



INSTITUTO POLITÉCNICO DE BRAGANÇA
Escola Superior de Tecnologia e Gestão

**COLUNAS MISTAS DE AÇO PARCIALMENTE REVESTIDAS
COM BETÃO EMBEBIDAS EM PAREDES EM CONDIÇÕES
DE INCÊNDIO**

Diogo Carvalho Pereira

Dissertação Apresentada à
Escola superior de Tecnologia e Gestão
Instituto Politécnico de Bragança

para obtenção do grau de Mestre em
Engenharia Industrial
(Ramo Engenharia Mecânica)

2021

Esta página foi intencionalmente deixada em branco.

**COLUNAS MISTAS DE AÇO PARCIALMENTE
REVESTIDAS COM BETÃO EMBEBIDAS EM PAREDES EM
CONDIÇÕES DE INCÊNDIO**

Diogo Carvalho Pereira

Dissertação Apresentada à
**Escola superior de Tecnologia e Gestão
Instituto Politécnico de Bragança**

para obtenção do grau de Mestre em
**Engenharia Industrial
(Mecânica)**

Orientador:
Prof. Dr. Paulo Alexandre Gonçalves Piloto

(Este Trabalho de Dissertação não inclui as críticas e sugestões feitas pelo Júri)

2021

Esta página foi intencionalmente deixada em branco.

AGRADECIMENTOS

Começo por agradecer ao professor orientador Dr. Paulo Piloto do Departamento de Mecânica Aplicada do Instituto Politécnico de Bragança pela oportunidade de trabalharmos juntos, pelos ensinamentos transmitidos e por toda a atenção dada ao desenvolvimento deste projeto.

Agradeço também do fundo do coração a minha avó que sempre me apoio e esteve sempre presente nos momentos mais difíceis, assim como ao meu irmão, um obrigado muito especial a minha namorada Cláudia, pelas dores de cabeça que teve para me aturar enquanto trabalha neste projeto, inclusive na ajuda que me deu na construção do mesmo. Agradeço aos meus amigos de Chaves, que foram minha família nos cinco anos de graduação em Bragança. Especialmente à Pedro, João, Hugo, que sempre estiveram ao meu lado e tornaram essa jornada muito melhor. Aos amigos que fiz em Bragança, e que tenho certeza que levarei em meu coração, mas em especial ao Peixoto, Poka, André e Francisco Sá.

Finalmente meu mais sincero agradecimento a todas as pessoas que em algum momento me apoiaram e fizeram parte das etapas decisivas da minha vida.

Esta página foi intencionalmente deixada em branco.

ABSTRACT

The fire resistance of partially closed columns (HEB and IPE) depends on the temperature evolution during exposure to fire. This work aims to verify the effect of the fire scenario on the plastic strength to axial compression and on the effective bending stiffness.

These two parameters depend on the effect of temperature on the cross section. The new proposed formulas were validated for different cross sections, considering the flange temperature, the web height and residual temperature, the concrete cross section and residual temperature, the reduction of stiffness and the reduced strength of the reinforcement.

An advanced calculation method (ANSYS) was used to validate this proposal, based on the analysis of the cross section under the conditions described.

The main conclusions will be to make a proposal to amend Annex G of Eurocode 1994-1-2, to review the way in which composite columns embedded in walls are dimensioned.

Keywords: Fire; Eurocode 4, Balanced summation model; partially encased columns embedded on walls; numerical simulation.

Esta página foi intencionalmente deixada em branco.

RESUMO

A resistência ao fogo de colunas parcialmente fechadas (HEB e IPE) depende da evolução da temperatura durante a exposição ao fogo. Este trabalho tem como objetivo verificar o efeito do cenário de incêndio na resistência plástica à compressão axial e na rigidez efetiva à flexão.

Esses dois parâmetros dependem do efeito da temperatura sobre a seção transversal. As novas fórmulas propostas foram validadas para diferentes seções transversais, levando em consideração a temperatura do banzo, a altura e a temperatura residual da alma, a seção transversal e a temperatura residuais do betão, a redução da rigidez e da resistência reduzida do reforço.

Foi utilizado um método de cálculo avançado (ANSYS) para validar esta proposta, com base na análise da seção transversal nas condições descritas.

As principais conclusões será efetuar uma proposta de alteração ao anexo G do Eurocódigo 1994-1-2, a fim de rever a forma como é dimensionado os pilares mistos embebidos em parede.

Palavras-chave: Fogo; Eurocódigo 4, modelo de soma pesada; colunas parcialmente revestidas embutidas em paredes; simulação numérica.

Esta página foi intencionalmente deixada em branco.

ÍNDICE

| | |
|--|-----------|
| CAPÍTULO 1- INTRODUÇÃO..... | 20 |
| 1.1 OBJETIVO DO TRABALHO | 20 |
| 1.2 METODOLOGIA DO TRABALHO | 21 |
| 1.3 ORGANIZAÇÃO DA DISSERTAÇÃO | 22 |
| 1.4 ESTADO DA ARTE | 22 |
| CAPÍTULO 2- AÇÃO DO FOGO E ASPETOS NORMATIVOS | 28 |
| 2.1 AÇÃO DO FOGO | 28 |
| 2.1.1 <i>Incendio natural</i> | 29 |
| 2.1.2 <i>Incêndio Padrão</i> | 30 |
| 2.2 ASPETOS NORMATIVOS | 31 |
| CAPÍTULO 3- SEÇÕES MISTAS E PROPRIEDADES DOS MATERIAIS..... | 33 |
| 3.1 SECCÕES MISTAS EMBEBIDAS EM PAREDE | 33 |
| 3.1.1 <i>Definição do modelo em análise.</i> | 33 |
| 3.2 PROPRIEDADES DOS MATERIAIS | 36 |
| 3.2.1 <i>Propriedades Térmicas</i> | 36 |
| 3.2.2 <i>Fator de forma</i> | 43 |
| CAPÍTULO 4- MÉTODO SIMPLIFICADO DE CÁLCULO..... | 46 |
| 4.1 BANZOS DO PERFIL DE AÇO | 48 |
| 4.2 ALMA DO PERFIL DE AÇO..... | 50 |
| 4.3 BETÃO..... | 52 |
| 4.4 REFORÇO..... | 54 |
| CÁPITULO 5 – MÉTODO AVANÇADO DE CÁLCULO..... | 56 |
| CÁPITULO 6 – NOVA PROPOSTA | 63 |
| 6.1 BANZOS..... | 64 |
| 6.2 ALMA..... | 68 |
| 6.3 BETÃO..... | 71 |
| 6.3.1 <i>Betão do lado exposto</i> | 71 |
| 6.3.2 <i>Betão não exposto</i> | 73 |
| 6.4 REFORÇO..... | 76 |
| 6.4.1 <i>Reforço exposto ao fogo</i> | 77 |
| CÁPITULO 7– COMPARAÇÃO DOS RESULTADOS..... | 79 |
| CÁPITULO 8– CONCLUSÕES E TRABALHOS FUTUROS | 80 |

NOTAÇÕES

Letras maiúsculas latinas

| | |
|--------------------|---|
| $(EI)_{c,z}$ | Rigidez efetiva à flexão do betão em torno do eixo Z, à 20 °C. |
| $(EI)_{eff,z}$ | Rigidez efetiva à flexão da coluna torno do eixo Z, à 20 °C. |
| $(EI)_{f,z}$ | Rigidez efetiva à flexão dos banzos em torno do eixo Z, à 20 °C. |
| $(EI)_{fi,c,z}$ | Rigidez efetiva à flexão do betão em torno do eixo Z, exposto ao fogo |
| $(EI)_{fi,eff,z}$ | Rigidez efetiva à flexão da coluna torno do eixo Z, exposta ao fogo. |
| $(EI)_{fi,f,z}$ | Rigidez efetiva à flexão dos banzos em torno do eixo Z, exposto ao fogo. |
| $(EI)_{fi,s,z}$ | Rigidez efetiva à flexão dos reforços em torno do eixo Z, exposto ao fogo. |
| $(EI)_{fi,w,z}$ | Rigidez efetiva à flexão da alma em torno do eixo Z, exposto ao fogo. |
| $(EI)_{s,z}$ | Rigidez efetiva à flexão dos reforços em torno do eixo Z, à 20 °C. |
| $(EI)_{w,z}$ | Rigidez efetiva à flexão da alma em torno do eixo Z, à 20 °C. |
| A_c | Área do betão na seção transversal. |
| A_m/V | Fator de sessão. |
| A_s | Área dos reforços na seção transversal. |
| C_a | Calor específico do aço. |
| C_p | Calor específico do betão seco. |
| $C_{p(T)}$ | Calor específico do material em função da temperatura. |
| $C_{p,peak}$ | Calor específico do betão com determinado teor de umidade. |
| E_a | Módulo de elasticidade do aço estrutural à 20 °C. |
| $E_{a,f}$ | Módulo de elasticidade do aço estrutural do banzo, à 20 °C. |
| $E_{a,f,t}$ | Módulo de elasticidade do aço estrutural do banzo, à elevadas temperaturas. |
| $E_{a,w}$ | Módulo de elasticidade do aço estrutural da alma, à 20 °C. |
| $E_{a,w,t}$ | Módulo de elasticidade do aço estrutural da alma, à elevadas temperaturas. |
| $E_{a,\theta}$ | Módulo de elasticidade do aço estrutural à elevadas temperaturas. |
| $E_{c,sec}$ | Módulo secante de elasticidade do betão à 20 °C. |
| $E_{c,sec,\theta}$ | Módulo secante de elasticidade do betão à elevadas temperaturas. |
| E_{cm} | Módulo de elasticidade médio do betão à 20 °C. |
| E_s | Módulo de elasticidade do aço de reforço à 20 °C. |

| | |
|------------------|--|
| $E_{s,\theta}$ | Módulo de elasticidade do aço de reforço à elevadas temperaturas. |
| G_a | Módulo de elasticidade transversal do aço estrutural à 20 °C. |
| H_t | Coefficiente empírico para redução da alma. |
| $I_{s,z}$ | Momento de segunda ordem das barras de reforços em torno do eixo Z. |
| L | Comprimento da coluna. |
| L_θ | Comprimento de flambagem. |
| $N_{fi,cr,z}$ | Resistência crítica da coluna, em torno do eixo Z, exposta ao fogo. |
| $N_{fi,pl,Rd}$ | Resistência plástica à compressão axial da coluna, exposta ao fogo. |
| $N_{fi,pl,Rd,c}$ | Resistência plástica à compressão axial do betão, exposto ao fogo. |
| $N_{fi,pl,Rd,f}$ | Resistência plástica à compressão axial dos banzos, exposto ao fogo. |
| $N_{fi,pl,Rd,s}$ | Resistência plástica à compressão axial dos reforços, exposto ao fogo. |
| $N_{fi,pl,Rd,w}$ | Resistência plástica à compressão axial da alma, exposto ao fogo. |
| $N_{fi,Rd,z}$ | Resistência de projeto à compressão axial da coluna, exposta ao fogo. |
| $N_{pl,Rd}$ | Resistência plástica à compressão axial da coluna, à 20 °C. |
| $N_{pl,Rd,c}$ | Resistência plástica à compressão axial do betão, à 20 °C. |
| $N_{pl,Rd,f}$ | Resistência plástica à compressão axial dos banzos, à 20 °C. |
| $N_{pl,Rd,s}$ | Resistência plástica à compressão axial dos reforços, à 20 °C. |
| $N_{pl,Rd,w}$ | Resistência plástica à compressão axial da alma, à 20 °C. |
| T | Temperatura do elemento. |
| T_g | Temperatura do gás. |

Letras minúsculas latinas

| | |
|-------------------|---|
| \dot{h}_{net} | Fluxo de calor total. |
| $\dot{h}_{net,c}$ | Fluxo de calor proveniente da convecção. |
| $\dot{h}_{net,r}$ | Fluxo de calor proveniente da radiação. |
| n^{\rightarrow} | Vetor direção. |
| b | Largura da seção transversal. |
| $b_{0,ch}$ | Parâmetro para cálculo da redução horizontal do betão. |
| $b_{0,cv}$ | Parâmetro para cálculo da redução vertical do betão. |
| $b_{c,fi}$ | Espessura da camada de betão negligenciada. |
| $b_{c,fi,h}$ | Espessura da camada de betão negligenciada na direção horizontal. |
| $b_{c,fi,v}$ | Espessura da camada de betão negligenciada na direção vertical. |
| e_f | Espessura do banzo. |
| e_w | Espessura da alma. |
| $f_{ap,\theta}$ | Tensão proporcional do aço estrutural à elevadas temperaturas. |
| f_{au} | Tensão máxima de tração do aço estrutural à 20 °C. |
| f_{ay} | Tensão de escoamento do aço estrutural à 20 °C. |
| $f_{ay,f}$ | Tensão de escoamento aço estrutural do banzo à 20 °C. |
| $f_{ay,f,t}$ | Tensão de escoamento aço estrutural do banzo à elevadas temperaturas. |
| $f_{ay,w}$ | Tensão de escoamento aço estrutural da alma à 20 °C. |
| $f_{ay,w,t}$ | Tensão de escoamento aço estrutural da alma à elevadas temperaturas. |
| $f_{ay,\theta}$ | Tensão de escoamento do aço estrutural à elevadas temperaturas. |
| f_c | Resistência à compressão do betão à 20 °C. |
| $f_{c,\theta}$ | Resistência à compressão do betão à elevadas temperaturas. |
| f_{ck} | Resistência à compressão característica do betão à 20 °C. |
| $f_{ck,cube}$ | Resistência à compressão característica cúbica do betão à 20 °C. |
| $f_{ck,\theta}$ | Resistência à compressão característica do betão à elevadas temperaturas. |
| f_{cm} | Resistência média à compressão do betão à 20 °C. |
| f_{ctm} | Resistência média à tração do betão à 20 °C. |
| f_{su} | Tensão máxima de tração do aço de reforço à 20 °C. |
| f_{sy} | Tensão de escoamento do aço de reforço à 20 °C. |
| $f_{sy,\theta}$ | Tensão de escoamento do aço de reforço à elevadas temperaturas. |

| | |
|-----------------|---|
| h | Altura da seção transversal. |
| $h_{w,fi}$ | Redução geométrica da alma. |
| k | Relação entre a tensão de escoamento e máxima do aço de reforço. |
| $k_{c,t}$ | Redução da resistência à tração do betão à elevadas temperaturas. |
| $k_{c,\theta}$ | Redução da resistência a compressão do betão à elevadas temperaturas. |
| $k_{E,t}$ | Redução do módulo de elasticidade do aço de reforço a elevadas temperaturas presente no anexo G da EN 1994-1-2. |
| $k_{E,\theta}$ | Redução do módulo de elasticidade do aço estrutural à elevadas temperaturas. |
| $k_{f,cv}$ | Coeficiente para cálculo da redução vertical do betão. |
| $k_{f,f}$ | Coeficiente para cálculo da temperatura média do banzo. |
| $k_{SE,\theta}$ | Redução do módulo de elasticidade do aço de reforço à elevadas temperaturas. |
| $k_{sy,\theta}$ | Redução da tensão de escoamento do aço de reforço à elevadas temperaturas. |
| k_t | Coeficiente para cálculo da temperatura média da flange. |
| $k_{t,c}$ | Coeficiente para cálculo da temperatura média do betão. |
| $k_{t,ch}$ | Coeficiente para cálculo da horizontal vertical do betão. |
| $k_{t,cv}$ | Coeficiente para cálculo da redução vertical do betão. |
| $k_{t,f}$ | Coeficiente para cálculo da temperatura média do banzo. |
| $k_{t,s}$ | Coeficiente para cálculo da temperatura média dos reforços. |
| $k_{t,w}$ | Coeficiente para cálculo da temperatura média da alma. |
| $k_{w,c}$ | Coeficiente para cálculo da temperatura média do betão. |
| $k_{w,ch}$ | Coeficiente para cálculo da horizontal vertical do betão. |
| $k_{w,w}$ | Coeficiente para cálculo da temperatura média da alma. |
| $k_{y,t}$ | Redução da tensão de escoamento do aço de reforço a elevadas temperaturas presente no anexo G da EN 1994-1-2. |
| $k_{y,\theta}$ | Redução da tensão de escoamento do aço estrutural à elevadas temperaturas. |
| t | Tempo. |
| μ | Média geométrica entre u_1 e u_2 . |
| μ_1 | Cobrimento vertical de betão da barra de reforço. |
| μ_2 | Cobrimento horizontal de betão da barra de reforço. |
| ν | Coeficiente de Poisson. |

Letras minúsculas gregas

| | |
|---------------------------|---|
| $\gamma_{M,fi,a}$ | Fator de segurança parcial para o aço estrutural. |
| $\gamma_{M,fi,c}$ | Fator de segurança parcial para o betão. |
| $\gamma_{M,fi,s}$ | Fator de segurança parcial para o aço de reforço. |
| λ_{θ} | Esbeltez adimensional. |
| α_c | Coefficiente de convecção. |
| β | Redução para a tensão de escoamento da alma à elevadas temperaturas. |
| ε | Deformação. |
| $\varepsilon_{ap,\theta}$ | Deformação do aço à tensão proporcional à elevadas temperaturas. |
| $\varepsilon_{au,\theta}$ | Deformação do aço à tensão máxima à elevadas temperaturas. |
| $\varepsilon_{ay,\theta}$ | Deformação do aço à tensão de escoamento à elevadas temperaturas. |
| ε_{ce} | Deformação máxima do betão à compressão. |
| $\varepsilon_{ce,\theta}$ | Deformação máxima do betão à compressão à elevadas temperaturas. |
| ε_{cu} | Deformação do betão à compressão máxima. |
| $\varepsilon_{cu,\theta}$ | Deformação do betão à compressão máxima à elevadas temperaturas. |
| ε_f | Emissividade do fogo. |
| ε_m | Emissividade do material. |
| θ | Temperatura. |
| $\theta_{0,c}$ | Parâmetro para cálculo da temperatura média do betão, aprimorado. |
| $\theta_{0,f}$ | Parâmetro para cálculo da temperatura média da flange, aprimorado. |
| $\theta_{0,s}$ | Parâmetro para cálculo da temperatura média dos reforços, aprimorado. |
| $\theta_{0,t}$ | Parâmetro para cálculo da temperatura média da flange. |
| $\theta_{0,w}$ | Parâmetro para cálculo da temperatura média da alma, aprimorado. |
| $\theta_{c,t}$ | Temperatura média do betão. |
| $\theta_{f,t}$ | Temperatura média dos banzos. |
| $\theta_{s,t}$ | Temperatura média do aço de reforço. |
| $\theta_{w,t}$ | Temperatura média da alma. |
| $\lambda_{(T)}$ | Condutividade térmica do material em função da temperatura. |
| λ_a | Condutividade térmica do aço. |
| λ_c | Condutividade térmica do betão. |
| $\rho_{(T)}$ | Massa específica do material em função da temperatura. |
| ρ_a | Massa específica do aço. |

LISTA DE FIGURAS

| | |
|--|----|
| Figura 1- A visão geral de uma simulação feita a uma coluna mista em laboratório por, I. Han. [14] | 23 |
| Figura 2 – Teste experimental de correia et al [17]..... | 25 |
| Figura 3 – Teste experimental feito a uma viga revestida com betão(a) e sem revestimento (b). [8] | 26 |
| Figura 4-Curva temperatura-tempo de um incêndio real [2]..... | 29 |
| Figura 5- Curva de incêndio padrão iso 834 | 31 |
| Figura 6- Tipos de secções transversais de pilar em 1994-1-2 [3]..... | 33 |
| Figura 7- Modelo utilizado no estudo. | 34 |
| Figura 8 – Massa específica do aço em função da temperatura. | 37 |
| Figura 9 - Calor específico do aço carbono, em função da temperatura. | 38 |
| Figura 10 - Condutividade do aço carbono, em função da temperatura. | 39 |
| Figura 11 – Calor específico do betão em função da temperatura. | 40 |
| Figura 12 – Massa volúmica do betão em função da temperatura | 41 |
| Figura 13 – Condutividade térmica do betão em função da temperatura..... | 42 |
| Figura 14 – Propriedades térmicas da parede de alvenaria | 43 |
| Figura 15 – Determinação do fator de massividade para perfil embebido em parede [11]. | 44 |
| Figura 16 - Secção transversal reduzida para verificação da resistência ao fogo. | 46 |
| Figura 17 - Representação dos banzos. | 48 |
| Figura 18 - Representação da alma. | 50 |
| Figura 19 - Representação do modelo de betão. | 52 |
| Figura 20 - Malha do perfil embebido na parede para o perfil de validação, HEA 220. | 57 |
| Figura 21 - Representação da malha usada nos banzos para o perfil de validação, HEA 220. | 57 |
| Figura 22 - Representação da malha usada no betão para o perfil de validação, HEA 220..... | 58 |
| Figura 23 - Representação da malha usada nos reforços para o perfil de validação, HEA 220. | 59 |
| Figura 24 - Representação da malha usada nas paredes de alvenaria para o perfil de validação, HEA 220..... | 60 |
| Figura 25 – Evolução da temperatura para o perfil HEA 220..... | 61 |
| Figura 26 – Evolução da temperatura no perfil HEA 220 (b) para os pontos ilustrados em (a). | 62 |
| Figura 27 – Curva de incêndio tg. | 62 |

| | |
|--|----|
| Figura 28 – Representação da secção..... | 63 |
| Figura 29 – Gradiente térmico da secção. | 63 |
| Figura 30 – Gradiente térmico dos banzos no modelo de validação..... | 64 |
| Figura 31 – Temperatura média para ansys e para atual proposta, exposto ao fogo (a, b, c) não exposto ao fogo (d, e, f)..... | 67 |
| Figura 32 – Gradiente térmico da alma para o modelo de validação. | 69 |
| Figura 33 - Temperatura média para ansys e para atual proposta, exposto ao fogo. | 70 |
| Figura 34 – Gradiente térmico do betão, para o modelo de validação. | 71 |
| Figura 35 - Temperatura média para ansys e para atual proposta, exposto ao fogo (a, b, c) não exposto ao fogo (d, e, f)..... | 75 |
| Figura 36 - Gradiente térmico dos reforços, para o modelo de validação. | 76 |
| Figura 37 - Temperatura média para ansys e para atual proposta, exposto ao fogo (a, b, c) não exposto ao fogo (d, e, f)..... | 78 |

LISTA DE TABELAS

| | |
|--|----|
| Tabela 1- Códigos Normativos Europeus | 31 |
| Tabela 2 - Configurações dos perfis embebidos em paredes estudados. | 35 |
| Tabela 3 –Fator de massividade para as secções em estudo. | 45 |
| Tabela 4- Coeficiente de redução para a rigidez de flexão. | 47 |
| Tabela 5- Parâmetros para a temperatura do banzo. | 49 |
| Tabela 6 - fatores de redução para relação tensões-extensões de aço estrutural a temperaturas elevadas. | 49 |
| Tabela 7 - Parâmetro para redução da altura da alma. | 51 |
| Tabela 8 - Redução da espessura da área de betão..... | 52 |
| Tabela 9 - Temperatura médio do betão..... | 53 |
| Tabela 10 - Valores dos dois parâmetros principais das relações tensões-extensões do betão de massa volúmica normal (NC) e do betão leve (LC) a temperaturas elevadas..... | 53 |
| Tabela 11 - Fator de redução $k_{y,t}$ para a tensão de cedência $f_{s,y}$ dos varões da armadura. . | 54 |
| Tabela 12 - Fator de redução $k_{E,t}$ para o módulo de elasticidade E_s dos varões da armadura. | 54 |
| Tabela 13 – Novos parâmetros para o cálculo da temperatura média nos banzos. | 65 |
| Tabela 14 - Novos parâmetros para o cálculo da temperatura média da alma. | 69 |
| Tabela 15 - Novos parâmetros para o cálculo da temperatura média do betão exposto. | 72 |
| Tabela 16 - Novos parâmetros para o cálculo da temperatura média do betão não exposto. .. | 73 |
| Tabela 17 - Novos parâmetros para o cálculo da temperatura média do reforço exposto. | 77 |
| Tabela 18 - Novos parâmetros para o cálculo da temperatura média do reforço não exposto. .. | 77 |

CAPÍTULO 1- INTRODUÇÃO

Os pilares de aço vulgarmente utilizados na construção de edifícios, possuem uma elevada resistência mecânica, boa ductilidade e permitem uma rápida execução na obra. Não obstante, a capacidade resistente à compressão e a rigidez à flexão do elemento diminuem drasticamente quando exposto à elevadas temperaturas. Como solução alternativa, começaram a ser usados pilares mistos, que associam os perfis estruturais de aço como betão estrutural armado. A associação destes materiais apresenta um aumento da rigidez à flexão e da resistência à compressão, mas também maior proteção do elemento contra o efeito de incêndios.

A resistência à encurvadura de pilares mistos parcialmente revestidos, que estejam submetidos a temperaturas de incêndio, é determinada através do modelo da soma ponderada, descrito no anexo G do Eurocódigo 1994-1-2 [3]. O anexo G apresenta um modelo de soma ponderada da rigidez a flexão e da resistência a compressão, baseado nas quatro componentes do elemento (banzo, alma, betão e reforço).

O presente trabalho tem como objetivo contribuir para o desenvolvimento do anexo G, introduzindo novas propostas, de forma a conseguir uma melhor aproximação do método de cálculo ao comportamento real da estrutura sob ação do fogo. Este trabalho investiga, por meio de modelos de cálculo avançado, com o método de elementos finitos, a resistência à encurvadura de pilares mistos parcialmente revestidos em situação de incêndio.

1.1 Objetivo do Trabalho

O estudo tem como principal objetivo efetuar uma proposta de alteração ao anexo G, do EN1994-1-2 [3]. Através deste anexo é possível determinar a resistência plástica à compressão axial e a rigidez à flexão de colunas mistas parcialmente revestidas e submetidas a uma situação de incêndio.

Esta investigação foi feita através do método avançado de cálculo, em colunas expostas a um cenário de incêndio bem específico, sendo estes pilares embutidos em paredes com fogo de um lado.

Os resultados obtidos através das alterações feitas ao método simplificado de cálculo proposto no anexo G do EN1994-1-2 [3] possibilita a comparação com os resultados obtidos através de simulações efetuadas e com o método proposto por Fábio M. Rocha [8] e pela Nathalia G. Gonçalves [4].

1.2 Metodologia do Trabalho

Neste trabalho foram analisadas 30 secções mistas de aço parcialmente revestidas de betão, sob ação do fogo, sendo que apenas um único lado foi exposto a temperaturas de incêndio. Foram utilizados 10 perfis da série HEA, 10 perfis da série HEB e 10 perfis da série HEM, todos embebidos em parede de tijolo cerâmico. A variação do fator de secção ou fator de massividade foi considerada na escolha dos perfis de cada série.

O programa ANSYS Mechanical APDL 2020 R2 foi utilizado na realização das simulações computacionais. Foram realizadas análises térmicas por meio de simulações bidimensionais transientes não lineares. As secções analisadas foram expostas a uma situação de incêndio cuja curva segue a curva de incêndio padrão ISO834. A validação do modelo foi feita por comparação com os ensaios experimentais de Fábio M. Rocha. Neste caso, a curva de incêndio afasta-se da curva de incêndio padrão. A distribuição da temperatura foi determinada para diferentes instantes de tempo correspondentes a períodos de resistência ao fogo bem estabelecidos de 1800, 3600, 5400 e 7200 segundos. Este método permite determinar a resistência ao fogo para os períodos de 30, 60, 90 e 120 minutos, respetivamente.

O método utilizado permite definir a distribuição de temperaturas em 4 níveis de classificação de resistência ao fogo, o R30, R60, R90 e R120 que totalizaram 210 resultados de distribuição de temperaturas em perfis.

A determinação da temperatura em várias secções é feita a partir da separação em várias componentes, neste caso de estudo, a secção resistente foi dividida em 7 componentes.

São apresentadas novas propostas para a aproximação da temperatura média de cada componente, para o cenário de incêndio de colunas parcialmente embebida com betão e embebidas em paredes de tijolo cerâmico. Estes elementos foram submetidos a incêndio de um lado, tendo sido propostas aproximações quadráticas ou lineares de fatores geométricos que aproximam as curvas de temperatura média para cada série de perfil.

1.3 Organização da Dissertação

A dissertação é organizada em 8 capítulos, os seguintes parágrafos descrevem o que cada capítulo contém.

O capítulo 1 representa a introdução do trabalho de investigação. No capítulo 2 é apresentado a descrição de curvas nominais e parâmetros de incêndio utilizados para determinar a evolução da temperatura, assim como os aspetos normativos sobre estruturas sob ação do fogo. No capítulo 3 são apresentados os perfis estudados e as suas propriedades térmicas.

No capítulo 4 é apresentado o método atual presente no Eurocódigo 1994-1-2, para cálculo resistência à encurvadura de perfis em aço parcialmente embebidos com betão, em condições de incêndio.

O capítulo 5 apresenta o estudo numérico sobre o comportamento de pilares mistos embebidos em paredes, num incêndio apenas de um lado. Todos os casos foram simulados através do programa ANSYS “mechanical APDL”. No capítulo 6 é desenvolvido uma proposta para expressões de cálculo da temperatura média das componentes da seção de pilares mistos embebidos em parede. No capítulo 7 são apresentados os resultados e as comparações realizadas, sendo que no capítulo 8 são apresentadas as principais conclusões e propostas para a realização de trabalhos futuros.

1.4 Estado da arte

A resistência ao fogo de colunas parcialmente embebidas tem vindo a ser estudada por vários autores. Os estudos utilizam maioritariamente métodos numéricos, mas existem alguns casos de ensaios experimentais.

Sobre este estudo colunas mistas de aço parcialmente revestidas com betão embebidas em paredes em condições de incêndio existem poucos estudos.

Em 1954, H. L. Malhotra [12] apresentou um estudo sobre o efeito da temperatura no betão, na resistência a compressão. Foram utilizados corpos de prova com diferentes diâmetros, com vários valores de relação entre água e cimento, para variados níveis de temperatura. Com o trabalho, a autora conseguiu demonstrar a significativa perda de resistência do betão a temperaturas com valores acima de 600 °C, não dependendo da relação água cimento, mas sim da relação entre cimento e agregado. A autora determinou que a redução da resistência do betão a temperaturas entre 200 °C e 450 °C é de aproximadamente 20 %.

Em 1984, J. C. Dotreppe, J. M. Franssen e J. B. Schleich [13] apresentaram um estudo sobre a resistência ao fogo de perfis em aço e estruturas mistas, utilizando o método dos

elementos finitos, utilizando modelos de elementos de viga com subdivisão da seção transversal numa malha de quadriláteros. Os elementos foram submetidos a um incremento de temperatura de acordo com a ISO834 e analisado incremento a incremento, com recurso ao método de Newton-Raphson. A comparação dos resultados teóricos e experimentais foi realizada para uma viga mista, obtendo boa aproximação em situações de baixas e médias temperaturas, necessitando de um aperfeiçoamento no modelo para altas temperaturas.

Em 1989, K. Kordina [5] realizou um estudo onde apresentou tabelas de resistência ao fogo, de forma a serem usadas como guia para dimensionamento de colunas mistas, totalmente revestidas, parcialmente revestidas e preenchidas, quando submetidas a situações de incêndio, utilizando a curva de incêndio padrão ISO834. As tabelas para resistência ao fogo foram desenvolvidas para as colunas de acordo com o grau de utilização, levando em consideração as dimensões mínimas, percentual de reforço e distância entre reforços, para os diferentes períodos de resistência ao fogo.

Em 2002, L. Han et al. [14] Realizaram um estudo experimental com seis colunas retangulares preenchidas com betão, com e sem proteção ao fogo, submetidas a carga axial ou excêntrica após serem expostas a curva de fogo padrão ISO834. Como esperado, a perda de resistência dos elementos sem proteção térmica após a exposição a curva de temperatura foi maior, comparado com os elementos que apresentavam proteção térmica. A resistência residual das colunas mistas foi determinada utilizando diferentes normas, e com modelos matemáticos, concluindo que os resultados comparados com os experimentais apresentavam valores concordantes.

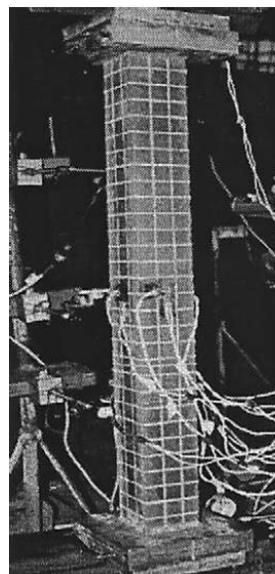


Figura 1- A visão geral de uma simulação feita a uma coluna mista em laboratório por, L. Han. [14]

Em 2010, Correia et al. [16] verificaram que os elementos de aço mistos se comportam de maneira diferente no caso de incêndio, quando isolados ou embutidos nas paredes dos edifícios. As paredes por um lado, têm um efeito favorável na proteção dos elementos contra o aquecimento excessivo resultante de fogo e, por outro lado, têm um efeito prejudicial devido aos gradientes térmicos originados em a seção transversal dos elementos. Os métodos de cálculo simplificados propostos na EN 1993-1-2 para projeto de elementos de aço submetidos a incêndio não tem em consideração o caso de elementos de aço se encontrarem embutidos nas paredes, estipulando apenas uma formulação para a avaliação da resistência com distribuição uniforme da temperatura. Este artigo apresenta uma proposta de um novo método de cálculo simplificado para avaliar a temperatura de colunas de aço embutidas nas paredes. O método é baseado em simulações numéricas e testes de resistência ao fogo. Colunas de aço total ou parcialmente foram embutidas em paredes, com a alma perpendicular ou paralela à superfície da parede. No estudo, também foi observado que paredes mais espessas ou colunas de aço H com a alma perpendicular à superfície da parede fornece maiores gradientes térmicos nas seções transversais.

Em 2014, Correia et al, [17] verificaram que o contato de colunas de aço com paredes de edifícios é responsável por grandes gradientes térmicos dentro de sua seção transversal durante o incêndio. Os códigos regulamentares atuais para o projeto de incêndio dos elementos de aço fornecem uma formulação para avaliar a capacidade de carga desses membros, assumindo temperatura uniforme na seção transversal; no entanto, não é isso que acontece na maior parte dos casos em estruturas reais quando as colunas estão embutidas nas paredes. As paredes, por um lado, proporcionam uma redução de temperatura nas colunas, que de alguma forma é favorável em termos de resistência ao fogo, mas por outro lado, a diferença de aquecimento na seção transversal das colunas pode levar a tensões desfavoráveis (momentos fletores) responsáveis por instabilidade (curvatura térmica). Dependendo dos efeitos de segunda ordem, este comportamento é um fenômeno importante que pode levar a uma significativa redução na sua resistência ao fogo. Este artigo apresenta os resultados de um estudo numérico para avaliar a influência do aquecimento diferencial no projeto de incêndio de colunas de aço. Novos diagramas de interação de momento fletor e carga axial são apresentados para colunas de aço H não uniformemente aquecidas.



Figura 2 – Teste experimental de Correia et al [17].

Em 2015, P. A. G. Piloto et al. [18] Apresentaram um estudo sobre colunas mistas parcialmente revestidas submetidas a situações de incêndio, onde foram propostas novas equações para o cálculo da resistência plástica à compressão axial e rigidez efetiva à flexão da seção transversal em relação ao eixo fraco. Este método foi apresentado como proposta de melhoramento do método do cálculo simplificado presente no anexo G da EN 1994-1-2. Foram utilizados perfis da série IPE e HEB, tendo sido realizadas simulações numéricas térmicas como método de comparação, demonstrando que existem valores inseguros na norma. O método de cálculo avançado foi utilizado para validar fórmulas novas e seguras, com base na análise da seção transversal totalmente absorvida pelo fogo.

No final de 2015, M. Milanović, M. Cvetkovska e P. Knežević. [15] Publicaram um artigo sobre a capacidade de três configurações diferentes de colunas mistas, aço-betão, submetidas ao fogo, comparando-as a uma coluna de betão reforçado como referência. A pesquisa teve por objetivo comparar os três tipos de colunas mistas (totalmente revestida, parcialmente revestida e preenchida com betão) analisando a absorção de calor quando

submetidas a exposição ao fogo (ISO834) dos quatro lados, verificando a redução das capacidades de carga mostrados pela curva de tensão normal-momento. Os autores verificaram que as colunas parcialmente revestidas possuem a maior absorção de calor, devido o metal estar em contato direto com o fogo, o que reduz a sua capacidade de carga, diminuindo sua resistência ao fogo, mas que em situação à temperatura ambiente para as mesmas dimensões de seção transversal, é a configuração com maior resistência, devido ao grande percentual do perfil de aço na seção transversal.

Em 2017 P. A.G. Piloto et al. [19] Publicaram um artigo sobre testes experimentais em vigas parcialmente revestidas submetidas a altas temperaturas, foi apresentado o desempenho de flexão lateral de vinte e sete vigas em diferentes níveis de temperatura usando a configuração de flexão em quatro pontos. A partir deste estudo, foi verificado que é necessário incluir o modo de falha de encurvamento torsional lateral em vigas parcialmente revestidas no Eurocódigo 4 para projetos de estruturas mistas de aço e betão expostas ao fogo.

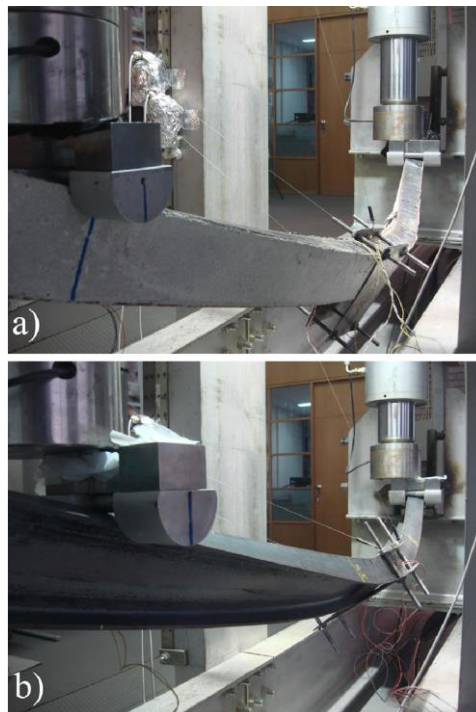


Figura 3 – Teste Experimental feito a uma viga revestida com betão(a) e sem revestimento (b). [8]

Em 2018, Fábio M. Rocha, et al [8], estudaram o comportamento ao fogo do aço em colunas e em colunas mistas parcialmente embutidos em paredes de alvenaria com restrição ao alongamento térmico. Os autores descobriram que a amplitude dos gradientes térmicos e suas

direções têm um forte efeito sobre o comportamento mecânico e sobre a estabilidade das colunas parcialmente revestidas com betão em condições de incêndio. A espessura da parede influenciou a rigidez à flexão das colunas testadas, afetando as forças de restrição e deslocamentos. O gradiente térmico na seção transversal é responsável pelo efeito de curvatura térmica, introduzindo momentos de flexão adicionais e forças axiais.

Em 2019, P. A.G. Piloto et al. Publicaram um livro onde são reunidas as apresentações feitas durante o 5º Congresso Latino-americano de segurança contra incêndios. Os autores estudaram o comportamento de Colunas parcialmente revestidas (PEC) em situação de incendio, concluindo que as (PEC) tem uma melhor resistência ao fogo em comparação aos pilares de aço a descoberto. Este estudo teve como objetivo de desenvolver uma nova proposta para o cálculo da resistência à encurvadura de colunas parcialmente revestidas, embutidas nas paredes, sob condições de incêndio. Esta proposta é baseada no método de cálculo atual, proposto no Anexo G da EN 1994-1-2. Este estudo usa o método dos elementos finitos para calcular a temperatura média de sete componentes. A temperatura média é então usada para encontrar a resistência à encurvadura de colunas compostas quando submetidas a fogo de um lado. Este método de solução é realizado usando 30 tipos de seções diferentes. Todas as seções transversais são expostas à curva de fogo padrão ISO834 de um lado, assumindo a classificação específica de incêndio de 30, 60, 90 e 120 min.

CAPÍTULO 2- AÇÃO DO FOGO E ASPETOS NORMATIVOS

2.1 Ação do Fogo

O estudo realizado no presente trabalho tem em conta análise a resistência de colunas mistas, parcialmente revestidas e embebidas em paredes, expostas a situações de incêndio. Como tal é necessário conhecer as ações do fogo, assim como os meios de propagação do calor a fim de determinar o comportamento mecânico destes elementos estruturais.

As ações térmicas são determinadas pela norma europeia EN1991-1-2, definem o fluxo de calor em duas vertentes: convecção e radiação. O fluxo de calor efetivo, por unidade de área, é apresentado na equação (1), definido na superfície do elemento exposto ao fogo.

$$h_{net} = h_{net,c} + h_{net,r} \left[\frac{W}{m^2} \right] \quad (1)$$

A convecção é a forma de propagação de calor em que ocorrem movimentos de partículas de um fluido que se encontra fora do equilíbrio térmico.

A componente do fluxo de calor efetivo por convecção deverá ser determinada pela seguinte equação:

$$h_{net} = \alpha_c (\theta_g - \theta_m) \left[\frac{W}{m^2} \right] \quad (2)$$

No lado não exposto ao fogo dos elementos, o fluxo de calor efetivo deverá ser determinado pela equação (2), com $\alpha_c = 4 \frac{W}{m^2 K}$. O coeficiente de transferência de calor pode também tomar o valor de $\alpha_c = 9 \frac{W}{m^2 K}$, quando se admite que inclui os efeitos da transferência de calor por radiação. Nesta equação, θ_g representa a temperatura do compartimento de incêndio e θ_m representa a temperatura do material.

A componente de fluxo de calor efetivo por radiação, é determinada por:

$$h_{net} = \phi \cdot \varepsilon_m \cdot \varepsilon_f \cdot [(\theta_r + 273)^4 - (\theta_m + 273)^4] \left[\frac{W}{m^2} \right] \quad (3)$$

A equação (3), também conhecida como lei de Stefan-Boltzmann detém, para o caso de colunas expostas ao fogo, o fator de vista (\varnothing) igual a 1. O fator de vista é um parâmetro geométrico que relaciona a posição relativa entre a fonte de emissão e o elemento recetor. Esta equação depende também da emissividade do elemento e das chamas. O valor da emissividade pode ser $\varepsilon_m = 0,7$ para o aço ou $\varepsilon_m = 0,91$ alvenaria e $\varepsilon_f = 1,0$ para o fogo.

Ação térmica atuante numa estrutura é caracterizada por modelos matemáticos que associam a elevação da temperatura dos gases em função do tempo. Estas curvas que fornecem a elevação da temperatura dos gases em função do tempo de incêndio são apresentadas a seguir.

2.1.1 Incendio natural

Quando ocorre um incendio é necessário que existam três fatores: fonte de calor, combustível e o comburente (oxigênio). Iniciada a reação de oxidação, vulgarmente denominada de combustão ou queima, o calor resultante desta reação permite a continuação do incêndio.

Os estágios de um incêndio podem ser definidos pelos seguintes pontos: pré-flashover, flashover e temperatura máxima. Na figura é apresentado um modelo esquematizado de um incêndio real. [2]

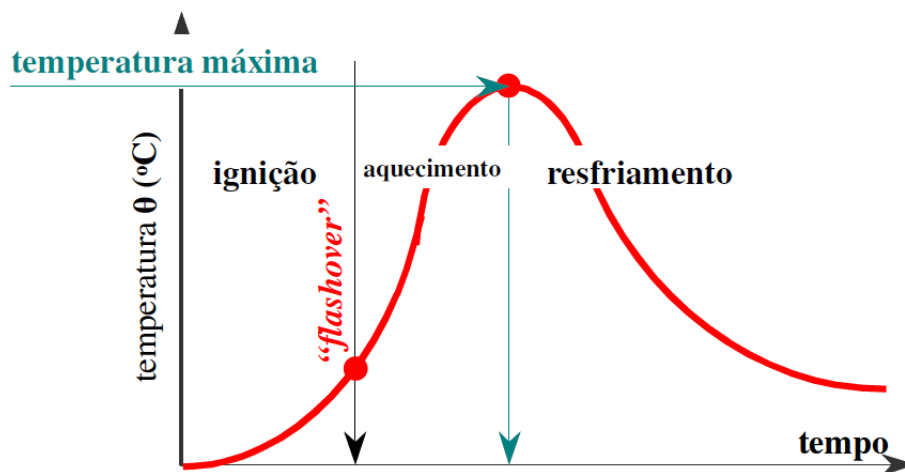


Figura 4-Curva temperatura-tempo de um incêndio real [2]

O incêndio é modelado por meio de curvas temperatura-tempo elas associam a elevação da temperatura em função do tempo de duração de incêndio. O incêndio real apresenta três estágios básicos:

- Ignição: é o início da inflamação($t=0$), com crescimento gradual da temperatura, nesta fase o incêndio é considerado de pequenas proporções e sem risco para a vida humana ou ao património, por colapso estrutural. Este estágio é também conhecido como *pré-flashover*.
- Fase de aquecimento: é caracterizada por uma mudança súbita de crescimento da temperatura, neste estágio resulta um incêndio generalizado, onde todo o material combustível no compartimento entra em combustão. Este fenómeno é denominado como *flashover*, podendo a temperatura dos gases quentes no seu pico ser superior aos 1000°C.
- Fase de resfriamento, região que apresenta a redução gradativa da temperatura dos gases no ambiente, após atingir a temperatura máxima.

2.1.2 Incêndio Padrão

O incêndio padrão é o modelo idealizado para ensaios experimentais, admitindo-se que a temperatura dos gases quentes no compartimento em chamas obedeça as curvas padronizadas. As curvas-padrão possuem apenas um ramo ascendente, com início no momento da combustão generalizada, aumentando a temperatura em função do tempo.

De acordo com C.N. Costa e V.P. Silva [2] as curvas-padrão não representam uma situação real de incêndio, grau de ventilação, etc.), contudo, elas são usadas em ensaios em série de elementos construtivos e para avaliar a sua resistência ao fogo. A curva-padrão pode ser indicadora qualitativa de resistência em função da severidade do aquecimento.

A curva de incêndio padrão utilizada no presente trabalho é normalizada pela **ISO834 - Fire Resistance Tests - Elements of Building Construction**. A norma foi inicialmente publicada em 1975 e alterada em 1999 pela *International Organization for Standardization (ISO)*, definindo a evolução da temperatura dos gases de incêndio através da equação (4).

$$\theta_g = \theta_0 + 345 \log(8t + 1) \quad (4)$$

Na equação (4), a temperatura dos gases no ambiente em chamas, em graus Celsius, é representado por θ_g , a temperatura dos gases no instante $t=0$ (geralmente igual a 20 °C) é representado por θ_0 e o tempo é representado por t (em minutos).

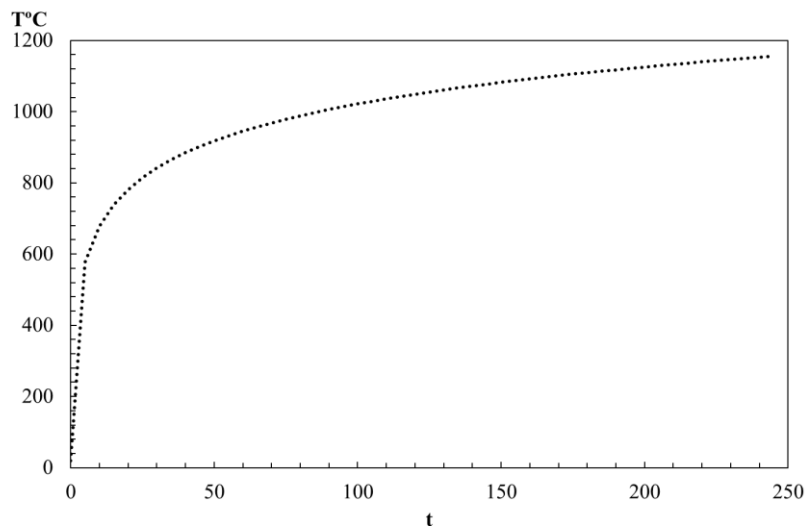


Figura 5- Curva de incêndio padrão ISO 834

O Eurocódigo 1991-1-2 especifica o coeficiente de convecção $\alpha_c = 25 \text{ W/m}^2\text{K}$ para ser adotado juntamente com a curva ISO 834. [7].

2.2 Aspectos Normativos

Com o passar dos anos foi necessário utilizar métodos de dimensionamento a fim de compreender o comportamento do fogo e seus impactos nas estruturas, de modo a tornar as estruturas mais seguras e económicas.

Os Eurocódigos estruturais iniciaram o seu desenvolvimento em 1975, quando uma comissão da comunidade europeia elaborou um programa de ação no campo da construção baseado em acordos, buscando eliminar os obstáculos técnicos e padronizar as especificações técnicas. A primeira publicação foi no ano de 1984,

Os Eurocódigos estão divididos em 10 partes, ver tabela, definidos em função dos materiais, cada código é dividido em algumas partes com especificações. Neste trabalho foi estudada a parte 1-2, utilizada para o fogo, ações e resistência.

Tabela 1- Códigos Normativos Europeus

| EN 1990 | EN 1991 | EN 1992 | EN 1993 | EN 1994 | EN 1995 | EN 1996 | EN 1997 | EN 1998 | EN 1999 |
|----------------------------------|---------------------|--------------------------------|------------------------------|---|----------------------------------|----------------------|--------------------|---|-----------------------------------|
| Bases para projeto de estruturas | Ações em estruturas | Projeto de estruturas de betão | Projeto de estruturas em aço | Projeto de estruturas compósitas de aço e betão | Projeto de estruturas de madeira | Projeto de alvenaria | Projeto geotécnico | Projeto de estruturas para resistência a sismos | Projeto de estruturas de alumínio |

As normas europeias apresentam métodos simplificados de cálculo para determinar a capacidade resistência de pilares mistos parcialmente revestidos, sob a ação do fogo, no entanto, nem todos os métodos tem em conta o aquecimento assimétrico dos pilares.

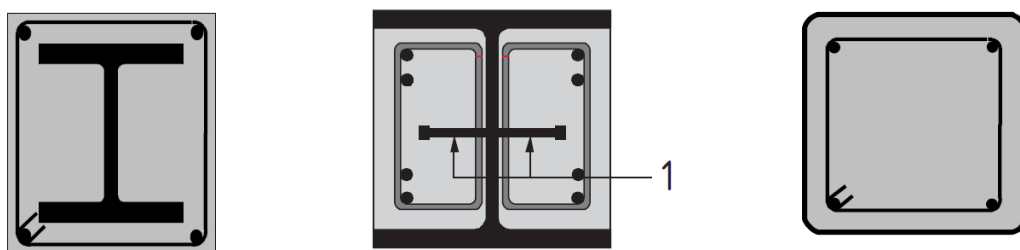
As normas europeias apresentam três métodos de cálculo da resistência ao fogo das estruturas, sendo primeiro o método a partir de valores tabelados, o segundo o método simplificado de cálculo e terceiro permite a utilização de modelo avançado de cálculo.

O presente trabalho considera um método simplificado de cálculo, o anexo G do EN 1994-1-2, para obtenção da resistência à encurvadura de pilares mistos parcialmente revestidos sob ação do fogo, comparando os resultados com os modelos avançados de cálculo.

CAPÍTULO 3- SEÇÕES MISTAS E PROPRIEDADES DOS MATERIAIS

Os pilares mistos parcialmente revestidos apresentam uma elevada rigidez e resistência, esse fator pode ser atribuído ao betão que se encontra entre banzos dos perfis metálicos, sendo geralmente utilizadas para secções do tipo I ou H.

De acordo com a área que o betão ocupa na secção mista, é possível classificar as secções mistas como totalmente revestidas, colunas parcialmente revestidas e colunas preenchidas.



Legenda:

1 Conectores soldados à alma do perfil

Figura 6- Tipos de secções transversais de pilar EN 1994-1-2 [3].

3.1 Secções mistas embebidas em parede

O comportamento apresentado por pilares mistos de aço e betão que se encontram inseridos em paredes de alvenaria é muito diferente do comportamento apresentado por pilares isolados, isto é, a alvenaria proporciona, em situação de incêndio, não só a redução da temperatura, mas é também responsável por um aquecimento diferencial que pode causar gradientes térmicos ao longo da secção. Isto deve-se muito porque os pilares inseridos em parede em edifícios reais serem, geralmente, expostos a fogo a partir do interior do compartimento.

3.1.1 Definição do modelo em análise.

Neste estudo, foram selecionados trinta tipos de secções transversais, com perfis da série HEB, da série HEA e da série HEM. Para determinar os perfis foi levado em conta o método tabular da Norma EN 1994-1-2 [3] para projetos de resistência ao fogo em colunas mistas parcialmente revestidas, tendo em conta a maior variação do fator de secção.

O modelo restringe a escolha de perfis com uma largura (b) mínima de 230 mm e máxima de 500 mm, uma altura (h) entre 230 e 1100 mm e ainda define uma percentagem de reforço variável entre 1 % e 6 %. As espessuras da alma (e_w) e do banzo (e_f) não interferem nas restrições de aplicação do modelo. Além destas restrições, para os tempos de resistência ao fogo de R90 e R120 a altura e a largura dos perfis não devem ser inferiores a 300 mm, por este motivo as duas primeiras seções transversais de todas as séries, para os dois últimos tempos de resistência ao fogo foram desprezadas.

O diâmetro das barras de reforço foi escolhido de maneira que a percentagem de reforço, calculado utilizando a área de betão (A_c) e a área dos reforços (A_s), se mantivesse equilibrada, de acordo com os diâmetros comerciais disponíveis, ver Figura 7. Foi utilizado uma distância u média de 50 mm, que é a média geométrica entre as distâncias de cobrimento de betão u_1 (distância entre o eixo da barra de reforço com a parte interior do banzo) e u_2 (distância do eixo da barra de reforço com a extremidade do betão).

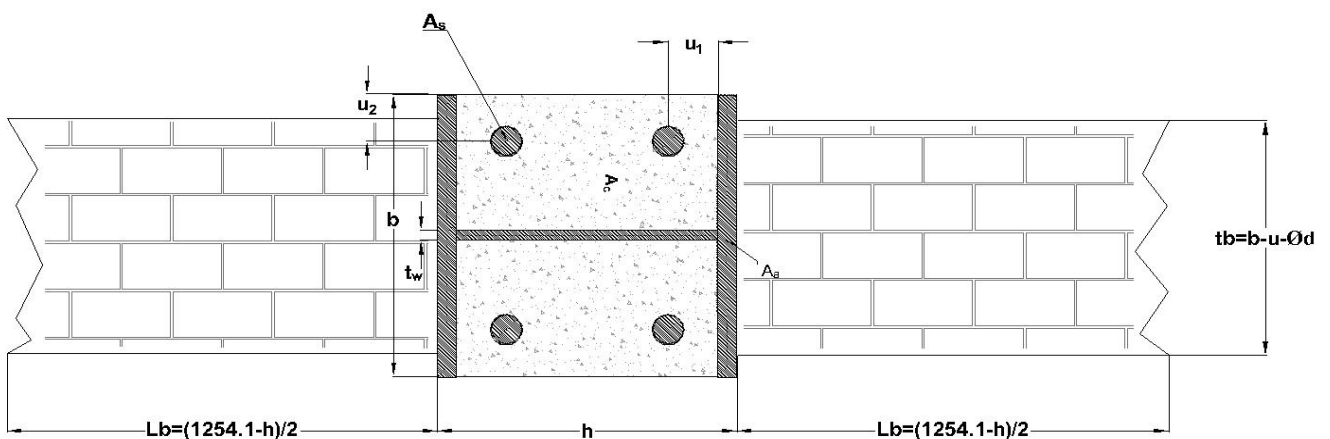


Figura 7- Modelo utilizado no estudo.

Para o perfil de aço foi selecionado o aço S355, com revestimento de betão C20/25 reforçado com barras de aço B500. As propriedades destes materiais são apresentadas na próxima secção deste capítulo.

A Figura 7 apresenta a configuração da seção estudada para perfil embebido na parede. A espessura da parede foi definida de modo que mantivesse sempre a proporção de acordo com a dimensão da seção, com sua espessura limitada à distância entre os reforços. Enquanto o comprimento da parede foi definido a partir do perfil UC 254x254x73, com comprimento $Lb = 500\text{mm}$, o comprimento total para todas as seções estudadas fixou-se em 1254.1mm.

A Tabela 2 apresenta as principais características geométricas e construtivas das seções estudadas.

Tabela 2 - Configurações dos perfis embebidos em paredes estudados.

| Perfis | h [mm] | b [mm] | t_w [mm] | t_f [mm] | $\frac{h}{b}$ | $\frac{Am}{V}$ [m ⁻¹] | Nº Reforços | ϕ [mm] | $\frac{A_s}{AS+Ac}$ | u [mm] | Lb [mm] | tb [mm] |
|-----------------|-------------|-------------|---------------|---------------|---------------|--------------------------------------|----------------|----------------|---------------------|-------------|--------------|--------------|
| HEA 240 | 230 | 240 | 7.5 | 12 | 0.96 | 6.34 | 4 | 20 | 2.62 | 50 | 512 | 120 |
| HEA 280 | 270 | 280 | 8 | 13 | 0.96 | 5.22 | 4 | 25 | 2.96 | 50 | 492 | 155 |
| HEA 320 | 310 | 300 | 9 | 15.5 | 1.03 | 4.68 | 4 | 25 | 2.42 | 50 | 472 | 175 |
| HEA 360 | 350 | 300 | 10 | 17.5 | 1.17 | 4.59 | 4 | 32 | 3.52 | 50 | 452 | 168 |
| HEA 450 | 440 | 300 | 11.5 | 21 | 1.47 | 4.33 | 4 | 32 | 2.80 | 50 | 40 | 168 |
| HEA 500 | 490 | 300 | 12 | 23 | 1.63 | 4.23 | 4 | 32 | 2.52 | 50 | 382 | 168 |
| HEA 600 | 590 | 300 | 13 | 25 | 1.97 | 4.08 | 4 | 32 | 2.08 | 50 | 332 | 168 |
| HEA 700 | 690 | 300 | 14.5 | 27 | 2.30 | 4.01 | 4 | 40 | 2.77 | 50 | 282 | 160 |
| HEA 800 | 790 | 300 | 15 | 28 | 2.63 | 3.92 | 4 | 40 | 2.40 | 50 | 232 | 160 |
| HEA 1000 | 990 | 300 | 16.5 | 26 | 3.30 | 3.80 | 4 | 40 | 1.89 | 50 | 13 | 160 |
| HEB 240 | 240 | 240 | 10 | 17 | 1.00 | 6.25 | 4 | 20 | 2.65 | 50 | 507 | 120 |
| HEB 280 | 280 | 280 | 10.5 | 18 | 1.00 | 5.17 | 4 | 25 | 2.99 | 50 | 487 | 155 |
| HEB 320 | 320 | 300 | 11.5 | 20.5 | 1.07 | 4.64 | 4 | 25 | 2.44 | 50 | 467 | 175 |
| HEB 360 | 360 | 300 | 12.5 | 22.5 | 1.20 | 4.56 | 4 | 32 | 3.55 | 50 | 447 | 168 |
| HEB 450 | 450 | 300 | 14 | 26 | 1.50 | 4.31 | 4 | 32 | 2.83 | 50 | 402 | 168 |
| HEB 500 | 500 | 300 | 14.5 | 28 | 1.67 | 4.21 | 4 | 32 | 2.54 | 50 | 377 | 168 |
| HEB 600 | 600 | 300 | 15.5 | 30 | 2.00 | 4.07 | 4 | 32 | 2.09 | 50 | 327 | 168 |
| HEB 700 | 700 | 300 | 17 | 32 | 2.33 | 4.00 | 4 | 40 | 2.79 | 50 | 277 | 160 |
| HEB 800 | 800 | 300 | 17.5 | 33 | 2.67 | 3.92 | 4 | 40 | 2.42 | 50 | 227 | 160 |
| HEB 1000 | 1000 | 300 | 19 | 36 | 3.33 | 3.80 | 4 | 40 | 1.93 | 50 | 12 | 160 |
| HEM 240 | 270 | 248 | 18 | 32 | 1.09 | 5.90 | 4 | 25 | 4.14 | 50 | 492 | 123 |
| HEM 280 | 310 | 288 | 18.5 | 33 | 1.08 | 4.87 | 4 | 25 | 2.99 | 50 | 472 | 163 |
| HEM 320 | 359 | 309 | 21 | 40 | 1.16 | 4.36 | 4 | 25 | 2.44 | 50 | 44 | 180 |
| HEM 360 | 395 | 308 | 21 | 40 | 1.28 | 4.27 | 4 | 25 | 2.17 | 50 | 429 | 183 |
| HEM 450 | 478 | 307 | 21 | 40 | 1.56 | 4.11 | 4 | 25 | 1.72 | 50 | 38 | 182 |
| HEM 500 | 524 | 306 | 21 | 40 | 1.71 | 4.09 | 4 | 32 | 2.54 | 50 | 36 | 174 |
| HEM 600 | 620 | 305 | 21 | 40 | 2.03 | 3.98 | 4 | 32 | 2.10 | 50 | 31 | 173 |
| HEM 700 | 668 | 305 | 21 | 40 | 2.19 | 3.93 | 4 | 32 | 1.93 | 50 | 29 | 173 |
| HEM 800 | 814 | 303 | 21 | 40 | 2.69 | 3.84 | 4 | 32 | 1.55 | 50 | 22 | 171 |
| HEM 1000 | 1008 | 302 | 21 | 40 | 3.34 | 3.74 | 4 | 32 | 1.23 | 50 | 123 | 170 |

As dimensões das seções transversais em estudo apresentadas na Tabela 2 foram utilizadas para realizar os cálculos do método simplificado de cálculo, como no modelo proposto de melhoramento. Para a realização do método avançado de cálculo foi necessário apenas um ajuste na geometria, aproximando as barras de reforço como quadriláteros com a mesma área equivalente.

3.2 Propriedades dos Materiais

3.2.1 Propriedades Térmicas

Entende-se por propriedade térmica, a característica responsável pela resposta ou reação do material à aplicação de calor.

O aumento da temperatura nos elementos estruturais, tem como consequência a ação térmica, sendo esta responsável pela redução da resistência e da rigidez nas estruturas. As propriedades térmicas influenciam no comportamento do aço quando submetidos a condições de elevadas temperaturas, e são definidas de acordo com o Eurocódigo EN 1993-1-2 [9].

3.2.1.1 Aço

As propriedades térmicas que tem influência no comportamento do aço em condições de incêndio estão expressas no Eurocódigo EN1993-1-2 [9] e são:

A massa específica do aço ρ_a não é afetada pela variação da temperatura, e permanece constante mesmo quando submetido a altas temperaturas.

$$20 \leq \theta_a \leq 1200^\circ C$$

$$\rho_a = 7850 \left[\frac{kg}{m^3} \right] \quad (5)$$

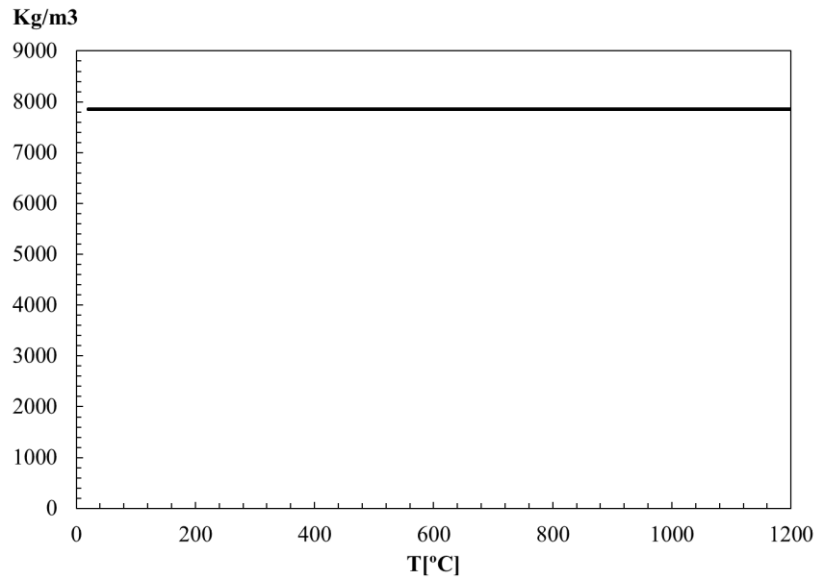


Figura 8 – Massa específica do aço em função da temperatura.

O calor específico c_a , deve ser determinado pelas seguintes expressões.

$20 [^{\circ}\text{C}] \leq \theta_a < 600 [^{\circ}\text{C}]$:

$$c_a = 425 + 7,73 \times 10^{-1} \theta_a - 1,69 \times 10^{-3} \theta_a^2 + 2,22 \times 10^{-6} \theta_a^3 \left[\frac{\text{J}}{\text{kgK}} \right] \quad (6)$$

$600 [^{\circ}\text{C}] \leq \theta_a < 735 [^{\circ}\text{C}]$:

$$c_a = 666 + \frac{13002}{738 - \theta_a} \left[\frac{\text{J}}{\text{kgK}} \right] \quad (7)$$

$900 [^{\circ}\text{C}] \leq \theta_a \leq 1200 [^{\circ}\text{C}]$:

$$c_a = 650 \left[\frac{\text{J}}{\text{kgK}} \right] \quad (8)$$

Em que θ_a representa a temperatura do aço em $[^{\circ}\text{C}]$. A variação do calor específico com a temperatura é representada no gráfico da Figura 9.

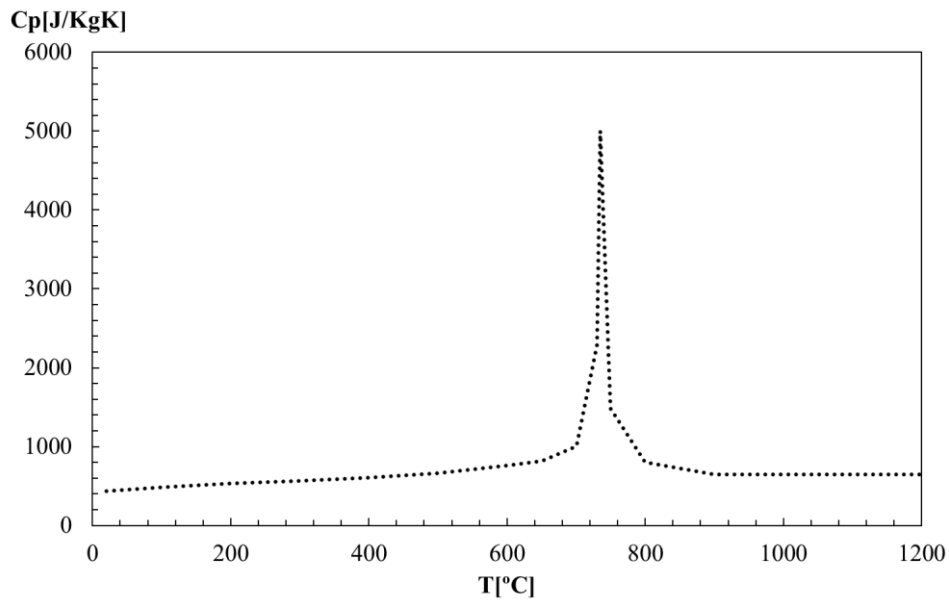


Figura 9 - Calor específico do aço carbono, em função da temperatura.

A condutividade térmica do aço λ_a é determinada pelas seguintes expressões:

$20 [^{\circ}\text{C}] \leq \theta_a < 800 [^{\circ}\text{C}]$:

$$\lambda_a = 54 - 3.3 \times 10^{-2} \theta_a \left[\frac{W}{mK} \right] \quad (9)$$

$800 [^{\circ}\text{C}] \leq \theta_a \leq 1200 [^{\circ}\text{C}]$:

$$\lambda_a = 27,3 \left[\frac{W}{mK} \right] \quad (10)$$

Em que θ_a representa a temperatura do aço em $[^{\circ}\text{C}]$.

A variação da condutividade térmica com a temperatura é representada no gráfico da Figura 10.

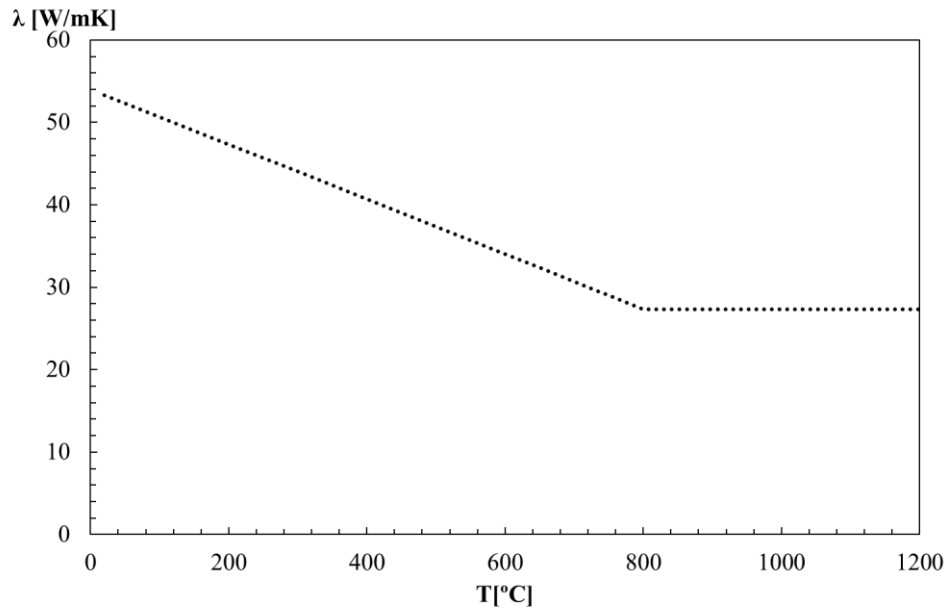


Figura 10 - Conduktividade do aço carbono, em função da temperatura.

3.2.1.2 Betão

O calor específico do betão $c_p(\theta)$, segundo o Eurocódigo 1992-1-2 deve ser determinado para um teor de água ($u = 0\%$) através das seguintes expressões:

$20 [^{\circ}\text{C}] \leq \theta < 100 [^{\circ}\text{C}]$:

$$c_p(\theta) = 900 \left[\frac{\text{J}}{\text{kg}\cdot\text{K}} \right] \quad (11)$$

$100 [^{\circ}\text{C}] \leq \theta \leq 200 [^{\circ}\text{C}]$:

$$c_p(\theta) = 900 + (\theta - 100) \left[\frac{\text{J}}{\text{kg}\cdot\text{K}} \right] \quad (12)$$

$400 [^{\circ}\text{C}] \leq \theta \leq 1200 [^{\circ}\text{C}]$:

$$c_p(\theta) = 1100 \left[\frac{\text{J}}{\text{kg}\cdot\text{K}} \right] \quad (13)$$

Em que θ_a representa a temperatura do betão em $[^{\circ}\text{C}]$

Quando o teor de água é explicitamente considerado no método de cálculo, a função indicada para o calor específico do betão com agregados siliciosos ou calcários poderá ser considerada por um valor constante, $c_{p,peak}$, situado entre 100°C e 115°C e decrescente linearmente entre 115°C e 200°C, como se pode observar na Figura 11.

$$c_{p,peak} = 900 \left[\frac{J}{kgK} \right], u = 0 [\%] \quad (14)$$

$$c_{p,peak} = 1470 \left[\frac{J}{kgK} \right], u = 1.5 [\%] \quad (15)$$

$$c_{p,peak} = 2020 \left[\frac{J}{kgK} \right], u = 3 [\%] \quad (16)$$

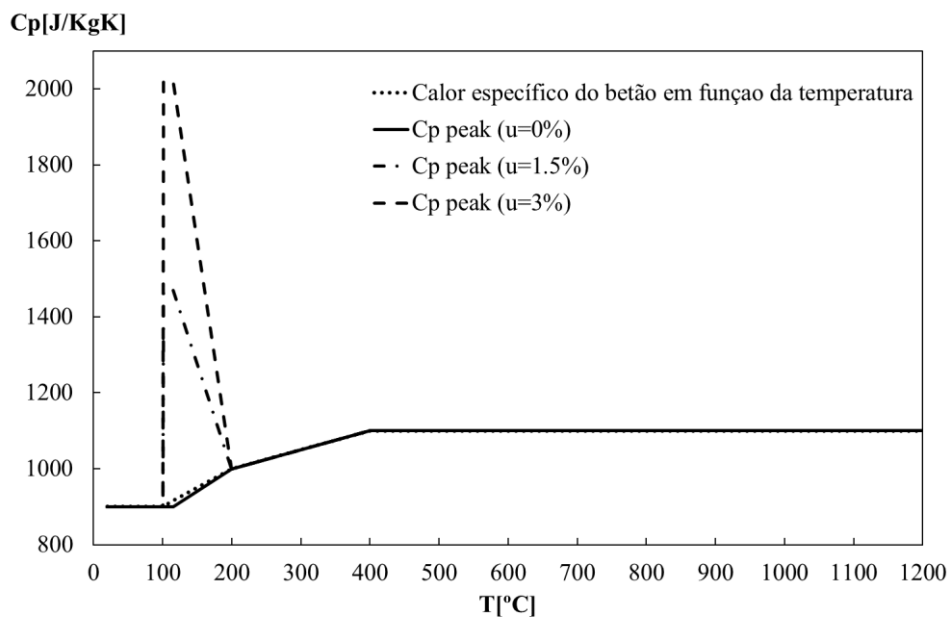


Figura 11 – Calor específico do betão em função da temperatura.

O modelo permite ter em conta o efeito da evaporação das moléculas de água presentes no betão. A massa volúmica do betão varia com a temperatura, sendo influenciada pela perda de água. O Eurocódigo EN 1992-1-2 define a variação através das seguintes expressões:

$20 [^{\circ}C] \leq \theta \leq 115 [^{\circ}C]$:

$$\rho(\theta) = \rho(20^{\circ}C) \quad (17)$$

115 [°C] ≤ θ ≤ 200 [°C]:

$$\rho(\theta) = \rho(20^{\circ}\text{C}) \times \left(1 - 0.02 \frac{\theta - 115}{85}\right) \quad (18)$$

200 [°C] ≤ θ ≤ 400 [°C]:

$$\rho(\theta) = \rho(20^{\circ}\text{C}) \times \left(0.98 - \frac{0.03(\theta - 200)}{200}\right) \quad (19)$$

400 [°C] ≤ θ ≤ 1200 [°C]:

$$\rho(\theta) = \rho(20^{\circ}\text{C}) \times \left(0.95 - \frac{0.07(\theta - 400)}{800}\right) \quad (20)$$

A variação da massa volúmica com a temperatura esta representada na Figura 12.

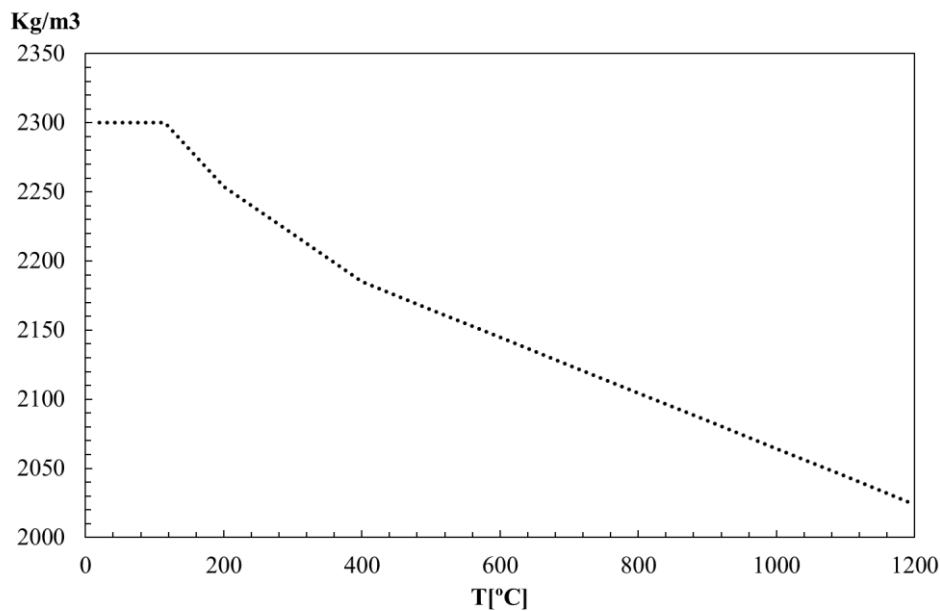


Figura 12 – Massa volúmica do betão em função da temperatura

A condutividade térmica λ_c segundo o Eurocódigo EN 1992-1-2 faz referência às fórmulas que descrevem os limites, superior e inferior, da condutividade térmica do betão em função da temperatura. O limite superior é recomendado para elementos mistos e é determinado pela expressão:

20 [°C] ≤ θ ≤ 1200 [°C]

$$\lambda_c = 2 - 0.2451 \left(\frac{\theta}{100} \right) + 0.0107 \left(\frac{\theta}{100} \right)^2 \left[\frac{w}{mK} \right] \quad (21)$$

Em que θ_a representa a temperatura do betão em [°C]

A Figura 13 representa o limite da condutividade térmica do betão.

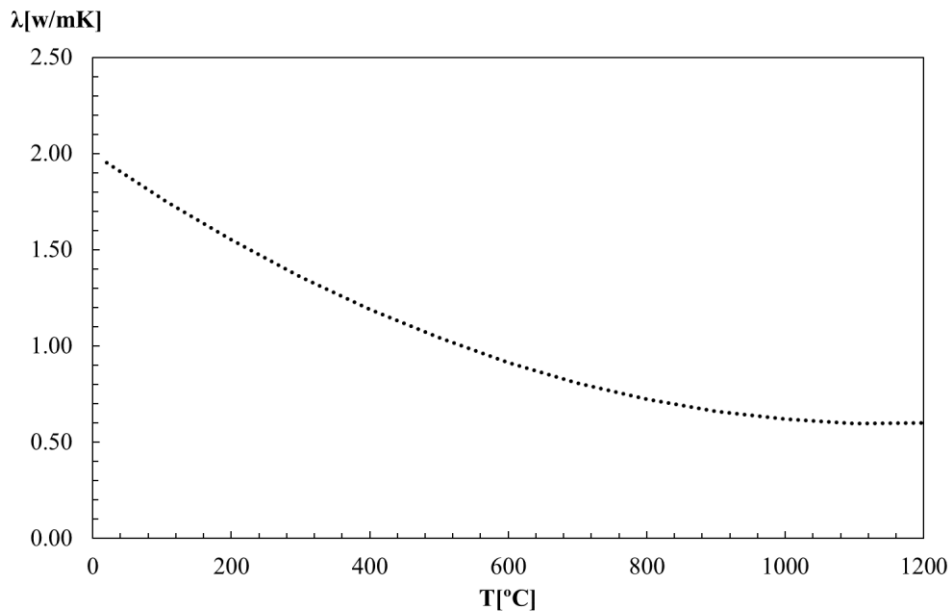


Figura 13 – Condutividade térmica do betão em função da temperatura.

3.2.1.3 Alvenaria

A parede é constituída por blocos de argila, sendo as suas propriedades definidos pela EN 1996-1-2 [10]. A capacidade de carga e de resistência é afetada pela ação do fogo, como tal é preciso considerar as propriedades térmicas da mesma, tais como a condutividade térmica e calor específico. A variação das propriedades da parede de argila consideradas neste trabalho, de acordo com a temperatura, para uma densidade compreendida entre os 900 e 1200 Kg/m³ está representada na Figura 14.

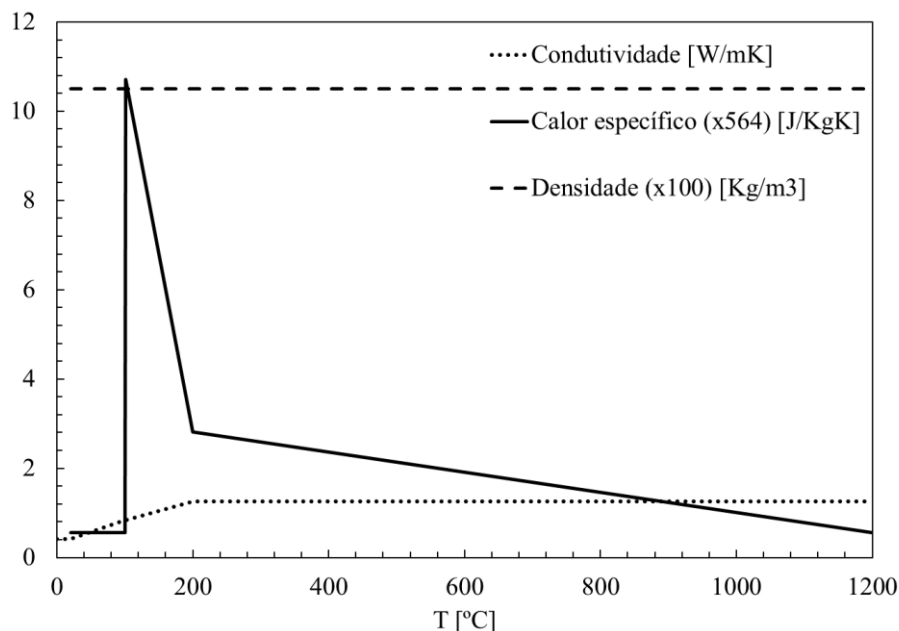


Figura 14 – Propriedades térmicas da parede de alvenaria

3.2.2 Fator de forma

O método de cálculo simplificado, para o cálculo da temperatura em elementos estruturais de aço expostos ao fogo, leva em consideração a evolução da temperatura de uma forma homogênea ao longo da secção transversal em todo o comprimento do elemento de interesse. Tudo isto se baseia no cálculo de um fator conhecido como: fator de forma ou de massividade.

Este fator depende dos lados a que um pilar está exposto ao fogo e é obtido do cálculo da área superficial exposta ao fogo, dividindo pelo seu volume.

No Eurocódigo 1993-1-2 [9], relativo ao dimensionamento estrutural de elementos em aço em situação de incêndio, são apresentadas várias expressões para o cálculo do fator de massividade de perfis metálicos, não considerando os gradientes de temperatura. Contudo, vários casos diferentes de posicionamento do pilar em relação às paredes deveriam ser considerados, uma vez que os gradientes térmicos podem ser consideravelmente diferentes.

Sendo que no nosso estudo só foi tido em conta um tipo de posicionamento, em que o pilar apresenta menor resistência, (eixo fraco).

Foram estudadas quatro formas distintas para o cálculo do fator de massividade por António Correia [11] para pilares embebidos em paredes, para uma configuração de perfil de

alma paralela á parede. Os resultados obtidos nesta investigação estão representados em Figura 15 .

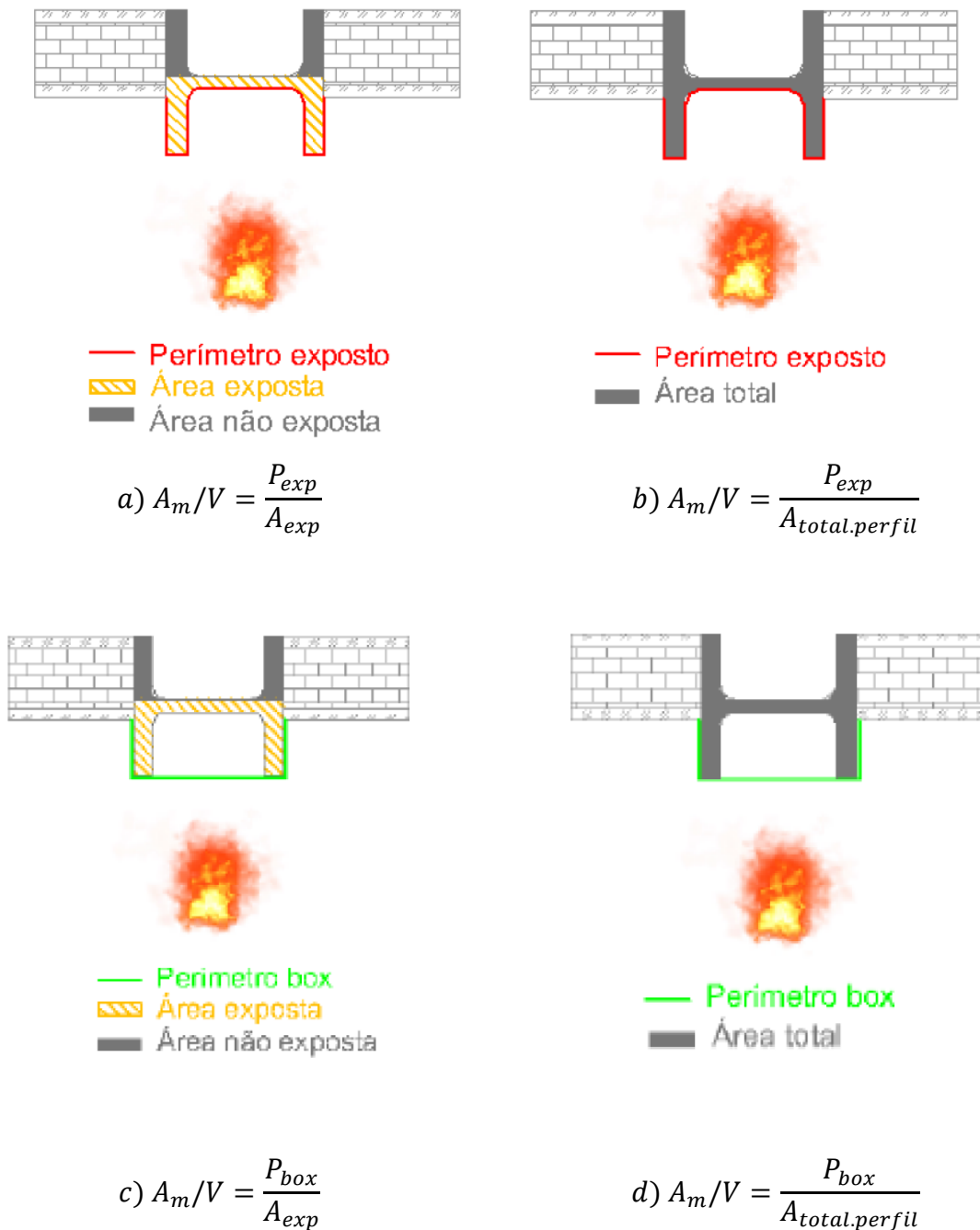


Figura 15 – Determinação do fator de massividade para perfil embebido em parede [11].

Neste estudo, o fator de forma pode ser calculado através da equação (22), para secções parcialmente revestidas embebidas em paredes com um lado exposto ao fogo. Os valores obtidos encontram se descritos na Tabela 3.

$$(A_m/V) = \frac{(b - tb) + h}{b h} [m^{-1}] \quad (22)$$

Tabela 3 –Fator de massividade para as secções em estudo.

| Perfil | A_m/V | Perfil | A_m/V | Perfil | A_m/V |
|-----------------|---------------------------|-----------------|---------------------------|-----------------|---------------------------|
| HEA 240 | 6.34 | HEB 240 | 6.25 | HEM 240 | 5.90 |
| HEA 280 | 5.22 | HEB 280 | 5.17 | HEM 280 | 4.87 |
| HEA 320 | 4.68 | HEB 320 | 4.64 | HEM 320 | 4.36 |
| HEA 360 | 4.59 | HEB 360 | 4.56 | HEM 360 | 4.27 |
| HEA 450 | 4.33 | HEB 450 | 4.31 | HEM 450 | 4.11 |
| HEA 500 | 4.23 | HEB 500 | 4.21 | HEM 500 | 4.09 |
| HEA 600 | 4.08 | HEB 600 | 4.07 | HEM 600 | 3.98 |
| HEA 700 | 4.01 | HEB 700 | 4.00 | HEM 700 | 3.93 |
| HEA 800 | 3.92 | HEB 800 | 3.92 | HEM 800 | 3.84 |
| HEA 1000 | 3.80 | HEB 1000 | 3.80 | HEM 1000 | 3.74 |

CAPÍTULO 4- MÉTODO SIMPLIFICADO DE CÁLCULO.

O método da soma ponderada presente no Anexo G consiste na separação da seção transversal de uma coluna mista parcialmente revestida, em quatro componentes (ver Figura 16 Figura 4), que são eles: os banzos do perfil metálico; a alma do perfil; o betão de revestimento e as barras de reforço do betão de revestimento.

Os banzos são representados por “*f*” (*flanges*), a alma por “*w*” (*web*), o betão por “*c*” (*concrete*) e o reforço por “*s*” (*reinforcing bars*).

O valor de cálculo da resistência plástica à compressão axial e a rigidez efetiva à flexão da seção transversal em situação de incendio são determinados a partir das equações (23) e (24).

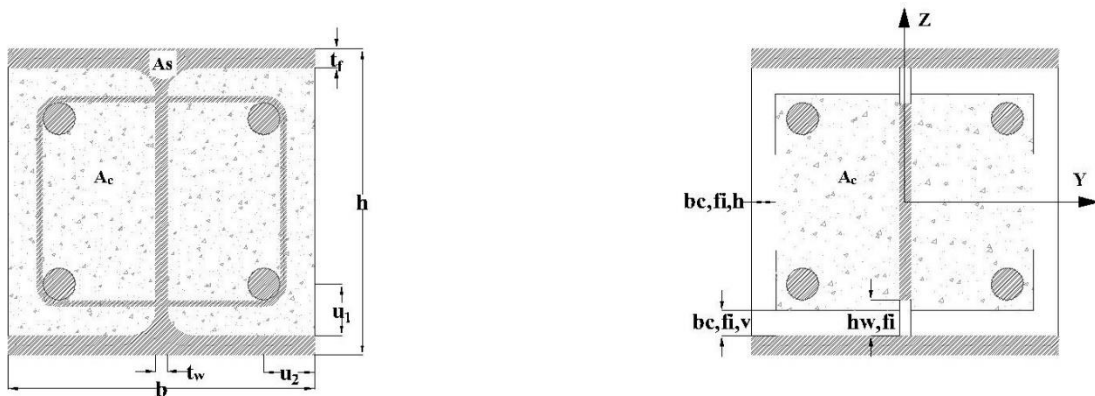


Figura 16 - Secção transversal reduzida para verificação da resistência ao fogo.

$$N_{fi,pl,Rd} = N_{fi,pl,Rd,f} + N_{fi,pl,Rd,w} + N_{fi,pl,Rd,c} + N_{fi,pl,Rd,s} \quad (23)$$

$$(EI)_{fi,eff,z} = \phi_{f,\theta}(EI)_{fi,f,z} + \phi_{w,\theta}(EI)_{fi,w,z} + \phi_{c,\theta}(EI)_{fi,c,z} + \phi_{s,\theta}(EI)_{fi,s,z} \quad (24)$$

em que $\phi_{i,\theta}$ é um coeficiente de ponderação que depende do efeito das tensões térmicas. Os valores de $\phi_{i,\theta}$ são fornecidos no Tabela 4.

Tabela 4- Coeficiente de redução para a rigidez de flexão.

| Resistência ao fogo padrão | $\phi_{f,\theta}$ | $\phi_{w,\theta}$ | $\phi_{c,\theta}$ | $\phi_{s,\theta}$ |
|-----------------------------------|-------------------|-------------------|-------------------|-------------------|
| R 30 | 1,0 | 1,0 | 0,8 | 1,0 |
| R 60 | 0,9 | 1,0 | 0,8 | 0,8 |
| R 90 | 0,8 | 1,0 | 0,8 | 0,8 |
| R 120 | 1,0 | 1,0 | 0,8 | 1,0 |

A carga crítica de Euler, ou carga crítica elástica, é obtida por:

$$N_{fi,cr,z} = \frac{\pi^2(EI)_{fi,eff,z}}{\ell_0^2} \quad (25)$$

em que:

ℓ_0 comprimento de encurvadura da coluna em situação de incêndio.

O coeficiente de esbelteza normalizada é obtido a partir de:

$$\bar{\lambda}_\theta = \sqrt{\frac{N_{fi,p,R}}{N_{fi,cr,z}}} \quad (26)$$

Utilizando $\bar{\lambda}_\theta$ e a curva de encurvadura c do EN 1993 1-1, é possível calcular o coeficiente de redução χ_z e o valor de cálculo da carga axial de encurvadura em situação de incêndio obtém-se a partir de:

$$\phi = 0.5 * [1 + \alpha * (\bar{\lambda}_\theta - 0.2) + \bar{\lambda}_\theta^{-2}], \text{ com } \alpha = 0.49 \quad (27)$$

$$\chi_z = \frac{1}{\phi + \sqrt{\phi^2 - \bar{\lambda}_\theta^{-2}}} \quad (28)$$

$$N_{fi,Rd,z} = \chi_z N_{fi,p,Rd} \quad (29)$$

Para que seja possível determinar o valor de cálculo da resistência plástica à compressão axial $N_{fi,Rd,z}$ e o valor da rigidez efetiva à flexão $(EI)_{fi,eff,z}$ em situação de incêndio, e necessário dividir a secção em quatro partes.

- Os banzos do perfil de aço;
- A alma do perfil de aço;
- O betão situado entre banzos do perfil de aço;
- Os varões da armadura.

Os valores de cálculo da resistência dos elementos em compressão axial ou os valores de cálculo das cargas axiais de encurvadura $N_{fi,Rd,z}$ em função do comprimento de encurvadura para perfis da série HEA da classe S 355, no caso de betões da classe C40/50, de varões da armadura da classe S 500 e para as classes de resistência ao fogo padrão R 60, R 90 e R 120.

Estes ábacos de cálculo baseiam-se nos coeficientes parciais de segurança dos materiais $\gamma_{M,fi,a} = \gamma_{M,fi,c} = \gamma_{M,fi,s} = 1,0$.

4.1 Banzos do perfil de aço

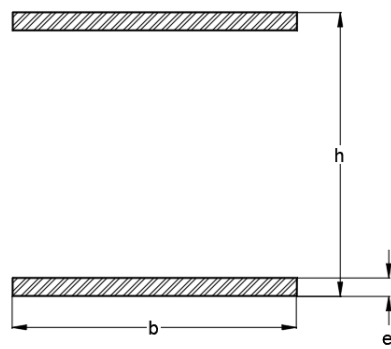


Figura 17 - Representação dos banzos.

A temperatura média do banzo poderá ser determinada a partir da equação seguinte:

$$\theta_{f,t} = \theta_{o,t} + k_t \left(\frac{A_m}{V} \right) \quad (30)$$

em que:

| | |
|------------------------------|--|
| t | duração em minutos da exposição ao incêndio; |
| $\left(\frac{A_m}{V}\right)$ | fator de massividade em m^{-1} , com $A_m = 2(h + b)$ em [m] e $V = h b$ em [m ²]; |
| $\theta_{o,t}$ | temperatura em °C fornecida no Tabela 5; |
| k_t | coeficiente empírico fornecido no Tabela 5. |

Tabela 5- Parâmetros para a temperatura do banzo.

| Resistência ao fogo padrão | $\theta_{o,t}$ [°C] | k_t [m°C] |
|-------------------------------|------------------------|----------------|
| R 30 | 550 | 9,65 |
| R 60 | 680 | 9,55 |
| R 90 | 805 | 6,15 |
| R 120 | 900 | 4,65 |

Para a temperatura $\theta = \theta_{f,t}$ o nível máximo das tensões e o módulo de elasticidade são determinados, utilizando os coeficientes de redução, a partir de:

$$f_{ay,ft} = f_{ay,f} k_{y,\theta} \quad (31)$$

$$E_{a,ft} = E_{a,f} k_{E,\theta} \quad (32)$$

Os coeficientes de redução para a tensão de cedência e módulo de elasticidade, $k_{y,\theta}$ e $k_{E,\theta}$, são determinados de acordo com o Tabela 6.

Tabela 6 - fatores de redução para relação tensões-extensões de aço estrutural a temperaturas elevadas.

| Temperatura do aço θ_a [°C] | $k_{E,\theta} = \frac{E_{a\theta}}{E_a}$ | $k_{p,\theta} = \frac{f_{ap\theta}}{f_{ay}}$ | $k_{y,\theta} = \frac{f_{ay\theta}}{f_{ay}}$ | $k_{u,\theta} = \frac{f_{au\theta}}{f_{ay}}$ |
|--|--|--|--|--|
| 20 °C | 1,00 | 1,000 | 1,00 | 1,25 |
| 100 °C | 1,00 | 1,000 | 1,00 | 1,25 |
| 200 °C | 0,90 | 0,807 | 1,00 | 1,25 |
| 300 °C | 0,80 | 0,613 | 1,00 | 1,25 |
| 400 °C | 0,70 | 0,420 | | 1,00 |
| 500 °C | 0,60 | 0,360 | | 0,78 |
| 600 °C | 0,31 | 0,180 | | 0,47 |
| 700 °C | 0,13 | 0,075 | | 0,23 |
| 800 °C | 0,09 | 0,050 | | 0,11 |
| 900 °C | 0,0675 | 0,0375 | | 0,06 |
| 1000 °C | 0,0450 | 0,0250 | | 0,04 |

| | | | |
|---------|--------|--------|------|
| 1100 °C | 0,0225 | 0,0125 | 0,02 |
| 1200 °C | 0 | 0,0000 | 0 |

O valor de cálculo da resistência plástica à compressão axial e a rigidez à flexão dos dois banzos do perfil de aço em situação de incêndio são determinados por:

$$N_{fi,pl,Rd,f} = \frac{2(b e_f f_{ay,f,t})}{\gamma_{M,fi,a}} \quad (33)$$

$$(EI)_{fi,f,z} = E_{a,f,t} \frac{(e_f b^3)}{6} \quad (34)$$

4.2 Alma do perfil de aço

O regulamento identifica a alma com a possibilidade de determinação de uma área reduzida, ver Figura 18.

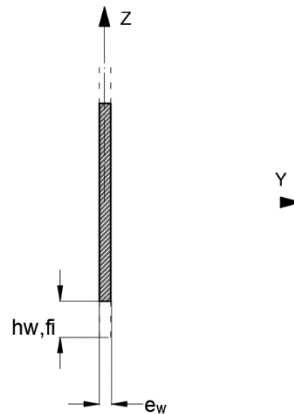


Figura 18 - Representação da alma.

Existe uma parte da alma com a altura $h_{w,fi}$ medida a partir da região interior do banzo que poderá ser ignorada (ver Figura 18). Esta parte é determinada por:

$$h_{w,fi} = 0.5(h - 2e_f) \left(1 - \sqrt{1 - \left(\frac{0.16 * H_t}{h} \right)} \right) \quad (35)$$

em que o valor do parâmetro empírico H_t é fornecido no Tabela 7.

Tabela 7 - Parâmetro para redução da altura da alma.

| Resistência ao fogo padrão | H_t [mm] |
|-----------------------------------|------------------------------|
| R 30 | 350 |
| R 60 | 770 |
| R 90 | 1100 |
| R 120 | 1250 |

O nível máximo da tensão de cedência da alma é obtido a partir de:

$$f_{ay,w,t} = f_{ay,w} \sqrt{1 - \left(\frac{0.16H_t}{h}\right)^2} \quad (36)$$

O valor de cálculo da resistência plástica à compressão axial e a rigidez à flexão da alma do perfil de aço em situação de incêndio são determinados por:

$$N_{fi,pl,Rd,w} = \frac{[e_w(h - 2e_f - 2h_{w,fi})f_{ay,w,t}]}{\gamma_{M,fi,a}} \quad (37)$$

O valor do módulo de elasticidade não sofre redução.

$$(EI)_{fi,w,z} = \frac{\left[\frac{E_{a,w}(h - 2e_f - 2h_{w,fi})}{e_w^3} \right]}{12} \quad (38)$$

4.3 Betão

Na Figura 19 está representada a secção residual do betão, com base na determinação da curva isotérmica. A curva isotérmica é uma curva onde a temperatura do sistema permanece constante, isto é, todo o betão fora desta região não deverá ser considerado para determinação da capacidade resistente.

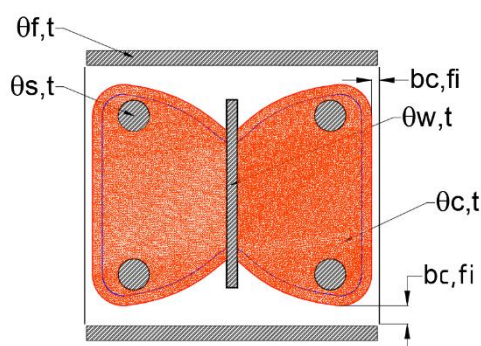


Figura 19 - Representação do modelo de betão.

A camada exterior do betão é definida pela espessura $b_{c,fi}$ (ver Figura 19). A espessura $b_{c,fi}$ é fornecida no Tabela 8, sendo $\frac{A_m}{V}$ o fator de massividade em m^{-1} de toda a secção mista.

Tabela 8 - Redução da espessura da área de betão.

| Resistência ao fogo padrão | $b_{c,fi}$ [mm] |
|----------------------------|----------------------|
| R 30 | 4,0 |
| R 60 | 15,0 |
| R 90 | $0,5 (A_m/V) + 22,5$ |
| R 120 | $2,0 (A_m/V) + 24,0$ |

No Tabela 9 é indicada a temperatura média no betão $\theta_{c,t}$ em função do fator de massividade $\frac{A_m}{V}$ de toda a secção mista e para diferentes classes de resistência ao fogo padrão.

Tabela 9 - Temperatura médio do betão.

| R 30 | | R 60 | | R 90 | | R 120 | |
|-----------------|----------------------|-----------------|----------------------|-----------------|----------------------|-----------------|----------------------|
| $\frac{A_m}{V}$ | $\theta_{c,t}$ °C | $\frac{A_m}{V}$ | $\theta_{c,t}$ °C | $\frac{A_m}{V}$ | $\theta_{c,t}$ °C | $\frac{A_m}{V}$ | $\theta_{c,t}$ °C |
| 4 | 136 | 4 | 214 | 4 | 256 | 4 | 256 |
| 23 | 300 | 9 | 300 | 6 | 300 | 5 | 300 |
| 46 | 400 | 21 | 400 | 13 | 400 | 9 | 400 |
| - | - | 50 | 600 | 33 | 600 | 23 | 600 |
| - | - | - | - | 54 | 800 | 38 | 800 |
| - | - | - | - | - | - | 41 | 900 |
| - | - | - | - | - | - | 43 | 1000 |

O modulo de elasticidade secante do betão à temperatura $\theta = \theta_{c,t}$, é obtido a partir de:

$$E_{c,sec,\theta} = \frac{f_{c,\theta}}{\varepsilon_{cu,\theta}} = f_c \frac{k_{c,\theta}}{\varepsilon_{cu,\theta}} \quad (39)$$

com $k_{c,\theta}$ e $\varepsilon_{cu,\theta}$ definidos de acordo com a Tabela 10, para betão normal (NWC) e para betão mais leve (LWC).

Tabela 10 - Valores dos dois parâmetros principais das relações tensões-extensões do betão de massa volúmica normal (NC) e do betão leve (LC) a temperaturas elevadas.

| Temperatura do aço θ_a [°C] | $k_{c,\theta} = \frac{f_{c,\theta}}{f_c}$ | | $E_{cu,\theta} \cdot 10^3$ |
|--|---|------|----------------------------|
| | NWC | LWC | NWC |
| 20 °C | 1 | 1 | 2,5 |
| 100 °C | 1 | 1 | 4,0 |
| 200 °C | 0,95 | 1 | 5,5 |
| 300 °C | 0,85 | 1 | 7,0 |
| 400 °C | 0,75 | 0,88 | 10,0 |
| 500 °C | 0,60 | 0,76 | 15,0 |
| 600 °C | 0,45 | 0,64 | 25,0 |
| 700 °C | 0,30 | 0,52 | 25,0 |
| 800 °C | 0,15 | 0,40 | 25,0 |
| 900 °C | 0,08 | 0,28 | 25,0 |
| 1000 °C | 0,04 | 0,16 | 25,0 |
| 1100 °C | 0,01 | 0,04 | 25,0 |
| 1200 °C | 0 | 0 | - |

O valor de cálculo da resistência plástica à compressão axial e a rigidez à flexão do betão em situação de incêndio são determinados por:

$$N_{fi,pl,Rd,c} = 0.86 \left\{ \left((h - 2e_f - 2b_{c,fi})(b - e_w - 2b_{c,fi}) \right) - A_s \right\} f_{c,\theta} / \gamma_{M,fi,c} \quad (40)$$

em que A_s é a área da secção transversal dos varões de armadura e 0,86 é um fator de calibração utilizado para forma do diagrama de tensões.

$$(EI)_{fi,c,z} = E_{c,sec,\theta} \left[\left\{ \frac{(h - 2e_f - 2b_{c,fi}) \left((b - 2b_{c,fi})^3 - e_w^3 \right)}{12} \right\} - I_{s,z} \right] \quad (41)$$

$I_{s,z}$ é o momento de inercia dos varões da armadura em relação ao eixo principal de inercia Z da secção mista e pode ser calculado com a equação (42), utilizando o teorema dos eixos paralelos, para as quatro barras de reforço.

$$I_{s,z} = \left[\frac{\pi \left(\frac{\phi}{2} \right)^4}{4} + \pi \left(\frac{\phi}{2} \right)^2 * \left(\frac{b}{2} - u_2 \right)^2 \right] \quad (42)$$

4.4 Reforço

O fator de redução $k_{y,t}$ da tensão de cedência e o fator de redução $k_{E,t}$ do módulo de elasticidade dos varões da armadura são definidos em função da resistência ao fogo padrão e da média geométrica u das distâncias entre o eixo dos varões e os paramentos exteriores do secção (ver os Tabela 11 e Tabela 12).

Tabela 11 - Fator de redução $k_{y,t}$ para a tensão de cedência $f_{s,y}$ dos varões da armadura.

| $u[mm]$ | | | | | | |
|-----------------------------------|-----------|-----------|-----------|-----------|-----------|--|
| Resistência ao fogo padrão | 40 | 45 | 50 | 55 | 60 | |
| R 30 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | |
| R 60 | 0 | 0,883 | 0,976 | 1 | 1 | |
| R 90 | 0,314 | 0,434 | 0,572 | 0,696 | 0,822 | |
| R 120 | 0,170 | 0,223 | 0,288 | 0,367 | 0,436 | |

Tabela 12 - Fator de redução $k_{E,t}$ para o módulo de elasticidade E_s dos varões da armadura.

| $u[mm]$ | | | | | | |
|-----------------------------------|-----------|-----------|-----------|-----------|-----------|--|
| Resistência ao fogo padrão | 40 | 45 | 50 | 55 | 60 | |

| | | | | | |
|-------|-------|-------|-------|-------|-------|
| R 30 | 0,830 | 0,865 | 0,888 | 0,914 | 0,935 |
| R 60 | 0,604 | 0,647 | 0,689 | 0,729 | 0,763 |
| R 90 | 0,193 | 0,283 | 0,406 | 0,522 | 0,619 |
| R 120 | 0,110 | 0,128 | 0,173 | 0,233 | 0,285 |

A média geométrica u das distâncias u_1 e u_2 ao eixo é determinado por:

$$u = \sqrt{u_1 * u_2} \quad (43)$$

em que:

u_1 distancia do eixo do varão exterior de armadura à face interior do banzo [mm];

u_2 distancia do eixo do varão exterior de armadura à superfície de betão [mm].

Existem algumas condições que devem ser consideradas:

$$\text{Se } (u_1 - u_2) > 10 \text{ mm, então } u = \sqrt{u_2 * (u_2 + 10)}$$

$$\text{ou } (u_2 - u_1) > 10 \text{ mm, então } u = \sqrt{u_1 * (u_1 + 10)}$$

O valor de cálculo da resistência plástica à compressão axial e a rigidez à flexão dos varões da armadura em situação de incêndio são determinados por:

$$N_{fi,pl,Rd,s} = A_s k_{y,t} \frac{f_{s,y}}{\gamma_{M,fi,s}} \quad (44)$$

$$(EI)_{fi,s,z} = k_{E,t} E_s I_{s,z} \quad (45)$$

CÁPITULO 5 – MÉTODO AVANÇADO DE CÁLCULO

Os campos de temperatura, nas secções transversais dos pilares mistos estudados, foram calculados através do método de elementos finitos com o auxílio do programa ANSYS-*Mechanical* APDL [20].

O estudo bidimensional foi desenvolvido com o objetivo de determinar a distribuição da temperatura, em toda seção transversal, para cada tempo de resistência ao fogo (30, 60, 90 e 120 minutos). A análise 2D utiliza o elemento PLANE55, com quatro nós e um grau de liberdade por nó (temperatura). O elemento utiliza funções de interpolação linear entre os nós e um esquema de integração completo de Gauss (2x2).

Foi utilizado o elemento SURF151 que pode ser usado para várias aplicações de carga e efeitos de superfície. Pode ser sobreposto em uma face de qualquer elemento sólido térmico 2-D. O elemento é aplicável a análises térmicas 2-D. Várias cargas e efeitos de superfície podem existir simultaneamente.

A malha do modelo foi definida, de modo a garantir resultados precisos para a isotérmica de 500 °C como tal para que a malha se mantivesse toda com elementos quadrangulares uniformes, a seção transversal da barra de reforço foi convertida em um quadrilátero. Sendo que foi feita análise de sensibilidade da malha.

A análise incremental foi definida com um incremento de tempo de integração de 60s, podendo ser diminuído para 0.1s, com o valor máximo de incremento de tempo fixado em 60s.

Para o critério de convergência da solução, foi utilizado um valor de referência mínimo de fluxo de calor com 1×10^{-6} e uma tolerância de 0,001.

Os materiais utilizados foram: aço S355 para os perfis, C20 / 25 para o betão e B500 para os reforços. Uma parede de tijolo com vazios foi considerada em ambos os lados da seção parcialmente revestida. As propriedades térmicas para os materiais aço estrutural, betão, aço do reforço e parede de barro foram adicionadas como descrito no capítulo 3, sendo sempre dependentes da temperatura.

O modelo está apresentado na figura 20, temos representado a vermelho os reforços, a roxo a área do betão armado, azul-claro os banzos e alma, podemos ver ainda a parede de alvenaria com o espaçamento referente aos ocós dos tijolos.

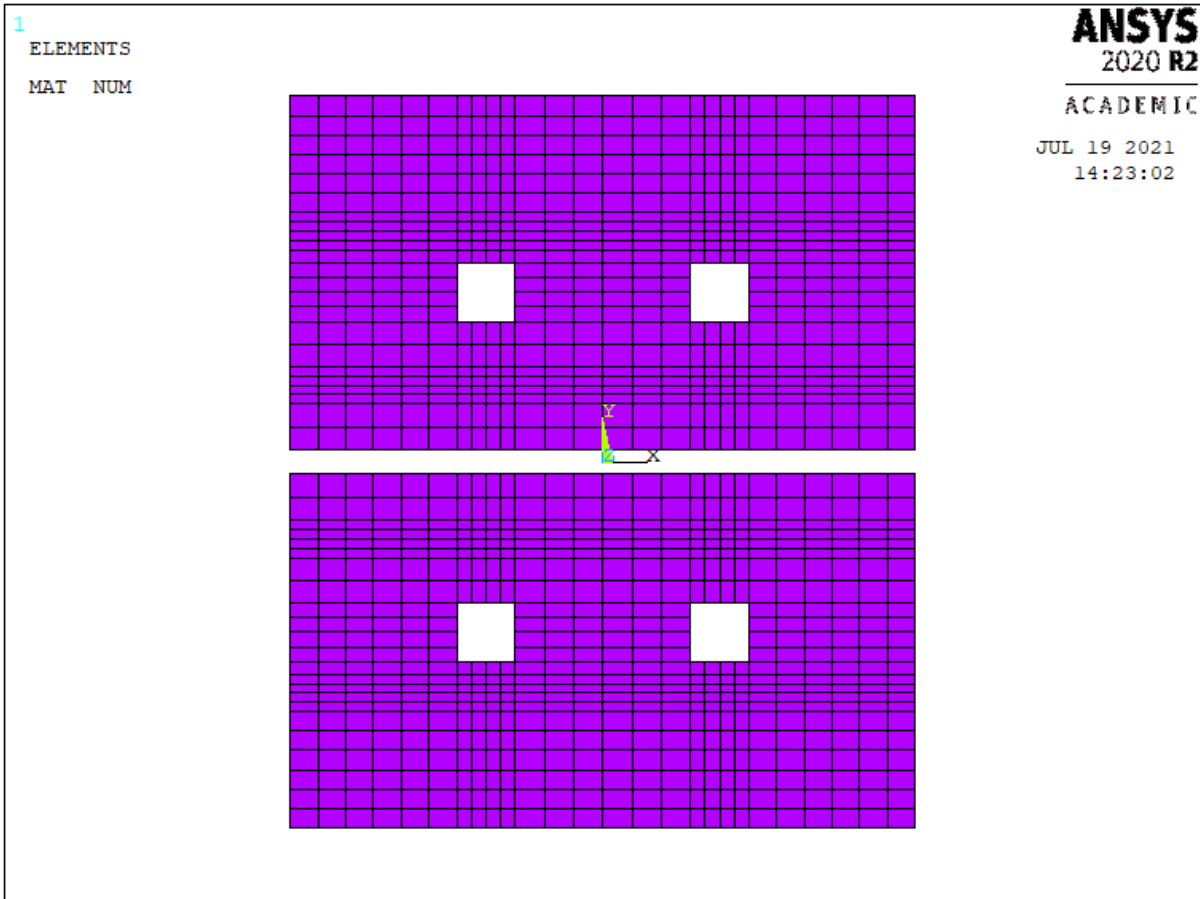


Figura 22 - Representação da malha usada no betão para o perfil de validação, HEA 220.

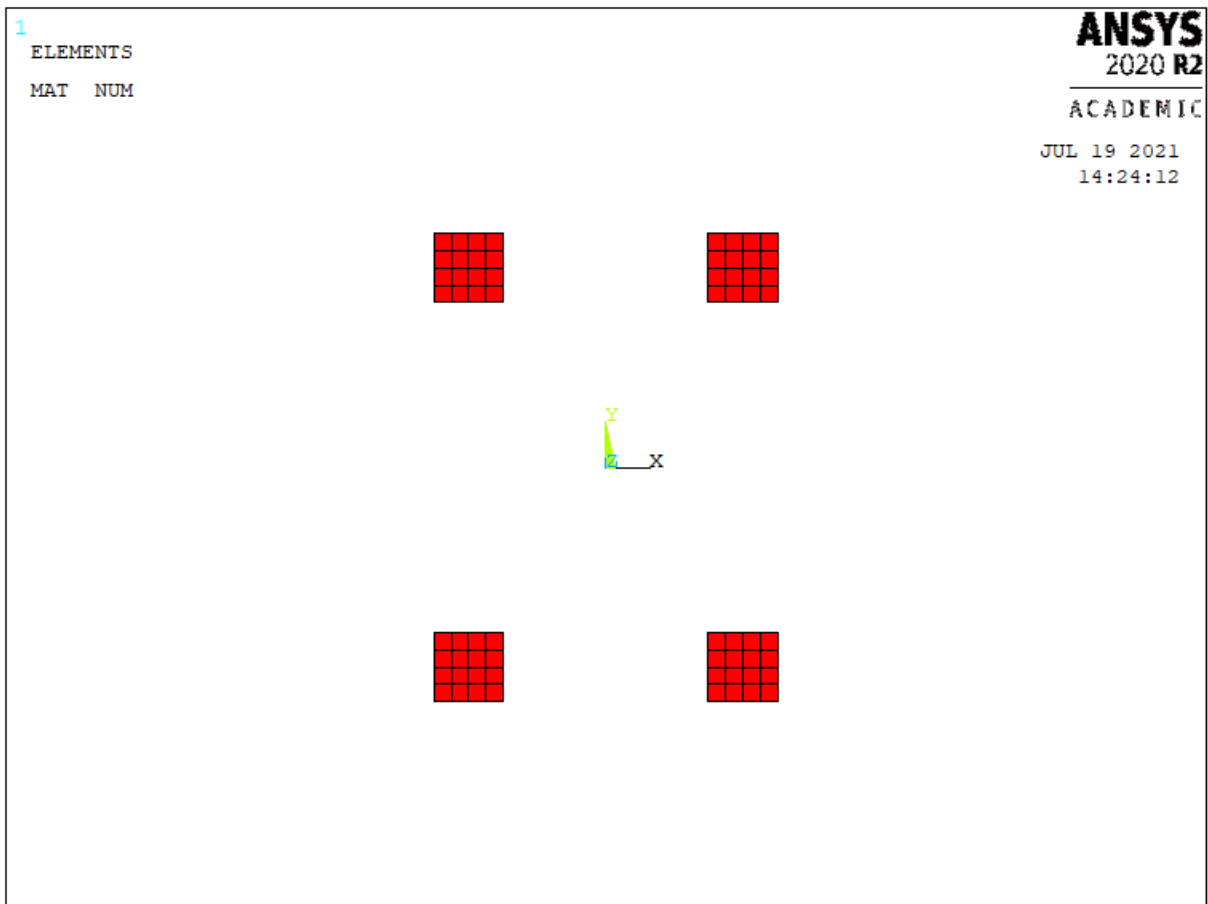


Figura 23 - Representação da malha usada nos reforços para o perfil de validação, HEA 220.

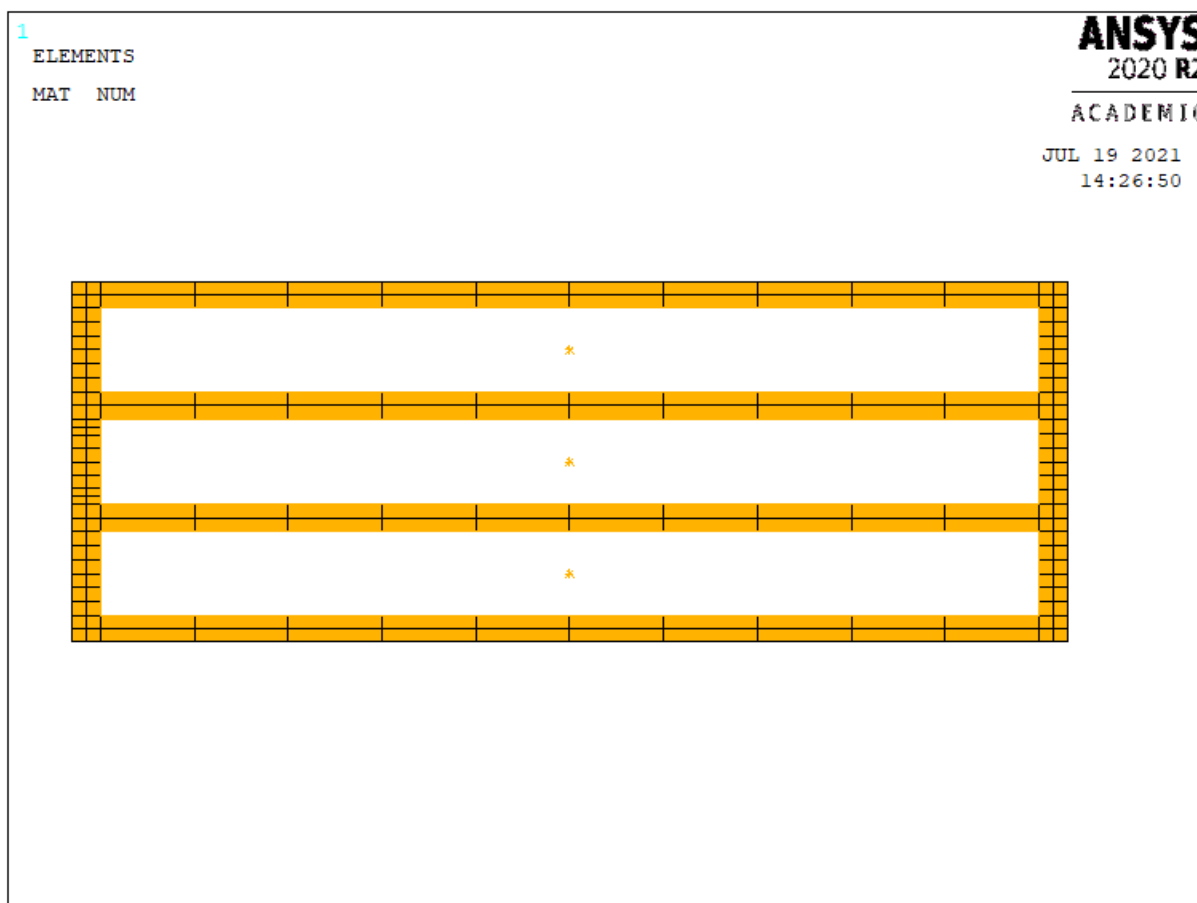


Figura 24 - Representação da malha usada nas paredes de alvenaria para o perfil de validação, HEA 220.

O betão e o aço apresentam um valor de emissividade de 0.7 de acordo com o Eurocódigo 1994-1-2 [3], enquanto o valor da emissividade é igual a 1.0 para o fogo, de acordo com o Eurocódigo 1991-1-2.

Para a definição das condições de fronteira do lado exposto ao fogo foi utilizado um coeficiente de convecção de $25 \text{ W/m}^2\text{K}$, fator de vista de 1.0 e a temperatura do gás (T_g) determinada de acordo com a curva de incêndio utilizada para validação do modelo, sendo que esta curva devia seguir a ISO834[7], para a radiação foi usado um coeficiente de Stefan-Boltzmann de $5,67\text{e-}8$, foi criado também um “space node” que segue a ISO834 [8].

A curva de aquecimento utilizada para validar o modelo não conseguiu atingir na perfeição a curva ISO834 [7], pelo que para estes resultados foi utilizada a curva de aquecimento dos ensaios experimentais. No lado não exposto ao fogo, o coeficiente de convecção foi de $9 \text{ W/m}^2\text{K}$, fator de vista de 1.0, e a temperatura do gás foi constante nos $20 \text{ }^\circ\text{C}$.

Na Figura 25 é possível perceber a evolução da temperatura para o perfil HEA 220 a partir da simulação no programa ANSYS, para as Classes de Resistência ao fogo analisadas, para o cenário de incêndio de 1 lado da parede. Os resultados são apresentados da esquerda para a direita, no sentido crescente da classe de resistência R30, R60, R90 e R120.

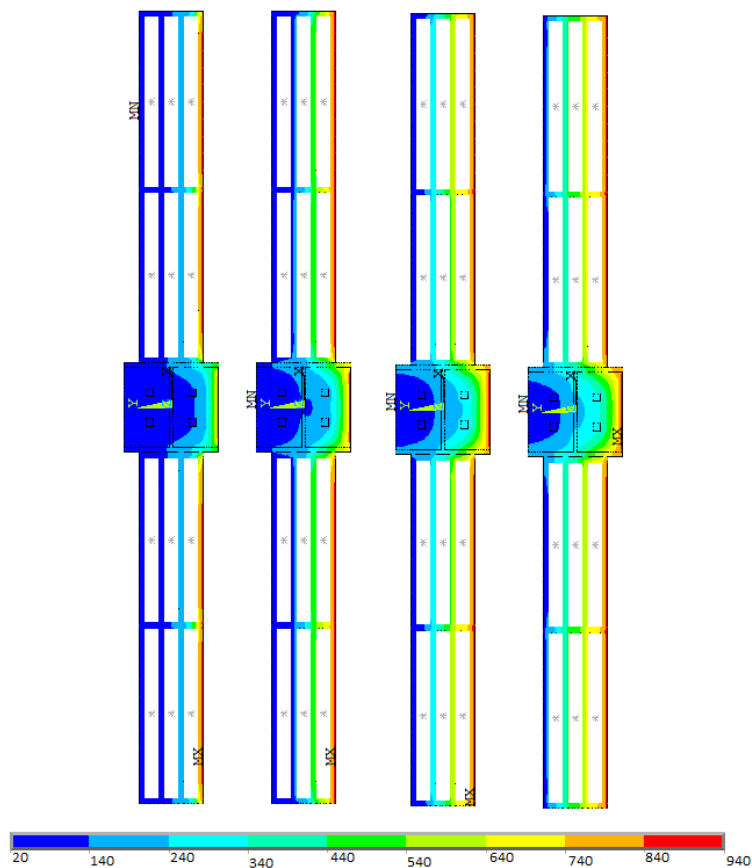


Figura 25 – Evolução da temperatura para o perfil HEA 220

Foi desenvolvida uma comparação para alguns pontos da secção reta. Podemos ainda ver a curva de incêndio utilizada para validação do modelo na Figura 27.

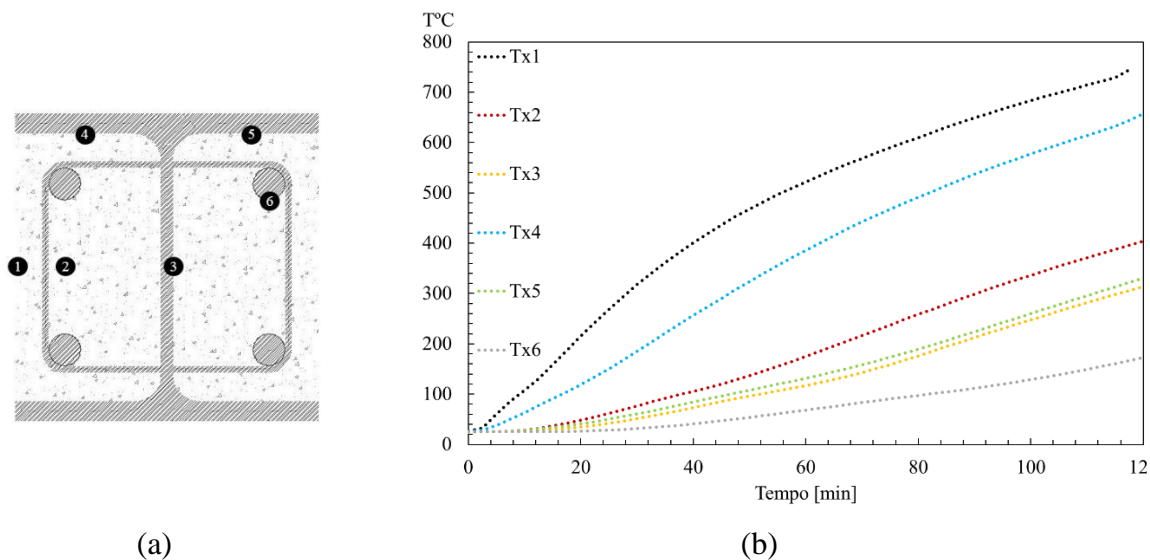


Figura 26 –Evolução da temperatura no perfil HEA 220 (b) para os pontos ilustrados em (a).

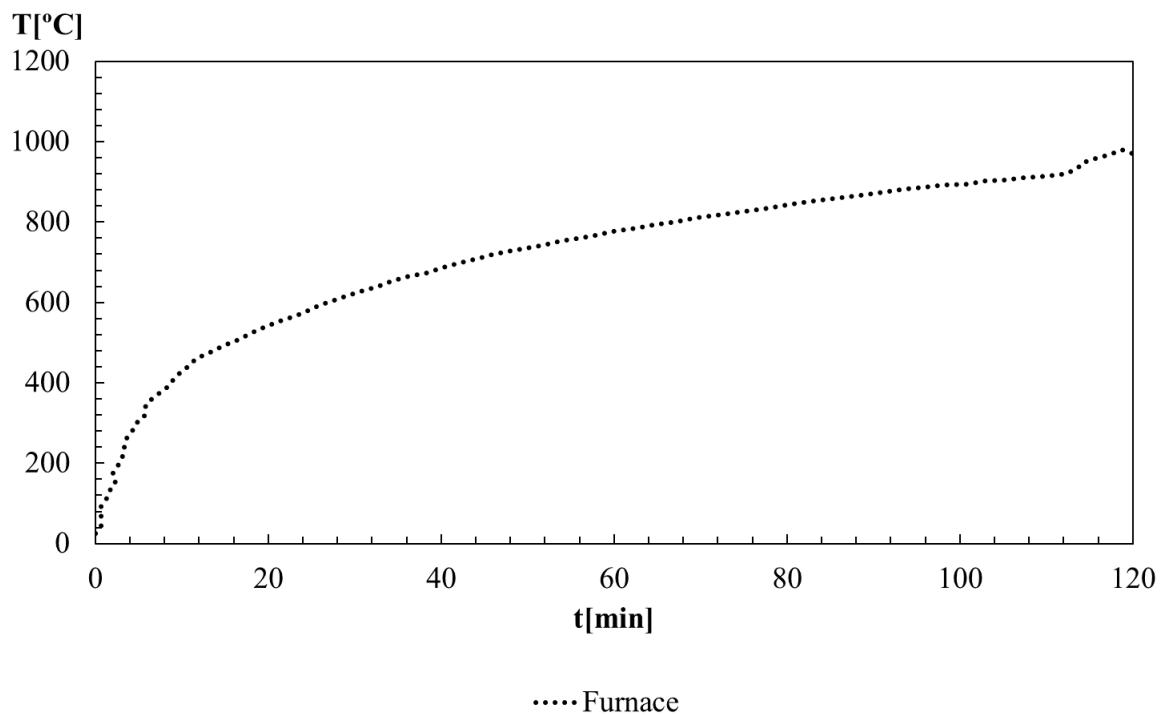


Figura 27 – Curva de incêndio TG.

Na figura 27 esta representada a curva de incendio referente ao estudo experimental seguido para validação do meu modelo.

CÁPITULO 6 – NOVA PROPOSTA

Os perfis embebidos em paredes, podem estar submetidos à ação de fogo somente de um lado, isto é, em situação real em edifícios com fogo somente no compartimento interno. Com a presença da parede no compartimento de incêndio, neste cenário, introduz-se um gradiente térmico na secção como se pode verificar na Figura 29. Isto faz com que o valor de cálculo da resistência plástica à compressão axial e da rigidez efetiva à flexão, a partir de agora, conte com sete componentes, ver Figura 28, sendo, a alma, o banzo, o betão e o reforço, todos exceto a alma, subdivididas em duas componentes: exposto ao fogo e não exposto. As componentes expostas ao fogo são identificadas por “e” (exposto), e as não expostas ao fogo identificadas por “ne” (não exposto).

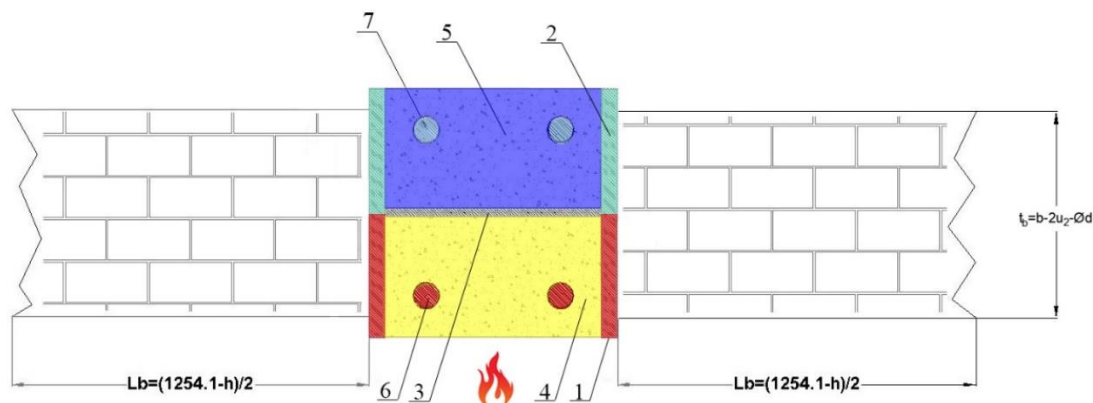


Figura 28 – Representação da secção

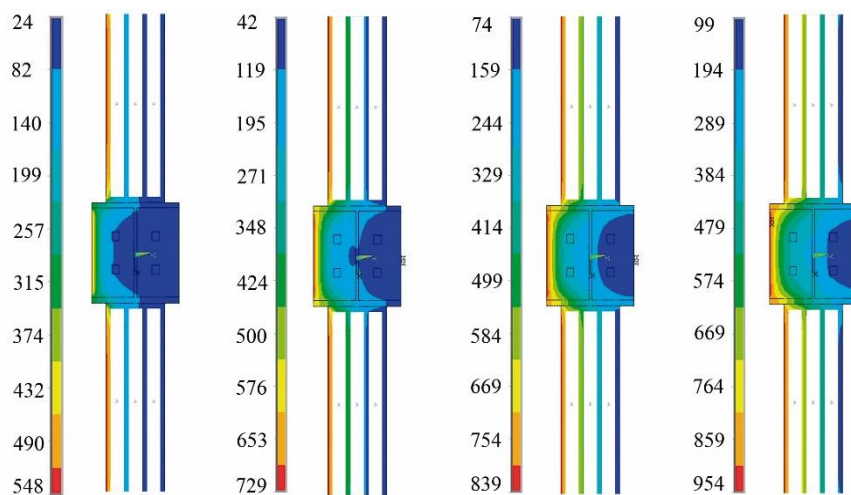


Figura 29 – Gradiente térmico da secção.

Todos os cálculos de temperatura média foram desenvolvidos para cada componente utilizando a temperatura média de cada seção transversal, obtidas através de simulações numéricas realizadas no ANSYS. De seguida serão apresentados todos esses cálculos desenvolvidos nesta proposta.

6.1 Banzos

Os banzos são divididos exatamente a meio em duas componentes com diferentes médias de temperatura, sendo eles o lado exposto ao fogo e o lado não exposto ao fogo. Na Figura 30 é apresentado o gradiente térmico dos banzos.

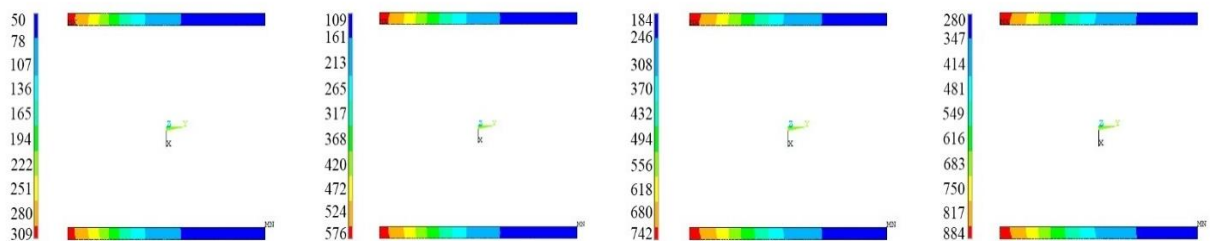


Figura 30 – Gradiente térmico dos Banzos no modelo de validação.

As temperaturas médias dos banzos são calculadas de maneira semelhante. A diferença que existe em relação a forma de cálculo do ANEXO G [3], é que foi acrescentado um termo que relaciona a espessura do banzo com um dos coeficientes afetados pela resistência ao fogo. A equação para cálculo da temperatura é apresentada na equação:

$$\theta_{f,t} = \theta_{o,t} + k_{ff}(t_f) + k_{t,f}(A_m/V) \quad (46)$$

em que:

- $\theta_{f,t}$ temperatura média do banzo;
- $\theta_{o,t}$ parâmetro de referência em °C;
- $k_{f,f}$ coeficiente empírico dependente da espessura do banzo;
- t_f espessura do banzo;

- $k_{t,f}$ coeficiente empírico dependente do fator de massividade;
 (A_m/V) fator de massividade em m^{-1} , com $A_m = (b - t_b) + h$ em [m] e $V = h b$ em [m²].

Sendo que a temperatura $\theta_{f,t}$ está subdividida em $\theta_{f,e,t}$, para componente exposta e $\theta_{f,ne,t}$, para a componente não exposta. A Tabela 13 e a Tabela 14 apresentam os novos coeficientes para serem utilizados com a equação empírica. Estes coeficientes foram determinados pela minimização do resíduo quadrático, definido entre os valores numéricos e os valores do modelo simplificado. A aproximação foi efetuada com o método de otimização não linear do EXCEL.

Tabela 13 – Novos parâmetros para o cálculo da temperatura média nos banzos.

| $\theta_{f,t} = \theta_{o,t} + k_{ff}(t_f) + k_{t,f}(A_m/V)$ | | | | | | | | | |
|--|-------------|-------------|----------------|-------------|-------------|----------------|-------------|----------------|-------------|
| Resistência ao fogo padrão | HEA | | | HEB | | | HEM | | |
| | $k_{f,e,f}$ | $k_{t,f,e}$ | $\theta_{o,t}$ | $k_{f,e,f}$ | $k_{t,f,e}$ | $\theta_{o,t}$ | $k_{t,f,e}$ | $\theta_{o,t}$ | $k_{f,e,f}$ |
| R 30 | 0 | 0 | 181 | 0 | 0 | 180 | 0 | 1 | 158 |
| R 60 | 0 | 0 | 370 | 0 | 0 | 366 | 0 | 3 | 331 |
| R 90 | 0 | 5 | 491 | 0 | 10 | 480 | 0 | 7 | 465 |
| R 120 | 0 | 9 | 587 | 0 | 14 | 579 | 0 | 13 | 559 |

| $\theta_{f,t} = \theta_{o,t} + k_{ff}(t_f) + k_{t,f}(A_m/V)$ | | | | | | | | | |
|--|--------------|--------------|----------------|--------------|--------------|----------------|--------------|----------------|--------------|
| Resistência ao fogo padrão | HEA | | | HEB | | | HEM | | |
| | $k_{f,ne,f}$ | $k_{t,f,ne}$ | $\theta_{o,t}$ | $k_{f,ne,f}$ | $k_{t,f,ne}$ | $\theta_{o,t}$ | $k_{t,f,ne}$ | $\theta_{o,t}$ | $k_{f,ne,f}$ |
| R 30 | 0 | 4 | 34 | 0 | 0 | 56 | 1 | 2 | 20 |
| R 60 | 1 | 10 | 66 | 1 | 0 | 129 | 1 | 7 | 60 |
| R 90 | 0 | 4 | 196 | 2 | 0 | 214 | 0 | 22 | 132 |
| R 120 | 3 | 30 | 110 | 3 | 36 | 70 | 0 | 32 | 180 |

Para a temperatura $\theta = \theta_{f,t}$ o nível máximo das tensões e o módulo de elasticidade são determinados a partir de:

-Para o banzo exposto ao fogo:

$$f_{ay,f,e,t} = f_{ay,f} k_{y,\theta} \quad (47)$$

$$E_{a,f,e,t} = E_{a,f} k_{E,\theta} \quad (48)$$

-Para o banzo não exposto:

$$f_{ay,f,ne,t} = f_{ay,f} k_{y,\theta} \quad (49)$$

$$E_{a,f,ne,t} = E_{a,f} k_{E,\theta} \quad (50)$$

O valor de cálculo da resistência plástica à compressão axial e o valor da rigidez efetiva à flexão dos dois banzos do perfil de aço em situação de incêndio são determinados por:

$$N_{fi,pl,Rd,f} = 2 \left[\frac{\frac{b}{2} t_f f_{ay,f,e,t}}{\gamma_{M,fi,a}} \right] + 2 \left[\frac{\frac{b}{2} t_f f_{ay,f,ne,t}}{\gamma_{M,fi,a}} \right] \quad (51)$$

$$(EI)_{fi,f,z} = \left[2 \left(\frac{\left(t_f \left(\frac{b}{2} \right)^3 \right)}{12} + \frac{t_f b^3}{32} \right) E_{a,f,e,t} \right] + \left[2 \left(\frac{\left(t_f \left(\frac{b}{2} \right)^3 \right)}{12} + \frac{t_f b^3}{32} \right) E_{a,f,ne,t} \right] \quad (52)$$

O melhoramento introduzido para o cálculo da temperatura média pode ser percebido na análise da Figura 31 com a aproximação da temperatura proposta superior ao valor da temperatura extraída numericamente (na maioria dos casos).

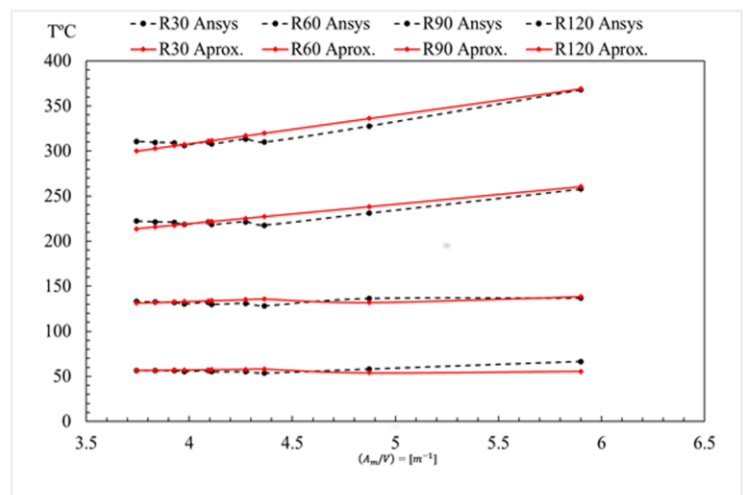
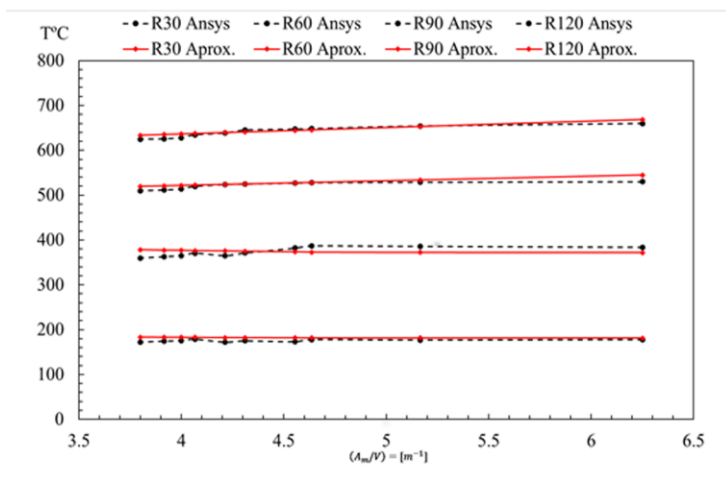
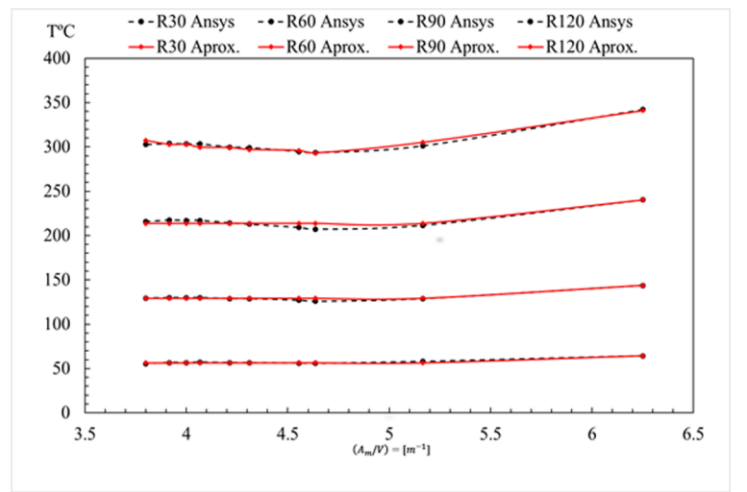
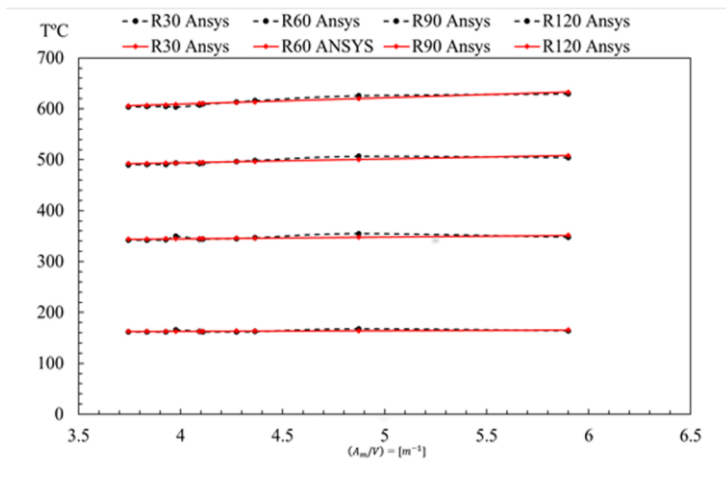
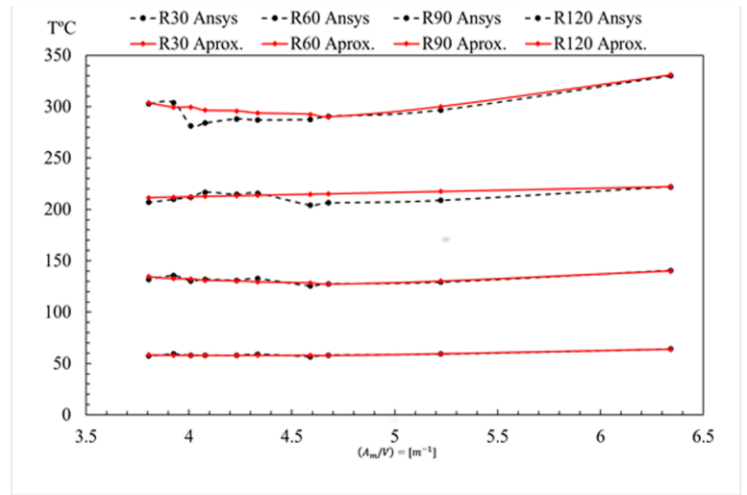
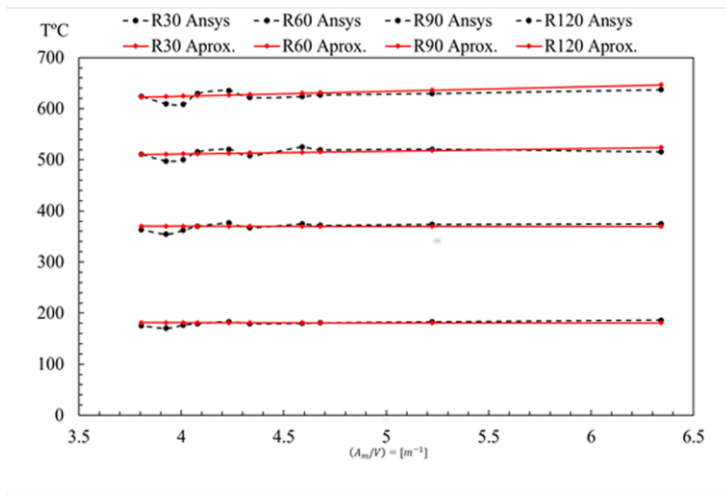


Figura 31 – Temperatura média para ANSYS e para Atual proposta, exposto ao fogo (A, B, C) não exposto ao fogo (D, E, F).

Podemos verificar que o lado não exposto apresenta melhor gradiente e melhores resultados térmico do que o não exposto.

6.2 Alma

A alma tem como equação para determinar a sua temperatura média a mesma equação que se encontra no ANEXO G para fogo dos 4 lados, sendo que nesta proposta apresenta novos coeficientes, nesta equação e desprezada a redução geométrica, logo é considerada toda a área como resistente. Por outro lado, é considerado efeito da temperatura na tensão de cedência e no módulo de elasticidade.

$$\theta_{w,t} = \theta_{o,w} + k_{w,w}(1/t_w) + k_{t,w}(A_m/V) \quad (53)$$

em que:

| | |
|----------------|---|
| $\theta_{w,t}$ | temperatura média da alma; |
| $\theta_{o,w}$ | parâmetro de referência em °C; |
| $k_{w,w}$ | coeficiente empírico dependente da espessura da alma; |
| t_f | espessura do banzo; |
| $k_{t,f}$ | coeficiente empírico dependente do fator de massividade; |
| (A_m/V) | fator de massividade em m^{-1} , com $A_m = (b - t_b) + h$ em [m] e $V=h b$ em [m ²]. |

O gradiente térmico da alma para o modelo de validação (HEA220) está representado na figura seguinte.

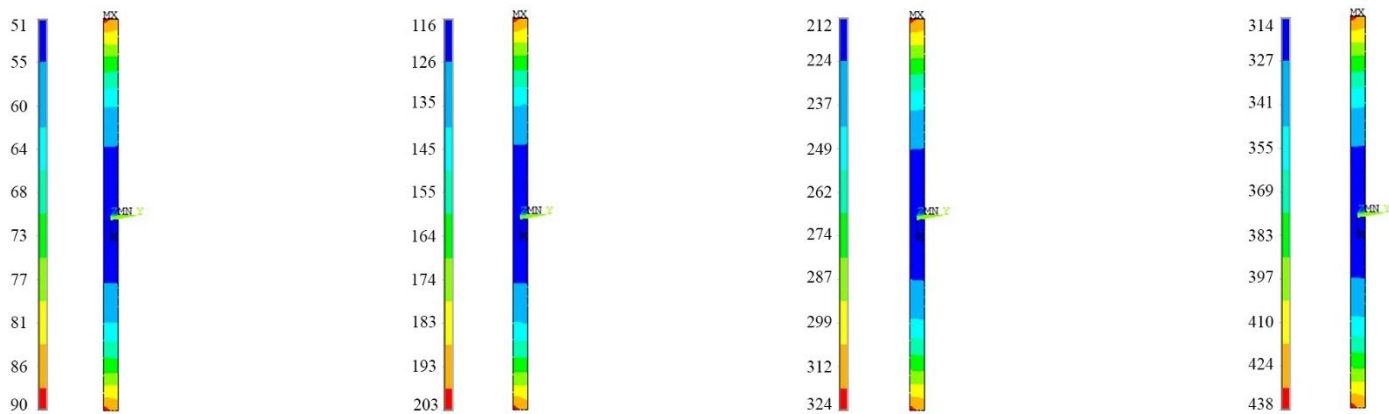


Figura 32 – Gradiente térmico da alma para o modelo de validação.

Tabela 14 - Novos parâmetros para o cálculo da temperatura média da alma.

| Resistência ao fogo padrão | $\theta_{f,t} = \theta_{o,t} + k_{ff}(t_f) + k_{t,f}(A_m/V)$ | | | | | | | | |
|----------------------------------|--|-----------|----------------|-----------|-----------|----------------|-----------|-----------|----------------|
| | HEA | | | HEB | | | HEM | | |
| | $k_{w,w}$ | $k_{t,w}$ | $\theta_{o,w}$ | $k_{w,w}$ | $k_{t,w}$ | $\theta_{o,w}$ | $k_{w,w}$ | $k_{t,w}$ | $\theta_{o,w}$ |
| R 30 | 26 | 4 | 33 | 106 | 4 | 27 | 0 | 8 | 17 |
| R 60 | 150 | 8 | 64 | 492 | 7 | 50 | 0 | 25 | 14 |
| R 90 | 97 | 22 | 80 | 570 | 21 | 58 | 0 | 47 | 0 |
| R 120 | 0 | 41 | 76 | 0 | 51 | 44 | 0 | 66 | 0 |

A redução das propriedades mecânicas da alma é feita através da temperatura média obtida, usando os fatores e as equações presentes no ANEXO G.

$$f_{ay,w,t} = f_{ay,f} k_{y,\theta} \quad (54)$$

$$E_{a,w,t} = E_{a,w} k_{E,\theta} \quad (55)$$

O valor da resistência plástica à compressão axial e a rigidez efetiva à flexão da alma do perfil na situação de incêndio são determinados a partir de:

$$N_{fi,pl,Rd,w} = \frac{[t_w(h - 2t_f)f_{ay,w,t}]}{\gamma_{M,fi,a}} \quad (56)$$

$$(EI)_{fi,w,z} = \frac{[E_{a,w}(h - 2e_f)/t_w^3]}{12} \quad (57)$$

Na Figura 33 é analisado graficamente a proposta de melhoramento para o cálculo da temperatura média na alma.

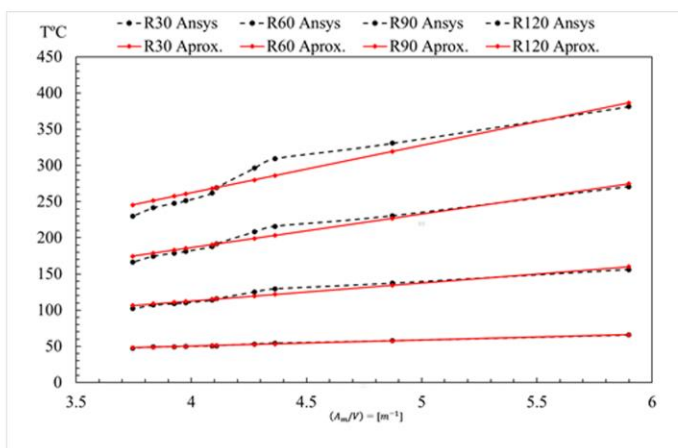
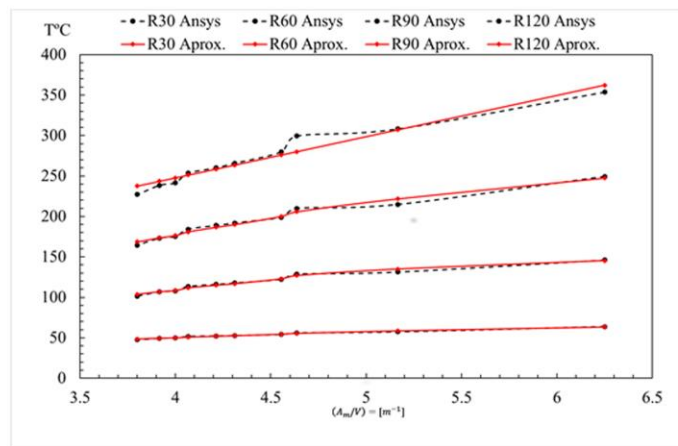
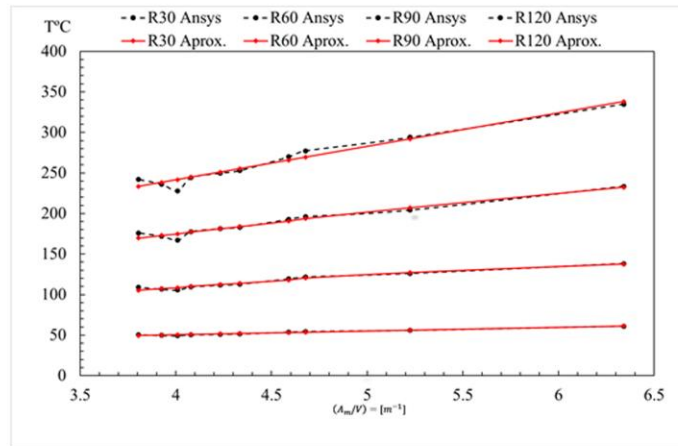


Figura 33 - Temperatura média para ANSYS e para atual proposta, exposto ao fogo.

6.3 Betão

As componentes para o cálculo da resistência à compressão e rigidez efetiva à flexão referente ao betão são calculadas a partir das temperaturas médias.

O gradiente térmico no betão para os tempos de resistência R30, R60, R90 e R120, está representado na Figura 34.

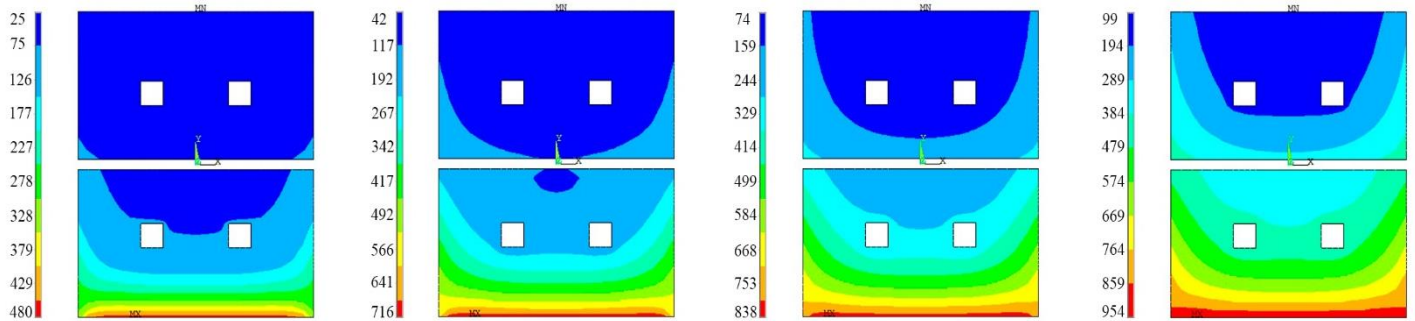


Figura 34 – Gradiente térmico do betão, para o modelo de validação.

6.3.1 Betão do lado exposto

O betão do lado exposto tem uma espessura a ser descartada ($b_{c,fi}$), para que toda secção do betão exposta apresente uma temperatura de 500°C, ver equação (58).

$$b_{c,fi,h} = b_{o,ch} + k_{w,ch} \left(\frac{1}{t_w} \right) + k_{t,ch} \left(\frac{A_m}{v} \right) \quad (58)$$

$$se \theta_{c,t} = 500^\circ C \text{ então } b_{c,fi,h} = \frac{(b - t_w)}{2}$$

A temperatura média para o betão exposto e calculada através da equação (59) :

$$\theta_{ce,t} = \theta_{o,t} + k_{f,ce} (1/t_w) + k_{t,ce} (A_m/V) \quad (59)$$

em que:

$\theta_{ce,t}$ temperatura média do betão exposto;

$\theta_{o,t}$ parâmetro de referência em °C;

k_{ce} coeficiente empírico dependente da espessura da alma;

t_w espessura da alma;

$k_{t,ce}$ coeficiente empírico dependente do fator de massividade;

(A_m/V) fator de massividade em m^{-1} , com $A_m = (b - t_b) + h$ em [m] e $V = h b$ em [m²].

A Tabela 15 apresenta os coeficientes empíricos determinados com o mesmo procedimento.

Tabela 15 - Novos parâmetros para o cálculo da temperatura média do betão exposto.

| Resistência ao fogo padrão | $\theta_{ce,t} = \theta_{o,t} + k_{f,ce}(1/t_w) + k_{t,ce}(A_m/V)$ | | | | | | | | |
|----------------------------------|--|------------|----------------|----------|------------|----------------|----------|------------|----------------|
| | HEA | | | HEB | | | HEM | | |
| | k_{ce} | $k_{t,ce}$ | $\theta_{o,t}$ | k_{ce} | $k_{t,ce}$ | $\theta_{o,t}$ | k_{ce} | $k_{t,ce}$ | $\theta_{o,t}$ |
| R 30 | 0 | 3 | 52 | 0 | 3 | 53 | 0 | 5 | 44 |
| R 60 | 0 | 9 | 106 | 0 | 10 | 105 | 0 | 14 | 83 |
| R 90 | 0 | 20 | 145 | 0 | 24 | 134 | 0 | 34 | 92 |
| R 120 | 0 | 32 | 177 | 675 | 24 | 174 | 0 | 51 | 110 |

A rigidez à flexão efetiva e a resistência compressão axial do betão são reduzidos de acordo com a temperatura média do betão, através do cálculo do fator de redução para a resistência à compressão do betão $k_{c,\theta}$ e do módulo de elasticidade secante $E_{c,sec,\theta}$.

$$f_{c,\theta} = f_c k_{c,\theta} \quad (60)$$

$$E_{c,sec,\theta} = \frac{f_c}{\varepsilon_{cu,\theta}} \quad (61)$$

A resistência plástica à compressão axial e rigidez de flexão da seção transversal residual de betão exposta ao fogo podem ser determinadas através das equações.

$$N_{fi,pl,Rd,c} = \frac{0.86 \left\{ \left((h - 2t_f) \left(\frac{b}{2} - \frac{t_w}{2} - b_{c,fi} \right) \right) - A_s \right\} f_{c,\theta}}{\gamma_{M,fi,c}} \quad (62)$$

$$(EI)_{fi,c,z} = E_{c,sec,\theta} \left[\left\{ \frac{(h - 2e_f) \left(\left(\frac{b}{2} - b_{c,fi} \right)^3 - t_w^3 \right)}{12} \right\} - I_{s,z} \right] \quad (63)$$

Onde A_s é a área da seção transversal de aço do reforço e 0,86 é o coeficiente de calibração. $I_{s,z}$ é o momento de segunda ordem das barras de reforço em relação ao eixo Z da seção transversal da coluna e pode ser calculado com a equação (64).

$$I_{s,z} = 4 \left[\frac{\pi \left(\frac{\phi}{2}\right)^4}{4} + \pi \left(\frac{\phi}{2}\right)^2 \left(\frac{b}{2} - u_2\right)^2 \right] \quad (64)$$

6.3.2 Betão não exposto

O betão do lado não exposto possui toda a sua área abaixo dos 500°C o que faz com que não exista nenhuma espessura a ser retirada. A temperatura média desta secção pode ser calculada através da equação (65).

$$\theta_{cne,t} = \theta_{o,t} + k_{f,cne}(1/t_w) + k_{t,cne}(A_m/V) \quad (65)$$

Os coeficientes utilizados na equação para os perfis estudados estão presentes na Tabela 16. Estes coeficientes também foram determinados através de um processo de otimização.

Tabela 16 - Novos parâmetros para o cálculo da temperatura média do betão não exposto.

| $\theta_{cne,t} = \theta_{o,t} + k_{f,cne}(1/t_w) + k_{t,cne}(A_m/V)$ | | | | | | | | | |
|---|-----------|-------------|----------------|-----------|-------------|----------------|-----------|-------------|----------------|
| Resistência ao fogo padrão | HEA | | | HEB | | | HEM | | |
| | k_{cne} | $k_{t,cne}$ | $\theta_{o,t}$ | k_{cne} | $k_{t,cne}$ | $\theta_{o,t}$ | k_{cne} | $k_{t,cne}$ | $\theta_{o,t}$ |
| R 30 | 0 | 2 | 25 | 0 | 2 | 24 | 0 | 4 | 20 |
| R 60 | 0 | 8 | 32 | 0 | 9 | 28 | 0 | 14 | 12 |
| R 90 | 0 | 16 | 42 | 0 | 18 | 36 | 0 | 28 | 0 |
| R 120 | 0 | 26 | 45 | 0 | 29 | 37 | 0 | 41 | 0 |

A rigidez à flexão efetiva e a resistência compressão axial do betão são reduzidos de acordo com a temperatura média do betão, através do cálculo do fator de redução para a resistência à compressão do betão $k_{c,\theta}$ e do módulo de elasticidade secante $E_{c,sec,\theta}$

$$f_{c,\theta} = f_c k_{c,\theta} \quad (66)$$

$$E_{c,sec,\theta} = \frac{f_c}{\varepsilon_{cu,\theta}} \quad (67)$$

A resistência plástica à compressão axial e rigidez de flexão da seção transversal residual de betão exposta ao fogo podem ser determinadas através das equações.

$$N_{fi,pl,Rd,c} = \frac{0.86 \left\{ \left((h - 2t_f) \left(\frac{b}{2} - \frac{t_w}{2} - b_{c,fi} \right) \right) - A_s \right\} f_{c,\theta}}{\gamma_{M,fi,c}} \quad (68)$$

$$(EI)_{fi,c,z} = E_{c,sec,\theta} \left[\left\{ \frac{(h - 2e_f - 2b_{c,fi}) \left(\frac{b}{2} - b_{c,fi} \right)^3}{12} \right\} - I_{s,z} \right] \quad (69)$$

Na Figura 35 verifica-se uma boa aproximação do valor da temperatura calculada com o valor determinado numericamente, mantendo-se seguro tanto para o betão exposto ao fogo quanto para o betão não exposto ao fogo.

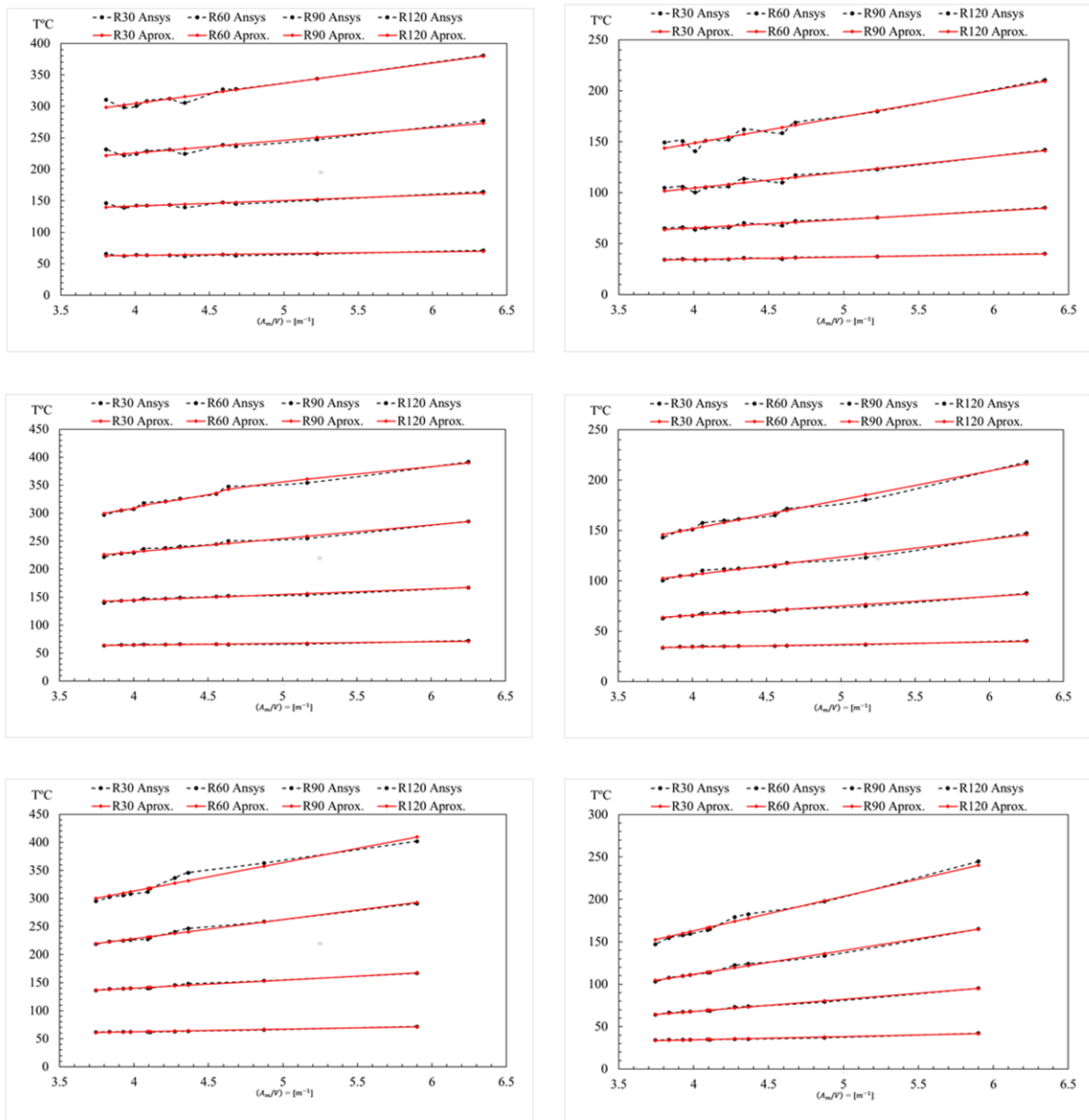


Figura 35 - Temperatura média para ANSYS e para Atual proposta, exposto ao fogo (A, B, C) não exposto ao fogo (D, E, F).

6.4 Reforço

Visto que o no modelo se apresenta com a alma paralela à parede faz com que exista uma diferença significativa do gradiente térmico entre os reforços expostos e os não expostos. Podemos observar o gradiente térmico na Figura 36.

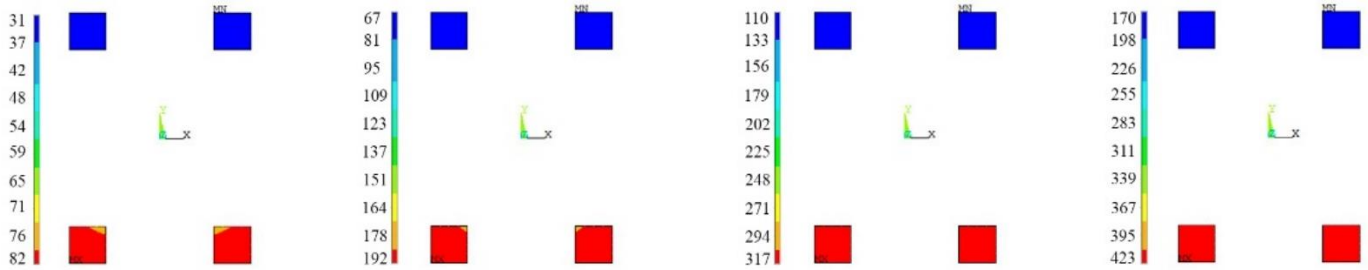


Figura 36 - Gradiente térmico dos reforços, para o modelo de validação.

Na proposta apresentada é necessário a determinação da temperatura média das barras de reforço, a partir de uma nova fórmula que considera o fator de massividade e o fator u do cobrimento na equação.

O fator de redução $k_{y,t}$ da tensão de cedência e o fator de redução $k_{E,t}$ do módulo de elasticidade dos varões da armadura são definidos em função da resistência ao fogo padrão e da média geométrica u das distâncias entre o eixo dos varões e os paramentos exteriores do betão. Após a determinação dos coeficientes $k_{y,t}$ e $k_{E,t}$, será possível o cálculo da resistência plástica à compressão axial e a rigidez efetiva do reforço da seção transversal sendo usadas as mesmas equações para as duas componentes (exposto e não exposto).

$$N_{fi,pl,Rd,s} = \frac{A_s k_{sy,\theta} f_{sy}}{\gamma_{M,fi,s}} \quad (70)$$

$$(EI)_{fi,c,z} = k_{se,\theta} E_s I_{s,z} \quad (71)$$

6.4.1 Reforço exposto ao fogo

A temperatura média das barras de reforço expostas ao fogo, é determinada a partir da equação (72).

$$\theta_{se,t} = \theta_{o,s,e,t} + k_{t,s,e} \left(\frac{A_m}{V} \right) + k_{u,s,e}(u) \quad (72)$$

Na Tabela 17 e na Tabela 18 estão apresentados os coeficientes empíricos para determinação da temperatura nos reforços.

Tabela 17 - Novos parâmetros para o cálculo da temperatura média do reforço exposto.

| $\theta_{se,t} = \theta_{o,s,e,t} + k_{t,s,e} \left(\frac{A_m}{V} \right) + k_{u,s,e}(u)$ | | | | | | | | | |
|--|-------------|-------------|--------------------|-------------|-------------|--------------------|-------------|-------------|--------------------|
| Resistência ao fogo padrão | HEA | | | HEB | | | HEM | | |
| | $k_{t,s,e}$ | $k_{u,s,e}$ | $\theta_{o,s,e,t}$ | $k_{t,s,e}$ | $k_{u,s,e}$ | $\theta_{o,s,e,t}$ | $k_{t,s,e}$ | $k_{u,s,e}$ | $\theta_{o,s,e,t}$ |
| R 30 | 6 | 0 | 44 | 6 | 0 | 46 | 3 | 0 | 62 |
| R 60 | 17 | 0 | 95 | 17 | 0 | 94 | 5 | 0 | 148 |
| R 90 | 26 | 0 | 163 | 27 | 0 | 157 | 17 | 0 | 203 |
| R 120 | 32 | 4 | 54 | 34 | 4 | 0 | 26 | 5 | 20 |

Tabela 18 - Novos parâmetros para o cálculo da temperatura média do reforço não exposto.

| $\theta_{sne,t} = \theta_{o,s,ne,t} + k_{t,s,ne} \left(\frac{A_m}{V} \right) + k_{u,s,ne}(u)$ | | | | | | | | | |
|--|--------------|--------------|---------------------|--------------|--------------|---------------------|--------------|--------------|---------------------|
| Resistência ao fogo padrão | HEA | | | HEB | | | HEM | | |
| | $k_{t,s,ne}$ | $k_{u,s,ne}$ | $\theta_{o,s,ne,t}$ | $k_{t,s,ne}$ | $k_{u,s,ne}$ | $\theta_{o,s,ne,t}$ | $k_{t,s,ne}$ | $k_{u,s,ne}$ | $\theta_{o,s,ne,t}$ |
| R 30 | 1 | 0 | 22 | 1 | 0 | 21 | 2 | 0 | 20 |
| R 60 | 6 | 0 | 18 | 8 | 0 | 14 | 10 | 0 | 3 |
| R 90 | 10 | 0 | 32 | 12 | 0 | 26 | 17 | 0 | 0 |
| R 120 | 13 | 0 | 51 | 20 | 0 | 18 | 28 | 0 | 0 |

Na Figura 37 está representada a comparação dos reforços expostos ao fogo com os reforços não expostos ao fogo, podemos ver que existe uma grande diferença de gradientes térmicos.

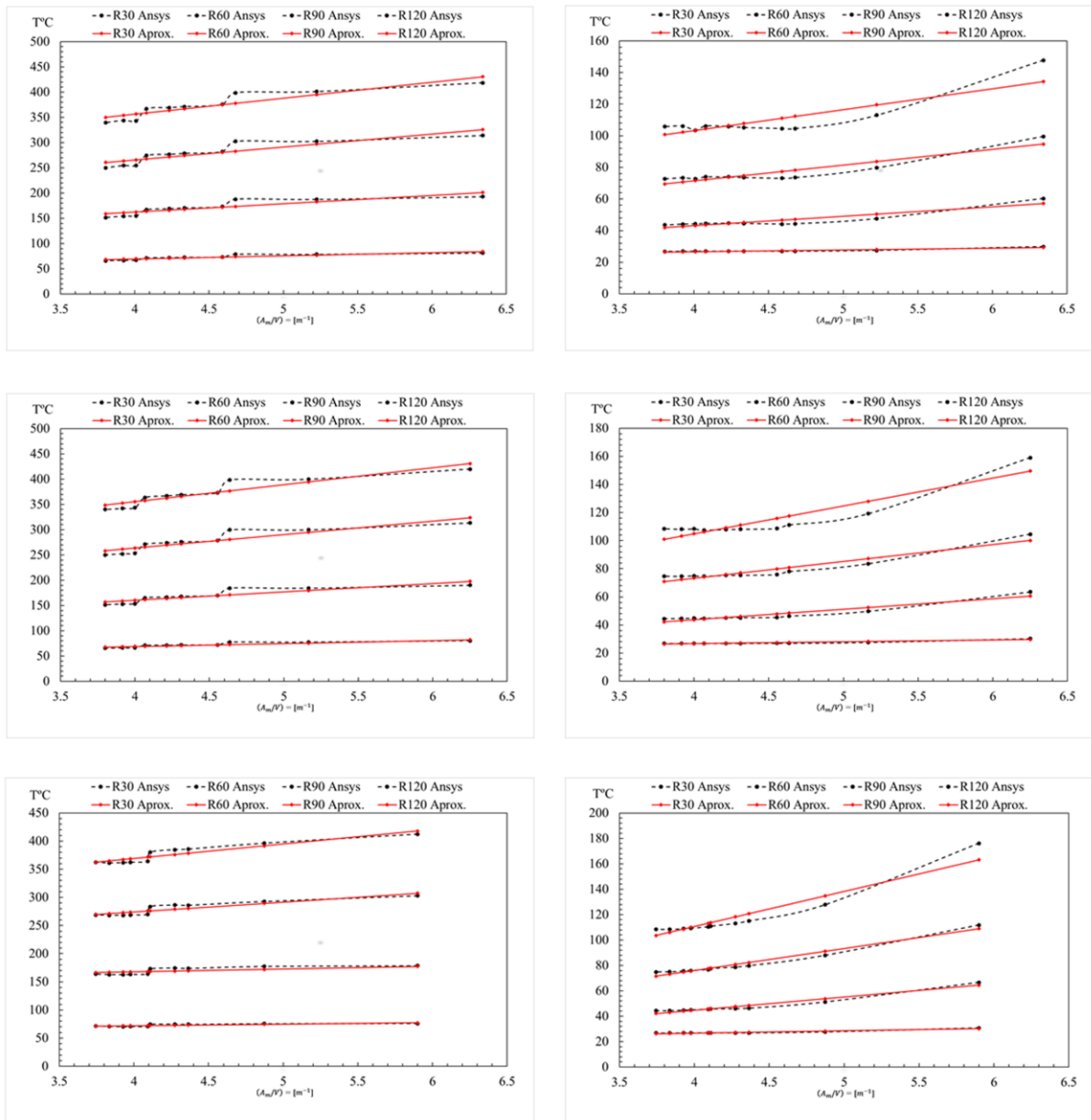


Figura 37 - Temperatura média para ANSYS e para Atual proposta, exposto ao fogo (A, B, C) não exposto ao fogo (D, E, F).

Do lado não exposto apresenta ser não linear, como tal uma das soluções seria acrescentar um quadrado a equação de forma a retificar aquela curva que se pode ver nos resultados do Ansys.

CÁPITULO 7– COMPARAÇÃO DOS RESULTADOS

Os banzos dos perfis estudados (HEA, HEB e HEM) apresentam temperaturas determinadas através do método avançado de cálculo que ficam sempre próximas das encontradas através do melhoramento, dando resultados bastante concordantes.

As temperaturas calculadas por meio da atual proposta mostraram-se próximas e seguras em relação às obtidas através da simulação numérica. Para a componente não exposta, as temperaturas são significativamente mais baixas, fazendo com que a diferença entre a temperatura da atual proposta e da simulação numérica seja mais perceptível graficamente do que a diferença para a componente exposta. No caso da alma as temperaturas médias são menores para o cenário fogo de 1 lado, este fato é atribuído a presença da parede na seção transversal. A comparação das temperaturas média para fogo de 1 lado obtidas numericamente e calculadas pela atual proposta são encontradas na Figura 33.

Nesta proposta, para a componente betão, verifica-se uma boa aproximação do valor da temperatura calculada com o valor determinado numericamente, mantendo-se seguro tanto para o betão exposto ao fogo quanto para o betão não exposto ao fogo, como se pode observar na Figura 35. As temperaturas no betão não exposto não apresentam a isotérmica de 500 °C, sendo assim, a redução do betão foi determinada somente para a componente exposta ao fogo. A presença da parede em contato com o banzo do perfil proporciona uma proteção térmica na direção vertical, tornando não necessária a redução vertical, tanto para o betão exposto quanto para o não exposto.

No caso dos reforços existe diferença no valor da temperatura média obtida para o reforço exposto ao fogo e reforço não exposto ao fogo, sendo significativamente alta para seções de pilares embebidos na parede (fogo de um lado). A equação de temperatura para o reforço no cenário fogo de um lado é semelhante à equação cenário fogo quatro lados, no entanto apresenta parâmetros diferentes para o reforço exposto (na esquerda) e reforço não exposto (na direita), uma vez que as temperaturas são significativamente mais altas para o reforço exposto ao fogo, ver Figura 37.

CÁPITULO 8– CONCLUSÕES E TRABALHOS FUTUROS

O método simplificado de cálculo presente no EN 1994-1-2 para o cálculo da resistência ao fogo de pilares parcialmente revestidos, apresenta resultados inseguros em relação aos valores obtidos através do método avançado de cálculo. Além de não considerar a configuração estudada para perfil parcialmente revestido embebido em parede com fogo de um único lado.

Como tal, é possível concluir que comparando a nova proposta ao método simplificado de cálculo, Eurocódigo 4 parte 1-2, apresenta resultados mais seguros levando em conta que a posição do perfil e a parede têm muita influência nos gradientes térmicos, sendo que este método simplificado de cálculo não leva em conta estas variações.

Foram determinados novas equações e novos coeficientes para o cálculo de pilares mistos embebidos em parede.

Como sugestões para trabalhos futuros, sugere-se simulações de novas séries de perfis com maior variação do fator “ u ” da componente do reforço, a fim de determinar parâmetros para uma maior variedade de configuração da seção e verificar a influência do cobrimento na resistência à altas temperaturas.

Propõem-se a realização de simulações numéricas tridimensionais para a verificação da resistência à encurvadura das colunas com as séries de perfis analisadas neste trabalho.

E ainda a realização de ensaios experimentais, especialmente para validação dos modelos numéricos.

REFERÊNCIAS

- [1] H.L.Malhotra, “Effect of temperature on the crushing strength of concrete“,1954.
- [2] C. N. Costa and V. P. Silva, “Revisão histórica das curvas padronizadas de incêndio,” *Nutau*, no. 2, 2006.
- [3] CEN - EN 1994-1-2, *Eurocode 4: Design of composite steel and concrete structures - Part 1-2: General rules - Structural fire desing*. Brussels, 2005, p. 109.
- [4] Nathalia G. Gonçalves,“. *Novos desenvolvimentos para análise numérica de pilares mistos em condições de incêndio baseado no Eurocódigo 4*” Instituto Politécnico de Bragança, 2019.
- [5] K. Kordina, “*Behaviour of Composite Columns and Girders in Fire,*” *Fire Saf. Sci.*, pp. 681–695, 1989.
- [6] CEN - EN 1991-1-2, *Eurocode 1: Actions on structures - Part 1-2: General actions - Actions on structures exposed to fire*, no. september. Brussels, 2005, p. 149.
- [7] ISO834-1, “*Fire-resistance tests - Elements of building construction - Part 1: General requirements.*” Switzerland, p. 25, 1999.
- [8] Fábio M.Rocha “*Fire behavior of steel and partially encased composite columns embedded on walls*”, 2018.
- [9] CEN - EN 1993-1-2, *Eurocode 3: Design of steel strutures - Part 1-2: General rules - Strutucral Fire Design*. Brussels, 2003, pp. 1–20.
- [10] CEN - EN 1996-1-2, *Eurocode 6 - Design of masonry structures - Part 1-2: General rules - Structural fire design*, vol. 54, no. 2. Brussels, 2005, p. 83.
- [11] 2019, *Proposta de novas expressões para o cálculo do fator de massividade*, António Correia.
- [12] H. L. Malhotra, “*Effect of temperature on the crushing strength of concrete*”, 1954.
- [13] J.C.Dotreppe, “*Computer aided fire resistance for steel and composite structures*”, 1984.
- [14] L. H. Han, Y. F. Yang, H. Yang, and J. S. Huo, “*Residual strength of concrete-filled RHS columns after exposure to the ISO-834 standard fire,*” *Thin-Walled Struct.*, vol. 40, no. 12, pp. 991–1012, 2002.
- [15] M. Milanovic, M. Cvetkovska, and P. Knezevic, “*Load-bearing capacity of fire exposed composite columns,*” vol. 67, no. 2015, pp. 1187–1197, 2016.

- [16]Correia, “*A simplified calculation method for temperature evaluation of steel*”, pp. 432-436, 2010.
- [17]Correia, “*Thermal bowing on steel columns embedded on walls*”, pp. 55-68, 2014.
- [18]Piloto et al, “*Proceedings of the International Fire Safety Symposium*”, pp, 29-32, 2015.
- [19]P.Piloto L.Mesquita, “*Experimental bending tests of partially encased beams at*”, pp. 25, 2017.
- [20]ANSYS®, “*Academic Research Mechanical APDL.*” Release 19.2.

ANEXO I

MÉTODO SIMPLIFICADO DE CÁLCULO: Atual Proposta para fogo 1 lado.

| NOVO MODELO | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
|-------------|------------------------------|-----|-----|------|-----|-----|----------------------------------|------|-----|-----|-----|------|------------------------------|-----|-----|------|-----|-----|----------------------------------|------|-----|-----|-----|------|--------------------------------|-----|-----|------|-----|-----|------------------------------------|------|-----|-----|-----|------|---------------------|-----|-----|-----|----|----|-----|-----|----|-----|-----|-----|----|----|----|-----|----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|----|-----|-----|-----|----|-----|-----|-----|----|----|-----|-----|----|-----|-----|-----|----|----|----|-----|----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|----|-----|-----|-----|----|-----|-----|-----|----|----|-----|-----|----|-----|-----|-----|----|----|----|-----|----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|----|-----|-----|-----|----|-----|-----|-----|----|----|-----|-----|----|-----|-----|-----|----|----|----|-----|----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|----|-----|-----|-----|----|-----|-----|-----|----|----|-----|-----|----|-----|-----|-----|----|----|----|-----|----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|----|-----|-----|-----|----|-----|-----|-----|----|----|-----|-----|----|-----|-----|-----|----|----|----|-----|----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|----|-----|-----|-----|----|-----|-----|-----|----|----|-----|-----|----|-----|-----|-----|----|----|----|-----|----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|----|-----|-----|-----|----|-----|-----|-----|----|----|-----|-----|----|-----|-----|-----|----|----|----|-----|----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|----|-----|-----|-----|----|-----|-----|-----|----|----|-----|-----|----|-----|-----|-----|----|----|----|-----|----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|----|-----|-----|-----|----|-----|-----|-----|----|----|-----|-----|----|-----|-----|-----|----|----|-----|-----|----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|----|-----|-----|-----|----|-----|-----|-----|----|----|-----|-----|----|-----|-----|-----|----|----|----|-----|----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|----|-----|-----|-----|----|-----|-----|-----|----|----|-----|-----|----|-----|-----|-----|----|----|----|-----|----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|----|-----|-----|-----|----|-----|-----|-----|----|----|-----|-----|----|-----|-----|-----|----|----|----|-----|----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|----|-----|-----|-----|----|-----|-----|-----|----|----|-----|-----|----|-----|-----|-----|----|----|----|-----|----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|----|-----|-----|-----|----|-----|-----|-----|----|----|-----|-----|----|-----|-----|-----|----|----|----|-----|----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|----|-----|-----|-----|----|-----|-----|-----|----|----|-----|-----|----|-----|-----|-----|----|----|----|-----|----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|----|-----|-----|-----|----|-----|-----|-----|----|----|-----|-----|----|-----|-----|-----|----|----|----|-----|----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|----|-----|-----|-----|----|-----|-----|-----|----|----|-----|-----|----|-----|-----|-----|----|----|----|-----|----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|----|-----|-----|-----|----|-----|-----|-----|----|----|-----|-----|----|-----|-----|-----|----|----|----|-----|----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|----|-----|-----|-----|----|-----|-----|-----|----|----|-----|-----|----|-----|-----|-----|----|----|-----|-----|----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|----|-----|-----|-----|----|-----|-----|-----|----|----|-----|-----|----|-----|-----|-----|----|----|----|-----|----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|----|-----|-----|-----|----|-----|-----|-----|----|----|-----|-----|----|-----|-----|-----|----|----|----|-----|----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|----|-----|-----|-----|----|-----|-----|-----|----|----|-----|-----|----|-----|-----|-----|----|----|----|-----|----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|----|-----|-----|-----|----|-----|-----|-----|----|----|-----|-----|----|-----|-----|-----|----|----|----|-----|----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|----|-----|-----|-----|----|-----|-----|-----|----|----|-----|-----|----|-----|-----|-----|----|----|----|-----|----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|----|-----|-----|-----|----|-----|-----|-----|----|----|-----|-----|----|-----|-----|-----|----|----|----|-----|----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|----|-----|-----|-----|----|-----|-----|-----|----|----|-----|-----|----|-----|-----|-----|----|----|----|-----|----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|----|-----|-----|-----|----|-----|-----|-----|----|----|-----|-----|----|-----|-----|-----|----|----|----|-----|----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|----|-----|-----|-----|----|-----|-----|-----|----|----|-----|-----|----|-----|-----|-----|----|----|----|-----|----|-----|-----|-----|
| | Temperatura do Banho exposto | | | | | | Temperatura do Banho não exposto | | | | | | Temperatura do Betão exposto | | | | | | Temperatura do Betão não exposto | | | | | | Temperatura do Reforço exposto | | | | | | Temperatura do Reforço não exposto | | | | | | Temperatura da Alma | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| | R30 | R60 | R90 | R120 | R30 | R60 | R90 | R120 | R30 | R60 | R90 | R120 | R30 | R60 | R90 | R120 | R30 | R60 | R90 | R120 | R30 | R60 | R90 | R120 | R30 | R60 | R90 | R120 | R30 | R60 | R90 | R120 | R30 | R60 | R90 | R120 | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| Perfis | 181 | 370 | 524 | 647 | 64 | 140 | 222 | 331 | 70 | 162 | 273 | 380 | 40 | 85 | 141 | 209 | 84 | 201 | 326 | 430 | 29 | 57 | 95 | 134 | 61 | 138 | 232 | 338 | 181 | 370 | 518 | 636 | 60 | 130 | 217 | 300 | 67 | 152 | 251 | 344 | 37 | 76 | 124 | 181 | 77 | 183 | 297 | 395 | 28 | 50 | 84 | 120 | 56 | 127 | 207 | 292 | 181 | 370 | 515 | 631 | 58 | 127 | 215 | 290 | 65 | 148 | 240 | 326 | 36 | 71 | 115 | 166 | 74 | 174 | 283 | 378 | 27 | 47 | 78 | 112 | 53 | 120 | 194 | 269 | 181 | 370 | 515 | 630 | 58 | 129 | 215 | 293 | 65 | 147 | 238 | 324 | 36 | 70 | 114 | 164 | 73 | 172 | 281 | 375 | 27 | 47 | 77 | 111 | 53 | 118 | 191 | 266 | 181 | 370 | 513 | 628 | 58 | 130 | 214 | 294 | 64 | 145 | 233 | 315 | 35 | 68 | 110 | 157 | 72 | 168 | 274 | 367 | 27 | 45 | 75 | 108 | 52 | 114 | 184 | 255 | 181 | 370 | 513 | 627 | 58 | 131 | 213 | 296 | 64 | 144 | 231 | 312 | 35 | 67 | 108 | 155 | 71 | 166 | 272 | 364 | 27 | 44 | 74 | 106 | 51 | 112 | 181 | 251 | 181 | 370 | 512 | 626 | 58 | 131 | 213 | 297 | 63 | 142 | 227 | 307 | 35 | 66 | 106 | 151 | 70 | 164 | 268 | 359 | 27 | 44 | 72 | 104 | 51 | 110 | 177 | 245 | 181 | 370 | 512 | 625 | 58 | 132 | 212 | 300 | 63 | 142 | 226 | 305 | 35 | 65 | 105 | 149 | 70 | 162 | 266 | 356 | 27 | 43 | 72 | 103 | 50 | 108 | 175 | 242 | 181 | 370 | 511 | 624 | 58 | 133 | 212 | 300 | 63 | 141 | 224 | 302 | 34 | 65 | 103 | 147 | 69 | 161 | 264 | 354 | 27 | 43 | 71 | 102 | 50 | 107 | 173 | 238 | 181 | 370 | 511 | 623 | 58 | 134 | 212 | 304 | 63 | 140 | 222 | 299 | 34 | 64 | 102 | 144 | 68 | 159 | 261 | 350 | 26 | 42 | 70 | 101 | 49 | 105 | 170 | 233 | 181 | 372 | 545 | 669 | 64 | 144 | 240 | 341 | 71 | 167 | 285 | 390 | 40 | 87 | 146 | 216 | 82 | 198 | 324 | 431 | 30 | 61 | 100 | 150 | 63 | 145 | 247 | 362 | 181 | 372 | 534 | 653 | 57 | 129 | 214 | 305 | 68 | 156 | 259 | 361 | 37 | 77 | 127 | 185 | 76 | 180 | 295 | 394 | 28 | 52 | 87 | 128 | 59 | 135 | 222 | 307 | 182 | 373 | 528 | 646 | 57 | 129 | 214 | 293 | 66 | 151 | 246 | 343 | 36 | 72 | 117 | 170 | 73 | 171 | 281 | 377 | 28 | 48 | 81 | 118 | 55 | 127 | 206 | 280 | 182 | 374 | 527 | 644 | 56 | 129 | 214 | 296 | 66 | 150 | 244 | 336 | 36 | 71 | 116 | 168 | 72 | 170 | 279 | 374 | 27 | 48 | 80 | 116 | 54 | 123 | 200 | 276 | 182 | 375 | 525 | 641 | 56 | 129 | 214 | 297 | 65 | 148 | 238 | 325 | 35 | 69 | 112 | 161 | 71 | 166 | 272 | 366 | 27 | 46 | 77 | 111 | 53 | 117 | 190 | 264 | 182 | 376 | 524 | 640 | 56 | 129 | 214 | 299 | 65 | 147 | 236 | 321 | 35 | 68 | 110 | 158 | 70 | 164 | 269 | 362 | 27 | 45 | 76 | 109 | 52 | 115 | 187 | 259 | 183 | 376 | 522 | 637 | 56 | 129 | 214 | 300 | 65 | 145 | 233 | 314 | 35 | 66 | 107 | 154 | 69 | 162 | 266 | 358 | 27 | 44 | 74 | 106 | 51 | 112 | 181 | 251 | 183 | 377 | 522 | 637 | 56 | 129 | 214 | 303 | 65 | 145 | 231 | 309 | 34 | 66 | 106 | 152 | 69 | 160 | 264 | 355 | 27 | 44 | 73 | 105 | 50 | 108 | 176 | 248 | 183 | 377 | 521 | 635 | 56 | 129 | 214 | 303 | 64 | 144 | 229 | 306 | 34 | 65 | 105 | 149 | 68 | 159 | 262 | 353 | 27 | 43 | 72 | 103 | 49 | 107 | 174 | 244 | 183 | 378 | 519 | 634 | 56 | 129 | 214 | 307 | 64 | 143 | 226 | 300 | 34 | 64 | 103 | 146 | 68 | 157 | 258 | 349 | 26 | 42 | 71 | 101 | 48 | 104 | 168 | 238 | 166 | 351 | 508 | 633 | 56 | 139 | 261 | 369 | 71 | 168 | 293 | 409 | 42 | 95 | 165 | 240 | 77 | 177 | 307 | 418 | 30 | 64 | 109 | 163 | 66 | 160 | 275 | 387 | 164 | 348 | 501 | 620 | 54 | 132 | 238 | 336 | 66 | 153 | 258 | 357 | 38 | 80 | 136 | 198 | 74 | 172 | 289 | 392 | 28 | 54 | 91 | 135 | 58 | 135 | 227 | 319 | 164 | 346 | 497 | 614 | 58 | 136 | 227 | 320 | 64 | 146 | 241 | 332 | 36 | 73 | 122 | 178 | 73 | 170 | 281 | 378 | 27 | 49 | 82 | 121 | 53 | 122 | 203 | 286 | 164 | 346 | 496 | 613 | 58 | 135 | 225 | 317 | 64 | 144 | 238 | 327 | 36 | 72 | 119 | 174 | 73 | 169 | 279 | 376 | 27 | 48 | 81 | 118 | 53 | 120 | 199 | 280 | 163 | 345 | 495 | 610 | 57 | 134 | 222 | 312 | 63 | 142 | 232 | 319 | 35 | 70 | 115 | 167 | 72 | 168 | 276 | 372 | 27 | 46 | 78 | 114 | 51 | 116 | 191 | 269 | 163 | 345 | 495 | 610 | 57 | 134 | 221 | 311 | 63 | 142 | 231 | 318 | 35 | 69 | 114 | 167 | 72 | 168 | 276 | 371 | 27 | 46 | 78 | 113 | 51 | 115 | 191 | 268 | 163 | 345 | 494 | 609 | 57 | 133 | 219 | 308 | 62 | 140 | 227 | 312 | 35 | 68 | 111 | 162 | 72 | 168 | 274 | 369 | 27 | 45 | 76 | 110 | 50 | 112 | 185 | 261 | 163 | 345 | 494 | 608 | 57 | 133 | 218 | 306 | 62 | 139 | 226 | 309 | 34 | 67 | 110 | 160 | 72 | 167 | 273 | 367 | 27 | 44 | 75 | 109 | 50 | 111 | 183 | 257 | 163 | 344 | 493 | 607 | 57 | 132 | 216 | 303 | 62 | 138 | 223 | 305 | 34 | 66 | 107 | 156 | 72 | 167 | 271 | 365 | 26 | 43 | 73 | 106 | 49 | 109 | 179 | 251 | 163 | 344 | 492 | 606 | 56 | 131 | 214 | 300 | 61 | 137 | 220 | 300 | 34 | 65 | 105 | 152 | 71 | 167 | 270 | 363 | 26 | 42 | 72 | 104 | 48 | 107 | 174 | 245 |

ANEXO II

MÉTODO SIMPLIFICADO DE CÁLCULO: Ansys

| Perfis | ANSYS | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
|----------|------------------------------|-----|-----|------|----------------------------------|-----|-----|------|------------------------------|-----|-----|------|----------------------------------|-----|-----|------|--------------------------------|-----|-----|------|------------------------------------|-----|-----|------|---------------------|-----|-----|------|-----|-----|-----|
| | Temperatura do Banzo exposto | | | | Temperatura do Banzo não exposto | | | | Temperatura do Betão exposto | | | | Temperatura do Betão não exposto | | | | Temperatura do Reforço exposto | | | | Temperatura do Reforço não exposto | | | | Temperatura da Alma | | | | | | |
| | R30 | R60 | R90 | R120 | R30 | R60 | R90 | R120 | R30 | R60 | R90 | R120 | R30 | R60 | R90 | R120 | R30 | R60 | R90 | R120 | R30 | R60 | R90 | R120 | R30 | R60 | R90 | R120 | R30 | R60 | R90 |
| HEA 240 | 186 | 375 | 516 | 637 | 64 | 141 | 222 | 330 | 71 | 165 | 277 | 381 | 40 | 85 | 142 | 211 | 81 | 193 | 314 | 418 | 30 | 60 | 100 | 148 | 61 | 138 | 233 | 335 | | | |
| HEA 280 | 183 | 374 | 521 | 630 | 59 | 129 | 209 | 297 | 66 | 151 | 248 | 344 | 37 | 76 | 123 | 180 | 78 | 187 | 303 | 401 | 27 | 48 | 80 | 113 | 56 | 126 | 204 | 294 | | | |
| HEA 320 | 181 | 372 | 520 | 627 | 58 | 128 | 206 | 290 | 63 | 145 | 237 | 327 | 36 | 72 | 117 | 169 | 79 | 188 | 303 | 399 | 27 | 44 | 74 | 105 | 54 | 122 | 196 | 277 | | | |
| HEA 360 | 180 | 375 | 525 | 624 | 57 | 126 | 204 | 288 | 65 | 148 | 239 | 327 | 35 | 68 | 110 | 158 | 73 | 173 | 282 | 376 | 27 | 44 | 73 | 105 | 54 | 119 | 193 | 270 | | | |
| HEA 450 | 180 | 367 | 508 | 622 | 59 | 133 | 216 | 287 | 62 | 139 | 225 | 306 | 36 | 70 | 114 | 162 | 73 | 171 | 279 | 371 | 27 | 45 | 74 | 105 | 52 | 113 | 183 | 253 | | | |
| HEA 500 | 183 | 376 | 521 | 636 | 58 | 131 | 215 | 288 | 64 | 144 | 231 | 312 | 34 | 66 | 106 | 152 | 72 | 169 | 277 | 369 | 27 | 45 | 74 | 106 | 51 | 112 | 181 | 250 | | | |
| HEA 600 | 179 | 370 | 515 | 630 | 58 | 132 | 217 | 284 | 64 | 143 | 229 | 309 | 34 | 65 | 105 | 151 | 72 | 167 | 274 | 367 | 27 | 45 | 74 | 106 | 50 | 109 | 177 | 244 | | | |
| HEA 700 | 177 | 362 | 500 | 608 | 58 | 131 | 212 | 281 | 64 | 142 | 225 | 301 | 34 | 64 | 100 | 141 | 67 | 155 | 255 | 343 | 27 | 44 | 73 | 104 | 49 | 106 | 167 | 228 | | | |
| HEA 800 | 171 | 354 | 498 | 610 | 59 | 135 | 210 | 304 | 63 | 139 | 222 | 298 | 35 | 66 | 106 | 151 | 67 | 154 | 254 | 344 | 27 | 44 | 73 | 106 | 50 | 107 | 172 | 236 | | | |
| HEA 1000 | 176 | 364 | 511 | 624 | 57 | 132 | 207 | 303 | 66 | 146 | 232 | 310 | 34 | 65 | 105 | 149 | 66 | 152 | 250 | 339 | 27 | 44 | 73 | 106 | 50 | 109 | 176 | 242 | | | |
| HEB 240 | 178 | 384 | 530 | 660 | 64 | 144 | 240 | 342 | 72 | 167 | 285 | 392 | 40 | 88 | 147 | 218 | 80 | 190 | 313 | 420 | 30 | 63 | 105 | 159 | 64 | 146 | 249 | 354 | | | |
| HEB 280 | 177 | 386 | 529 | 654 | 58 | 129 | 212 | 301 | 66 | 154 | 255 | 354 | 37 | 75 | 123 | 180 | 77 | 184 | 300 | 400 | 28 | 50 | 84 | 119 | 57 | 131 | 215 | 308 | | | |
| HEB 320 | 178 | 387 | 528 | 648 | 56 | 126 | 207 | 294 | 66 | 152 | 250 | 347 | 36 | 72 | 118 | 172 | 77 | 184 | 300 | 398 | 27 | 46 | 78 | 111 | 56 | 129 | 210 | 299 | | | |
| HEB 360 | 173 | 382 | 527 | 647 | 56 | 127 | 209 | 295 | 66 | 151 | 244 | 335 | 35 | 70 | 114 | 165 | 72 | 170 | 279 | 373 | 27 | 45 | 76 | 109 | 54 | 122 | 199 | 280 | | | |
| HEB 450 | 175 | 371 | 525 | 645 | 56 | 129 | 213 | 299 | 66 | 149 | 240 | 326 | 35 | 69 | 112 | 161 | 72 | 168 | 276 | 369 | 27 | 45 | 75 | 108 | 53 | 118 | 192 | 266 | | | |
| HEB 500 | 172 | 365 | 524 | 638 | 57 | 129 | 214 | 300 | 65 | 147 | 238 | 321 | 35 | 69 | 112 | 160 | 71 | 167 | 274 | 367 | 27 | 45 | 75 | 108 | 52 | 116 | 189 | 260 | | | |
| HEB 600 | 179 | 371 | 520 | 634 | 57 | 130 | 217 | 303 | 66 | 147 | 236 | 318 | 35 | 68 | 110 | 157 | 71 | 165 | 271 | 364 | 27 | 45 | 75 | 108 | 52 | 113 | 184 | 253 | | | |
| HEB 700 | 176 | 365 | 514 | 628 | 57 | 130 | 217 | 303 | 65 | 144 | 229 | 308 | 34 | 66 | 106 | 151 | 66 | 154 | 254 | 344 | 27 | 45 | 75 | 108 | 50 | 108 | 175 | 242 | | | |
| HEB 800 | 174 | 363 | 511 | 625 | 57 | 130 | 217 | 304 | 65 | 143 | 228 | 305 | 34 | 65 | 105 | 150 | 66 | 153 | 252 | 342 | 27 | 45 | 75 | 108 | 49 | 107 | 173 | 238 | | | |
| HEB 1000 | 172 | 360 | 510 | 625 | 55 | 130 | 216 | 303 | 64 | 140 | 222 | 297 | 34 | 63 | 100 | 143 | 66 | 151 | 250 | 340 | 27 | 44 | 75 | 109 | 48 | 102 | 165 | 227 | | | |
| HEM 240 | 164 | 348 | 505 | 630 | 67 | 137 | 258 | 368 | 72 | 167 | 291 | 402 | 42 | 95 | 165 | 245 | 76 | 179 | 303 | 412 | 31 | 67 | 112 | 176 | 66 | 156 | 271 | 381 | | | |
| HEM 280 | 168 | 355 | 507 | 626 | 58 | 137 | 231 | 328 | 66 | 153 | 259 | 363 | 37 | 79 | 134 | 198 | 76 | 177 | 293 | 396 | 28 | 51 | 88 | 128 | 58 | 137 | 230 | 331 | | | |
| HEM 320 | 163 | 347 | 499 | 616 | 54 | 128 | 218 | 310 | 64 | 148 | 246 | 346 | 35 | 74 | 124 | 183 | 74 | 174 | 286 | 386 | 27 | 46 | 80 | 115 | 54 | 130 | 216 | 309 | | | |
| HEM 360 | 162 | 345 | 497 | 613 | 55 | 131 | 221 | 313 | 63 | 145 | 241 | 336 | 35 | 73 | 122 | 179 | 75 | 175 | 286 | 385 | 27 | 46 | 79 | 113 | 53 | 125 | 208 | 296 | | | |
| HEM 450 | 162 | 344 | 494 | 609 | 55 | 130 | 218 | 308 | 62 | 141 | 230 | 318 | 35 | 69 | 114 | 165 | 75 | 173 | 284 | 380 | 27 | 46 | 77 | 111 | 51 | 116 | 192 | 269 | | | |
| HEM 500 | 163 | 344 | 493 | 607 | 56 | 132 | 221 | 310 | 62 | 140 | 228 | 312 | 35 | 69 | 114 | 164 | 71 | 164 | 270 | 364 | 27 | 45 | 77 | 110 | 51 | 114 | 188 | 262 | | | |
| HEM 600 | 166 | 349 | 494 | 604 | 56 | 130 | 218 | 306 | 63 | 140 | 226 | 308 | 35 | 68 | 111 | 159 | 71 | 163 | 269 | 362 | 27 | 45 | 76 | 109 | 50 | 110 | 181 | 251 | | | |
| HEM 700 | 163 | 343 | 491 | 605 | 56 | 132 | 221 | 309 | 62 | 139 | 225 | 306 | 35 | 67 | 110 | 158 | 71 | 163 | 268 | 362 | 27 | 45 | 76 | 109 | 49 | 109 | 179 | 248 | | | |
| HEM 800 | 162 | 343 | 491 | 605 | 56 | 133 | 221 | 310 | 62 | 139 | 223 | 303 | 35 | 67 | 108 | 155 | 71 | 163 | 268 | 361 | 27 | 44 | 75 | 108 | 49 | 107 | 175 | 242 | | | |
| HEM 1000 | 162 | 342 | 490 | 604 | 57 | 133 | 222 | 311 | 62 | 136 | 218 | 295 | 34 | 64 | 103 | 147 | 71 | 164 | 269 | 362 | 27 | 44 | 75 | 108 | 48 | 102 | 166 | 230 | | | |

