurança são todos unitários. Além disto, variáveis erro de modelo ( $E_m$ ) são incorporadas e o vetor  $X$  reúne todas as variáveis aleatórias do problema:

$$g(X) = E_{m,r}R(f_c, f_y, b, d) - E_{m,s}S(M_g, M_q) \quad (2.41)$$

Para todas as vigas analisadas, as equações de estado limite são sempre as mesmas, o que muda com as razões de carregamento são as variáveis aleatórias, que são dimensionais, e devem ser recalculadas a cada ponto de calibração e a cada iteração. Através da análise de confiabilidade pelo método FORM, é determinado o índice de confiabilidade  $\beta_{ij}(\Psi_0)$ .

Observa-se que os índices de confiabilidade obtidos no processo de calibração são funções do valor inicial arbitrado para o vetor de coeficientes parciais de segurança  $\Psi_0$ . Com estas preliminares, e dado  $\Psi_k$ , para  $k = 0$ , o problema de calibração pode ser posto como: determine  $\Psi^*$  que minimiza  $f(\Psi)$ .

A função objetivo visa minimizar, para todas as combinações de carregamento, as variações entre  $\beta_{ij}(\Psi_0)$  e o índice de confiabilidade alvo  $\beta_{t,fi}$ :

$$f(\Psi) = \sum_i \sum_j w_{ij} [\beta_t - \beta_{ij}(\Psi_0)]^2 \quad (2.42)$$

$$f(\Psi) = \sum_i \sum_j w_{ij} \left[ \beta_t - \beta_{ij}(\gamma_{c,fi}, \gamma_{s,fi}, \gamma_{g,fi}, \gamma_{q,fi}, \psi_2) \right]^2$$

onde  $w_{ij}$  é o peso correspondente a cada razão entre ações, conforme apresentado anteriormente na Tabela 2.13.

#### 2.1.7.1 Algoritmo de otimização

De acordo com Beck (2022), a determinação dos coeficientes parciais de segurança com base no método de confiabilidade de nível 3 FORM não é trivial, e geralmente é feita de forma numérica. Trata-se de um problema de otimização, que busca determinar o valor ótimo de um vetor de variáveis de projeto  $\Psi \in \mathbb{R}^{n_{dv}}$ , que minimiza uma função objetivo  $f(\Psi)$ , sujeito a restrições de igualdade, de desigualdade e restrições ditas laterais, com relação aos possíveis valores do vetor de projeto:  $\{\Psi_{min} \leq \Psi \leq \Psi_{max}\}$ .

A solução do problema de otimização proposto no processo de calibração pode ser realizada por algum algoritmo de otimização proposto na literatura. Neste trabalho, optou-se empregar o algoritmo heurístico *Particle Swarm Optimization* (PSO).

Segundo Gandomi e Alavi (2012), a PSO é uma das meta-heurísticas mais utilizadas para resolução de problemas de otimização. Ela ganhou muita atenção devido a algumas de suas características, como aplicabilidade a pesquisas científicas e a problemas do mundo real; exploração mais rápida do espaço de busca, quando comparada com algumas meta-heurísticas tradicionais; e facilidade de implementação.

O PSO é um algoritmo heurístico baseado no comportamento social de um bando de pássaros. O método foi proposto por Eberhart e Kennedy (1995), e tem como objetivo buscar a solução ótima, em um espaço de busca, através da troca de informações entre indivíduos de uma população determinando qual trajetória cada um deles deverá tomar no espaço de busca (PAIVA, 2018).

## **2.2. ESTADO DA ARTE**

No que tange às bibliografias nessa vertente, verificou-se que, para o caso de avaliações da confiabilidade de elementos estruturais à temperatura ambiente, diversos trabalhos já foram feitos, podendo-se citar Santos *et al.* (2014b), que apresentou uma investigação da segurança de vigas submetidas à flexão simples, em concreto armado, em aço e em material misto, e dimensionadas segundo as normas brasileiras. Em geral, o autor observou uma variação muito grande, ou uma falta de uniformidade, nos índices de confiabilidade obtidos para diferentes razões de carregamento, bem como para os diferentes materiais. Enquanto os índices de confiabilidade dos elementos de concreto são satisfatórios, as vigas metálicas apresentam resultados abaixo dos limites estabelecidos por normas internacionais. No caso das vigas mistas, os índices de confiabilidade encontrados estão entre os valores para concreto e aço. Os resultados apresentados demonstram a importância de se realizar a calibração baseada em confiabilidade dos coeficientes parciais de segurança das normas brasileiras, tal qual realizado para as normas americanas e européias.

Tramontini (2016) realizou um estudo de confiabilidade de seções de concreto armado submetidos a diversos esforços, a fim de avaliar a probabilidade de falha. As verificações foram feitas utilizando o método *First Order Reliability Method* (FORM) para verificar se os coeficientes de segurança definidos pela norma brasileira de dimensionamento de estruturas de concreto armado em temperatura ambiente são compatíveis com probabilidades de falha estrutural consideradas como socialmente aceitáveis. Nas diversas análises realizadas, pode-se concluir que os coeficientes de majoração para as cargas permanentes da norma brasileira estão

adequados e poderiam até mesmo ser reduzidos, mas os coeficientes para cargas acidentais poderiam aumentar.

Nogueira e Pinto (2016) realizaram um estudo sobre a segurança de vigas em concreto armado solicitadas por momento fletor e dimensionadas de acordo com as normas brasileiras em temperatura ambiente. O principal objetivo foi avaliar a uniformidade na segurança das vigas para diferentes posições da linha neutra e razão de carregamentos, com o uso da Teoria da Confiabilidade. Um procedimento simplificado para a calibração dos coeficientes parciais de segurança foi proposto, levando-se em conta a natureza das variáveis aleatórias de resistência e solicitação envolvidas no problema. Os resultados mostraram a falta de uniformidade na segurança das vigas quando dimensionadas com o conjunto fixo de coeficientes parciais proposto em norma. O processo de calibração apresentado mostrou-se capaz de uniformizar a segurança e ainda obter a configuração estrutural que apresenta o nível de segurança requerido considerando um valor alvo para o índice de confiabilidade.

Santiago *et al.* (2020) realizaram a calibração dos fatores de segurança parciais das principais normas brasileiras de projeto utilizadas no dimensionamento de estruturas metálicas e de concreto. O estudo realizou um ajuste estatístico das principais variáveis aleatórias de resistência e solicitação envolvidas no problema, que foram ajustadas para a realidade brasileira, mostrando que apresentam um comportamento ligeiramente diferente daquele apresentado pelas variáveis equivalentes adaptadas à realidade de outros países. Assim, a obtenção de um conjunto de coeficientes de segurança otimizados que conduzem a uma confiabilidade mais uniforme para as diferentes situações de projeto e tipologias de estruturas, mostrou que os novos coeficientes tendem a majorar as ações consideradas principais e a minorar as ações consideradas secundárias nas combinações normais de projeto.

Correia *et al.* (2022) realizaram a avaliação da confiabilidade de vigas de concreto armado em diferentes situações de projeto. Vigas simplesmente apoiadas foram otimizadas para encontrar as dimensões e armaduras da seção transversal que minimizam os custos, atendendo aos critérios das normas técnicas em temperatura ambiente. Foi verificado que há uma grande influência da relação entre a carga variável e a carga total no índice de confiabilidade das vigas de concreto armado, assim como observado por Scherer *et al.* (2019).

Já, em situação de incêndio, Iqbal e Harichandran (2011) realizaram a calibração dos coeficientes parciais de segurança da norma americana de estruturas metálicas através de uma análise de confiabilidade para avaliação dos coeficientes de redução de capacidade resistente e dos fatores de carga para colunas de aço expostas ao fogo, considerando o efeito de sistemas de

proteção contra incêndio na redução da probabilidade de ocorrência de um fogo severo. Da análise dos resultados, verificou-se que os coeficientes de redução da capacidade resistente e os fatores de carga de incêndio não devem ser constantes para todas as situações de projeto, e que devem variar dependendo da presença de sistemas ativos de proteção contra incêndios num edifício.

Poucos trabalhos nacionais de confiabilidade de estruturas em situação de incêndio foram encontrados, podendo-se destacar Ricardo (2015) e Silva (2019) que realizaram a análise de confiabilidade estrutural de elementos de aço em altas temperaturas.

Em se tratando de estruturas de concreto armado em situação de incêndio, tema alvo deste estudo, é possível citar dentro das principais referências encontradas na literatura internacional, o trabalho de Wang (2010), onde um modelo simples e viável de resistência temporal de vigas de concreto armado sob fogo foi fornecido juntamente com um método de análise do índice de confiabilidade de vigas de concreto armado. Foi analisada a ação da curva de incêndio ISO 834 (1999) no índice de confiabilidade de diferentes configurações de vigas de concreto em diferentes tempos de incêndio. Os resultados mostraram que o aumento da taxa de armadura e do cobrimento do concreto são as medidas eficazes para melhorar o limite de resistência ao fogo de vigas de concreto armado.

Coile *et al.* (2012) realizaram análises não lineares através do Método dos Elementos Finitos para calcular a resposta estrutural de lajes de concreto durante um incêndio. As análises levam em consideração a interação estrutural entre diferentes seções e possíveis redistribuições de tensões, a fim de obter um dimensionamento mais econômico. Sugere-se dividir a resistência estrutural obtida por um fator parcial global. Embora apresente um alto nível de simplicidade, o método proposto leva em consideração as classes de consequências de falha da estrutura e a taxa de incidência de incêndios e permite a incorporação de outras medidas de proteção contra incêndios.

Coile *et al.* (2013) também realizaram uma análise probabilística completa de vigas de concreto durante incêndio. Eles desenvolveram uma ferramenta simplificada de cálculo probabilístico capaz de calcular a capacidade do momento fletor de vigas simplesmente apoiadas expostas ao fogo. A incerteza das variáveis básicas foi levada em consideração através de simulações de Monte Carlo, resultando em uma quantificação da incerteza quanto à capacidade do momento fletor durante o incêndio. É descoberto que a incerteza com relação aos fatores de redução para as propriedades do material em condições de elevadas temperaturas e a incerteza em relação ao cobrimento de concreto têm um efeito negativo no nível de segurança

correspondente ao valor de projeto da capacidade do momento fletor calculado de acordo com o EN 1992-1-2 (2004).

Tem-se, ainda, os estudos de Eamon e Jesen (2013b) sobre a análise de confiabilidade de colunas de concreto armado em situação de incêndio, e Eamon e Jensen (2013a) sobre a análise de confiabilidade de vigas de concreto armado em situação de incêndio. Em ambos estudos, verificou-se que a confiabilidade estrutural diminuiu não linearmente em função do tempo de exposição ao fogo, sendo os parâmetros mais significativos para a análise de pilares o tipo de incêndio, a taxa de carga, a excentricidade e taxa de armadura, enquanto para as vigas foram o cobrimento de concreto, a relação vão/profundidade na presença de restrições axiais, a temperatura média do incêndio e as condições de suporte.

Em território nacional, Coelho (2018) realizou uma avaliação da confiabilidade de seções de vigas de concreto armado em situação de incêndio, determinando a probabilidade de falha das estruturas frente a um incêndio totalmente desenvolvido, obtida através de simulações de Monte Carlo. A função de estado limite foi descrita através de expressões analíticas obtidas pelo equilíbrio de forças entre o concreto e armadura para seções de vigas em flexão, sendo considerado os efeitos da temperatura através da redução das propriedades dos materiais. Os resultados indicaram que os parâmetros mais relevantes, que culminaram nas maiores perdas de confiabilidade com o aumento da temperatura, foram a área de armadura e a razão entre cargas acidental e permanente. Ainda, observou-se que a variação térmica entre 500°C e 800°C foi o intervalo em que a probabilidade de falha apresentou os maiores aumentos.

Preuss (2023) realizou uma avaliação da confiabilidade de pilares de concreto armado à temperatura ambiente e em situação de incêndio. A segurança dos pilares foi estimada através da aplicação dos conceitos da confiabilidade estrutural, sendo as análises probabilísticas realizadas através do *First Order Reliability Method* e da simulação de Monte Carlo com amostragem por importância adaptativa. Foi levada em consideração a aleatoriedade das ações (permanente e variável), resistência dos materiais (aço e concreto), geometria da seção transversal (altura, base e cobrimento), temperatura e erros de modelagem. Os resultados mostram que diversos dos pilares projetados, tanto em temperatura ambiente, como em situação de incêndio, resultaram em uma confiabilidade aquém da almejada, o que evidencia a necessidade de estudos que proponham uma calibração dos coeficientes parciais de segurança.

Pires (2023) avaliou a confiabilidade de seções de vigas de concreto armado simplesmente apoiadas em situação de incêndio considerando a utilização do método simplificado proposto pela norma brasileira NBR 15200 (ABNT, 2012). Essa análise considerou

a influência do cobrimento de concreto, da razão entre carga variável e carga total e do número de faces das vigas aquecidas pelo incêndio, além de ter sido realizada uma análise de sensibilidade que mostra quais são as variáveis aleatórias consideradas que possuem maior impacto na função de estado limite. Ao final, conclui-se que o número de faces aquecidas das vigas é de extrema importância para a segurança dessas estruturas, que um aumento no cobrimento pode promover um aumento na confiabilidade e que uma maior proporção da carga variável em relação a carga total da viga gera uma probabilidade de falha mais baixa. Com relação a análise de sensibilidade, a temperatura de incêndio e o cobrimento foram as variáveis que apresentaram maior impacto.

### 3. METODOLOGIA

No presente estudo foram analisadas vigas biapoiadas de seção retangular de concreto armado, verificadas para o ELU de flexão simples conforme a NBR 6118 (ABNT, 2014), com seção transversal retangular de 20x50 cm e 25x70 cm, vão de cálculo de 600 cm, sujeitas a cargas uniformemente distribuídas (permanentes e acidentais), onde supõe-se que pertençam a uma edificação residencial, de 25 m de altura, cuja exigência de TRRF é de 90 min.

A Tabela 3.1 apresenta os dados geométricos da seção de concreto das vigas, que foram divididas em dois grupos respeitando a taxa mínima de armadura exigida pela NBR 6118 (ABNT, 2014).

**Tabela 3.1 - Características geométricas da seção de concreto**

| VIGAS    |      | $b$ (cm) | $h$ (cm) | $A_c$ (cm <sup>2</sup> ) | Número de barras | $\phi$ (mm) | $A_s$ (cm <sup>2</sup> ) | $\rho$ (%) |
|----------|------|----------|----------|--------------------------|------------------|-------------|--------------------------|------------|
| GRUPO I  | V101 | 20       | 50       | 1000                     | 4                | 8,0         | 2,01                     | 0,20%      |
|          | V102 | 20       | 50       | 1000                     | 4                | 10,0        | 3,14                     | 0,31%      |
|          | V103 | 20       | 50       | 1000                     | 4                | 12,5        | 4,91                     | 0,49%      |
|          | V104 | 20       | 50       | 1000                     | 3                | 16,0        | 6,03                     | 0,60%      |
|          | V105 | 20       | 50       | 1000                     | 3                | 20,0        | 9,42                     | 0,94%      |
| GRUPO II | V201 | 25       | 70       | 1750                     | 4                | 10,0        | 3,14                     | 0,18%      |
|          | V202 | 25       | 70       | 1750                     | 4                | 12,5        | 4,91                     | 0,28%      |
|          | V203 | 25       | 70       | 1750                     | 3                | 16,0        | 6,03                     | 0,34%      |
|          | V204 | 25       | 70       | 1750                     | 3                | 20,0        | 9,42                     | 0,54%      |

Foi considerada uma análise paramétrica com dois valores de  $f_{ck}$  (25 MPa e 35 MPa), dois tipos de agregados (calcário e silicoso), duas classes de agressividade ambiental (CAA I e CAA II) e cinco razões de carregamento. A resistência ao escoamento do aço da armadura longitudinal ( $f_{yk}$ ) é assumida como 500 MPa e a armadura transversal com  $\phi=5$  mm.

No Apêndice A é possível encontrar o resumo de todas as vigas analisadas e suas principais características físicas e geométricas.

#### 3.1. ANÁLISE TÉRMICA COMPUTACIONAL

O *ANSYS Mechanical APDL* é um programa computacional, baseado no Método dos Elementos Finitos que, de acordo com o manual do usuário, pode ser utilizado nas mais diversas classes de problemas de engenharia. Possui habilidades para resolver sete tipos de análises estruturais diferentes: estática, modal, harmônica, dinâmica transiente, espectral, flambagem e

dinâmica explícita. Além destas, várias características especiais estão disponíveis: mecânica da fratura, materiais compósitos, fadiga, etc.

A modelagem no *ANSYS Mechanical APDL* foi feita através da linguagem conhecida como *ANSYS Parametric Design Language*. Similarmente a qualquer linguagem de programação (PASCAL, C++, FORTRAN, etc), a linguagem *APDL* possui recursos para declaração de variáveis, execução de laços, decisões lógicas, atribuição de valores, operadores matemáticos e funções paramétricas.

De uma maneira geral, a modelagem computacional realizada no software *ANSYS Mechanical APDL* divide-se em três etapas principais, que serão detalhadas nos próximos itens: pré-processamento; solução (processamento); e pós-processamento.

#### 3.1.1. Pré-processamento

Na primeira fase, em suma, caracteriza-se o problema, definindo os elementos que serão utilizados, atribuindo as propriedades dos materiais, definindo a geometria do modelo e o discretizando. Logo, o pré-processamento é a etapa responsável por:

##### a) Modelagem da massa de concreto

A análise térmica bidimensional começa pela definição da geometria da seção transversal dos elementos analisados. Neste estudo considerou-se dois grupos de vigas cujas dimensões variam em 20x50 cm e 25x70 cm.

##### b) Atribuição dos parâmetros térmicos do concreto variáveis com a temperatura

Foram consideradas variáveis as propriedades de massa específica, condutividade térmica e calor específico para umidade igual a 0% em peso, conforme item 2.1.1.

##### c) Escolha do elemento finito

O elemento utilizado na modelagem do concreto foi o PLANE55 (*2-D Thermal Solid*), que pode ser utilizado como elemento plano com capacidade de condução térmica 2-D, em regime estacionário ou transiente. O elemento possui quatro nós com um único grau de liberdade, a temperatura. A sua geometria é ilustrada abaixo na Figura 3.1.

Após a modelagem da seção transversal, a massa de concreto é discretizada em segmentos menores, formando a malha de elementos finitos usada na análise. As temperaturas são calculadas nos cantos desses elementos, que são chamados de nós.

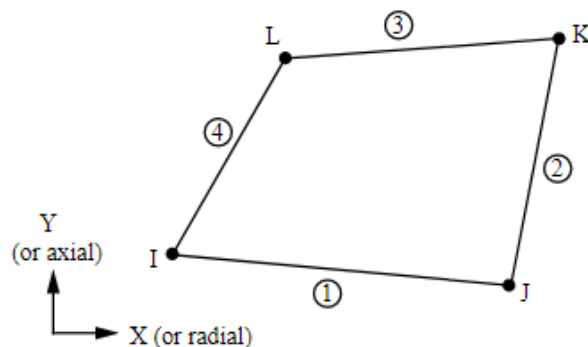


**Figura 3.1 - Geometria do elemento finito quadrilátero PLANE55 (2-D Thermal Solid)**

Fonte: *Mechanical APDL Structural Analysis Guide* (2013)

A temperatura de um elemento finito é uma média das temperaturas em seus nós. Assim, melhores aproximações da temperatura em qualquer local em um membro estrutural são obtidas com malhas mais refinadas. No entanto, se uma malha for muito refinada, o tempo de análise aumenta significativamente com pouca melhoria em precisão, portanto, é necessário um equilíbrio entre alta precisão e tempo de execução da análise.

A divisão do domínio é feita de acordo com o tamanho dos elementos atribuídos no comando "Size Controls", disponível em "Mesh Tool" no menu "Meshing".

### 3.1.2. Processamento

A solução (processamento) é a etapa principal da simulação numérica. Consiste na resolução das equações de conservação pelo software, onde se define o tipo de análise e as condições de contorno do problema. Tem-se como objetivo obter as temperaturas em todos os nós da malha de elementos finitos que a estrutura foi discretizada, para variados tempos de exposição ao fogo.

#### a) Definição do tipo de análise

Conforme o guia de análise térmica do *software ANSYS Mechanical APDL*, a base fundamental para a análise térmica é a equação diferencial do balanço de energia em um volume de controle, obtida através do princípio de conservação de energia.

Neste estudo, foi feita uma análise térmica transiente das estruturas analisadas. Nesta situação, considera-se as propriedades dos materiais variáveis para um dado período de tempo. Em uma análise térmica estacionária, a solução do problema é dada ignorando a variação destas condições.

As propriedades dos materiais, definidas na etapa de pré-processamento, são consideradas no problema automaticamente ao atualizar a matriz correspondente conforme a

temperatura média dos elementos em cada passo de tempo ou *time step*. Adotou-se um *time step* de 1 s, visto que, segundo a literatura e apresentado por Amaral (2018), simulações com esse passo de tempo conduzem a resultados satisfatórios, e possuem um tempo médio de processamento inferior a 5 min.

A temperatura média do elemento é calculada a partir da temperatura de cada um dos nós que o constitui, porque cada nó do elemento pode apresentar uma diferente temperatura. O resultado da análise térmica consiste na determinação das temperaturas em cada nó da malha discretizada da seção transversal da estrutura.

#### b) Definição das condições de contorno e iniciais

Foram considerados os efeitos da convecção e da radiação de calor como condição de contorno nas paredes externas laterais e inferior da seção transversal, conforme Figura 3.2. A face superior foi considerada adiabática, como hipótese simplificada de casos de viga sob laje. Cabe destacar que a laje não foi admitida como elemento contribuinte ao momento fletor resistente da viga, senão como uma proteção térmica.

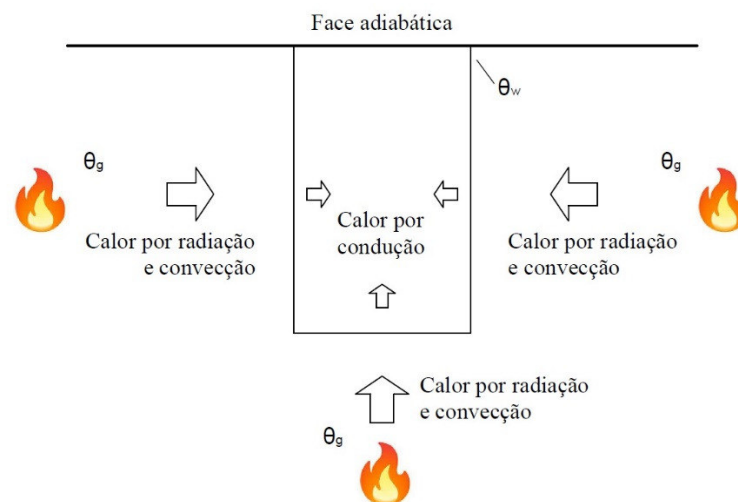


**Figura 3.2 - Condições de contorno para análise térmica computacional**

Fonte: elaborada pela autora

Foi considerada a ação térmica da curva de incêndio padrão ISO 834 por 90 min (equivalente ao TRRF) na estrutura, conforme Equação (2.1), por ser a mais utilizada em pesquisas numéricas e experimentais envolvendo a temática de incêndio e por cumprir as exigências prescritivas de segurança contra incêndio apresentadas em normas e regulamentos, conforme Costa e Silva (2006). A temperatura inicial da estrutura foi considerada igual a 20°C.

A elevação da temperatura na superfície da viga, relacionada com a radiação e a convecção, foi determinada conforme método simplificado de Wickström (1986), enquanto que a variação de temperatura devido à condução no interior da viga, será resolvida de acordo com a Lei de Fourier e o Método dos Elementos Finitos.

A partir do Método de Wickström, detalhado no item 2.1.4.1, inserindo a Equação (2.1) e a Equação (2.8) na Equação (2.7) e, além disso, convertendo-se a unidade do tempo para segundos, obtém-se a Equação (3.1) para a temperatura na superfície da viga, em função do tempo:

$$\theta_w = \theta_0 + \left[ 1 - 0,0616 \left( \frac{t}{3600} \right)^{-0,88} \right] 345 \log_{10} \left[ 8 \left( \frac{t}{60} \right) + 1 \right] \quad (3.1)$$

onde  $\theta_0$  é a temperatura ambiente antes do início do aquecimento ( $^{\circ}\text{C}$ ); e  $t$  é o tempo (seg).

Conforme detalhado em Amaral (2018), para valores de tempo inferiores a 152 segundos, a Equação (3.1) resulta em temperaturas negativas, fez-se o seguinte ajuste, a favor da segurança, a fim de obter valores mais representativos para a temperatura na superfície da viga, em função do tempo:

$$\theta_w = \theta_0 + \left[ 1 - 0,0616 \left( \frac{t + 152}{3600} \right)^{-0,88} \right] 345 \log_{10} \left[ 8 \left( \frac{t}{60} \right) + 1 \right] \quad (3.2)$$

A Equação (3.2) foi utilizada como parâmetro de entrada na modelagem para a análise térmica transiente que, conforme o *ANSYS Mechanical APDL Thermal Analysis Guide* (2013), a relação tempo-temperatura é convertida em uma relação de fluxo de calor-tempo e é aplicada à superfície exposta do componente estrutural, como entrada para o modelo.

### c) Hipóteses simplificadoras

Na modelagem computacional da seção transversal foram desconsideradas as barras de aço presentes na massa de concreto, pois a resistência térmica do aço é muito menor que a do concreto, assim, assume-se que o aço irá absorver instantaneamente a temperatura do concreto e, portanto, consideram-se apenas as propriedades do concreto sensíveis à ação térmica.

Desprezaram-se todos os esforços decorrentes de deformações impostas, por serem muito reduzidos e pelas grandes deformações plásticas que ocorrem em situação de incêndio. Assim, a ação do incêndio se traduz apenas na redução da resistência dos materiais e na capacidade do elemento estrutural.

Na análise térmica da seção de concreto exposta ao fogo, conforme Silva (2016), desconsiderou-se o *spalling*, pois, em concretos com resistência convencional ( $f_{ck} \leq 50 \text{ MPa}$ ),

tal fenômeno possui ocorrência aleatória, sendo assim, antieconômico tentar soluções para evitá-lo.

### 3.1.3. Pós-processamento

E, finalmente, na etapa de pós-processamento, os resultados obtidos na etapa anterior são analisados. Nessa fase são identificados problemas relacionados a todas as etapas anteriores. Encontrados os problemas, volta-se ao passo referente, corrige-se e reinicia-se a análise. Na etapa de pós-processamento os softwares comerciais estão equipados com versáteis ferramentas para a análise e apresentação dos resultados através de gráficos e listas de resultados (*outputs*). Os principais resultados esperados da análise térmica realizada são as temperaturas nos nós da malha de elementos finitos.

### 3.1.4. Teste de convergência de malha

A exatidão da solução é governada pelo número de elementos finitos da malha. Em geral, quanto maior o número de elementos, maior a exatidão. Porém, quanto mais refinada a malha maior o esforço computacional. Logo, é importante saber a condição de refinamento do modelo numérico em virtude dos resultados que se pretende obter e do tempo disponível para realizar o estudo.

A seguir, na Tabela 3.2, são apresentados os resultados dos testes de convergência para especificar o tamanho das malhas que apresentaram um resultado mais satisfatório e um tempo hábil de processamento para serem aplicadas neste trabalho, considerando as duas seções de vigas alvo do estudo.

Através da análise dos resultados obtidos, o domínio computacional, para aplicação do Método dos Elementos Finitos, foi discretizado por uma malha quadrada com 0,50 cm de lado, conforme Figura 3.3, definida através do teste de convergência de malha apresentado na Tabela 3.2. Os resultados foram considerados satisfatórios quando a diferença entre a temperatura interna no concreto em um ponto específico, para duas malhas consecutivas, é inferior à 0,5%.

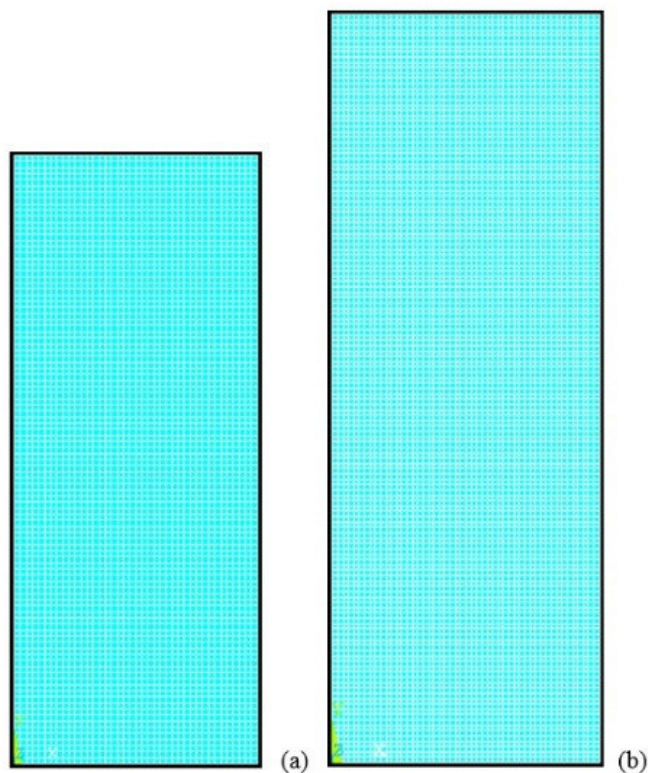


**Figura 3.3 - Discretização do modelo 2-D das seções 20x50 cm (a) e 25x70 cm (b) de concreto**  
 Fonte: ANSYS Mechanical APDL ANSYS

**Tabela 3.2 - Teste de convergência de malha**

| Malha | Viga          |               | Lado<br>Elemento (cm) | Nº de<br>elementos | Nó   | Temperatura*<br>(°C) | DPR** |
|-------|---------------|---------------|-----------------------|--------------------|------|----------------------|-------|
|       | <i>b</i> (cm) | <i>h</i> (cm) |                       |                    |      |                      |       |
| 1     | 20            | 50            | 5,00                  | 40                 | 29   | 504,58               | -     |
| 2     | 20            | 50            | 2,50                  | 160                | 77   | 517,59               | 2,55% |
| 3     | 20            | 50            | 1,00                  | 1000               | 341  | 522,55               | 0,95% |
| 4     | 20            | 50            | 0,50                  | 4000               | 1181 | 523,35               | 0,15% |
| 5     | 20            | 50            | 0,25                  | 16000              | 4361 | 523,54               | 0,04% |
| 1     | 25            | 70            | 5,00                  | 70                 | 39   | 497,03               | -     |
| 2     | 25            | 70            | 2,50                  | 280                | 105  | 509,71               | 2,52% |
| 3     | 25            | 70            | 1,00                  | 1750               | 471  | 514,54               | 0,94% |
| 4     | 25            | 70            | 0,50                  | 7000               | 1641 | 515,32               | 0,15% |
| 5     | 25            | 70            | 0,25                  | 28000              | 6081 | 515,51               | 0,04% |

\* temperatura no concreto, a uma profundidade  $x=y=5\text{cm}$ , para 90 min de incêndio padrão.  
 \*\* Diferença Percentual Relativa: medida da mudança em um valor relativo à média desse valor.

### 3.2. MOMENTO RESISTENTE EM SITUAÇÃO DE INCÊNDIO

A determinação do momento resistente de cálculo em situação de incêndio foi feita após a análise térmica realizada no software *ANSYS Mechanical APDL*, de posse dos *outputs* contendo os dados das temperaturas nos nós da seção transversal de concreto discretizada.

A partir das temperaturas de cada nó, são determinados os fatores de redução de resistência dos materiais:  $k_{c,\theta i}$  para cada nó dos elementos finitos de concreto comprimido e  $k_{s,\theta i}$  para cada barra de aço (considerando a temperatura da barra igual a temperatura do concreto no seu eixo). Os valores são obtidos através de interpolação linear dos valores encontrados na NBR 15200 (ABNT, 2012), conforme Tabela 2.1 e Tabela 2.2.

Após, calcula-se a força resultante de cálculo em situação de incêndio na armadura, dada pela Equação (3.3):

$$F_{sd,fi} = \frac{f_{yk}}{\gamma_{s,fi}} \sum_{i=1}^n k_{s,\theta i} A_{si} \quad (3.3)$$

onde  $F_{sd,fi}$  é a força resultante de cálculo na armadura, em situação de incêndio (kN);  $f_{yk}$  é a resistência característica à tração do aço, à temperatura ambiente (kN/cm<sup>2</sup>);  $\gamma_{s,fi}$  é o coeficiente de ponderação da resistência do aço, em situação de incêndio valor igual a 1,0 (adimensional);  $k_{s,\theta i}$  é o fator de redução da resistência, à temperatura  $\theta$ , da barra de aço  $i$  (adimensional); e  $A_{si}$  é a área da barra de aço  $i$  (cm<sup>2</sup>).

A força resultante de cálculo no bloco de concreto comprimido, em situação de incêndio, é dada por:

$$F_{cd,fi} = \alpha_{fi} \frac{f_{ck}}{\gamma_{c,fi}} \sum_{j=1}^m k_{c,\theta j} A_{cj} \quad (3.4)$$

onde  $F_{cd,fi}$  é a força resultante de cálculo no bloco de concreto comprimido, em situação de incêndio (kN);  $\alpha_{fi}$  é o redutor do valor de cálculo da resistência à compressão, em situação de incêndio valor igual a 1,0 (adimensional);  $f_{ck}$  é a resistência característica à compressão do concreto, à temperatura ambiente (kN/cm<sup>2</sup>);  $\gamma_{c,fi}$  é o coeficiente de ponderação da resistência do concreto, em situação de incêndio valor igual a 1,0 (adimensional);  $k_{c,\theta j}$  é o fator de redução da resistência, à temperatura  $\theta$ , correspondente ao nó  $j$  do elemento finito de concreto comprimido (adimensional); e  $A_{cj}$  é a área correspondente ao nó  $j$  do elemento finito de concreto comprimido (cm<sup>2</sup>).

Para a determinação da força resultante de cálculo em situação de incêndio no bloco de concreto comprimido, tem-se a temperatura em cada nó das extremidades dos elementos finitos que discretizam a seção de concreto. Portanto, é necessário considerar a área correspondente de cada elemento finito de concreto comprimido, dada por:

$$A_{cj} = h_{j,fi} b_j \quad (3.5)$$

onde  $h_{j,fi}$  é a altura (cm) correspondente ao nó  $j$  do elemento finito de concreto comprimido (para nós situados na extremidade da seção considera-se valor igual a metade da altura do elemento finito utilizado, ou seja, 0,25 cm; para os demais nós considera-se o valor igual à própria altura do elemento finito utilizado, ou seja, 0,5 cm); e  $b_j$  é a largura (cm) correspondente ao nó  $j$  do elemento finito de concreto comprimido (para nós situados na extremidade da seção considera-se valor igual a metade da largura do elemento finito utilizado, ou seja, 0,25 cm; para os demais nós considera-se o valor igual à própria largura do elemento finito utilizado, ou seja, 0,5 cm).

Considerando o equacionamento de resolução de problemas de flexão simples, com base no equilíbrio das forças resultantes nas barras de aço tracionadas e no bloco de concreto comprimido, é possível determinar o braço de alavanca relativo a esse bloco, que consiste na principal incógnita para a determinação do momento resistente de cálculo em situação de incêndio, conforme ilustrado na Figura 3.4.

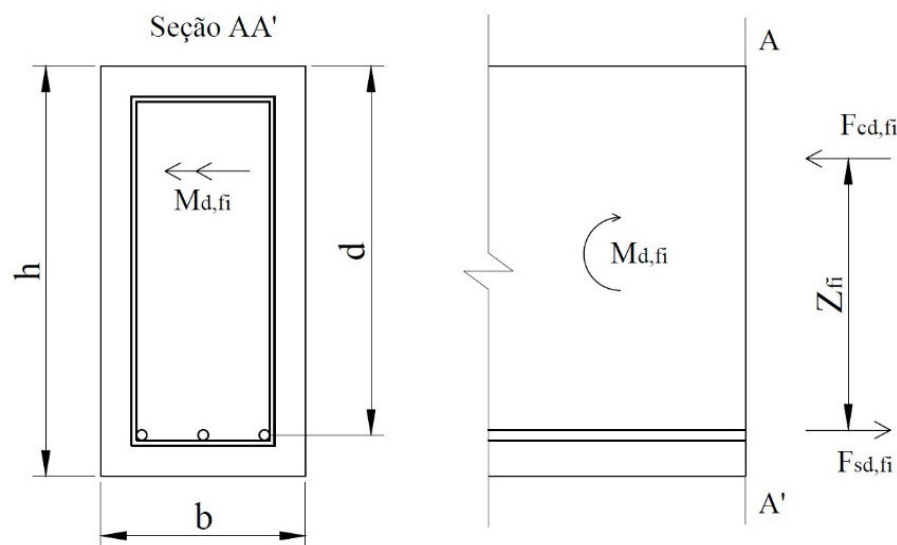


**Figura 3.4 - Equilíbrio das forças de flexão simples em situação de incêndio**

Fonte: elaborada pela autora

Para isso, calcula-se primeiro a força resultante de cálculo em situação de incêndio em cada nó dos elementos finitos de concreto. Depois soma-se esses valores para cada faixa horizontal de nós da seção transversal de concreto. Feito isso, partindo da faixa referente ao bordo superior da seção de concreto comprimido, somam-se as forças resultantes de cálculo de cada faixa de elementos finitos de concreto analisada até que o somatório iguale ou supere a força resultante na armadura tracionada. Tal somatório parcial de determinado número de faixas representa a força resultante em um bloco de concreto comprimido.

Conhecido o número de faixas do bloco de concreto em que a força resultante é superior à força na armadura tracionada, é possível determinar a altura desse bloco e, conseqüentemente, calcular o braço de alavanca para tal condição, dado por:

$$Z_{fi} = d - \frac{y_{fi}}{2} \quad (3.6)$$

onde  $Z_{fi}$  é o braço de alavanca referente ao bloco de concreto, em situação de incêndio, que consiste na distância entre o centro de gravidade (CG) do bloco de concreto comprimido e a linha horizontal que passa pelo CG da armadura tracionada (cm);  $d$  é a altura efetiva da viga, correspondente a distância da borda superior da seção até o CG da armadura (cm); e  $y_{fi}$  é a altura do bloco de concreto comprimido, em situação de incêndio (cm).

Então, através da interpolação linear entre o valor da altura do bloco que superou a força resultante na armadura tracionada e a altura do bloco em que a força resultante no concreto seja imediatamente inferior à força na armadura, calcula-se o braço de alavanca do bloco que satisfaça a condição de equilíbrio das forças, conforme Equação (3.7):

$$F_{cd,fi} \geq F_{sd,fi} \quad (3.7)$$

Por fim, o momento resistente de cálculo em situação de incêndio é dado pela Equação (3.8):

$$M_{Rd,fi} = F_{cd,fi}Z_{fi} = F_{sd,fi}Z_{fi} \quad (3.8)$$

Os valores obtidos para o momento resistente de cálculo em situação de incêndio serão utilizados no decorrer do trabalho para a verificação da análise térmica computacional realizada no software *ANSYS Mechanical APDL*, através de uma comparação com Método das Isotermas dos 500°C do EN 1992-1-2 (2004), além de servirem para a obtenção do valor fator de redução de resistência do concreto ( $k_c$ ), que será utilizado na função Estado Limite Último da análise de confiabilidade.

### 3.3. ANÁLISE PROBABILÍSTICA DE CONFIABILIDADE EM SITUAÇÃO DE INCÊNDIO

A avaliação dos índices de confiabilidade das vigas deste estudo busca determinar a probabilidade de falha das estruturas em situação de incêndio e se inicia com a definição da função estado limite que governa o problema.

### 3.3.1. Função Estado Limite Último

A análise de confiabilidade das vigas em situação de incêndio no ELU para flexão é dada por:

$$g(X) = R(Y) - S(Z) \quad (3.9)$$

onde  $X$  é o vetor de variáveis aleatórias do problema;  $R(Y)$  é a função de variáveis aleatórias que representa o momento resistente do elemento estrutural; e  $S(Z)$  é a função de variáveis aleatórias que representa o momento solicitante.

Considerando o equilíbrio da seção transversal, como indicado na Figura 3.4, tem-se que o momento fletor resistente em situação de incêndio é dado pela Equação (3.10), com  $Z_{fi} = d - 0,5y_{fi}$ :

$$M_{R,fi} = \frac{A_s k_s f_{yk}}{\gamma_{s,fi}} Z_{fi} \quad (3.10)$$

A profundidade  $y_{fi}$  da linha neutra é obtida a partir da Equação (3.11) de equilíbrio de forças:

$$b_n y_{fi} \left( \alpha_{fi} \frac{k_c f_{ck}}{\gamma_{c,fi}} \right) = A_s \frac{k_s f_{yk}}{\gamma_{s,fi}} \quad (3.11)$$

onde  $\gamma_{c,fi} = 1,0$ ,  $\gamma_{s,fi} = 1,0$  e  $\alpha_{fi} = 1,0$  conforme ABNT NBR 15200 (2012).

Logo:

$$y_{fi} = \frac{A_s k_s f_{yk}}{k_c f_{ck} b_n} \quad (3.12)$$

Substituindo a Equação (3.12) na Equação (3.10), tem-se que o momento fletor resistente em situação de incêndio é dado pela Equação (3.13):

$$M_{R,fi} = A_s k_s f_{yk} * \left( d_n - 0,5 \frac{A_s k_s f_{yk}}{k_c f_{ck} b_n} \right) \quad (3.13)$$

Em termos das variáveis contidas nos vetores  $Y = \{f_c, f_y, b, d, E_{m,r}\}$  e  $Z = \{M_G, M_Q, E_{m,s}\}$ , a função ELU pode ser reescrita conforme a Equação (3.14):

$$g(X) = E_{m,r} \left[ A_s k_s f_y * \left( d_n - 0,5 \frac{A_s k_s f_y}{k_c f_c b_n} \right) \right] - E_{m,s} [M_G + M_Q] \quad (3.14)$$

Os valores utilizados para os coeficientes de redução da resistência do aço e do concreto foram os obtidos após a análise térmica realizada no *ANSYS Mechanical APDL*, conforme o item 3.1. Para a determinação do fator de redução de resistência do aço ( $k_s$ ), considerou-se o valor médio obtido para o valor de  $k_{s,\theta_i}$  de cada barra de aço (considerando a temperatura da barra igual a temperatura do concreto no seu eixo), e para a determinação do fator de redução

de resistência do concreto ( $k_c$ ), utilizou-se o valor da força resultante de cálculo no bloco de concreto comprimido, em situação de incêndio, conforme item 3.2.

Na parcela que representa o momento solicitante, nos valores relativos às variáveis aleatórias de carregamento, foram considerados os esforços solicitantes característicos em temperatura ambiente: o momento solicitante de cálculo  $M_{Sd}$  é considerado igual ao momento resistente de cálculo em temperatura ambiente  $M_{Rd}$ , sendo que para a determinação dos carregamentos característicos, empregou-se os coeficientes de ponderação para combinação normal das ações dados pela NBR 8681 (ABNT, 2004). Os valores de *bias* e os coeficientes de variação utilizados na análise foram os correspondentes a um instante arbitrário do tempo (*Arbitrary Point in Time*), uma vez que, de acordo com Ellingwood (2005), a probabilidade de coincidência de um incêndio com valores máximos de carregamento variável é insignificante, e é provável que uma estrutura seja carregada com apenas uma fração de carregamento variável quando ocorre um incêndio.

Portanto, baseado na regra de Turkstra (1970), convém o uso da combinação de carga variável em um instante arbitrário ao longo do tempo para análise de confiabilidade em condições de incêndio. Isso também é consistente com a recomendação de Iqbal e Harichandran (2011) e Beck (2022).

A Tabela 3.3 apresenta um resumo dos parâmetros estatísticos das variáveis aleatórias básicas presentes na função Estado Limite Último considerada neste trabalho (média, coeficiente de variação e tipo de distribuição de probabilidade).

**Tabela 3.3 - Resumo dos parâmetros estatísticos das variáveis aleatórias**

| Variável    | Distribuição | $\mu$    | c.v. | Fonte                      |
|-------------|--------------|----------|------|----------------------------|
| fc (25 MPa) | normal       | 1,25 fck | 0,17 | Santiago (2019)            |
| fc (35 MPa) | normal       | 1,19 fck | 0,13 | Santiago (2019)            |
| fy          | normal       | 1,22 fyk | 0,04 | Santiago (2019)            |
| b           | normal       | 1,01 bn  | 0,04 | Eamon e Jensen (2013b)     |
| d           | normal       | 0,99 dn  | 0,04 | Eamon e Jensen (2013b)     |
| Em,r        | normal       | 1,02     | 0,06 | Nowak <i>et al.</i> (2011) |
| Mg          | normal       | 1,06 Mgk | 0,12 | Beck <i>et al.</i> (2023)  |
| Mq          | gamma        | 0,21 Mqk | 0,76 | Beck <i>et al.</i> (2023)  |
| Em,s        | lognormal    | 1,00     | 0,05 | Beck (2022)                |

Considerando que foram assumidos valores para a razão de carregamento  $r = 0,25; 0,5; 1,0; 1,5$  e  $2,0$ , no total, foram analisadas duas áreas de seções transversais de vigas, em cinco situações de carregamento, para dois valores de  $f_{ck}$ , diferentes áreas de armadura longitudinal,

dois tipos de agregados e duas classes de agressividade ambiental, totalizando 360 situações de projeto.

No Apêndice B são apresentadas as variáveis aleatórias de solicitação em situação de incêndio para as razões entre carregamento variável e permanente consideradas neste estudo, para todas as vigas analisadas.

### 3.3.2. Índice de confiabilidade

Conforme Minasi (2016), o índice de confiabilidade das vigas pode ser determinada com a utilização de uma ferramenta que permita a solução de problemas de minimização. Para o procedimento adotado neste trabalho, foi utilizada a ferramenta *Solver*, integrada ao *software MS Excel*. Essa ferramenta recebe como dados de entrada as condições de restrição do problema na função de estado limite e determina a menor distância ( $\beta$ ) entre a origem do sistema de variáveis transformadas e a superfície de falha.

A metodologia para o cálculo do índice de confiabilidade através do Método FORM é baseada no modelo Hasofer-Lind proposto por Low e Tang (1997). Em Low e Tang (2007), tal metodologia foi desenvolvida no *software MS Excel*, através da linguagem de programação *Visual Basic for Applications* (VBA), própria desta ferramenta.

A planilha eletrônica desenvolvida por Low e Tang (2007) é de fácil utilização e baseada em uma rotina de otimização. Submetendo à função estado limite a restrição  $g(x) = 0$ , a ferramenta *Solver* calcula os valores do ponto de projeto ( $x_i^*$ ) e, conseqüentemente de  $\beta$ , através da alteração automática dos valores de  $z_i^*$  na Equação (2.30).

Após encontrar a distância mínima entre o ponto de falha e a origem do sistema, é possível determinar o valor do índice de confiabilidade( $\beta$ ), de acordo com a Equação (3.15), onde  $z$  é o vetor coluna de  $z_i$ ,  $[z]^T$  é sua transposta, e  $[R]^{-1}$  é a inversa da matriz de correlação.

$$\beta = \min_{x \in F} \{ [z]^T [R]^{-1} [z] \}^{1/2} \quad (3.15)$$

Por conseguinte, calculam-se também os cossenos diretores ( $\alpha_i$ ), permitindo-se efetuar a análise de sensibilidade em relação às variáveis, e a probabilidade de falha ( $P_f$ ) correspondente.

Os dados de entrada na planilha eletrônica são os valores da média e desvio padrão das variáveis aleatórias de resistência e solicitação envolvidas na função estado limite que descreve o problema, bem como o tipo de distribuição de cada variável, conforme apresentado na Tabela 3.3.

### 3.3.3. Índice de confiabilidade alvo

A determinação do  $\beta_{t,fi}$  adotada neste estudo foi a sugerida por Beck (2022), através da média ponderada dos índices de confiabilidade obtidos nas análises de confiabilidade baseadas nas verificações de norma, considerando o peso correspondente de cada razão entre ações variáveis e permanentes, conforme Equação (3.17):

$$\beta_{t,fi} = \sum_i \sum_j w_{ij} \beta_{ij} \quad (3.16)$$

sendo  $w_{ij}$  dado conforme Tabela 2.13 e  $\beta_{ij}$  conforme Equação (3.15).

## 3.4. CALIBRAÇÃO DOS COEFICIENTES PARCIAIS DE SEGURANÇA

O problema de calibração proposto busca, de forma iterativa, a obtenção do conjunto dos coeficientes parciais de segurança da combinação última excepcional de ações em situação de incêndio que minimizem as variações da função objetivo entre os índices de confiabilidade de cada ponto de calibração  $\beta_{ij}(\Psi_0)$  e o índice de confiabilidade alvo  $\beta_{t,fi}$ , conforme descrito no item 2.1.7.

O coeficiente de ponderação para ações variáveis consideradas conjuntamente será  $\gamma_{q,fi} = 1$ , conforme Tabela 2.4 para combinação excepcional em estruturas em geral, e busca-se determinar os valores do coeficiente de ponderação para ações permanentes diretas agrupadas ( $\gamma_{g,fi}$ ) e do fator de combinação utilizado para determinação dos valores reduzidos das ações variáveis ( $\psi_2$ ), para que, assim, as premissas normativas sejam respeitadas.

O processo de calibração foi elaborado na linguagem de programação Python, através de um script iterativo e orientado a objetos, baseado na abordagem de enxame de partículas PSO. Os valores adotados para os parâmetros utilizados no método foram: 2,05 para o coeficiente que contribui com a auto exploração da partícula e também para o que contribui com o movimento da partícula no sentido do deslocamento global do enxame no espaço de busca; 0,5 para o fator de inércia que representa a velocidade inercial da partícula; 30 para o número de partículas e 100 o número máximo de iterações.

Como ponto de partida, a ordem convencional de verificação das estruturas em situação de incêndio é invertida: ao invés da estrutura ser verificada a partir de um carregamento conhecido, é encontrado o carregamento máximo que pode ser imposto às estruturas pré-definidas em situação de incêndio. Desta forma, tem-se que os carregamentos característicos máximos para cada ponto de calibração são dados pela Equação (3.17) e Equação (3.18):

$$M_{g,k} = \frac{M_{Rd,fi}}{(\gamma_{g,fi} + r\psi_2)} \quad (3.17)$$

$$M_{q,k} = rM_{g,k} \quad (3.18)$$

onde  $M_{Rd,fi}$  é a resistência de projeto encontrada com base nas prescrições da norma vigente e que determina o carregamento máximo admitido na seção crítica em situação de incêndio.

Para todas as vigas analisadas, as equações de estado limite são sempre as mesmas e, através da análise de confiabilidade pelo método FORM, conforme descrito no item 3.3, são determinados os índices de confiabilidade  $\beta_{ij}(\Psi_0)$ .

A função objetivo visa minimizar, para todas as combinações de carregamento, as variações entre  $\beta_{ij}(\Psi_0)$  e o índice de confiabilidade alvo  $\beta_{t,fi}$ , conforme Equação (3.19):

$$f(\Psi) = \sum_i \sum_j w_{ij} \left[ \beta_{t,fi} - \beta_{ij}(\gamma_{g,fi}, \psi_2) \right]^2 \quad (3.19)$$

onde valor adotado para o índice de confiabilidade alvo  $\beta_{t,fi}$  segue as orientações de Beck (2022), conforme descrito no item 3.3.3.

## 4. RESULTADOS

Neste capítulo serão apresentados e discutidos os resultados obtidos das análises, de acordo com a metodologia proposta no Capítulo 3.

### 4.1. ANÁLISE TÉRMICA COMPUTACIONAL

Para cada viga caracterizada no item 3, foi realizada a análise térmica no software *ANSYS Mechanical APDL*, conforme descrito no item 3.1. A Figura 4.1 apresenta os gráficos das isothermas obtidos para tempos de 30, 60, 90 e 120 min de exposição ao fogo, respectivamente, para a viga V101.

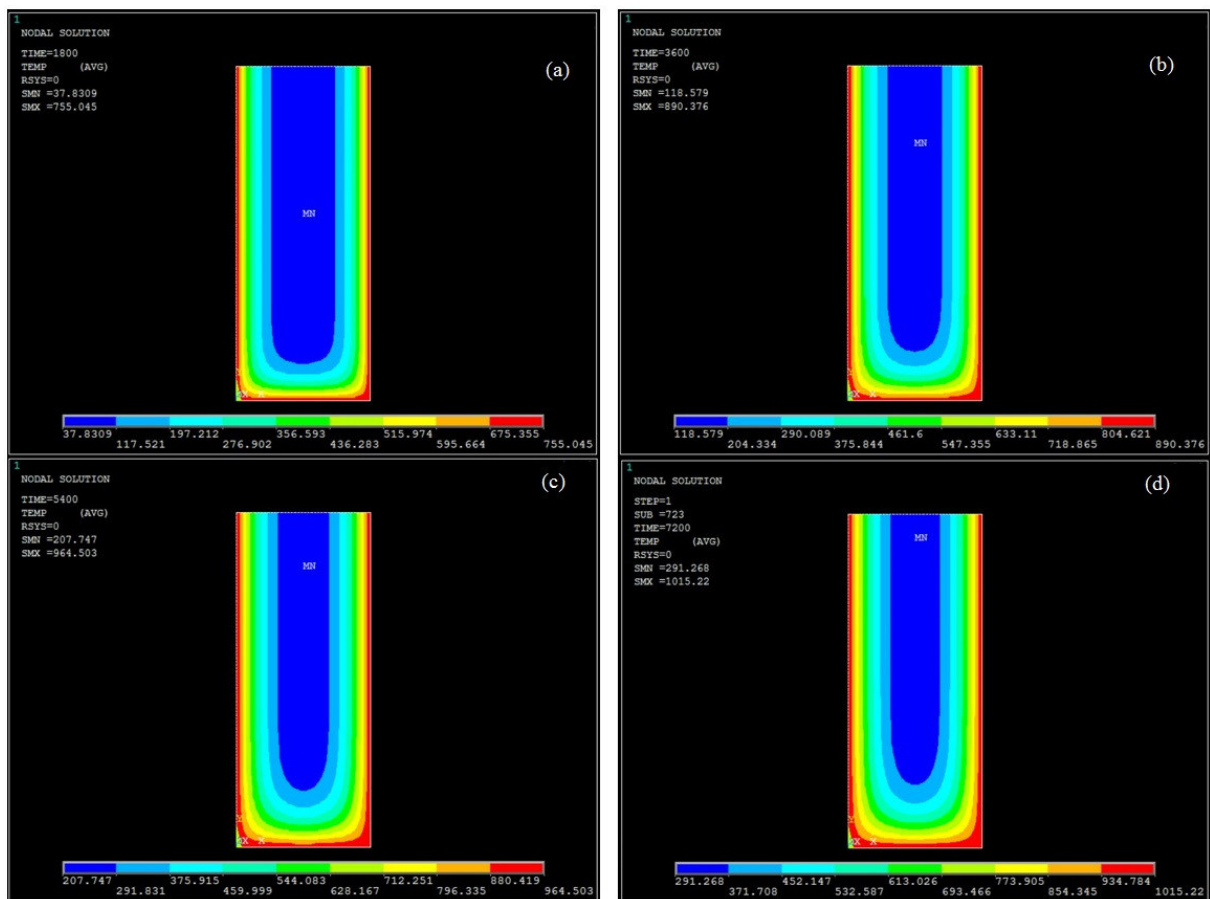


**Figura 4.1 - Isothermas na seção transversal da viga V101 em t=30 min(a), 60 min(b), 90 min(c) e 120 min(d), através da modelagem no ANSYS**

Fonte: Capturas de tela do *software*

Pode-se observar que, conforme o tempo da ação térmica sobre a estrutura aumenta, maiores são os valores da temperatura atingida tanto nas faces expostas, quanto no centro da seção transversal da estrutura. Conclui-se que esta grande variabilidade de temperatura ao longo da seção transversal comprova a importância da análise térmica baseada no Método dos

Elementos Finitos, uma vez que esta servirá de base para a determinação dos coeficientes de redução de resistência dos materiais.

#### 4.1.1. Verificação das temperaturas

Inicialmente verificou-se as temperaturas encontradas na superfície do concreto sob efeito do incêndio padrão ISO 834 ao longo do tempo. A verificação consiste em um comparativo da temperatura na superfície da estrutura conforme Wickström (1986), obtidos conforme método analítico demonstrado no item 2.1.4.1, e o modelado no *ANSYS Mechanical APDL*, para diferentes tempos de duração de incêndio, considerando as vigas de seção 20x50 cm. Os resultados são apresentados na Tabela 4.1.

**Tabela 4.1 - Verificação da temperatura na superfície de concreto (°C)**

| Duração Incêndio<br>Padrão ISO 834<br>(min) | Temperatura<br>Equação de<br>Wickström<br>(°C) | Temperatura ANSYS<br>(nó 10) (°C) | Diferença |      |
|---------------------------------------------|------------------------------------------------|-----------------------------------|-----------|------|
|                                             |                                                |                                   | (°C)      | (%)  |
| 30                                          | 746                                            | 755,05                            | 8,69      | 1,2% |
| 60                                          | 887                                            | 890,38                            | 3,27      | 0,4% |
| 90                                          | 963                                            | 964,5                             | 1,88      | 0,2% |
| 120                                         | 1014                                           | 1015,2                            | 1,27      | 0,1% |

Buscou-se também fazer um comparativo com os resultados encontrados através do método de Wickström, em um ponto distante 5 cm da face inferior e 5 cm da face lateral esquerda da seção, com os valores encontrados na modelagem no *ANSYS Mechanical APDL*, conforme Tabela 4.2:

**Tabela 4.2 - Verificação da temperatura no interior do concreto (°C)**

| Duração<br>Incêndio<br>Padrão ISO<br>834 (min) | x (cm) | y (cm) | nx     | ny     | nw     | Equação de<br>Wickström | ANSYS<br>(nó 1181)<br>V20x50 | Diferença |      |
|------------------------------------------------|--------|--------|--------|--------|--------|-------------------------|------------------------------|-----------|------|
|                                                |        |        |        |        |        |                         |                              | (°C)      | (%)  |
| 30                                             | 5      | 5      | 0,1437 | 0,1437 | 0,8866 | 201,06                  | 200,90                       | -0,16     | 0,1% |
| 60                                             | 5      | 5      | 0,2685 | 0,2685 | 0,9384 | 416,57                  | 387,79                       | -28,78    | 6,9% |
| 90                                             | 5      | 5      | 0,3414 | 0,3414 | 0,9569 | 550,19                  | 523,35                       | -26,84    | 4,9% |
| 120                                            | 5      | 5      | 0,3932 | 0,3932 | 0,9665 | 646,06                  | 627,87                       | -18,19    | 2,8% |

Observando a Tabela 4.1 e Tabela 4.2, nota-se que, embora haja uma diferença maior entre os dados de temperatura na parte interna da seção do concreto em comparação com a variação superficial de temperatura, ainda assim os resultados da verificação do modelo criado

no *ANSYS Mechanical APDL* com a equação de Wickström (1986) são satisfatórios, pois essa diferença é inferior a 30 °C, ou 7%.

## 4.2. MOMENTO RESISTENTE EM SITUAÇÃO DE INCÊNDIO

Considerando um TRRF de 90 min, conforme exigência da NBR 14432 (ABNT, 2001), e de posse dos valores de temperaturas atingidas nos nós da seção transversal de concreto discretizada, foi possível determinar os fatores de redução de resistência dos materiais para cada viga analisada e, conforme item 3.2, determinar o momento resistente de cálculo em situação de incêndio. Os resultados são apresentados na Tabela 4.3 e Tabela 4.4.

**Tabela 4.3 -Momento resistente de cálculo em situação de incêndio Grupo I**

| VIGAS   |      | Fsd,fi<br>(kN) | Zfi<br>(cm) | d (cm) | kc     | ks     | Mrd,fi<br>(kNm) |
|---------|------|----------------|-------------|--------|--------|--------|-----------------|
| GRUPO I | V101 | 57,79          | 45,25       | 46,10  | 0,6806 | 0,5749 | 26,15           |
|         | V102 | 94,22          | 44,62       | 46,00  | 0,6806 | 0,5998 | 42,04           |
|         | V103 | 153,25         | 43,62       | 45,88  | 0,6806 | 0,6244 | 66,85           |
|         | V104 | 185,72         | 42,97       | 45,70  | 0,6806 | 0,6158 | 79,81           |
|         | V105 | 315,09         | 40,87       | 45,50  | 0,6806 | 0,6686 | 128,78          |
|         | V106 | 57,79          | 45,34       | 46,10  | 0,7590 | 0,5749 | 26,20           |
|         | V107 | 94,22          | 44,76       | 46,00  | 0,7590 | 0,5998 | 42,17           |
|         | V108 | 153,25         | 43,86       | 45,88  | 0,7590 | 0,6244 | 67,21           |
|         | V109 | 185,72         | 43,25       | 45,70  | 0,7590 | 0,6158 | 80,33           |
|         | V110 | 315,09         | 41,35       | 45,50  | 0,7590 | 0,6686 | 130,28          |
|         | V111 | 57,79          | 45,49       | 46,10  | 0,6806 | 0,5749 | 26,29           |
|         | V112 | 94,22          | 45,01       | 46,00  | 0,6806 | 0,5998 | 42,41           |
|         | V113 | 153,25         | 44,27       | 45,88  | 0,6806 | 0,6244 | 67,84           |
|         | V114 | 185,72         | 43,75       | 45,70  | 0,6806 | 0,6158 | 81,26           |
|         | V115 | 315,09         | 42,19       | 45,50  | 0,6806 | 0,6686 | 132,94          |
|         | V116 | 57,79          | 45,56       | 46,10  | 0,7590 | 0,5749 | 26,33           |
|         | V117 | 94,22          | 45,12       | 46,00  | 0,7590 | 0,5998 | 42,51           |
|         | V118 | 153,25         | 44,43       | 45,88  | 0,7590 | 0,6244 | 68,09           |
|         | V119 | 185,72         | 43,95       | 45,70  | 0,7590 | 0,6158 | 81,63           |
|         | V120 | 315,09         | 42,53       | 45,50  | 0,7590 | 0,6686 | 134,02          |
|         | V121 | 44,92          | 45,93       | 46,60  | 0,6806 | 0,4468 | 20,63           |
|         | V122 | 74,49          | 45,40       | 46,50  | 0,6806 | 0,4742 | 33,82           |
|         | V123 | 124,00         | 44,56       | 46,38  | 0,6806 | 0,5052 | 55,25           |
|         | V124 | 125,75         | 44,35       | 46,20  | 0,6806 | 0,4169 | 55,77           |
|         | V125 | 258,64         | 42,20       | 46,00  | 0,6806 | 0,5489 | 109,15          |
|         | V126 | 44,92          | 46,02       | 46,60  | 0,7590 | 0,4468 | 20,67           |
|         | V127 | 74,49          | 45,52       | 46,50  | 0,7590 | 0,4742 | 33,91           |
|         | V128 | 124,00         | 44,74       | 46,38  | 0,7590 | 0,5052 | 55,48           |

| VIGAS |      | Fsd,fi<br>(kN) | Zfi<br>(cm) | d (cm) | kc     | ks     | Mrd,fi<br>(kNm) |
|-------|------|----------------|-------------|--------|--------|--------|-----------------|
|       | V129 | 125,75         | 44,54       | 46,20  | 0,7590 | 0,4169 | 56,01           |
|       | V130 | 258,64         | 42,59       | 46,00  | 0,7590 | 0,5489 | 110,16          |
|       | V131 | 44,92          | 46,13       | 46,60  | 0,6806 | 0,4468 | 20,72           |
|       | V132 | 74,49          | 45,71       | 46,50  | 0,6806 | 0,4742 | 34,05           |
|       | V133 | 124,00         | 45,07       | 46,38  | 0,6806 | 0,5052 | 55,89           |
|       | V134 | 125,75         | 44,88       | 46,20  | 0,6806 | 0,4169 | 56,44           |
|       | V135 | 258,64         | 43,28       | 46,00  | 0,6806 | 0,5489 | 111,95          |
|       | V136 | 44,92          | 46,17       | 46,60  | 0,7590 | 0,4468 | 20,74           |
|       | V137 | 74,49          | 45,79       | 46,50  | 0,7590 | 0,4742 | 34,11           |
|       | V138 | 124,00         | 45,21       | 46,38  | 0,7590 | 0,5052 | 56,06           |
|       | V139 | 125,75         | 45,02       | 46,20  | 0,7590 | 0,4169 | 56,61           |
|       | V140 | 258,64         | 43,57       | 46,00  | 0,7590 | 0,5489 | 112,68          |

**Tabela 4.4 - Momento resistente de cálculo em situação de incêndio Grupo II**

| VIGAS    |      | Fsd,fi<br>(kN) | Zfi<br>(cm) | d (cm) | kc     | ks     | Mrd,fi<br>(kNm) |
|----------|------|----------------|-------------|--------|--------|--------|-----------------|
| GRUPO II | V201 | 102,43         | 64,93       | 66,00  | 0,7659 | 0,6521 | 66,51           |
|          | V202 | 166,37         | 64,13       | 65,88  | 0,7659 | 0,6778 | 106,70          |
|          | V203 | 199,31         | 63,61       | 65,70  | 0,7659 | 0,6608 | 126,79          |
|          | V204 | 337,38         | 61,97       | 65,50  | 0,7659 | 0,7159 | 209,09          |
|          | V205 | 102,43         | 65,00       | 66,00  | 0,8245 | 0,6521 | 66,58           |
|          | V206 | 166,37         | 64,26       | 65,88  | 0,8245 | 0,6778 | 106,91          |
|          | V207 | 199,31         | 63,76       | 65,70  | 0,8245 | 0,6608 | 127,09          |
|          | V208 | 337,38         | 62,23       | 65,50  | 0,8245 | 0,7159 | 209,94          |
|          | V209 | 102,43         | 65,23       | 66,00  | 0,7659 | 0,6521 | 66,82           |
|          | V210 | 166,37         | 64,63       | 65,88  | 0,7659 | 0,6778 | 107,53          |
|          | V211 | 199,31         | 64,21       | 65,70  | 0,7659 | 0,6608 | 127,98          |
|          | V212 | 337,38         | 62,98       | 65,50  | 0,7659 | 0,7159 | 212,49          |
|          | V213 | 102,43         | 65,28       | 66,00  | 0,8245 | 0,6521 | 66,87           |
|          | V214 | 166,37         | 64,72       | 65,88  | 0,8245 | 0,6778 | 107,68          |
|          | V215 | 199,31         | 64,32       | 65,70  | 0,8245 | 0,6608 | 128,19          |
|          | V216 | 337,38         | 63,16       | 65,50  | 0,8245 | 0,7159 | 213,09          |
|          | V217 | 84,77          | 65,61       | 66,50  | 0,7659 | 0,5396 | 55,62           |
|          | V218 | 139,23         | 64,92       | 66,38  | 0,7659 | 0,5673 | 90,39           |
|          | V219 | 166,74         | 64,46       | 66,20  | 0,7659 | 0,5529 | 107,48          |
|          | V220 | 277,31         | 63,10       | 66,00  | 0,7659 | 0,5885 | 174,99          |
|          | V221 | 84,77          | 65,67       | 66,50  | 0,8245 | 0,5396 | 55,67           |
|          | V222 | 139,23         | 65,02       | 66,38  | 0,8245 | 0,5673 | 90,53           |
|          | V223 | 166,74         | 64,58       | 66,20  | 0,8245 | 0,5529 | 107,68          |
|          | V224 | 277,31         | 63,31       | 66,00  | 0,8245 | 0,5885 | 175,56          |
|          | V225 | 84,77          | 65,86       | 66,50  | 0,7659 | 0,5396 | 55,83           |
|          | V226 | 139,23         | 65,33       | 66,38  | 0,7659 | 0,5673 | 90,96           |

| VIGAS |      | Fsd,fi<br>(kN) | Zfi<br>(cm) | d (cm) | kc     | ks     | Mrd,fi<br>(kNm) |
|-------|------|----------------|-------------|--------|--------|--------|-----------------|
|       | V227 | 166,74         | 64,96       | 66,20  | 0,7659 | 0,5529 | 108,31          |
|       | V228 | 277,31         | 63,93       | 66,00  | 0,7659 | 0,5885 | 177,28          |
|       | V229 | 84,77          | 65,91       | 66,50  | 0,8245 | 0,5396 | 55,87           |
|       | V230 | 139,23         | 65,41       | 66,38  | 0,8245 | 0,5673 | 91,07           |
|       | V231 | 166,74         | 65,04       | 66,20  | 0,8245 | 0,5529 | 108,45          |
|       | V232 | 277,31         | 64,08       | 66,00  | 0,8245 | 0,5885 | 177,69          |

#### 4.2.1. Verificação do momento resistente de cálculo em situação de incêndio

Dentre os métodos simplificados para verificação da resistência do elemento estrutural, têm-se, conforme a norma Europeia EN 1992-1-2 (2004), o Método da Isoterma dos 500 °C. Este método considera uma redução na seção transversal do elemento suprimindo a região danificada pelo fogo. Considera-se que acima dos 500 °C de temperatura o concreto perde sua resistência à compressão, não mais contribuindo para a capacidade resistente do elemento. O restante da seção responde de maneira usual, ou seja, como se não estivesse exposta ao incêndio.

A verificação do momento resistente de cálculo em situação de incêndio, obtido dos perfis de temperatura resultantes da modelagem no *ANSYS Mechanical APDL* e conforme item 3.2, foi comparado com os valores obtidos através dos Métodos das Isotermas dos 500°C do EN 1992-1-2 (2004), utilizando as mesmas temperaturas e as obtidas através do Método de Wickström (1986), conforme Tabela 4.5 e Tabela 4.6.

Pode-se verificar que os três valores encontrados na verificação do momento resistente de cálculo em situação de incêndio, para os dois grupos de vigas analisadas, são muito próximos, com diferença percentual relativa máxima de 23% quando a comparação é feita considerando as temperaturas na estrutura conforme o método analítico de Wickström (1986).

Considerando a mesma distribuição térmica obtida através da modelagem computacional no software *ANSYS*, o momento resistente de cálculo em situação de incêndio obtido conforme item 3.2 apresenta resultados muito similares aos obtidos pelo Método das Isotermas 500°C, que é um método reconhecido internacionalmente, apresentando uma diferença percentual relativa máxima de 2%.

**Tabela 4.5 -Verificação do Momento Resistente de Cálculo em situação de incêndio Grupo I**

| VIGAS   |      | Momento Resistente de Cálculo em Situação de Incêndio - MRd,fi (kNm) |                                  |                     |
|---------|------|----------------------------------------------------------------------|----------------------------------|---------------------|
|         |      | Temperatura Wickström (°C)                                           | Temperatura modelagem ANSYS (°C) |                     |
|         |      | Método Isoterma 500°C                                                | Método Isoterma 500°C            | Método Simplificado |
| GRUPO I | V101 | 24,33                                                                | 26,16                            | 26,15               |
|         | V102 | 39,27                                                                | 42,05                            | 42,04               |
|         | V103 | 63,13                                                                | 66,88                            | 66,85               |
|         | V104 | 76,90                                                                | 79,85                            | 79,81               |
|         | V105 | 123,06                                                               | 128,89                           | 128,78              |
|         | V106 | 24,33                                                                | 26,16                            | 26,20               |
|         | V107 | 39,27                                                                | 42,05                            | 42,17               |
|         | V108 | 63,13                                                                | 66,88                            | 67,21               |
|         | V109 | 76,90                                                                | 79,85                            | 80,33               |
|         | V110 | 123,06                                                               | 128,89                           | 130,28              |
|         | V111 | 24,45                                                                | 26,30                            | 26,29               |
|         | V112 | 39,59                                                                | 42,42                            | 42,41               |
|         | V113 | 64,00                                                                | 67,86                            | 67,84               |
|         | V114 | 78,22                                                                | 81,28                            | 81,26               |
|         | V115 | 126,79                                                               | 133,03                           | 132,94              |
|         | V116 | 24,45                                                                | 26,30                            | 26,33               |
|         | V117 | 39,59                                                                | 42,42                            | 42,51               |
|         | V118 | 64,00                                                                | 67,86                            | 68,09               |
|         | V119 | 78,22                                                                | 81,28                            | 81,63               |
|         | V120 | 126,79                                                               | 133,03                           | 134,02              |
|         | V121 | 18,93                                                                | 20,27                            | 20,63               |
|         | V122 | 30,74                                                                | 33,83                            | 33,82               |
|         | V123 | 51,49                                                                | 55,26                            | 55,25               |
|         | V124 | 63,90                                                                | 61,32                            | 61,30               |
|         | V125 | 105,05                                                               | 109,22                           | 109,15              |
|         | V126 | 18,93                                                                | 20,27                            | 20,67               |
|         | V127 | 30,74                                                                | 33,83                            | 33,91               |
|         | V128 | 51,49                                                                | 55,26                            | 55,48               |
|         | V129 | 63,90                                                                | 61,32                            | 61,59               |
|         | V130 | 105,05                                                               | 109,22                           | 110,16              |
|         | V131 | 19,00                                                                | 20,35                            | 20,72               |
|         | V132 | 30,93                                                                | 34,06                            | 34,05               |
|         | V133 | 52,04                                                                | 55,90                            | 55,89               |
|         | V134 | 64,77                                                                | 62,13                            | 62,11               |
|         | V135 | 107,61                                                               | 112,01                           | 111,95              |
|         | V136 | 19,00                                                                | 20,35                            | 20,74               |
|         | V137 | 30,93                                                                | 34,06                            | 34,11               |
|         | V138 | 52,04                                                                | 55,90                            | 56,06               |
|         | V139 | 64,77                                                                | 62,13                            | 62,30               |
|         | V140 | 107,61                                                               | 112,01                           | 112,68              |

**Tabela 4.6 - Verificação do Momento Resistente de Cálculo em situação de incêndio Grupo II**

| VIGAS    |      | Momento Resistente de Cálculo em Situação de Incêndio - MRd,fi (kNm) |                                  |                     |
|----------|------|----------------------------------------------------------------------|----------------------------------|---------------------|
|          |      | Temperatura Wickström (°C)                                           | Temperatura modelagem ANSYS (°C) |                     |
|          |      | Método Isoterma 500°C                                                | Método Isoterma 500°C            | Método Simplificado |
| GRUPO II | V201 | 52,79                                                                | 66,48                            | 66,51               |
|          | V202 | 84,69                                                                | 106,64                           | 106,70              |
|          | V203 | 118,74                                                               | 126,70                           | 126,79              |
|          | V204 | 190,78                                                               | 208,82                           | 209,09              |
|          | V205 | 52,79                                                                | 66,48                            | 66,58               |
|          | V206 | 84,69                                                                | 106,64                           | 106,91              |
|          | V207 | 118,74                                                               | 126,70                           | 127,09              |
|          | V208 | 190,78                                                               | 208,82                           | 209,94              |
|          | V209 | 52,99                                                                | 66,80                            | 66,82               |
|          | V210 | 85,22                                                                | 107,48                           | 107,53              |
|          | V211 | 119,80                                                               | 127,91                           | 127,98              |
|          | V212 | 193,65                                                               | 212,29                           | 212,49              |
|          | V213 | 52,99                                                                | 66,80                            | 66,87               |
|          | V214 | 85,22                                                                | 107,48                           | 107,68              |
|          | V215 | 119,80                                                               | 127,91                           | 128,19              |
|          | V216 | 193,65                                                               | 212,29                           | 213,09              |
|          | V217 | 50,26                                                                | 55,60                            | 55,62               |
|          | V218 | 83,02                                                                | 90,34                            | 90,39               |
|          | V219 | 99,95                                                                | 107,41                           | 107,48              |
|          | V220 | 166,67                                                               | 174,80                           | 174,99              |
|          | V221 | 50,26                                                                | 55,60                            | 55,67               |
|          | V222 | 83,02                                                                | 90,34                            | 90,53               |
|          | V223 | 99,95                                                                | 107,41                           | 107,68              |
|          | V224 | 166,67                                                               | 174,80                           | 175,56              |
|          | V225 | 50,44                                                                | 55,82                            | 55,83               |
|          | V226 | 83,52                                                                | 90,93                            | 90,96               |
|          | V227 | 100,68                                                               | 108,26                           | 108,31              |
|          | V228 | 168,79                                                               | 177,15                           | 177,28              |
|          | V229 | 50,44                                                                | 55,82                            | 55,87               |
|          | V230 | 83,52                                                                | 90,93                            | 91,07               |
|          | V231 | 100,68                                                               | 108,26                           | 108,45              |
|          | V232 | 168,79                                                               | 177,15                           | 177,69              |

### 4.3. ANÁLISE PROBABILÍSTICA DE CONFIABILIDADE EM SITUAÇÃO DE INCÊNDIO

Inicialmente foi realizada a análise de confiabilidade das vigas listadas na Tabela 3.1 considerando o tipo de agregado silicoso, CAA-II e  $f_{ck}=25\text{MPa}$ . Os valores são apresentados na Figura 4.2, onde é possível observar que, com o aumento da relação de carregamento variável sobre carregamento permanente, tem-se o aumento do valor do índice de confiabilidade,

conforme demonstrado nos trabalhos de Santos *et al.* (2014b), Eamon e Jensen (2013a) e Pires (2023). Fato este justificado pela maior importância para a carga permanente na combinação última excepcional em situação de incêndio (equivalente à ponderação de carregamentos em um instante arbitrário do tempo), de maneira que quanto maior ela for, maior será a solicitação das vigas em situação de incêndio e, conseqüentemente, menor a confiabilidade.

Observa-se também que os valores de  $\beta$  não são diretamente proporcionais às taxas de armadura, uma vez que seus valores dependem também do número e posição das barras na seção transversal. A altura da seção transversal influencia diretamente nos valores de  $\beta$ . Vigas de maior altura apresentam maiores índices de confiabilidade, mesmo que tenham valores de taxa de armadura muito próximos.

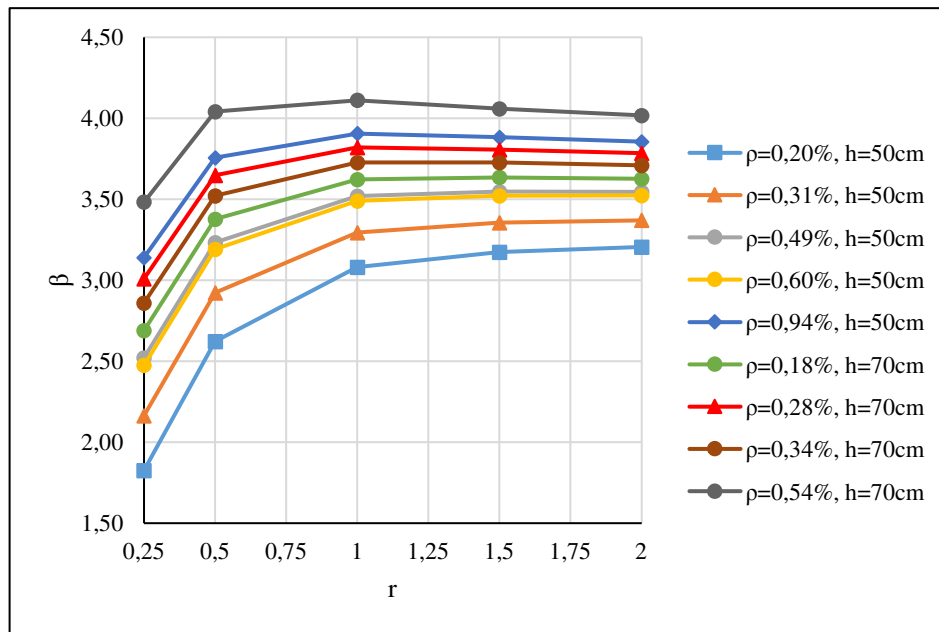


**Figura 4.2 - Índice de confiabilidade para vigas com  $f_{ck}=25\text{MPa}$ , CAA-II e agregado silicoso**

Realizando uma análise paramétrica, a Figura 4.3 apresenta os valores dos índices de confiabilidade das mesmas vigas, agora considerando o valor de  $f_{ck} = 35 \text{ MPa}$ . Observa-se que o aumento da resistência à compressão do concreto apresenta uma baixa influência nos valores encontrados para  $\beta$ , com um ligeiro aumento da probabilidade de falha quando há aumento da resistência à compressão, conforme demonstrado no trabalho de Coelho (2018).

Em princípio, apesar do fato de que maiores valores de  $f_{ck}$  conduzem a  $M_{Rd,fi}$  maiores, este motivo pode ser justificado por existir uma diferenciação entre concretos de resistência normal (C20 até C50) e concretos de alta resistência (C60 até C90), visto que o último grupo demonstrou ter maior suscetibilidade ao *spalling* durante um incêndio do que os concretos de resistência normal. Ironicamente, o concreto de baixa qualidade é pouco suscetível ao

lascamento, tornando-o um concreto de “boa qualidade” para este efeito, considerando que o *spalling* em concretos de alta resistência é um problema comum, provavelmente devido ao aumento da permeabilidade (Wit, 2023).

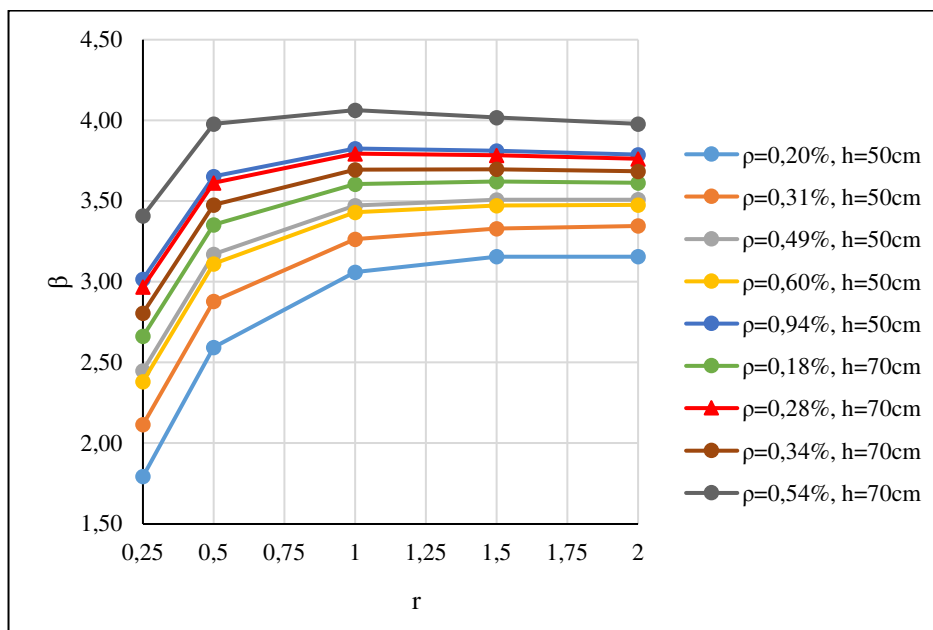


**Figura 4.3 - Índice de confiabilidade para vigas com  $f_{ck}=35\text{MPa}$ , CAA-II e agregado silicoso**

Considerando que o agregado calcáreo faz com que a peça de concreto apresente maior resistência sob temperaturas diferentes da temperatura ambiente, espera-se que uma viga de concreto armado com agregado calcáreo apresente maior confiabilidade em situação de incêndio do que uma viga com agregado tipo silicoso (PIRES, 2023). Fato este é comprovado através da Figura 4.4, onde observa-se uma sutil elevação nos valores de  $\beta$  encontrados, em comparação às vigas com agregado silicoso da Figura 4.2.

Agora, conforme apresentado na Figura 4.5, uma análise paramétrica considerando a variação da classe de agressividade ambiental para CAA-I mostra que os valores dos índices de confiabilidade reduzem significativamente com a diminuição do cobrimento de concreto na armadura. Este fato está diretamente ligado à ação térmica nas barras de aço, que por estarem mais exposta para valores menores de cobrimento, apresentam um fator redutor de resistência maior, o que diminui a capacidade resistente do elemento estrutural.

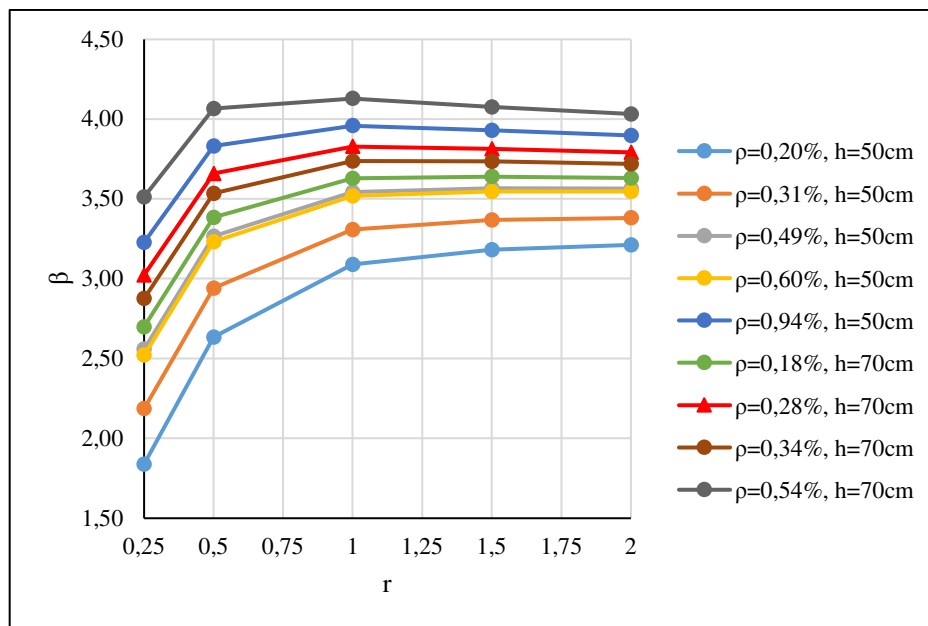


**Figura 4.4 - Índice de confiabilidade para vigas com  $f_{ck}=25\text{MPa}$ , CAA-II e agregado calcário**

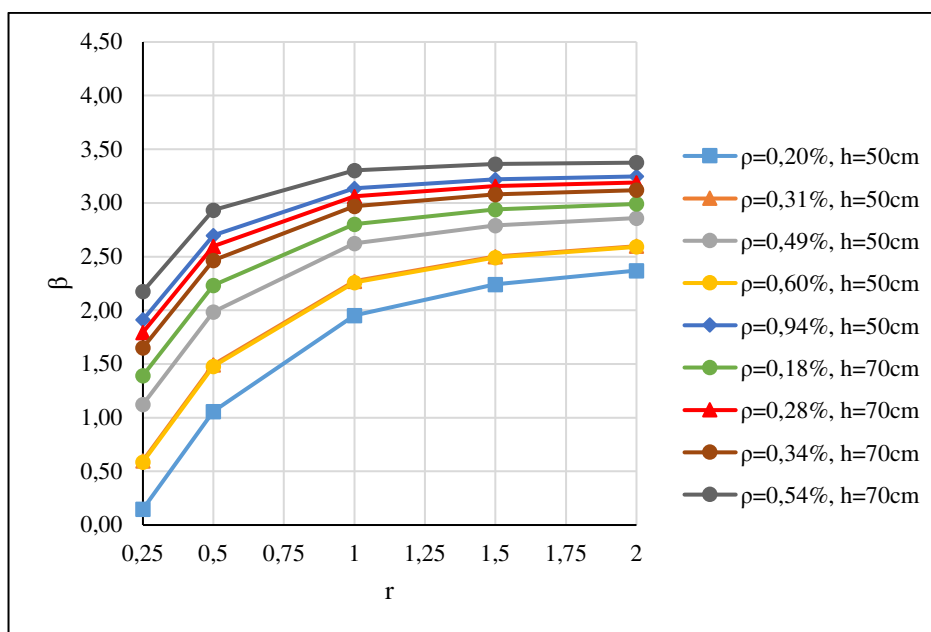


**Figura 4.5 - Índice de confiabilidade para vigas com  $f_{ck}=25\text{MPa}$ , CAA-I e agregado silicoso**

Uma tabela resumo com todos os valores dos índices de confiabilidade e das probabilidades de falha das vigas analisadas é apresentada no Apêndice C.

A Figura 4.6 traz os resultados das análises das vigas em termos da variabilidade do índice de confiabilidade considerando as diversas posições da linha neutra para todas as razões de carregamento. A linha horizontal representa o valor alvo de  $\beta_{t,fi} = 3,0$ , obtido através da média ponderada, conforme relatado no item 3.3.3. As linhas verticais contêm os resultados para todos os valores de  $r$  para a mesma posição da linha neutra, sendo que os pontos no extremo superior referem-se a  $r=2,0$  enquanto que os pontos no extremo inferior representam  $r=0,25$ .

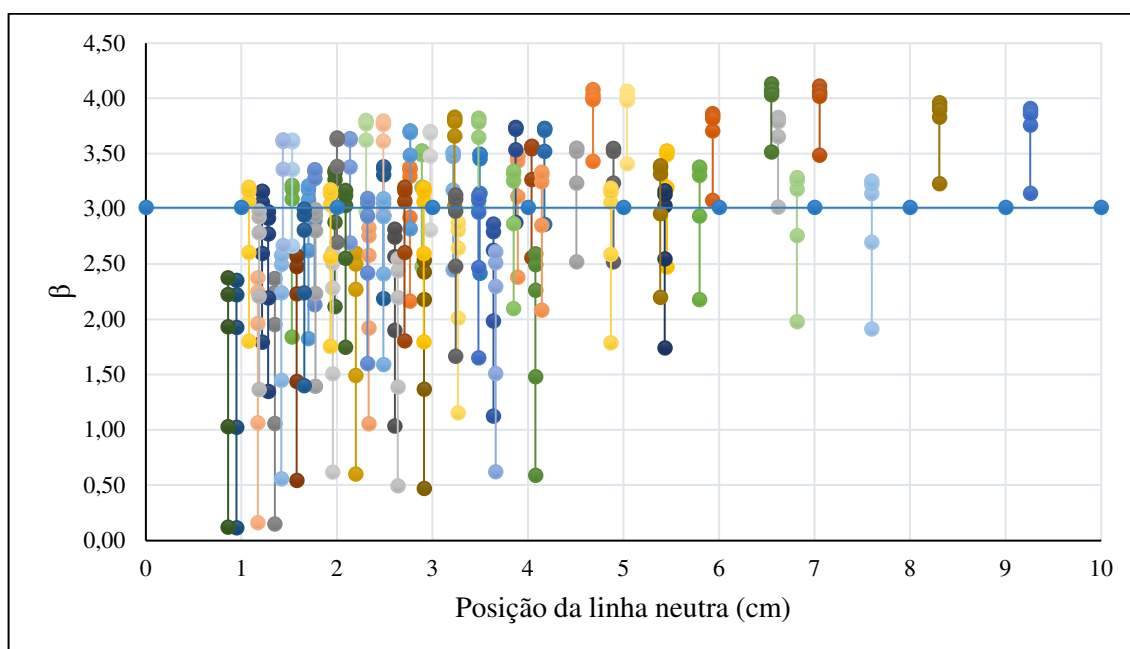


**Figura 4.6 - Variabilidade da segurança das vigas antes do processo de calibração**

Logo, o objetivo do processo de calibração proposto neste estudo é a redução na dispersão dos índices de confiabilidade obtidos para as diferentes configurações de vigas. Em outras palavras, busca-se um conjunto de coeficientes parciais de segurança calibrados que produzam índices de confiabilidade mais uniformes, para as diferentes condições de projeto, mas mantendo a confiabilidade em ou acima dos níveis obtidos através da verificação de norma.

#### 4.4. CALIBRAÇÃO DOS COEFICIENTES PARCIAIS DE SEGURANÇA

A Tabela 4.7 apresenta o conjunto dos coeficientes parciais de segurança atualmente indicado nas normas brasileiras, bem como o correspondente conjunto decorrente do processo de calibração.

**Tabela 4.7 - Coeficientes parciais de segurança calibrados e o impacto nos carregamentos solicitantes de cálculo**

|          | $\gamma_{g,fi}$ | $\gamma_{q,fi}$ | $\psi_2$ | $M_{sd,fi}$ |       |
|----------|-----------------|-----------------|----------|-------------|-------|
|          |                 |                 |          | r=0,5       | r=1,0 |
| Atual    | 1,2             | 1               | 0,3      | 1,31        | 1,41  |
| Proposto | 1               | 1               | 0,82     | 1,41        | 1,82  |

A calibração baseada em confiabilidade resultou na diminuição do coeficiente de segurança do peso próprio ( $\gamma_{g,fi}$ ) que foi compensado pelo aumento do coeficiente de ponderação para ações variáveis.

Conforme demonstrado na Tabela 4.7, para valores típicos em prédios de concreto armado da razão entre os valores nominais de ações variáveis e peso próprio na faixa  $0,5 \leq r \leq 1,0$ , os novos coeficientes implicam no aumento médio do carregamento solicitante na ordem de 23%.

A Figura 4.7 apresenta os valores máximos e mínimos obtidos para os índices de confiabilidade, antes e depois do processo de calibração, e a Figura 4.8 traz os resultados das análises das vigas considerando as diversas posições da linha neutra para todas as razões de carregamento, após o procedimento de calibração. Os resultados mostraram que a calibração dos coeficientes parciais de segurança referente à combinação excepcional última de ações conduziu a uma uniformidade nos índices de confiabilidade das vigas de concreto armado analisadas, para os diversos pontos de calibração.

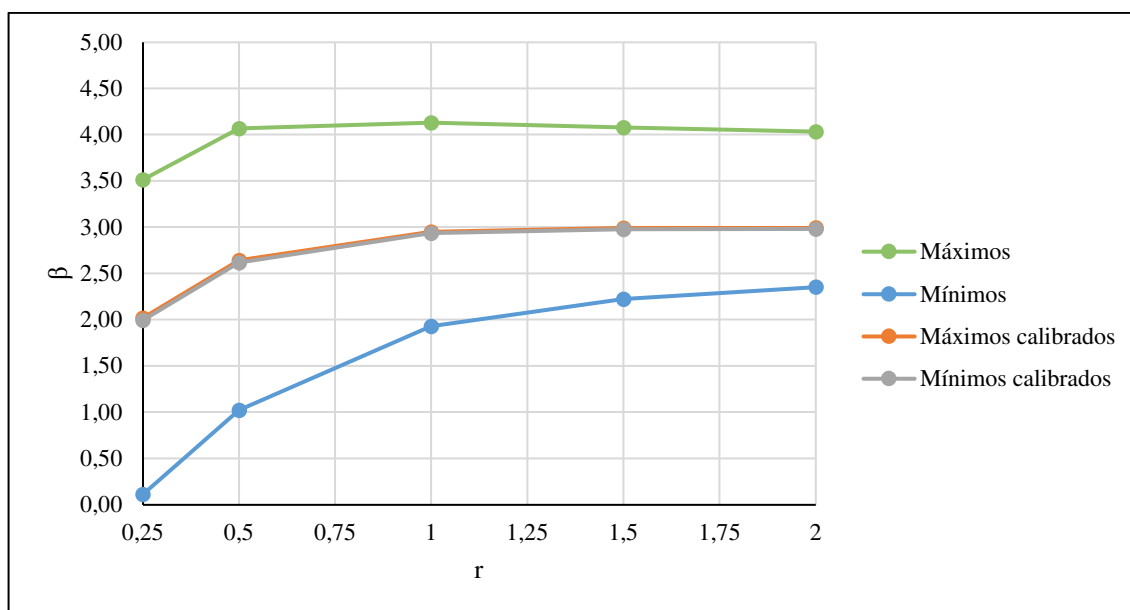


**Figura 4.7 - Comparação índices de confiabilidade máximos e mínimos antes e após calibração**

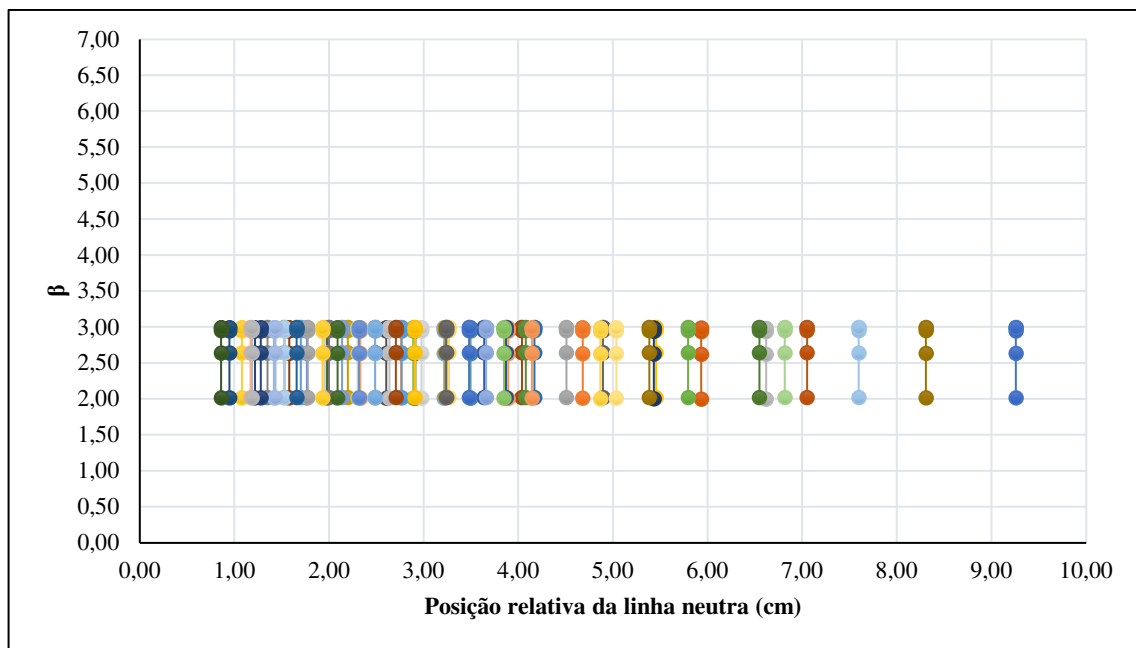


**Figura 4.8 - Variabilidade da segurança das vigas projetadas após o processo de calibração**

## 5. CONCLUSÕES

Através desta tese, uma proposta de calibração baseada em confiabilidade estrutural dos coeficientes parciais de segurança indicados nas principais normas brasileiras para a verificação de estruturas em situação de incêndio foi apresentada.

No capítulo 1, uma breve contextualização do problema foi exposta, juntamente com a motivação, justificativa e os objetivos desejados. Após, o capítulo 2 foi dedicado às revisões da literatura e apresentação dos fundamentos teóricos sobre tópicos relevantes ao trabalho. A partir de então, os capítulos posteriores apresentaram as propostas de metodologias e explanação dos métodos utilizados para o alcance dos objetivos desejados, bem como os resultados obtidos.

Inicialmente, foi realizada a análise térmica de um grupo de vigas consideradas usuais em edifícios de concreto armado. Através da modelagem numérica no software *ANSYS Mechanical APDL*, foi considerada a ação térmica bidimensional transiente proveniente da ação do incêndio padrão ISO 834 (1999), agindo durante o TRRF de 90 min nas estruturas.

A elevação da temperatura na superfície das vigas, relacionada com a radiação e a convecção, foi determinada conforme método simplificado de Wickström (1986), enquanto que a variação de temperatura devido à condução no interior das estruturas, foi resolvida de acordo com a Lei de Fourier e o Método dos Elementos Finitos. Assim, verificou-se a importância de uma análise térmica detalhada, visto que os resultados obtidos conduziram a valores de temperaturas favoráveis à segurança, se comparados com os métodos analíticos presentes na literatura.

De posse dos perfis de distribuição de temperaturas nas seções transversais dos elementos analisados, foi possível determinar os fatores de redução de resistência dos materiais, que foram utilizados para a determinação do momento resistente máximo de cálculo em situação de incêndio das estruturas.

Em seguida, uma análise de confiabilidade da função Estado Limite Último de flexão simples em situação de incêndio, baseada no *First Order Reliability Method* (FORM), considerou as variáveis aleatórias críticas relacionadas à resistência e às solicitações no contexto das práticas construtivas brasileiras. Os valores obtidos para os índices de confiabilidade apresentaram baixa influência com a variação do  $f_{ck}$  e tipo de agregado utilizado. Conforme a proporção de carregamento variável para carregamento permanente aumentou, os valores de  $\beta$  também aumentaram. Além disso, observou-se que a altura de seção transversal e o cobrimento do concreto foram os parâmetros de maior influência na confiabilidade das estruturas.

Com base nos resultados obtidos, concluiu-se que a verificação da segurança proposta pelas normas brasileiras para estruturas de concreto armado em situação de incêndio apresenta uma variação significativa nos níveis de confiabilidade para os diferentes pontos de calibração analisados. Por isso, buscou-se um conjunto de coeficientes parciais de segurança calibrados que produzissem índices de confiabilidade mais uniformes.

Assim, foi desenvolvida uma proposta de calibração dos coeficientes parciais de segurança indicados nas principais normas brasileiras para a combinação última excepcional de ações para verificação de estruturas de concreto armado em situação de incêndio, desenvolvida através de uma metodologia de otimização baseado em confiabilidade (RBDO) e resolvida através de um algoritmo heurístico de enxame de partículas (PSO) programado na linguagem Python.

O índice de confiabilidade alvo para o processo de calibração adotado foi determinado através da média ponderada dos índices de confiabilidade obtidos nas análises de confiabilidade baseadas nas verificações de norma, e resultou na diminuição do coeficiente de segurança do peso próprio ( $\gamma_{g,fi}$ ), que foi compensado pelo aumento do coeficiente de ponderação para ações variáveis, e que conduziram a uma confiabilidade mais uniforme para diferentes situações de projeto e diferentes relações de carregamentos.

Por fim conclui-se que a revisão dos coeficientes parciais de segurança de norma baseada em uma análise probabilística pode ser aconselhável. No entanto, essa recomendação depende de uma investigação mais aprofundada da iniciada neste estudo, pois os resultados obtidos não abrangem todos cenários de projeto cobertos por norma.

As hipóteses simplificativas adotadas mostram que ainda há muito em que se avançar com relação a segurança estrutural em situação de incêndio. Alguns tópicos abordados nesta tese podem ser aprofundados, bem como aplicações diferentes podem ser exploradas através da metodologia proposta.

Considerando que no processo de calibração é importante que sejam consideradas diferentes situações de projeto e solicitações, com vista a permitir que os coeficientes parciais de segurança calibrados sejam representativos, sugere-se que outros tipos de estruturas (lajes e pilares) sujeitas a variados esforços sejam analisadas.

Ainda como sugestões para trabalhos futuros, uma análise térmica transiente não linear, onde possam ser consideradas as deformações térmicas dos materiais impostas na capacidade resistente dos elementos avaliados, bem como demais fatores presentes na edificação, tais como: carga térmica de incêndio específica, sistemas de proteção ativa instalados, ventilação dos

ambientes e a tecnologia construtiva da estrutura podem ser considerados. Da mesma forma, incluir no modelo probabilístico de análise de confiabilidade outras variáveis aleatórias de resistência, tais como: cobrimento da armadura e temperatura máxima do incêndio.

Desde modo, espera-se que, ao término deste trabalho, seja possível construir uma série de decisões que possam contribuir no avanço na análise de estruturas de concreto armado em situação de incêndio no país.

## REFERÊNCIAS

- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **Componentes construtivos estruturais - Determinação da resistência ao fogo: NBR-5628**. Rio de Janeiro, 2001.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **Ações e segurança nas estruturas - Procedimento: NBR-58681**. Rio de Janeiro, 2004.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **Execução de estruturas de concreto - Procedimento: NBR-14931**. Rio de Janeiro, 2004.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **Projeto de estruturas de concreto em situação de incêndio: NBR-15200**. Rio de Janeiro, 2012.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **Projeto de estruturas de concreto - Procedimento: NBR-6118**. Rio de Janeiro, 2023.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **Exigências de resistência ao fogo de elementos construtivos de edificações - Procedimento - NBR 14432**. Rio de Janeiro, 2001.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **Cargas para o cálculo de estruturas de edificações - NBR 6120**. Rio de Janeiro, 2019.
- AMARAL, M. **Dimensionamento de vigas de concreto armado de estruturas portuárias em situação de incêndio**. 2018. Dissertação (Mestrado Engenharia Oceânica) - Escola de Engenharia, Universidade Federal do Rio Grande, Rio Grande, Rio Grande do Sul, 2018.
- ANSYS RELEASE. **ANSYS Mechanical APDL Thermal Analysis Guide**. Canonsburg, 2013.
- ARAÚJO, J. M. DE. **Curso de concreto armado**. Editora Dunas, Rio Grande, 2014.
- ARIOZ, O. Effects of elevated temperatures on properties of concrete. **Fire Safety Journal**, v. 42, n. 8, p. 516–522, 2007.
- BACARJI, E. **Análise de estruturas de edifícios: projeto de pilares**. Dissertação (Mestrado) – Universidade de São Paulo, São Carlos, 1993.
- BECK, A.; MELCHERS, R. **Structural reliability analysis and prediction**. John Wiley & Sons Ltd., 2018.
- BECK, A. T. **Confiabilidade e segurança das estruturas**. Elsevier, ISBN 978-85-352-8895-7, 2019.
- BUCHANAN, A. H.; ABU, A. K. **Structural Design for Fire Safety**. 2a edition.

Chichester, United Kingdom: John Wiley & Sons Ltd., 2017.

COELHO, T. A. P. **Avaliação da Confiabilidade de Seções de Vigas de Concreto Armado em Situação de Incêndio**. 2018. Dissertação (Mestrado Engenharia Civil) - Escola de Engenharia, Universidade Federal do Minas Gerais, Minas Gerais, 2018.

COILE, R. V.. **Reliability-based decision making for concrete elements exposed to fire**. Ghent, Belgium: Ghent University. Faculty of Engineering and Architecture, 2015.

COILE R. V., ANNEREL E., CASPEELE R., TAERWE L. Full-probabilistic analysis of concrete beams during fire. **Journal of Structural Fire Engineering**, v. 4, n. 3, p. 165–174, 2013.

COILE R. V., CASPEELE R., TAERWE L. **Global resistance factor for concrete slabs exposed to fire**. International Conference on Structures in Fire, n. 1, 2012.

CORREIA, R. S.; BONO, G. F. F.; PALIGA, C. M. Evaluation of the reliability of optimized reinforced concrete beams. **Revista IBRACON de Estruturas e Materiais**, v. 15, n. 4, p. 1–12, 2022.

COSTA, C. N. **Dimensionamento de elementos de concreto armado em situação de incêndio**. 2008. Tese (Doutorado Engenharia Civil) - Escola Politécnica da Universidade de São Carlos, UniversidadeDe São Paulo, São Carlos, São Paulo, 2008.

COSTA, C. N.; SILVA, V. P. Revisão histórica das curvas padronizadas de incêndio. **Nutau**, 2006.

COSTA, L. G. L.; SANTIAGO, W. C.; BECK, A. T. Probabilistic models for live loads in buildings: critical review, comparison to Brazilian design standards and calibration of partial safety factors. **Revista IBRACON de Estruturas e Materiais**, v. 16, n. 2, p. 1–21, 2023.

EAMON, C. D.; JENSEN, E. Reliability Analysis of RC Beams Exposed to Fire. **Journal of Structural Engineering**, v. 139, p. 212–220, 2013a.

EAMON, C. D.; JENSEN, E. Reliability analysis of reinforced concrete columns exposed to fire. **Fire Safety Journal**, v. 62, p. 221–229, 2013b.

ELLINGWOOD, B. et al. **Development of a Probability Based Load Criterion for American National Standard A58**. Washington: U.S. Government Printing Office, 1980.

ELLINGWOOD, B. R. Load combination requirements for fire-resistant structural design. **Journal of Fire Protection Engineering**, v. 15, n. 1, p. 43–61, 2005.

EUROPEAN COMMISSION. **Competitive steel buildings through natural fire safety concepts**. Office for Official Publications of the European Union, 2002.

EUROPEAN COMMITTEE FOR STANDARDIZATION. **EN 1992-1-2: Eurocode 2:**

**Design of concrete structures - Part 1-2: General rules - Structural fire design.** Brussels: CEN, 2004.

EN 1992-1-2. **EN 1992-1-2: Eurocode 2: Design of concrete structures - Part 1-2: General rules - Structural fire design**The european union, , 2004.

FERREIRA, M. W. **Estudo Numérico Dos Efeitos Estruturais Da Exposição De Pilares Em Concreto Armado a Altas Temperaturas.** 2019. Dissertação (Mestrado Engenharia Civil) - Escola de Engenharia, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, Rio Grande do Sul, 2019.

GALAMBOS T, ELLINGWOOD B, MACGREGOR J, C. A. **Probability based load criteria: assessment of current design practice.**Journal of Structural Engineering, , 1982.

GANDOMI, A. H.; ALAVI, A. H. Krill herd: A new bio-inspired optimization algorithm. **Communications in Nonlinear Science and Numerical Simulation**, v. 17, n. 12, p. 4831–4845, 2012.

HALDAR, A.; MAHADEVAN, S. **Probability, Reliability, and Statistical Methods in Engineering Design.** New York: John Wiley & Sons, 2000.

HOPKIN, D.; FU, I. Reliability-Based Fire Resistance Periods for Buildings in England. **Fire**, v. 6, n. 1, 2023.

HOPKIN, D. J.; RUSH, D. Applicability of Ambient Temperature Reliability Targets for Appraising. n. September, 2017.

IQBAL, S.; HARICHANDRAN, R. S. Capacity reduction and fire load factors for LRFD of steel columns exposed to fire. **Fire Safety Journal**, v. 46, n. 5, p. 234–242, 2011.

INTERNATIONAL ORGANIZATION FOR STANDARDIZATION. **ISO 834: Fireresistance tests: Elements of building construction - part 1.1: general requirements for the fire resistance testing.** Geneva, 1999.

JOIN COMMITTEE ON STRUCTURAL SAFETY. **JCSS Probabilistic Model Code.** Lyngby, 2001.

KENNERDY, J.; EBERHART, R. Particle Swarm Optimization. **Conference on Neural Networks**, p. 1942–1948, 1995.

LIN, X.; ZHANG, Y. X.; PATHAK, P. **Nonlinear Finite Element Analysis of Composite and Reinforced Concrete Beams.** Sydney, Australia: Matthew Deans, 2020. v. 1999.

LOW, B. K.; TANG, W. H. Efficient Spreadsheet Algorithm for First-Order Reliability Method. **Journal of Engineering Mechanics**, v. 133, n. 12, p. 1378–1387, 2007.

MARTINS, M. M. **Dimensionamento de estruturas de aço em situação de incêndio**. 2000. Dissertação (Mestrado Engenharia Civil) - Escola de Engenharia, Universidade Federal do Minas Gerais, Minas Gerais, 2000.

MEDEIROS, C. A. DE. **Estatística aplicada à educação**. Universidade de Brasília, Brasília, 2009.

MINASI, A. T. **Confiabilidade de vigas de concreto armado em estruturas portuárias no estado limite último de flexão**. 2016. Dissertação (Mestrado Engenharia Oceânica) - Escola de Engenharia, Universidade Federal do Rio Grande, Rio Grande, Rio Grande do Sul, 2016.

NOGUEIRA, C. G.; PINTO, M. D. T. Avaliação da variabilidade da segurança de vigas em concreto armado submetidas ao momento fletor considerando os coeficientes parciais de segurança da NBR 6118:2014. **Revista IBRACON de Estruturas e Materiais**, v. 9, n. 5, p. 682–709, 2016.

NOWAK, A.; COLLINS, K. **Reliability of Structures**. NASA Conference Publication. Thomas Casson, 2000.

NOWAK, A. S.; RAKOCZY, A. M.; SZELIGA, E. K. Revised statistical resistance models for R / C structural components. **American Concrete Institute**, 2011.

PAIVA, F. A. P. DE. **Otimização por Enxame de Partículas**. Editora IFRN, Natal, 2018.

PIRES, R. M. **Análise de confiabilidade de vigas de concreto armado em situação de incêndio**. 2023. Dissertação (Mestrado Engenharia Civil) - Escola de Engenharia, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, Rio Grande do Sul, 2023.

PREUSS, A. C. **Análise Probabilística Termoestrutural de Pilares de Concreto Armado**. 2023. Dissertação (Mestrado Engenharia Civil) - Escola de Engenharia, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, Rio Grande do Sul, 2023.

RIBEIRO, K. **Análise da confiabilidade de pilares esbeltos**. 2022. Tese (Doutorado Engenharia Civil) - Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, Santa Catarina, 2022.

RIBEIRO, S. E. C.; DINIZ, S. M. C. Reliability-based design recommendations for FRP-reinforced concrete beams. **Engineering Structures**, v. 52, p. 273–283, 2013.

RICARDO, A. S. **Análise da confiabilidade estrutural de elementos de aço em situação de incêndio**. 2015. Dissertação (Mestrado Engenharia Civil) - Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, Santa Catarina, 2015.

RODRIGUES, J.; OLIVEIRA, R. **Dimensionamento de estruturas em situação de incêndio segundo as Normas Brasileiras**. São Paulo: Oficina de textos, 2021.

SANTIAGO, W. C. **Calibração baseada em confiabilidade dos coeficientes parciais de segurança das principais normas brasileiras de projeto estrutural**. 2019. Tese (Doutorado Engenharia Civil) - Universidade de São Paulo, São Carlos, São Paulo, 2019.

SANTIAGO, W. C. et al. Reliability-based calibration of main brazilian structural design codes. **Latin American Journal of Solids and Structures**, v. 17, n. 1, p. 1–28, 2020.

SANTOS, D. M.; STUCCHI, F. R.; BECK, A. T. Reliability of beams designed in accordance with Brazilian codes. **IBRACON Structures and Materials Journal**, v. 7, n. 5, p. 723–734, 2014a.

SANTOS, D. M.; STUCCHI, F. R.; BECK, A. T. Confiabilidade de vigas projetadas de acordo com as normas brasileiras. **Ibracon Structures and Materials Journal**, v. 7, n. 5, p. 723–734, 2014b.

SANTOS, E. S. **Avaliação estatística do erro de modelos de resistência para elementos lineares de concreto armado da ABNT NBR 6118:2007**. 2012. Dissertação (Programa de Pós-graduação em Engenharia de Estruturas) - Escola Politécnica da Universidade de São Carlos, UniversidadeDe São Paulo, São Carlos, São Paulo, 2012.

SCHERER, M.; MORSCH, I. B.; REAL, M. V. Reliability of reinforced concrete beams designed in accordance with Brazilian code NBR-6118:2014. **Revista IBRACON de Estruturas e Materiais**, v. 12, n. 5, p. 1086–1125, 2019.

SILVA, L. A. R. DA. **Análise da confiabilidade estrutural de uma coluna de aço em situação de incêndio**. 2019. Monografia (Graduação Engenharia Civil) - Universidade Federal de Alagoas, Delmiro Golveia, Alagoas, 2019.

SILVA, V. P. **Projeto de estruturas de concreto em situação de incêndio**. Editora Blücher, São Paulo, 2016.

TANG, W. H.; LOW, B. K. **Efficient Spreadsheet Evaluation Using Spreadsheet**. Journal of Engineering Mechanics. v. 123, n. July, p. 749–752, 1997.

TARIQ, F.; BHARGAVA, P. **Flexural behaviour of corroded RC beams exposed to fire**. Structures. v. 33, n. October 2021, p. 1366–1375, 2021.

TRAMONTINI, P. M. **Estudo de confiabilidade para seções de concreto armado submetidas a diversos esforços**. 2016. Dissertação (Mestrado Projeto de Estruturas) - Escola Politécnica da Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2016.

TURKSTRA, C., J. **Theory of Structural Design Decisions**. Solid Mechanics Division,

University of Waterloo, Waterloo, Ontario, 1970.

WANG, Z.; QIAO, M.; ZHU, D.; HAN, Y. **The reliability analysis of reinforced concrete beams under high temperature.** 3rd International Joint Conference on Computational Sciences and Optimization, CSO 2010: Theoretical Development and Engineering Practice, v. 1, n. 5, p. 327–330, 2010.

WICKSTROM, U. **A very simple method for estimating temperatures in fire-exposed structures.** London. Elsevier Applied Science, 1986.

WIT, A. D. E. **Behaviour and structural design of concrete structures exposed to fire.** 2011. Teses (Doutorado de Ciências) - Royal Institute of Technology (KTH), Stockholm, 2011.

## APÊNDICE A – CARACTERÍSTICAS DAS VIGAS ANALISADAS

| VIGAS   |      | $b$<br>(cm) | $h$<br>(cm) | $f_{ck}$<br>(MPa) | Agregado | Número de<br>barras | $\phi$<br>(mm) | As<br>(cm <sup>2</sup> ) | $\rho$ (%) | $c$<br>(mm) | $d'$ (cm) | $d$ (cm) |
|---------|------|-------------|-------------|-------------------|----------|---------------------|----------------|--------------------------|------------|-------------|-----------|----------|
| GRUPO I | V101 | 20          | 50          | 25                | silicoso | 4                   | 8,0            | 2,01                     | 0,20%      | 30          | 3,90      | 46,10    |
|         | V102 | 20          | 50          | 25                | silicoso | 4                   | 10,0           | 3,14                     | 0,31%      | 30          | 4,00      | 46,00    |
|         | V103 | 20          | 50          | 25                | silicoso | 4                   | 12,5           | 4,91                     | 0,49%      | 30          | 4,13      | 45,88    |
|         | V104 | 20          | 50          | 25                | silicoso | 3                   | 16,0           | 6,03                     | 0,60%      | 30          | 4,30      | 45,70    |
|         | V105 | 20          | 50          | 25                | silicoso | 3                   | 20,0           | 9,42                     | 0,94%      | 30          | 4,50      | 45,50    |
|         | V106 | 20          | 50          | 25                | calcário | 4                   | 8,0            | 2,01                     | 0,20%      | 30          | 3,90      | 46,10    |
|         | V107 | 20          | 50          | 25                | calcário | 4                   | 10,0           | 3,14                     | 0,31%      | 30          | 4,00      | 46,00    |
|         | V108 | 20          | 50          | 25                | calcário | 4                   | 12,5           | 4,91                     | 0,49%      | 30          | 4,13      | 45,88    |
|         | V109 | 20          | 50          | 25                | calcário | 3                   | 16,0           | 6,03                     | 0,60%      | 30          | 4,30      | 45,70    |
|         | V110 | 20          | 50          | 25                | calcário | 3                   | 20,0           | 9,42                     | 0,94%      | 30          | 4,50      | 45,50    |
|         | V111 | 20          | 50          | 35                | silicoso | 4                   | 8,0            | 2,01                     | 0,20%      | 30          | 3,90      | 46,10    |
|         | V112 | 20          | 50          | 35                | silicoso | 4                   | 10,0           | 3,14                     | 0,31%      | 30          | 4,00      | 46,00    |
|         | V113 | 20          | 50          | 35                | silicoso | 4                   | 12,5           | 4,91                     | 0,49%      | 30          | 4,13      | 45,88    |
|         | V114 | 20          | 50          | 35                | silicoso | 3                   | 16,0           | 6,03                     | 0,60%      | 30          | 4,30      | 45,70    |
|         | V115 | 20          | 50          | 35                | silicoso | 3                   | 20,0           | 9,42                     | 0,94%      | 30          | 4,50      | 45,50    |
|         | V116 | 20          | 50          | 35                | calcário | 4                   | 8,0            | 2,01                     | 0,20%      | 30          | 3,90      | 46,10    |
|         | V117 | 20          | 50          | 35                | calcário | 4                   | 10,0           | 3,14                     | 0,31%      | 30          | 4,00      | 46,00    |
|         | V118 | 20          | 50          | 35                | calcário | 4                   | 12,5           | 4,91                     | 0,49%      | 30          | 4,13      | 45,88    |
|         | V119 | 20          | 50          | 35                | calcário | 3                   | 16,0           | 6,03                     | 0,60%      | 30          | 4,30      | 45,70    |
|         | V120 | 20          | 50          | 35                | calcário | 3                   | 20,0           | 9,42                     | 0,94%      | 25          | 4,50      | 45,50    |
|         | V121 | 20          | 50          | 25                | silicoso | 4                   | 8,0            | 2,01                     | 0,20%      | 25          | 3,40      | 46,60    |
|         | V122 | 20          | 50          | 25                | silicoso | 4                   | 10,0           | 3,14                     | 0,31%      | 25          | 3,50      | 46,50    |
|         | V123 | 20          | 50          | 25                | silicoso | 4                   | 12,5           | 4,91                     | 0,49%      | 25          | 3,63      | 46,38    |
|         | V124 | 20          | 50          | 25                | silicoso | 3                   | 16,0           | 6,03                     | 0,60%      | 25          | 3,80      | 46,20    |
|         | V125 | 20          | 50          | 25                | silicoso | 3                   | 20,0           | 9,42                     | 0,94%      | 25          | 3,50      | 46,50    |
|         | V126 | 20          | 50          | 25                | calcário | 4                   | 8,0            | 2,01                     | 0,20%      | 25          | 3,63      | 46,38    |
|         | V127 | 20          | 50          | 25                | calcário | 4                   | 10,0           | 3,14                     | 0,31%      | 25          | 3,80      | 46,20    |
|         | V128 | 20          | 50          | 25                | calcário | 4                   | 12,5           | 4,91                     | 0,49%      | 25          | 3,50      | 46,50    |
|         | V129 | 20          | 50          | 25                | calcário | 3                   | 16,0           | 6,03                     | 0,60%      | 25          | 3,63      | 46,38    |
|         | V130 | 20          | 50          | 25                | calcário | 3                   | 20,0           | 9,42                     | 0,94%      | 25          | 3,80      | 46,20    |
|         | V131 | 20          | 50          | 35                | silicoso | 4                   | 8,0            | 2,01                     | 0,20%      | 25          | 3,50      | 46,50    |
|         | V132 | 20          | 50          | 35                | silicoso | 4                   | 10,0           | 3,14                     | 0,31%      | 25          | 3,63      | 46,38    |
|         | V133 | 20          | 50          | 35                | silicoso | 4                   | 12,5           | 4,91                     | 0,49%      | 25          | 3,80      | 46,20    |
|         | V134 | 20          | 50          | 35                | silicoso | 3                   | 16,0           | 6,03                     | 0,60%      | 25          | 3,50      | 46,50    |
|         | V135 | 20          | 50          | 35                | silicoso | 3                   | 20,0           | 9,42                     | 0,94%      | 25          | 3,63      | 46,38    |
|         | V136 | 20          | 50          | 35                | calcário | 4                   | 8,0            | 2,01                     | 0,20%      | 25          | 3,80      | 46,20    |
|         | V137 | 20          | 50          | 35                | calcário | 4                   | 10,0           | 3,14                     | 0,31%      | 25          | 3,50      | 46,50    |
|         | V138 | 20          | 50          | 35                | calcário | 4                   | 12,5           | 4,91                     | 0,49%      | 25          | 3,63      | 46,38    |
|         | V139 | 20          | 50          | 35                | calcário | 3                   | 16,0           | 6,03                     | 0,60%      | 25          | 3,80      | 46,20    |
|         | V140 | 20          | 50          | 35                | calcário | 3                   | 20,0           | 9,42                     | 0,94%      | 25          | 3,50      | 46,50    |

| VIGAS    |      | $b$<br>(cm) | $h$<br>(cm) | $f_{ck}$<br>(MPa) | Agregado | Número<br>de barras | $\phi$<br>(mm) | $A_s$<br>(cm <sup>2</sup> ) | $\rho$ (%) | $c$<br>(mm) | $d'$ (cm) | $d$ (cm) |
|----------|------|-------------|-------------|-------------------|----------|---------------------|----------------|-----------------------------|------------|-------------|-----------|----------|
| GRUPO II | V201 | 25          | 70          | 25                | silicoso | 4                   | 10,0           | 3,14                        | 0,18%      | 30          | 4,00      | 66,00    |
|          | V202 | 25          | 70          | 25                | silicoso | 4                   | 12,5           | 4,91                        | 0,28%      | 30          | 4,13      | 65,88    |
|          | V203 | 25          | 70          | 25                | silicoso | 3                   | 16,0           | 6,03                        | 0,34%      | 30          | 4,30      | 65,70    |
|          | V204 | 25          | 70          | 25                | silicoso | 3                   | 20,0           | 9,42                        | 0,54%      | 30          | 4,50      | 65,50    |
|          | V205 | 25          | 70          | 25                | calcário | 4                   | 10,0           | 3,14                        | 0,18%      | 30          | 4,00      | 66,00    |
|          | V206 | 25          | 70          | 25                | calcário | 4                   | 12,5           | 4,91                        | 0,28%      | 30          | 4,13      | 65,88    |
|          | V207 | 25          | 70          | 25                | calcário | 3                   | 16,0           | 6,03                        | 0,34%      | 30          | 4,30      | 65,70    |
|          | V208 | 25          | 70          | 25                | calcário | 3                   | 20,0           | 9,42                        | 0,54%      | 30          | 4,50      | 65,50    |
|          | V209 | 25          | 70          | 35                | silicoso | 4                   | 10,0           | 3,14                        | 0,18%      | 30          | 4,00      | 66,00    |
|          | V210 | 25          | 70          | 35                | silicoso | 4                   | 12,5           | 4,91                        | 0,28%      | 30          | 4,13      | 65,88    |
|          | V211 | 25          | 70          | 35                | silicoso | 3                   | 16,0           | 6,03                        | 0,34%      | 30          | 4,30      | 65,70    |
|          | V212 | 25          | 70          | 35                | silicoso | 3                   | 20,0           | 9,42                        | 0,54%      | 30          | 4,50      | 65,50    |
|          | V213 | 25          | 70          | 35                | calcário | 4                   | 10,0           | 3,14                        | 0,18%      | 30          | 4,00      | 66,00    |
|          | V214 | 25          | 70          | 35                | calcário | 4                   | 12,5           | 4,91                        | 0,28%      | 30          | 4,13      | 65,88    |
|          | V215 | 25          | 70          | 35                | calcário | 3                   | 16,0           | 6,03                        | 0,34%      | 30          | 4,30      | 65,70    |
|          | V216 | 25          | 70          | 35                | calcário | 3                   | 20,0           | 9,42                        | 0,54%      | 30          | 4,50      | 65,50    |
|          | V217 | 25          | 70          | 25                | silicoso | 4                   | 10,0           | 3,14                        | 0,18%      | 25          | 3,50      | 66,50    |
|          | V218 | 25          | 70          | 25                | silicoso | 4                   | 12,5           | 4,91                        | 0,28%      | 25          | 3,63      | 66,38    |
|          | V219 | 25          | 70          | 25                | silicoso | 3                   | 16,0           | 6,03                        | 0,34%      | 25          | 3,80      | 66,20    |
|          | V220 | 25          | 70          | 25                | silicoso | 3                   | 20,0           | 9,42                        | 0,54%      | 25          | 4,00      | 66,00    |
|          | V221 | 25          | 70          | 25                | calcário | 4                   | 10,0           | 3,14                        | 0,18%      | 25          | 3,50      | 66,50    |
|          | V222 | 25          | 70          | 25                | calcário | 4                   | 12,5           | 4,91                        | 0,28%      | 25          | 3,63      | 66,38    |
|          | V223 | 25          | 70          | 25                | calcário | 3                   | 16,0           | 6,03                        | 0,34%      | 25          | 3,80      | 66,20    |
|          | V224 | 25          | 70          | 25                | calcário | 3                   | 20,0           | 9,42                        | 0,54%      | 25          | 4,00      | 66,00    |
|          | V225 | 25          | 70          | 35                | silicoso | 4                   | 10,0           | 3,14                        | 0,18%      | 25          | 3,50      | 66,50    |
|          | V226 | 25          | 70          | 35                | silicoso | 4                   | 12,5           | 4,91                        | 0,28%      | 25          | 3,63      | 66,38    |
|          | V227 | 25          | 70          | 35                | silicoso | 3                   | 16,0           | 6,03                        | 0,34%      | 25          | 3,80      | 66,20    |
|          | V228 | 25          | 70          | 35                | silicoso | 3                   | 20,0           | 9,42                        | 0,54%      | 25          | 4,00      | 66,00    |
|          | V229 | 25          | 70          | 35                | calcário | 4                   | 10,0           | 3,14                        | 0,18%      | 25          | 3,50      | 66,50    |
|          | V230 | 25          | 70          | 35                | calcário | 4                   | 12,5           | 4,91                        | 0,28%      | 25          | 3,63      | 66,38    |
|          | V231 | 25          | 70          | 35                | calcário | 3                   | 16,0           | 6,03                        | 0,34%      | 25          | 3,80      | 66,20    |
|          | V232 | 25          | 70          | 35                | calcário | 3                   | 20,0           | 9,42                        | 0,54%      | 25          | 4,00      | 66,00    |

## APÊNDICE B - ESTATÍSTICAS DAS VARIÁVEIS ALEATÓRIAS DE CARREGAMENTO EM SITUAÇÃO DE INCÊNDIO

| VIGA    |      | r=0,25      |                |             |                | r=0,5       |                |             |                |
|---------|------|-------------|----------------|-------------|----------------|-------------|----------------|-------------|----------------|
|         |      | $\mu$ Mg,fi | $\sigma$ Mg,fi | $\mu$ Mq,fi | $\sigma$ Mq,fi | $\mu$ Mg,fi | $\sigma$ Mg,fi | $\mu$ Mq,fi | $\sigma$ Mq,fi |
| GRUPO I | V101 | 23,65       | 2,84           | 1,17        | 0,89           | 19,71       | 2,36           | 1,95        | 1,48           |
|         | V102 | 36,20       | 4,34           | 1,79        | 1,36           | 30,16       | 3,62           | 2,99        | 2,27           |
|         | V103 | 54,76       | 6,57           | 2,71        | 2,06           | 45,63       | 5,48           | 4,52        | 3,44           |
|         | V104 | 65,73       | 7,89           | 3,26        | 2,47           | 54,78       | 6,57           | 5,43        | 4,12           |
|         | V105 | 96,18       | 11,54          | 4,76        | 3,62           | 80,15       | 9,62           | 7,94        | 6,03           |
|         | V106 | 23,65       | 2,84           | 1,17        | 0,89           | 19,71       | 2,36           | 1,95        | 1,48           |
|         | V107 | 36,20       | 4,34           | 1,79        | 1,36           | 30,16       | 3,62           | 2,99        | 2,27           |
|         | V108 | 54,76       | 6,57           | 2,71        | 2,06           | 45,63       | 5,48           | 4,52        | 3,44           |
|         | V109 | 65,73       | 7,89           | 3,26        | 2,47           | 54,78       | 6,57           | 5,43        | 4,12           |
|         | V110 | 96,18       | 11,54          | 4,76        | 3,62           | 80,15       | 9,62           | 7,94        | 6,03           |
|         | V111 | 23,87       | 2,86           | 1,18        | 0,90           | 19,89       | 2,39           | 1,97        | 1,50           |
|         | V112 | 36,73       | 4,41           | 1,82        | 1,38           | 30,61       | 3,67           | 3,03        | 2,30           |
|         | V113 | 56,06       | 6,73           | 2,78        | 2,11           | 46,72       | 5,61           | 4,63        | 3,52           |
|         | V114 | 67,69       | 8,12           | 3,35        | 2,55           | 56,41       | 6,77           | 5,59        | 4,25           |
|         | V115 | 100,97      | 12,12          | 5,00        | 3,80           | 84,14       | 10,10          | 8,33        | 6,33           |
|         | V116 | 23,87       | 2,86           | 1,18        | 0,90           | 19,89       | 2,39           | 1,97        | 1,50           |
|         | V117 | 36,73       | 4,41           | 1,82        | 1,38           | 30,61       | 3,67           | 3,03        | 2,30           |
|         | V118 | 56,06       | 6,73           | 2,78        | 2,11           | 46,72       | 5,61           | 4,63        | 3,52           |
|         | V119 | 67,69       | 8,12           | 3,35        | 2,55           | 56,41       | 6,77           | 5,59        | 4,25           |
|         | V120 | 100,97      | 12,12          | 5,00        | 3,80           | 84,14       | 10,10          | 8,33        | 6,33           |
|         | V121 | 23,91       | 2,87           | 1,18        | 0,90           | 19,93       | 2,39           | 1,97        | 1,50           |
|         | V122 | 36,61       | 4,39           | 1,81        | 1,38           | 30,51       | 3,66           | 3,02        | 2,30           |
|         | V123 | 55,41       | 6,65           | 2,74        | 2,09           | 46,17       | 5,54           | 4,57        | 3,48           |
|         | V124 | 66,53       | 7,98           | 3,30        | 2,50           | 55,44       | 6,65           | 5,49        | 4,17           |
|         | V125 | 97,42       | 11,69          | 4,83        | 3,67           | 81,19       | 9,74           | 8,04        | 6,11           |
|         | V126 | 23,91       | 2,87           | 1,18        | 0,90           | 19,93       | 2,39           | 1,97        | 1,50           |
|         | V127 | 36,61       | 4,39           | 1,81        | 1,38           | 30,51       | 3,66           | 3,02        | 2,30           |
|         | V128 | 55,41       | 6,65           | 2,74        | 2,09           | 46,17       | 5,54           | 4,57        | 3,48           |
|         | V129 | 66,53       | 7,98           | 3,30        | 2,50           | 55,44       | 6,65           | 5,49        | 4,17           |
|         | V130 | 97,42       | 11,69          | 4,83        | 3,67           | 81,19       | 9,74           | 8,04        | 6,11           |
|         | V131 | 24,13       | 2,90           | 1,20        | 0,91           | 20,11       | 2,41           | 1,99        | 1,51           |
|         | V132 | 37,14       | 4,46           | 1,84        | 1,40           | 30,95       | 3,71           | 3,07        | 2,33           |
|         | V133 | 56,70       | 6,80           | 2,81        | 2,13           | 47,25       | 5,67           | 4,68        | 3,56           |
|         | V134 | 68,49       | 8,22           | 3,39        | 2,58           | 57,07       | 6,85           | 5,65        | 4,30           |
|         | V135 | 102,21      | 12,27          | 5,06        | 3,85           | 85,17       | 10,22          | 8,44        | 6,41           |
|         | V136 | 24,13       | 2,90           | 1,20        | 0,91           | 20,11       | 2,41           | 1,99        | 1,51           |
|         | V137 | 37,14       | 4,46           | 1,84        | 1,40           | 30,95       | 3,71           | 3,07        | 2,33           |
|         | V138 | 56,70       | 6,80           | 2,81        | 2,13           | 47,25       | 5,67           | 4,68        | 3,56           |
|         | V139 | 68,49       | 8,22           | 3,39        | 2,58           | 57,07       | 6,85           | 5,65        | 4,30           |
|         | V140 | 102,21      | 12,27          | 5,06        | 3,85           | 85,17       | 10,22          | 8,44        | 6,41           |

| VIGA     |      | r=0,25      |                |             |                | r=0,5       |                |             |                |
|----------|------|-------------|----------------|-------------|----------------|-------------|----------------|-------------|----------------|
|          |      | $\mu$ Mg,fi | $\sigma$ Mg,fi | $\mu$ Mq,fi | $\sigma$ Mq,fi | $\mu$ Mg,fi | $\sigma$ Mg,fi | $\mu$ Mq,fi | $\sigma$ Mq,fi |
| GRUPO II | V201 | 53,12       | 6,37           | 2,63        | 2,00           | 44,26       | 5,31           | 4,38        | 3,33           |
|          | V202 | 81,52       | 9,78           | 4,04        | 3,07           | 67,94       | 8,15           | 6,73        | 5,11           |
|          | V203 | 98,88       | 11,87          | 4,90        | 3,72           | 82,40       | 9,89           | 8,16        | 6,20           |
|          | V204 | 149,17      | 17,90          | 7,39        | 5,62           | 124,31      | 14,92          | 12,31       | 9,36           |
|          | V205 | 53,12       | 6,37           | 2,63        | 2,00           | 44,26       | 5,31           | 4,38        | 3,33           |
|          | V206 | 81,52       | 9,78           | 4,04        | 3,07           | 67,94       | 8,15           | 6,73        | 5,11           |
|          | V207 | 98,88       | 11,87          | 4,90        | 3,72           | 82,40       | 9,89           | 8,16        | 6,20           |
|          | V208 | 149,17      | 17,90          | 7,39        | 5,62           | 124,31      | 14,92          | 12,31       | 9,36           |
|          | V209 | 53,54       | 6,42           | 2,65        | 2,02           | 44,62       | 5,35           | 4,42        | 3,36           |
|          | V210 | 82,56       | 9,91           | 4,09        | 3,11           | 68,80       | 8,26           | 6,82        | 5,18           |
|          | V211 | 100,44      | 12,05          | 4,97        | 3,78           | 83,70       | 10,04          | 8,29        | 6,30           |
|          | V212 | 153,00      | 18,36          | 7,58        | 5,76           | 127,50      | 15,30          | 12,63       | 9,60           |
|          | V213 | 53,54       | 6,42           | 2,65        | 2,02           | 44,62       | 5,35           | 4,42        | 3,36           |
|          | V214 | 82,56       | 9,91           | 4,09        | 3,11           | 68,80       | 8,26           | 6,82        | 5,18           |
|          | V215 | 100,44      | 12,05          | 4,97        | 3,78           | 83,70       | 10,04          | 8,29        | 6,30           |
|          | V216 | 153,00      | 18,36          | 7,58        | 5,76           | 127,50      | 15,30          | 12,63       | 9,60           |
|          | V217 | 53,53       | 6,42           | 2,65        | 2,01           | 44,61       | 5,35           | 4,42        | 3,36           |
|          | V218 | 82,17       | 9,86           | 4,07        | 3,09           | 68,47       | 8,22           | 6,78        | 5,16           |
|          | V219 | 99,67       | 11,96          | 4,94        | 3,75           | 83,06       | 9,97           | 8,23        | 6,25           |
|          | V220 | 150,41      | 18,05          | 7,45        | 5,66           | 125,35      | 15,04          | 12,42       | 9,44           |
|          | V221 | 53,53       | 6,42           | 2,65        | 2,01           | 44,61       | 5,35           | 4,42        | 3,36           |
|          | V222 | 82,17       | 9,86           | 4,07        | 3,09           | 68,47       | 8,22           | 6,78        | 5,16           |
|          | V223 | 99,67       | 11,96          | 4,94        | 3,75           | 83,06       | 9,97           | 8,23        | 6,25           |
|          | V224 | 150,41      | 18,05          | 7,45        | 5,66           | 125,35      | 15,04          | 12,42       | 9,44           |
|          | V225 | 53,96       | 6,47           | 2,67        | 2,03           | 44,96       | 5,40           | 4,45        | 3,38           |
|          | V226 | 83,21       | 9,99           | 4,12        | 3,13           | 69,34       | 8,32           | 6,87        | 5,22           |
|          | V227 | 101,24      | 12,15          | 5,01        | 3,81           | 84,37       | 10,12          | 8,36        | 6,35           |
|          | V228 | 154,24      | 18,51          | 7,64        | 5,81           | 128,54      | 15,42          | 12,73       | 9,68           |
|          | V229 | 53,96       | 6,47           | 2,67        | 2,03           | 44,96       | 5,40           | 4,45        | 3,38           |
|          | V230 | 83,21       | 9,99           | 4,12        | 3,13           | 69,34       | 8,32           | 6,87        | 5,22           |
|          | V231 | 101,24      | 12,15          | 5,01        | 3,81           | 84,37       | 10,12          | 8,36        | 6,35           |
|          | V232 | 154,24      | 18,51          | 7,64        | 5,81           | 128,54      | 15,42          | 12,73       | 9,68           |

| VIGA    |      | r=1,0             |                      |                   |                      | r=1,5             |                      |                   |                      |
|---------|------|-------------------|----------------------|-------------------|----------------------|-------------------|----------------------|-------------------|----------------------|
|         |      | $\mu\text{Mg,fi}$ | $\sigma\text{Mg,fi}$ | $\mu\text{Mq,fi}$ | $\sigma\text{Mq,fi}$ | $\mu\text{Mg,fi}$ | $\sigma\text{Mg,fi}$ | $\mu\text{Mq,fi}$ | $\sigma\text{Mq,fi}$ |
| GRUPO I | V101 | 14,78             | 1,77                 | 13,94             | 10,60                | 11,82             | 1,42                 | 16,73             | 12,72                |
|         | V102 | 22,62             | 2,71                 | 21,34             | 16,22                | 18,10             | 2,17                 | 25,61             | 19,46                |
|         | V103 | 34,23             | 4,11                 | 32,29             | 24,54                | 27,38             | 3,29                 | 38,75             | 29,45                |
|         | V104 | 41,08             | 4,93                 | 38,76             | 29,46                | 32,87             | 3,94                 | 46,51             | 35,35                |
|         | V105 | 60,11             | 7,21                 | 56,71             | 43,10                | 48,09             | 5,77                 | 68,05             | 51,72                |
|         | V106 | 14,78             | 1,77                 | 13,94             | 10,60                | 11,82             | 1,42                 | 16,73             | 12,72                |
|         | V107 | 22,62             | 2,71                 | 21,34             | 16,22                | 18,10             | 2,17                 | 25,61             | 19,46                |
|         | V108 | 34,23             | 4,11                 | 32,29             | 24,54                | 27,38             | 3,29                 | 38,75             | 29,45                |
|         | V109 | 41,08             | 4,93                 | 38,76             | 29,46                | 32,87             | 3,94                 | 46,51             | 35,35                |
|         | V110 | 60,11             | 7,21                 | 56,71             | 43,10                | 48,09             | 5,77                 | 68,05             | 51,72                |
|         | V111 | 14,92             | 1,79                 | 14,07             | 10,69                | 11,93             | 1,43                 | 16,89             | 12,83                |
|         | V112 | 22,96             | 2,75                 | 21,66             | 16,46                | 18,36             | 2,20                 | 25,99             | 19,75                |
|         | V113 | 35,04             | 4,20                 | 33,05             | 25,12                | 28,03             | 3,36                 | 39,66             | 30,14                |
|         | V114 | 42,31             | 5,08                 | 39,91             | 30,33                | 33,85             | 4,06                 | 47,90             | 36,40                |
|         | V115 | 63,10             | 7,57                 | 59,53             | 45,25                | 50,48             | 6,06                 | 71,44             | 54,29                |
|         | V116 | 14,92             | 1,79                 | 14,07             | 10,69                | 11,93             | 1,43                 | 16,89             | 12,83                |
|         | V117 | 22,96             | 2,75                 | 21,66             | 16,46                | 18,36             | 2,20                 | 25,99             | 19,75                |
|         | V118 | 35,04             | 4,20                 | 33,05             | 25,12                | 28,03             | 3,36                 | 39,66             | 30,14                |
|         | V119 | 42,31             | 5,08                 | 39,91             | 30,33                | 33,85             | 4,06                 | 47,90             | 36,40                |
|         | V120 | 63,10             | 7,57                 | 59,53             | 45,25                | 50,48             | 6,06                 | 71,44             | 54,29                |
|         | V121 | 14,95             | 1,79                 | 14,10             | 10,72                | 11,96             | 1,43                 | 16,92             | 12,86                |
|         | V122 | 22,88             | 2,75                 | 21,59             | 16,41                | 18,31             | 2,20                 | 25,90             | 19,69                |
|         | V123 | 34,63             | 4,16                 | 32,67             | 24,83                | 27,70             | 3,32                 | 39,20             | 29,79                |
|         | V124 | 41,58             | 4,99                 | 39,23             | 29,81                | 33,26             | 3,99                 | 47,07             | 35,77                |
|         | V125 | 60,89             | 7,31                 | 57,44             | 43,66                | 48,71             | 5,85                 | 68,93             | 52,39                |
|         | V126 | 14,95             | 1,79                 | 14,10             | 10,72                | 11,96             | 1,43                 | 16,92             | 12,86                |
|         | V127 | 22,88             | 2,75                 | 21,59             | 16,41                | 18,31             | 2,20                 | 25,90             | 19,69                |
|         | V128 | 34,63             | 4,16                 | 32,67             | 24,83                | 27,70             | 3,32                 | 39,20             | 29,79                |
|         | V129 | 41,58             | 4,99                 | 39,23             | 29,81                | 33,26             | 3,99                 | 47,07             | 35,77                |
|         | V130 | 60,89             | 7,31                 | 57,44             | 43,66                | 48,71             | 5,85                 | 68,93             | 52,39                |
|         | V131 | 15,08             | 1,81                 | 14,23             | 10,81                | 12,07             | 1,45                 | 17,07             | 12,98                |
|         | V132 | 23,21             | 2,79                 | 21,90             | 16,64                | 18,57             | 2,23                 | 26,28             | 19,97                |
|         | V133 | 35,44             | 4,25                 | 33,43             | 25,41                | 28,35             | 3,40                 | 40,12             | 30,49                |
|         | V134 | 42,81             | 5,14                 | 40,38             | 30,69                | 34,24             | 4,11                 | 48,46             | 36,83                |
|         | V135 | 63,88             | 7,67                 | 60,26             | 45,80                | 51,10             | 6,13                 | 72,32             | 54,96                |
|         | V136 | 15,08             | 1,81                 | 14,23             | 10,81                | 12,07             | 1,45                 | 17,07             | 12,98                |
|         | V137 | 23,21             | 2,79                 | 21,90             | 16,64                | 18,57             | 2,23                 | 26,28             | 19,97                |
|         | V138 | 35,44             | 4,25                 | 33,43             | 25,41                | 28,35             | 3,40                 | 40,12             | 30,49                |
|         | V139 | 42,81             | 5,14                 | 40,38             | 30,69                | 34,24             | 4,11                 | 48,46             | 36,83                |
|         | V140 | 63,88             | 7,67                 | 60,26             | 45,80                | 51,10             | 6,13                 | 72,32             | 54,96                |

| VIGA     |      | r=1,0             |                      |                   |                      | r=1,5             |                      |                   |                      |
|----------|------|-------------------|----------------------|-------------------|----------------------|-------------------|----------------------|-------------------|----------------------|
|          |      | $\mu\text{Mg,fi}$ | $\sigma\text{Mg,fi}$ | $\mu\text{Mq,fi}$ | $\sigma\text{Mq,fi}$ | $\mu\text{Mg,fi}$ | $\sigma\text{Mg,fi}$ | $\mu\text{Mq,fi}$ | $\sigma\text{Mq,fi}$ |
| GRUPO II | V201 | 33,20             | 3,98                 | 6,58              | 5,00                 | 26,56             | 3,19                 | 7,89              | 6,00                 |
|          | V202 | 50,95             | 6,11                 | 10,09             | 7,67                 | 40,76             | 4,89                 | 12,11             | 9,21                 |
|          | V203 | 61,80             | 7,42                 | 12,24             | 9,30                 | 49,44             | 5,93                 | 14,69             | 11,17                |
|          | V204 | 93,23             | 11,19                | 18,47             | 14,04                | 74,59             | 8,95                 | 22,16             | 16,85                |
|          | V205 | 33,20             | 3,98                 | 6,58              | 5,00                 | 26,56             | 3,19                 | 7,89              | 6,00                 |
|          | V206 | 50,95             | 6,11                 | 10,09             | 7,67                 | 40,76             | 4,89                 | 12,11             | 9,21                 |
|          | V207 | 61,80             | 7,42                 | 12,24             | 9,30                 | 49,44             | 5,93                 | 14,69             | 11,17                |
|          | V208 | 93,23             | 11,19                | 18,47             | 14,04                | 74,59             | 8,95                 | 22,16             | 16,85                |
|          | V209 | 33,46             | 4,02                 | 6,63              | 5,04                 | 26,77             | 3,21                 | 7,96              | 6,05                 |
|          | V210 | 51,60             | 6,19                 | 10,22             | 7,77                 | 41,28             | 4,95                 | 12,27             | 9,32                 |
|          | V211 | 62,78             | 7,53                 | 12,44             | 9,45                 | 50,22             | 6,03                 | 14,92             | 11,34                |
|          | V212 | 95,63             | 11,48                | 18,94             | 14,40                | 76,50             | 9,18                 | 22,73             | 17,28                |
|          | V213 | 33,46             | 4,02                 | 6,63              | 5,04                 | 26,77             | 3,21                 | 7,96              | 6,05                 |
|          | V214 | 51,60             | 6,19                 | 10,22             | 7,77                 | 41,28             | 4,95                 | 12,27             | 9,32                 |
|          | V215 | 62,78             | 7,53                 | 12,44             | 9,45                 | 50,22             | 6,03                 | 14,92             | 11,34                |
|          | V216 | 95,63             | 11,48                | 18,94             | 14,40                | 76,50             | 9,18                 | 22,73             | 17,28                |
|          | V217 | 33,46             | 4,01                 | 6,63              | 5,04                 | 26,76             | 3,21                 | 7,95              | 6,04                 |
|          | V218 | 51,36             | 6,16                 | 10,17             | 7,73                 | 41,08             | 4,93                 | 12,21             | 9,28                 |
|          | V219 | 62,29             | 7,48                 | 12,34             | 9,38                 | 49,84             | 5,98                 | 14,81             | 11,26                |
|          | V220 | 94,01             | 11,28                | 18,62             | 14,15                | 75,21             | 9,02                 | 22,35             | 16,99                |
|          | V221 | 33,46             | 4,01                 | 6,63              | 5,04                 | 26,76             | 3,21                 | 7,95              | 6,04                 |
|          | V222 | 51,36             | 6,16                 | 10,17             | 7,73                 | 41,08             | 4,93                 | 12,21             | 9,28                 |
|          | V223 | 62,29             | 7,48                 | 12,34             | 9,38                 | 49,84             | 5,98                 | 14,81             | 11,26                |
|          | V224 | 94,01             | 11,28                | 18,62             | 14,15                | 75,21             | 9,02                 | 22,35             | 16,99                |
|          | V225 | 33,72             | 4,05                 | 6,68              | 5,08                 | 26,98             | 3,24                 | 8,02              | 6,09                 |
|          | V226 | 52,01             | 6,24                 | 10,30             | 7,83                 | 41,60             | 4,99                 | 12,36             | 9,40                 |
|          | V227 | 63,27             | 7,59                 | 12,54             | 9,53                 | 50,62             | 6,07                 | 15,04             | 11,43                |
|          | V228 | 96,40             | 11,57                | 19,10             | 14,51                | 77,12             | 9,25                 | 22,92             | 17,42                |
|          | V229 | 33,72             | 4,05                 | 6,68              | 5,08                 | 26,98             | 3,24                 | 8,02              | 6,09                 |
|          | V230 | 52,01             | 6,24                 | 10,30             | 7,83                 | 41,60             | 4,99                 | 12,36             | 9,40                 |
|          | V231 | 63,27             | 7,59                 | 12,54             | 9,53                 | 50,62             | 6,07                 | 15,04             | 11,43                |
|          | V232 | 96,40             | 11,57                | 19,10             | 14,51                | 77,12             | 9,25                 | 22,92             | 17,42                |

| VIGA    |      | r=2,0       |                |             |                |
|---------|------|-------------|----------------|-------------|----------------|
|         |      | $\mu$ Mg,fi | $\sigma$ Mg,fi | $\mu$ Mq,fi | $\sigma$ Mq,fi |
| GRUPO I | V101 | 9,85        | 1,18           | 3,90        | 2,97           |
|         | V102 | 15,08       | 1,81           | 5,98        | 4,54           |
|         | V103 | 22,82       | 2,74           | 9,04        | 6,87           |
|         | V104 | 27,39       | 3,29           | 10,85       | 8,25           |
|         | V105 | 40,08       | 4,81           | 15,88       | 12,07          |
|         | V106 | 9,85        | 1,18           | 3,90        | 2,97           |
|         | V107 | 15,08       | 1,81           | 5,98        | 4,54           |
|         | V108 | 22,82       | 2,74           | 9,04        | 6,87           |
|         | V109 | 27,39       | 3,29           | 10,85       | 8,25           |
|         | V110 | 40,08       | 4,81           | 15,88       | 12,07          |
|         | V111 | 9,94        | 1,19           | 3,94        | 2,99           |
|         | V112 | 15,30       | 1,84           | 6,06        | 4,61           |
|         | V113 | 23,36       | 2,80           | 9,25        | 7,03           |
|         | V114 | 28,21       | 3,38           | 11,18       | 8,49           |
|         | V115 | 42,07       | 5,05           | 16,67       | 12,67          |
|         | V116 | 9,94        | 1,19           | 3,94        | 2,99           |
|         | V117 | 15,30       | 1,84           | 6,06        | 4,61           |
|         | V118 | 23,36       | 2,80           | 9,25        | 7,03           |
|         | V119 | 28,21       | 3,38           | 11,18       | 8,49           |
|         | V120 | 42,07       | 5,05           | 16,67       | 12,67          |
|         | V121 | 9,96        | 1,20           | 3,95        | 3,00           |
|         | V122 | 15,25       | 1,83           | 6,04        | 4,59           |
|         | V123 | 23,09       | 2,77           | 9,15        | 6,95           |
|         | V124 | 27,72       | 3,33           | 10,98       | 8,35           |
|         | V125 | 40,59       | 4,87           | 16,08       | 12,22          |
|         | V126 | 9,96        | 1,20           | 3,95        | 3,00           |
|         | V127 | 15,25       | 1,83           | 6,04        | 4,59           |
|         | V128 | 23,09       | 2,77           | 9,15        | 6,95           |
|         | V129 | 27,72       | 3,33           | 10,98       | 8,35           |
|         | V130 | 40,59       | 4,87           | 16,08       | 12,22          |
|         | V131 | 10,05       | 1,21           | 3,98        | 3,03           |
|         | V132 | 15,48       | 1,86           | 6,13        | 4,66           |
|         | V133 | 23,63       | 2,84           | 9,36        | 7,11           |
|         | V134 | 28,54       | 3,42           | 11,31       | 8,59           |
|         | V135 | 42,59       | 5,11           | 16,87       | 12,82          |
|         | V136 | 10,05       | 1,21           | 3,98        | 3,03           |
|         | V137 | 15,48       | 1,86           | 6,13        | 4,66           |
|         | V138 | 23,63       | 2,84           | 9,36        | 7,11           |
|         | V139 | 28,54       | 3,42           | 11,31       | 8,59           |
|         | V140 | 42,59       | 5,11           | 16,87       | 12,82          |

| VIGA     |      | r=2,0       |                |             |                |
|----------|------|-------------|----------------|-------------|----------------|
|          |      | $\mu$ Mg,fi | $\sigma$ Mg,fi | $\mu$ Mq,fi | $\sigma$ Mq,fi |
| GRUPO II | V201 | 22,13       | 2,66           | 8,77        | 6,66           |
|          | V202 | 33,97       | 4,08           | 13,46       | 10,23          |
|          | V203 | 41,20       | 4,94           | 16,32       | 12,41          |
|          | V204 | 62,16       | 7,46           | 24,63       | 18,72          |
|          | V205 | 22,13       | 2,66           | 8,77        | 6,66           |
|          | V206 | 33,97       | 4,08           | 13,46       | 10,23          |
|          | V207 | 41,20       | 4,94           | 16,32       | 12,41          |
|          | V208 | 62,16       | 7,46           | 24,63       | 18,72          |
|          | V209 | 22,31       | 2,68           | 8,84        | 6,72           |
|          | V210 | 34,40       | 4,13           | 13,63       | 10,36          |
|          | V211 | 41,85       | 5,02           | 16,58       | 12,60          |
|          | V212 | 63,75       | 7,65           | 25,26       | 19,20          |
|          | V213 | 22,31       | 2,68           | 8,84        | 6,72           |
|          | V214 | 34,40       | 4,13           | 13,63       | 10,36          |
|          | V215 | 41,85       | 5,02           | 16,58       | 12,60          |
|          | V216 | 63,75       | 7,65           | 25,26       | 19,20          |
|          | V217 | 22,30       | 2,68           | 8,84        | 6,72           |
|          | V218 | 34,24       | 4,11           | 13,57       | 10,31          |
|          | V219 | 41,53       | 4,98           | 16,46       | 12,51          |
|          | V220 | 62,67       | 7,52           | 24,83       | 18,87          |
|          | V221 | 22,30       | 2,68           | 8,84        | 6,72           |
|          | V222 | 34,24       | 4,11           | 13,57       | 10,31          |
|          | V223 | 41,53       | 4,98           | 16,46       | 12,51          |
|          | V224 | 62,67       | 7,52           | 24,83       | 18,87          |
|          | V225 | 22,48       | 2,70           | 8,91        | 6,77           |
|          | V226 | 34,67       | 4,16           | 13,74       | 10,44          |
|          | V227 | 42,18       | 5,06           | 16,71       | 12,70          |
|          | V228 | 64,27       | 7,71           | 25,46       | 19,35          |
|          | V229 | 22,48       | 2,70           | 8,91        | 6,77           |
|          | V230 | 34,67       | 4,16           | 13,74       | 10,44          |
|          | V231 | 42,18       | 5,06           | 16,71       | 12,70          |
|          | V232 | 64,27       | 7,71           | 25,46       | 19,35          |

## APÊNDICE C - ÍNDICES DE CONFIABILIDADE E PROBABILIDADES DE FALHA

|         |      | r = 0,25 |          | r = 0,5 |          |
|---------|------|----------|----------|---------|----------|
|         |      | $\beta$  | Pf (%)   | $\beta$ | Pf       |
| GRUPO I | V101 | 1,8250   | 3,40E-02 | 2,6225  | 4,36E-03 |
|         | V102 | 2,1635   | 1,53E-02 | 2,9217  | 1,74E-03 |
|         | V103 | 2,5215   | 5,84E-03 | 3,2322  | 6,14E-04 |
|         | V104 | 2,4745   | 6,67E-03 | 3,1915  | 7,08E-04 |
|         | V105 | 3,1401   | 8,44E-04 | 3,7565  | 8,62E-05 |
|         | V106 | 1,8382   | 3,30E-02 | 2,6343  | 4,22E-03 |
|         | V107 | 2,1856   | 1,44E-02 | 2,9411  | 1,64E-03 |
|         | V108 | 2,5589   | 5,25E-03 | 3,2645  | 5,48E-04 |
|         | V109 | 2,5209   | 5,85E-03 | 3,2316  | 6,15E-04 |
|         | V110 | 3,228    | 6,23E-04 | 3,8301  | 6,40E-05 |
|         | V111 | 1,7934   | 3,65E-02 | 2,5943  | 4,74E-03 |
|         | V112 | 2,1152   | 1,72E-02 | 2,8795  | 1,99E-03 |
|         | V113 | 2,4488   | 7,17E-03 | 3,1699  | 7,62E-04 |
|         | V114 | 2,3816   | 8,62E-03 | 3,1117  | 9,30E-04 |
|         | V115 | 3,0161   | 1,28E-03 | 3,6526  | 1,30E-04 |
|         | V116 | 1,8032   | 3,57E-02 | 2,6031  | 4,62E-03 |
|         | V117 | 2,1315   | 1,65E-02 | 2,8939  | 1,90E-03 |
|         | V118 | 2,4761   | 6,64E-03 | 3,1935  | 7,03E-04 |
|         | V119 | 2,4151   | 7,87E-03 | 3,1408  | 8,42E-04 |
|         | V120 | 3,0768   | 1,05E-03 | 3,7036  | 1,06E-04 |
|         | V121 | 0,1491   | 4,41E-01 | 1,0581  | 1,45E-01 |
|         | V122 | 0,6004   | 2,74E-01 | 1,4922  | 6,78E-02 |
|         | V123 | 1,1245   | 1,30E-01 | 1,9842  | 2,36E-02 |
|         | V124 | 0,5878   | 2,78E-01 | 1,4793  | 6,95E-02 |
|         | V125 | 1,9132   | 2,79E-02 | 2,6979  | 3,49E-03 |
|         | V126 | 0,1586   | 4,37E-01 | 1,0623  | 1,44E-01 |
|         | V127 | 0,6166   | 2,69E-01 | 1,5077  | 6,58E-02 |
|         | V128 | 1,1527   | 1,25E-01 | 2,0105  | 2,22E-02 |
|         | V129 | 0,6189   | 2,68E-01 | 1,5091  | 6,56E-02 |
|         | V130 | 1,9782   | 2,40E-02 | 2,7564  | 2,92E-03 |
|         | V131 | 0,1125   | 4,55E-01 | 1,0227  | 1,53E-01 |
|         | V132 | 0,5432   | 2,93E-01 | 1,4379  | 7,52E-02 |
|         | V133 | 1,035    | 1,50E-01 | 1,9016  | 2,86E-02 |
|         | V134 | 0,4694   | 3,19E-01 | 1,3669  | 8,58E-02 |
|         | V135 | 1,7403   | 4,09E-02 | 2,5457  | 5,45E-03 |
|         | V136 | 0,1196   | 4,52E-01 | 1,0295  | 1,52E-01 |
|         | V137 | 0,5553   | 2,89E-01 | 1,4494  | 7,36E-02 |
|         | V138 | 1,0558   | 1,46E-01 | 1,9211  | 2,74E-02 |
|         | V139 | 0,4923   | 3,11E-01 | 1,389   | 8,24E-02 |
|         | V140 | 1,7868   | 3,70E-02 | 2,5876  | 4,83E-03 |

|         |      | r = 1   |          | r = 1,5 |          | r = 2   |          |
|---------|------|---------|----------|---------|----------|---------|----------|
|         |      | $\beta$ | Pf       | $\beta$ | Pf       | $\beta$ | Pf       |
| GRUPO I | V101 | 3,0801  | 1,03E-03 | 3,1734  | 7,53E-04 | 3,2051  | 6,75E-04 |
|         | V102 | 3,2945  | 4,93E-04 | 3,3552  | 3,97E-04 | 3,3706  | 3,75E-04 |
|         | V103 | 3,5187  | 2,17E-04 | 3,547   | 1,95E-04 | 3,5458  | 1,96E-04 |
|         | V104 | 3,4897  | 2,42E-04 | 3,5223  | 2,14E-04 | 3,5233  | 2,13E-04 |
|         | V105 | 3,9063  | 4,69E-05 | 3,8831  | 5,16E-05 | 3,8552  | 5,78E-05 |
|         | V106 | 3,0885  | 1,01E-03 | 3,1805  | 7,35E-04 | 3,2116  | 6,60E-04 |
|         | V107 | 3,3084  | 4,69E-04 | 3,367   | 3,80E-04 | 3,3813  | 3,61E-04 |
|         | V108 | 3,5419  | 1,99E-04 | 3,5668  | 1,81E-04 | 3,5639  | 1,83E-04 |
|         | V109 | 3,5184  | 2,17E-04 | 3,5468  | 1,95E-04 | 3,5457  | 1,96E-04 |
|         | V110 | 3,9591  | 3,76E-05 | 3,9284  | 4,28E-05 | 3,8966  | 4,88E-05 |
|         | V111 | 3,0599  | 1,11E-03 | 3,1563  | 7,99E-04 | 3,1563  | 7,99E-04 |
|         | V112 | 3,264   | 5,49E-04 | 3,3293  | 4,35E-04 | 3,3469  | 4,09E-04 |
|         | V113 | 3,4731  | 2,57E-04 | 3,5077  | 2,26E-04 | 3,5097  | 2,24E-04 |
|         | V114 | 3,4313  | 3,00E-04 | 3,472   | 2,58E-04 | 3,4771  | 2,53E-04 |
|         | V115 | 3,8254  | 6,53E-05 | 3,8114  | 6,91E-05 | 3,7884  | 7,58E-05 |
|         | V116 | 3,0662  | 1,08E-03 | 3,1616  | 7,85E-04 | 3,1944  | 7,01E-04 |
|         | V117 | 3,2743  | 5,30E-04 | 3,338   | 4,22E-04 | 3,3548  | 3,97E-04 |
|         | V118 | 3,4901  | 2,41E-04 | 3,5222  | 2,14E-04 | 3,523   | 2,13E-04 |
|         | V119 | 3,4522  | 2,78E-04 | 3,4898  | 2,42E-04 | 3,4933  | 2,39E-04 |
|         | V120 | 3,8624  | 5,61E-05 | 3,8433  | 6,07E-05 | 3,8177  | 6,74E-05 |
|         | V121 | 1,9532  | 2,54E-02 | 2,2424  | 1,25E-02 | 2,3707  | 8,88E-03 |
|         | V122 | 2,2706  | 1,16E-02 | 2,5002  | 6,21E-03 | 2,5995  | 4,67E-03 |
|         | V123 | 2,6245  | 4,34E-03 | 2,792   | 2,62E-03 | 2,8607  | 2,11E-03 |
|         | V124 | 2,2611  | 1,19E-02 | 2,4926  | 6,34E-03 | 2,5928  | 4,76E-03 |
|         | V125 | 3,1359  | 8,57E-04 | 3,2215  | 6,38E-04 | 3,2494  | 5,78E-04 |
|         | V126 | 1,9601  | 2,50E-02 | 2,2479  | 1,23E-02 | 2,3756  | 8,76E-03 |
|         | V127 | 2,2818  | 1,13E-02 | 2,5094  | 6,05E-03 | 2,6077  | 4,56E-03 |
|         | V128 | 2,6433  | 4,11E-03 | 2,8076  | 2,50E-03 | 2,8747  | 2,02E-03 |
|         | V129 | 2,2958  | 1,08E-02 | 2,5103  | 6,03E-03 | 2,6086  | 4,55E-03 |
|         | V130 | 3,1773  | 7,43E-04 | 3,2564  | 5,64E-04 | 3,281   | 5,17E-04 |
|         | V131 | 1,927   | 2,70E-02 | 2,2212  | 1,32E-02 | 2,352   | 9,34E-03 |
|         | V132 | 2,2313  | 1,28E-02 | 2,4758  | 6,65E-03 | 2,5709  | 5,07E-03 |
|         | V133 | 2,5653  | 5,15E-03 | 2,7428  | 3,05E-03 | 2,8165  | 2,43E-03 |
|         | V134 | 2,1796  | 1,46E-02 | 2,426   | 7,63E-03 | 2,5335  | 5,65E-03 |
|         | V135 | 3,0257  | 1,24E-03 | 3,1277  | 8,81E-04 | 3,1639  | 7,78E-04 |
|         | V136 | 1,9321  | 2,67E-02 | 2,2253  | 1,30E-02 | 2,3757  | 8,76E-03 |
|         | V137 | 2,2396  | 1,26E-02 | 2,4961  | 6,28E-03 | 2,5769  | 4,98E-03 |
|         | V138 | 2,5792  | 4,95E-03 | 2,7543  | 2,94E-03 | 2,8268  | 2,35E-03 |
|         | V139 | 2,1957  | 1,41E-02 | 2,4391  | 7,36E-03 | 2,5451  | 5,46E-03 |
|         | V140 | 3,0555  | 1,12E-03 | 3,1528  | 8,09E-04 | 3,1866  | 7,20E-04 |

|          |      | r = 0,25 |          | r = 0,5 |          |
|----------|------|----------|----------|---------|----------|
|          |      | $\beta$  | Pf (%)   | $\beta$ | Pf       |
| GRUPO II | V201 | 2,6897   | 3,58E-03 | 3,3767  | 3,67E-04 |
|          | V202 | 3,0098   | 1,31E-03 | 3,6475  | 1,32E-04 |
|          | V203 | 2,859    | 2,12E-03 | 3,5204  | 2,15E-04 |
|          | V204 | 3,4832   | 2,48E-04 | 4,0412  | 2,66E-05 |
|          | V205 | 2,6978   | 3,49E-03 | 3,3836  | 3,58E-04 |
|          | V206 | 3,0233   | 1,25E-03 | 3,6588  | 1,27E-04 |
|          | V207 | 2,8753   | 2,02E-03 | 3,5342  | 2,05E-04 |
|          | V208 | 3,5125   | 2,22E-04 | 4,0652  | 2,40E-05 |
|          | V209 | 2,6623   | 3,88E-03 | 3,3534  | 3,99E-04 |
|          | V210 | 2,9678   | 1,50E-03 | 3,6122  | 1,52E-04 |
|          | V211 | 2,8057   | 2,51E-03 | 3,4753  | 2,55E-04 |
|          | V212 | 3,4078   | 3,27E-04 | 3,9787  | 3,46E-05 |
|          | V213 | 2,6683   | 3,81E-03 | 3,3585  | 3,92E-04 |
|          | V214 | 2,9777   | 1,45E-03 | 3,6206  | 1,47E-04 |
|          | V215 | 2,8177   | 2,42E-03 | 3,4855  | 2,46E-04 |
|          | V216 | 3,4288   | 3,03E-04 | 3,9961  | 3,22E-05 |
|          | V217 | 1,3932   | 8,18E-02 | 2,2324  | 1,28E-02 |
|          | V218 | 1,7948   | 3,63E-02 | 2,5955  | 4,72E-03 |
|          | V219 | 1,6516   | 4,93E-02 | 2,4668  | 6,82E-03 |
|          | V220 | 2,1769   | 1,47E-02 | 2,9332  | 1,68E-03 |
|          | V221 | 1,3996   | 8,08E-02 | 2,2383  | 1,26E-02 |
|          | V222 | 1,8057   | 3,55E-02 | 2,6052  | 4,59E-03 |
|          | V223 | 1,6647   | 4,80E-02 | 2,4786  | 6,59E-03 |
|          | V224 | 2,1995   | 1,39E-02 | 2,9531  | 1,57E-03 |
|          | V225 | 1,3484   | 8,88E-02 | 2,1915  | 1,42E-02 |
|          | V226 | 1,7463   | 4,04E-02 | 2,5522  | 5,35E-03 |
|          | V227 | 1,5899   | 5,59E-02 | 2,4112  | 7,95E-03 |
|          | V228 | 2,0817   | 1,87E-02 | 2,85    | 2,19E-03 |
|          | V229 | 1,3658   | 8,60E-02 | 2,2074  | 1,36E-02 |
|          | V230 | 1,7544   | 3,97E-02 | 2,5594  | 5,24E-03 |
|          | V231 | 1,5995   | 5,49E-02 | 2,42    | 7,76E-03 |
|          | V232 | 2,0983   | 1,79E-02 | 2,8646  | 2,09E-03 |

|          |      | r = 1   |          | r = 1,5 |          | r = 2   |          |
|----------|------|---------|----------|---------|----------|---------|----------|
|          |      | $\beta$ | Pf       | $\beta$ | Pf       | $\beta$ | Pf       |
| GRUPO II | V201 | 3,6226  | 1,46E-04 | 3,6358  | 1,39E-04 | 3,627   | 1,43E-04 |
|          | V202 | 3,8201  | 6,67E-05 | 3,8063  | 7,05E-05 | 3,7834  | 7,74E-05 |
|          | V203 | 3,7274  | 9,67E-05 | 3,7262  | 9,72E-05 | 3,7099  | 1,04E-04 |
|          | V204 | 4,1116  | 1,96E-05 | 4,0598  | 2,46E-05 | 4,0173  | 2,94E-05 |
|          | V205 | 3,6276  | 1,43E-04 | 3,6401  | 1,36E-04 | 3,6309  | 1,41E-04 |
|          | V206 | 3,8284  | 6,45E-05 | 3,8134  | 6,85E-05 | 3,79    | 7,53E-05 |
|          | V207 | 3,7374  | 9,30E-05 | 3,7349  | 9,39E-05 | 3,7178  | 1,00E-04 |
|          | V208 | 4,1292  | 1,82E-05 | 4,0751  | 2,30E-05 | 4,0313  | 2,77E-05 |
|          | V209 | 3,6056  | 1,56E-04 | 3,6212  | 1,47E-04 | 3,6135  | 1,51E-04 |
|          | V210 | 3,7942  | 7,41E-05 | 3,7837  | 7,73E-05 | 3,7627  | 8,40E-05 |
|          | V211 | 3,6943  | 1,10E-04 | 3,6976  | 1,09E-04 | 3,6836  | 1,15E-04 |
|          | V212 | 4,0642  | 2,41E-05 | 4,0182  | 2,93E-05 | 3,9787  | 3,46E-05 |
|          | V213 | 3,6093  | 1,54E-04 | 3,6244  | 1,45E-04 | 3,6165  | 1,49E-04 |
|          | V214 | 3,8003  | 7,23E-05 | 3,789   | 7,56E-05 | 3,7675  | 8,24E-05 |
|          | V215 | 3,7017  | 1,07E-04 | 3,704   | 1,06E-04 | 3,6894  | 1,12E-04 |
|          | V216 | 4,077   | 2,28E-05 | 4,0293  | 2,80E-05 | 3,9889  | 3,32E-05 |
|          | V217 | 2,8017  | 2,54E-03 | 2,9394  | 1,64E-03 | 2,9934  | 1,38E-03 |
|          | V218 | 3,0608  | 1,10E-03 | 3,1571  | 7,97E-04 | 3,1904  | 7,10E-04 |
|          | V219 | 2,969   | 1,49E-03 | 3,0798  | 1,04E-03 | 3,1203  | 9,03E-04 |
|          | V220 | 3,303   | 4,78E-04 | 3,3626  | 3,86E-04 | 3,3774  | 3,66E-04 |
|          | V221 | 2,8059  | 2,51E-03 | 2,9429  | 1,63E-03 | 2,9966  | 1,37E-03 |
|          | V222 | 3,0678  | 1,08E-03 | 3,163   | 7,81E-04 | 3,1957  | 6,97E-04 |
|          | V223 | 2,9774  | 1,45E-03 | 3,0868  | 1,01E-03 | 3,1267  | 8,84E-04 |
|          | V224 | 3,3172  | 4,55E-04 | 3,3747  | 3,69E-04 | 3,3883  | 3,52E-04 |
|          | V225 | 2,7725  | 2,78E-03 | 2,915   | 1,78E-03 | 2,9714  | 1,48E-03 |
|          | V226 | 3,0298  | 1,22E-03 | 3,121   | 9,01E-04 | 3,1667  | 7,71E-04 |
|          | V227 | 2,9293  | 1,70E-03 | 3,0463  | 1,16E-03 | 3,09    | 1,00E-03 |
|          | V228 | 3,243   | 5,91E-04 | 3,3114  | 4,64E-04 | 3,3306  | 4,33E-04 |
|          | V229 | 2,7838  | 2,69E-03 | 2,9245  | 1,73E-03 | 2,9799  | 1,44E-03 |
|          | V230 | 3,035   | 1,20E-03 | 3,1353  | 8,58E-04 | 3,1706  | 7,61E-04 |
|          | V231 | 2,9355  | 1,67E-03 | 3,0516  | 1,14E-03 | 3,0947  | 9,85E-04 |
|          | V232 | 3,2534  | 5,70E-04 | 3,3203  | 4,50E-04 | 3,3387  | 4,21E-04 |