

UNIVERSIDADE FEDERAL DE MINAS GERAIS
ESCOLA DE ENGENHARIA
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA DE ESTRUTURAS

**ANÁLISE DO COMPORTAMENTO DE PILARES MISTOS
AÇO-CONCRETO EM SITUAÇÃO DE INCÊNDIO**

Dissertação apresentada como requisito parcial
para a obtenção do grau de Mestre
em Engenharia de Estruturas
por
Ana Paula Mendonça Nóbrega

Abril de 2003

UNIVERSIDADE FEDERAL DE MINAS GERAIS
ESCOLA DE ENGENHARIA
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA DE ESTRUTURAS

**“ANÁLISE DO COMPORTAMENTO DE PILARES MISTOS
AÇO-CONCRETO EM SITUAÇÃO DE INCÊNDIO”**

Ana Paula Mendonça Nóbrega

Dissertação apresentada ao Curso de Mestrado em Engenharia de Estruturas da Escola de Engenharia da Universidade Federal de Minas Gerais, como parte dos requisitos necessários à obtenção do título de “Mestre em Engenharia de Estruturas”.

Comissão Examinadora:

Prof. Dr. Ricardo Hallal Fakury (Orientador)
DEES – UFMG

Prof. Dr. Francisco Carlos Rodrigues
DEES – UFMG

Profa. Dra. Eliane Maria Lopes Carvalho
UFF

Belo Horizonte, 25 de Abril de 2003

*Ao meu marido Nicodemos
e à minha filha Isabela.*

AGRADECIMENTOS

A Deus, que se faz presente em todos os momentos.

Ao Prof. Ricardo Hallal Fakury, pela confiança, dedicação e orientação durante o decorrer deste trabalho.

Aos professores e demais funcionários do Departamento de Engenharia de Estruturas da UFMG, pela atenção e presteza durante todo o curso.

Ao Fernando P. Figueiredo Júnior, pelas orientações sobre o programa CALTEMI.

Aos colegas do mestrado, pelo convívio agradável e troca de experiências, que enriqueceram esta jornada.

Ao meu marido Nicodemos, por sempre compartilhar de meus planos, apoiando e incentivando, pelo amor e compreensão fundamentais durante os momentos mais difíceis.

Aos meus pais e irmãos que acompanharam com estímulo e carinho o desenvolvimento deste trabalho.

Aos amigos e familiares que direta ou indiretamente contribuíram para a realização deste trabalho.

À USIMINAS MECÂNICA e à CODEME, por possibilitar a realização das disciplinas do mestrado.

À USIMINAS pela bolsa de mestrado concedida.

RESUMO

Os pilares mistos constituídos por perfil H de aço totalmente ou parcialmente revestidos por concreto e os pilares constituídos por perfil tubular de seção circular ou retangular preenchido por concreto têm sido cada vez mais utilizados na construção civil, no Brasil e em todo o mundo.

Na fase de projeto, tais pilares devem ser dimensionados à temperatura ambiente e em situação de incêndio, usando normas e especificações que tratam do assunto.

Um dos maiores problemas do dimensionamento em situação de incêndio dos pilares mistos vem a ser a determinação da distribuição de temperatura, função do tempo de incêndio, na seção transversal do elemento formada pelo perfil metálico, pelo concreto e pela armadura longitudinal de aço. Na prática, este problema normalmente é contornado usando-se métodos simplificados que fornecem a resistência a partir de tabelas ou ainda tabelas com a temperatura aproximada na seção transversal ou outros parâmetros que permitem a determinação da resistência e rigidez do pilar.

Neste trabalho, utilizando um programa desenvolvido na UFMG para análise térmica bidimensional, baseado no Método dos Elementos Finitos, pretende-se fazer uma avaliação crítica dos métodos simplificados previstos pelo Eurocode 4 - Part 1.2 (1994), quando aplicados aos pilares mistos parcialmente revestidos por concreto ou aos pilares de seção circular preenchidos por concreto, axialmente comprimidos, no que se refere à precisão e à consistência dos resultados obtidos para a resistência de cálculo.

ABSTRACT

It is known that the use of composite columns made of totally and partially encased steel sections or composite columns made of concrete filled hollow sections is a quite consolidated structural system to civil construction in Brazil and the whole world.

In general, a composite column must be designed at room temperature and under fire condition using appropriate standards and specifications.

The most problem to design composite column in fire condition is the temperature redistribution in cross-section (steel profile, concrete and reinforcing bars together) that is a function of the time of fire exposure. In fact, this problem is normally solved with simplified design methods that present tables with the resistance of composite columns or some tables with average temperature in cross-section in fire condition and parameters that determine the resistance and the stiffness of the composite column.

This work presents a critical analysis of simplified design methods according EC4-Part 1.2 (1994), using a software based on the finite element method developed in Federal University of Minas Gerais for bidimensional thermal analysis to composite columns made of partially encased steel sections or composite columns made of concrete filled circular hollow sections under axial compression.

ÍNDICE

1	Considerações Gerais sobre os Pilares Mistos	1
1.1	Introdução	1
1.2	Histórico	4
1.2.1	Generalidades	4
1.2.2	Pilares com Seção I	6
1.2.3	Pilares Tubulares	7
1.2.4	Situação Brasileira	15
1.3	No Presente Estudo	17
2	Propriedades Dos Materiais em Situação de Incêndio	20
2.1	Introdução	20
2.2	Propriedades Mecânicas	20
2.2.1	Aços Estruturais	20
A.	Resistência ao Escoamento e Módulo de Elasticidade	21
B.	Massa Específica	22
2.2.2	Concreto	22
A.	Resistência Característica à Compressão e Módulo de Elasticidade	22
B.	Massa Específica	24
2.2.3	Armadura	24
A.	Resistência ao Escoamento e Módulo de Elasticidade	24
B.	Massa Específica	25

2.3	Propriedades Térmicas	25
2.3.1	Aços Estruturais e Armadura	25
A.	Alongamento	25
B.	Calor específico	26
C.	Condutividade térmica	28
2.3.2	Concreto	28
A.	Alongamento	28
B.	Calor específico	29
C.	Condutividade térmica	30
3	Dimensionamento de Pilares Mistos à Temperatura Ambiente	31
3.1	Introdução	31
3.2	Método Simplificado	32
3.2.1	Resistência Plástica à Compressão	32
A.	Pilares Parcialmente Revestidos por Concreto	32
B.	Pilares de Seção Circular Preenchidos por Concreto	33
3.2.2	Rigidez Efetiva do Pilar Misto	34
A.	Cargas de curta duração $(EI)_e$	34
B.	Cargas de longa duração $(EI)_e$	34
3.2.3	Carga Crítica de Flambagem Elástica N_{cr}	35
3.2.4	Parâmetro de Esbeltez $\bar{\lambda}$	35
3.2.5	Resistência de Cálculo do Pilar Misto à Compressão	36
3.2.6	Limitações do Método Simplificado	37

4	Dimensionamento de Pilares Mistos em Situação de Incêndio	38
4.1	Introdução	38
4.2	Métodos de Dimensionamento de Pilares Mistos em Situação de Incêndio ..	40
4.2.1	Método Tabular	40
A.	Pilares Mistos Parcialmente Revestidos por Concreto	42
B.	Pilares Mistos de Seção Circular Preenchidos por Concreto	44
4.3.2	Método Simplificado Analítico de Cálculo	45
A.	Procedimento Geral	45
B.	Pilares Mistos Parcialmente Revestidos por Concreto	47
C.	Pilares Mistos de Seção Circular Preenchidos por Concreto	55
D.	Disposições Construtivas	59
4.3.3	Métodos Avançados de Cálculo	61
A.	Modelo de Resposta Térmica	61
B.	Modelo de Resposta Mecânica	62
C.	Validação	62
5	Considerações do Programa CALTEMI	63
5.1	Introdução	63
5.2	Método dos Elementos Finitos Aplicado à Transferência de Calor	66
5.2.1	Mecanismos de Transferência de Calor	66
A.	Condução	66
B.	Convecção	70
C.	Radiação	72
5.2.2	Equações Básicas	73

5.2.3	Formulação	76
5.2.4	Discretização	77
5.3	Características do Programa CALTEMI	79
5.3.1	Propriedades dos Materiais	79
5.3.2	Elementos utilizáveis	80
5.3.3	Condições de Contorno	80
6	Análise de Modelos	82
6.1	Introdução	82
6.2	Perfis Metálicos Adotados	83
6.3	Seções Mistas Analisadas	84
6.3.1	Pilares Parcialmente Revestidos por Concreto	85
6.3.2	Pilares de Seção Circular Preenchidos por Concreto	93
6.4	Temperatura da Seção Mista Via Programa CALTEMI	96
6.4.1	Generalidades	96
6.4.2	Pilares Parcialmente Revestidos por Concreto	97
6.4.3	Pilares de Seção Circular Preenchidos por Concreto	113
6.5	Resistência dos Pilares Mistos	118
6.5.1	Generalidades	118
6.5.2	Comparação da Resistência calculada pelo Método Avançado de Cálculo com a Resistência determinada pelo Método Simplificado Analítico ...	119
6.5.3	Comparação da Resistência calculada pelo Método Avançado de Cálculo com a Resistência determinada pelo Método Tabular	128
6.5.4	Comparação das Resistências dos Pilares com e sem Proteção de Argamassa Jateada	145

7	Análise de Resultados	150
7.1	Análise Comparativa	150
8	Conclusões e Sugestões para Novos Trabalhos	167
8.1	Conclusões	167
8.2	Sugestões para Novos Trabalhos	169
Anexo 1	Temperatura em Escala de Cores na Seção Transversal dos Pilares Mistos Obtida Por Meio do Programa Caltemi ...	173
Anexo 2	Cálculo da Resistência em Situação de Incêndio do Pilar Misto Parcialmente Revestido por Concreto Formado com o Perfil PS 400x62 por Meio do Método Simplificado Analítico de Cálculo	188
Anexo 3	Cálculo da Resistência em Situação de Incêndio do Pilar Misto Parcialmente Revestido por Concreto Formado com o Perfil PS 400x62 e do Perfil Preenchido por Concreto Formado Com o Perfil Tubular 273x9,3 por Meio do Método Avançado de Cálculo	193
Anexo 4	Cálculo da Resistência em Situação de Incêndio do Pilar Misto Parcialmente Revestido por Concreto Formado com o Perfil PS 400x62 e do Perfil Preenchido por Concreto Formado Com o Perfil Tubular 273x9,3 com Proteção Térmica por Meio do Método Avançado de Cálculo	210
	Referências Bibliográficas	227
	Bibliografia	230

LISTA DE FIGURAS

FIGURA 1.1 – Tipos de seções transversais de pilares mistos

FIGURA 2.1 – Diagrama tensão-deformação do aço

FIGURA 2.2 – Diagrama tensão-deformação do concreto

FIGURA 2.3 – Alongamento do aço em função da temperatura

FIGURA 2.4 – Calor específico do aço em função da temperatura

FIGURA 2.5 – Condutividade térmica do aço em função da temperatura

FIGURA 2.6 – Alongamento do concreto em função da temperatura

FIGURA 2.7 – Calor específico do concreto em função da temperatura

FIGURA 2.8 – Condutividade térmica do concreto em função da temperatura

FIGURA 3.1 – Curvas de flambagem

FIGURA 4.1 – Seção reduzida para dimensionamento em situação de incêndio

FIGURA 4.2 – Seção transversal do pilar preenchido por concreto

FIGURA 4.3 – Disposições construtivas para pilares parcialmente revestidos

FIGURA 5.1 – Malha gerada através do pré-processador GID para o pilar parcialmente revestido formado com o perfil HP 310x93 e indicação de alguns nós utilizados no estudo deste pilar

FIGURA 5.2 – Parte do relatório de saída do CALTEMI com as temperaturas dos nós da malha gerada para o pilar parcialmente revestido formado com o perfil HP 310x93

FIGURA 5.3 – Distribuição de temperatura no pilar parcialmente revestido formado com o perfil HP 310x93 submetido a 120 minutos de incêndio

FIGURA 5.4 – Fluxo de calor em um elemento bidimensional

FIGURA 5.5 – Região bidimensional com as condições de contorno possíveis

FIGURA 5.6 – Elementos utilizáveis no programa CALTEMI

FIGURA 6.1 – Dimensões dos perfis metálicos

FIGURA 6.2 – Pilar parcialmente revestido formado com perfil PS 400x62

FIGURA 6.3 – Pilar parcialmente revestido formado com perfil VE 500x68

FIGURA 6.4 – Pilar parcialmente revestido formado com perfil CE 250x49

FIGURA 6.5 – Pilar parcialmente revestido formado com perfil CE 300x76

FIGURA 6.6 – Pilar parcialmente revestido formado com perfil W 610x174

FIGURA 6.7 – Pilar parcialmente revestido formado com perfil HP 310x93

FIGURA 6.8 – Pilar parcialmente revestido formado com perfil HP 360x132

FIGURA 6.9 – Pilar preenchido por concreto formado com o perfil tubular 219,1x12,7

FIGURA 6.10 – Pilar preenchido por concreto formado com o perfil tubular 273x9,3

FIGURA 6.11 – Pilar preenchido por concreto formado com o perfil tubular 355,6x11,1

FIGURA 6.12 – Divisão da seção transversal do pilar e temperaturas adotadas para as faixas de concreto

FIGURA 6.13 – Temperatura do pilar misto formado com perfil PS 400x62 sem proteção térmica, em °C

FIGURA 6.14 – Temperatura do pilar misto formado com perfil PS 400x62 com proteção de argamassa jateada, em °C

FIGURA 6.15 – Temperatura do pilar misto formado com perfil VE 500x68 sem proteção térmica, em °C

FIGURA 6.16 – Temperatura do pilar misto formado com perfil VE 500x68 com proteção de argamassa jateada, em °C

FIGURA 6.17 – Temperatura do pilar misto formado com perfil CE 250x49, em °C

FIGURA 6.18 – Temperatura do pilar misto formado com perfil CE 300x76, em °C

FIGURA 6.19 – Temperatura do pilar misto formado com perfil W 610x174, em °C

FIGURA 6.20 – Temperatura do pilar misto formado com perfil HP 310x93, em °C

FIGURA 6.21 – Temperatura do pilar misto formado com perfil HP 360x132 sem proteção térmica, em °C

FIGURA 6.22 – Temperatura do pilar misto formado com perfil HP 360x132 com proteção de argamassa jateada, em °C

FIGURA 6.23 – Temperatura do pilar misto formado com perfil tubular 219,1x12,7, em °C

FIGURA 6.24 – Temperatura do pilar misto formado com perfil tubular 273x9,3 sem proteção térmica, em °C

FIGURA 6.25 – Temperatura do pilar misto formado com perfil tubular 273x9,3 com proteção de argamassa jateada, em °C

FIGURA 6.26 – Temperatura do pilar misto formado com perfil tubular 355,6x11,1, em °C

FIGURA 7.1.a – Gráfico comparativo das resistências obtidas através do diferentes métodos de dimensionamento para o pilar parcialmente revestido formado com o perfil CE 250x49

FIGURA 7.1.b – Gráfico comparativo das resistências obtidas através do diferentes métodos de dimensionamento para o pilar parcialmente revestido formado com o perfil PS 400x62

FIGURA 7.1.c – Gráfico comparativo das resistências obtidas através do diferentes métodos de dimensionamento para o pilar parcialmente revestido formado com o perfil W 610x174

FIGURA 7.1.d – Gráfico comparativo das resistências obtidas através do diferentes métodos de dimensionamento para o pilar parcialmente revestido formado com o perfil HP 310x93

FIGURA 7.1.e – Gráfico comparativo das resistências obtidas através do diferentes métodos de dimensionamento para o pilar parcialmente revestido formado com o perfil HP 360x132

FIGURA 7.1.f – Gráfico comparativo das resistências obtidas através do diferentes métodos de dimensionamento para o pilar parcialmente revestido formado com o perfil CE 300x76

FIGURA 7.1.g – Gráfico comparativo das resistências obtidas através do diferentes métodos de dimensionamento para o pilar parcialmente revestido formado com o perfil VE 500x68

FIGURA 7.1.h – Gráfico comparativo das resistências obtidas através do diferentes métodos de dimensionamento para o pilar preenchido por concreto formado com o perfil tubular 273x9,3

FIGURA 7.1.i – Gráfico comparativo das resistências obtidas através do diferentes métodos de dimensionamento para o pilar preenchido por concreto formado com o perfil tubular 355,6x11,1

FIGURA 7.1.j – Gráfico comparativo das resistências obtidas através do diferentes métodos de dimensionamento para o pilar preenchido por concreto formado com o perfil tubular 219,1x12,7

FIGURA 7.2.a – Gráfico comparativo das resistências do pilar parcialmente revestido formado com o perfil PS 400x62 com proteção e sem proteção de argamassa jateada

FIGURA 7.2.b – Gráfico comparativo das resistências do pilar parcialmente revestido formado com o perfil VE 500x68 com proteção e sem proteção de argamassa jateada

FIGURA 7.2.c – Gráfico comparativo das resistências do pilar parcialmente revestido formado com o perfil HP 360x132 com proteção e sem proteção de argamassa jateada

FIGURA 7.2.d – Gráfico comparativo das resistências do pilar preenchido por concreto formado com o perfil tubular 273x9,3 com proteção e sem proteção de argamassa jateada

FIGURA 8.1.a – Pilares mistos de fachada com a face exposta ao fogo alinhada com a face interna da alvenaria

FIGURA 8.2. b – Pilares mistos de fachada com o eixo de maior inércia coincidindo com o eixo da alvenaria

FIGURA 8.2.a – Pilar parcialmente revestido por concreto formado com o perfil PS 400x62 submetido a 30 minutos de incêndio

FIGURA 8.2.b – Pilar parcialmente revestido por concreto formado com o perfil PS 400x62 submetido a 60 minutos de incêndio

FIGURA 8.2.c – Pilar parcialmente revestido por concreto formado com o perfil PS 400x62 submetido a 90 minutos de incêndio

FIGURA 8.2.d – Pilar parcialmente revestido por concreto formado com o perfil PS 400x62 submetido a 120 minutos de incêndio

LISTA DE TABELAS

TABELA 2.1 – Relação entre parâmetros do modelo matemático do diagrama $\sigma \times \varepsilon$

TABELA 2.2 – Valores dos coeficientes de redução dos principais parâmetros do diagrama tensão-deformação para os aços laminados

TABELA 2.3 – Valores para os 2 principais parâmetros do diagrama tensão-deformação para o concreto submetido a alta temperatura

TABELA 2.4 – Valores dos coeficientes de redução dos principais parâmetros do diagrama tensão-deformação para os aços treilados

TABELA 3.1 – Valores de α para as curvas de flambagem

TABELA 4.1 – Valores mínimos para as dimensões da seção transversal, distância do eixo das barras da armadura e razões entre as espessuras da alma e das mesas dos pilares mistos parcialmente revestidos por concreto

TABELA 4.2 – Valores mínimos para as dimensões da seção transversal, distância do eixo das barras da armadura e porcentagem de armadura dos pilares mistos preenchidos por concreto

TABELA 4.3 – Temperatura inicial e coeficiente empírico para a determinação da temperatura média nas mesas do perfil

TABELA 4.4 – Coeficiente para a determinação de $h_{w,fi}$

TABELA 4.5 – Espessura $b_{e,fi}$ da camada externa do concreto desprezada no cálculo

TABELA 4.6 – Temperatura média no concreto $\theta_{c,t}$

TABELA 4.7 – Fator de redução $k_{ys,\theta}$ para o limite de escoamento da armadura

TABELA 4.8 – Fator de redução $k_{Es,\theta}$ para o módulo de elasticidade da armadura

TABELA 4.9 – Coeficiente de redução $\phi_{i,\theta}$

TABELA 4.10 – Determinação de $f_{sy,\theta}$ e $E_{s,\theta}$

TABELA 4.11 – Determinação de $f_{c,\theta}$ e $E_{c,\theta}$

TABELA 6.1 – Perfis metálicos utilizados na composição dos pilares mistos

TABELA 6.2-a – Resultados comparativos para o Pilar Parcialmente Revestido formado com o perfil PS 400x62

TABELA 6.2-b – Resultados comparativos para o Pilar Parcialmente Revestido formado com o perfil VE 500x68

TABELA 6.2-c – Resultados comparativos para o Pilar Parcialmente Revestido formado com o perfil CE 250x49

TABELA 6.2-d – Resultados comparativos para o Pilar Parcialmente Revestido formado com o perfil CE 300x76

TABELA 6.2-e – Resultados comparativos para o Pilar Parcialmente Revestido formado com o perfil W 610x174

TABELA 6.2-f – Resultados comparativos para o Pilar Parcialmente Revestido formado com o perfil HP 310x93

TABELA 6.2-g – Resultados comparativos para o Pilar Parcialmente Revestido formado com o perfil HP 360x132

TABELA 6.3-a – Resultados comparativos para o Pilar Parcialmente Revestido formado com o perfil PS 400x62

TABELA 6.3-b – Resultados comparativos para o Pilar Parcialmente Revestido formado com o perfil VE 500x68

TABELA 6.3-c – Resultados comparativos para o Pilar Parcialmente Revestido formado com o perfil CE 250x49

TABELA 6.3-d – Resultados comparativos para o Pilar Parcialmente Revestido formado com o perfil CE 300x76

TABELA 6.3-e – Resultados comparativos para o Pilar Parcialmente Revestido formado com o perfil W 610x174

TABELA 6.3-f – Resultados comparativos para o Pilar Parcialmente Revestido formado com o perfil HP 310x93

TABELA 6.3-g – Resultados comparativos para o Pilar Parcialmente Revestido formado com o perfil HP 360x132

TABELA 6.3-h – Resultados comparativos para o Pilar Preenchido por Concreto formado com o perfil tubular 219,1x12,7

TABELA 6.3-i – Resultados comparativos para o Pilar Preenchido por Concreto formado com o perfil tubular 273x9,3

TABELA 6.3-j – Resultados comparativos para o Pilar Preenchido por Concreto formado com o perfil tubular 355,6x11,1

TABELA 6.4-a – Resistências do pilar misto formado com o perfil PS 400x62 sem proteção e com proteção de argamassa jateada

TABELA 6.4-b – Resistências do pilar misto formado com o perfil VE 500x68 sem proteção e com proteção de argamassa jateada

TABELA 6.4-c – Resistências do pilar misto formado com o perfil HP 360x132 sem proteção e com proteção de argamassa jateada

TABELA 6.4-d – Resistências do pilar misto formado com o perfil tubular 273x9,3 sem proteção e com proteção de argamassa jateada

TABELA 7.1-a – Relação entre as resistências obtidas através dos Métodos Tabular, Simplificado Analítico e Avançado de Cálculo do pilar parcialmente revestido formado com o perfil CE 250x49

TABELA 7.1-b – Relação entre as resistências obtidas através dos Métodos Tabular, Simplificado Analítico e Avançado de Cálculo do pilar parcialmente revestido formado com o perfil PS 400x62

TABELA 7.1-c – Relação entre as resistências obtidas através dos Métodos Tabular, Simplificado Analítico e Avançado de Cálculo do pilar parcialmente revestido formado com o perfil W 610x174

TABELA 7.1-d – Relação entre as resistências obtidas através dos Métodos Tabular, Simplificado Analítico e Avançado de Cálculo do pilar parcialmente revestido formado com o perfil HP 310x93

TABELA 7.1-e – Relação entre as resistências obtidas através dos Métodos Tabular, Simplificado Analítico e Avançado de Cálculo do pilar parcialmente revestido formado com o perfil HP 360x132

TABELA 7.1-f – Relação entre as resistências obtidas através dos Métodos Tabular, Simplificado Analítico e Avançado de Cálculo do pilar parcialmente revestido formado com o perfil CE 300x76

TABELA 7.1-g – Relação entre as resistências obtidas através dos Métodos Tabular, Simplificado Analítico e Avançado de Cálculo do pilar parcialmente revestido formado com o perfil VE 500x68

TABELA 7.1-h – Relação entre as resistências obtidas através dos Métodos Tabular e Avançado de Cálculo do pilar preenchido por concreto formado com o perfil tubular 273x9,3

TABELA 7.1-i – Relação entre as resistências obtidas através dos Métodos Tabular e Avançado de Cálculo do pilar preenchido por concreto formado com o perfil tubular 355,6x11,1

TABELA 7.1-j – Relação entre as resistências obtidas através dos Métodos Tabular e Avançado de Cálculo do pilar preenchido por concreto formado com o perfil tubular 219,1x12,7

TABELA 7.2-a – Relação entre as resistências do pilar parcialmente revestido formado com o perfil PS 400x62 com proteção e sem proteção de argamassa jateada

TABELA 7.2-b – Relação entre as resistências do pilar parcialmente revestido formado com o perfil VE 500x68 com proteção e sem proteção de argamassa jateada

TABELA 7.2-c – Relação entre as resistências do pilar parcialmente revestido formado com o perfil HP 360x132 com proteção e sem proteção de argamassa jateada

TABELA 7.2-d – Relação entre as resistências do pilar preenchido por concreto formado com o perfil tubular 273x9,3 com proteção e sem proteção de argamassa jateada

1

CONSIDERAÇÕES GERAIS SOBRE OS PILARES MISTOS

1.1 Introdução

São denominados pilares mistos os elementos estruturais submetidos a compressão pura, ou compressão e flexão, nos quais um perfil de aço trabalha em conjunto com partes de concreto, armado ou não, praticamente sem escorregamento relativo entre os materiais nas superfícies de contato.

Nos pilares mistos, o perfil de aço e o concreto se complementam, suprimindo as deficiências um do outro e levando a uma solução estrutural interessante tanto do ponto de vista técnico quanto do ponto de vista econômico. O concreto atua com boa resistência à compressão, protege o perfil metálico da corrosão e de impactos, além de melhorar significativamente o comportamento do perfil à ação do fogo e à flambagem local. O perfil metálico por sua vez colabora com sua elevada resistência mecânica, agilidade no processo construtivo e facilidade na execução de ligações e emendas.

Os pilares mistos podem ser constituídos de perfis de aço total ou parcialmente revestidos (FIG.1.1-a e FIG.1.1-b) ou por perfis metálicos tubulares preenchidos por concreto (FIG.1.1-c e FIG.1.1-d), sendo que este concreto pode ser armado ou não.

Nos pilares totalmente revestidos por concreto, o perfil metálico fica completamente imerso neste material, tornando desnecessária a verificação de seus elementos componentes à flambagem local. Para evitar fissuração do concreto e garantir o vínculo necessário entre concreto e o aço, um limitado número de barras longitudinais e estribos é exigido no projeto destes pilares.

Os pilares parcialmente revestidos por concreto, por sua vez, possuem concreto na região entre as mesas e a alma do perfil metálico. Neste caso, é necessário verificar a flambagem local dos elementos expostos do perfil metálico, as mesas, que passam a ter, no entanto, maior resistência a este estado limite que nos perfis de aço isolados. A armadura dos pilares, que deve ser envolvida por estribos, garante a maior parte da rigidez e resistência necessárias durante a exposição ao fogo. O vínculo entre o concreto e o aço é garantido pela soldagem dos estribos na alma do perfil metálico, pela passagem dos estribos através de furos abertos na alma ou por conectores de cisalhamento soldados na alma. Entre outras vantagens, a facilidade de execução do pilar parcialmente revestido por concreto torna-o uma solução interessante do ponto de vista construtivo.

Com relação aos pilares preenchidos por concreto, o simples preenchimento do perfil tubular com o concreto promove um considerável acréscimo em sua resistência ao incêndio. Este tipo de pilar misto trabalha de forma diferente dos pilares totalmente ou parcialmente revestidos por concreto. A temperatura do perfil metálico aumenta mais rapidamente e como o aço perde gradualmente sua resistência e rigidez quando aquecido, a carga é transferida para o núcleo de concreto. O tubo de aço atua como um protetor à radiação, desta forma a temperatura do concreto se eleva mais lentamente. Em várias situações, os pilares mistos tubulares mantêm sua capacidade de carga por um longo período de exposição ao incêndio.

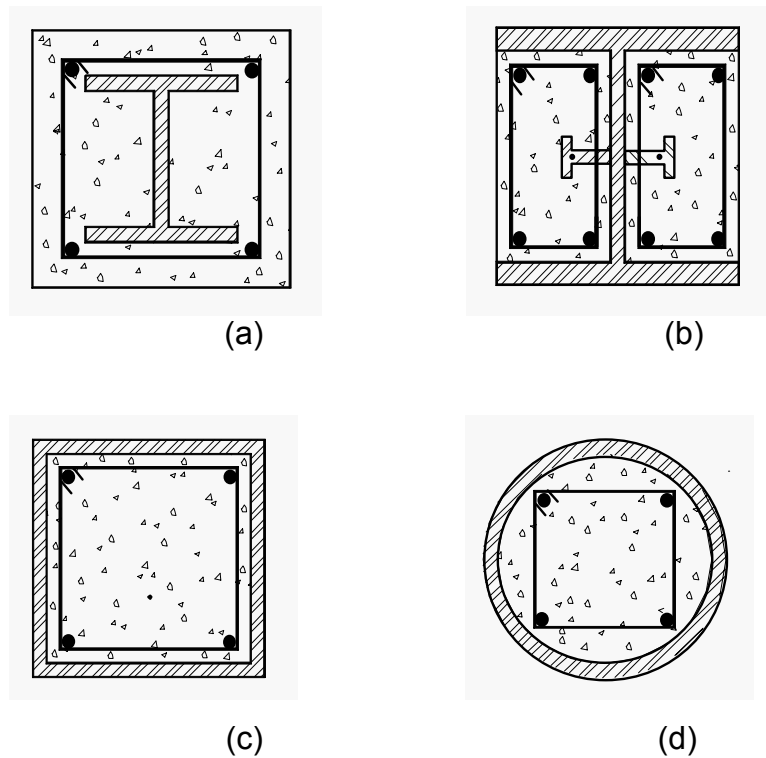


FIGURA 1.1 – Tipos de seções transversais de pilares mistos

As vantagens econômicas, construtivas e estruturais inerentes aos pilares mistos, como a redução das dimensões dos elementos estruturais, menor mão-de-obra e maior área livre por pavimento, promoveram um crescimento significativo na sua utilização, principalmente nas duas últimas décadas.

Tendo em vista as vantagens do uso de pilares mistos nas edificações, têm surgido cada vez mais pesquisas relacionadas ao assunto. Atualmente, essas pesquisas têm colaborado para o desenvolvimento de métodos de dimensionamento, que têm sido incorporados pelos novos códigos de projeto de estruturas em temperatura ambiente ou em situação de incêndio em vários países.

Este trabalho tem como enfoque principal o comportamento dos pilares mistos em situação de incêndio. Por isso, o sub-item seguinte apresenta um histórico dos principais trabalhos publicados sobre esse tema.

1.2 Histórico

1.2.1 Generalidades

Vários estudos com relação às estruturas de aço e mista em situação de incêndio têm sido realizados visando quantificar seu desempenho quando submetida a temperaturas elevadas, para refletir adequadamente os interesses de segurança e economia.

Pesquisas recentes têm mostrado que o uso de estruturas metálicas nas construções está diretamente relacionado com o custo da proteção contra incêndio. Segundo ROBINSON (2001), no Reino Unido, o custo da proteção contra incêndio reduziu-se à metade nos últimos 20 anos e o uso de estruturas metálicas em edifícios de andares múltiplos aumentou de 30% para 70%.

Segundo LAWSON (2001), no Reino Unido, a proteção convencional ao incêndio pode superar 30% do custo da estrutura. Em vários tipos de estrutura onde essa proteção pode ser evitada, a economia é considerável, podendo até evitar a inviabilização de um projeto.

Por isso, os estudos realizados atualmente estão mais direcionados para o melhor aproveitamento da resistência dos elementos estruturais em temperatura elevada. Assim, ao invés de buscar uma proteção passiva de menor preço, procura-se obter a resistência dos elementos estruturais de forma mais realística, com procedimentos mais atualizados, o que tem permitido eliminar ou reduzir consideravelmente a proteção passiva.

A norma mais conceituada internacionalmente para projetos de estruturas mistas em altas temperaturas, o Eurocode 4 – Part 1.2 (1994), foi desenvolvida a partir de resultados de vários estudos analíticos e experimentais, seguindo uma linha coerente ao projeto em temperatura ambiente do Eurocode 4 – Part 1.1 (1992). Esta norma apresenta dois métodos simplificados para o dimensionamento de pilares mistos, que serão denominados aqui Método Tabular e Método Simplificado Analítico de Cálculo. Permite ainda o uso de métodos avançados de cálculo.

O Método Tabular é baseado em resultados de testes e apresenta diretamente a resistência do pilar em situação de incêndio em função da carga aplicada e das dimensões da seção transversal. Este método é, naturalmente, de fácil aplicação; contudo, é limitado ao uso de casos definidos de carga e de dimensões de seção transversal.

O Método Simplificado Analítico é mais abrangente que o Método Tabular. Mas, para ser usado, é necessário conhecer a distribuição não-uniforme de temperatura na seção transversal do pilar misto. No caso dos pilares parcialmente revestidos por concreto, este método apresenta tabelas com a temperatura ou outros parâmetros que permitem a determinação da resistência e da rigidez de cada parte componente da seção transversal (mesas e alma do perfil metálico, concreto e armadura) em função do tempo de exposição ao incêndio. Já no caso de pilares mistos preenchidos por concreto e pilares totalmente revestidos por concreto, devem ser primeiramente implementados procedimentos numéricos para a obtenção da distribuição não-uniforme da temperatura na seção do pilar, que é complicado e pouco prático, e então avaliada a capacidade de carga baseada na distribuição não uniforme de resistência e rigidez do material.

Os métodos avançados são aqueles que proporcionam uma análise realística da estrutura e do cenário do incêndio e podem ser usados para elementos estruturais individuais com qualquer tipo de seção transversal, para subconjuntos ou para estruturas completas, internas ou externas ou pertencentes à vedação. Eles devem ser baseados no comportamento físico fundamental de modo a levar a uma aproximação confiável do comportamento esperado dos componentes da estrutura em situação de incêndio.

Nos sub-itens 1.2.2, 1.2.3 e 1.2.4 são citados alguns estudos relevantes relacionados ao comportamento dos pilares mistos em situação de incêndio, realizados nos países mais adiantados nesse assunto e no Brasil. Nota-se que o número de pesquisas realizadas sobre os pilares preenchidos por concreto é muito maior do que o número de pesquisas com relação aos demais pilares mistos.

1.2.2 Pilares com Seção I

Por volta dos anos 80, um grande número de testes de incêndio padrão foi realizado para a preparação do Eurocode 3 – Part 1.2 (1995) e do Eurocode 4 – Part 1.2 (1994), marcando o início do desenvolvimento dos modernos procedimentos de dimensionamento das estruturas de aço e mistas em situação de incêndio.

Alguns testes foram realizados com seções parcialmente revestidas, como pilares com blocos de concreto furados entre as mesas do perfil metálico e parcialmente revestidos por concreto, ROBINSON (2001). Nesses pilares, as mesas desprotegidas escoaram plasticamente quando alcançaram seu limite de temperatura e a carga foi transferida para a parte mais fria do perfil, a alma, que ainda trabalhava elasticamente.

Os testes realizados em pilares com blocos entre as mesas mostraram que estes pilares resistem, no mínimo, até suas mesas alcançarem 600°C, considerando toda a carga de projeto atuando na estrutura. Isto significa que 30 minutos de resistência ao incêndio seriam obtidos com baixo custo sem qualquer proteção das mesas.

Os parcialmente revestidos por concreto apresentaram aumento de resistência ainda maior do que os pilares com blocos entre as mesas. Conectores de cisalhamento foram fixados na alma do pilar em intervalos de 500 mm, evitando a fissuração do concreto. Os pilares parcialmente revestidos sem armadura resistiram, no mínimo, uma hora sem proteção adicional das mesas, que atingiram mais de 800°C.

Adicionando-se armadura ao concreto, as cargas das mesas aquecidas foram transferidas não apenas para a alma do perfil metálico, mas também para o concreto, fazendo com que a resistência do pilar atingisse 2 horas de incêndio sem proteção térmica adicional.

1.2.3 Pilares Tubulares

Os benefícios do pilar tubular preenchido por concreto, sob o ponto de vista estético e estrutural, têm sido reconhecidos por arquitetos e engenheiros, e entre os quais destacam-se:

- a) eficiência para resistir a cargas de compressão;
- b) aumento significativo da resistência ao momento fletor;
- c) boa resistência ao impacto;
- d) agilidade na construção;
- e) boa resistência em situação de incêndio sem a necessidade de proteção do perfil metálico, o que garante melhor aproveitamento do espaço útil da edificação e redução de custo.

Esses benefícios têm estimulado o uso de pilares mistos preenchidos por concreto e o desenvolvimento de pesquisas sobre o assunto. Nos últimos anos, um número maior de pesquisas com relação a esses perfis tem sido realizado na Europa e no Canadá.

O Conselho Nacional de Pesquisa do Canadá tem conduzido estudos para o desenvolvimento de métodos de dimensionamento para esses pilares. Tanto estudos numéricos quanto experimentais para determinação de resistência de pilares tubulares preenchidos com diferentes tipos de concreto foram realizados visando métodos mais simples e de fácil e abrangente aplicação prática.

Em uma primeira fase, foram estudadas as seções tubulares preenchidas por concreto sem a utilização de armadura. LIE & STRINGER* apud LIE & KODUR (1996) concluíram um estudo sobre esses perfis e as expressões para determinação da resistência dos pilares foram estabelecidas e incorporadas no Código Nacional de Construção do Canadá.

No entanto, percebeu-se que, devido à falta de armadura, a resistência desses pilares sofria brusca redução em temperaturas elevadas. Mas, como mostraram os estudos sobre

* Lie, T. T.; Stringer, D. C. *Calculation of Fire Resistance of Steel Hollow Structural Steel Columns Filled with Plain Concrete*. Can. J. Civ. Engrg., 1994.

pilares mistos preenchidos por concreto armado realizados por CHABOT & LIE* apud LIE & IRWIN (1995), a utilização de armadura nestes pilares garante a resistência a cargas maiores mesmo em situação de incêndio.

Com o intuito de facilitar a utilização dos pilares mistos preenchidos por concreto, foi desenvolvido um modelo matemático com o qual a resistência dos pilares mistos preenchidos por concreto com seção transversal retangular era determinada a partir de alguns parâmetros como a carga aplicada, as dimensões da seção transversal, o comprimento do pilar e a porcentagem de armadura, com uma aproximação aceitável para as aplicações práticas, sem a necessidade de realização de testes, LIE & IRWIN (1995). Os resultados do modelo foram comparados a valores experimentais que permitiram sua validação.

As temperaturas na superfície do perfil metálico e em várias profundidades no interior do concreto foram obtidas a partir do modelo e comparadas aos valores medidos em ensaios. As temperaturas dentro da seção transversal inicialmente apresentaram um aumento brusco, seguido de um período em que sua elevação ocorria de maneira relativamente suave. Isto se deu devido à migração da água do concreto em direção ao centro da seção transversal com a elevação da temperatura. As temperaturas calculadas pelo modelo se aproximaram bem das obtidas em ensaios, com exceção do estágio inicial, onde a influência da migração da água do concreto em direção ao centro do pilar é mais pronunciada, como mostrado em testes realizados por CHABOT & LIE* apud LIE & IRWIN (1995). Apesar do modelo levar em conta a evaporação da água, o fenômeno da migração não foi considerado, o que causou as diferenças dos resultados nos estágios iniciais do incêndio.

As deformações dos pilares obtidas pelo modelo apresentaram razoável aproximação aos resultados dos testes. As diferenças entre esses valores se deram devido a vários fatores que não podem ser totalmente considerados no modelo, como: a carga aplicada, a expansão térmica e a deformação lenta.

***Chabot, M.; Lie, T. T.** *Experimental Studies on the Fire Resistance of Hollow Steel Columns Filled with Bar-reinforced Concrete*. IRC Internal Rep. No. 628, National Research Council of Canada, Institute for Research in Construction, Ottawa, Ontario, 1992.

LIE & IRWIN (1995) publicaram as equações para o cálculo das temperaturas, deformações e resistências de pilares mistos com seção retangular preenchidos por concreto submetidos ao incêndio.

Posteriormente, foram publicadas expressões para o cálculo da resistência em situação de incêndio de pilares tubulares de seção circular e quadrada preenchidos por concreto, LIE & KODUR (1996). Essas expressões foram desenvolvidas com base em estudos paramétricos realizados anteriormente por LIE & DENHAM* apud LIE & KODUR (1996). O procedimento numérico, contido no modelo matemático, foi programado em computador e os programas testados através da comparação com resultados de ensaios. Usando esses programas, tornou-se possível avaliar a influência de vários fatores na resistência dos pilares em situação de incêndio, como as dimensões da seção transversal, o comprimento efetivo do pilar, a porcentagem de armadura, a resistência do concreto, o cobrimento de concreto para armadura, e o tipo de agregado utilizado.

Em resumo, os resultados dos estudos indicaram que as dimensões da seção transversal, o comprimento efetivo do pilar e a carga aplicada têm grande influência na resistência ao incêndio do pilar preenchido por concreto. A resistência do concreto e o tipo de agregado têm influência moderada, enquanto o cobrimento e a porcentagem de armadura exercem pequena influência. Nesses estudos, concluiu-se também que a espessura da parede do tubo não tem influência significativa na resistência do pilar.

Devido ao uso de algumas aproximações, as equações desenvolvidas para determinação da resistência dos pilares mistos preenchidos por concreto com seção circular e quadrada conduziram a resultados um pouco conservadores, mas aceitáveis para os propósitos práticos.

Com relação às considerações do Eurocode 4 - Part 1.2 (1994) para pilares preenchidos por concreto, um interessante trabalho foi publicado por WANG (1997), no qual foram avaliados:

***Lie, T. T.; Denham, E. M. A.** *Factors affecting the Fire Resistance of Hollow Steel Columns Filled with Bar-reinforced Concrete*. IRC Internal Rep. No. 650 and No. 651, National Research Council of Canada, Institute for Research in Construction, Ottawa, Ontario, 1993.

- a) a curva de flambagem utilizada no dimensionamento do pilar em situação de incêndio;
- b) a possibilidade de implementação do método simplificado analítico de cálculo, com a finalidade de facilitar a aplicação deste método;
- c) a possibilidade da utilização do conceito de tempo equivalente em situação de incêndio.

O Eurocode 4 – Part 1.2 (1994) recomenda a curva *c* de flambagem para o dimensionamento dos pilares em situação de incêndio, enquanto Eurocode 4 – Part 1.1 (1992) utiliza a curva *a* para os pilares preenchidos por concreto em temperatura ambiente. A utilização da curva *c*, ao invés da curva *a*, conduz a resultados a favor da segurança, o que pode elevar desnecessariamente o custo dos pilares preenchidos por concreto.

Em temperaturas elevadas a resistência e a rigidez do aço e do concreto sofrem reduções. A precisão do método de dimensionamento depende dos modelos adotados para descrever as relações entre a resistência /rigidez e a temperatura desses materiais. WANG (1997) utilizou as recomendações do Eurocode 4 – Part 1.2 (1994) para o perfil metálico, já que para o aço existe uma boa concordância entre diferentes modelos. Mas, para o concreto, existe uma grande discrepância entre diferentes modelos. Por isso, para avaliar a influência do modelo utilizado para o concreto na precisão do método de dimensionamento do Eurocode 4 – Part 1.2 (1994), WANG (1997) aplicou o modelo desenvolvido por LIE e outros pesquisadores e o modelo de comportamento do concreto apresentado por essa norma. Foram usados também os resultados experimentais de LIE & CHABOT (1992), citados por WANG (1997), que consistem de 36 testes em pilares tubulares com seção circular e 7 testes em pilares tubulares com seção quadrada, realizados no Laboratório Nacional de Incêndio do Canadá.

A comparação entre os cálculos realizados e os 43 resultados de testes de incêndio canadenses indica que, usando o modelo de comportamento do concreto do Eurocode 4 Parte 1.2 (1994), a curva *a* de flambagem leva a resultados mais precisos do que a curva *c* adotada atualmente pela norma européia.

Como o Método Simplificado Analítico de Cálculo do Eurocode 4 Parte 1.2 (1994) para o dimensionamento de pilares preenchidos por concreto apresenta somente os princípios fundamentais da transferência de calor e análise estrutural, para a utilização deste método, é necessário que o engenheiro resolva as equações fundamentais da transferência de calor para obter a distribuição de temperatura na seção mista. E, devido à distribuição não uniforme de temperatura, é necessário dividir a seção transversal em várias camadas para obter uma resistência mais precisa para o pilar. Embora tal problema possa ser resolvido com o apoio de ferramentas numéricas, os engenheiros não familiarizados a essas soluções podem ter dificuldades na utilização do método.

Na tentativa de promover o uso do Método Simplificado Analítico de cálculo do Eurocode 4 Parte 1.2 (1994), WANG (1997) sugeriu que, para pilares mistos preenchidos por concreto submetidos ao incêndio padrão, fosse tomado o método aproximado de distribuição de temperatura desenvolvido por LAWSON & NEWMAN (1996) e uma tabela auxiliar para a obtenção da resistência e rigidez do pilar.

Os resultados do método proposto por WANG (1997) foram comparados aos resultados obtidos usando um programa de computador, baseado no método das diferenças finitas, para obtenção da temperatura não uniforme e a divisão da seção transversal em várias fatias para a determinação da resistência. O método proposto levou a resultados aceitáveis para a utilização prática, com diferenças de no máximo 10% para resistência e rigidez na maioria dos casos. Resultados mais grosseiros, com diferenças superiores a 20%, somente ocorreram em situações combinadas de pilares de pequenas dimensões, temperaturas do aço muito elevadas (cerca 800°C) e resistência do pilar em situação de incêndio muito baixa (menor do que 30% da resistência em temperatura ambiente). Os resultados pouco precisos não invalidaram o método proposto, já que as situações que levam a estes resultados não são muito comuns na prática.

O conceito de tempo equivalente tem sido muito utilizado como uma maneira de medir a severidade de um incêndio real com relação ao incêndio padrão. Uma característica comum dos incêndios é que o pico de temperatura é alcançado em um tempo

relativamente pequeno, frequentemente nos primeiros 30 minutos, e então a temperatura decresce rapidamente. Isto significa que perfis relativamente “robustos” ou protegidos contra incêndio podem nunca experimentar uma temperatura suficientemente elevada para causar seu colapso.

A equivalência dos efeitos devidos à exposição a um incêndio real aos efeitos devidos à exposição ao incêndio padrão tem sido estabelecida com base na temperatura crítica de um elemento estrutural. Isto é, o tempo equivalente de um incêndio real é o tempo em que um elemento estrutural submetido ao incêndio padrão teria, como temperatura crítica, a temperatura máxima que o elemento estrutural alcança quando exposto ao incêndio real.

Em seu trabalho, WANG (1997) examinou o conceito de tempo equivalente, adotado pelo Eurocode 1 – Part 2.2 (1991), e avaliou sua aplicabilidade para os perfis preenchidos por concreto. Devido à distribuição não-uniforme de temperatura na seção mista, não é possível identificar a temperatura crítica para calcular o tempo equivalente. Por isso, no trabalho de WANG (1997), o tempo equivalente foi definido como o tempo de exposição ao incêndio padrão que dá a resistência de um pilar igual à resistência mínima do pilar submetido a um incêndio real.

Quando um pilar misto interage com outros elementos estruturais em situação de incêndio, tanto suas condições de contorno quanto seus carregamentos são alterados. Por isso, para a determinação da resistência de um pilar em temperatura elevada, é necessário que estes valores sejam avaliados corretamente.

Para um pilar metálico, assume-se que a distribuição de temperatura na seção transversal é uniforme. Então, quando um pilar contínuo, submetido a incêndio em um pavimento, está próximo ao colapso, sua rigidez fica bastante reduzida com relação aos trechos dos pavimentos superior e inferior, o que torna válida a hipótese de pilar contínuo com rotação impedida em ambas as extremidades. Para pilares preenchidos por concreto, devido ao núcleo de concreto estar um pouco mais frio e manter ainda alguma

resistência no estado limite de incêndio, torna-se importante verificar a validade dessa condição de dimensionamento recomendada pelo Eurocode 4 – Part 1.2 (1994).

Em situação de incêndio considera-se que os valores característicos das cargas axiais e momentos fletores são constantes e iguais aos valores em temperatura ambiente, já que a norma européia não oferece um guia específico para a determinação dessas cargas em um pilar misto como parte de uma estrutura. Contudo, segundo WANG (1998), estudos realizados anteriormente no Japão mostraram que os momentos fletores tornam-se pequenos para o estado limite de incêndio, e os pilares podem ser considerados como apenas axialmente carregados. Isto ocorre porque a rigidez reduzida do pilar faz com que sejam absorvidos momentos fletores muito reduzidos.

WANG (1998) publicou um estudo sobre os efeitos da continuidade estrutural na resistência de pilares com seção transversal circular e quadrada preenchidos por concreto. Este trabalho utilizou análise por elementos finitos para a avaliação da distribuição não uniforme de temperatura na seção transversal mista e para avaliação da interação estrutural entre o pilar misto e os outros elementos da estrutura em temperatura elevada, e teve como principais objetivos:

- a) avaliar os comprimentos de flambagem dos pilares mistos em situação de incêndio para validar ou não as hipóteses adotadas pelo Eurocode 4 – Part 1.2 (1994);
- b) estudar as variações da carga axial e momentos fletores, principalmente para verificar a hipótese de que os pilares mistos devem ser considerados sob carga axial pura para o estado limite de incêndio.

No trabalho de WANG (1998) foram analisados pilares mistos com e sem armadura, sujeitos a carga axial e a momentos fletores. Para pilares sem armadura sujeitos a carga axial pura, dimensões diferentes de seção transversal, alturas variadas de perfis e diferentes razões entre carga em situação de incêndio e em temperatura ambiente foram analisadas. Para a atuação combinada de carga axial e momento fletor e para pilares com armadura, elementos mais esbeltos foram examinados, onde a resistência ao

incêndio é mais influenciada pelas variações dos momentos fletores e taxas de armadura.

As recomendações do Eurocode 4 – Part 1.2 (1994) para comprimentos de flambagem dos pilares mistos em situação de incêndio foram validadas. Especialmente para os pilares sem armadura, adotar para a razão do comprimento efetivo de pilares contínuos nas duas extremidades o valor de 0,5 e, para pilares contínuos em apenas uma extremidade o valor de 0,7, conduz a resultados com boa precisão. Já para os pilares com armadura, as recomendações do Eurocode 4 – Part 1.2 (1994) conduzem a valores um pouco superestimados, mas as diferenças para os valores considerados reais são pequenas.

Com relação aos momentos fletores, observou-se que os momentos fletores primários nas barras contínuas diminuíram com a elevação da temperatura. Para pilares mais robustos, momentos secundários devidos a grandes deformações do pilar também são pequenos, então esses pilares podem ser considerados de fato submetidos apenas a cargas axiais para o estado limite de incêndio. Para pilares mais esbeltos, a influência dos momentos fletores secundários torna-se maior. Contudo, estes momentos secundários conduzem a curvaturas reversas complicadas, e os tempos de resistência a incêndio dos pilares não são reduzidos por estas curvaturas. Então, pilares mais esbeltos também podem ser considerados submetidos apenas a cargas axiais para o estado limite de incêndio.

Nos estudos de WANG (1998), observou-se também que devido à restrição de sua expansão térmica, algumas cargas axiais adicionais foram geradas no pilar. Contudo, com a elevação da temperatura, essas cargas axiais adicionais decrescem e a carga axial total do pilar volta ao seu valor inicial em temperatura ambiente.

1.2.4 Situação Brasileira

No Brasil, apenas recentemente tem sido dedicada uma atenção maior ao dimensionamento das estruturas em situação de incêndio por parte dos órgãos públicos responsáveis e de pesquisadores. No caso das estruturas de aço e mistas aço-concreto, em 1995, algumas universidades, como a UFMG, a USP e a UFOP, começaram a desenvolver estudos e pesquisas sobre o assunto, a partir dos quais tornou-se possível a edição da norma brasileira que trata da questão no que concerne aos edifícios residenciais, comerciais e públicos, a NBR 14323 (1999).

De acordo com Fakury (2001), na elaboração da NBR 14323 (1999), para assegurar a consistência e a uniformidade das prescrições, foram adotadas, como normas estrangeiras referenciais, o Eurocode 3 – Part 1.2 (1995), e o Eurocode 4 – Part 1.2 (1994), considerando-se que:

- a) tratavam-se das especificações mais recentes sobre o tema;
- b) foram elaboradas pelo CEN (*European Committee for Standardization*), que congrega 18 países da Europa, recebendo, portanto, apoio maciço neste continente;
- c) seus métodos foram aprovados e recomendados por grandes pesquisadores europeus e baseiam-se em pesquisas teóricas e experimentais cujos resultados têm sido devidamente comprovados nos últimos 30 anos;
- d) atendem aos critérios de racionalidade exigidos por todas as normas atuais;
- e) a bibliografia técnica e científica abordando suas bases e fundamentação teórica é suficientemente farta.

Assim, pode-se afirmar que a NBR 14323 (1999) apresenta forma de abordagem e níveis de segurança compatíveis com as exigências internacionais atuais.

A NBR 14323 (1999) trata dos elementos estruturais de aço e dos elementos estruturais mistos (vigas mistas, pilares mistos e lajes com forma de aço incorporada), e permite ao usuário, da mesma forma que o Eurocode 4 – Part 1.2 (1994), optar por usar um Método

Simplificado de Cálculo Tabular ou Analítico, Métodos Avançados de Cálculo, ou por utilizar resultados de ensaios, ou ainda por fazer uma combinação entre um método analítico e resultados de ensaios.

Posteriormente, foi publicada a norma NBR 14432 (2000) intitulada de “Exigências de Resistência ao fogo de Elementos Construtivos de Edificações”. Esta norma estabelece as condições, relativas aos elementos construtivos e estruturais, que devem ser atendidas pelas edificações para que, na ocorrência de incêndio, seja evitado o colapso da estrutura. Os critérios estabelecidos nesta norma baseiam-se na elevação de temperatura dos elementos estruturais considerando as condições de exposição ao incêndio-padrão, que é a elevação padronizada de temperatura em função do tempo.

A NBR 14432 (2000) define o tempo requerido de resistência ao fogo (TRRF) das construções, que depende de vários fatores, principalmente do tipo de ocupação, da altura e área da edificação e da existência e profundidade de subsolos. O TRRF é erroneamente tratado como o tempo que a estrutura deve suportar em situação de incêndio para possibilitar a fuga das pessoas, as operações de combate ao incêndio e a minimização de danos a edificações adjacentes e a infra-estrutura pública. A rigor, numa avaliação puramente estrutural, o TRRF é uma ação considerada no dimensionamento da estrutura em situação de incêndio. Esta ação se manifesta reduzindo a resistência do elemento estrutural ao invés de aumentar diretamente as solicitações. Quanto maior o TRRF, maior será a temperatura no elemento estrutural exposto ao fogo e maior a redução de resistência do mesmo.

Mas, ainda são poucos os trabalhos publicados por pesquisadores brasileiros relacionados aos pilares mistos em situação de incêndio. Citam-se:

- a) FIGUEIREDO (1998), que apresentou um estudo onde foram determinadas as resistências de alguns pilares mistos revestidos e preenchidos por concreto em situação de incêndio utilizando o Método Tabular de uma versão preliminar da NBR 14323 (1999), e observou a quase inexistência de referências nacionais sobre o tema;

- b) QUEIROZ et al. (2001), que tratou dos procedimentos normalizados da NBR 14323 (1999) e do Eurocode 4 – Part 1.2 (1994), para o dimensionamento de pilares mistos em situação de incêndio;
- c) FIGUEIREDO JÚNIOR (2002), que apresentou um procedimento via Métodos dos Elementos Finitos para distribuição de temperatura em estruturas metálicas e mistas em situação de incêndio, aplicável a pilares mistos.

Os trabalhos de FIGUEIREDO (1998) e FIGUEIREDO JÚNIOR (2002) são dissertações de mestrado e geraram alguns artigos em congressos que não serão mencionados aqui.

1.3 No Presente Estudo

O presente estudo tem como objetivo uma análise crítica do Método Tabular e do Método Simplificado Analítico de Cálculo, previstos pelo Eurocode 4 – Part 1.2 (1994) para o dimensionamento em situação de incêndio de pilares mistos, no que se refere à precisão e à consistência dos resultados obtidos para a resistência de cálculo.

O trabalho se limitará aos pilares parcialmente revestidos por concreto e aos de seção circular preenchidos por concreto, solicitados apenas por força normal de compressão, submetidos à curva de incêndio padrão da ISO 834 (1994) e tempos requeridos de resistência ao fogo (TRRF) de 30, 60, 90 e 120 minutos. Além disso, o concreto terá sempre densidade normal.

A utilização do Eurocode 4 – Part 1.2 (1994) como referencial básico e não da NBR 14323 (1999) se deve aos seguintes fatores:

- a) a NBR 14323 (1999) encontra-se em processo de revisão, findo o qual, passará a utilizar, para a determinação da resistência dos pilares mistos,

praticamente todos os valores das propriedades mecânicas e térmicas dos materiais e todos os procedimentos recomendados pelo Eurocode 4 – Part 1.2 (1994);

- b) a NBR 14323 (1999) utiliza para a determinação da resistência dos pilares mistos axialmente comprimidos em temperatura ambiente, procedimentos iguais aos do Eurocode 4 – Part 1.1 (1992), sendo esta resistência importante para a determinação da resistência dos pilares mistos em situação de incêndio pelo Método Tabular.

Desta forma, acredita-se que usando o Eurocode 4 – Part 1.2 (1994), os resultados obtidos serão válidos para o futuro texto da NBR 14323.

Merece ainda lembrança o fato que, atualmente, também a norma NBR 8800 (1986) encontra-se em fase de revisão e, em breve, o dimensionamento de estruturas mistas em temperatura ambiente será tratado pela mesma, passando a NBR 14323 a abordar apenas as estruturas de aço e mistas em temperatura elevada.

Para se atingir o objetivo proposto, este trabalho foi dividido em 7 capítulos que tratam de todos os aspectos teóricos e práticos e da revisão de conceitos relacionados com o tema em questão. Assim, o Capítulo 2 apresenta as propriedades dos materiais componentes das estruturas mistas aço-concreto expostas ao fogo. Sua importância se justifica pelo fato de que, submetidos a altas temperaturas, os materiais sofrem redução de resistência e rigidez, devido à degeneração de suas características físicas e químicas, influenciando no dimensionamento dos pilares mistos em situação de incêndio.

O capítulo 3 trata do dimensionamento dos pilares mistos parcialmente revestidos por concreto e de seção circular preenchidos por concreto axialmente comprimidos em temperatura ambiente, e o capítulo 4 apresenta os métodos de dimensionamento para tais pilares em situação de incêndio.

O capítulo 5 apresenta os conceitos básicos dos principais mecanismos de transferência de calor: condução, convecção e radiação, além das principais características e

considerações do programa CALTEMI, desenvolvido por FIGUEIREDO JÚNIOR (2002), adotado neste trabalho para a obtenção de uma distribuição mais realística de temperatura em situação de incêndio. Este programa tem como base o Método dos Elementos Finitos e permite obtenção da temperatura em diversos pontos da seção transversal de um elemento estrutural submetido a uma lei qualquer de elevação de temperatura. Os resultados obtidos com o programa CALTEMI tiveram fundamental importância na avaliação dos Métodos Tabular e Simplificado Analítico de Cálculo.

No capítulo 6 são apresentados os procedimentos utilizados para obtenção da temperatura usando o programa CALTEMI ao longo da seção transversal de diversos pilares dos tipos tratados neste trabalho e o procedimento para determinação da força normal resistente de cálculo usando esta temperatura. Este capítulo apresenta também uma comparação dos resultados obtidos utilizando o Método Tabular, o Método Simplificado Analítico e o Método Avançado de Cálculo.

Finalmente, as conclusões do trabalho e recomendações para estudos futuros se encontram no capítulo 7.

2

PROPRIEDADES DOS MATERIAIS EM SITUAÇÃO DE INCÊNDIO

2.1 – Introdução

A exposição dos materiais estruturais, tais como aço e concreto, a altas temperaturas degenera as suas características físicas e químicas, causando redução da resistência e da rigidez, o que deve ser levado em conta no dimensionamento das estruturas em situação de incêndio.

2.2 – Propriedades Mecânicas

2.2.1 – Aços Estruturais

A. Resistência ao Escoamento e Módulo de Elasticidade

As propriedades mecânicas dos aços estruturais submetidos a altas temperaturas podem ser obtidas através das relações apresentadas no diagrama tensão-deformação (FIG.2.1) ou pelas relações dadas pela TAB.2.1.

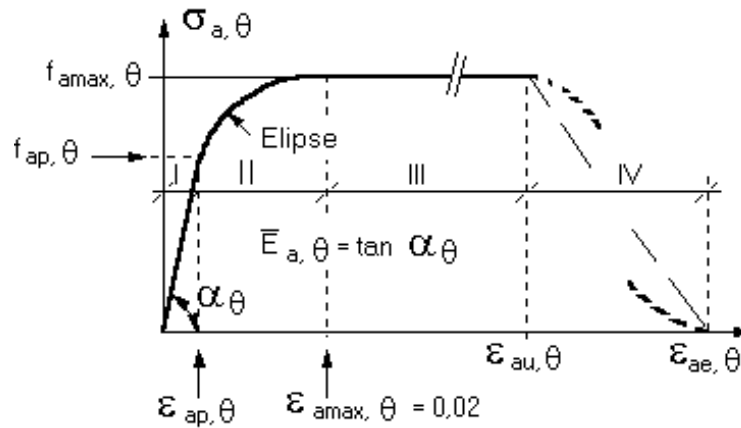


FIGURA 2.1 – Diagrama tensão-deformação do aço

TABELA 2.1 – Relação entre parâmetros do modelo matemático do diagrama $\sigma \times \varepsilon$

Deformação Trecho	Tensão σ	Módulo de elasticidade
I / elástico $\varepsilon \leq \varepsilon_{ap,\theta}$	$\bar{E}_{a,\theta} \varepsilon_{a,\theta}$	$\bar{E}_{a,\theta}$
II / transição elíptica $\varepsilon_{ap,\theta} \leq \varepsilon \leq \varepsilon_{amax,\theta}$	$\frac{b}{a} \sqrt{a^2 - (\varepsilon_{amax,\theta} - \varepsilon_{a,\theta})^2} + f_{ap,\theta} - c$ com $a^2 = (\varepsilon_{amax,\theta} - \varepsilon_{ap,\theta})(\varepsilon_{amax,\theta} - \varepsilon_{ap,\theta} + c / \bar{E}_{a,\theta})$ $b^2 = \bar{E}_{a,\theta} (\varepsilon_{amax,\theta} - \varepsilon_{ap,\theta})c + c^2$ $c = \frac{(f_{amax,\theta} - f_{ap,\theta})^2}{\bar{E}_{a,\theta} (\varepsilon_{amax,\theta} - \varepsilon_{ap,\theta}) - 2(f_{amax,\theta} - f_{ap,\theta})}$	$\frac{b(\varepsilon_{amax,\theta} - \varepsilon_{a,\theta})}{a \sqrt{a^2 - (\varepsilon_{amax,\theta} - \varepsilon_{a,\theta})^2}}$
III / plástico $\varepsilon_{amax,\theta} \leq \varepsilon \leq \varepsilon_{au,\theta}$	$f_{amax,\theta}$	0

Os fatores de redução $k_{y,\theta}$ e $k_{E,\theta}$, relativos aos valores a 20°C, da resistência ao escoamento e do módulo de elasticidade, respectivamente, dos aços estruturais submetidos a altas temperaturas, são mostrados na TAB.2.2.

TABELA 2.2 – Valores dos coeficientes de redução dos principais parâmetros do diagrama tensão-deformação para os aços laminados

Temperatura do aço - θ_a (°C)	Fator de redução para o limite de escoamento $k_{y,\theta}$	Fator de redução para o módulo de elasticidade $k_{E,\theta}$
20	1,000	1,0000
100	1,000	1,0000
200	1,000	0,9000
300	1,000	0,8000
400	1,000	0,7000
500	0,780	0,6000
600	0,470	0,3100
700	0,230	0,1300
800	0,110	0,0900
900	0,060	0,0675
1000	0,040	0,0450
1100	0,020	0,0225
1200	0,000	0,0000

B. Massa Específica

É considerada independente da temperatura e igual a:

$$\rho_a = 7850 \text{ kg/m}^3$$

2.2.2 – Concreto

A. Resistência Característica à Compressão e Módulo de Elasticidade

As propriedades mecânicas do concreto submetido a altas temperaturas podem ser obtidas através das relações indicadas no diagrama tensão-deformação da FIG.2.2.

Os valores do coeficiente de redução $k_{c,\theta}$ aplicado à resistência característica a compressão do concreto $f_{c,20^\circ\text{C}}$ e da deformação correspondente $\varepsilon_{cu,\theta}$ para a temperatura θ_c são fornecidos pela TAB.2.3.

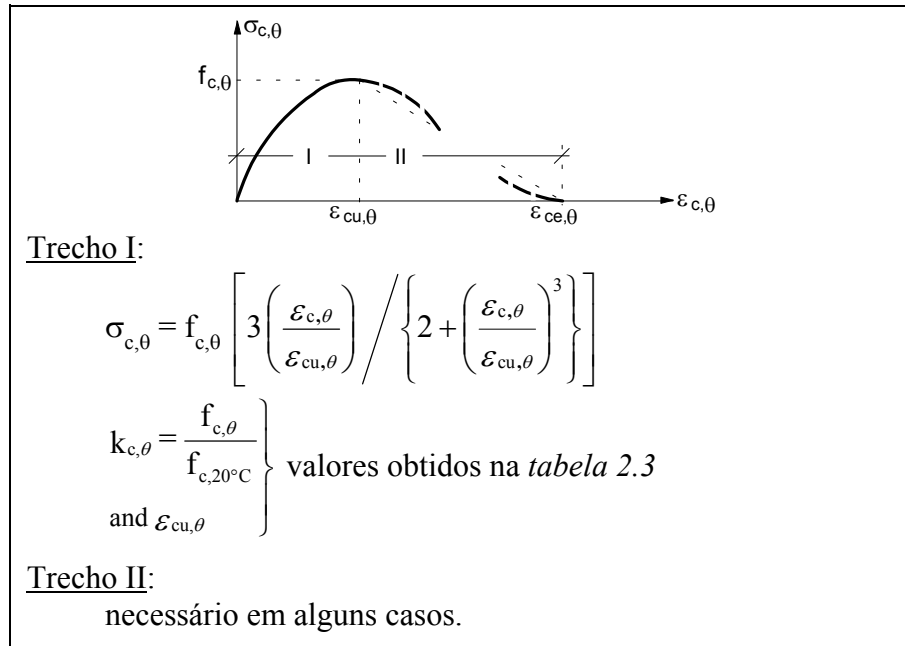


FIGURA 2.2 – Diagrama tensão-deformação do concreto

TABELA 2.3 – Valores para os 2 principais parâmetros do diagrama tensão-deformação para o concreto submetido a alta temperatura

Temperatura do Concreto θ_c [°C]	$k_{c,\theta}$	$\varepsilon_{cu,\theta} \times 10^3$
20	1,00	2,5
100	0,95	3,5
200	0,90	4,5
300	0,85	6,0
400	0,75	7,5
500	0,60	9,5
600	0,45	12,5
700	0,30	14,0
800	0,15	14,5
900	0,08	15,0
1000	0,04	15,0
1100	0,01	15,0
1200	0,00	15,0

A favor da segurança, a resistência a tração do concreto é desprezada. Se for levada em conta, não pode superar 10% da resistência a compressão correspondente.

Quando a resistência a tração do concreto é considerada, o diagrama tensão-deformação deve apresentar o trecho II.

Na utilização da Tabela 2.3, para valores intermediários de temperatura, pode ser feita interpolação linear.

B. Massa Específica

A massa específica do concreto é considerada independente da temperatura e igual a:

$$\rho_c = 2300 \text{ kg/m}^3.$$

2.2.3 – Armadura

A. Resistência ao Escoamento e Módulo de Elasticidade

Os fatores de redução do módulo de elasticidade e do limite de escoamento das barras da armadura de aço laminado a quente são os mesmos adotados para os aços estruturais. Já para os aços trefilados, usam-se os coeficientes fornecidos pela TAB.2.4.

TABELA 2.4 – Valores dos coeficientes de redução dos principais parâmetros do diagrama tensão-deformação para os aços trefilados

Temperatura do aço - θ_s (°C)	Fator de redução para o módulo de elasticidade $k_{E,\theta}$	Fator de redução para o limite de escoamento $k_{y,\theta}$
20	1,00	1,00
100	1,00	1,00
200	0,87	1,00
300	0,72	1,00
400	0,56	0,94
500	0,40	0,67
600	0,24	0,40
700	0,08	0,12
800	0,06	0,11
900	0,05	0,08
1000	0,03	0,05
1100	0,02	0,03
1200	0,00	0,00

B. Massa Específica

O valor da massa específica do aço da armadura é o mesmo adotado para os aços estruturais.

2.3 – PROPRIEDADES TÉRMICAS

2.3.1 – Aços Estruturais e Armadura

A. Alongamento

O alongamento unitário do aço Δl é determinado em função da temperatura FIG.2.3 através das expressões a seguir:

$$\Delta/l = -2,416 \times 10^{-4} + 1,2 \times 10^{-5} \theta_a + 0,4 \times 10^{-8} \theta_a^2 \quad \text{se } 20^\circ\text{C} \leq \theta_a \leq 750^\circ\text{C} \quad (2.1)$$

$$\Delta/l = 11 \times 10^{-3} \quad \text{se } 750^\circ\text{C} < \theta_a \leq 860^\circ\text{C} \quad (2.2)$$

$$\Delta/l = -6,2 \times 10^{-3} + 2 \times 10^{-5} \theta_a \quad \text{se } 860^\circ\text{C} < \theta_a \leq 1200^\circ\text{C} \quad (2.3)$$

onde:

l é o comprimento da barra a 20°C ;

Δl é o alongamento da barra de aço devido a elevação da temperatura;

θ_a é a temperatura do aço, em grau Celsius.

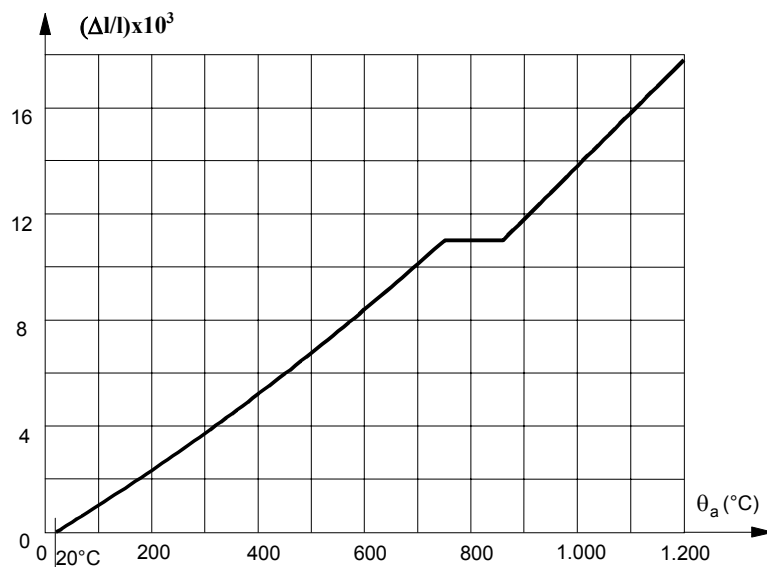


FIGURA 2.3 – Alongamento do aço em função da temperatura

Em *modelos de cálculo simplificados*, a relação entre o alongamento unitário e a temperatura do aço pode ser considerada linear conforme a expressão:

$$\Delta/l = 14 \times 10^{-6} (\theta_a - 20) \quad (2.4)$$

B. Calor específico

Deve ser determinado como segue:

$$c_a = 425 + 7,73 \times 10^{-1} \theta_a - 1,69 \times 10^{-3} \theta_a^2 + 2,22 \times 10^{-6} \theta_a^3 \quad \text{se } 20 \leq \theta_a \leq 600^\circ\text{C} \quad (2.5)$$

$$c_a = 666 - \left(\frac{13222}{\theta_a - 740,7} \right) \quad \text{se } 600 < \theta_a \leq 735^\circ\text{C} \quad (2.6)$$

$$c_a = 545 + \left(\frac{18099}{\theta_a - 727,6} \right) \quad \text{se } 735 < \theta_a \leq 900^\circ\text{C} \quad (2.7)$$

$$c_a = 650 \quad \text{se } 900 < \theta_a \leq 1200^\circ\text{C} \quad (2.8)$$

onde:

θ_a é a temperatura do aço;

c_a está expresso em J/kg°C.

A FIG.2.4 ilustra a variação do calor específico em função da temperatura do aço θ_a .

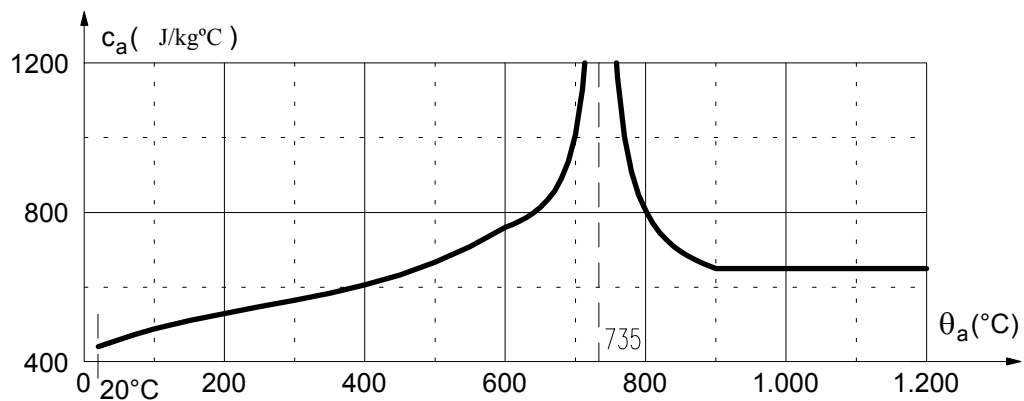


FIGURA 2.4 – Calor específico do aço em função da temperatura

Em modelos de cálculo simplificados o calor específico pode ser considerado independente da temperatura. Neste caso, adota-se o valor:

$$c_a = 600 \text{ J/kg}^\circ\text{C}$$

C. Condutividade térmica

É determinada em como segue (FIG.2.5):

$$\lambda_a = 54 - 3,33 \times 10^{-2} \theta_a \text{ W/m}^\circ\text{C} \quad \text{se } 20^\circ\text{C} \leq \theta_a \leq 800^\circ\text{C} \quad (2.9)$$

$$\lambda_a = 27,3 \text{ W/m}^\circ\text{C} \quad \text{se } 800^\circ\text{C} < \theta_a \leq 1200^\circ\text{C} \quad (2.10)$$

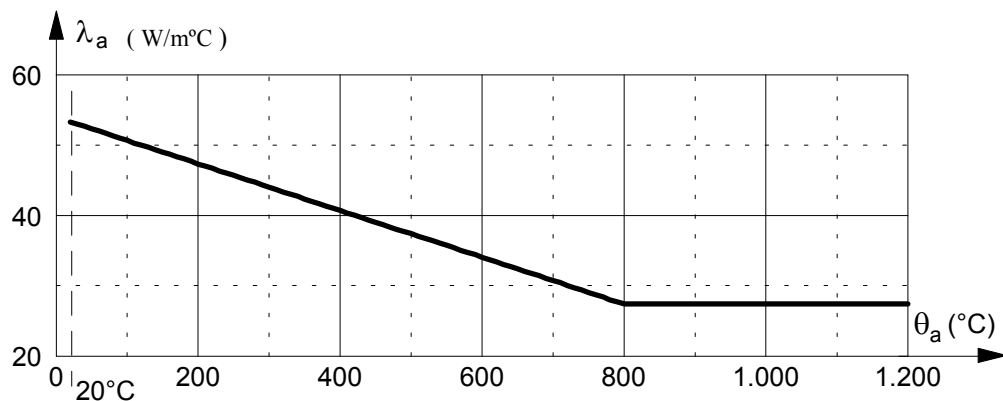


FIGURA 2.5 – Condutividade térmica do aço em função da temperatura

Em *modelos de cálculo simplificados* o valor da condutividade térmica pode ser considerado independente da temperatura. Neste caso, adota-se:

$$\lambda_a = 45 \text{ W/m}^\circ\text{C}$$

2.3.2 – Concreto

A. Alongamento

O alongamento unitário do concreto Δl é determinado como segue (FIG.2.6):

$$\Delta l/l = -1,8 \times 10^{-4} + 9 \times 10^{-6} \theta_c + 2,3 \times 10^{-11} \theta_c^3 \quad \text{se } 20^\circ\text{C} \leq \theta_c \leq 700^\circ\text{C} \quad (2.11)$$

$$\Delta l/l = 14 \times 10^{-3} \quad \text{se } 700^\circ\text{C} < \theta_c \leq 1200^\circ\text{C} \quad (2.12)$$

onde:

l é o comprimento da barra a 20°C;

Δl é o alongamento da barra devido a elevação da temperatura;

θ_c é a temperatura do concreto.

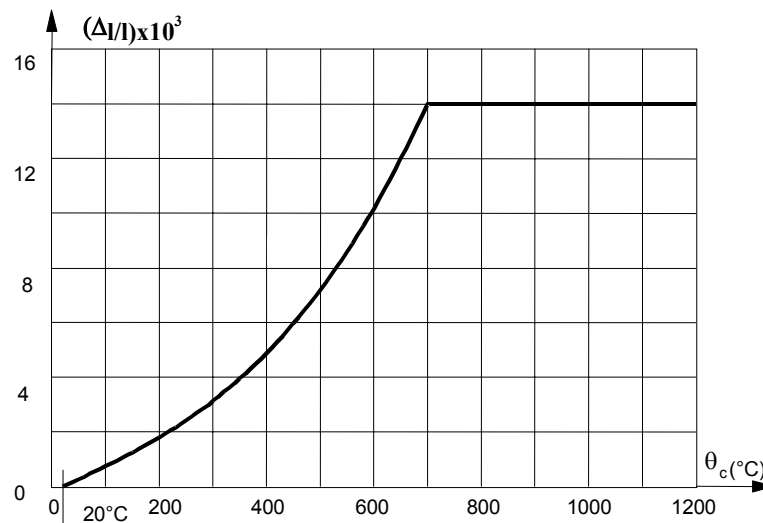


FIGURA 2.6 – Alongamento do concreto em função da temperatura

Em *modelos de cálculo simplificados*, a relação entre o alongamento unitário e a temperatura do concreto pode ser considerada linear conforme a expressão:

$$\Delta l/l = 18 \times 10^{-6} (\theta_c - 20) \quad (2.13)$$

B. Calor específico

Deve ser determinado como segue (FIG.2.7):

$$c_c = 900 + 80 (\theta_c / 120) - 4(\theta_c / 120)^2 \text{ J/kg}^\circ\text{C} \quad \text{se } 20^\circ\text{C} \leq \theta_c \leq 1200^\circ\text{C} \quad (2.14)$$

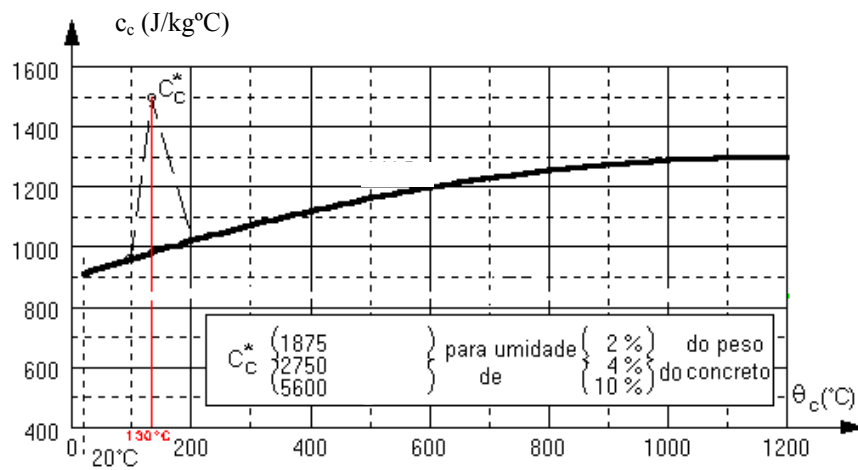


FIGURA 2.7 – Calor específico do concreto em função da temperatura

Em *modelos de cálculo simplificados* o calor específico pode ser considerado independente da temperatura. Neste caso, recomenda-se o valor:

$$c_c = 1000 \text{ J/kg}^\circ\text{C}$$

C. Condutividade térmica

É determinada como segue (FIG.2.8):

$$\lambda_c = 2 - 0,24(\theta_c / 120) + 0,012(\theta_c / 120)^2 \text{ W/m}^\circ\text{C} \quad \text{se } 20^\circ\text{C} \leq \theta_c \leq 1200^\circ\text{C} \quad (2.15)$$

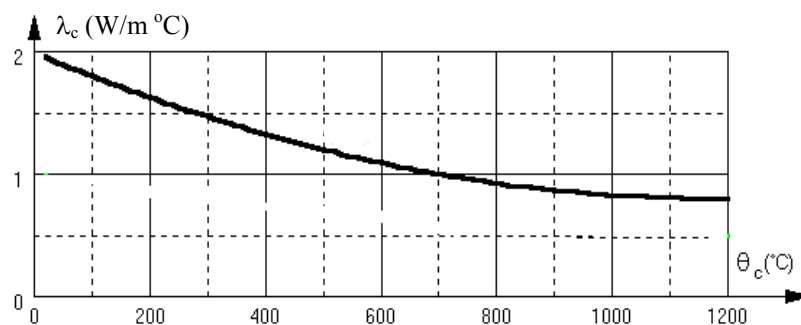


FIGURA 2.8 – Condutividade térmica do concreto em função da temperatura

Em *modelos de cálculo simplificados* o valor da condutividade térmica pode ser considerado independente da temperatura. Neste caso, recomenda-se o valor:

$$\lambda_c = 1,60 \text{ W/m}^\circ\text{C}.$$

3

DIMENSIONAMENTO DE PILARES MISTOS À TEMPERATURA AMBIENTE

3.1 Introdução

Diversas especificações de projeto tratam do dimensionamento de pilares mistos submetidos a força axial à temperatura ambiente. Citam-se a NBR 14323 (1999), o Eurocode 4 – Part 1.1 (1992) e o AISC/LRFD (1999). Neste trabalho, conforme já explicitado anteriormente, será apresentado o Método Simplificado do Eurocode 4 – Part 1.1 (1992) aplicável às seções transversais de pilares parcialmente revestidos por concreto e de seções circulares preenchidas com concreto, pertencentes a estruturas indeslocáveis ou a estruturas deslocáveis nas quais os efeitos de 2ª ordem tenham sido levados em conta diretamente na análise estrutural.

3.2 Método Simplificado

Os pilares mistos axialmente comprimidos são dimensionados pelo método dos estados limites, sendo necessário que a combinação mais desfavorável das forças normais de cálculo não exceda sua resistência de cálculo.

Esse dimensionamento se compõe da determinação da força normal resistente de cálculo levando-se em conta a contribuição do perfil de aço, do concreto e da armadura.

3.2.1 Resistência Plástica à Compressão

A. Pilares Parcialmente Revestidos por Concreto

A resistência plástica à compressão de cálculo dos pilares mistos parcialmente revestidos por concreto, $N_{pl,Rd}$, é dada pela soma das resistências de cálculo do perfil metálico, do concreto e da armadura:

$$N_{pl,Rd} = A_a f_y / \gamma_a + \alpha_c A_c f_{ck} / \gamma_c + A_s f_{sk} / \gamma_s = A_a f_{yd} + A_c f_{cd} + A_s f_{sd} \quad (3.1)$$

onde:

A_a , A_c e A_s : área do perfil metálico, do concreto e da armadura, respectivamente;

f_y , f_{ck} e f_{sk} : resistência ao escoamento do aço do perfil, resistência característica à compressão do concreto, e resistência ao escoamento do aço da armadura, respectivamente;

$\gamma_a = 1,10$: coeficiente de ponderação da resistência do perfil metálico;

$\gamma_c = 1,50$: coeficiente de ponderação da resistência do concreto;

$\gamma_s = 1,15$: coeficiente de ponderação da resistência da armadura longitudinal;

$\alpha_c = 0,85$: coeficiente de redução devido à retração e à deformação lenta do concreto sujeito a cargas de longa duração (efeito de Rüschi).

B. Pilares de Seção Circular Preenchidos por Concreto

Para esses pilares, o acréscimo de resistência devido ao confinamento do concreto pode ser incluído no cálculo. O impedimento da deformação transversal devido ao confinamento resulta no aumento da resistência do concreto. Ao mesmo tempo, aparece uma tensão circunferencial de tração na seção de aço, o que reduz a resistência axial.

O efeito do aumento da resistência do concreto depende também da esbeltez do pilar, devendo ser desprezado para pilares com esbeltez $\bar{\lambda} > 0,5$. Além disso, a excentricidade e da carga aplicada não pode exceder o valor $d/10$, onde d é o diâmetro externo da seção, sendo:

$$e = M_{sd} / N_{sd} \quad (3.2)$$

onde:

M_{sd} : maior momento fletor solicitante de cálculo sem considerar os efeitos de 2ª ordem;

N_{sd} : força normal solicitante de cálculo.

A resistência plástica à compressão de cálculo, é dada por:

$$N_{pl,Rd} = A_a \eta_2 \frac{f_y}{\gamma_a} + A_c \frac{\alpha f_{ck}}{\gamma_c} \left[1 + \eta_1 \left(\frac{t}{d} \right) \left(\frac{f_y}{f_{ck}} \right) \right] + A_s \frac{f_{sk}}{\gamma_s} \quad (3.3)$$

onde:

t : espessura da seção circular de aço;

$$\eta_1 = \eta_{10} \left(1 - \frac{10 e}{d} \right);$$

$$\eta_2 = \eta_{20} + (1 - \eta_{20}) \frac{10 e}{d};$$

$$\eta_{10} = 4,9 - 18,5 \bar{\lambda} + 17 \bar{\lambda}^2 \quad \text{sendo } \eta_{10} \geq 0;$$

$$\eta_{20} = 0,25 (3 + 2 \bar{\lambda}) \quad \text{sendo } \eta_{20} \leq 1.$$

Se a excentricidade e exceder o valor $d/10$, ou se a esbeltez $\bar{\lambda}$ exceder o valor 0,5, então $\eta_1 = 0$ e $\eta_2 = 1,0$.

3.2.2 Rigidez Efetiva do Pilar Misto

A rigidez efetiva a flexão da seção transversal $(EI)_e$ é determinada como a seguir:

A. Cargas de curta duração $(EI)_e$

$$(EI)_e = E_a I_a + 0,8 E_{cm} I_c / 1,35 + E_s I_s \quad (3.4)$$

onde:

I_a , I_c e I_s : momentos de inércia do perfil metálico, da seção de concreto (considerada sem fissuras) e da armadura, respectivamente;

E_a e E_s : módulos de elasticidade do perfil metálico e da armadura, respectivamente;

$E_{cm} = 950 (10 f_{ck} + 8)^{1/3}$: módulo de elasticidade secante do concreto, em kN/cm^2 .

B. Cargas de longa duração $(E.I)_e$

É necessário considerar o efeito das cargas de longa duração se:

$$e = M_{Sd} / N_{Sd} \leq 2d \quad \text{e} \quad \bar{\lambda} > 0,80.$$

onde:

M_{Sd} e N_{Sd} : momento de cálculo e carga axial de cálculo, respectivamente;

d : altura total da seção transversal do pilar misto, no plano de flexão considerado;

$\bar{\lambda}$: parâmetro de esbeltez.

Se ambas as condições acima forem atendidas, deve-se substituir E_{cm} pelo módulo de elasticidade do concreto $E_{c,\infty}$ na equação de rigidez efetiva à flexão do pilar misto para cargas de curta duração (EQ. 3.4):

$$E_{c,\infty} = E_{cm} \left(1 - \frac{0,5 N_{G,Sd}}{N_{Sd}} \right) \quad (3.5)$$

onde:

$N_{G,Sd}$: parcela da carga axial de cálculo que atua permanentemente no pilar.

3.2.3 Carga Crítica de Flambagem Elástica N_{cr}

A carga crítica de flambagem elástica do pilar é determinada pela seguinte expressão:

$$N_{cr} = \frac{\pi^2 (EI)_e}{l_\theta^2} \quad (3.6)$$

onde:

l_θ : comprimento de flambagem do pilar.

3.2.4 Parâmetro de Esbeltez $\bar{\lambda}$

O parâmetro de esbeltez do pilar misto é dado por:

$$\bar{\lambda} = \left(\frac{N_{pl,R}}{N_{cr}} \right)^{\frac{1}{2}} \quad (3.7)$$

onde:

$N_{pl,R}$: resistência plástica nominal do pilar misto, obtida fazendo $\gamma_a = \gamma_c = \gamma_s = 1,0$ na EQ.3.1 ou EQ.3.3.

3.2.5 Resistência de Cálculo do Pilar Misto à Compressão

Para cada um dos eixos principais de inércia do pilar deve-se atender à condição:

$$N_{Sd} \leq \chi N_{pl,Rd} \quad (3.8)$$

onde:

χ : fator de redução devido à flambagem do pilar, levando em consideração as imperfeições iniciais do pilar, sendo função de $\bar{\lambda}$. Para se obter o valor de χ utilizam-se as curvas de flambagem indicadas na FIG.3.1.

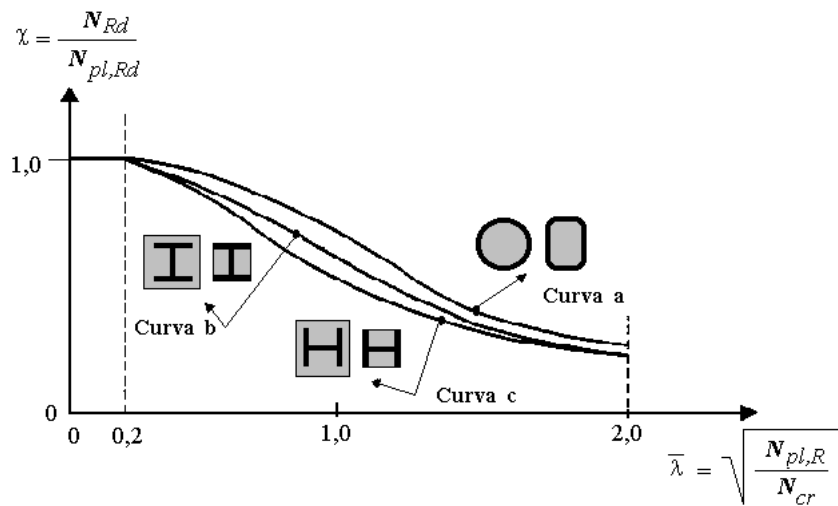


FIGURA 3.1 – Curvas de flambagem

As curvas de flambagem podem ser descritas matematicamente como se segue:

$$\chi = \frac{1}{\phi + \sqrt{\phi^2 - \bar{\lambda}^2}} \leq 1,0 \quad (3.9)$$

$$\phi = 0,5 \left[1 + \alpha (\bar{\lambda} - 0,2) + \bar{\lambda}^2 \right] \quad (3.10)$$

O fator α corresponde a diferentes níveis de imperfeições de pilares. A TAB.3.1 fornece os valores de α para cada curva de flambagem.

TABELA 3.1 – Valores de α para as curvas de flambagem

Curva europeia de flambagem	a	b	c
Fator de imperfeição α	0,21	0,34	0,49

3.2.6 Limitações do Método Simplificado

O método simplificado só é aplicável se atendidas as seguintes limitações:

- a) perfil duplamente simétrico e de seção constante ao longo do comprimento da barra;
- b) a parcela de contribuição (δ) do perfil de aço em relação à seção mista deve estar entre os limites: $0,2 \leq \delta \leq 0,9$, sendo $\delta = A_a f_{yd} / N_{pl,Rd}$;
- c) parâmetro de esbeltez $\bar{\lambda} \leq 2$;
- d) para prevenir a flambagem local, a razão entre a largura e a espessura da seção de aço comprimida deve satisfazer aos limites:

- $d/t \leq 90 \varepsilon^2 \rightarrow$ para seções tubulares circulares de aço preenchidas por concreto
- $b/t_f \leq 44 \varepsilon \rightarrow$ para seções I parcialmente revestidas

$$\text{onde } \varepsilon = \sqrt{235/f_y} \quad \text{sendo } f_y \text{ expresso em MPa}$$

- e) as extremidades do pilar devem ser indeslocáveis lateralmente.

4

DIMENSIONAMENTO DE PILARES MISTOS EM SITUAÇÃO DE INCÊNDIO

4.1 Introdução

Em linhas gerais, o dimensionamento de pilares mistos axialmente comprimidos em situação de incêndio consiste em:

- a) determinar a temperatura nos componentes da seção transversal (perfil metálico, concreto e aço da armadura) no TRRF, o que permite obter a força normal de compressão resistente de cálculo em situação de incêndio;
- b) determinar a força normal de compressão solicitante de cálculo a partir da combinação de ações apropriada para o estado limite último em situação de incêndio;
- c) verificar se a força normal solicitante de cálculo não ultrapassa a força normal resistente de cálculo em situação de incêndio.

Com base nestas linhas gerais, o dimensionamento pode ser realizado com o uso de tabelas, obtidas a partir de análises numéricas e ensaios, de métodos simplificados analíticos ou avançados de cálculo, sempre obedecendo exigências relativas a detalhes construtivos.

O Eurocode 4 – Part 1.2 (1994) possui prescrições completas para o uso do Método Tabular e do Método Simplificado Analítico e orientações para uso de Métodos Avançados de Cálculo.

O uso do Método Tabular e do Método Simplificado Analítico de Cálculo é limitado para tipos específicos de elementos estruturais individuais. Esses elementos são considerados expostos ao incêndio nas quatro faces ao longo de todo seu comprimento. As ações térmicas são tomadas de acordo com as condições do incêndio padrão, e a mesma distribuição de temperatura é assumida ao longo do comprimento de uma barra exposta ao fogo.

Os Métodos Avançados de Cálculo são utilizados para simulação do comportamento global da estrutura, de partes da estrutura ou somente de um elemento estrutural.

O Método Tabular e o Método Simplificado Analítico de Cálculo apresentam resultados mais conservadores quando comparados aos resultados de testes ou de Métodos Avançados de Cálculo.

Nas situações em que o Método Tabular e o Método Simplificado Analítico não forem aplicáveis, é necessário o uso de Métodos Avançados de Cálculo ou a realização de testes.

Tendo em vista os objetivos do presente trabalho, neste capítulo somente serão abordados detalhadamente os Métodos Tabular e Simplificado Analítico de Cálculo, e apenas apresentadas as hipóteses básicas dos Métodos Avançados de Cálculo.

4.2 Métodos de Dimensionamento de Pilares Mistos em Situação de Incêndio

4.2.1 Método Tabular

No Método Tabular, o nível de carga em situação de incêndio, é definido por:

$$\eta_{f_i, t} = \frac{N_{f_i, Sd, t}}{N_{Rd}} \leq 1,0 \quad (4.1)$$

onde:

$N_{f_i, Sd, t}$: força normal solicitante de cálculo da estrutura em situação de incêndio, no tempo t ;

N_{Rd} : força normal resistente de cálculo da estrutura à temperatura ambiente, obtida conforme capítulo 3.

Para a utilização das tabelas, as solicitações de cálculo da estrutura em temperatura elevada são consideradas independentes do tempo t , assim:

$$N_{f_i, Sd, t} = N_{f_i, Sd} = \eta_{f_i} N_{Sd} \quad (4.2)$$

Para verificação de elementos estruturais em situação de incêndio, a seguinte condição deve ser atendida:

$$N_{f_i, Sd} \leq N_{f_i, Rd, t} \quad (4.3)$$

O Método Tabular é válido para pilares de estruturas contraventadas que atendam as seguintes condições:

- a) o comprimento do pilar seja menor ou igual a 30 vezes a menor dimensão externa da seção transversal;
- b) o trecho do pilar no nível considerado é completamente ligado aos trechos superior e inferior, inclusive, se for o caso, às fundações.

A rotação das extremidades superior e inferior do pilar, quando este tiver continuidade, deve ser considerada impedida em situação de incêndio, logo, seu comprimento de flambagem é igual à metade de seu comprimento total em todos os andares, exceto no último andar, quando deve ser considerada igual a 0,7 vez o comprimento total.

Para a determinação da força normal resistente de cálculo da estrutura em temperatura ambiente N_{Rd} , o comprimento de flambagem é considerado igual ao comprimento total do pilar. Exceto para o último andar do edifício, quando o comprimento de flambagem é igual 1,4 vez o comprimento do pilar na determinação de N_{Rd} .

Em resumo, para o uso do Método Tabular, o comprimento de flambagem para a determinação de N_{Rd} é sempre o dobro do valor correspondente em situação de incêndio.

Na utilização das tabelas, a interpolação linear é permitida para todos os parâmetros físicos.

A. Pilares Mistos Parcialmente Revestidos por Concreto

Os Pilares Mistos Parcialmente Revestidos por Concreto são classificados em função do nível de carga η_{fi} , das dimensões de sua seção transversal, da distância mínima do centro da armadura à face do concreto e da razão entre a espessura da alma e a espessura das mesas (TAB. 4.1).

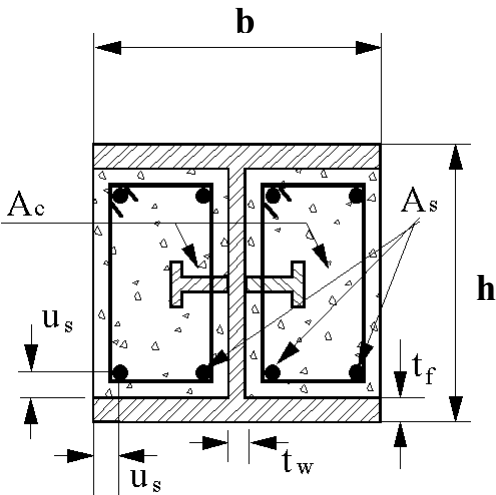
Na determinação de N_{Rd} e $N_{fi,Rd} = \eta_{fi} N_{Rd}$ para o uso da TAB.4.1, a razão de armadura $A_s/(A_c + A_s)$ superior a 6% ou inferior a 1% não deve ser considerada.

A razão mínima entre a espessura da alma e da mesa t_w/t_f pode ser 0,6 em vez de 0,7, desde que a altura do perfil seja no mínimo 350 mm e a razão $A_s/(A_c + A_s)$ seja no mínimo 3%.

A TAB. 4.1 deve ser usada para aços estruturais com resistência ao escoamento entre 235 MPa e 345 MPa e resistência a ruptura entre 400 MPa e 485 MPa.

A área de armadura mínima necessária para a verificação da resistência do pilar parcialmente revestido por concreto em situação de incêndio não é apresentada na TAB. 4.1. O ECCS (2001) traz uma nova exigência para a utilização desta tabela: a razão de contribuição do aço δ , obtida no dimensionamento em temperatura ambiente, passa a ter valor de, no máximo, 0,4 (o futuro texto da NBR 14323 deverá trazer também esta nova exigência). Assim a TAB. 4.1 pode ser empregada sem verificações adicionais da taxa de armadura conduzindo a resultados consistentes.

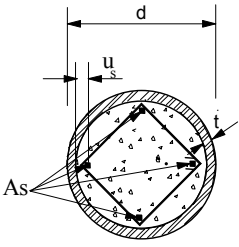
TABELA 4.1 – Valores mínimos para as dimensões da seção transversal, distância do eixo das barras da armadura e razões entre as espessuras da alma e das mesas dos pilares mistos parcialmente revestidos por concreto

		Tempo requerido de resistência ao fogo (min)			
		30	60	90	120
1	Dimensões mínimas da seção transversal para o nível de carga $\eta_{fi} \leq 0,3$				
1.1	Dimensões mínimas de h e b (mm)	160	260	300	300
1.2	Distância mínima da face ao eixo das barras da armadura u_s (mm)	40	40	50	60
1.3	Relação mínima entre as espessuras da alma e da mesa t_w/t_f	0,6	0,5	0,5	0,7
2	Dimensões mínimas da seção transversal para o nível de carga $\eta_{fi} \leq 0,5$				
2.1	Dimensões mínimas de h e b (mm)	200	300	300	-
2.2	Distância mínima da face ao eixo das barras da armadura u_s (mm)	35	40	50	-
2.3	Relação mínima entre as espessuras da alma e da mesa t_w/t_f	0,6	0,6	0,7	-
3	Dimensões mínimas da seção transversal para o nível de carga $\eta_{fi} \leq 0,7$				
3.1	Dimensões mínimas de h e b (mm)	250	300	-	-
3.2	Distância mínima da face ao eixo das barras da armadura u_s (mm)	30	40	-	-
3.3	Relação mínima entre as espessuras da alma e da mesa t_w/t_f	0,6	0,7	-	-

B. Pilares Mistos de Seção Circular Preenchidos por Concreto

São classificados em função do nível de carga η_{fi} , das dimensões de sua seção transversal, da distância mínima do centro da armadura à face do concreto e da razão de armadura $A_s/(A_c + A_s)$ (TAB.4.2).

TABELA 4.2 – Valores mínimos para as dimensões da seção transversal, distância do eixo das barras da armadura e porcentagem de armadura dos pilares mistos preenchidos por concreto

		Tempo requerido de resistência ao fogo			
		(min)			
	Seção de aço: $(d/t) > 25$	30	60	90	120
1	Dimensões mínimas da seção transversal para o nível de carga $\eta_{fi} \leq 0,3$				
1.1	Diâmetro mínimo d (mm)	160	200	220	260
1.2	Taxa mínima da armadura $A_s/(A_c + A_s)$ em %	0	1,5	3,0	6,0
1.3	Distâncias mínimas dos eixos das barras da armadura u_s (mm)	-	30	40	50
2	Dimensões mínimas da seção transversal para o nível de carga $\eta_{fi} \leq 0,5$				
2.1	Diâmetro mínimo d (mm)	260	260	400	450
2.2	Taxa mínima da armadura $A_s/(A_c + A_s)$ em %	0	3,0	6,0	6,0
2.3	Distâncias mínimas dos eixos das barras da armadura u_s (mm)	-	30	40	50
3	Dimensões mínimas da seção transversal para o nível de carga $\eta_{fi} \leq 0,7$				
3.1	Diâmetro mínimo d (mm)	260	450	550	-
3.2	Taxa mínima da armadura $A_s/(A_c + A_s)$ em %	3,0	6,0	6,0	-
3.3	Distâncias mínimas dos eixos das barras da armadura u_s (mm)	(25)	30	40	-

Na determinação de N_{Rd} e $N_{fi,Rd} = \eta_{fi} N_{Rd}$ para o uso da TAB.4.2, as seguintes exigências devem ser atendidas:

- a) independente das características mecânicas do aço utilizado no perfil tubular, adota-se o valor máximo de 235 MPa para o limite de escoamento;
- b) a espessura da parede da seção tubular é considerada no máximo 1/25 de d ;
- c) as taxas de armadura $A_s/(A_c + A_s)$ superiores a 3% não são levadas em conta;
- d) o aço da armadura deve ter resistência ao escoamento de, no mínimo, 500 MPa.

A resistência do concreto pode ser considerada como no projeto para temperatura ambiente.

4.2.2 Método Simplificado Analítico de Cálculo

A. Procedimento Geral

O Método Simplificado Analítico de Cálculo somente pode ser utilizado para o dimensionamento de estruturas contraventadas.

a) Resistência de Cálculo a Compressão

A força normal resistente de cálculo do pilar misto em situação de incêndio é dada por:

$$N_{fi,Rd} = \chi N_{fi,pl,Rd} \quad (4.4)$$

onde:

χ é o coeficiente de redução para a *curva c de flambagem* (FIG.3.1);

$N_{fi,pl,Rd}$ é a resistência plástica de cálculo para compressão em situação de incêndio, dada por:

$$N_{fi,pl,Rd} = \sum_j \frac{(A_{a,\theta} f_{y,\theta,a})}{\gamma_{M,fi,a}} + \sum_k \frac{(A_{s,\theta} f_{y,\theta,s})}{\gamma_{M,fi,s}} + \sum_m \frac{(A_{c,\theta} f_{c,\theta})}{\gamma_{M,fi,c}} \quad (4.5)$$

No dimensionamento do pilar misto, a seção transversal do pilar misto é dividida em partes, onde:

o índice a refere-se ao perfil metálico, o índice s à armadura longitudinal e o índice c ao concreto;

$A_{i,\theta}$ é a área de cada elemento da seção transversal;

$\gamma_{M,fi,a} = \gamma_{M,fi,s} = \gamma_{M,fi,c} = 1,0$.

b) Rigidez Efetiva

A *rigidez efetiva* do pilar misto é dada por:

$$(EI)_{fi,eff} = \sum_j (\varphi_{a,\theta} \bar{E}_{a,\theta} I_{a,\theta}) + \sum_k (\varphi_{s,\theta} \bar{E}_{s,\theta} I_{s,\theta}) + \sum_m (\varphi_{c,\theta} E_{c,sec,\theta} I_{c,\theta}) \quad (4.6)$$

onde:

$I_{i,\theta}$ é o momento de inércia de cada parte da seção transversal;

$\varphi_{i,\theta}$ é o coeficiente de redução que depende dos efeitos das tensões térmicas, cujos valores são obtidos na TAB.4.9. Para pilares mistos preenchidos por concreto, ao invés de $\varphi_{f,\theta}$ e $\varphi_{w,\theta}$, usa-se apenas um valor $\varphi_{a,\theta}$ igual a $\varphi_{f,\theta}$ da TAB.4.9.

c) Carga Elástica Crítica

A carga de flambagem de Euler ou carga elástica crítica em situação de incêndio é definida por:

$$N_{fi,cr} = \pi^2 (EI)_{fi,eff} / l_\theta^2 \quad (4.7)$$

onde l_θ é o comprimento de flambagem do pilar em situação de incêndio.

d) Esbeltez

O parâmetro de esbeltez do pilar é dado por:

$$\bar{\lambda}_\theta = \sqrt{N_{fi,pl,Rd} / N_{fi,cr}} \quad (4.8)$$

O comprimento de flambagem do pilar deve ser determinado como no Método Tabular (ver item 4.2.1).

B. Pilares Mistos Parcialmente Revestidos por Concreto

O Método Simplificado Analítico possui uma formulação específica para a determinação da resistência ao incêndio de Pilares Mistos Parcialmente Revestidos por Concreto com flambagem e momento fletor *com relação ao eixo de menor inércia do perfil metálico*, válida desde que as seguintes condições sejam atendidas:

- a) o comprimento de flambagem l_θ deve ser menor ou igual a $13,5 b$;
- b) a altura da seção transversal h deve variar entre 230 mm e 1100 mm;
- c) a largura da seção transversal b deve variar entre 230 mm e 500 mm;
- d) a porcentagem de armadura de aço deve variar de 1% a 6%;
- e) tempo requerido de resistência ao fogo de no máximo 120 min;
- f) para os tempos requeridos de resistência ao fogo de 90 e 120 minutos, as dimensões b e h devem ser no mínimo 300 mm.

Além disso, o comprimento de flambagem l_θ deve ser, no máximo, $10 b$ nas seguintes situações:

- a) para TRRF = 60 minutos, se $230 \text{ mm} \leq b < 300 \text{ mm}$ ou se $h/b > 3$;
- b) para TRRF = 90 ou TRRF = 120 minutos, se $h/b > 3$.

Mesas do perfil metálico

A temperatura média nas mesas do perfil deve ser determinada por:

$$\theta_{f,t} = \theta_{o,t} + k_t (A_m/V) \quad (4.9)$$

onde:

t é a duração em minutos do incêndio;

$A_m = 2(h+b)$, em metros;

$V = h b$, em m²;

$\theta_{o,t}$ é a temperatura em °C dada na TAB.4.3;

k_t é um coeficiente empírico dado na TAB.4.3.

TABELA 4.3 – Temperatura inicial e coeficiente empírico para a determinação da temperatura média nas mesas do perfil

TRRF [min]	$\theta_{o,t}$ [°C]	k_t [m°C]
30	550	9,65
60	680	9,55
90	805	6,15
120	900	4,65

Para a temperatura $\theta = \theta_{f,t}$, a *resistência ao escoamento* e o *módulo de elasticidade* das mesas do perfil são determinados por:

$$f_{y,\theta f} = f_y k_{y,\theta} \quad (4.10)$$

$$E_{\theta,f} = E k_{E,\theta} \quad (4.11)$$

Os valores da *resistência plástica de cálculo a compressão* e da *rigidez efetiva* das mesas do perfil metálico em situação de incêndio são determinados por:

$$N_{fi,pl,Rd,f} = 2 \left(\frac{b t_f f_{y,\theta,f}}{\gamma_{M,fi,a}} \right) \quad (4.12)$$

$$(EI)_{fi,f} = E_{\theta,f} \left(\frac{t_f b^3}{6} \right) \quad (4.13)$$

Alma do perfil metálico

Uma parte da alma do perfil metálico de altura $h_{w,fi}$ com início na borda interna das mesas deve ser desprezada. Essa parte é determinada por (FIG.4.1):

$$h_{w,fi} = 0,5(h - 2t_f) \left(1 - \sqrt{1 - 0,16 \left(\frac{H_t}{h} \right)} \right) \quad (4.14)$$

onde H_t é dado pela TAB.4.4.

TABELA 4.4 – Coeficiente para a determinação de $h_{w,fi}$

TRRF [min]	H_t [mm]
30	350
60	770
90	1100
120	1250

A *tensão máxima* na alma do perfil em situação de incêndio é determinada por:

$$f_{y,\theta,w} = f_y \sqrt{1 - \left(0,16 \frac{H_t}{h} \right)} \quad (4.15)$$

Os valores da *resistência plástica de cálculo a compressão axial* e da *rigidez efetiva* da alma do perfil metálico em situação de incêndio são determinados por:

$$N_{fi,pl,Rd,w} = t_w (h - 2t_f - 2h_{w,fi}) f_{y,\theta,w} / \gamma_{M,fi,a} \quad (4.16)$$

$$(EI)_{fi,w} = E (h - 2t_f - 2h_{w,fi}) t_w^3 / 12 \quad (4.17)$$

Concreto contido pelo perfil metálico

Uma camada externa do concreto deve ser desprezada no cálculo. A espessura dessa camada $b_{e,fi}$ (FIG.4.1) é dada pela TAB.4.5:

TABELA 4.5 – Espessura $b_{e,fi}$ da camada externa do concreto desprezada no cálculo

TRRF [min]	$b_{c,fi}$ [mm]
30	4,0
60	15,0
90	$0,5 (A_m/V) + 22,5$
120	$2,0 (A_m/V) + 24,0$

A temperatura média no concreto $\theta_{c,t}$, em valor aproximado, é dada em função do fator de massividade da seção A_m/V e do tempo requerido de resistência ao fogo através da TAB.4.6.

TABELA 4.6 – Temperatura média no concreto $\theta_{c,t}$

TRRF [min]							
30		60		90		120	
A_m/V [m ⁻¹]	$\theta_{c,t}$ [°C]	A_m/V [m ⁻¹]	$\theta_{c,t}$ [°C]	A_m/V [m ⁻¹]	$\theta_{c,t}$ [°C]	A_m/V [m ⁻¹]	$\theta_{c,t}$ [°C]
4	136	4	214	4	256	4	265
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

Para a temperatura $\theta = \theta_{c,t}$, o *módulo de elasticidade* do concreto é obtido por:

$$E_{c,\theta} = f_{c,\theta} / \varepsilon_{cu,\theta} = f_{c,20^\circ\text{C}} k_{c,\theta} / \varepsilon_{cu,\theta} \quad (4.18)$$

Os valores da *resistência plástica de cálculo a compressão axial* e da *rigidez efetiva* do concreto em situação de incêndio são determinados por:

$$N_{fi,pl,Rd,c} = 0,86 \left[(h - 2t_f - 2b_{c,fi})(b - t_w - 2b_{c,fi}) - A_s \right] f_{c,\theta} / \gamma_{M,fi,c} \quad (4.19)$$

$$(EI)_{fi,c} = E_{c,\theta} \left\{ \left[(h - 2t_f - 2b_{c,fi}) \frac{(b - 2b_{c,fi})^3 - t_w^3}{12} \right] - I_s \right\} \quad (4.20)$$

onde:

A_s é a seção transversal da armadura

0,86 é um fator de calibração;

I_s é o momento de inércia das barras da armadura com relação ao eixo de menor inércia da seção mista.

Armadura Longitudinal

O fator de redução $k_{ys,\theta}$ do limite de escoamento e o fator de redução $k_{Es,\theta}$ do módulo de elasticidade das barras da armadura são definidos em função da resistência ao incêndio padrão e da média geométrica u das distâncias dos eixos das barras até as faces externas do concreto. Esses fatores são apresentados na TAB.4.7 e TAB.4.8 apresentadas a seguir.

TABELA 4.7 – Fator de redução $k_{ys,\theta}$ para o limite de escoamento da armadura

u [mm] \ TRRF [min]	40	45	50	55	60
30	1	1	1	1	1
60	0,789	0,883	0,976	1	1
90	0,314	0,434	0,572	0,696	0,822
120	0,170	0,223	0,288	0,367	0,436

TABELA 4.8 – Fator de redução $k_{Es,\theta}$ para o módulo de elasticidade da armadura

u [mm] TRRF [min]	40	45	50	55	60
30	0,830	0,865	0,888	0,914	0,935
60	0,604	0,647	0,689	0,729	0,763
90	0,193	0,283	0,406	0,522	0,619
120	0,110	0,128	0,173	0,233	0,285

A média geométrica u das distâncias u_1 e u_2 é obtida de:

$$u = \sqrt{u_1 u_2} \quad (4.21)$$

onde:

u_1 é a distância, em milímetros, do eixo da barra externa da armadura à face interna da mesa do perfil metálico;

u_2 é a distância, em milímetros, do eixo da barra externa da armadura à superfície do concreto.

Se $(u_1 - u_2) > 10$ mm, u é dado por:

$$u = \sqrt{u_2 (u_2 + 10)} \quad (4.22)$$

Se $(u_2 - u_1) > 10$ mm, u é dado por:

$$u = \sqrt{u_1 (u_1 + 10)} \quad (4.23)$$

Os valores da *resistência plástica de cálculo a compressão axial* e da *rigidez efetiva* das barras da armadura em situação de incêndio são determinados por:

$$N_{fi,pl,Rd,s} = A_s k_{ys,\theta} f_{y,s} / \gamma_{M_{fi,s}} \quad (4.24)$$

$$(EI)_{fi,s} = k_{Es,\theta} E_s I_s \quad (4.25)$$

Força Axial de Compressão Resistente de Cálculo e Rigidez Efetiva

Os valores da *força axial de compressão resistente de cálculo* e da *rigidez efetiva* da seção transversal em situação de incêndio são determinados por:

$$N_{fi,pl,Rd} = N_{fi,pl,Rd,f} + N_{fi,pl,Rd,w} + N_{fi,pl,Rd,c} + N_{fi,pl,Rd,s} \quad (4.26)$$

$$(EI)_{fi,eff} = \varphi_{f,\theta}(EI)_{fi,f} + \varphi_{w,\theta}(EI)_{fi,w} + \varphi_{c,\theta}(EI)_{fi,c} + \varphi_{s,\theta}(EI)_{fi,s} \quad (4.27)$$

onde $\varphi_{i,\theta}$ é o coeficiente de redução que depende dos efeitos das tensões térmicas.

Os valores de $\varphi_{i,\theta}$ são dados na TAB. 4.9.

TABELA 4.9 – Coeficiente de redução $\varphi_{i,\theta}$

TRRF [min]	$\varphi_{f,\theta}$	$\varphi_{w,\theta}$	$\varphi_{c,\theta}$	$\varphi_{s,\theta}$
30	1,0	1,0	0,8	1,0
60	0,9	1,0	0,8	0,9
90	0,8	1,0	0,8	0,8
120	1,0	1,0	0,8	1,0

A carga de flambagem de Euler ou carga elástica crítica e o parâmetro de esbeltez do pilar são calculadas pelas expressões (4.5) e (4.6) respectivamente.

Usando o parâmetro de esbeltez do pilar $\bar{\lambda}_{\theta}$ e a *curva c* de flambagem, o coeficiente de redução χ é obtido e a resistência de cálculo a compressão axial do pilar misto em situação de incêndio é dada pela EQ. 4.4.

O Método Analítico de Cálculo apresenta limitações para diferentes resistências do incêndio padrão:

a) TRRF=30 minutos:

b e $h \geq 230$ mm $\rightarrow$ o comprimento de flambagem l_0 deve ser menor ou igual a $13,5 b$;

b) TRRF = 60 minutos:

$230 \text{ mm} \leq b < 300 \text{ mm}$ ou $h/b > 3 \rightarrow$ o comprimento de flambagem l_θ deve ser menor ou igual a $10 b$

$b \geq 300 \text{ mm}$ e $h/b \leq 3 \rightarrow$ o comprimento de flambagem l_θ deve ser menor ou igual a $13,5b$

c) TRRF = 90 minutos e TRRF = 120 minutos - $b \geq 300 \text{ mm}$ e $h \geq 300 \text{ mm}$:

$h/b > 3 \rightarrow l_\theta$ deve ser menor ou igual a $10 b$;

$h/b \leq 3 \rightarrow l_\theta$ deve ser menor ou igual a $13,5 b$.

C. Pilares Mistos de Seção Circular Preenchidos por Concreto

Para a utilização do Método Simplificado Analítico de cálculo para pilares de seção circular preenchidos por concreto devem atendidas as seguintes condições:

- a) o comprimento de flambagem l_θ deve ser menor ou igual a 4,5 m;
- b) o diâmetro d da seção transversal deve variar de 140 mm a 400 mm;
- c) a porcentagem de armadura de aço deve variar de 0% a 5%;
- d) resistência ao incêndio padrão de no máximo 120 min;
- e) a resistência do concreto deve variar de 20 a 40 MPa.

O dimensionamento de um pilar misto de seção circular preenchido por concreto em situação de incêndio é dividido em duas etapas independentes:

1. cálculo do campo de temperatura em uma seção transversal mista dada a duração da exposição ao incêndio;
2. determinação da força normal resistente de cálculo $N_{fi,Rd}$ para o campo de temperatura previamente obtido.

Campo de Temperatura

Para o cálculo do campo de temperatura assume-se que:

- a) a temperatura do perfil metálico é homogênea;
- b) não existe interação térmica entre o perfil metálico e o concreto;
- c) a temperatura da armadura é a mesma do concreto na mesma posição;
- d) não existe gradiente térmico longitudinal ao longo do pilar.

A *calor adicional por unidade de tempo* transmitido ao núcleo de concreto é obtido por:

$$\dot{h}_{net,d} = \rho_a c_a e \left[\frac{\partial \theta_a}{\partial t} \right] \quad (4.28)$$

onde:

ρ_a é a densidade do aço do perfil tubular;;

c_a é o calor específico do aço do perfil tubular;

e é a espessura do perfil tubular.

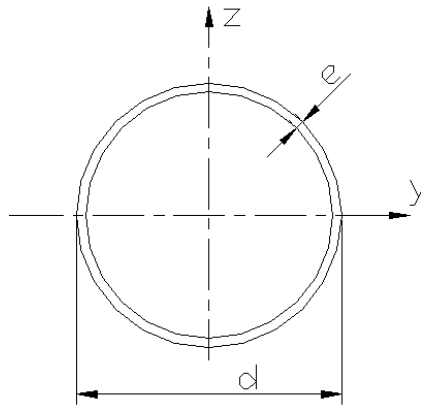


FIGURA 4.2 – Seção transversal do pilar preenchido por concreto

O *fluxo de calor no núcleo de concreto* é governado pelas relações abaixo, sendo os eixos y e z indicados na FIG. 4.2:

$$c_{c,\theta} \rho_c \frac{\partial \theta_c}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial y} \left(\lambda_{c,\theta} \frac{\partial \theta_c}{\partial y} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left(\lambda_{c,\theta} \frac{\partial \theta_c}{\partial z} \right) \quad (4.29)$$

onde:

$c_{c,\theta}$ é o calor específico do concreto em situação de incêndio;

ρ_c é a densidade do concreto;

$\lambda_{c,\theta}$ é a condutividade térmica do concreto em situação de incêndio.

Para seções circulares de diâmetro d , a distância entre 2 malhas circulares n , usada quando calcula-se com o método das diferenças finitas, não deve ser maior do que 2 cm, de modo que $d = n_2 n$, sendo n_2 o número de malhas ao longo do diâmetro d .

Carga Axial de Flambagem

Para seções tubulares preenchidas por concreto, a carga axial de flambagem, $N_{fi,Rd}$, deve ser obtida de:

$$N_{fi,Rd} = N_{fi,cr} = N_{fi,pl,Rd} \quad (4.30)$$

onde:

$$N_{fi,cr} = \pi^2 [E_{a,\theta,\sigma} I_a + E_{c,\theta,\sigma} I_c + E_{s,\theta,\sigma} I_s] / l_\theta^2 \quad (4.31)$$

$$N_{fi,pl,Rd} = A_a \sigma_{a,\theta} / \gamma_{M,fi,a} + A_c \sigma_{c,\theta} / \gamma_{M,fi,c} + A_s \sigma_{s,\theta} / \gamma_{M,fi,s} \quad (4.32)$$

$N_{fi,cr}$: carga de flambagem de Euler ou carga elástica crítica em situação de incêndio;

$N_{fi,pl,Rd}$: valor da resistência plástica de cálculo à compressão axial da seção transversal total;

l_θ : comprimento de flambagem em situação de incêndio;

$E_{i,\theta,\sigma}$: é o módulo tangente do gráfico tensão x deformação para o material i submetido a temperatura θ e a tensão $\sigma_{i,\theta}$;

I_i : momento de inércia do material i , com relação a um dos eixos principais da seção transversal mista;

A_i : é a área da seção transversal do material i ;

$\sigma_{i,\theta}$: é a tensão no material i , na temperatura θ .

$E_{i,\theta,\sigma} I_i$ e $A_i \sigma_{i,\theta}$ devem ser calculados como a soma de todos os elementos $dy dz$, com temperatura θ , depois de um incêndio de duração t .

Os valores de $E_{i,t}$ e $\sigma_{i,t}$ são determinados com:

$$\varepsilon_a = \varepsilon_c = \varepsilon_s = \varepsilon \quad (4.33)$$

onde:

ε : deformação axial do pilar;

ε_i : deformação axial do material i da seção transversal.

As relações tensão x deformação usadas *para os perfis metálicos* de acordo com este método são expressas por:

$$\frac{\sigma_{a,\theta}}{f_{ay,\theta}} = 0,06 + 1,416 \left[\frac{E_{a,\theta} \varepsilon_{a,\theta}}{f_{ay,\theta}} \right] - 0,651 \left[\frac{E_{a,\theta} \varepsilon_{a,\theta}}{f_{ay,\theta}} \right]^2 + 0,103 \left[\frac{E_{a,\theta} \varepsilon_{a,\theta}}{f_{ay,\theta}} \right]^3 \quad (4.34)$$

$$\frac{E_{a,\theta,\sigma}}{E_{a,\theta}} = 1,416 - 1,302 \left[\frac{E_{a,\theta} \varepsilon_{a,\theta}}{f_{ay,\theta}} \right] + 0,309 \left[\frac{E_{a,\theta} \varepsilon_{a,\theta}}{f_{ay,\theta}} \right]^2 \quad (4.35)$$

onde:

$$\frac{f_{ay,\theta}}{f_{ay,20^\circ\text{C}}} = 1,0 + \theta / (900 \log_e(\theta / 1750)) \quad \text{se } 0 < \theta \leq 600^\circ\text{C} \quad (4.36)$$

$$\frac{f_{ay,\theta}}{f_{ay,20^\circ\text{C}}} = (340 - 0,34\theta) / (\theta - 240) \quad \text{se } 600^\circ\text{C} < \theta \leq 1000^\circ\text{C} \quad (4.37)$$

$$\frac{E_{a,\theta}}{E_{a,20^\circ\text{C}}} = 1,0 + \theta / (2000 \log_e(\theta / 1100)) \quad \text{se } 0 < \theta \leq 600^\circ\text{C} \quad (4.38)$$

$$\frac{E_{a,\theta}}{E_{a,20^\circ\text{C}}} = (690 - 0,69\theta) / (\theta - 53,5) \quad \text{se } 600^\circ\text{C} < \theta \leq 1000^\circ\text{C} \quad (4.39)$$

As expressões 4.34 e 4.35 podem ser usadas *para a armadura*, exceto $f_{sy,\theta}$ e $E_{s,\theta}$ que são dados na TAB. 4.10.

TABELA 4.10 – Determinação de $f_{sy,\theta}$ e $E_{s,\theta}$

Temperatura θ_s [°C]	0	400	580	750
$\frac{E_{s,\theta}}{E_{s,20^\circ\text{C}}}$ ou $\frac{f_{sy,\theta}}{f_{sy,20^\circ\text{C}}}$	1	1	0,15	0

As relações tensão x deformação *para o concreto* são expressas por:

$$\frac{\sigma_{c,\theta}}{f_{c,\theta}} = \frac{E_{c,\theta} \varepsilon_{c,\theta}}{f_{c,\theta}} \left[1 - \left(\frac{E_{c,\theta} \varepsilon_{c,\theta}}{4f_{c,\theta}} \right) \right] \quad (4.40)$$

$$\frac{E_{c,\theta,\sigma}}{E_{c,\theta}} = 1 - \left[\frac{E_{c,\theta} \varepsilon_{c,\theta}}{2f_{c,\theta}} \right] \quad (4.41)$$

onde $f_{c,\theta}$ e $E_{c,\theta}$ são determinados pela TAB.4.11:

TABELA 4.11 – Determinação de $f_{c,\theta}$ e $E_{c,\theta}$

Temperatura θ_c [°C]	0	50	200	250	400	600	1000
$\frac{f_{c,\theta}}{f_{c,20^\circ\text{C}}}$	1	1	1	1	0,76	0,45	0
$\frac{E_{c,\theta}}{E_{c,20^\circ\text{C}}}$	1	1	0,5	0,41	0,15	0,05	0,05

D. Disposições construtivas

Para que os métodos simplificados de cálculo sejam válidos, devem ser obedecidas as seguintes disposições construtivas:

Pilares parcialmente revestidos por concreto

- a) o concreto entre as mesas do perfil metálico deve ser ligado à alma por meio de estribos soldados ou que atravessem a alma, ou por meio de estribos e conectores tipo pino com cabeça soldados à alma, conforme a FIG. 4.3;
- b) o espaçamento entre os estribos ao longo do comprimento do pilar não deve exceder 500 mm;
- c) para seções de aço com altura superior a 400 mm, a disposição das armaduras e dos estribos deve ser conforme a figura FIG. 4.3.b.

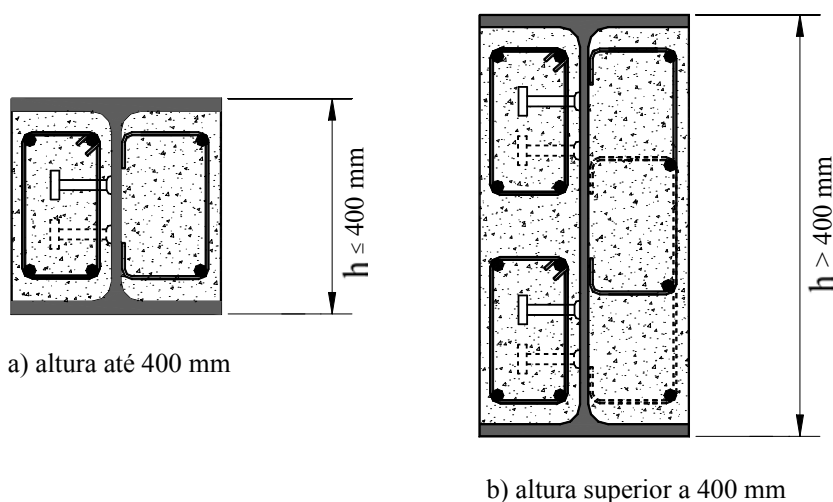


FIGURA 4.3 - Disposições construtivas para pilares parcialmente revestidos

Pilares de perfis tubulares preenchidos com concreto

- a) o espaçamento dos estribos ao longo do comprimento do pilar não poderá exceder 5 vezes o menor diâmetro das barras da armadura longitudinal do concreto;
- b) antes da concretagem, em cada andar do edifício deverão ser executados furos com diâmetro mínimo de 20 mm na parede do perfil de aço, com espaçamento no máximo igual a 5 m, e obrigatoriamente um no topo e outro na base do pilar.

4.2.3 Métodos Avançados de Cálculo

Os métodos avançados de cálculo devem garantir uma análise realística da estrutura exposta ao fogo. Devem ser baseados em hipóteses físicas que permitam uma boa aproximação do comportamento real da estrutura em situação de incêndio.

Esses métodos podem ser usados para barras individuais, para partes da estrutura ou para a estrutura como um todo, admitem a utilização de qualquer tipo de seção transversal, e devem incluir, separadamente:

- a) Modelo de Resposta Térmica – para a determinação do desenvolvimento e distribuição da temperatura dentro dos elementos estruturais;
- b) Modelo de Resposta Mecânica – para a determinação do comportamento mecânico da estrutura ou de quaisquer de suas partes.

A. Modelos de Resposta Térmica

São baseados em princípios reconhecidos e hipóteses da teoria da transferência de calor.

O modelo de resposta térmica deve considerar as ações térmicas relevantes e as variações das propriedades dos materiais.

Os efeitos da exposição térmica não-uniforme e a transferência de calor para os componentes adjacentes da edificação devem ser considerados onde necessário.

B. Modelos de Resposta Mecânica

São baseados em princípios reconhecidos e hipóteses da teoria das estruturas, levando em conta os efeitos da temperatura.

Onde necessário, o modelo de resposta mecânica deve também levar em conta:

- a) os efeitos combinados das ações mecânicas, imperfeições geométricas, e ações térmicas;
- b) os efeitos da não linearidade geométrica;
- c) os efeitos das propriedades dos materiais não lineares, incluindo os efeitos do descarregamento na rigidez da estrutura.

Os efeitos das tensões e deformações induzidas termicamente devidos ao aumento de temperatura e aos diferenciais de temperatura devem ser considerados.

As deformações nos estados limites últimos, inferidas pelo modelo de cálculo, devem ser limitadas como necessário para assegurar a compatibilidade entre todas as partes da estrutura.

C. Validação

Para a validação dos métodos avançados de cálculo, a verificação dos resultados deve ser feita com base em resultados de testes. Os resultados desses testes devem referir-se às deformações, temperaturas e tempos de resistência ao incêndio.

Os parâmetros críticos devem referir-se ao comprimento de flambagem, às dimensões dos elementos, ao nível de carga, etc.

5

CONSIDERAÇÕES SOBRE O PROGRAMA CALTEMI

5.1 Introdução

As análises térmicas realizadas neste trabalho utilizaram o programa CALTEMI (Cálculo de Temperatura em Estruturas Metálicas e Mistas em Situação de Incêndio) desenvolvido e validado por FIGUEIREDO JÚNIOR (2002). Este programa tem como base o Método dos Elementos Finitos para obtenção dos valores de distribuição de temperatura em diversos pontos da seção transversal de um elemento estrutural submetido a um incêndio padrão.

Para a utilização do CALTEMI, primeiramente, é necessário gerar a malha do modelo em um pré-processador, como, por exemplo, o programa GID, utilizado no desenvolvimento deste trabalho. A FIG. 5.1 mostra a malha gerada para o estudo de um pilar parcialmente revestido por concreto.

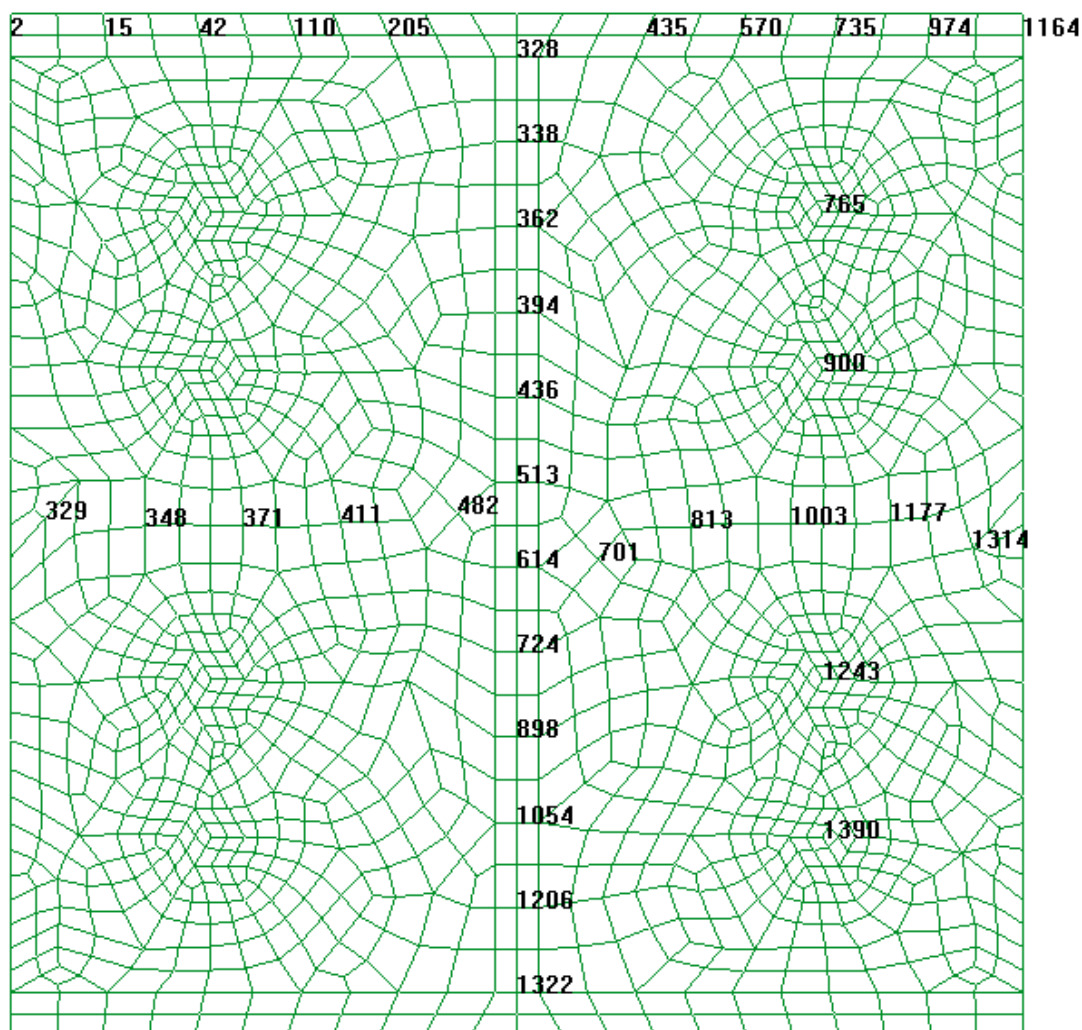


FIGURA 5.1 – Malha gerada através do pré-processador GID para o pilar parcialmente revestido formado com o perfil HP 310x93 e indicação de alguns nós utilizados no estudo deste pilar

Pronta a malha, são introduzidos os demais dados, como os tipos e as propriedades térmicas dos materiais, as condições de contorno do problema, a discretização temporal escolhida, a consideração ou não da não-linearidade física dos materiais etc. Após o processamento, o CALTEMI gera um relatório com as temperaturas em todos os nós da malha, permitindo o estudo do comportamento do elemento estrutural em situação de incêndio (FIG. 5.2).

```

                                UNIVERSIDADE FEDERAL DE MINAS GERAIS
                                ESCOLA DE ENGENHARIA
                                PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA DE ESTRUTURAS
                                -----
                                CALTEMI 1.0
                                -----
TEMPERATURA NOS NÓS

PASSO 2 : 30.0 MINUTOS
  1  0.53355E+03
  2  0.53469E+03
  3  0.53743E+03
  4  0.52690E+03
  5  0.52466E+03
  6  0.52268E+03
  7  0.61755E+03
  8  0.53021E+03
  9  0.51282E+03
 10  0.53151E+03
 11  0.49283E+03
 12  0.62787E+03
 13  0.48182E+03
 14  0.52054E+03
 15  0.51563E+03
 16  0.47968E+03
 17  0.51222E+03
 18  0.52731E+03
 19  0.62517E+03
 20  0.43871E+03
 21  0.46080E+03
 22  0.50775E+03
 23  0.40032E+03
 24  0.42371E+03
 25  0.62044E+03
 26  0.51103E+03
 27  0.50594E+03

```

FIGURA 5.2 – Parte do relatório de saída do CALTEMI com as temperaturas dos nós da malha gerada para o pilar parcialmente revestido formado com o perfil HP 310x93

Utilizando o programa GID como pós-processador, é possível também visualizar a elevação da temperatura na seção transversal de um pilar, como mostrado na FIG. 5.3.

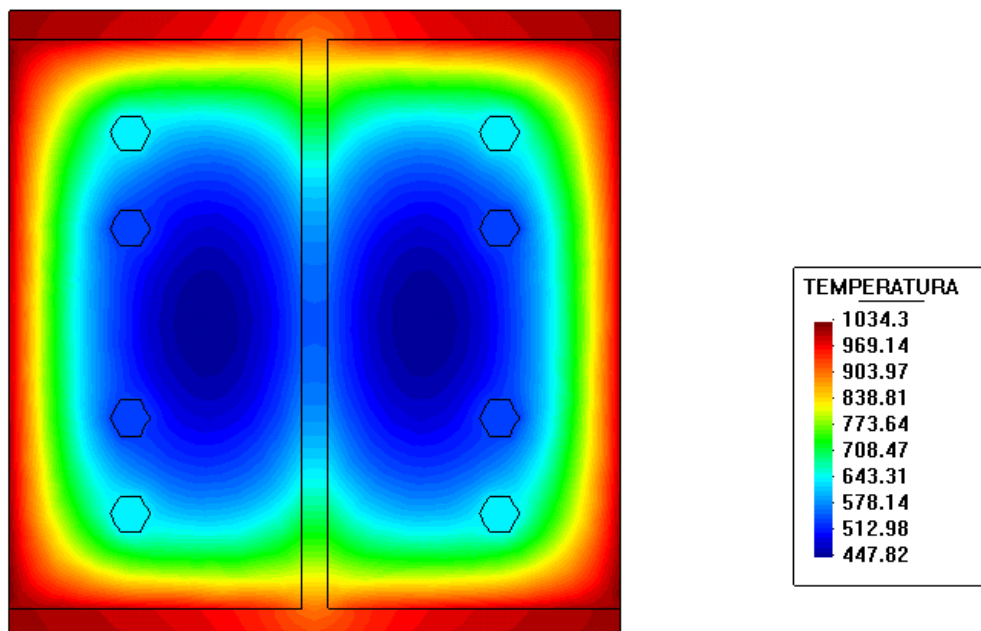


FIGURA 5.3 – Distribuição de temperatura no pilar parcialmente revestido formado com o perfil HP 310x93 submetido a 120 minutos de incêndio

Sendo assim, neste capítulo serão abordados alguns aspectos relevantes do programa CALTEMI e a teoria que serviu de base para seu desenvolvimento.

5.2 Método dos Elementos Finitos Aplicado à Transferência de Calor

5.2.1 Mecanismos de Transferência de Calor

Em situação de incêndio, o calor é transmitido através de alguns mecanismos, entre os quais destacam-se: condução, convecção e radiação.

A. Condução

Trata-se de um processo em que o calor flui de uma região de temperatura mais alta para outra de temperatura mais baixa, dentro de um meio sólido, líquido ou gasoso,

ou entre meios diferentes em contato físico direto, através do movimento cinético ou pelo impacto direto de moléculas, no caso de fluidos em repouso, e pelo movimento de elétrons, no caso de metais.

A relação básica para a transmissão de calor por condução é dada pela Lei de Fourier. Esta relação estabelece que o calor transmitido por condução por unidade de tempo, Q , é função:

- a) da condutividade térmica do material, k ;
- b) da área da seção transversal, A , através da qual o calor flui por condução, medida perpendicularmente à direção do fluxo;
- c) do gradiente de temperatura na seção, $d\theta/dn$, isto é, da razão de variação da temperatura θ com a distância, na direção n do fluxo de calor.

Assim, a equação elementar para a condução unidimensional no regime permanente é dada por:

$$Q = -kA d\theta/dn \quad (5.1)$$

O sinal negativo da EQ.5.1 indica que o fluxo de calor ocorre em sentido contrário ao gradiente de temperatura.

A quantidade de calor por unidade de área por unidade de tempo é chamada fluxo de calor q . A equação do fluxo de calor corresponde à expressão matemática para o princípio básico da condução de calor e estabelece que o calor é transferido em proporção ao gradiente de temperatura, EQ. 5.2.

$$q_n = Q/A = -k d\theta/dn \quad (5.2)$$

Para determinar as equações básicas que governam a condução de calor em um sólido, considera-se um material isotrópico em um sistema bidimensional em um domínio Ω , como mostrado na FIG. 5.4.

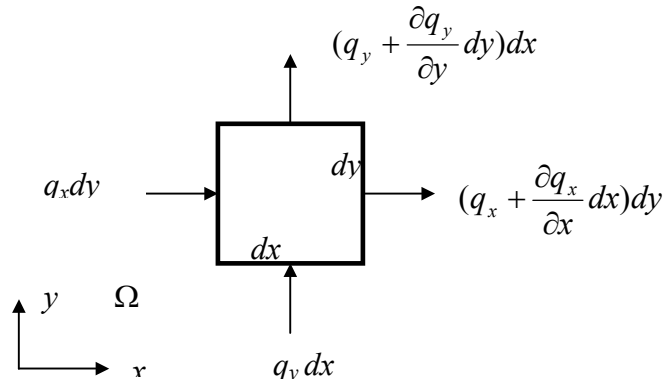


FIGURA 5.4 – Fluxo de calor em um elemento bidimensional

A diferença entre o fluxo de calor que entra e o fluxo que sai de um elemento de tamanho $dx dy$ é dada por:

$$\left(q_x + \frac{\partial q_x}{\partial x} dx - q_x \right) dy + \left(q_y + \frac{\partial q_y}{\partial y} dy - q_y \right) dx \quad (5.3)$$

onde:

q_x é a quantidade de calor que flui na direção do eixo x por unidade de comprimento na unidade de tempo;

q_y é a quantidade de calor que flui na direção do eixo y por unidade de comprimento na unidade de tempo.

Por conservação de calor, a diferença entre o fluxo de calor que entra e o que sai de um elemento deve ser igual à soma do calor gerado no elemento na unidade de tempo, $Q_g dx dy$, com o calor adicional por unidade de tempo devido à mudança de temperatura, $-\rho c \frac{\partial \theta}{\partial t} dx dy$, onde c é o calor específico, ρ é a densidade e $\theta(x, y, t)$

é a distribuição de temperatura. Assim:

$$\frac{\partial q_x}{\partial x} dydx + \frac{\partial q_y}{\partial y} dxdy = Q_g dxdy - \rho c \frac{\partial \theta}{\partial t} dxdy \quad (5.4)$$

Dividindo todos os termos por $dxdy$, tem-se:

$$\frac{\partial q_x}{\partial x} + \frac{\partial q_y}{\partial y} - Q_g + \rho c \frac{\partial \theta}{\partial t} = 0 \quad (5.5)$$

Substituindo o fluxo de calor na direção x , $q_x = -k \frac{\partial \theta}{\partial x}$, e o fluxo de calor na direção y , $q_y = -k \frac{\partial \theta}{\partial y}$, na EQ. 5.5:

$$\frac{\partial}{\partial x} \left(k \frac{\partial \theta}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(k \frac{\partial \theta}{\partial y} \right) + Q_g - \rho c \frac{\partial \theta}{\partial t} = 0 \quad (5.6)$$

É necessário especificar as condições iniciais (no tempo $t = t_0$ no domínio Ω) e as condições de contorno na superfície Γ para a resolução de uma equação diferencial da condução de calor de um problema particular.

O campo inicial de temperatura deve ser especificado como:

$$\theta = \theta(x,y,z,0) = \theta_0(x,y,z) \text{ em } \Omega \quad (5.7)$$

Quanto às condições de contorno, existem duas condições típicas envolvidas:

- a) a condição essencial ou de Dirichlet;
- b) a condição natural ou de Neumann.

Na condição de contorno essencial, o valor da temperatura no contorno Γ_θ é prescrito, podendo ser constante ou variar com o tempo, isto é:

$$\theta = \theta(x,y,z,t) \text{ em } \Gamma_\theta \quad (5.8)$$

Na condição de contorno natural, os valores do fluxo saindo na direção normal ao contorno Γ_q são prescritos como $\bar{q}(x,y,z,t)$. Assim:

$$-k \frac{\partial \theta}{\partial n} = \bar{q} \quad \text{em} \quad \Gamma_q \quad (5.9)$$

B. Convecção

A convecção é o processo de transmissão de calor que envolve a movimentação de um fluido nas imediações de um corpo, estando ambos a temperaturas diferentes.

Seja um grupo de partículas movendo-se com uma dada velocidade cujas componentes são (u,v,w). Para o cálculo da razão pela qual o calor atravessa um plano, um termo convectivo de componentes ($\rho c \theta u$, $\rho c \theta v$, $\rho c \theta w$) deve ser adicionado à parte devido à condução. Então, as componentes do fluxo de calor passam a ser:

$$q_x = -k \frac{\partial \theta}{\partial x} + \rho c \theta u \quad (5.10)$$

$$q_y = -k \frac{\partial \theta}{\partial y} + \rho c \theta v \quad (5.11)$$

$$q_z = -k \frac{\partial \theta}{\partial z} + \rho c \theta w \quad (5.12)$$

Voltando a EQ. 5.5:

$$\rho c \left(\frac{\partial \theta}{\partial t} + u \frac{\partial \theta}{\partial x} + v \frac{\partial \theta}{\partial y} + w \frac{\partial \theta}{\partial z} \right) = \nabla k \nabla \theta + Q_g \quad \text{ou} \quad \rho c \frac{D\theta}{Dt} = \nabla k \nabla \theta + Q_g \quad (5.13)$$

onde:

$$\frac{D\theta}{Dt} = \frac{\partial \theta}{\partial t} + u \frac{\partial \theta}{\partial x} + v \frac{\partial \theta}{\partial y} + w \frac{\partial \theta}{\partial z} \quad (5.14)$$

Para a resolução da EQ.5.13, assumindo-se o campo de velocidade como conhecido, são utilizadas as condições de contorno e iniciais dadas pelas Equações 5.7, 5.8 e 5.9.

A convecção pode ocorrer de duas maneiras:

- a) de forma natural;
- b) forçada.

A convecção natural ocorre devido a um movimento do fluido decorrente da diferença de densidade entre regiões distintas do mesmo. A densidade do fluido sofre variações devido à mudança de temperatura.

Já, a convecção forçada ocorre quando o movimento é induzido por agentes mecânicos como ventiladores ou bombas.

Em muitos casos, a convecção ocorre entre um fluido e a superfície de um sólido, por isso pode ser considerada como um tipo de condição de contorno para o domínio do sólido.

A transferência de calor por convecção é uma função da diferença de temperatura entre o sólido e o fluido. Então:

$$q = h (\theta_s - \theta_f) \quad (5.15)$$

onde:

q é o fluxo de calor;

h é o coeficiente de transferência de calor por convecção entre o sólido e o fluido.

Portanto, a condição de contorno dada pela EQ. 5.9 pode ser expressa por:

$$-k \frac{\partial \theta}{\partial n} = h(\theta_s - \theta_f) \quad \text{em} \quad \Gamma_q \quad (5.16)$$

C. Radiação

O mecanismo de radiação consiste na emissão de ondas eletromagnéticas por um corpo aquecido, que absorvidas por um receptor, transforma-se em energia térmica.

Ao contrário dos processos de condução e convecção, a radiação não necessita de um meio material para se processar.

A expressão para o cálculo do fluxo de calor emitido por um irradiador perfeito ou ideal, um corpo negro, foi encontrada experimentalmente por J. STEFAN em 1879, e deduzida por L. BOLTZMANN em 1888. A denominada Lei de Stefan-Boltzmann estabelece que o calor emitido por um irradiador ideal é diretamente proporcional à sua temperatura absoluta elevada à quarta potência, ou seja:

$$q_r \propto \theta_s^4 \quad (5.17)$$

A constante de proporcionalidade ou Constante Stefan-Boltzmann é representada por σ e vale $5,669 \times 10^{-8} \text{ W/m}^2\text{K}^4$, então:

$$q_r = \sigma \theta_s^4 \quad (5.18)$$

A EQ. 5.18 é válida apenas para os corpos negros, considerados superfícies ideais que absorvem integralmente a energia radiante incidente. Para superfícies reais, o fluxo q_r deve ser multiplicado pela emissividade ε da superfície, que representa a fração da energia emitida por essa, quando comparada a uma superfície negra. Dessa forma, o calor emitido pela superfície é dado por:

$$q_r = \varepsilon \sigma \theta_s^4 \quad \text{sendo } 1 > \varepsilon > 0 \quad (5.19)$$

A vizinhança da superfície considerada também emite calor por radiação, q_{inc} . A superfície irá absorver esse calor de acordo com sua absortividade η , ou seja, numa quantidade igual a ηq_{inc} . A troca líquida de calor entre a superfície e sua vizinhança será:

$$\varepsilon \sigma \theta_s^4 - \eta q_{inc} \quad \text{ou} \quad \varepsilon \sigma \theta_s^4 - \eta \sigma \theta_f^4 \quad (5.20)$$

Finalmente, pode-se demonstrar que, para superfícies cinzentas, ou seja, aquelas que não absorvem integralmente a energia radiante incidente, $\varepsilon = \eta$ e o calor trocado será:

$$\varepsilon \sigma (\theta_s^4 - \theta_f^4) \quad (5.21)$$

Assim, a condição de contorno descrita na EQ. 5.9 pode ser escrita como:

$$-k \frac{\partial \theta}{\partial n} = \varepsilon \sigma (\theta_s^4 - \theta_f^4) \quad \text{em} \quad \Gamma_q \quad (5.22)$$

Combinando a EQ.5.9, a EQ.5.16 e a EQ.5.22, a condição de contorno para as equações de transferência de calor dada pelas EQ. 5.6 e EQ. 5.13 podem ser escritas como:

$$-k \frac{\partial \theta}{\partial n} = \bar{q} + h(\theta_s - \theta_f) + \varepsilon_s \sigma (\theta_s^4 - \theta_f^4) \quad \text{em} \quad \Gamma_q \quad (5.23)$$

onde ε_s é a emissividade do sólido considerado.

5.2.2 Equações básicas

A equação básica da transferência de calor é a Equação de Poisson, que pode ser expressa da seguinte forma:

$$\rho c \frac{\partial \theta}{\partial t} = \nabla^2 D \theta + \rho r \quad \text{em} \quad \Omega \quad (5.24)$$

onde:

θ representa a temperatura;

t é a variável de tempo;

ρ é a densidade do material;

c é o calor específico;

ρr a densidade de calor devido a uma fonte de calor interna;

D corresponde à matriz constitutiva, formada pelas condutividades térmicas λ , para as diferentes dimensões nas quais se descreve o domínio Ω .

Desta forma, para um domínio bidimensional, a matriz D é dada por:

$$D = \begin{bmatrix} \lambda_x & 0 \\ 0 & \lambda_y \end{bmatrix} \quad (5.25)$$

As condições de contorno às quais está sujeito o problema, mostradas na FIG. 5.5, são:

- a) a *condição de Dirichlet* fixa a temperatura θ a um valor previamente conhecido sobre um contorno particular:

$$\theta - \bar{\theta} = 0 \quad \text{em } \Gamma_\theta \quad (5.26)$$

- b) a *condição de Neumann* fixa o gradiente de temperatura normal à superfície:

$$n^T q + \alpha(\theta_f - \theta_s) + \bar{q} = 0 \quad \text{em } \Gamma_q \quad (5.27)$$

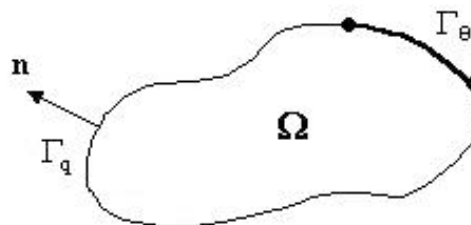


FIGURA 5.5 – Região bidimensional com as condições de contorno possíveis

onde:

$\bar{\theta}$ é a temperatura com valor conhecido na fronteira;

α representa o coeficiente de convecção-radiação;

$\bar{q}$ é o fluxo de temperatura, com valor conhecido na fronteira;

θ_f é a temperatura dos gases fora do domínio.

As demais variáveis são expressas pelas equações:

$$\text{vetor de normais ao contorno: } n = [n_x \ n_y]^T \quad (5.28)$$

$$\text{vetor gradiente de temperatura: } q_n = [q_x \ q_y] = D \nabla \theta \quad (5.29)$$

A função gradiente é dada por:

$$\nabla = \left[\frac{\partial}{\partial x} \quad \frac{\partial}{\partial y} \right]^T \quad (5.30)$$

Os casos no contorno dependerão dos valores dos parâmetros na EQ. (5.27):

- a) o *contorno isolado* representa um fluxo de calor zero na interface do domínio com o meio externo, de maneira que:

$$n^T q = 0 \quad \text{pois} \quad \bar{q} = 0 \text{ e } \alpha = 0 \quad (5.31)$$

- b) para o contorno com entrada ou saída de fluxo existe um fluxo de valor conhecido na fronteira, ou seja:

$$n^T q = -\bar{q} \quad \text{já que } \alpha = 0 \quad (5.32)$$

- c) para o contorno com entrada ou saída de calor por convecção-radiação existe uma interação do calor existente no meio externo e a temperatura do domínio, que de acordo com as leis da termodinâmica, produz um fluxo na interface representado por:

$$n^T q = -\alpha (\theta_s - \theta_f) \quad \text{com} \quad \bar{q} = 0 \quad (5.33)$$

O fator α representa ambos os fenômenos, convecção e radiação, e é dado por:

$$\alpha = h + \varepsilon_{res} \sigma (81.385.668 + 447.174 (\theta_f + \theta_s) + (\theta_f + \theta_s)(\theta_f^2 + \theta_s^2) + 1.092 (\theta_f^2 + \theta_f \theta_s + \theta_s^2)) \quad (5.34)$$

onde:

h é o coeficiente de transferência de calor por convecção, podendo ser tomado igual a 25 W/m²°C;

ε_{res} é a emissividade resultante entre os gases e a superfície, podendo ser tomada igual a 0,5;

σ é a constante de Stefan-Boltzmann, possui valor de 5,669x10⁻⁸ W/m²K⁴;

θ_f é a temperatura dos gases, em graus Celsius;

θ_s é a temperatura da superfície, em graus Celsius.

5.2.3 Formulação

A aplicação do MEF exige como ponto de partida a existência de uma forma integral que expresse o mecanismo global do sistema. Essa forma integral pode ser obtida aplicando-se o método dos resíduos ponderados à EQ. 5.24 e à condição de contorno dada pela EQ. 5.27. Assim:

$$\int_{\Omega} W^T [\nabla^T D \nabla \theta + \rho r] \partial \Omega - \int_{\Omega} W^T \left[\rho c \frac{\partial \theta}{\partial t} \right] \partial \Omega + \oint_{\Gamma_q} W^T [h^T D \nabla \theta + \alpha (\theta_s - \theta_f) + \bar{q}] \partial \Gamma_q = 0 \quad (5.35)$$

Onde W são funções de peso do método dos resíduos ponderados.

Após integrar por partes o termo $\nabla^T D \nabla \theta$ e reagrupar a equação, vem:

$$\begin{aligned} \int_{\Omega} W^T \rho c \frac{\partial \theta}{\partial t} \partial \Omega + \int_{\Omega} \nabla^T W^T D \nabla \theta \partial \Omega + \oint_{\Gamma_q} W^T \alpha \theta \partial \Gamma_q = \\ \int_{\Omega} W^T \rho r \partial \Omega - \oint_{\Gamma_q} W^T \bar{q}_n \partial \Gamma_q + \oint_{\Gamma_q} W^T \alpha \theta_f \partial \Gamma_q - \oint_{\Gamma_{\theta}} W^T \bar{q}_n \partial \Gamma_q \end{aligned} \quad (5.36)$$

5.2.4 Discretização

O domínio é discretizado em elementos finitos, e então as temperaturas são interpoladas no interior de cada elemento como:

$$\theta = \sum N_i \theta_i = N_a^{(e)} \quad (5.37)$$

onde:

N_i são as funções de forma definidas em cada elemento;

$a^{(e)}$ contém os valores das temperaturas nodais do elemento (e).

O vetor de gradientes em cada elemento pode ser obtido por:

$$g = \nabla \theta = \nabla N_a^{(e)} = B_a^{(e)} \quad (5.38)$$

onde:

$$B = [B_1, \dots, B_n], \text{ sendo } B_i = \left[\frac{\partial N_i}{\partial x} \quad \frac{\partial N_i}{\partial y} \right]^T, \text{ para problemas bidimensionais.} \quad (5.39)$$

O vetor de fluxos pode ser calculado em função dos valores nodais conforme:

$$q = -DB_a^{(e)} \quad (5.40)$$

Substituindo a EQ. 5.37 e a EQ. 5.38 na EQ. 5.36 e fazendo W igual a N , conforme o Método de Galerkin, obtém-se um sistema matricial de equações que pode ser escrito na forma:

$$M \frac{\partial a}{\partial t} + Ka = f \quad (5.41)$$

onde:

a é o vetor de incógnitas contendo a temperatura em todos os nós da malha;

M é a matriz de massa;

K é a matriz de rigidez;

f é o vetor de forças nodais.

Para cada elemento, essas matrizes podem ser obtidas pelas seguintes equações:

$$M^{(e)} = \int_{\Omega^{(e)}} \rho c N^T N \partial \Omega^{(e)} \quad (5.42)$$

$$K^{(e)} = \int_{\Omega^{(e)}} B^T D B \partial \Omega^{(e)} + \alpha \int_{\Gamma_q^{(e)}} N^T N \partial \Gamma_q^{(e)} \quad (5.43)$$

$$f^{(e)} = \int_{\Omega^{(e)}} N^T \rho r \partial \Omega^{(e)} - \int_{\Gamma_q^{(e)}} N^T \bar{q} \partial \Gamma_q^{(e)} + \int_{\Gamma_q^{(e)}} N^T \alpha \theta_f \partial \Gamma_q^{(e)} - \int_{\Gamma_q^{(e)}} n^T N^T q_n \partial \Gamma_q^{(e)} \quad (5.44)$$

No caso estacionário, a solução requer apenas a resolução do sistema de equações:

$$Ka = f \quad (5.45)$$

Obtidas as temperaturas nodais, obtêm-se os gradientes de temperatura e os fluxos de calor em cada ponto através das EQ. 5.38 e 5.40, respectivamente.

Para um problema transiente, a solução exige a integração no tempo da EQ. 5.41.

Usando um esquema de diferenças finitas trapezoidal generalizado obtém-se:

$$\left[\frac{M}{\Delta t} + \beta K \right] a_t = \beta f_t + (1 - \beta) f_{t-1} + \left[\frac{M}{\Delta t} - (1 - \beta) K \right] a_{t-1} \quad (5.46)$$

onde:

β define o *ponto de colocação* da EQ. 5.41, isto é:

$$a^\beta = \beta a_t + (1 - \beta) a_{t-1} \quad (5.47)$$

A EQ.5.47 permite obter o valor da temperatura no tempo t em função da temperatura no instante $(t-1)$ e dos valores das forças nos tempos t e $(t-1)$.

É possível demonstrar que o esquema trapezoidal utilizado na equação anterior é condicionalmente estável, convergindo para $\beta \geq 0,5$. Na prática recomenda-se utilizar $\beta = 2/3$ (Galerkin) ou $\beta = 1$.

5.3 Características do Programa CALTEMI

Este item descreve as principais características do programa CALTEMI no que se refere às propriedades térmicas dos materiais, aos tipos de elementos utilizáveis e às condições de contorno que podem ser adotadas na análise numérica.

5.3.1 Propriedades dos Materiais

O programa CALTEMI foi baseado na plataforma do programa CALTEP (Programa para o Cálculo Transitório da Equação de Poisson), desenvolvido no Centro Integrado de Métodos Numéricos em Engenharia (CIMNE) da Universidade Politécnica da Catalunha, na Espanha (CIMNE, 1997), que adota propriedades térmicas constantes para os materiais. O CALTEMI foi implementado para permitir a utilização da não-linearidade física do aço e do concreto. As curvas adotadas para a condutividade térmica, calor específico e massa específica destes materiais são aquelas mostradas no capítulo 2 deste trabalho.

5.3.2 Elementos utilizáveis

O programa CALTEMI aceita a discretização nos seguintes elementos isoparamétricos (FIG. 5.6):

- a) elemento triangular lagrangiano de 3 nós;
- b) elemento triangular serendípico de 6 nós;
- c) elemento quadrangular lagrangiano de 4 nós;
- d) elemento quadrangular serendípico de 8 nós.

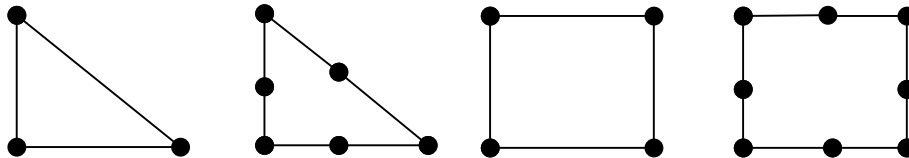


FIGURA 5.6 – Elementos utilizáveis no programa CALTEMI

Nesta dissertação foram utilizados os elementos quadrangulares lagrangianos de 4 nós, pois estes elementos empregados aos exemplos realizados por FIGUEIREDO JÚNIOR (2002) conduziram a bons resultados.

5.3.3 Condições de Contorno

No CALTEMI, são admitidas quatro formas distintas de condições de contorno na superfície:

- a) temperatura prescrita, representada pela EQ.5.26;
- b) fluxo de calor prescrito, representado pela EQ.5.27;
- c) condição de convecção no contorno, dada por:

$$-k \frac{\partial \theta}{\partial n} = h(\theta_s - \theta_f) \quad (5.48)$$

onde:

h é o coeficiente de convecção entre o ambiente e o material utilizado;

θ_f é a temperatura do ambiente, variável segundo a curva-padrão de temperatura dos gases;

d) condição de radiação no contorno, dada por:

$$-k \frac{\partial \theta}{\partial n} = \varepsilon_{res} \sigma (\theta_s^4 - \theta_f^4) \quad (5.49)$$

onde:

ε_{res} é a emissividade resultante entre a superfície e o meio externo, podendo ser tomada igual a 0,5;

σ é a constante de Stefan-Boltzmann, com valor de $5,669 \times 10^{-8} \text{ W/m}^2\text{K}^4$.

Neste trabalho, foi adotada a soma das condições de convecção e radiação para superfícies expostas diretamente ao incêndio, representada pela EQ. 5.50:

$$-k \frac{\partial \theta}{\partial n} = \alpha (\theta_s - \theta_f) \quad (5.50)$$

sendo α o coeficiente linearizado que leva em consideração tanto a convecção quanto a radiação, dado pela EQ.5.34.

No caso de superfícies diretamente expostas ao incêndio, como a convecção representa uma parcela muito pequena em relação à radiação, foi adotado, simplifcadamente, um coeficiente de convecção médio h igual a $25 \text{ W/m}^2\text{C}$.

6

ANÁLISE DE MODELOS

6.1 Introdução

Alguns pilares mistos parcialmente revestidos e pilares mistos de seção circular preenchidos por concreto submetidos ao incêndio foram estudados utilizando uma distribuição mais real de temperatura obtida por meio do programa CALTEMI. Neste capítulo serão apresentadas as resistências destes pilares submetidos a 30, 60, 90 e 120 minutos de incêndio padrão, calculadas utilizando esta distribuição de temperatura e o procedimento geral do Método Simplificado Analítico de Cálculo, descrito no item 4.2.2.A. Ou seja, pode-se considerar que se trata do uso de um Método Avançado de Cálculo, e assim será referido doravante neste trabalho, pois emprega um modelo bastante realístico de resposta térmica, embora o modelo de resposta mecânica seja o do Método Analítico Simplificado de Cálculo. Mas deve-se ter em mente que para um pilar

axialmente comprimido, portanto de comportamento relativamente óbvio, este último método representa um bom modelo de resposta mecânica.

Para efeito de comparação, foram obtidas também as resistências dos pilares mistos parcialmente revestidos por concreto por meio do Método Tabular e do Método Simplificado Analítico de Cálculo e dos pilares mistos de seção circular preenchidos por concreto por meio do Método Tabular.

Ainda para efeito de comparação, foram obtidas as resistências de alguns destes pilares com proteção contra incêndio proporcionada por argamassa jateada, neste caso sempre usando o Método Avançado de Cálculo.

6.2 Perfis Metálicos Adotados

Na composição dos pilares mistos, procurou-se adotar perfis metálicos com seção I (FIG. 6.1.a) e tubulares de seção circular (FIG. 6.1.b) de dimensões variadas possibilitando uma análise envolvendo uma gama de seções transversais usuais na prática.

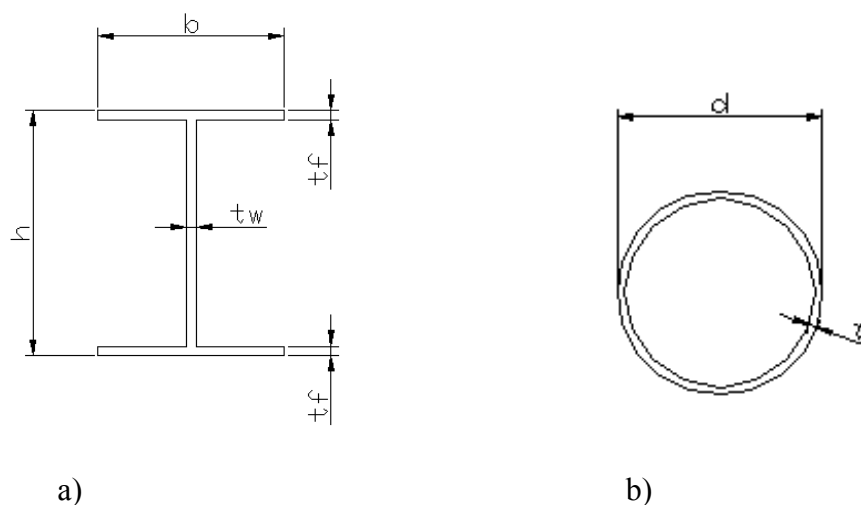


FIGURA 6.1 – Dimensões dos perfis metálicos

A TABELA 6.1 mostra os perfis metálicos utilizados nas análises.

TABELA 6.1 – Perfis metálicos utilizados na composição dos pilares mistos

Perfis Metálicos	
Seção I Altura (mm) x Massa (kg/m)	$h \times b \times t_f \times t_w$ (FIG. 6.1.a)
PS 400x62	400x300x8,0x8,0
VE 500x68	500x250x9,5x8
CE 250x49	250x250x9,5x6,35
CE 300x76	300x300x12,5x8,0
W 610x174	616x325x21,6x14,0
HP 310x93	303x308x13,1x13,1
HP 360x132	351x373x15,6x15,6
Seções Tubulares Circulares : $d \times t$ (FIG. 6.1.b)	
219,1x12,7	
273x9,3	
355,6x11,1	

6.3 Seções Mistas Analisadas

Para todos os pilares mistos foram adotados os seguintes materiais:

- a) concreto com resistência característica à compressão igual a 30 MPa;
- b) armadura com resistência ao escoamento de 500 MPa;
- c) perfil metálico com resistência ao escoamento de 300 MPa.

Adotou-se para todos os pilares o comprimento real (de eixo a eixo de vigas) de 4 metros e o comprimento de flambagem em situação de incêndio igual à metade deste valor, ou seja, 2 metros.

Nos pilares parcialmente revestidos por concreto a flambagem ocorre em relação ao eixo de menor inércia.

Nos itens 6.3.1 e 6.3.2 são mostrados a armadura utilizada, o cobrimento de concreto e o perfil metálico adotados em cada pilar.

6.3.1 Pilares Parcialmente Revestidos por Concreto

A. PS 400x62 (FIG. 6.2)

Foram adotadas 16 barras com diâmetro de 16 mm como armadura longitudinal do pilar parcialmente revestido formado com o perfil PS 400x62.

A seção transversal deste pilar apresenta as seguintes áreas:

- a) área total – $A = 1200,00 \text{ cm}^2$;
- b) área do perfil metálico – $A_a = 78,72 \text{ cm}^2$;
- c) área do concreto – $A_c = 1089,11 \text{ cm}^2$;
- d) área de armadura – $A_s = 32,17 \text{ cm}^2$.

Através dessas áreas obtém-se as taxas utilizadas na verificação da aplicabilidade dos métodos de dimensionamento dos pilares mistos à temperatura ambiente e em situação de incêndio:

$$A_s/A_c = 2,95\%$$

$$A_s/(A_s+A_c) = 2,87\%$$

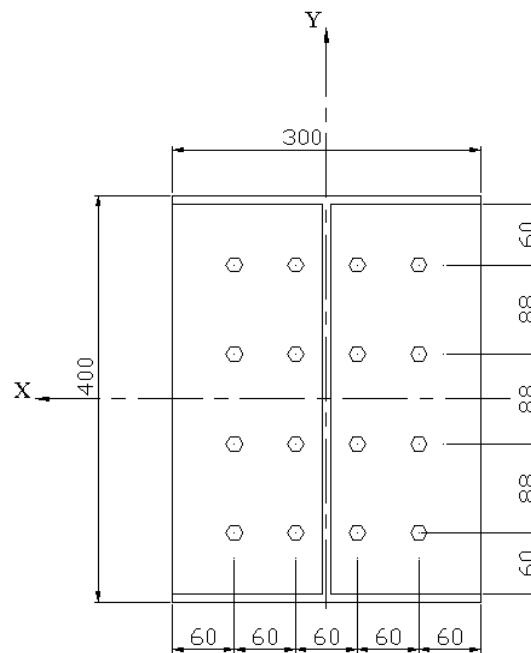


FIGURA 6.2 – Pilar parcialmente revestido formado com perfil PS 400x62

Como mostra a FIG. 6.2, a distância mínima do eixo da armadura à face do concreto u_s é igual a 60 mm.

B. VE 500x68 (FIG. 6.3)

Para o pilar parcialmente revestido formado com o perfil VE 500x68, foram adotadas 12 barras com diâmetro de 20 mm como armadura longitudinal.

A seção transversal deste pilar apresenta as seguintes áreas:

- a) área total – $A = 1250,00 \text{ cm}^2$;
- b) área do perfil metálico – $A_a = 86,00 \text{ cm}^2$;
- c) área do concreto – $A_c = 1126,30 \text{ cm}^2$;
- d) área de armadura – $A_s = 37,70 \text{ cm}^2$.

Assim, para a verificação da aplicabilidade dos métodos de dimensionamento dos pilares mistos em temperatura ambiente e em situação de incêndio:

$$A_s/A_c = 3,35\%$$

$$A_s/(A_s+A_c) = 3,24\%$$

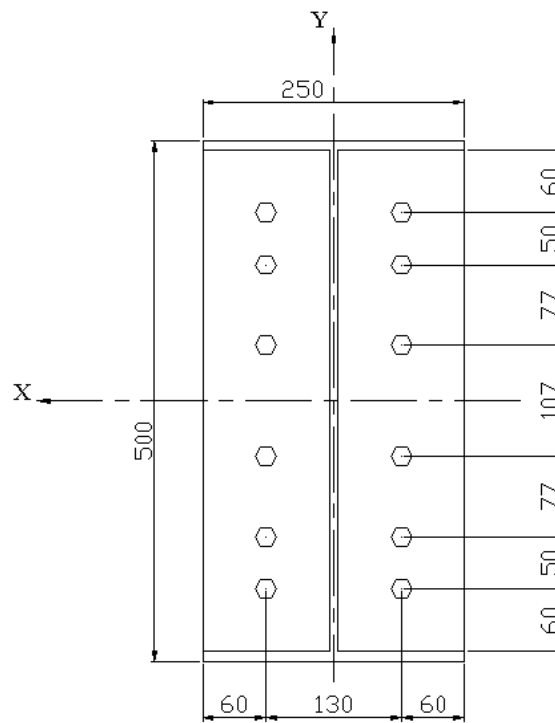


FIGURA 6.3 – Pilar parcialmente revestido formado com perfil VE 500x68

Como mostra a FIG. 6.3, a distância mínima do eixo da armadura à face do concreto u_s é igual a 60 mm.

C. CE 250x49 (FIG. 6.4)

A armadura longitudinal do pilar parcialmente revestido formado com o perfil CE 250x49 é composta de 4 barras de 20 mm de diâmetro.

A seção transversal deste pilar apresenta as seguintes áreas:

- a) área total – $A = 625,00 \text{ cm}^2$;
- b) área do perfil metálico – $A_a = 62,17 \text{ cm}^2$;
- c) área do concreto – $A_c = 543,20 \text{ cm}^2$;
- d) área de armadura – $A_s = 19,63 \text{ cm}^2$.

Então, as taxas de armadura para esse pilar são:

$$A_s/A_c = 3,61\%$$

$$A_s/(A_s+A_c) = 3,49\%.$$

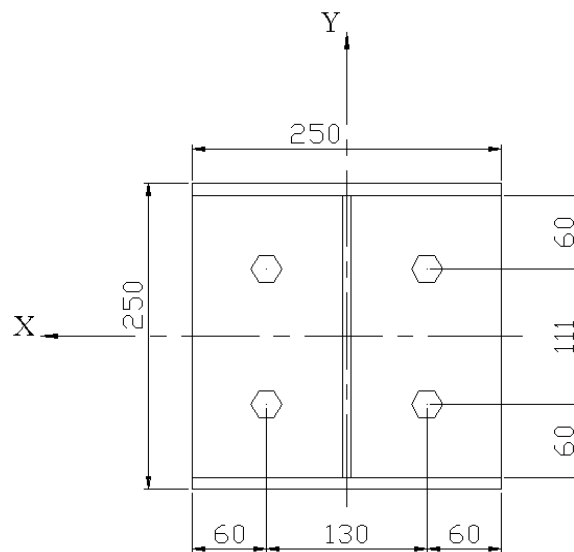


FIGURA 6.4 – Pilar parcialmente revestido formado com perfil CE 250x49

Como mostra a FIG. 6.4, a distância mínima do eixo da armadura à face do concreto u_s é igual a 60 mm.

D. CE 300x76 (FIG. 6.5)

A armadura longitudinal do pilar parcialmente revestido formado com o perfil CE 300x76 é composta de 8 barras de 20 mm de diâmetro.

A seção transversal deste pilar apresenta as seguintes áreas:

- a) área total – $A = 900,00 \text{ cm}^2$;
- b) área do perfil metálico – $A_a = 97,00 \text{ cm}^2$;
- c) área do concreto – $A_c = 777,87 \text{ cm}^2$;
- d) área de armadura – $A_s = 25,13 \text{ cm}^2$.

Assim, para a verificação da aplicabilidade dos métodos de dimensionamento dos pilares mistos em temperatura ambiente e em situação de incêndio:

$$A_s/A_c = 3,23\%$$

$$A_s/(A_s+A_c) = 3,13\%.$$

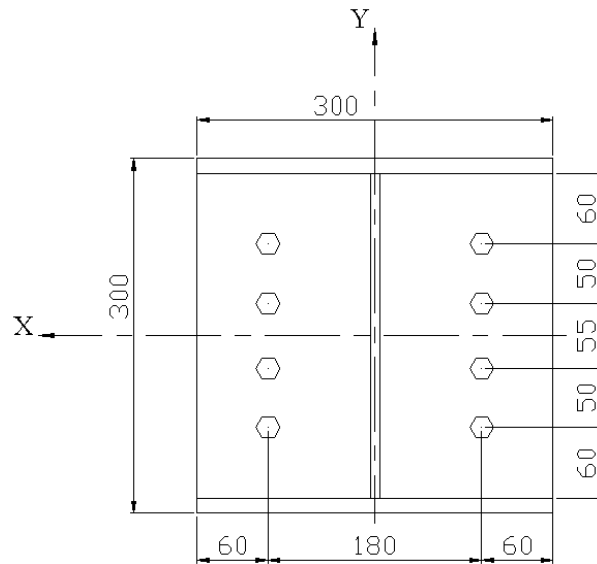


FIGURA 6.5 – Pilar parcialmente revestido formado com perfil CE 300x76

Como mostra a FIG. 6.5, a distância mínima do eixo da armadura à face do concreto u_s é igual a 60 mm.

E. W 610x174 (FIG. 6.6)

Para o pilar parcialmente revestido formado com o perfil W 610x174, foram adotadas 16 barras com diâmetro de 22 mm como armadura longitudinal.

A seção transversal deste pilar apresenta as seguintes áreas:

- a) área total – $A = 2002,00 \text{ cm}^2$;
- b) área do perfil metálico – $A_a = 222,30 \text{ cm}^2$;
- c) área do concreto – $A_c = 1651,02 \text{ cm}^2$;
- d) área de armadura – $A_s = 60,82 \text{ cm}^2$.

Então, as taxas de armadura para esse pilar são:

$$A_s/A_c = 3,53\%$$

$$A_s/(A_s+A_c) = 3,42\%.$$

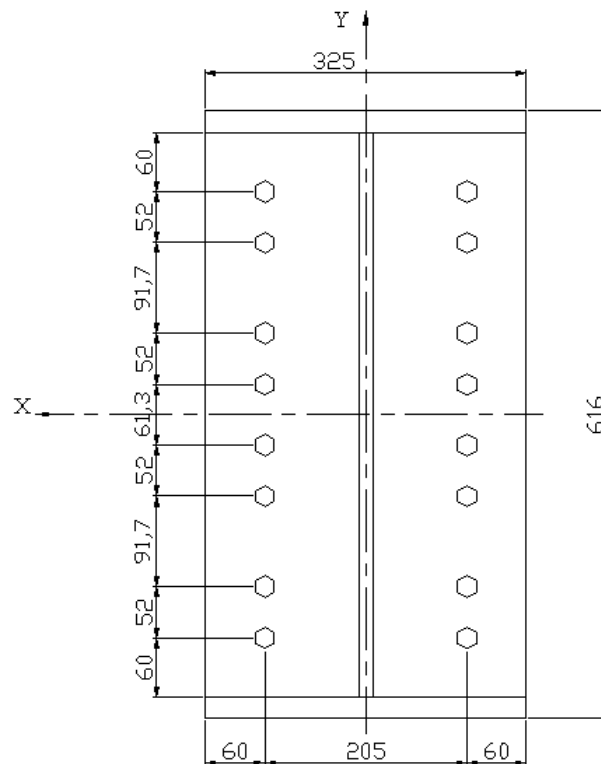


FIGURA 6.6 – Pilar parcialmente revestido formado com perfil W 610x174

Como mostra a FIG. 6.6, a distância mínima do eixo da armadura à face do concreto u_s é igual a 60 mm.

F. HP 310x93 (FIG. 6.7)

Foram adotadas 8 barras com diâmetro de 20 mm como armadura longitudinal do pilar parcialmente revestido formado com o perfil HP 310x93.

A seção transversal deste pilar apresenta as seguintes áreas:

- a) área total – $A = 933,24 \text{ cm}^2$;
- b) área do perfil metálico – $A_a = 119,70 \text{ cm}^2$;
- c) área do concreto – $A_c = 788,41 \text{ cm}^2$;
- d) área de armadura – $A_s = 25,13 \text{ cm}^2$.

Assim, para a verificação da aplicabilidade dos métodos de dimensionamento dos pilares mistos em temperatura ambiente e em situação de incêndio:

$$A_s/A_c = 3,18\%$$

$$A_s/(A_s+A_c) = 3,09\%.$$

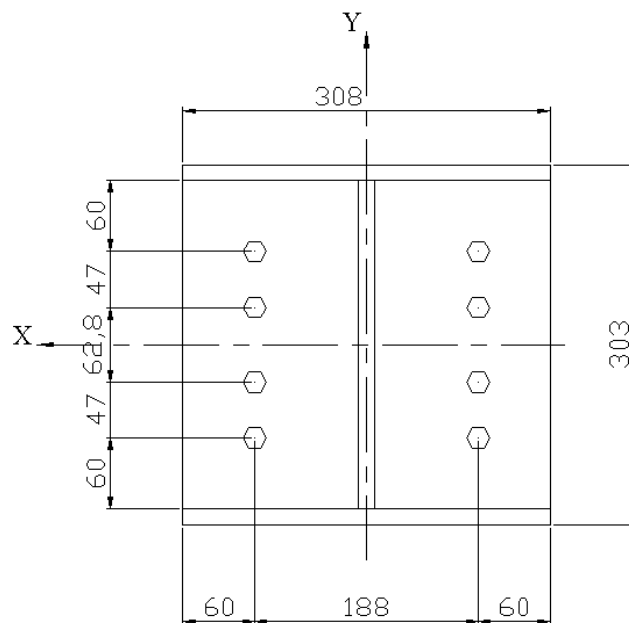


FIGURA 6.7 – Pilar parcialmente revestido formado com perfil HP 310x93

Como mostra a FIG. 6.7, a distância mínima do eixo da armadura à face do concreto u_s é igual a 60 mm.

G. HP 360x132 (FIG. 6.8)

A armadura longitudinal do pilar parcialmente revestido formado com o perfil HP 360x132 é composta de 8 barras de 25 mm de diâmetro.

A seção transversal deste pilar apresenta as seguintes áreas:

- a) área total – $A = 1309,23 \text{ cm}^2$;
- b) área do perfil metálico – $A_a = 169,00 \text{ cm}^2$;
- c) área do concreto – $A_c = 1100,96 \text{ cm}^2$;
- d) área de armadura – $A_s = 39,27 \text{ cm}^2$.

Assim, para a verificação da aplicabilidade dos métodos de dimensionamento dos pilares mistos em temperatura ambiente e em situação de incêndio:

$$A_s/A_c = 3,56\%$$

$$A_s/(A_s+A_c) = 3,44\%.$$

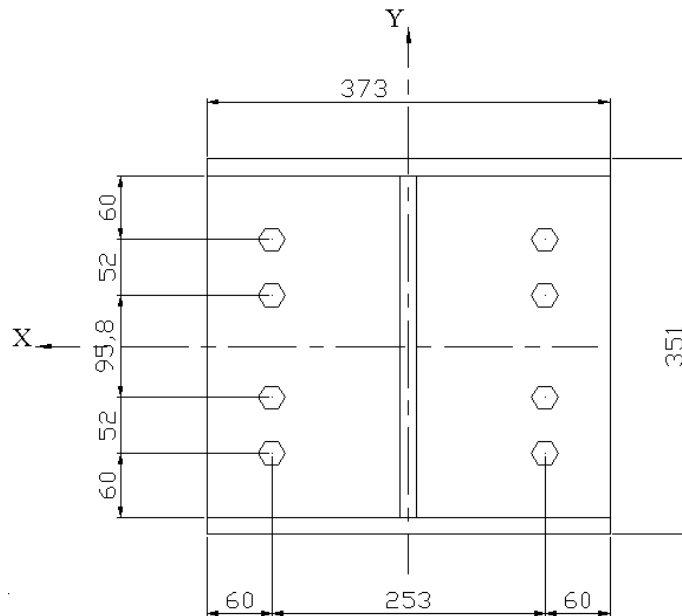


FIGURA 6.8 – Pilar parcialmente revestido formado com perfil HP 360x132

Como mostra a FIG. 6.8, a distância mínima do eixo da armadura à face do concreto u_s é igual a 60 mm.

6.3.2 Pilares de Seção Circular Preenchidos por Concreto

A. Perfil Tubular 219,1x12,7 (FIG. 6.9)

A armadura longitudinal do pilar preenchido por concreto formado com o perfil tubular circular 219,1x12,7 é composta de 4 barras de 12,5 mm de diâmetro.

A seção transversal deste pilar apresenta as seguintes áreas:

- a) área total – $A = 377,03 \text{ cm}^2$;
- b) área do perfil metálico – $A_a = 82,35 \text{ cm}^2$;
- c) área do concreto – $A_c = 289,77 \text{ cm}^2$;
- d) área de armadura – $A_s = 4,91 \text{ cm}^2$.

Então, as taxas de armadura para esse pilar são:

$$A_s/A_c = 1,69\%$$

$$A_s/(A_s+A_c) = 1,67\%.$$

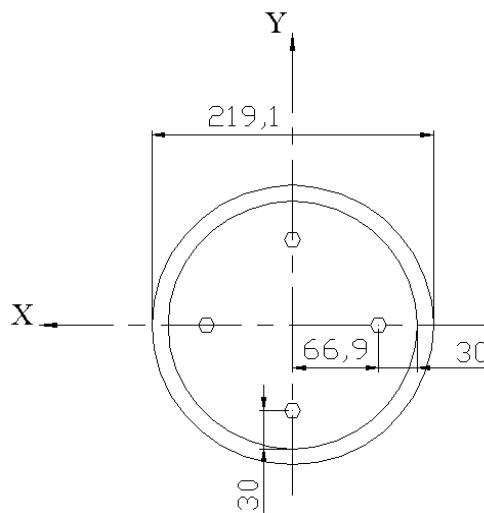


FIGURA 6.9 – Pilar preenchido por concreto formado com perfil tubular 219,1x12,7

Como mostra a FIG. 6.9, a distância mínima do eixo da armadura à face do concreto u_s é igual a 30 mm.

B. Perfil tubular 273x9,3 (FIG. 6.10)

A armadura longitudinal do pilar preenchido por concreto formado com o perfil tubular circular 273x9,3 é composta de 4 barras de 25 mm de diâmetro.

A seção transversal deste pilar apresenta as seguintes áreas:

- a) área total – $A = 585,34 \text{ cm}^2$;
- b) área do perfil metálico – $A_a = 77,04 \text{ cm}^2$;
- c) área do concreto – $A_c = 488,67 \text{ cm}^2$;
- d) área de armadura – $A_s = 19,63 \text{ cm}^2$.

Então, as taxas de armadura para esse pilar são:

$$A_s/A_c = 4,02\%$$

$$A_s/(A_s+A_c) = 3,86\%.$$

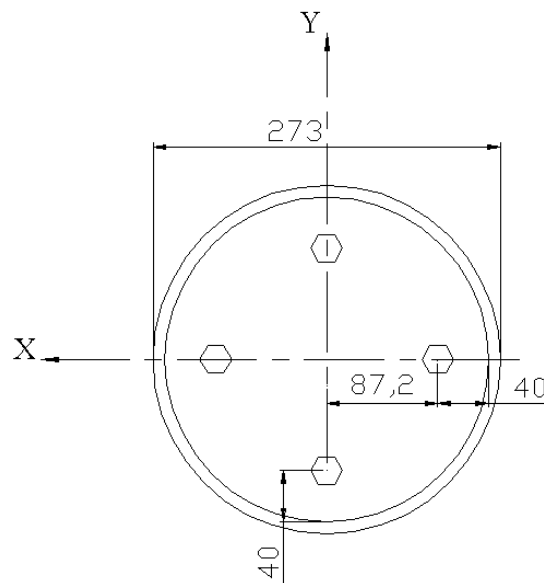


FIGURA 6.10 – Pilar preenchido por concreto formado com perfil tubular 273x9,3

Como mostra a FIG. 6.10, a distância mínima do eixo da armadura à face do concreto u_s é igual a 40 mm.

C. Perfil tubular 355,6x11,1 (FIG. 6.11)

A armadura longitudinal do pilar preenchido por concreto formado com o perfil tubular circular 355,6x11,1 é composta de 8 barras de 32 mm de diâmetro.

A seção transversal deste pilar apresenta as seguintes áreas:

- a) área total – $A = 993,15 \text{ cm}^2$;
- b) área do perfil metálico – $A_a = 120,13 \text{ cm}^2$;
- c) área do concreto – $A_c = 808,68 \text{ cm}^2$;
- d) área de armadura – $A_s = 64,34 \text{ cm}^2$.

Então, as taxas de armadura para esse pilar são:

$$A_s/A_c = 7,96\%$$

$$A_s/(A_s+A_c) = 7,37\%.$$

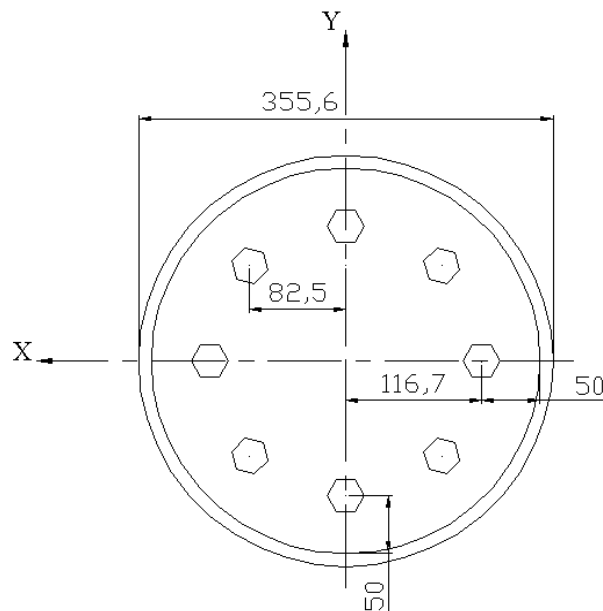


FIGURA 6.11 – Pilar preenchido por concreto formado com perfil tubular 355,6x11,1

Como mostra a FIG. 6.11, a distância mínima do eixo da armadura à face do concreto u_s é igual a 50 mm.

6.4 Temperatura da Seção Mista Via Programa CALTEMI

6.4.1 Generalidades

As temperaturas de todos os pilares descritos na seção 6.3, submetidos ao incêndio padrão, com todo o perímetro exposto ao fogo e sem proteção térmica, foram obtidas usando o programa CALTEMI. Os pilares mistos parcialmente revestidos por concreto formados com os perfis PS 400x62, VE 500x68 e HP 360x132 foram analisados com as mesas protegidas e o pilar preenchido por concreto formado com o perfil tubular circular 273x9,3 foi analisado com todo o perímetro envolvido por material de proteção térmica constituído por argamassa jateada.

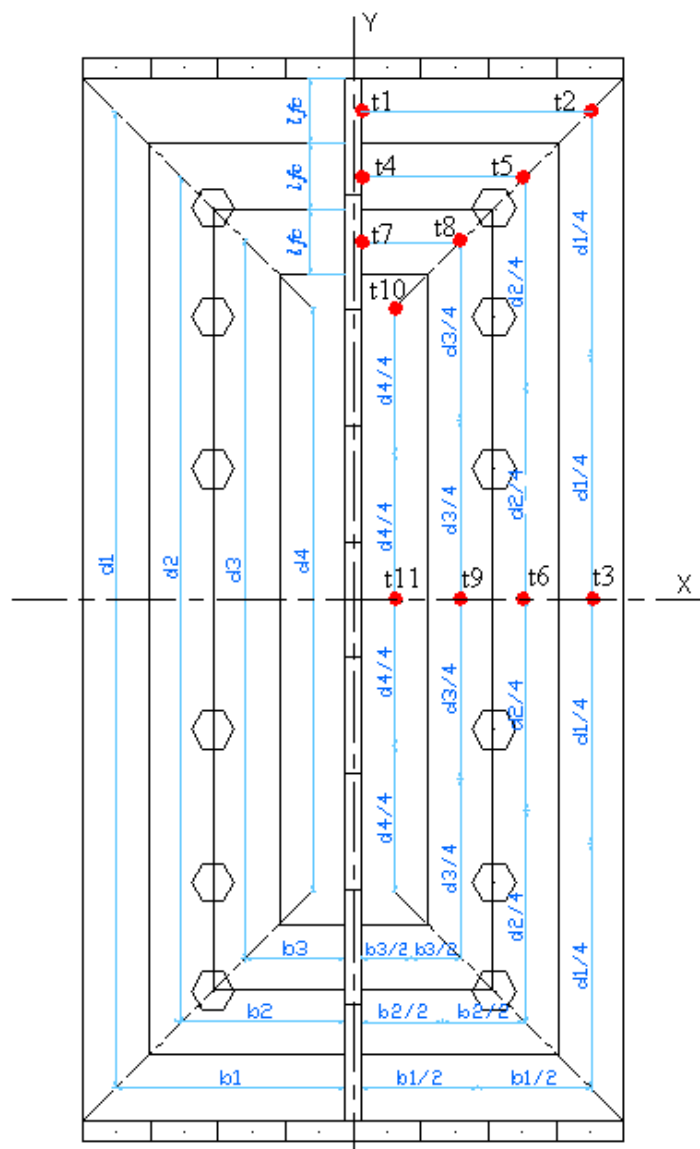
Para a argamassa, adotou-se calor específico de 1100 J/kg°C, condutividade térmica de 0,15 W/m°C, massa específica de 300 kg/m³ e 15 mm de espessura, exceto para o pilar misto formado com o perfil circular 273x9,3, para o qual foi adotada a espessura de 7,5 mm, já que 15 mm de espessura conduziram a temperaturas que não provocam perda de resistência do perfil metálico, ou seja, inferiores a 400°C.

A seguir, nos itens 6.4.2 e 6.4.3 são mostradas, respectivamente, as temperaturas obtidas com o programa CALTEMI nos pilares mistos parcialmente revestidos por concreto e de seção circular preenchidos por concreto utilizadas nos cálculos. Nestes itens, são descritos também o número de nós e de elementos das malhas geradas para as seções transversais dos pilares. Vale ressaltar que o número de elementos da malha foi determinado após a verificação de que este número conduzia a bons resultados, já que após a realização de processamentos com malhas mais refinadas os resultados continuaram praticamente os mesmos.

No anexo 1, a título de ilustração, são apresentadas as temperaturas obtidas através do programa, em escala de cores, que deram origem aos valores citados.

6.4.2 Pilares Parcialmente Revestidos por Concreto

As mesas e a alma do pilar metálico foram divididas em partes iguais e, para cada uma dessas partes, foi obtida a temperatura do nó central para o cálculo da resistência do perfil (FIG. 6.12).



Sendo l_{fc} a largura da faixa de concreto e numerando as faixas de fora para dentro:

$$\text{temperatura da faixa 1} = [t1x b1/2 + t2x (b1/2 + d1/4) + t3x d1/4] / (b1 + d1/2)$$

$$\text{temperatura da faixa 2} = [t4x b2/2 + t5x (b2/2 + d2/4) + t6x d2/4] / (b2 + d2/2)$$

$$\text{temperatura da faixa 3} = [t7x b3/2 + t8x (b3/2 + d3/4) + t9x d3/4] / (b3 + d3/2)$$

$$\text{temperatura da faixa 4} = [t10x d4/4 + t11x d4/4] / d4/2$$

FIGURA 6.12 – Divisão da seção transversal do pilar e temperaturas adotadas para as faixas de concreto

O concreto foi dividido em faixas de mesma largura. Como os pilares mistos parcialmente revestidos apresentaram diferenças significativas entre as temperaturas do concreto situado próximo às quinas da seção e sobre seu eixo x, adotou-se, como a temperatura da faixa, a média ponderada das seguintes temperaturas (FIG. 6.12):

- a) do nó central dessa faixa situado sobre o eixo x do perfil metálico;
- b) próxima a alma do perfil;
- c) do nó situado “na quina” da faixa.

Quanto à armadura, foi adotada como a temperatura da barra a temperatura do nó central da mesma.

A. PS 400x62 (FIG. 6.13 e FIG. 6.14)

Para o pilar parcialmente revestido formado com perfil PS 400x62 sem proteção térmica foi gerada uma malha com 2793 nós e 2736 elementos.

A alma do perfil PS 400x62 foi dividida em 10 partes e as mesas em 11 partes iguais. Adotou-se para o concreto 5 faixas. As temperaturas obtidas em 30, 60, 90 e 120 minutos de incêndio em cada trecho da seção transversal do pilar sem proteção estão indicadas na FIG. 6.13.

Para o pilar parcialmente revestido formado com perfil PS 400x62 protegido com argamassa jateada, foi gerada uma malha com 2993 nós e 2922 elementos.

Neste caso, a alma e as mesas do perfil PS 400x62 foram divididas em 10 partes iguais e o concreto em 5 faixas. As temperaturas obtidas em 30, 60, 90 e 120 minutos de incêndio em cada trecho da seção transversal do pilar com proteção de argamassa jateada, estão indicadas na FIG. 6.14.

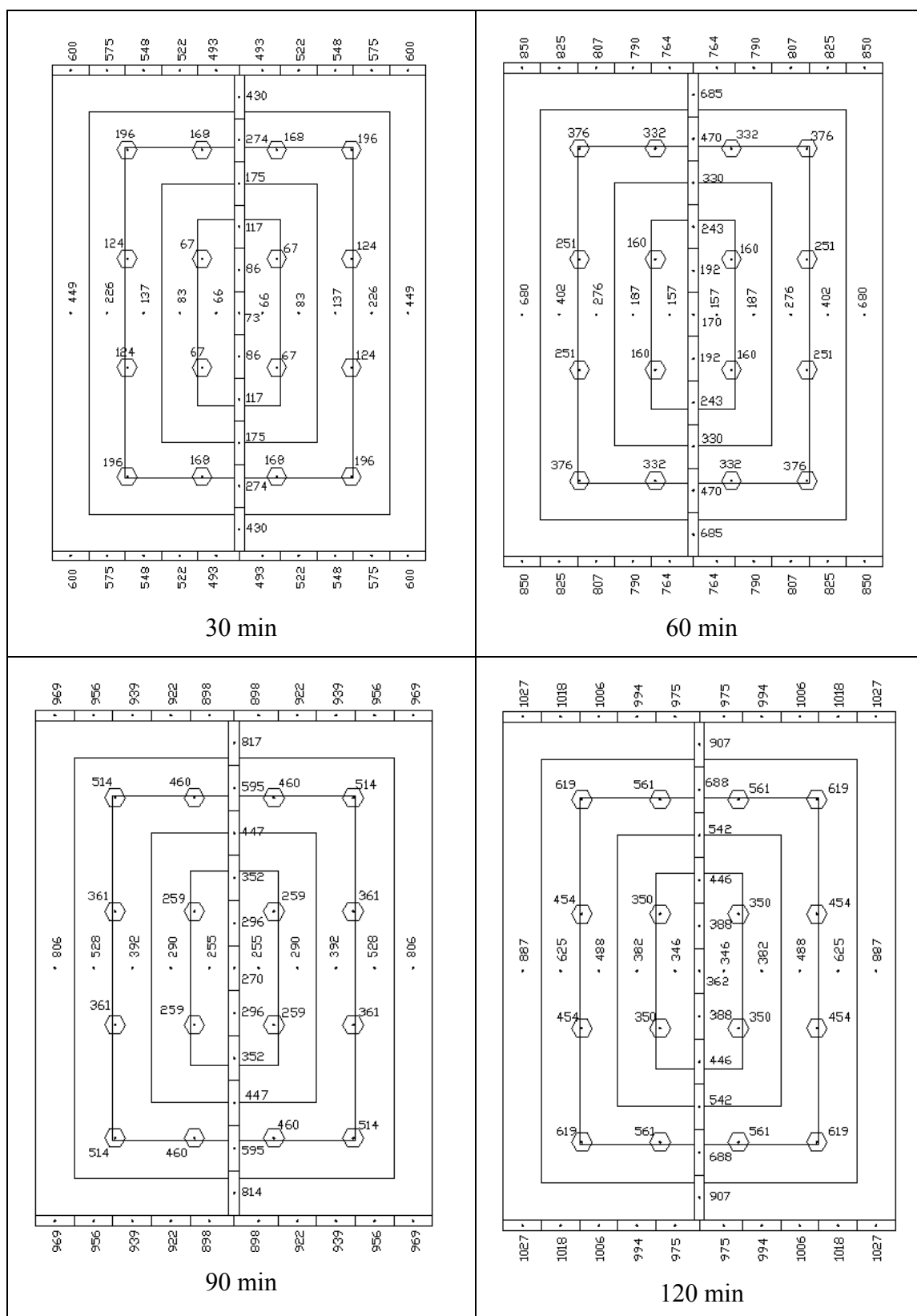


FIGURA 6.13 – Temperatura do pilar misto formado com o perfil PS 400x62 sem proteção térmica, em °C

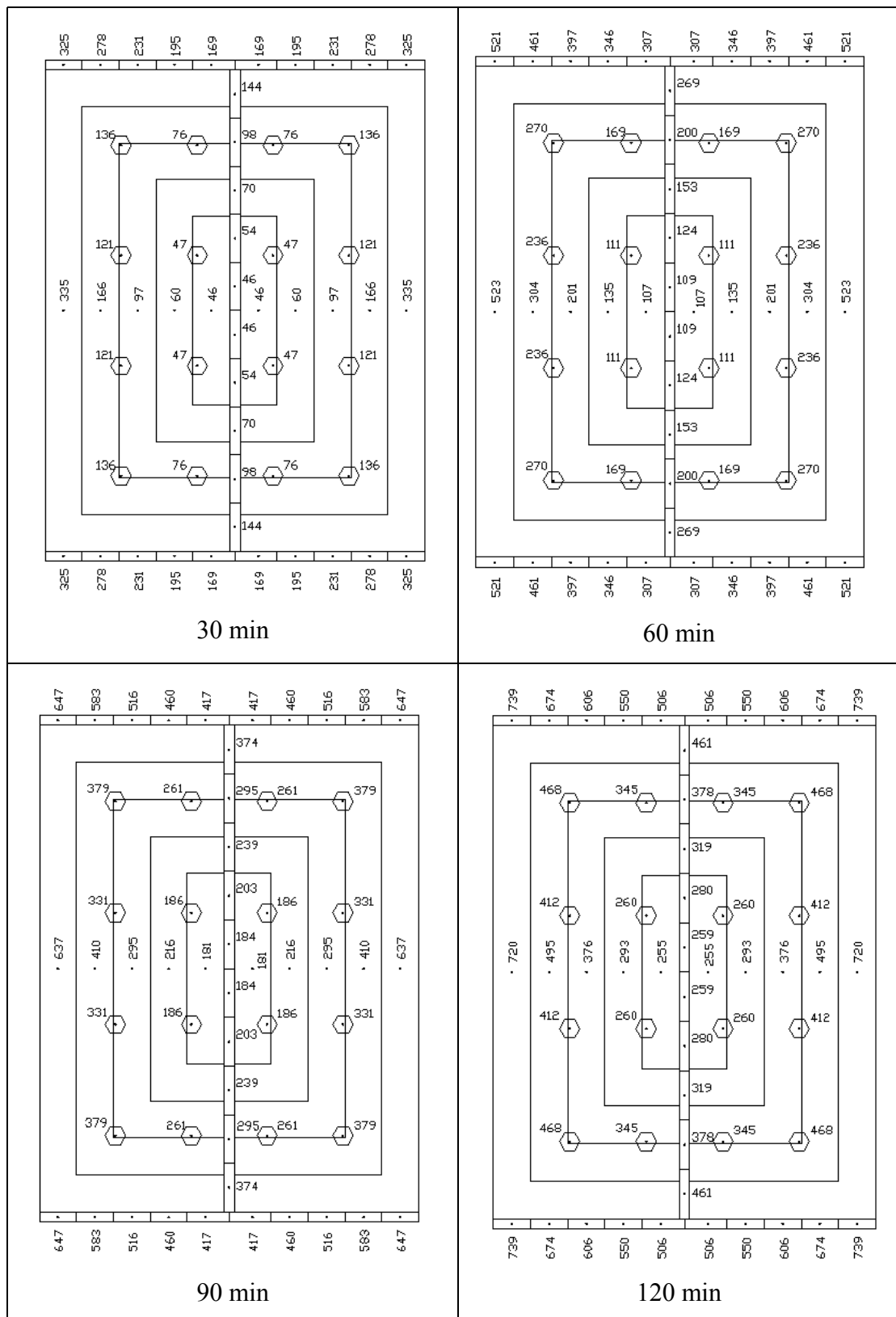


FIGURA 6.14 – Temperatura do pilar misto formado com o perfil PS 400x62 com proteção de argamassa jateada, em °C

B. VE 500x68 (FIG. 6.15 e FIG. 6.16)

Para o pilar parcialmente revestido formado com perfil VE 500x68 sem proteção térmica foi gerada uma malha com 2399 nós e 2306 elementos.

As mesas e a alma do perfil VE 500x68 foram divididas em 10 partes iguais e o concreto em 5 faixas. As temperaturas obtidas em cada trecho da seção transversal do pilar sem proteção estão indicadas na FIG. 6.15.

Para o pilar parcialmente revestido formado com perfil VE 500x68 protegido com argamassa jateada foi gerada uma malha com 2155 nós e 2086 elementos.

Neste caso, as mesas do perfil foram divididas em 8 partes e a alma em 9 partes iguais. O concreto foi dividido em 4 faixas. As temperaturas obtidas em cada trecho da seção transversal do pilar com proteção de argamassa jateada estão indicadas na FIG. 6.16.

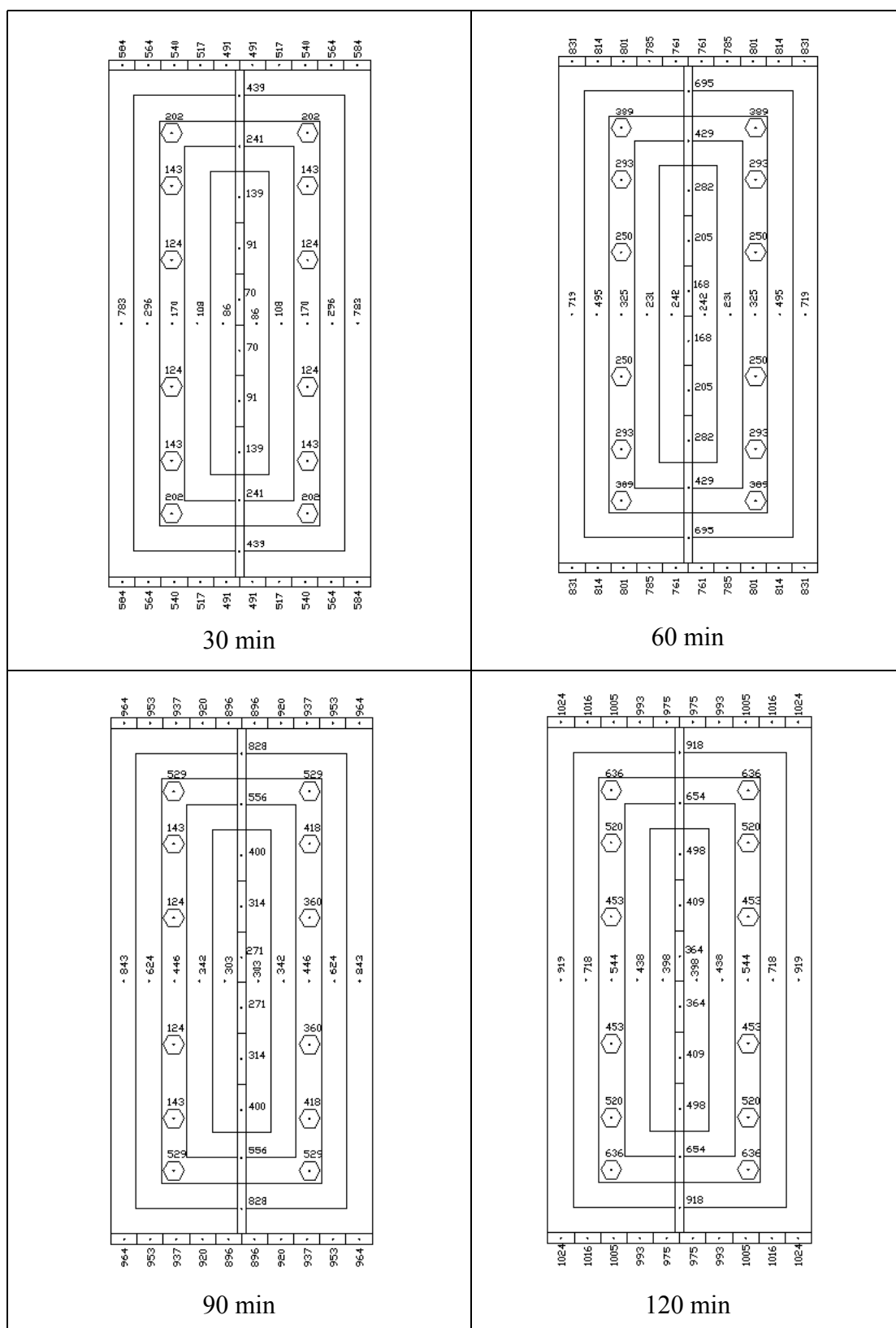


FIGURA 6.15 – Temperatura do pilar misto formado com o perfil VE 500x68 sem proteção térmica, em °C

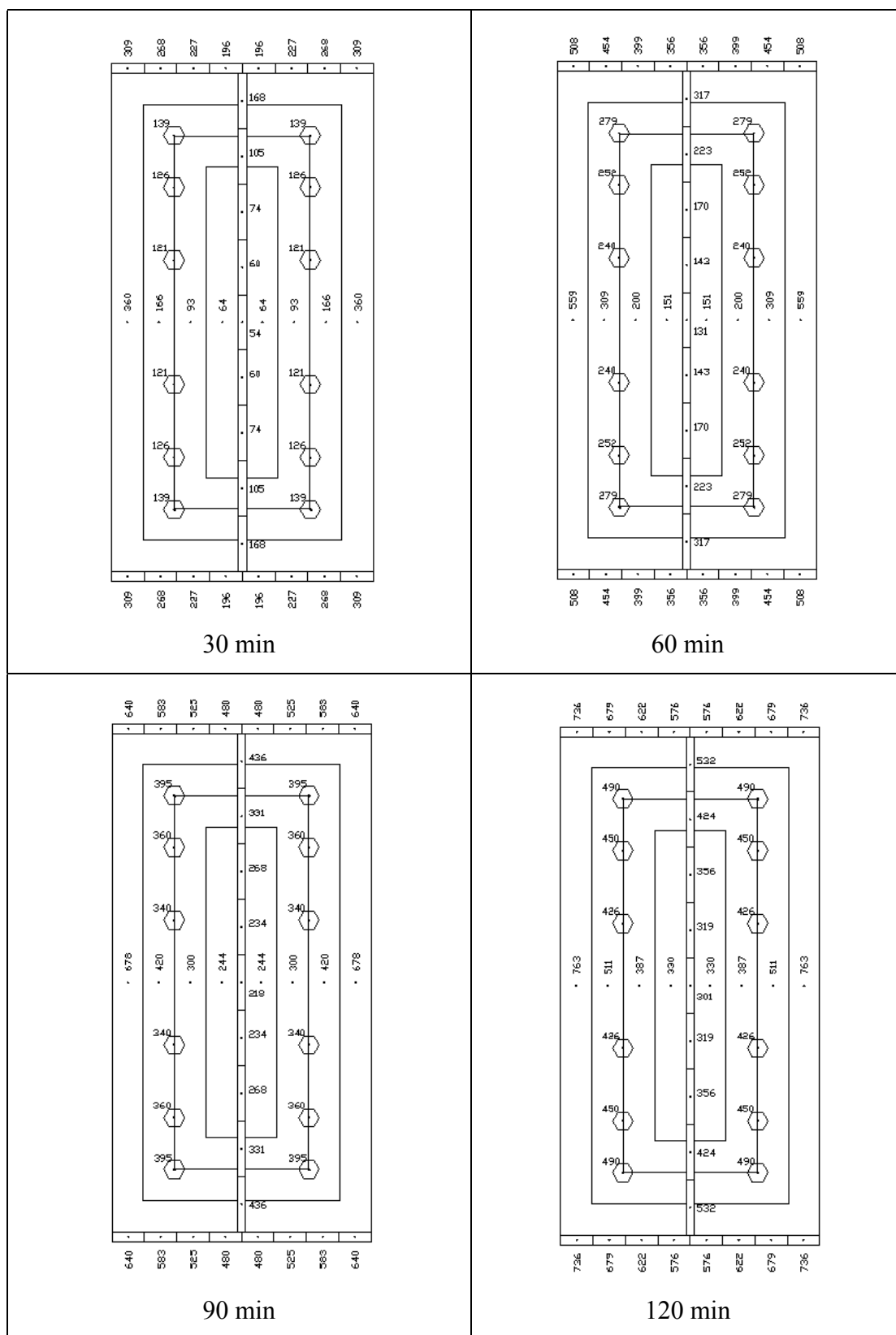


FIGURA 6.16 – Temperatura do pilar misto formado com o perfil VE 500x68 com proteção de argamassa jateada, em °C

C. CE 250x49 (FIG. 6.17)

Para o pilar parcialmente revestido formado com perfil CE 250x49 foi gerada uma malha com 1875 nós e 1816 elementos.

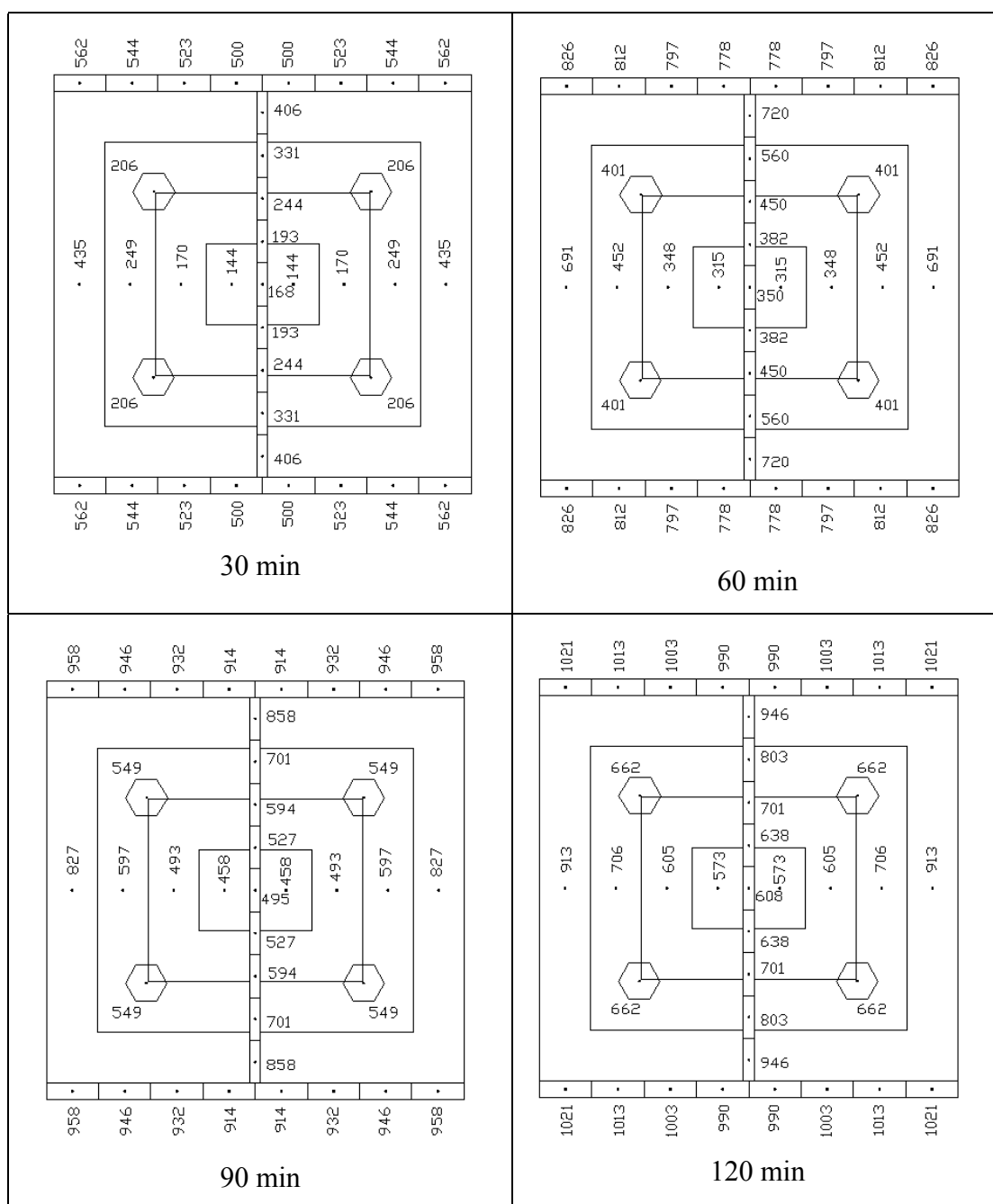


FIGURA 6.17 – Temperatura do pilar misto formado com o perfil CE 250x49, em °C

As mesas do perfil foram divididas em 8 partes e a alma 9 partes iguais. O concreto foi dividido em 4 faixas. As temperaturas obtidas em cada trecho da seção transversal do pilar estão indicadas na FIG. 6.17.

D. CE 300x76 (FIG. 6.18)

Para o pilar parcialmente revestido formado com perfil CE 300x76 foi gerada uma malha com 1933 nós e 1856 elementos.

As mesas do perfil CE 300x76 foram divididas em 8 partes e a alma 11 partes iguais. O concreto foi dividido em 4 faixas. As temperaturas obtidas em cada trecho da seção transversal do pilar estão indicadas na FIG. 6.18.

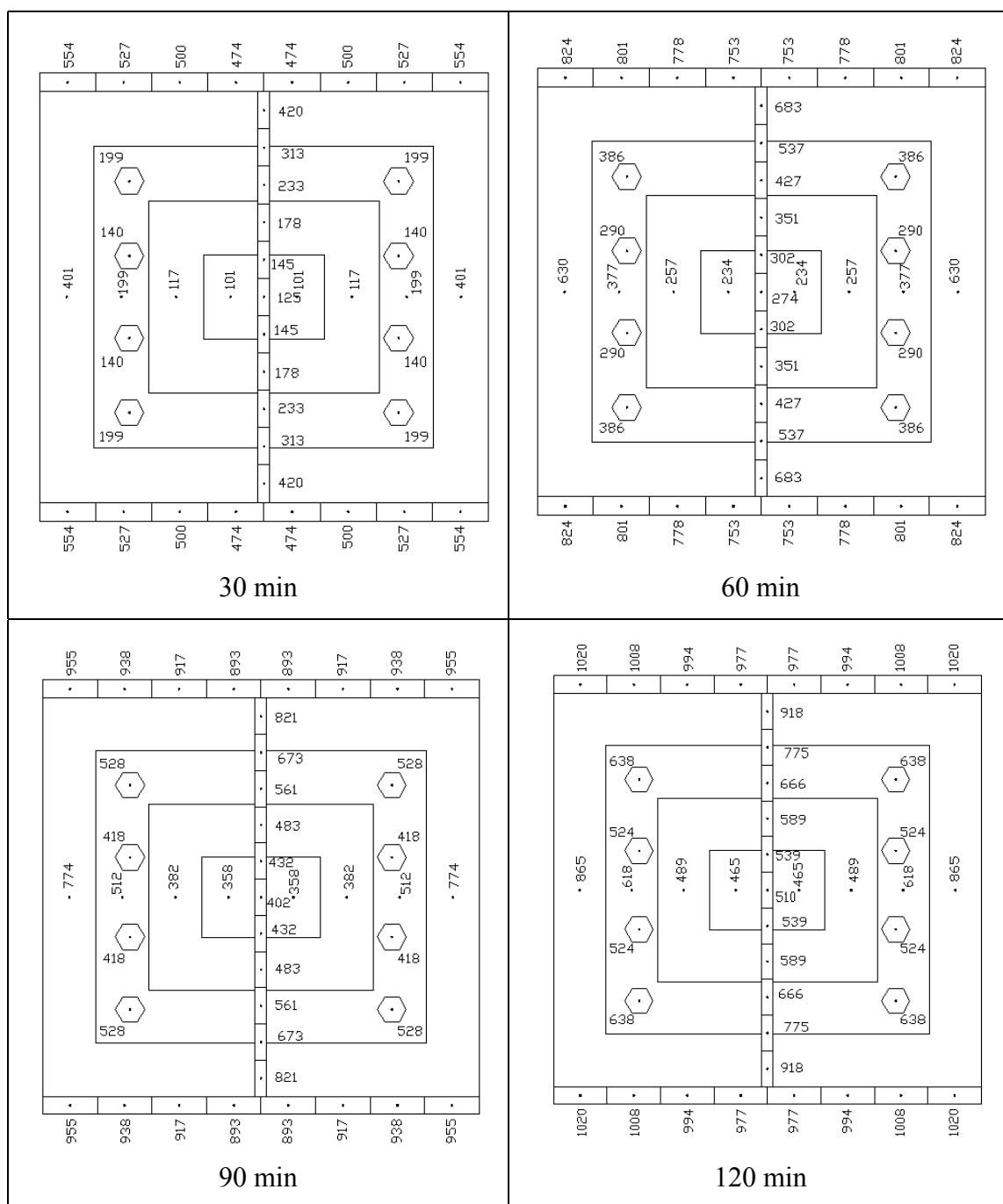


FIGURA 6.18 – Temperatura do pilar misto formado com o perfil CE 300x76, em °C

E. W 610x174 (FIG. 6.19)

Para o pilar parcialmente revestido formado com perfil W 610x174 foi gerada uma malha com 2391 nós e 2330 elementos.

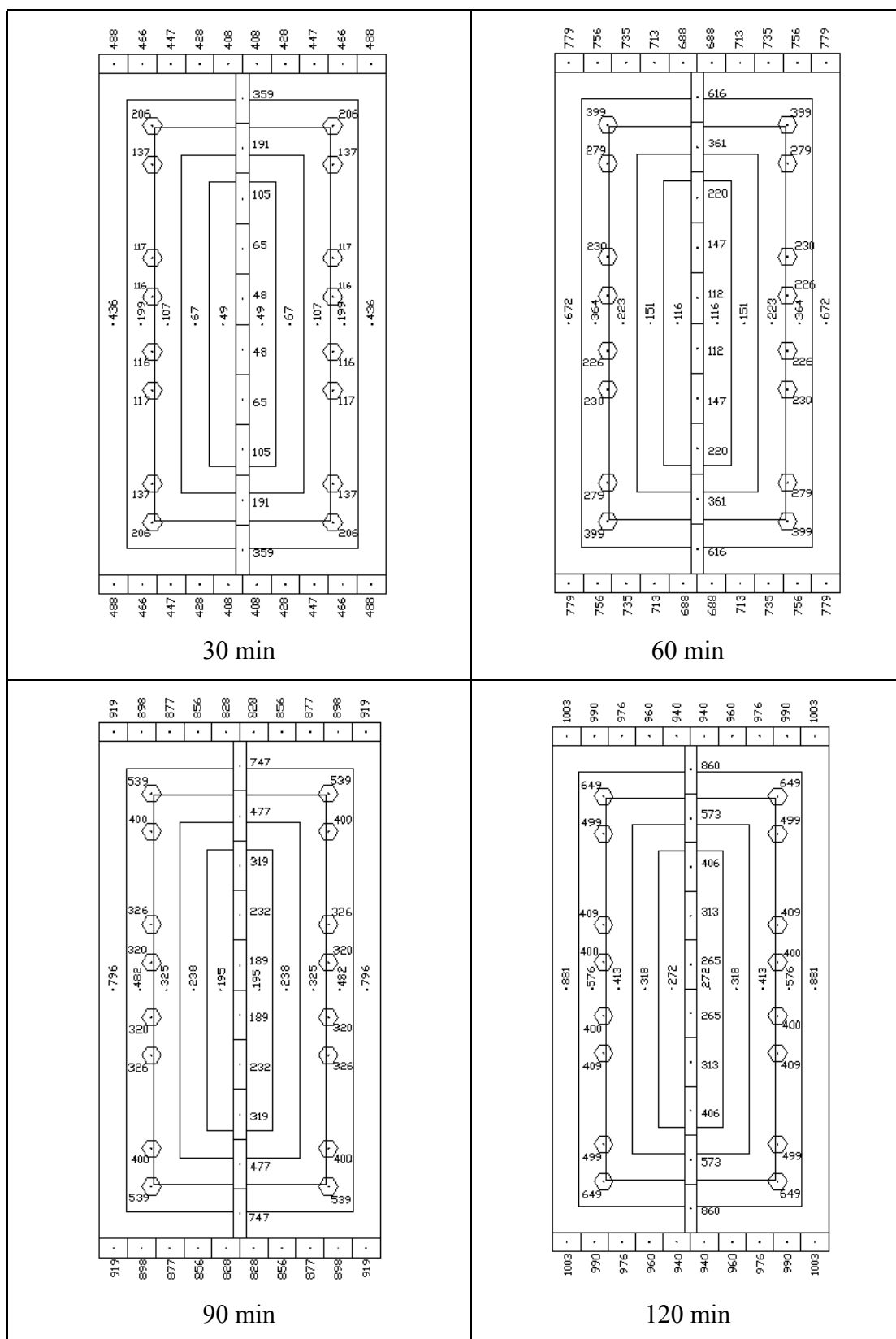


FIGURA 6.19 – Temperatura do pilar misto formado com o perfil W 610x174, em °C

As mesas e a alma do perfil W 610x174 foram divididas em 10 partes iguais. O concreto foi dividido em 5 faixas. As temperaturas obtidas em cada trecho da seção transversal do pilar estão indicadas na FIG. 6.19.

F. HP 310x93 (FIG. 6.20)

Para o pilar parcialmente revestido formado com perfil HP 310x93 foi gerada uma malha com 1531 nós e 1470 elementos.

As mesas do perfil HP 310x93 foram divididas em 10 partes e a alma 11 partes iguais. O concreto foi dividido em 5 faixas. As temperaturas obtidas em cada trecho da seção transversal do pilar estão indicadas na FIG. 6.20.

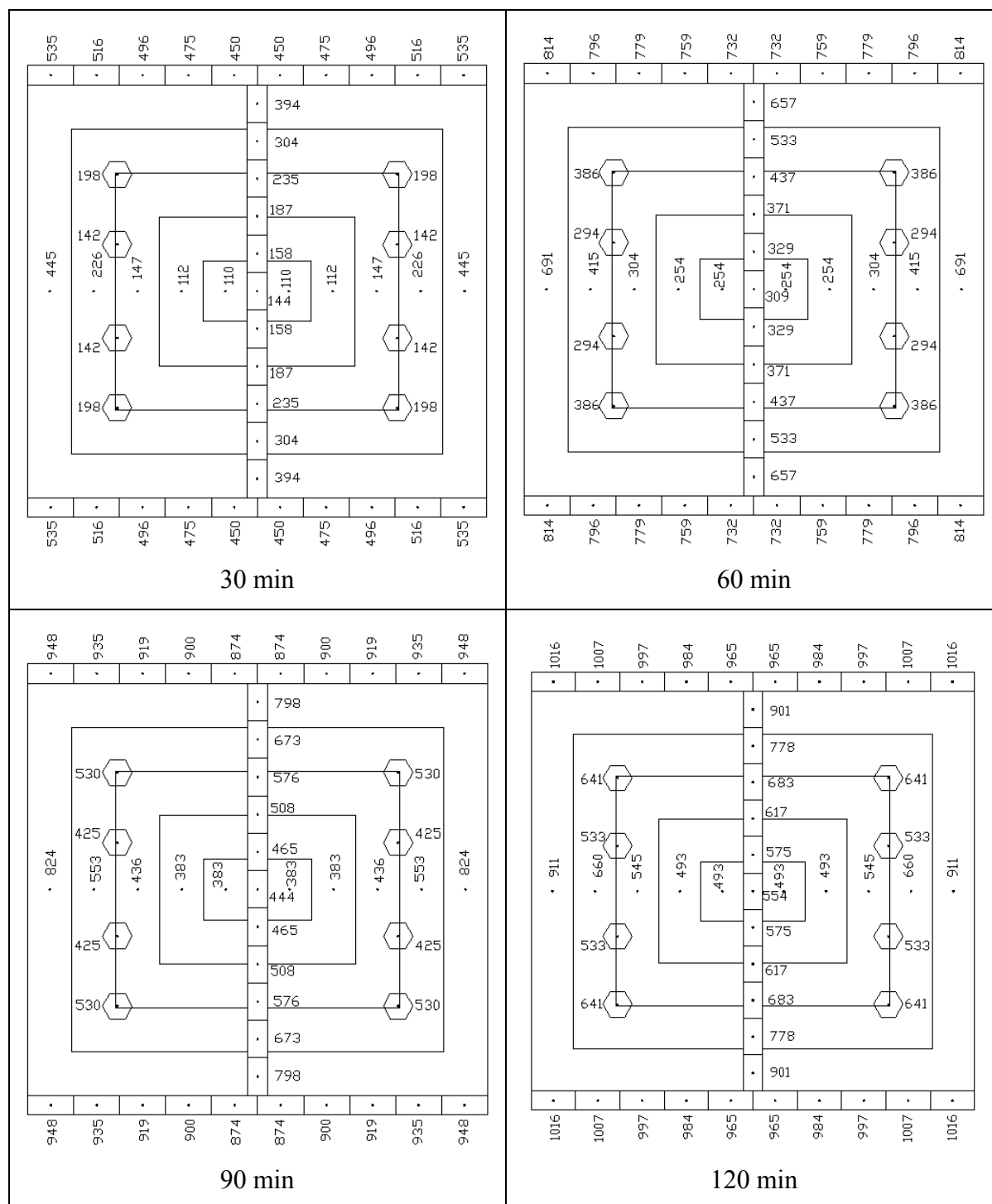


FIGURA 6.20 – Temperatura do pilar misto formado com o perfil HP 310x93, em °C

G. HP 360x132 (FIG. 6.21 e FIG. 6.22)

Para o pilar parcialmente revestido formado com perfil HP 360x132 sem proteção térmica foi gerada uma malha com 2041 nós e 1976 elementos.

As mesas do perfil HP 360x132 foram divididas em 10 partes e a alma 11 partes iguais. O concreto foi dividido em 5 faixas. As temperaturas obtidas em cada trecho da seção transversal do pilar sem proteção estão indicadas na FIG. 6.21.

Para o pilar parcialmente revestido formado com perfil HP 360x132 protegido com argamassa jateada foi gerada uma malha com 1775 nós e 1700 elementos.

A seção transversal foi dividida da mesma maneira adotada para o pilar sem proteção. As temperaturas obtidas em cada trecho da seção transversal do pilar com proteção de argamassa jateada estão indicadas na FIG. 6.22.

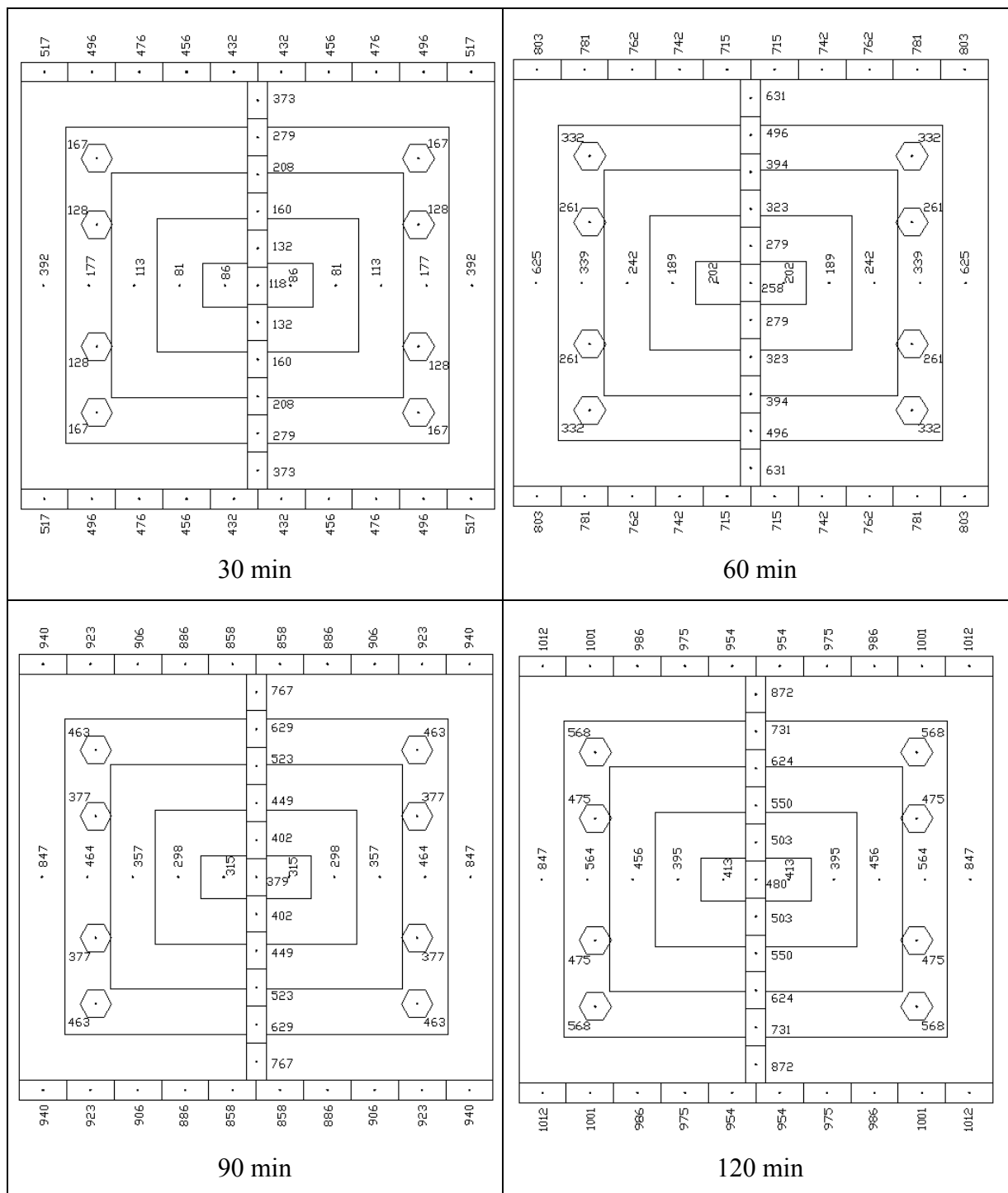


FIGURA 6.21 – Temperatura do pilar misto formado com o perfil HP 360x132 sem proteção térmica, em °C

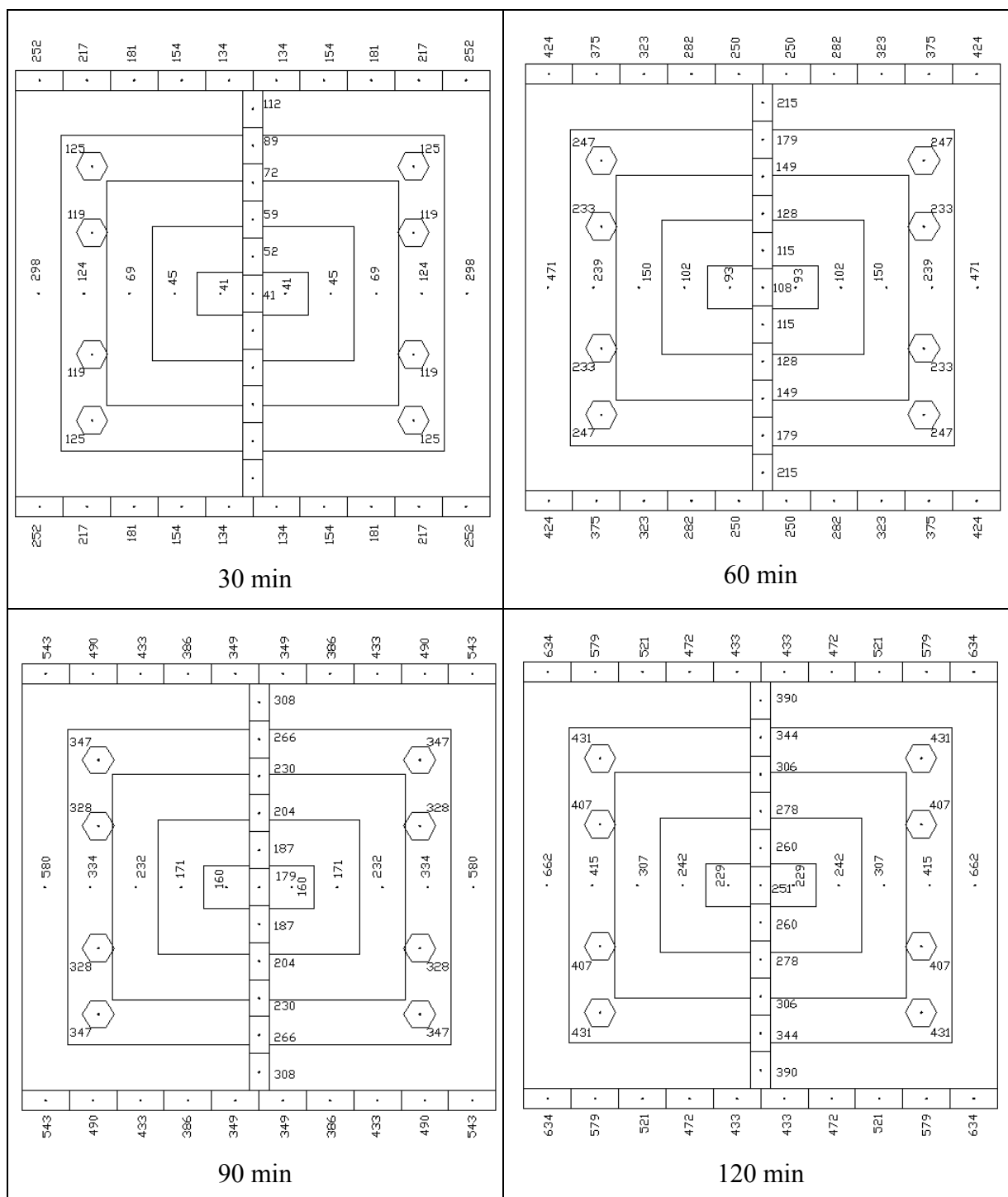


FIGURA 6.22 – Temperatura do pilar misto formado com o perfil HP 360x132 com proteção de argamassa jateada, em °C

6.4.3 Pilares de Seção Circular Preenchidos por Concreto

Para os tubos circulares preenchidos por concreto, admitiu-se a mesma temperatura para toda a seção do perfil metálico em cada TRRF. A seção transversal de concreto do pilar foi dividida em 4 faixas de mesma largura e, adotou-se, como a temperatura da faixa, a temperatura dos nós centrais dessa faixa.

Quanto à armadura, foi adotada como a temperatura da barra a temperatura do nó central da mesma.

As temperaturas obtidas em cada trecho das seções transversais dos pilares mistos de seção circular preenchidos por concreto, com e sem proteção de argamassa jateada, estão indicadas nas Figuras 6.23, 6.24, 6.25 e 6.26.

A. Perfil Tubular 219,1x12,7 (FIG. 6.23)

Para o pilar formado com perfil tubular 219,1x12,7 foi gerada uma malha com 1219 nós e 1169 elementos.

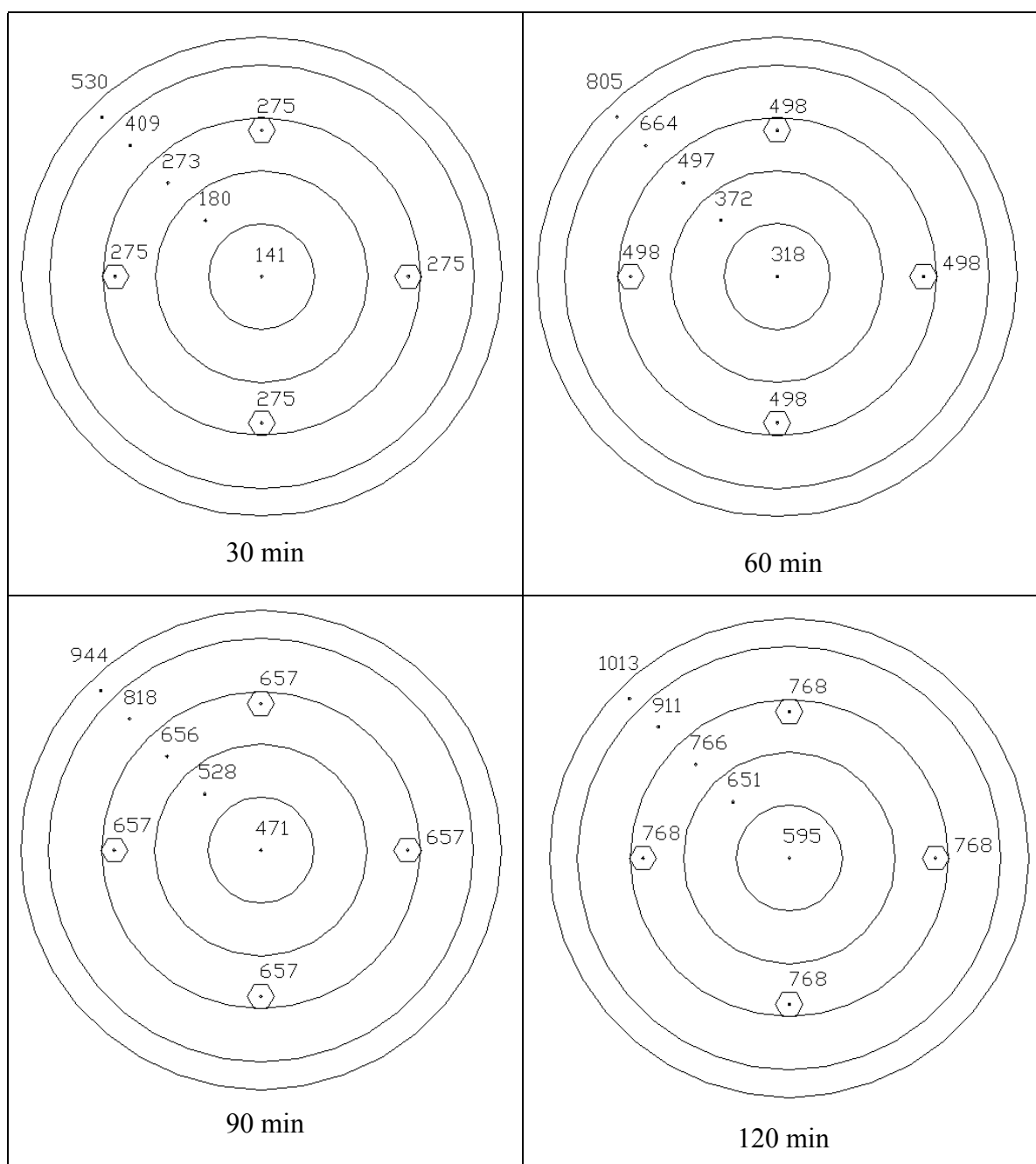


FIGURA 6.23 – Temperatura do pilar misto formado com o perfil tubular 219,1x12,7, em °C

B. Perfil Tubular 273x9,3 (FIG. 6.24 e FIG. 6.25)

Para o pilar formado com perfil tubular 273x9,3 sem proteção térmica, foi gerada uma malha com 1023 nós e 969 elementos, e para esse pilar protegido com argamassa jateada, a malha gerada possui 761 nós e 724 elementos.

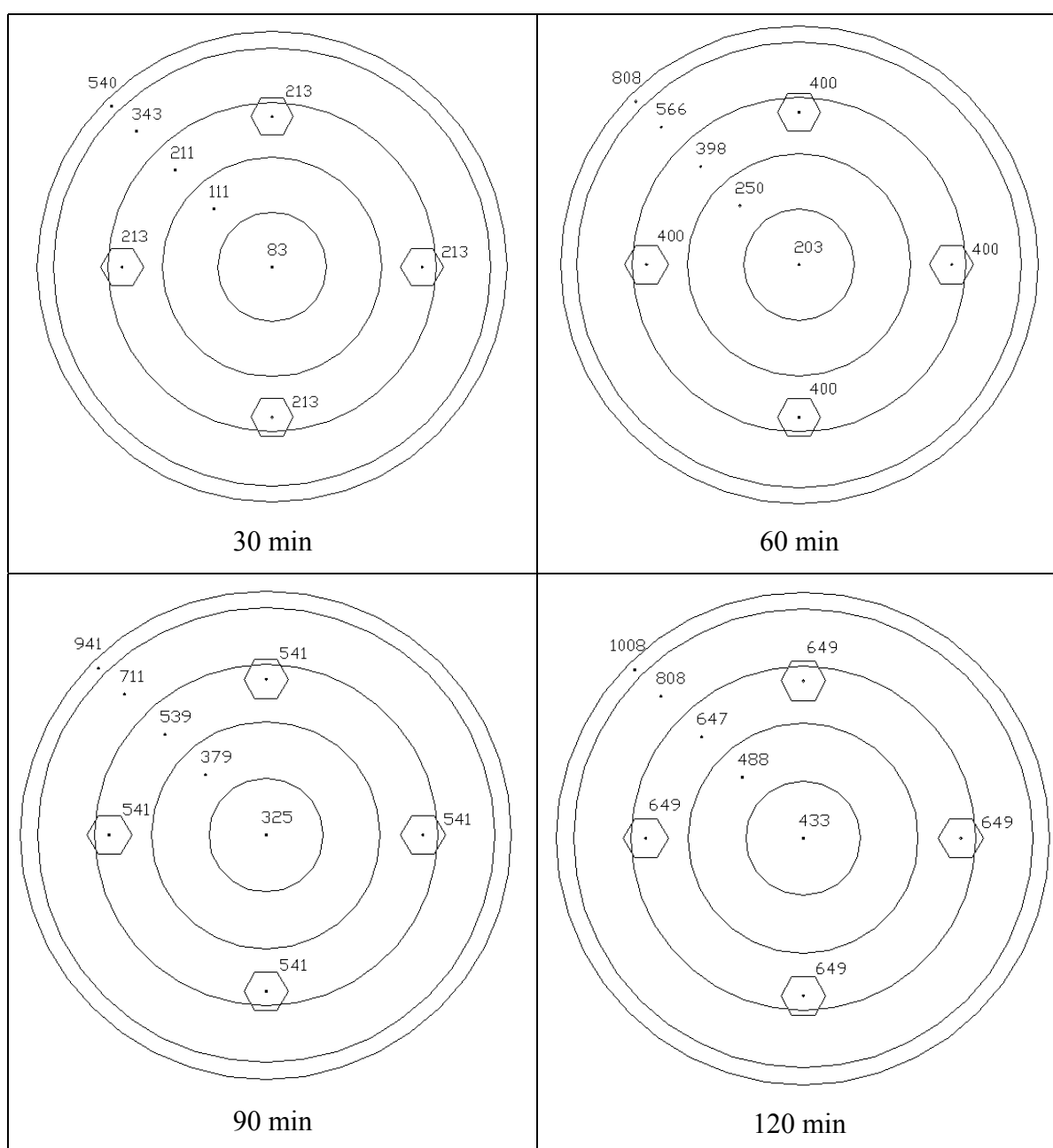


FIGURA 6.24 – Temperatura do pilar misto formado com o perfil tubular 273x9,3 sem proteção térmica, em °C

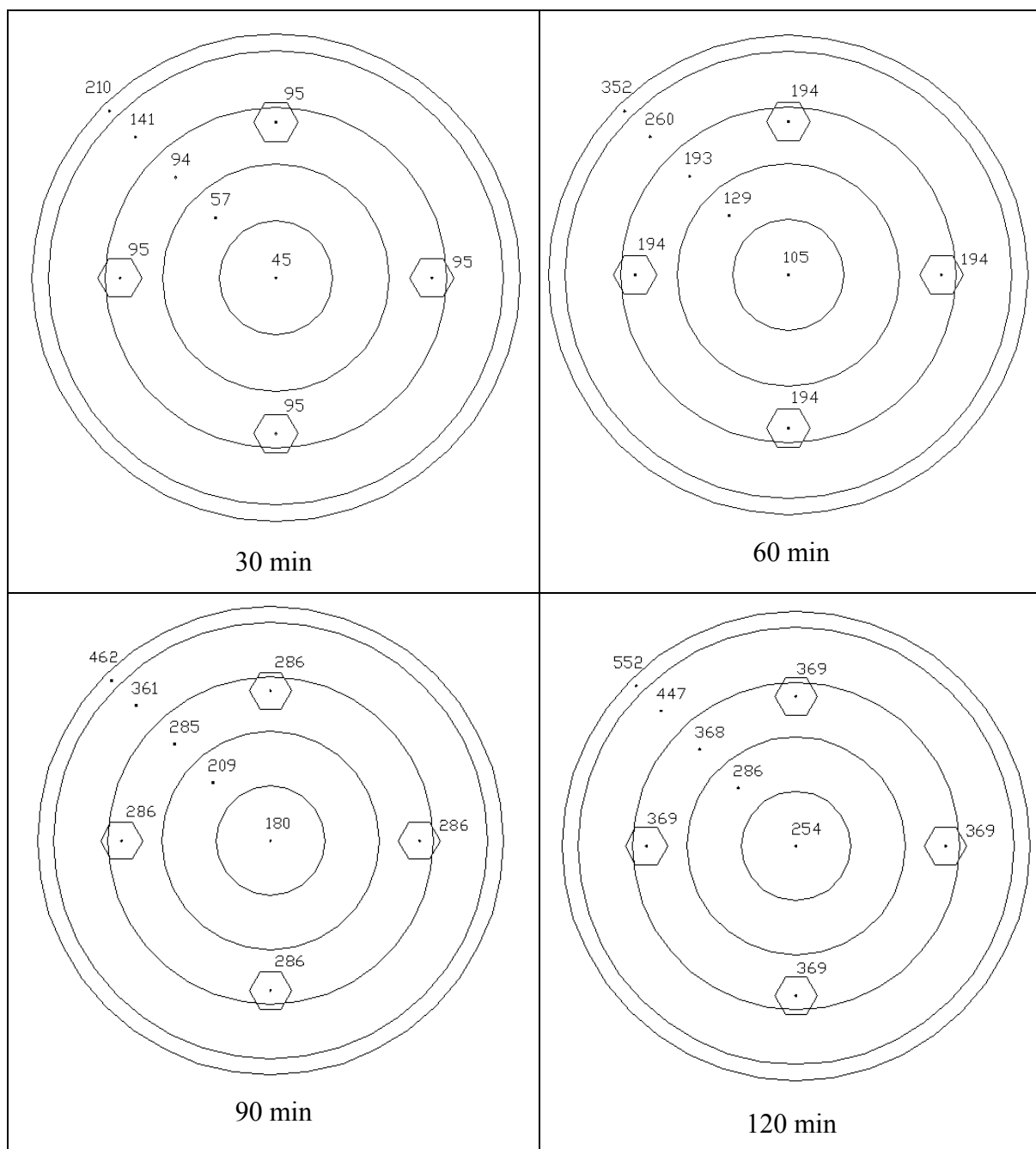


FIGURA 6.25 – Temperatura do pilar misto formado com o perfil tubular 273x9,3 com proteção de argamassa jateada, em °C

C. Perfil Tubular 355,6x11,1 (FIG. 6.26)

Para o pilar formado com perfil tubular 355,6x11,1, foi gerada uma malha com 1039 nós e 1001 elementos.

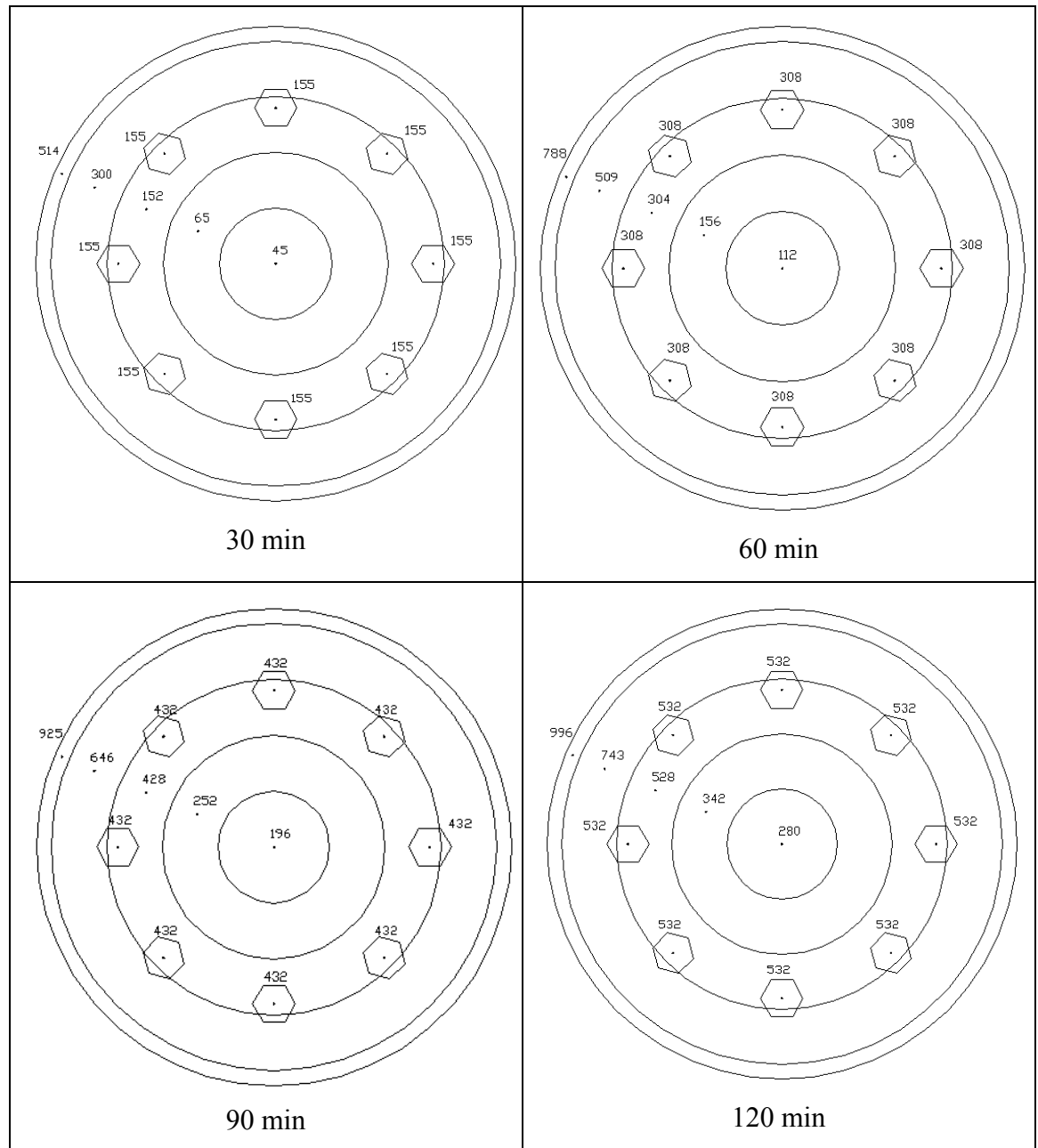


FIGURA 6.26 – Temperatura do pilar misto formado com o perfil tubular 355,6x11,1, em °C

6.5 Resistência dos Pilares mistos

6.5.1 Generalidades

A resistência dos pilares mistos parcialmente revestidos e preenchidos por concreto foi determinada utilizando-se o Método Tabular, e por meio do Método Avançado de Cálculo, utilizando as temperaturas obtidas pelo programa CALTEMI. E, para os pilares mistos parcialmente revestidos, também foi empregado o Método Simplificado Analítico de Cálculo.

As tabelas a seguir apresentam:

- a) comparação entre a resistência do pilar obtida pelo Método Simplificado Analítico de Cálculo do Eurocode 4 – Part 1.2 (1994) e a resistência obtida por meio do Método Avançado de Cálculo para pilares mistos parcialmente revestidos (TAB. 6.2);
- b) comparação entre a resistência do pilar obtida pelo Método Tabular do Eurocode 4 – Part 1.2 (1994) e a resistência obtida por meio do Método Avançado de Cálculo para pilares mistos parcialmente revestidos e preenchidos por concreto (TAB. 6.3);
- c) comparação entre as resistências dos pilares mistos parcialmente revestidos e preenchidos por concreto, sem proteção e com proteção de argamassa jateada, por meio do Método Avançado de Cálculo (TAB. 6.4).

Os valores da resistência obtidos pelo Método Simplificado Analítico de Cálculo e pelo Método Avançado de Cálculo, neste último caso com o perfil de aço com e sem proteção contra incêndio, foram obtidos usando uma planilha Excel especialmente desenvolvida para este fim. Como ilustração são apresentados:

- no anexo 2, o cálculo da resistência em situação de incêndio do pilar misto parcialmente revestido por concreto formado com o perfil PS 400x62, por meio do Método Simplificado Analítico de Cálculo;
- no anexo 3, o cálculo das resistências em situação de incêndio do pilar misto parcialmente revestido por concreto formado com o perfil PS 400x62 e do pilar

preenchido por concreto formado com o perfil tubular 273x9,3, por meio do Método Avançado de Cálculo;

- no anexo 4, o cálculo das resistências em situação de incêndio do pilar misto parcialmente revestido por concreto formado com o perfil PS 400x62 e do pilar preenchido por concreto formado com o perfil tubular 273x9,3 com proteção térmica, por meio do Método Avançado de Cálculo.

6.5.2 Comparação da Resistência calculada pelo Método Avançado de Cálculo com a Resistência determinada pelo Método Simplificado Analítico

A. PS 400x62

A TAB. 6.2-a apresenta uma comparação entre os resultados obtidos para a resistência e rigidez do pilar misto parcialmente revestido por concreto constituído pelo perfil PS 400x62, usando o Método Simplificado Analítico e o Método Avançado de Cálculo.

Como pode-se observar no item 6.3.1, as dimensões do perfil metálico PS 400x62 e a taxa de armadura atendem às exigências do Método Simplificado Analítico para sua utilização:

- a) $230 \leq h \leq 1100 \text{ mm}$;
- b) $230 \leq b \leq 500 \text{ mm}$;
- c) $1\% \leq A_s/(A_s+A_c) \leq 6\%$.

As dimensões b e h também atendem às exigências desse método para o dimensionamento do pilar submetido a 90 e 120 minutos de incêndio:

$$b \text{ e } h \geq 300 \text{ mm.}$$

TABELA 6.2-a – Resultados comparativos para o Pilar Parcialmente Revestido formado com o perfil PS 400x62

PS 400x62		Método Analítico		Método Avançado		$\Delta (EI)_{fi}$ (%)	ΔN_{fi} (%)
		$(EI)_{fi}$ (kNm ²)	N_{fi} (kN)	$(EI)_{fi}$ (kNm ²)	N_{fi} (kN)		
30 min	Mesas	1451	459	2726	909	87,9	98,0
	Alma	3	793	2,99	911	-0,3	14,9
	Concreto	4558	2402	3439	2843	-24,6	18,4
	Armadura	2775	1609	2797	1608	0,8	-0,1
	Total	7875	4376	8278	5093	5,1	16,4
60 min	Mesas	691	174	612	162	-11,4	-6,9
	Alma	3	638	2,31	773	-23,0	21,2
	Concreto	2222	1913	1706	2260	-23,2	18,1
	Armadura	2664	1609	2346	1608	-11,9	-0,1
	Total	4440	3328	4030	3495	-9,2	5,0
90 min	Mesas	537	103	403	76	-25,0	-26,2
	Alma	3	516	1,85	668	-38,3	29,5
	Concreto	1210	1465	1030	1812	-14,9	23,7
	Armadura	1837	1322	1954	1449	6,4	9,6
	Total	2870	2482	2711	2718	-5,5	9,5
120 min	Mesas	409	42	301	56	-26,4	33,3
	Alma	2	461	1,48	564	-26,0	22,3
	Concreto	489	963	615	1445	25,8	50,1
	Armadura	846	701	1405	1164	66,1	66,0
	Total	1648	1530	2199	2197	33,4	43,6

B. VE 500x68

A TAB. 6.2-b apresenta uma comparação entre os resultados obtidos para a resistência e rigidez do pilar misto parcialmente revestido por concreto constituído pelo perfil VE 500x68, usando o Método Simplificado Analítico e o Método Avançado de Cálculo.

Como pode-se observar no item 6.3.1, as dimensões b e h do perfil metálico e a taxa de armadura, $As/(As+Ac)$, atendem às exigências para a utilização do Método Simplificado Analítico.

C. CE 250x49

A TAB. 6.2-c apresenta uma comparação entre os resultados obtidos para a resistência e rigidez do pilar misto parcialmente revestido por concreto constituído pelo perfil CE 250x49, usando o Método Simplificado Analítico e o Método Avançado de Cálculo.

Como pode-se observar no item 6.3.1, as dimensões b e h do perfil metálico CE 250x49 e a taxa de armadura, $A_s/(A_s+A_c)$, atendem às exigências do Método Simplificado Analítico para sua utilização.

Já para o dimensionamento do pilar submetido a 90 e 120 minutos de incêndio, tanto a altura do perfil metálico h quanto a largura da mesa b são menores do que dimensões exigidas para a utilização do método. Apesar disso, as resistências do pilar nestes TRRF foram determinadas pelo Método Simplificado Analítico para comparação com as resistências determinadas a partir do Método Avançado.

TABELA 6.2-c – Resultados comparativos para o Pilar Parcialmente Revestido formado com o perfil CE 250x49

CE 250x49		Método Simplificado		Método Avançado		$\Delta (EI)_{fi}$ (%)	ΔN_{fi} (%)
		$(EI)_{fi}$ (kNm ²)	N_{fi} (kN)	$(EI)_{fi}$ (kNm ²)	N_{fi} (kN)		
30 min	Mesas	651	321	2287	969	251,3	201,9
	Alma	0,89	341	0,82	428	-7,9	25,5
	Concreto	1320	1149	992	1361	-24,8	18,5
	Armadura	1590	982	1520	982	-4,4	0,0
	Total	3298	2217	4601	2994	39,5	35,0
60 min	Mesas	419	133	437	161	4,3	21,1
	Alma	0,72	223	0,51	312	-29,2	39,9
	Concreto	588	837	370	918	-37,1	9,7
	Armadura	1297	982	1188	979	-8,4	-0,3
	Total	2016	1628	1759	1660	-12,7	2,0
* 90 min	Mesas	339	85	284	75	-16,2	-11,8
	Alma	0,55	130	0,30	185	-45,5	42,3
	Concreto	228	529	168	590	-26,3	11,5
	Armadura	1052	807	779	616	-26,0	-23,7
	Total	1296	1127	985	992	-24,0	-12,0
* 120 min	Mesas	258	64	210	55	-18,6	-14,1
	Alma	0,45	88	0,15	97	-66,7	10,2
	Concreto	34	212	94	393	176,5	85,4
	Armadura	485	428	337	315	-30,5	-26,4
	Total	770	601	622	597	-19,2	-0,7
*Resultados inválidos para o Método Analítico de Cálculo devido ao não cumprimento de suas limitações.							

D. CE 300x76

A TAB. 6.2-d apresenta uma comparação entre os resultados obtidos para a resistência e rigidez do pilar misto parcialmente revestido por concreto constituído pelo perfil CE 300x76, usando o Método Simplificado Analítico e o Método Avançado de Cálculo.

Como pode-se observar no item 6.3.1, as dimensões b e h do perfil metálico CE 300x76 e a taxa de armadura, $A_s/(A_s+A_c)$, atendem às exigências do Método Simplificado Analítico para sua utilização.

As dimensões b e h também atendem às exigências desse método para o dimensionamento do pilar submetido a 90 e 120 minutos de incêndio.

TABELA 6.2-d – Resultados comparativos para o Pilar Parcialmente Revestido formado com o perfil CE 300x76

CE 300x76		Método Analítico		Método Avançado		$\Delta (EI)_{fi}$ (%)	ΔN_{fi} (%)
		$(EI)_{fi}$ (kNm ²)	N_{fi} (kN)	$(EI)_{fi}$ (kNm ²)	N_{fi} (kN)		
30 min	Mesas	1935	631	5611	1646	190,0	160,9
	Alma	2.17	537	2,05	655	-5,5	22,0
	Concreto	3001	1686	2389	2029	-20,4	20,3
	Armadura	3902	1257	3883	1257	-0,5	0,0
	Total	8240	3579	11408	4877	38,4	36,3
60 min	Mesas	1019	240	1016	287	-0,3	19,6
	Alma	1.85	389	1,44	525	-22,2	35,0
	Concreto	1425	1295	1033	1521	-27,5	17,5
	Armadura	3184	1257	3180	1257	-0,1	0,0
	Total	4924	2660	4604	2899	-6,5	9,0
90 min	Mesas	812	150	662	125	-18,5	-16,7
	Alma	1.55	273	1,02	388	-34,2	42,1
	Concreto	694	925	535	1085	-22,9	17,3
	Armadura	2583	1033	2506	1039	-3,0	0,6
	Total	3272	1949	2963	2070	-9,4	6,2
120 min	Mesas	618	107	485	90	-21,5	-15,9
	Alma	1.39	220	0,64	245	-54,0	11,4
	Concreto	210	519	304	788	44,8	51,8
	Armadura	1189	548	1611	682	35,5	24,5
	Total	1977	1148	2340	1461	18,4	27,3

E. W 610x174

A TAB. 6.2-e apresenta uma comparação entre os resultados obtidos para a resistência e rigidez do pilar misto parcialmente revestido por concreto constituído pelo perfil W 610x174, usando o Método Simplificado Analítico e o Método Avançado de Cálculo.

Como pode-se observar no item 6.3.1, as dimensões b e h do perfil metálico e a taxa de armadura, $A_s/(A_s+A_c)$, atendem às limitações para a utilização do Método Simplificado Analítico, inclusive para o dimensionamento para 90 e 120 minutos de incêndio.

TABELA 6.2-e – Resultados comparativos para o Pilar Parcialmente Revestido formado com o perfil W 610x174

W 610x174		Método Analítico		Método Avançado		$\Delta (EI)_{fi}$ (%)	ΔN_{fi} (%)
		$(EI)_{fi}$ (kNm ²)	N_{fi} (kN)	$(EI)_{fi}$ (kNm ²)	N_{fi} (kN)		
30 min	Mesas	5984	1565	15929	3773	166,2	141,1
	Alma	26	2187	24,94	2406	-4,1	10,0
	Concreto	9035	3869	7136	4656	-21,0	20,3
	Armadura	12248	3041	12523	3042	2,2	0,0
	Total	25486	9501	34185	12411	34,1	30,6
60 min	Mesas	2584	615	2678	808	3,6	31,4
	Alma	24	1925	20,63	2132	-14,0	10,8
	Concreto	4613	3200	3771	3840	-18,3	20,0
	Armadura	9995	3041	10696	3042	7,0	0,0
	Total	15035	7468	15074	8203	0,3	9,8
90 min	Mesas	1921	331	1698	309	-11,6	-6,6
	Alma	23	1718	17,69	1927	-23,1	12,2
	Concreto	2826	2623	2368	3219	-16,2	22,7
	Armadura	8109	2500	8976	2783	10,7	11,3
	Total	10307	5920	10451	6638	1,4	12,1
120 min	Mesas	1459	216	1185	191	-18,8	-11,6
	Alma	22	1625	14,93	1742	-32,1	7,2
	Concreto	1439	1983	1586	2775	10,2	39,9
	Armadura	3733	1326	7250	2369	94,2	78,7
	Total	6366	4127	9719	5792	52,7	40,3

F. HP 310x93

A TAB. 6.2-f apresenta uma comparação entre os resultados obtidos para a resistência e rigidez do pilar misto parcialmente revestido por concreto constituído pelo perfil HP 310x93, usando o Método Simplificado Analítico e o Método Avançado de Cálculo.

Como pode-se observar no item 6.3.1, as dimensões b e h do perfil metálico e a taxa de armadura, $A_s/(A_s+A_c)$, atendem às limitações para a utilização do Método Simplificado Analítico, inclusive para o dimensionamento para 90 e 120 minutos de incêndio.

TABELA 6.2-f – Resultados comparativos para o Pilar Parcialmente Revestido formado com o perfil HP 310x93

HP 310x93		Método Analítico		Método Avançado		$\Delta (EI)_{fi}$ (%)	ΔN_{fi} (%)
		$(EI)_{fi}$ (kNm ²)	N_{fi} (kN)	$(EI)_{fi}$ (kNm ²)	N_{fi} (kN)		
30 min	Mesas	2265	696	7051	1896	211,3	172,4
	Alma	9,60	887	9,08	1088	-5,4	22,7
	Concreto	3320	1719	2511	2026	-24,4	17,9
	Armadura	4033	1257	4012	1256	-0,5	-0,1
	Total	8964	3958	13080	5486	45,9	38,6
60 min	Mesas	1163	260	1195	341	2,8	31,2
	Alma	8,19	646	6,32	876	-22,8	35,6
	Concreto	1582	1323	1118	1515	-29,3	14,5
	Armadura	3291	1257	3278	1256	-0,4	-0,1
	Total	5282	2905	4926	3196	-6,7	10,0
90 min	Mesas	925	162	775	142	-16,2	-12,3
	Alma	6,88	456	4,23	596	-38,5	30,7
	Concreto	787	952	575	1096	-26,9	15,1
	Armadura	2670	1033	2562	1025	-4,0	-0,8
	Total	3512	2123	3135	2232	-10,7	5,1
120 min	Mesas	704	116	564	100	-19,9	-13,8
	Alma	6,20	370	2,34	346	-62,3	-6,5
	Concreto	254	544	331	797	30,3	46,5
	Armadura	1229	548	1597	659	29,9	20,3
	Total	2142	1288	2429	1535	13,4	19,2

G. HP 360x132

A TAB. 6.2-g apresenta uma comparação entre os resultados obtidos para a resistência e rigidez do pilar misto parcialmente revestido por concreto constituído pelo perfil HP 360x132, usando o Método Simplificado Analítico e o Método Avançado de Cálculo.

Como pode-se observar no item 6.3.1, as dimensões b e h do perfil metálico e a taxa de armadura, $A_s/(A_s+A_c)$, atendem às limitações para a utilização do Método Simplificado Analítico, inclusive para o dimensionamento para 90 e 120 minutos de incêndio.

TABELA 6.2-g – Resultados comparativos para o Pilar Parcialmente Revestido formado com o perfil HP 360x132

HP 360x132		Método Analítico		Método Avançado		$\Delta (EI)_{fi}$ (%)	ΔN_{fi} (%)
		$(EI)_{fi}$ (kNm ²)	N_{fi} (kN)	$(EI)_{fi}$ (kNm ²)	N_{fi} (kN)		
30 min	Mesas	5737	1163	16147	2901	181,5	149,4
	Alma	19.01	1258	18,25	1497	-4,0	19,0
	Concreto	7328	2443	6029	2971	-17,7	21,6
	Armadura	10041	1964	12270	1963	22,2	-0,1
	Total	21659	6278	33260	8679	53,6	38,2
60 min	Mesas	2644	443	2650	551	0,2	24,4
	Alma	16.71	971	13,51	1275	-19,2	31,3
	Concreto	3684	1955	2943	2352	-20,1	20,3
	Armadura	8194	1964	10351	1963	26,3	-0,1
	Total	12719	4750	14068	5443	10,6	14,6
90 min	Mesas	2036	257	1704	219	-16,3	-14,8
	Alma	14.65	746	9,82	992	-33,0	33,0
	Concreto	2134	1516	1744	1855	-18,3	22,4
	Armadura	6648	1614	8760	1827	31,8	13,2
	Total	8669	3621	9776	4259	12,8	17,6
120 min	Mesas	1549	174	1231	150	-20,5	-13,8
	Alma	13.60	644	6,84	677	-49,7	5,1
	Concreto	963	1028	1066	1448	10,7	40,9
	Armadura	3061	856	6620	1378	116,3	61,0
	Total	5394	2351	8710	3254	61,5	38,4

6.5.3 Comparação da Resistência calculada utilizando o Método Avançado de Cálculo com a Resistência determinada pelo Método Tabular

Com relação aos pilares mistos parcialmente revestidos, o aço utilizado para os perfis metálicos atende às limitações do Método Tabular:

$$235 \text{ MPa} \leq f_y \leq 345 \text{ MPa};$$

$$400 \text{ MPa} \leq f_u \leq 485 \text{ MPa};$$

A. PS 400x62

A TAB. 6.3-a apresenta uma comparação entre os resultados obtidos para a resistência do pilar misto parcialmente revestido por concreto constituído pelo perfil PS 400x62, usando o Método Tabular e o Método Avançado de Cálculo.

Para o pilar misto parcialmente revestido formado com o perfil PS 400x62, a relação entre as resistências de cálculo da seção de aço e da seção mista, δ , atende aos limites para pilares mistos em temperatura ambiente ($0,2 \leq \delta \leq 0,9$).

O parâmetro de esbeltez $\bar{\lambda}$ é igual 0,62 atendendo assim ao limite exigido para pilares mistos ($\bar{\lambda} \leq 2,0$).

A relação da área da seção transversal da armadura longitudinal corresponde a 2,95% da área da seção transversal de concreto podendo assim ser totalmente utilizada na determinação da resistência do pilar em temperatura ambiente ($0,3\% \leq A_s/A_c \leq 4\%$).

As relações limite para evitar a flambagem local do perfil I são obedecidas:

$$b/t_f = 37,5 \leq 1,47(E/f_y)^{1/2} = 38,42$$

Para o uso das tabelas, toda a taxa de armadura pode ser levada em conta na determinação de N_{Rd} e $N_{fi,Rd}$: $1\% \leq A_s/(A_c+A_s) = 2,87\% \leq 6\%$.

TABELA 6.3-a – Resultados comparativos para o Pilar Parcialmente Revestido formado com o perfil PS 400x62

Resistência do Pilar Parcialmente Revestido				
PS 400x62		Método Tabular	Método Avançado	ΔN_{fi}
$N_{Rd} = 4065 \text{ kN}$		$N_{fi} \text{ (kN)}$	$N_{fi} \text{ (kN)}$	(%)
30 min	$\eta_{fi} \leq 0,7$	2846	5093	79,0
60 min	$\eta_{fi} \leq 0,7$	2846	3495	22,8
90 min	$\eta_{fi} \leq 0,5$	2033	2718	33,7
120 min	$\eta_{fi} \leq 0,3$	1220	2197	80,2

A distância mínima da face do pilar ao eixo da armadura u_s e as dimensões do perfil PS 400x62 permitiram a determinação da resistência pelo Método Tabular para todos os TRRF previstos pelo Eurocode 4 – Part 1.2 (1994) para perfis parcialmente revestidos por concreto. Pode-se observar que as resistências obtidas com o Método Avançado são consideravelmente maiores do que aquelas obtidas por meio do Método Tabular. Além disso, nota-se que, a partir do TRRF igual a 60 minutos, as diferenças aumentam à medida que são adotados tempos maiores de exposição ao fogo. Para 30 minutos de incêndio a diferença ocorre na mesma ordem de grandeza do TRRF igual a 120min devido à limitação do nível de carga.

B. VE 500x68

A TAB. 6.3-b apresenta uma comparação entre os resultados obtidos para a resistência do pilar misto parcialmente revestido por concreto constituído pelo perfil VE 500x68, usando o Método Tabular e o Método Avançado de Cálculo.

Para o pilar misto parcialmente revestido formado com o perfil VE 500x68, a relação entre as resistências de cálculo da seção de aço e da seção mista, δ , atende aos limites para pilares mistos em temperatura ambiente ($0,2 \leq \delta = 0,40 \leq 0,9$).

O parâmetro de esbeltez $\bar{\lambda}$ é igual a 0,77 atendendo assim ao limite exigido para pilares mistos ($\bar{\lambda} \leq 2,0$).

A relação da área da seção transversal da armadura longitudinal corresponde a 3,35% da área da seção transversal de concreto podendo assim ser totalmente utilizada na determinação da resistência do pilar em temperatura ambiente ($0,3\% \leq A_s/A_c \leq 4\%$).

As relações limites para evitar a flambagem local do perfil I são obedecidas:

$$b/t_f = 26,3 \leq 1,47(E/f_y)^{1/2} = 38,42$$

Para o uso das tabelas, toda a taxa de armadura pode ser levada em conta na determinação de N_{Rd} e $N_{fi,Rd}$: $1\% \leq A_s/(A_c + A_s) = 3,24 \leq 6\%$.

A largura das mesas do perfil VE 500x68 limitou a determinação da resistência pelo Método Tabular a 30 minutos de incêndio ($b = 250$ mm). Pode-se observar na TAB.6.3-b que a resistência obtida através do Método Avançado de Cálculo para 30 minutos de incêndio é muito maior do que as resistências obtidas através do Método Tabular para os níveis de carga 0,3, 0,5 e 0,7.

TABELA 6.3-b – Resultados comparativos para o Pilar Parcialmente Revestido formado com o perfil VE 500x68

Resistência do Pilar Parcialmente Revestido				
VE 500x68		Método Tabular	Método Avançado	ΔN_{fi} (%)
		N_{fi} (kN)	N_{fi} (kN)	
30 min	$\eta_{fi} \leq 0,7$	2804	5233	86,7
	$\eta_{fi} \leq 0,5$	2003		161,3
	$\eta_{fi} \leq 0,3$	1202		335,5
60 min	—	—	3532	—
90 min	—	—	2695	—
120 min	—	—	2399	—

C. CE 250x49

A TAB. 6.3-c apresenta uma comparação entre os resultados obtidos para a resistência do pilar misto parcialmente revestido por concreto constituído pelo perfil CE 250x49, usando o Método Tabular e o Método Avançado de Cálculo.

Para o pilar misto parcialmente revestido formado com o perfil CE 250x49, a relação entre as resistências de cálculo da seção de aço e da seção mista, δ , atende aos limites para pilares mistos em temperatura ambiente ($0,2 \leq \delta = 0,49 \leq 0,9$).

O parâmetro de esbeltez $\bar{\lambda}$ é igual a 0,75 atendendo assim ao limite exigido para pilares mistos ($\bar{\lambda} \leq 2,0$).

A relação da área da seção transversal da armadura longitudinal corresponde a 3,61% da área da seção transversal de concreto podendo assim ser totalmente

utilizada na determinação da resistência do pilar em temperatura ambiente ($0,3\% \leq A_s/A_c \leq 4\%$).

As relações limites para evitar a flambagem local do perfil I são obedecidas:

$$b/t_f = 26,3 \leq 1,47(E/f_y)^{1/2} = 38,42$$

Para o uso das tabelas, toda a taxa de armadura pode ser levada em conta na determinação de N_{Rd} e $N_{fi,Rd}$: $1\% \leq A_s/(A_c+A_s) = 3,49 \leq 6\%$.

TABELA 6.3-c – Resultados comparativos para o Pilar Parcialmente Revestido formado com o perfil CE 250x49

Resistência do Pilar Parcialmente Revestido				
CE 250x49		Método Tabular	Método Avançado	ΔN_{fi} (%)
		N_{fi} (kN)	N_{fi} (kN)	
30 min	$\eta_{fi} \leq 0,7$	1691	2994	77,1
	$\eta_{fi} \leq 0,5$	1208		148,0
	$\eta_{fi} \leq 0,3$	1025		192,2
60 min	—	—	1660	—
90 min	—	—	992	—
120 min	—	—	597	—

A largura das mesas do perfil CE 250x49 limitou a determinação da resistência pelo Método Tabular a 30 minutos de incêndio ($b = 250$ mm). Através da TAB. 6.3-c, pode-se observar que a resistência obtida com Método Avançado de Cálculo para 30 minutos de incêndio é consideravelmente maior do que as resistências obtidas por meio do Método Tabular para os níveis de carga 0,3, 0,5 e 0,7.

D. CE 300x76

A TAB. 6.3-d apresenta uma comparação entre os resultados obtidos para a resistência do pilar misto parcialmente revestido por concreto constituído pelo perfil CE 300x76, usando o Método Tabular e o Método Avançado de Cálculo.

Para o pilar misto parcialmente revestido formado com o perfil CE 300x76, a relação entre as resistências de cálculo da seção de aço e da seção mista, δ , atende aos limites para pilares mistos em temperatura ambiente ($0,2 \leq \delta = 0,52 \leq 0,9$).

O parâmetro de esbeltez $\bar{\lambda}$ é igual a 0,61 atendendo assim ao limite exigido para pilares mistos ($\bar{\lambda} \leq 2,0$).

A relação da área da seção transversal da armadura longitudinal corresponde a 3,23% da área da seção transversal de concreto podendo assim ser totalmente utilizada na determinação da resistência do pilar em temperatura ambiente ($0,3\% \leq A_s/A_c \leq 4\%$).

As relações limites para evitar a flambagem local do perfil I são obedecidas:

$$b/t_f = 24,0 \leq 1,47(E/f_y)^{1/2} = 38,42$$

Para o uso das tabelas, toda a taxa de armadura pode ser levada em conta na determinação de N_{Rd} e $N_{fi,Rd}$: $1\% \leq A_s/(A_c + A_s) = 3,13 \leq 6\%$.

A distância mínima da face do pilar ao eixo da armadura u_s , a dimensão da mesa e a altura do perfil metálico permitiriam a determinação da resistência pelo Método Tabular para todos os TRRF previstos pelo Eurocode 4 – Part 1.2 (1994) para perfis parcialmente revestidos por concreto. Mas, a relação t_w/t_f limitou a resistência do pilar a 90 minutos de incêndio. Pode-se observar na TAB. 6.3-d que as resistências obtidas com o do Método Avançado de Cálculo são consideravelmente maiores do que aquelas obtidas por meio do Método Tabular.

TABELA 6.3-d – Resultados comparativos para o Pilar Parcialmente Revestido formado com o perfil CE 300x76

Resistência do Pilar Parcialmente Revestido				
CE 300x76		Método Tabular	Método Avançado	ΔN_{fi} (%)
		N_{fi} (kN)	N_{fi} (kN)	
30 min	$\eta_{fi} \leq 0,7$	2766	4877	76,3
60 min	$\eta_{fi} \leq 0,5$	1976	2899	46,7
90 min	$\eta_{fi} \leq 0,3$	1186	2070	74,6
120 min	—	—	1461	—

E. W 610x174

A TAB. 6.3-e apresenta uma comparação entre os resultados obtidos para a resistência do pilar misto parcialmente revestido por concreto constituído pelo perfil W 610x174, usando o Método Tabular e o Método Avançado de Cálculo.

Para o pilar misto parcialmente revestido formado com o perfil W 610x174, a relação entre as resistências de cálculo da seção de aço e da seção mista, δ , atende aos limites para pilares mistos em temperatura ambiente ($0,2 \leq \delta = 0,52 \leq 0,9$).

O parâmetro de esbeltez $\bar{\lambda}$ é igual a 0,58 atendendo assim ao limite exigido para pilares mistos ($\bar{\lambda} \leq 2,0$).

A relação da área da seção transversal da armadura longitudinal corresponde a 3,53% da área da seção transversal de concreto podendo assim ser totalmente utilizada na determinação da resistência do pilar em temperatura ambiente ($0,3\% \leq A_s/A_c \leq 4\%$).

As relações limite para evitar a flambagem local do perfil I são obedecidas:

$$b/t_f = 15 \leq 1,47(E/f_y)^{1/2} = 38,42$$

Para o uso das tabelas, toda a taxa de armadura pode ser levada em conta na determinação de N_{Rd} e $N_{fi,Rd}$: $1\% \leq A_s/(A_c+A_s) = 3,42\% \leq 6\%$.

TABELA 6.3-e – Resultados comparativos para o Pilar Parcialmente Revestido formado com o perfil W 610x174

Resistência do Pilar Parcialmente Revestido				
W 610x174		Método Tabular	Método Avançado	ΔN_{fi}
		N_{fi} (kN)	N_{fi} (kN)	(%)
30 min	$\eta_{fi} \leq 0,7$	6476	12411	91,6
60 min	$\eta_{fi} \leq 0,5$	4626	8203	77,3
90 min	$\eta_{fi} \leq 0,3$	2776	6638	139,2
120 min	—	—	5792	—

A distância mínima da face do pilar ao eixo da armadura u_s , a dimensão da mesa e a altura do perfil metálico permitiriam a determinação da resistência pelo Método Tabular para todos os TRRF previstos pelo Eurocode 4 – Part 1.2 (1994) para perfis parcialmente revestidos por concreto. Mas, a relação t_w/t_f limitou a resistência do pilar a 90 minutos de incêndio. Pode-se observar na TAB. 6.3-e que as resistências obtidas com o Método Avançado de Cálculo são consideravelmente maiores do que aquelas obtidas por meio do Método Tabular.

F. HP 310x93

A TAB. 6.3-f apresenta uma comparação entre os resultados obtidos para a resistência do pilar misto parcialmente revestido por concreto constituído pelo perfil HP 310x93, usando o Método Tabular e o Método Avançado de Cálculo.

Para o pilar misto parcialmente revestido formado com o perfil W 610x174, a relação entre as resistências de cálculo da seção de aço e da seção mista, δ , atende aos limites para pilares mistos em temperatura ambiente ($0,2 \leq \delta = 0,57 \leq 0,9$).

O parâmetro de esbeltez $\bar{\lambda}$ é igual a 0,61 atendendo assim ao limite exigido para pilares mistos ($\bar{\lambda} \leq 2,0$).

A relação da área da seção transversal da armadura longitudinal corresponde a 3,18% da área da seção transversal de concreto podendo assim ser totalmente utilizada na determinação da resistência do pilar em temperatura ambiente ($0,3\% \leq A_s/A_c \leq 4\%$).

As relações limite para evitar a flambagem local do perfil I são obedecidas:

$$b/t_f = 23,5 \leq 1,47(E/f_y)^{1/2} = 38,42$$

Para o uso das tabelas, toda a taxa de armadura pode ser levada em conta na determinação de N_{Rd} e $N_{fi,Rd}$: $1\% \leq A_s/(A_c + A_s) = 3,09\% \leq 6\%$.

A distância mínima da face do pilar ao eixo da armadura u_s e as dimensões do perfil metálico permitiram a determinação da resistência pelo Método Tabular para todos os TRRF previstos pelo Eurocode 4 – Part 1.2 (1994) para perfis parcialmente revestidos por concreto. Pode-se observar que as resistências obtidas com o Método Avançado de Cálculo são maiores do que aquelas obtidas por meio do Método Tabular e que, para 30 minutos de incêndio, a diferença é ainda maior devido à limitação do nível de carga.

TABELA 6.3-f – Resultados comparativos para o Pilar Parcialmente Revestido formado com o perfil HP 310x93

Resistência do Pilar Parcialmente Revestido				
HP 310x93		Método Tabular	Método Avançado	ΔN_{fi} (%)
		N_{fi} (kN)	N_{fi} (kN)	
30 min	$\eta_{fi} \leq 0,7$	3080	5486	78,1
60 min	$\eta_{fi} \leq 0,7$	3080	3196	3,8
90 min	$\eta_{fi} \leq 0,5$	2200	2232	1,5
120 min	$\eta_{fi} \leq 0,3$	1320	1535	16,3

G. HP 360x132

A TAB. 6.3-g apresenta uma comparação entre os resultados obtidos para a resistência do pilar misto parcialmente revestido por concreto constituído pelo perfil HP 360x132, usando o Método Tabular e o Método Avançado de Cálculo.

Para o pilar misto parcialmente revestido formado com o perfil HP 360x132, a relação entre as resistências de cálculo da seção de aço e da seção mista, δ , atende aos limites para pilares mistos em temperatura ambiente ($0,2 \leq \delta = 0,56 \leq 0,9$).

O parâmetro de esbeltez $\bar{\lambda}$ é igual a 0,49 atendendo assim ao limite exigido para pilares mistos ($\bar{\lambda} \leq 2,0$).

A relação da área da seção transversal da armadura longitudinal corresponde a 3,56% da área da seção transversal de concreto podendo assim ser totalmente utilizada na determinação da resistência do pilar em temperatura ambiente ($0,3\% \leq A_s/A_c \leq 4\%$).

As relações limite para evitar a flambagem local do perfil I são obedecidas:

$$b/t_f = 23,9 \leq 1,47(E/f_y)^{1/2} = 38,42$$

Para o uso das tabelas, toda a taxa de armadura pode ser levada em conta na determinação de N_{Rd} e $N_{fi,Rd}$: $1\% \leq A_s/(A_c+A_s) = 3,44\% \leq 6\%$.

TABELA 6.3-g – Resultados comparativos para o Pilar Parcialmente Revestido formado com o perfil HP 360x132

Resistência do Pilar Parcialmente Revestido				
HP 360x132		Método Tabular	Método Avançado	ΔN_{fi}
		N_{fi} (kN)	N_{fi} (kN)	(%)
30 min	$\eta_{fi} \leq 0,7$	4817	8679	80,2
60 min	$\eta_{fi} \leq 0,7$	4817	5443	13,0
90 min	$\eta_{fi} \leq 0,5$	3441	4259	23,8
120 min	$\eta_{fi} \leq 0,3$	2065	3254	57,6

A distância mínima da face do pilar ao eixo da armadura u_s e as dimensões do perfil HP 360x132 permitiram a determinação da resistência pelo Método Tabular para todos os TRRF previstos pelo Eurocode 4 – Part 1.2 (1994) para perfis parcialmente revestidos por concreto. Pode-se observar que as resistências obtidas com o Método Avançado são consideravelmente maiores do que aquelas obtidas por meio do Método Tabular. Além disso, nota-se que, a partir do TRRF igual a 60 minutos, as diferenças aumentam à medida que são adotados tempos maiores de exposição ao fogo. Para 30 minutos de incêndio, a diferença é ainda maior devido à limitação do nível de carga.

H. Perfil Tubular 219,1x12,7

A TAB. 6.3-h apresenta uma comparação entre os resultados obtidos para a resistência do pilar misto preenchido por concreto constituído pelo perfil tubular 219,1x12,7, usando o Método Tabular e o Método Avançado de Cálculo.

Para o pilar misto preenchido por concreto formado com o perfil tubular 219,1x12,7, a relação entre as resistências de cálculo da seção de aço e da seção mista, δ , atende aos limites para pilares mistos em temperatura ambiente ($0,2 \leq \delta = 0,68 \leq 0,9$).

O parâmetro de esbeltez $\bar{\lambda}$ é igual a 0,71, atendendo assim ao limite exigido para pilares mistos ($\bar{\lambda} \leq 2,0$).

A relação da área da seção transversal da armadura longitudinal corresponde a 1,69% da área da seção transversal de concreto podendo assim ser totalmente utilizada na determinação da resistência do pilar em temperatura ambiente ($0,3\% \leq A_s/A_c \leq 4\%$).

As relações limite para evitar a flambagem local do perfil tubular são obedecidas:

$$d/t = 17,25 \leq 0,103(E/f_y) = 70,4$$

Na determinação de N_{Rd} e $N_{fi,Rd}$, para o uso das tabelas, aplicam-se as seguintes considerações:

- a) resistência ao escoamento do aço para perfil tubular igual a 235 MPa;
- b) toda a armadura foi levada em conta já que $A_s/(A_c + A_s) = 1,67\% \leq 3\%$;
- c) foi adotada a espessura de 8,76 mm para tubo, atendendo assim a limitação: $t \leq d/25$.

TABELA 6.3-h – Resultados comparativos para o Pilar Preenchido por Concreto formado com o perfil tubular 219,1x12,7

Pilar Preenchido por Concreto					
TC 219,1x12,7		Método Tabular	Método Avançado		ΔN_{fi} (%)
		N_{fi} (kN)	$(EI)_{fi}$ (kNm²)	N_{fi} (kN)	
30 min	Perfil Metálico	$\eta_{fi} \leq 0,3$	4627	1697	319,1
	Concreto		240	726	
	Armadura		186	246	
	Total	549	5005	2301	
60 min	Perfil Metálico	$\eta_{fi} \leq 0,3$	802	266	29,3
	Concreto		83	479	
	Armadura		135	193	
	Total	549	910	710	
90 min	Perfil Metálico	–	520	126	–
	Concreto		34	282	
	Armadura		47	82	
	Total	–	480	373	
120 min	Perfil Metálico	–	380	92	–
	Concreto		18	172	
	Armadura		23	36	
	Total	–	417	247	

O diâmetro do pilar, a taxa de armadura, $A_s/(A_c+A_s)$, e a distância mínima da face externa do concreto ao eixo da armadura, u_s , permitiram a determinação da resistência pelo Método Tabular apenas até 60 minutos de incêndio considerando o nível de carga, η_{fi} , menor ou igual a 0,3. Pode-se observar que as resistências obtidas com o Método Avançado são consideravelmente maiores do que aquelas obtidas por meio do Método Tabular. Além disso, nota-se que a diferença é ainda maior para 30 minutos de exposição ao fogo devido à limitação do nível de carga.

I. Perfil Tubular 273x9,3

A TAB. 6.3-i apresenta uma comparação entre os resultados obtidos para a resistência do pilar misto preenchido por concreto constituído pelo perfil tubular 273x9,3, usando o Método Tabular e o Método Avançado de Cálculo.

Para o pilar misto preenchido por concreto formado com o perfil tubular 273x9,3, a relação entre as resistências de cálculo da seção de aço e da seção mista, δ , atende aos limites para pilares mistos em temperatura ambiente ($0,2 \leq \delta = 0,52 \leq 0,9$).

O parâmetro de esbeltez $\bar{\lambda}$ é igual a 0,58, atendendo assim ao limite exigido para pilares mistos ($\bar{\lambda} \leq 2,0$).

A relação da área da seção transversal da armadura longitudinal utilizada na determinação da resistência do pilar em temperatura ambiente ($15,12 \text{ cm}^2$) corresponde a 3,09% da área da seção transversal de concreto ($0,3\% \leq A_s/A_c \leq 4\%$).

As relações limite para evitar a flambagem local do perfil tubular são obedecidas:

$$d/t = 29,4 \leq 0,103(E/f_y) = 70,4$$

Na determinação de N_{Rd} e $N_{fi,Rd}$, para o uso das tabelas, foi considerado o valor de 235 MPa para a resistência ao escoamento do aço do perfil tubular e apenas uma parte da armadura foi levada em conta devido à exigência: $A_s/(A_c+A_s) \leq 3\%$. A espessura do tubo atende a limitação $t \leq d/25 = 10,9 \text{ mm}$ ($t = 9,3 \text{ mm}$).

TABELA 6.3-i – Resultados comparativos para o Pilar Preenchido por Concreto formado com o perfil tubular 273x9,3

Pilar Preenchido por Concreto					
TC 273x9,3		Método Tabular	Método Avançado		ΔN_{fi}
		N_{fi} (kN)	$(EI)_{fi}$ (kNm ²)	N_{fi} (kN)	(%)
30 min	Perfil Metálico	$\eta_{fi} \leq 0,7$	6638	1516	59,5
	Concreto		871	1326	
	Armadura		1357	982	
	Total	2123	8692	3386	
60 min	Perfil Metálico	$\eta_{fi} \leq 0,5$	1210	245	14,8
	Concreto		384	1028	
	Armadura		1071	982	
	Total	1517	2360	1741	
90 min	Perfil Metálico	$\eta_{fi} \leq 0,3$	799	120	23,6
	Concreto		184	746	
	Armadura		736	641	
	Total	910	1384	1125	
120 min	Perfil Metálico	–	592	89	–
	Concreto		107	521	
	Armadura		339	346	
	Total	–	1017	741	

O diâmetro do pilar, a taxa de armadura, $A_s/(A_c+A_s)$, e a distância mínima da face externa do concreto ao eixo da armadura, u_s , permitiram a determinação da resistência pelo Método Tabular apenas até 90 minutos de incêndio. Para o nível de carga, η_{fi} , menor ou igual a 0,3, a taxa de armadura e distância mínima dos eixos das barras da armadura limitaram a resistência do pilar a 90 minutos de incêndio, já para η_{fi} menor ou igual a 0,5 e menor ou igual a 0,7, a limitação a 60 minutos de incêndio

e a 30 minutos de incêndio, respectivamente, se deu devido aos valores mínimos do diâmetro do pilar e da taxa de armadura. Pode-se observar que, também neste caso, as resistências obtidas com o Método Avançado são consideravelmente maiores do que aquelas obtidas por meio do Método Tabular.

J. TC 355,6x11,1

A TAB. 6.3-j apresenta uma comparação entre os resultados obtidos para a resistência do pilar misto preenchido por concreto constituído pelo perfil tubular 355,6x11,1, usando o Método Tabular e o Método Avançado de Cálculo.

Para o pilar misto preenchido por concreto formado com o perfil tubular 355,6x11,1, a relação entre as resistências de cálculo da seção de aço e da seção mista, δ , atende aos limites para pilares mistos em temperatura ambiente ($0,2 \leq \delta = 0,49 \leq 0,9$).

O parâmetro de esbeltez $\bar{\lambda}$ é igual a 0,45, atendendo assim ao limite exigido para pilares mistos ($\bar{\lambda} \leq 2,0$).

A relação da área da seção transversal da armadura longitudinal utilizada na determinação da resistência do pilar em temperatura ambiente (25 cm^2) corresponde a 3,09% da área da seção transversal de concreto ($0,3\% \leq A_s/A_c \leq 4\%$).

As relações limite para evitar a flambagem local do perfil tubular são obedecidas:

$$d/t = 34,0 \leq 0,103(E/f_y) = 70,4$$

Na determinação de N_{Rd} e $N_{fi,Rd}$, para o uso das tabelas, foi considerado o valor de 235MPa para a resistência ao escoamento do aço do perfil tubular e apenas uma parte da armadura foi levada conta devido à exigência: $A_s/(A_c+A_s) \leq 3\%$. A espessura do tubo atende a limitação $t \leq d/25 = 14,2 \text{ mm}$ ($t = 11,1 \text{ mm}$).

TABELA 6.3-j – Resultados comparativos para o Pilar Preenchido por Concreto formado com o perfil tubular 355,6x11,1

Pilar Preenchido por Concreto					
TC 355,6x11,1		Método Tabular	Método Avançado		ΔN_{fi}
		N_{fi} (kN)	$(EI)_{fi}$ (kNm ²)	N_{fi} (kN)	(%)
30 min	Perfil Metálico	$\eta_{fi} \leq 0,7$	20504	2655	111,6
	Concreto		2885	2369	
	Armadura		8488	3217	
	Total	3644	31300	7709	
60 min	Perfil Metálico	$\eta_{fi} \leq 0,5$	3475	448	87,1
	Concreto		1469	1972	
	Armadura		7113	3217	
	Total	2603	10704	4870	
90 min	Perfil Metálico	$\eta_{fi} \leq 0,3$	2268	198	155,4
	Concreto		840	1593	
	Armadura		6000	2991	
	Total	1562	7286	3989	
120 min	Perfil Metálico	$\eta_{fi} \leq 0,3$	1682	147	98,4
	Concreto		525	1264	
	Armadura		4555	2190	
	Total	1562	6658	3099	

O diâmetro do pilar, a taxa de armadura, $A_s/(A_c+A_s)$, e a distância mínima da face externa do concreto ao eixo da armadura, u_s , permitiram a determinação da resistência pelo Método Tabular até 120 minutos de incêndio. Para o nível de carga, η_{fi} , menor ou igual a 0,5 e menor ou igual a 0,7, a limitação a 60 minutos de incêndio e a 30 minutos de incêndio, respectivamente, se deu devido aos valores mínimos exigidos para o diâmetro do pilar. Pode-se observar que as resistências

obtidas com o Método Avançado são consideravelmente maiores do que aquelas obtidas por meio do Método Tabular e que a diferença é ainda maior para 90 minutos de exposição ao fogo devido à limitação do nível de carga.

6.5.4 Comparação das Resistências dos Pilares com e sem Proteção de Argamassa Jateada

As tabelas 6.4-a, 6.4-b, 6.4-c e 6.4-d mostram uma comparação entre a resistência e rigidez dos pilares mistos protegidos com argamassa jateada e a resistência desses pilares sem proteção térmica, obtidas usando-se o Método Avançado de Cálculo. Pode-se observar, a partir dessas tabelas, como a aplicação de uma pequena espessura de argamassa jateada sobre a região exposta ao fogo dos perfis metálicos eleva consideravelmente a resistência dos pilares mistos em situação de incêndio.

TABELA 6.4-a – Resistências do pilar misto formado com o perfil PS 400x62 sem proteção e com proteção de argamassa jateada

Pilar Parcialmente Revestido							
PS 400x62		Pilar Protegido		Pilar sem Proteção		$\Delta (EI)_{fi}$	ΔN_{fi}
		$(EI)_{fi}$ (kNm ²)	N_{fi} (kN)	$(EI)_{fi}$ (kNm ²)	N_{fi} (kN)	(%)	(%)
30 min	Mesas	5991	1440	2726	909	119,8	58,4
	Alma	3,33	922	2,99	911	11,4	1,2
	Concreto	4501	3042	3439	2843	30,9	7,0
	Armadura	2892	1608	2797	1608	3,4	0,0
	Total	12487	6000	8278	5093	50,8	17,8
60 min	Mesas	4484	1319	612	162	632,7	714,2
	Alma	3,12	922	2,31	773	35,1	19,3
	Concreto	2619	2645	1706	2260	53,5	17,0
	Armadura	2547	1608	2346	1608	8,6	0,0
	Total	8427	5257	4030	3495	109,1	50,4
90 min	Mesas	2522	991	403	76	525,8	1203,9
	Alma	2,82	922	1,85	668	52,4	38,0
	Concreto	1724	2303	1030	1812	67,4	27,1
	Armadura	2250	1608	1954	1449	15,1	11,0
	Total	5200	4314	2711	2718	91,8	58,7
120 min	Mesas	1356	667	301	56	350,5	1091,1
	Alma	2,55	897	1,48	564	72,3	59,0
	Concreto	1198	1975	615	1445	94,8	36,7
	Armadura	1999	1548	1405	1164	42,3	33,0
	Total	4317	3715	2199	2197	96,3	69,1

TABELA 6.4-b – Resistências do pilar misto formado com o perfil VE 500x68 sem proteção e com proteção de argamassa jateada

Pilar Parcialmente Revestido							
VE 500x68		Pilar Protegido		Pilar sem Proteção		$\Delta (EI)_{fi}$	ΔN_{fi}
		$(EI)_{fi}$ (kNm ²)	N_{fi} (kN)	$(EI)_{fi}$ (kNm ²)	N_{fi} (kN)	(%)	(%)
30 min	Mesas	4128	1425	2058	936	100,6	52,2
	Alma	4,14	1154	3,77	1135	9,8	1,7
	Concreto	2973	3125	2150	2894	38,3	8,0
	Armadura	3172	1886	3081	1886	3,0	0,0
	Total	9682	6123	6863	5233	41,1	17,0
60 min	Mesas	3112	1295	437	169	612,1	666,3
	Alma	3,77	1154	2,91	965	29,6	19,6
	Concreto	1557	2631	972	2212	60,2	18,9
	Armadura	2753	1886	2257	1886	22,0	0,0
	Total	6527	5230	3493	3532	86,9	48,1
90 min	Mesas	1581	863	281	76	462,6	1035,5
	Alma	3,34	1134	2,39	855	39,7	32,6
	Concreto	984	2234	538	1745	82,9	28,0
	Armadura	2400	1886	2109	1666	13,8	13,2
	Total	3975	4090	2345	2695	69,5	51,8
120 min	Mesas	772	509	209	56	269,4	808,9
	Alma	2,91	1059	1,94	730	50,0	45,1
	Concreto	645	1849	335	1373	92,5	34,7
	Armadura	2105	1656	1561	1248	34,8	32,7
	Total	3396	3429	2188	2399	55,2	42,9

TABELA 6.4-c – Resistências do pilar misto formado com o perfil HP 360x132 sem proteção e com proteção de argamassa jateada

Pilar Parcialmente Revestido							
HP 360x132		Pilar Protegido		Pilar sem Proteção		$\Delta (EI)_{fi}$	ΔN_{fi}
		$(EI)_{fi}$ (kNm ²)	N_{fi} (kN)	$(EI)_{fi}$ (kNm ²)	N_{fi} (kN)	(%)	(%)
30 min	Mesas	24219	3491	16147	2901	50,0	20,3
	Alma	20,7	1497	18,25	1497	13,4	0,0
	Concreto	7650	3146	6029	2971	26,9	5,9
	Armadura	12599	1963	12270	1963	2,7	0,0
	Total	42958	9539	33260	8679	29,2	9,9
60 min	Mesas	19783	3454	2650	551	646,5	526,9
	Alma	19,65	1497	13,51	1275	45,4	17,4
	Concreto	4738	2773	2943	2352	61,0	17,9
	Armadura	11079	1963	10351	1963	7,0	0,0
	Total	31585	8932	14068	5443	124,5	64,1
90 min	Mesas	15486	3056	1704	219	808,8	1295,4
	Alma	17,97	1497	9,82	992	83,0	50,9
	Concreto	3206	2453	1744	1855	83,8	32,2
	Armadura	9823	1963	8760	1827	12,1	7,4
	Total	22830	8052	9776	4259	133,5	89,1
120 min	Mesas	9782	2379	1231	150	694,6	1486,0
	Alma	16,39	1497	6,84	677	139,6	121,1
	Concreto	2338	2161	1066	1448	119,3	49,2
	Armadura	8773	1881	6620	1378	32,5	36,5
	Total	20442	7121	8710	3254	134,7	118,8

TABELA 6.4-d – Resistências do pilar misto formado com o perfil tubular 273x9,3 sem proteção e com proteção de argamassa jateada

Pilar Preenchido por Concreto							
TC 273x9,3		Pilar Protegido		Pilar sem Proteção		$\Delta (EI)_{fi}$ (%)	ΔN_{fi} (%)
		$(EI)_{fi}$ (kNm ²)	N_{fi} (kN)	$(EI)_{fi}$ (kNm ²)	N_{fi} (kN)		
30 min	Perfil Aço	12206	2311	6638	1516	83,9	52,4
	Concreto	1504	1448	871	1326	72,7	9,2
	Armadura	1530	982	1357	982	12,7	0,0
	Total	14939	4357	8692	3386	71,9	28,7
60 min	Perfil Aço	10258	2311	1210	245	747,8	843,3
	Concreto	1049	1369	384	1028	173,2	33,2
	Armadura	1483	982	1071	982	38,5	0,0
	Total	11406	4166	2360	1741	383,3	139,3
90 min	Perfil Aço	8750	1996	799	120	995,1	1563,3
	Concreto	755	1278	184	746	310,3	71,3
	Armadura	1245	982	736	641	69,2	53,2
	Total	8600	3710	1384	1125	521,4	229,8
120 min	Perfil Aço	6161	1430	592	89	940,7	1506,7
	Concreto	546	1154	107	521	410,3	121,5
	Armadura	1118	982	339	346	229,8	183,8
	Total	7716	3137	1017	741	658,7	323,3

7

ANÁLISE DE RESULTADOS

7.1 Análise Comparativa

Verifica-se pela consolidação dos resultados do Capítulo 6, apresentada nas Figuras 7.1 e Tabelas 7.1, que em termos gerais as resistências dos pilares mistos obtidas a partir do Método Tabular são menores do que as obtidas através do Método Analítico que, por sua vez, são inferiores àquelas obtidas pelo Método Avançado. Tal constatação confirma que o Método Tabular fornece resultados conservadores quando comparados com os outros dois métodos, e que o Método Simplificado Analítico de Cálculo fornece também resultados a favor da segurança quando comparado ao Método Avançado de Cálculo.

Uma exceção ao anteriormente exposto é apresentada na TAB.7.1-a e FIG.7.1-a, onde as resistências obtidas para o pilar parcialmente revestido pelo Método Analítico em 90

e 120 minutos de incêndio são maiores do que as obtidas pelo Método Avançado. Isso se dá porque o perfil CE 250x49 não atende as dimensões mínimas exigidas para a utilização do Método Analítico de Cálculo em 90 e 120 minutos de incêndio, o que levou a resultados contra a segurança.

Outros casos que merecem atenção dizem respeito aos pilares parcialmente revestidos formados com os perfis HP 310x93 para os tempos requeridos de resistência ao fogo de 60, 90 e 120 minutos e, HP 360x132, para o tempo requerido de resistência ao fogo de 60 minutos. Nestes casos, a resistência calculada através do Método Tabular é superior à calculada através do Método Simplificado Analítico de Cálculo. Possivelmente, a razão de contribuição do aço δ para estes pilares ($\delta = 0,57$ para o pilar formado com o perfil HP 310x93 e $\delta = 0,56$ para o pilar formado com o perfil HP 360x132) tenha influenciado na obtenção de valores contra a segurança para as resistências no dimensionamento pelo Método Tabular. Assim, a utilização do limite de 0,4 adotado pelo ECCS (2001) para o valor de δ conduzirá a resultados mais consistentes no dimensionamento dos pilares mistos parcialmente revestidos por este método. Além disto, os valores das resistências obtidos pelos dois métodos simplificados são muito próximos (diferenças de, no máximo, 5,68%), não invalidando os resultados.

Os gráficos apresentados nas Figuras 7.1.a a 7.1.g também permitem observar claramente que, no caso dos pilares parcialmente revestidos por concreto, tanto o Método Tabular quanto o Método Simplificado Analítico foram calibrados para os tempos requeridos de resistência ao fogo de 60 e 90 minutos.

Para alguns pilares, não foi possível fazer a comparação entre resistências obtidas pelo Método Tabular com as demais para todos os tempos requeridos de resistência ao fogo, já que essas resistências não foram determinadas devido às limitações do método para as dimensões da seção transversal.

As figuras 7.2 e tabelas 7.2 mostram a relação entre as resistências dos pilares mistos com e sem proteção de argamassa jateada. Como esperado, a proteção com argamassa é

eficiente conduzindo a resistências consideravelmente superiores tanto para os pilares parcialmente revestidos quanto para os preenchidos por concreto.

Observa-se que todos os gráficos apresentam curvas semelhantes para o mesmo tipo de pilar misto (FIG.7.1) e, o comportamento das curvas que relacionam as resistências dos pilares mistos protegidos ou sem proteção de argamassa jateada (FIG.7.2) também possuem o mesmo comportamento.

TABELA 7.1-a – Relação entre as resistências obtidas através dos Métodos Tabular, Simplificado Analítico e Avançado de Cálculo do pilar parcialmente revestido formado com o perfil CE 250x49

Relação entre as Resistências dos Diferentes Métodos (%)			
CE 250x49	Método Avançado / Método Analítico	Método Avançado / Método Tabular	Método Analítico / Método Tabular
30	135,05	177,05	131,11
60	101,97	-	-
*90	88,02	-	-
*120	99,33	-	-
*Resultados inválidos para o Método Analítico de Cálculo devido ao não cumprimento de suas limitações.			

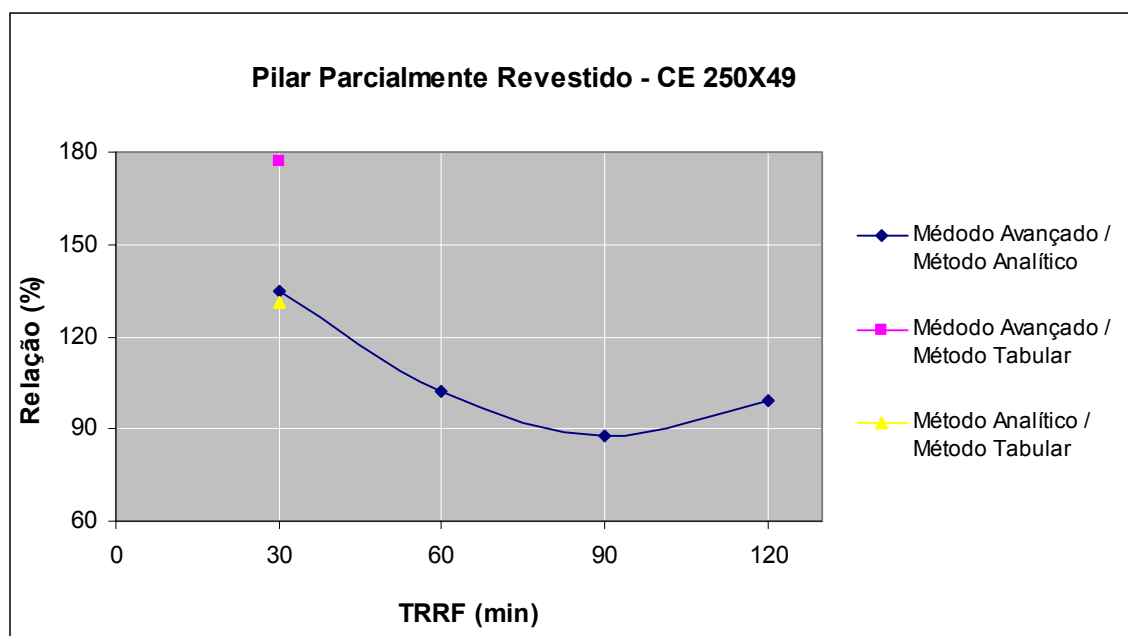


FIGURA 7.1.a – Gráfico comparativo das resistências obtidas através dos diferentes métodos de dimensionamento para o pilar parcialmente revestido formado com o perfil CE 250x49

TABELA 7.1-b – Relação entre as resistências obtidas através dos Métodos Tabular, Simplificado Analítico e Avançado de Cálculo do pilar parcialmente revestido formado com o perfil PS 400x62

Relação entre as Resistências dos Diferentes Métodos (%)			
PS 400x62	Método Avançado / Método Analítico	Método Avançado / Método Tabular	Método Analítico / Método Tabular
30	116,38	178,95	153,76
60	105,02	122,80	116,94
90	109,51	133,69	122,09
120	143,59	180,08	125,41

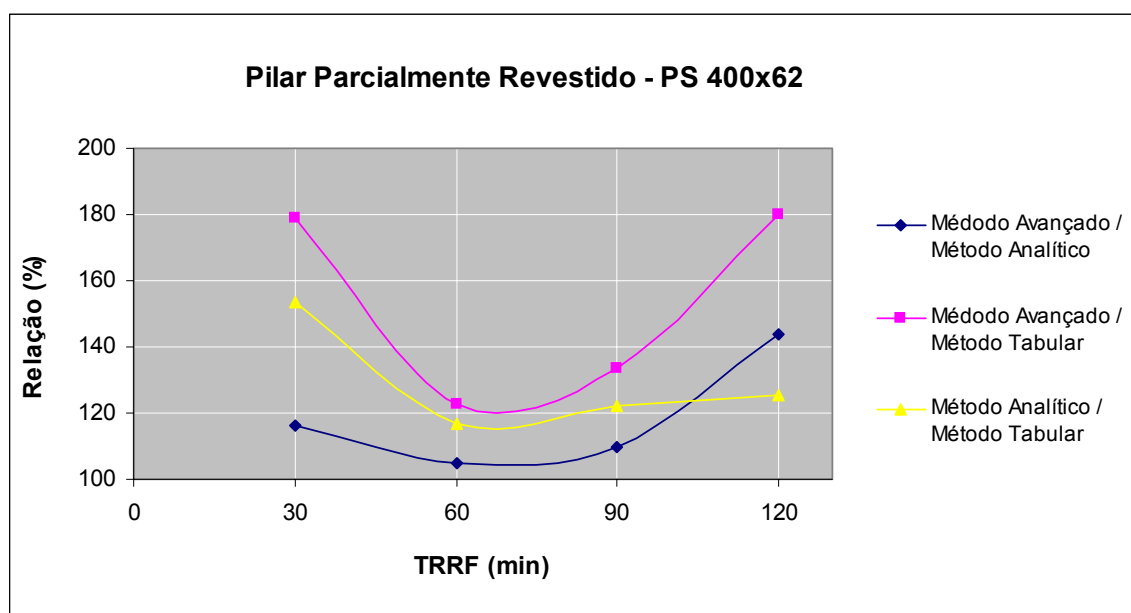


FIGURA 7.1.b – Gráfico comparativo das resistências obtidas através dos diferentes métodos de dimensionamento para o pilar parcialmente revestido formado com o perfil PS 400x62

TABELA 7.1-c – Relação entre as resistências obtidas através dos Métodos Tabular, Simplificado Analítico e Avançado de Cálculo do pilar parcialmente revestido formado com o perfil W 610x174

Relação entre as Resistências dos Diferentes Métodos (%)			
W 610x174	Método Avançado / Método Analítico	Método Avançado / Método Tabular	Método Analítico / Método Tabular
30	130,63	191,65	146,71
60	109,84	177,32	161,44
90	112,13	239,12	213,26
120	140,34	-	-

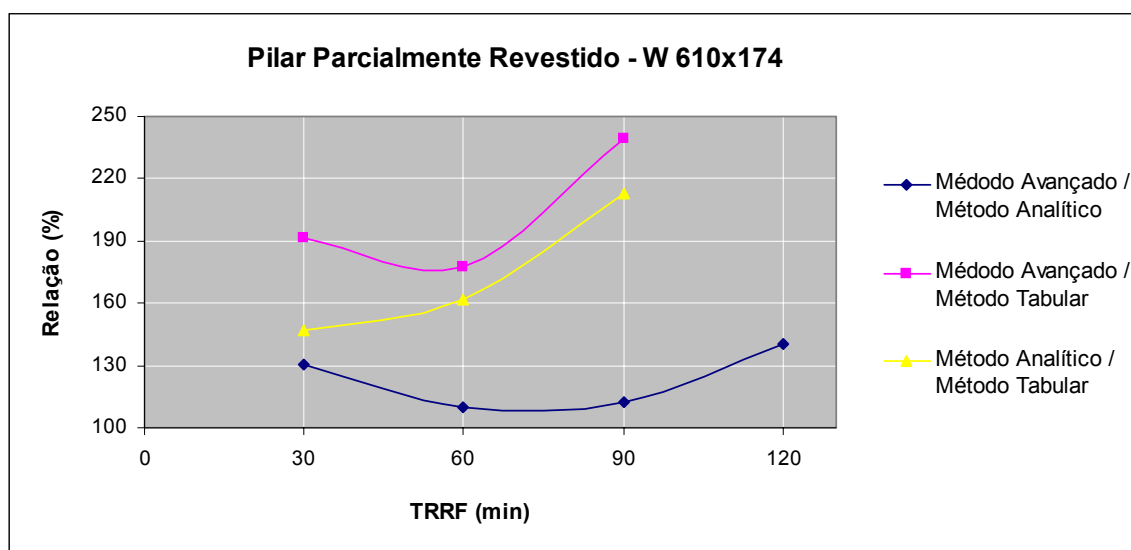


FIGURA 7.1.c – Gráfico comparativo das resistências obtidas através dos diferentes métodos de dimensionamento para o pilar parcialmente revestido formado com o perfil W 610x174

TABELA 7.1-d – Relação entre as resistências obtidas através dos Métodos Tabular, Simplificado Analítico e Avançado de Cálculo do pilar parcialmente revestido formado com o perfil HP 310x93

Relação entre as Resistências dos Diferentes Métodos (%)			
HP 310x93	Método Avançado / Método Analítico	Método Avançado / Método Tabular	Método Analítico / Método Tabular
30	138,61	178,12	128,51
60	110,02	103,77	94,32
90	105,13	101,45	96,50
120	119,18	116,29	97,58

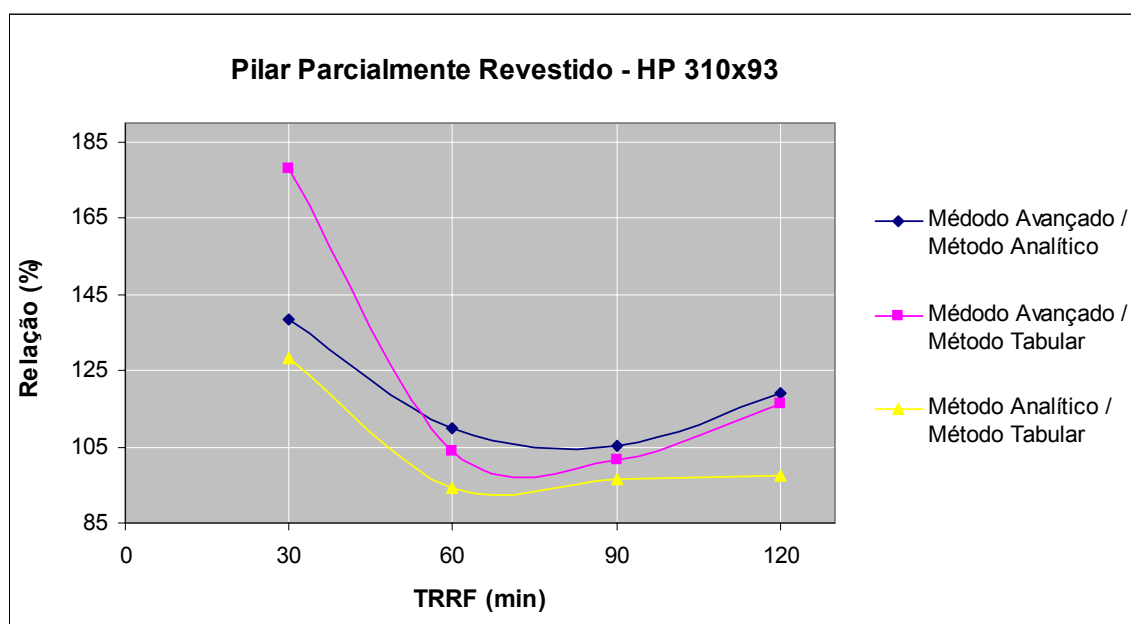


FIGURA 7.1.d – Gráfico comparativo das resistências obtidas através dos diferentes métodos de dimensionamento para o pilar parcialmente revestido formado com o perfil HP 310x93

TABELA 7.1-e – Relação entre as resistências obtidas através dos Métodos Tabular, Simplificado Analítico e Avançado de Cálculo do pilar parcialmente revestido formado com o perfil HP 360x132

Relação entre as Resistências dos Diferentes Métodos (%)			
HP 360x132	Método Avançado / Método Analítico	Método Avançado / Método Tabular	Método Analítico / Método Tabular
30	138,24	180,17	130,33
60	114,59	113,00	98,61
90	117,62	123,77	105,23
120	138,41	157,58	113,85

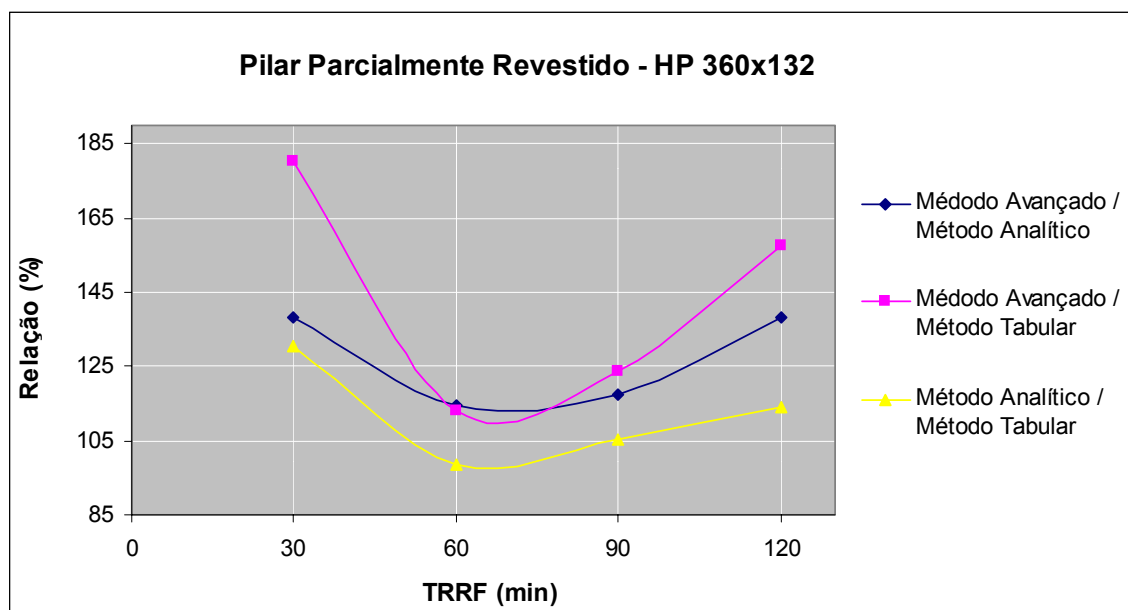


FIGURA 7.1.e – Gráfico comparativo das resistências obtidas através dos diferentes métodos de dimensionamento para o pilar parcialmente revestido formado com o perfil HP 360x132

TABELA 7.1-f – Relação entre as resistências obtidas através dos Métodos Tabular, Simplificado Analítico e Avançado de Cálculo do pilar parcialmente revestido formado com o perfil CE 300x76

Relação entre as Resistências dos Diferentes Métodos (%)			
CE 300x76	Método Avançado / Método Analítico	Método Avançado / Método Tabular	Método Analítico / Método Tabular
30	136,27	176,32	129,39
60	108,98	146,71	134,62
90	106,21	174,54	164,33
120	127,26	-	-

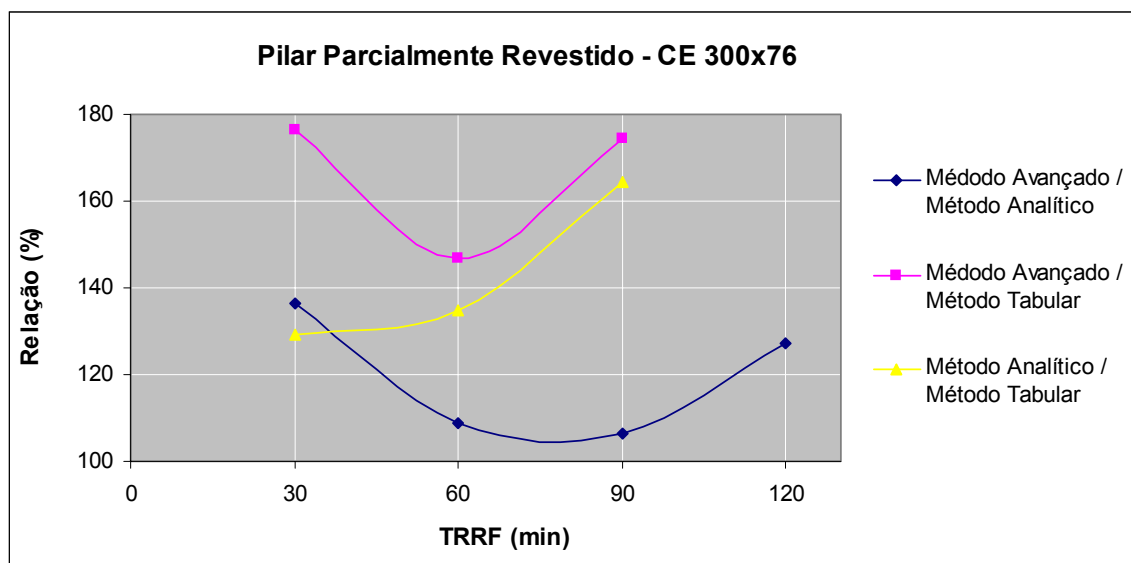


FIGURA 7.1.f – Gráfico comparativo das resistências obtidas através dos diferentes métodos de dimensionamento para o pilar parcialmente revestido formado com o perfil CE 300x76

TABELA 7.1-g – Relação entre as resistências obtidas através dos Métodos Tabular, Simplificado Analítico e Avançado de Cálculo do pilar parcialmente revestido formado com o perfil VE 500x68

Relação entre as Resistências dos Diferentes Métodos (%)			
VE 500x68	Método Avançado / Método Analítico	Método Avançado / Método Tabular	Método Analítico / Método Tabular
30	114,43	186,63	163,09
60	101,67	-	-
*90	104,66	-	-
*120	152,03	-	-
*Resultados inválidos para o Método Analítico de Cálculo devido ao não cumprimento de suas limitações.			

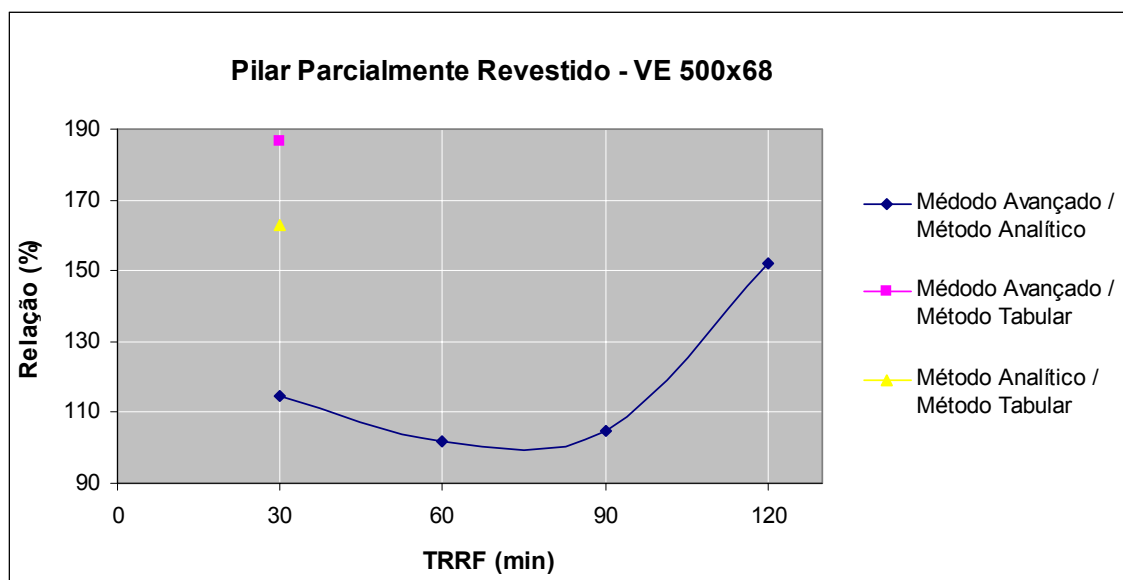


FIGURA 7.1.g – Gráfico comparativo das resistências obtidas através dos diferentes métodos de dimensionamento para o pilar parcialmente revestido formado com o perfil VE 500x68

TABELA 7.1-h – Relação entre as resistências obtidas através dos Métodos Tabular e Avançado de Cálculo do pilar preenchido por concreto formado com o perfil tubular 273x9,3

Relação entre as Resistências dos Diferentes Métodos (%)	
TC 273x9,3	Método Avançado / Método Tabular
30	159,49
60	114,77
90	123,63
120	-

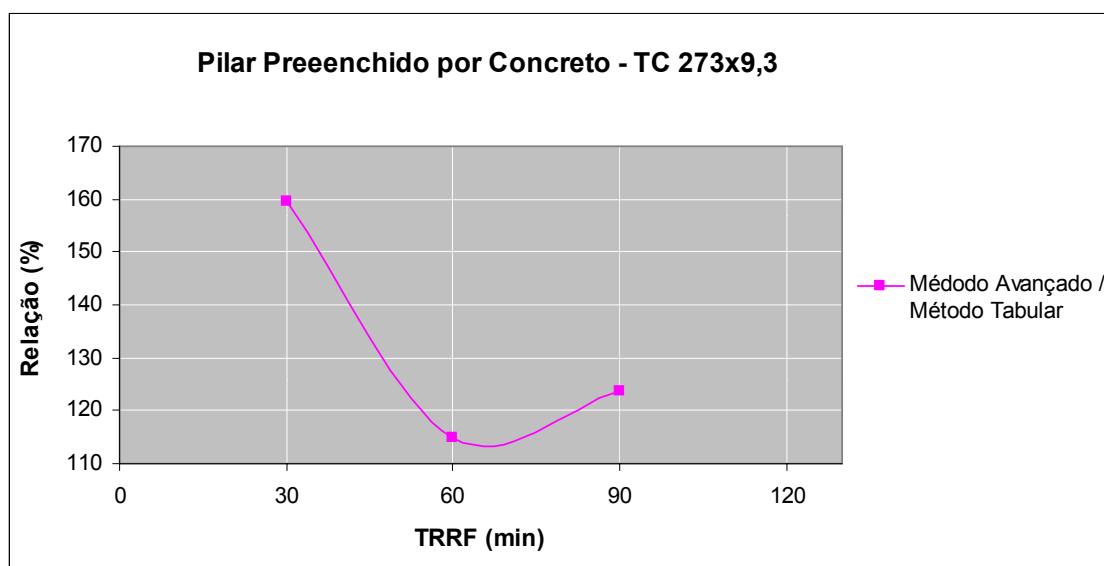


FIGURA 7.1.h – Gráfico comparativo das resistências obtidas através dos diferentes métodos de dimensionamento para o pilar preenchido por concreto formado com o perfil tubular 273x9,3

TABELA 7.1-i – Relação entre as resistências obtidas através dos Métodos Tabular e Avançado de Cálculo do pilar preenchido por concreto formado com o perfil tubular 355,6x11,1

Relação entre as Resistências dos Diferentes Métodos (%)	
TC 355,6x11,1	Método Avançado / Método Tabular
30	211,55
60	187,09
90	255,38
120	198,40

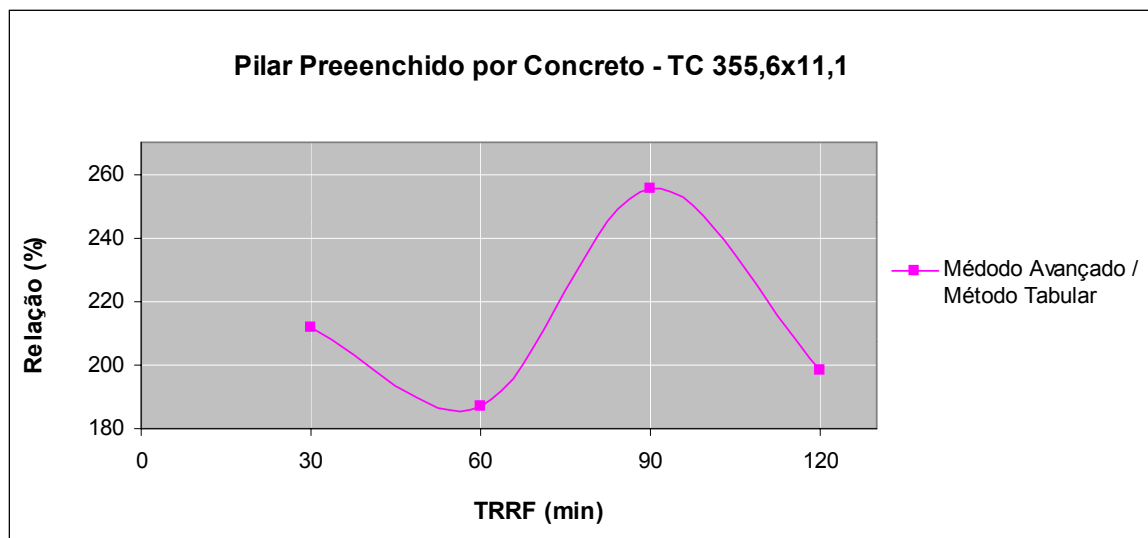


FIGURA 7.1.i – Gráfico comparativo das resistências obtidas através dos diferentes Métodos de Dimensionamento para o pilar preenchido por concreto formado com o perfil tubular 355,6x11,1

TABELA 7.1-j – Relação entre as resistências obtidas através dos Métodos Tabular e Avançado de Cálculo do pilar preenchido por concreto formado com o perfil tubular 219,1x12,7

Relação entre as Resistências dos Diferentes Métodos (%)	
TC 219,1x12,7	Método Avançado / Método Tabular
30	419,13
60	129,33
90	-
120	-

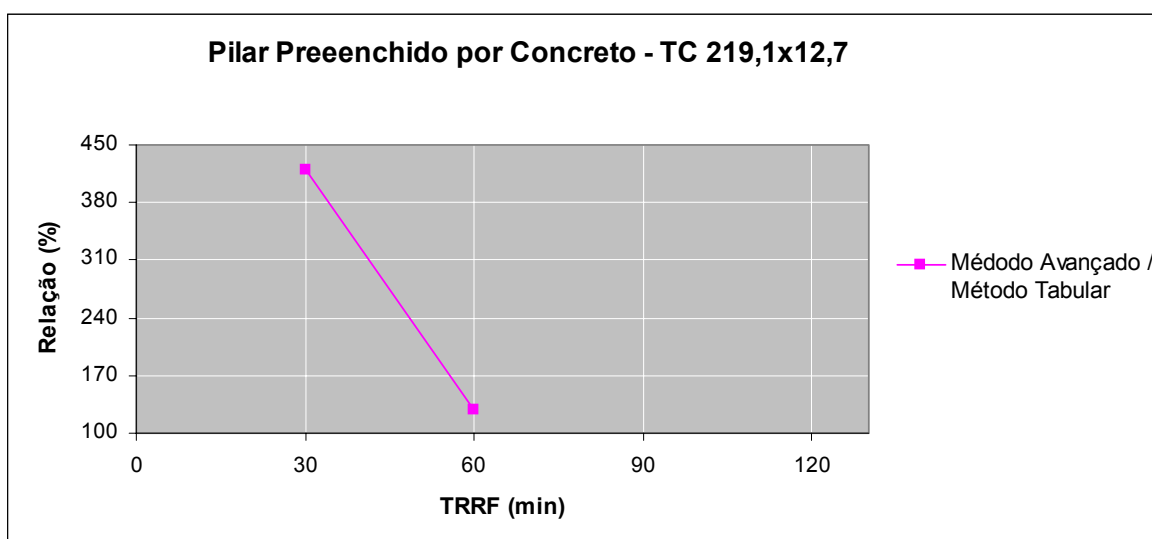


FIGURA 7.1.j – Gráfico comparativo das resistências obtidas através do diferentes métodos de dimensionamento para o pilar preenchido por concreto formado com o perfil tubular 219,1x12,7

TABELA 7.2-a – Relação entre as resistências do pilar parcialmente revestido formado com o perfil PS 400x62 com proteção e sem proteção de argamassa jateada

Relação entre as Resistências dos Pilares (%)	
PS 400x62	Protegido/ Sem Proteção
30	117,81
60	150,41
90	158,72
120	169,09

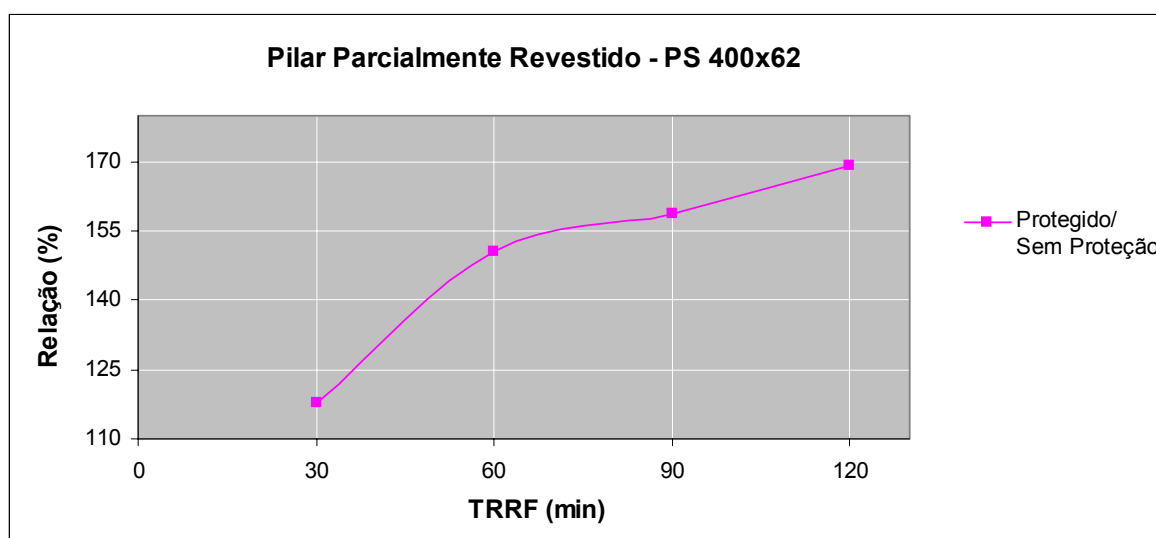


FIGURA 7.2.a – Gráfico comparativo das resistências do pilar parcialmente revestido formado com o perfil PS 400x62 com proteção e sem proteção de argamassa jateada

TABELA 7.2-b – Relação entre as resistências do pilar parcialmente revestido formado com o perfil VE 500x68 com proteção e sem proteção de argamassa jateada

Relação entre as Resistências dos Pilares (%)	
VE 500x68	Protegido/ Sem Proteção
30	117,01
60	148,07
90	151,76
120	142,93

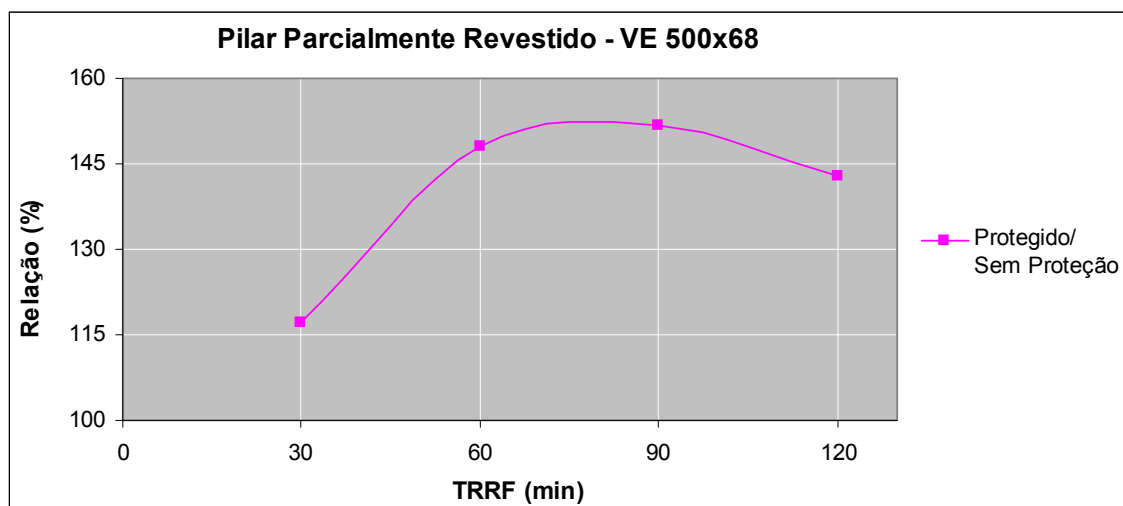


FIGURA 7.2.b – Gráfico comparativo das resistências do pilar parcialmente revestido formado com o perfil VE 500x68 com proteção e sem proteção de argamassa jateada

TABELA 7.2-c – Relação entre as resistências do pilar parcialmente revestido formado com o perfil HP 360x132 com proteção e sem proteção de argamassa jateada

Relação entre as Resistências dos Pilares (%)	
HP 360x132	Protegido/ Sem Proteção
30	109,91
60	164,10
90	189,06
120	218,84

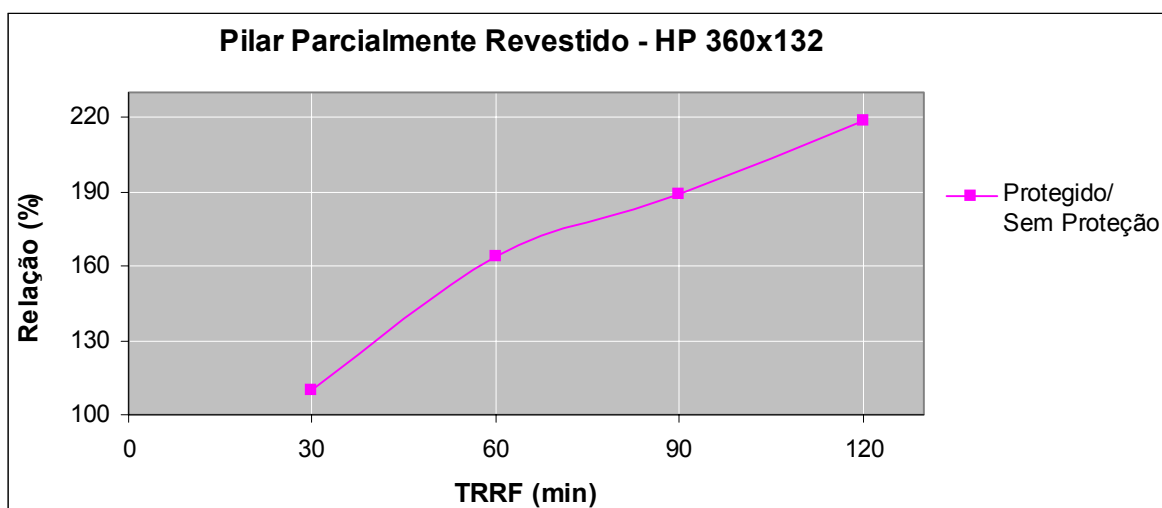


FIGURA 7.2.c – Gráfico comparativo das resistências do pilar parcialmente revestido formado com o perfil HP 360x132 com proteção e sem proteção de argamassa jateada

TABELA 7.2-d – Relação entre as resistências do pilar preenchido por concreto formado com o perfil tubular 273x9,3 com proteção e sem proteção de argamassa jateada

Relação entre as Resistências dos Pilares (%)	
TC 273x9,3	Protegido/ Sem Proteção
30	128,68
60	239,29
90	329,78
120	423,35

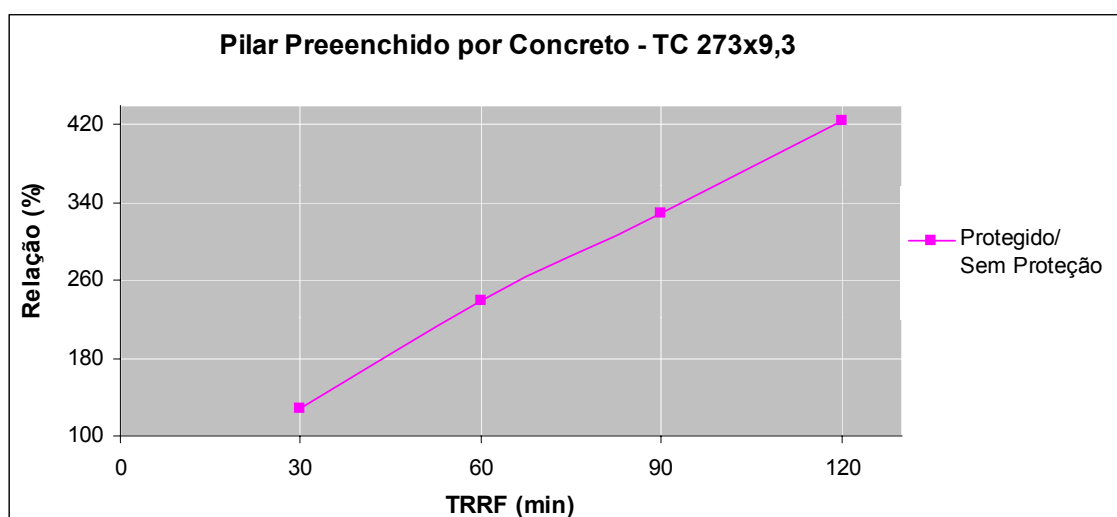


FIGURA 7.2.d – Gráfico comparativo das resistências do pilar preenchido por concreto formado com o perfil tubular 273x9,3 com proteção e sem proteção de argamassa jateada

8

CONCLUSÕES E SUGESTÕES PARA NOVOS TRABALHOS

8.1 Conclusões

Os exemplos apresentados neste trabalho permitiram a confirmação da consistência dos Métodos Tabular e Simplificado Analítico de Cálculo na determinação da resistência dos pilares parcialmente revestidos e do Método Tabular na determinação da resistência dos pilares preenchidos por concreto.

Os resultados da força normal resistente de cálculo obtidos pelos Métodos Simplificados e pelo Método Avançado de Cálculo indicaram que o Método Tabular, embora seja de uso mais simples e direto, fornece resultados bastante favoráveis à segurança, o que pode elevar os custos de construção. Estes resultados indicaram também que o Método Simplificado Analítico apresenta resultados mais corretos, quando comparados aos resultados obtidos pelo Método Tabular, mas ainda bastante

conservadores quando comparados aos Métodos Avançados de Cálculo. Além disto, observou-se a fácil aplicação do Método Simplificado Analítico para os pilares parcialmente revestidos, mas de uso ainda dificultado para os pilares preenchidos por concreto devido à exigência de programas computacionais para a determinação da temperatura na seção transversal do pilar.

Para os pilares parcialmente revestidos por concreto, resultados mais corretos foram obtidos em 60 e 90 minutos de incêndio devido à uma provável calibração dos métodos simplificados para estes tempos requeridos de resistência ao fogo. Assim, a utilização destes métodos para 120 minutos de incêndio leva a resultados favoráveis à segurança, porém anti-econômicos.

Além disto, no caso do Método Tabular, a limitação do nível de carga η_f ao valor de 0,3 em 120 minutos de incêndio também torna a solução anti-econômica para este tempo requerido de resistência ao fogo, tanto para os pilares parcialmente revestidos quanto para os pilares preenchidos por concreto. Daí a necessidade do desenvolvimento de ferramentas para análise térmica e utilização de Métodos Avançados de Cálculo.

Nota-se ainda que as exigências do Método Tabular relativas a relação t_w/t_f (*espessura da alma / espessura da mesa*) para pilares parcialmente revestidos são apropriadas para os perfis laminados devido às suas dimensões bastante proporcionais e bem definidas. Ajustando as tabelas à realidade brasileira, a relação A_w/A_f (*área da alma / área da mesa*) seria mais adequada já que perfis soldados são amplamente empregados.

Deve-se ressaltar ainda que, em alguns casos, quando o aquecimento é relativamente pequeno, pode-se chegar a uma força normal resistente de cálculo superior à força normal resistente em temperatura ambiente, devido à utilização de coeficientes de ponderação da resistência em situação de incêndio iguais a 1,0. Embora resultados assim possam ser justificados probabilisticamente a partir de considerações relacionadas ao fato de o incêndio se constituir em uma ação excepcional de curta duração e com probabilidade relativamente reduzida de ocorrência, não tem sentido prático, limitando-se então a resistência do pilar misto em situação de incêndio para qualquer tempo requerido de resistência ao fogo à resistência deste pilar em temperatura ambiente.

8.2 Sugestões para Novos Trabalhos

Com a finalidade de aumentar os conhecimentos relacionados à resistência dos pilares mistos em situação de incêndio, sugere-se efetuar todos os estudos realizados neste trabalho para os pilares totalmente revestidos por concreto e pilares de seção retangular preenchidos por concreto.

Outra sugestão é realizar estudos relacionados à resistência dos pilares mistos sujeitos a condições menos severas do que aqueles submetidos ao incêndio em todas as faces, como, por exemplo, pilares de fachada que ficam relativamente protegidos pela alvenaria, tendo, portanto, um menor aquecimento e assim maior resistência (FIG. 7.3).

A título de ilustração, a FIG. 7.4, obtida com a utilização do programa CALTEMI, mostra em escala de cores a diferença de temperatura na seção transversal do pilar parcialmente revestido por concreto formado com o perfil PS 400x62 com os 4 lados expostos ao fogo e com apenas um lado exposto ao fogo, considerando o pilar no eixo da alvenaria e faceando a alvenaria, para os TRRF de 30, 60, 90 e 120 minutos.

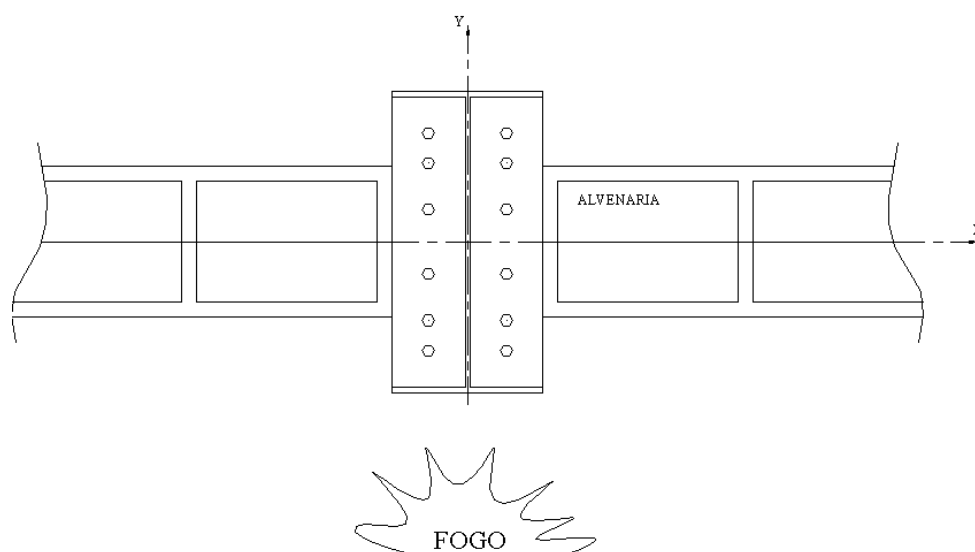


FIGURA 8.1.a – Pilares mistos de fachada com o eixo de maior inércia coincidindo com o eixo da alvenaria

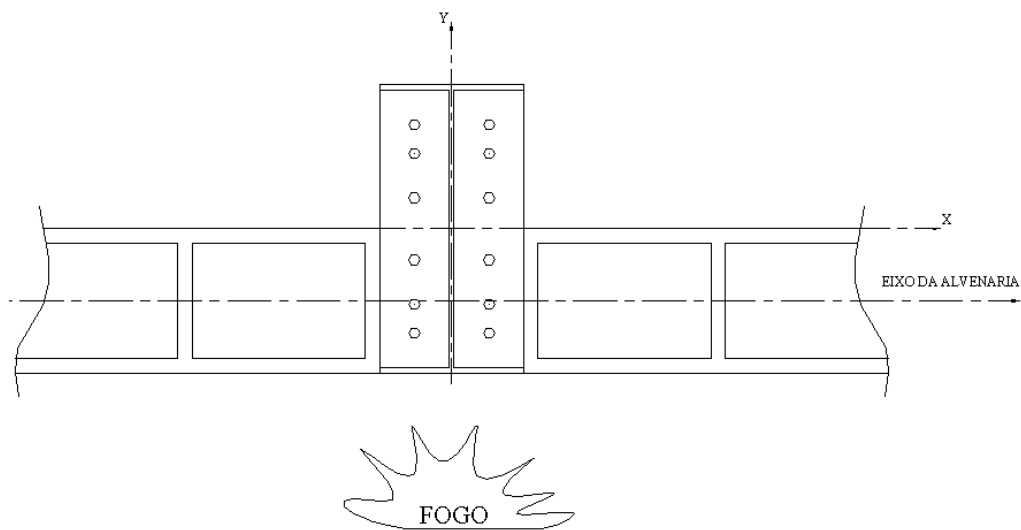


FIGURA 8.1.b – Pilares mistos de fachada com a face exposta ao fogo alinhada com a face interna da alvenaria

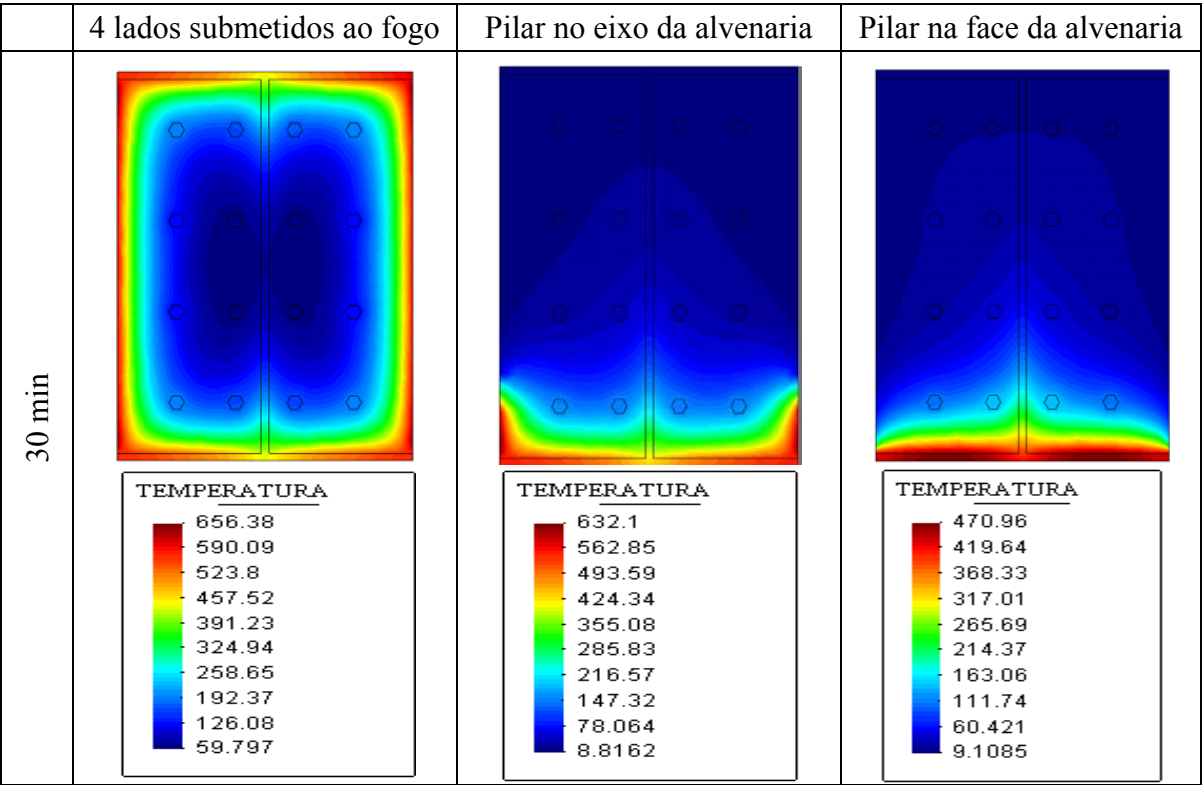


FIGURA 8.2.a – Pilar parcialmente revestido formado com o perfil PS 400x62 submetido a 30 minutos de incêndio

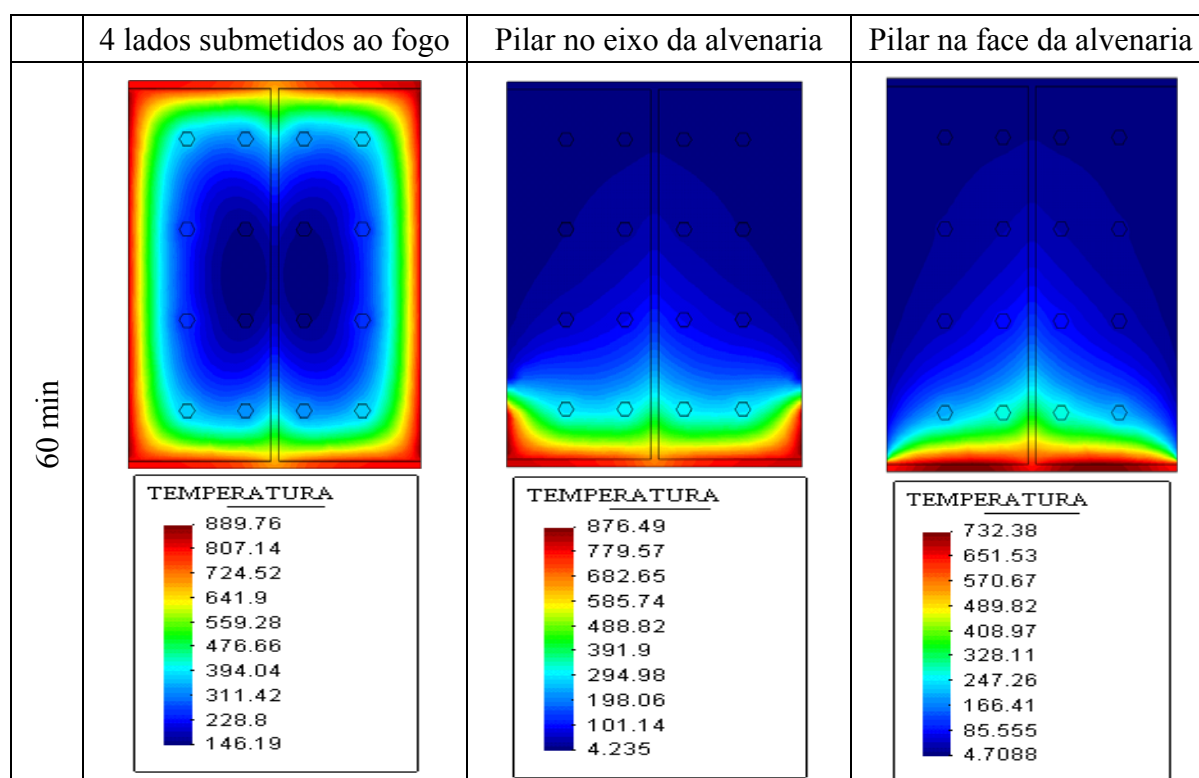


FIGURA 8.2.b – Pilar parcialmente revestido formado com o perfil PS 400x62 submetido a 60 minutos de incêndio

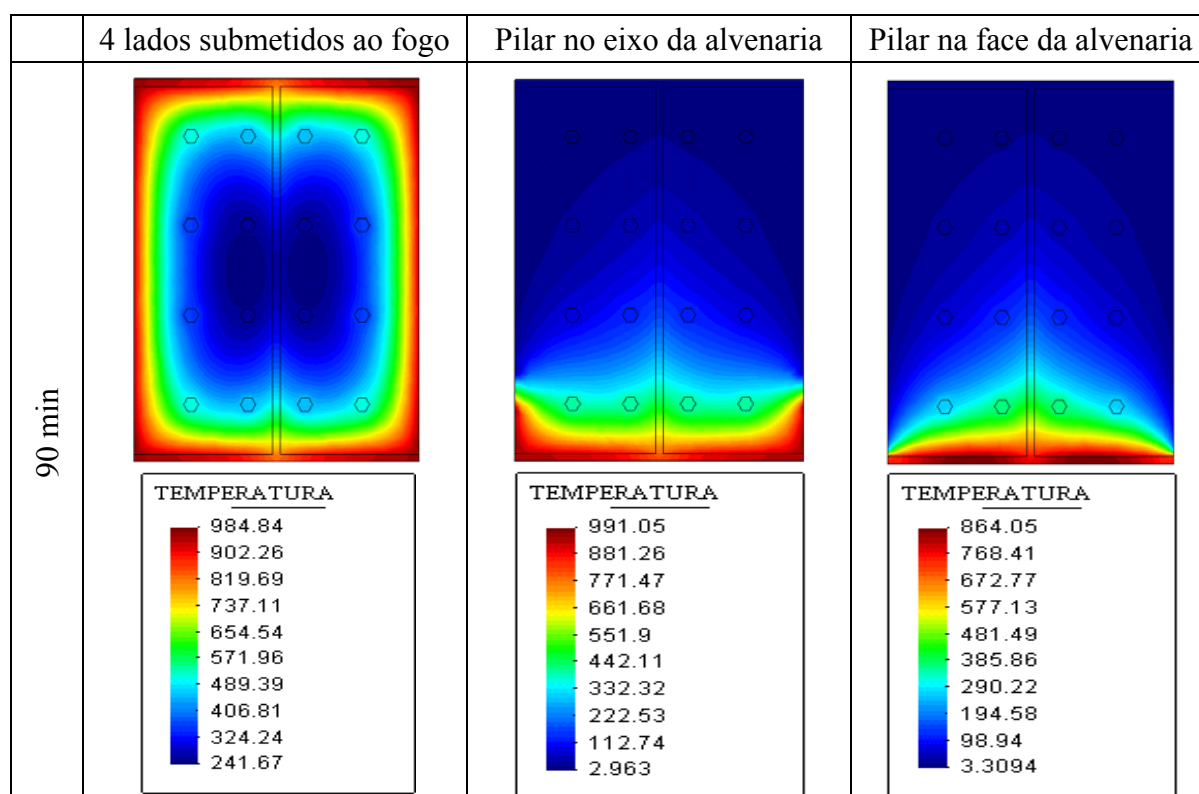


FIGURA 8.2.c – Pilar parcialmente revestido formado com o perfil PS 400x62 submetido a 90 minutos de incêndio

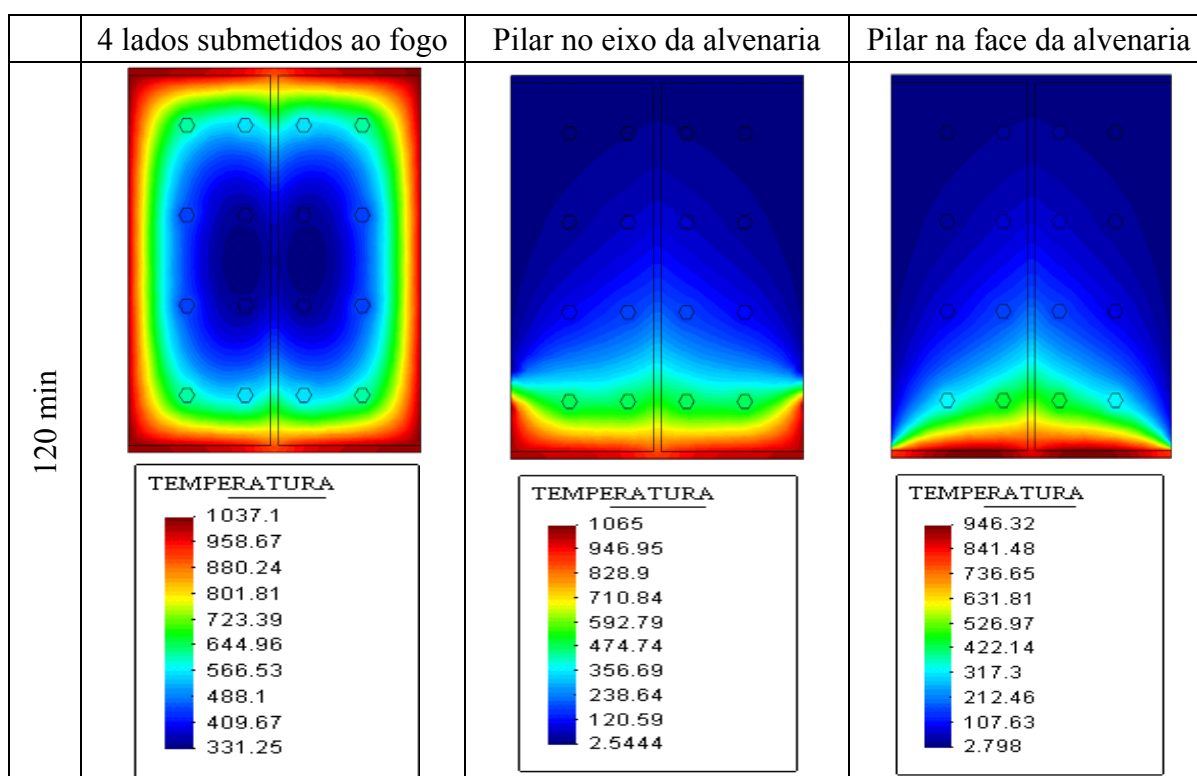


FIGURA 8.2.d – Pilar parcialmente revestido formado com o perfil PS 400x62 submetido a 120 minutos de incêndio

Sugere-se ainda a realização de um conjunto de processamentos do programa CALTEMI de modo a se obter tabelas com a distribuição de temperatura nas seções transversais de pilares mistos com a maior gama possível de dimensões, para o emprego rápido do Método Avançado de Cálculo apresentado nesta dissertação.

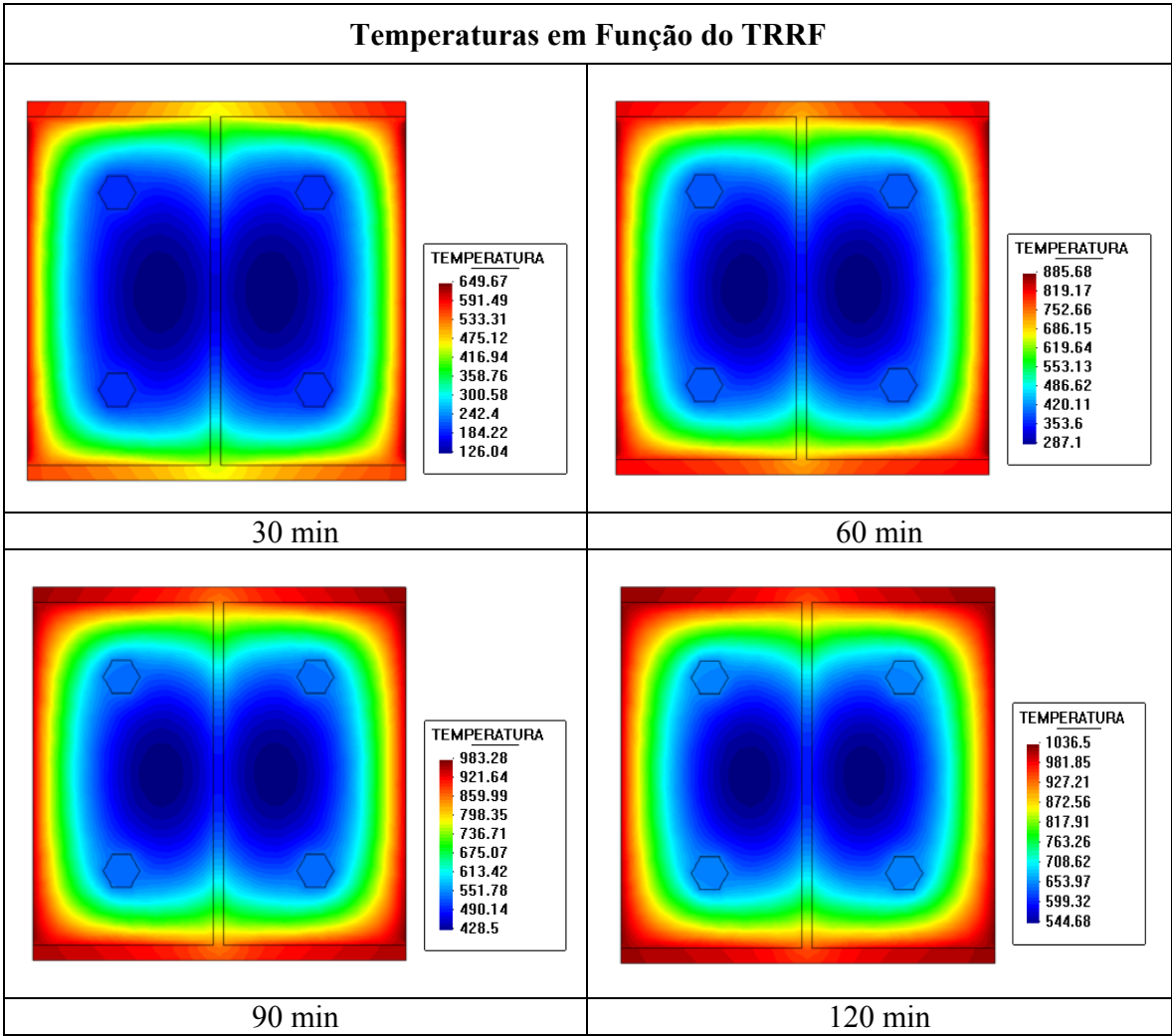
Uma solução que simplificaria ainda mais o trabalho dos usuários seria a produção de novas tabelas de dimensionamento mais realísticas do que as apresentadas pelo Eurocode 4 – Part 1.2 (1994).

Finalmente, sugere-se estender os estudos aos pilares mistos submetidos aos esforços combinados de força normal e momento fletor em torno de um ou dos dois eixos principais de inércia da seção transversal.

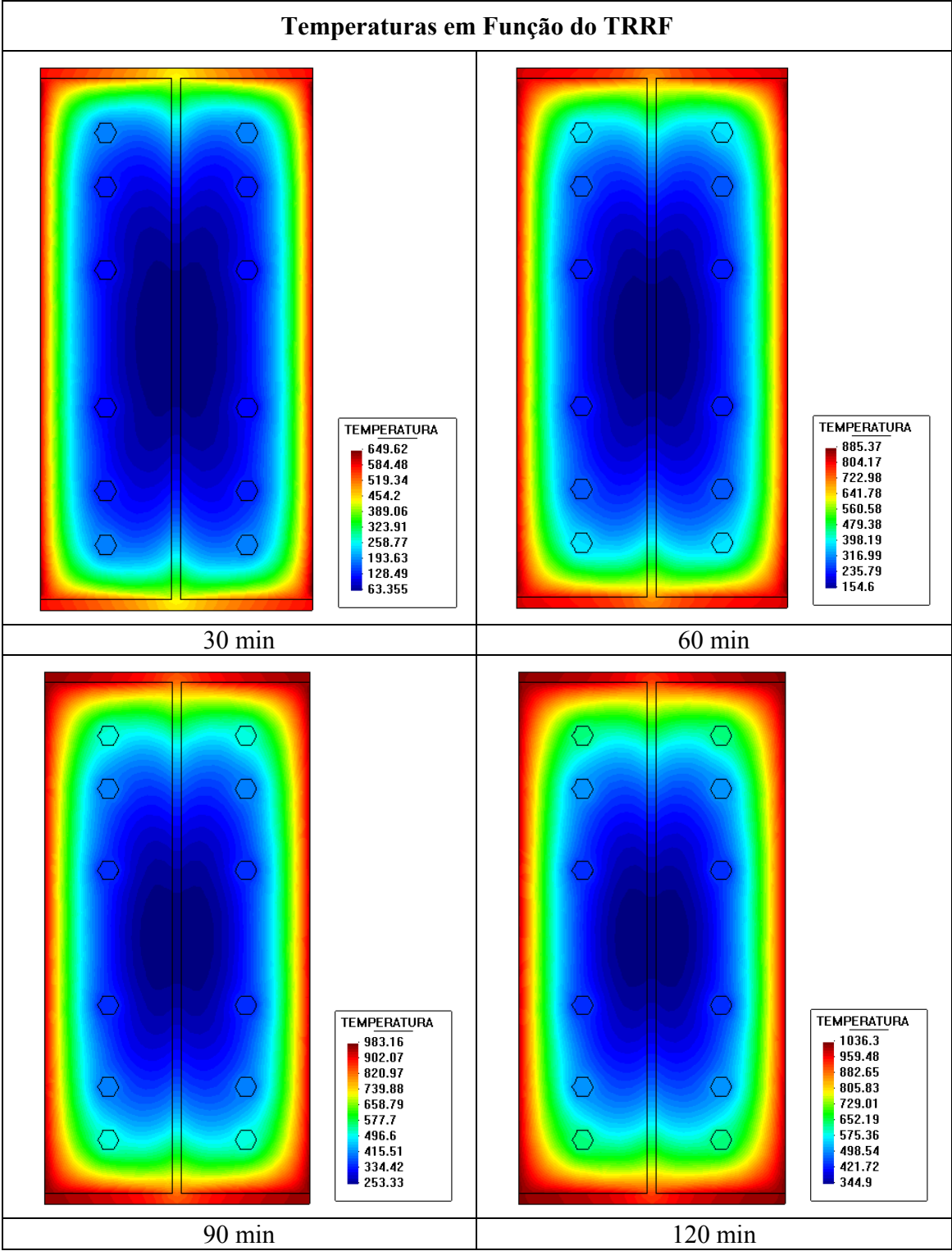
ANEXO 1

**TEMPERATURA EM ESCALA DE CORES NA SEÇÃO
TRANSVERSAL DOS PILARES MISTOS OBTIDA POR MEIO DO
PROGRAMA CALTEMI**

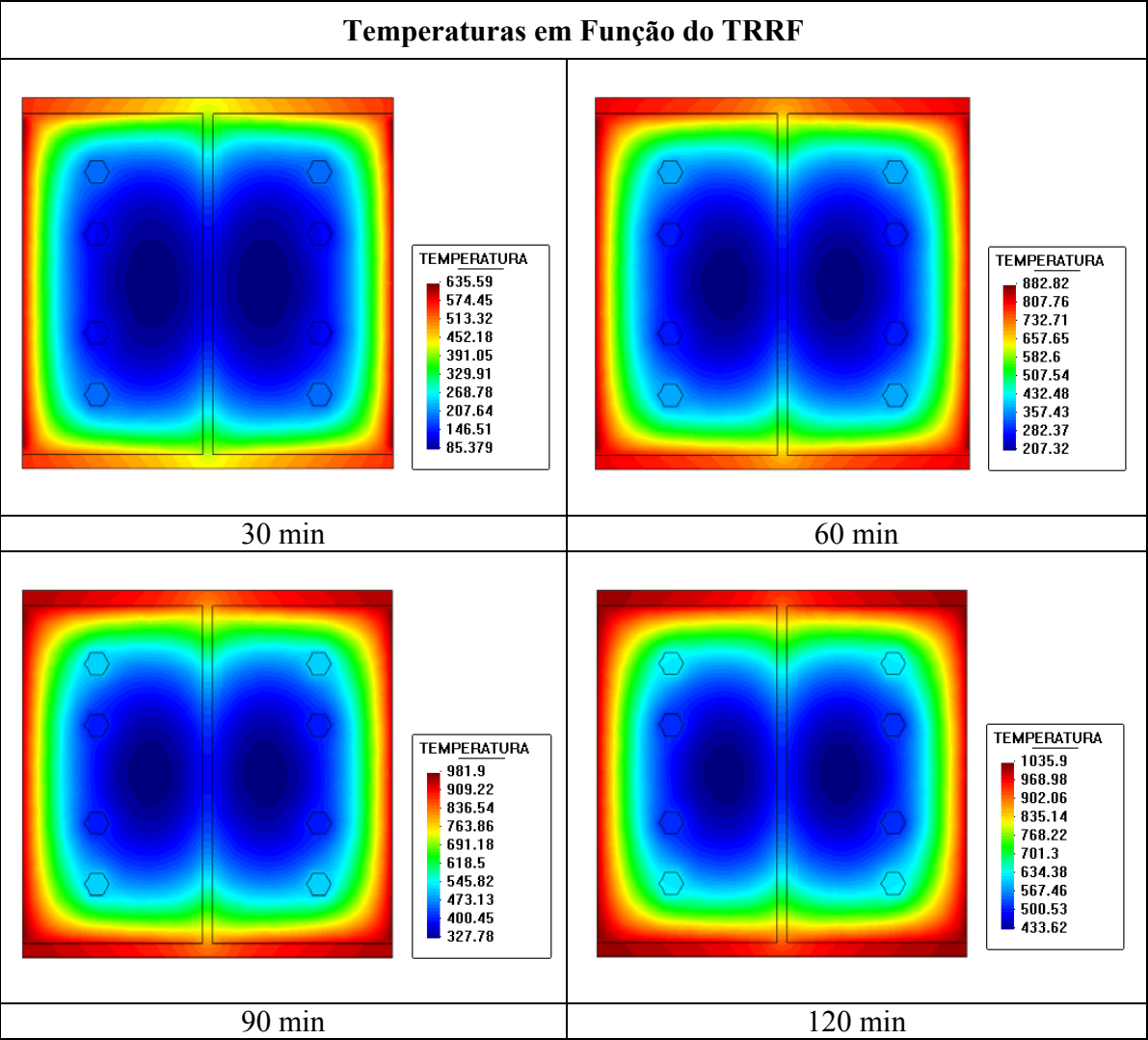
Pilar formado com o Perfil CE 250x49



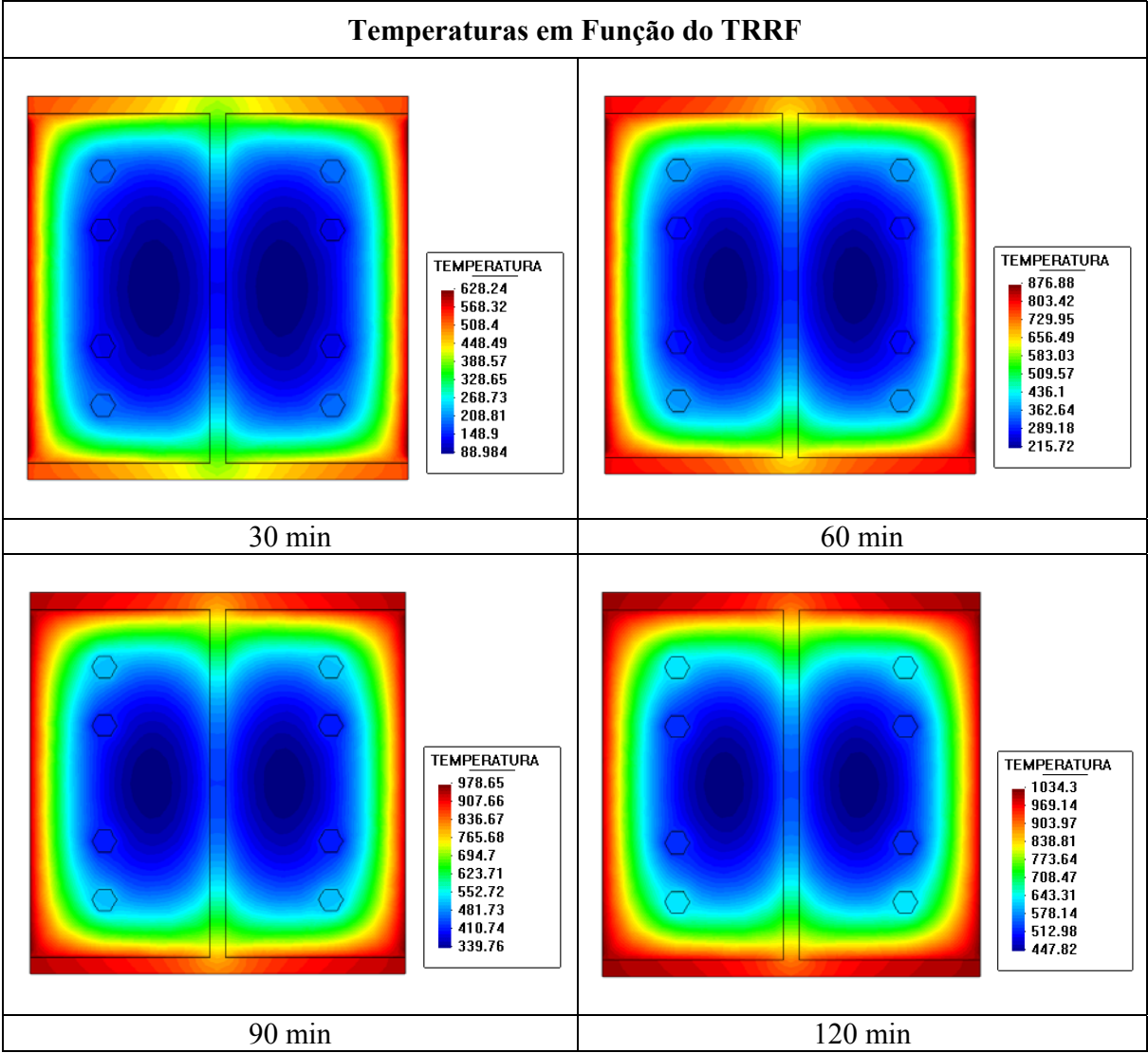
Pilar formado com o Perfil VE 500x68



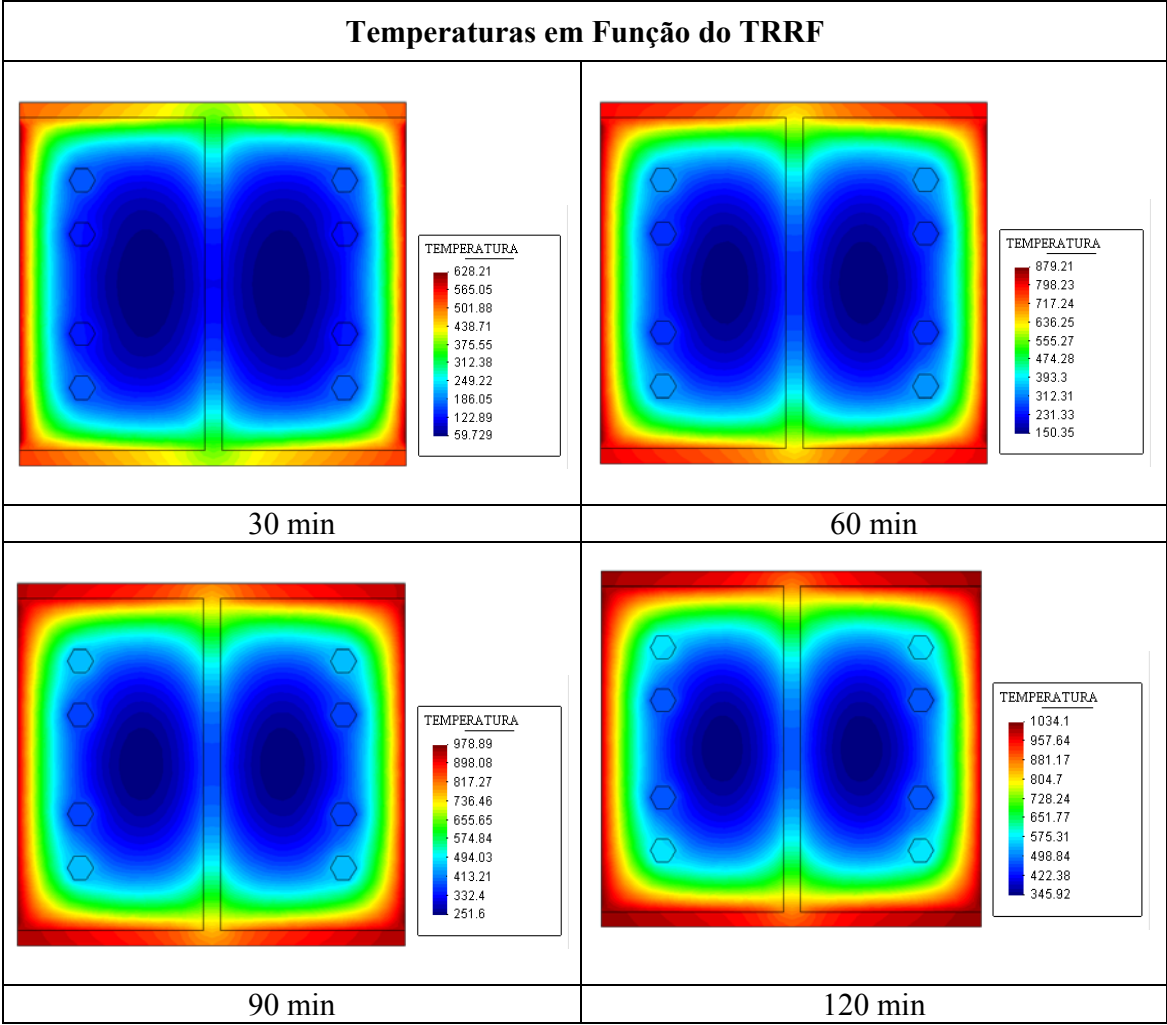
Pilar formado com o Perfil CE 300x76



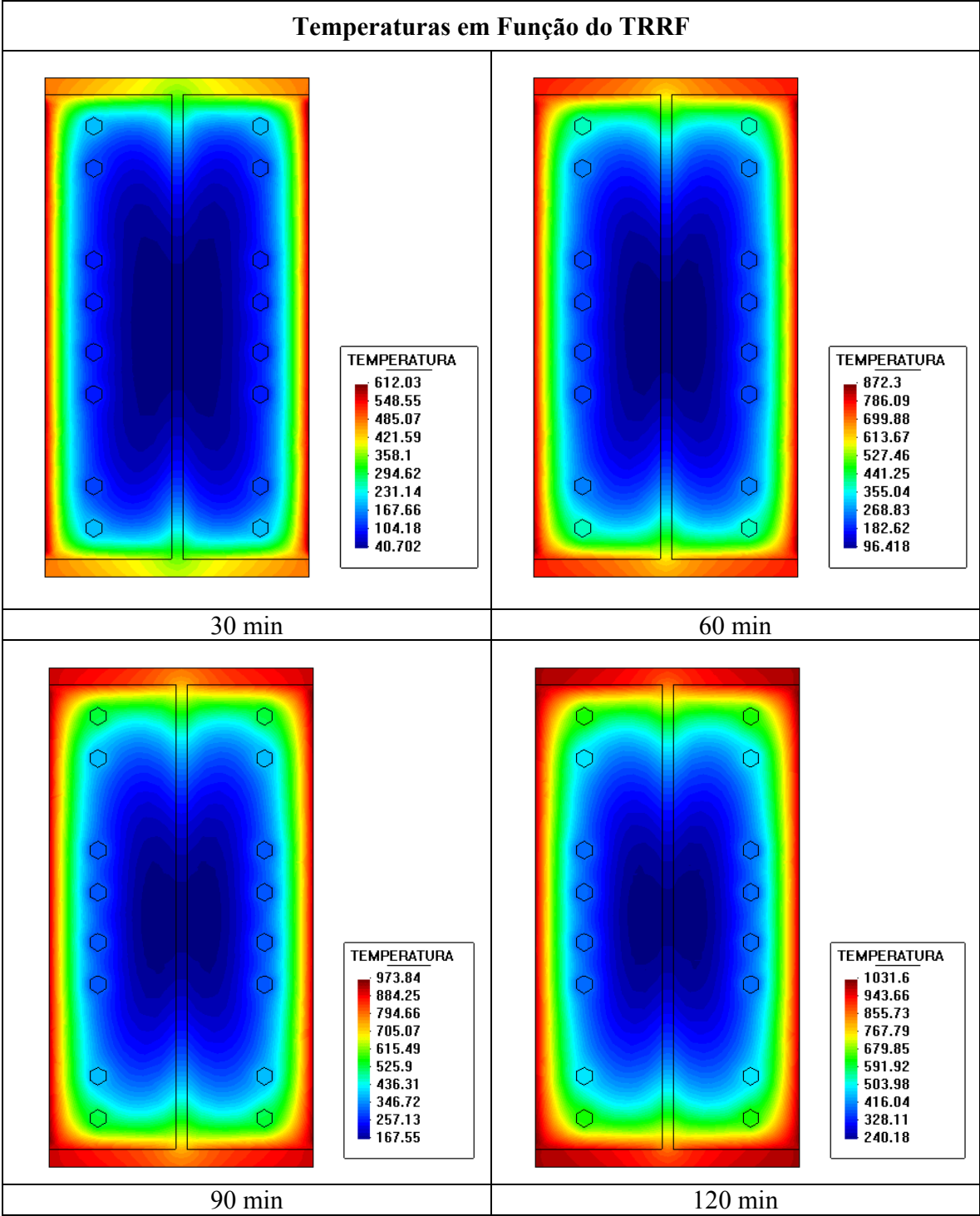
Pilar formado com o Perfil HP 310x93



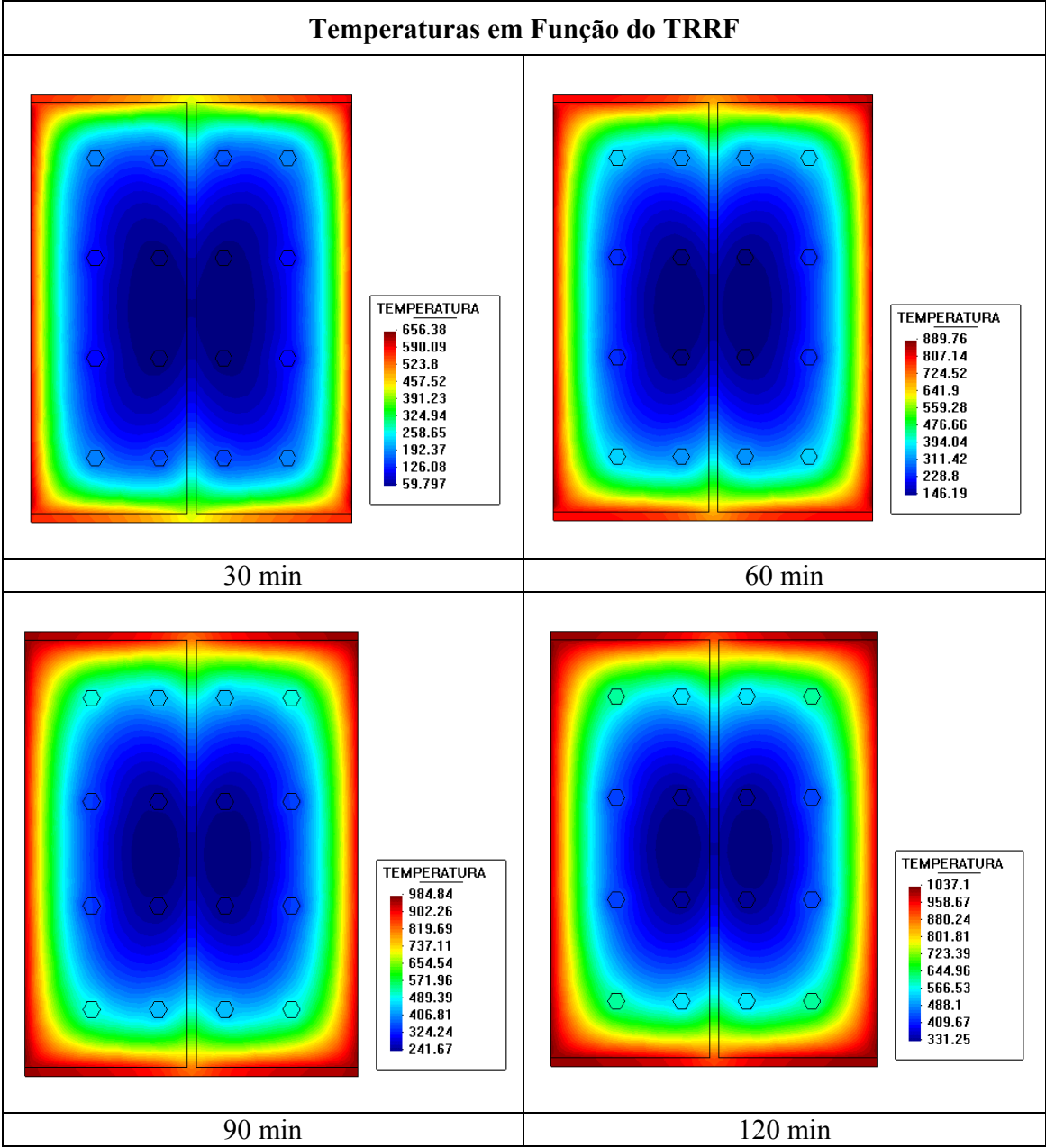
Pilar formado com o Perfil HP 360x132



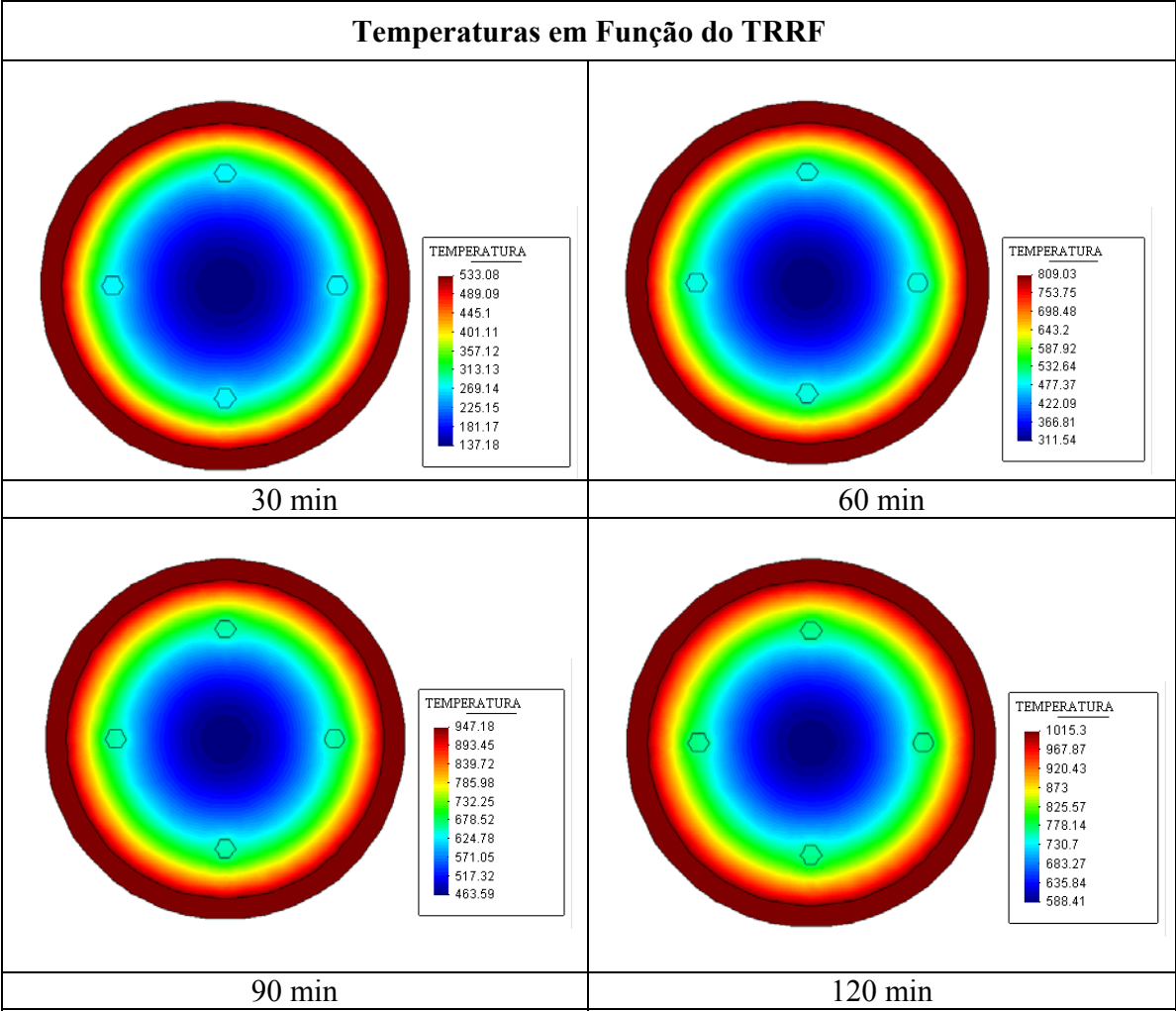
Pilar formado com o Perfil W 610x174



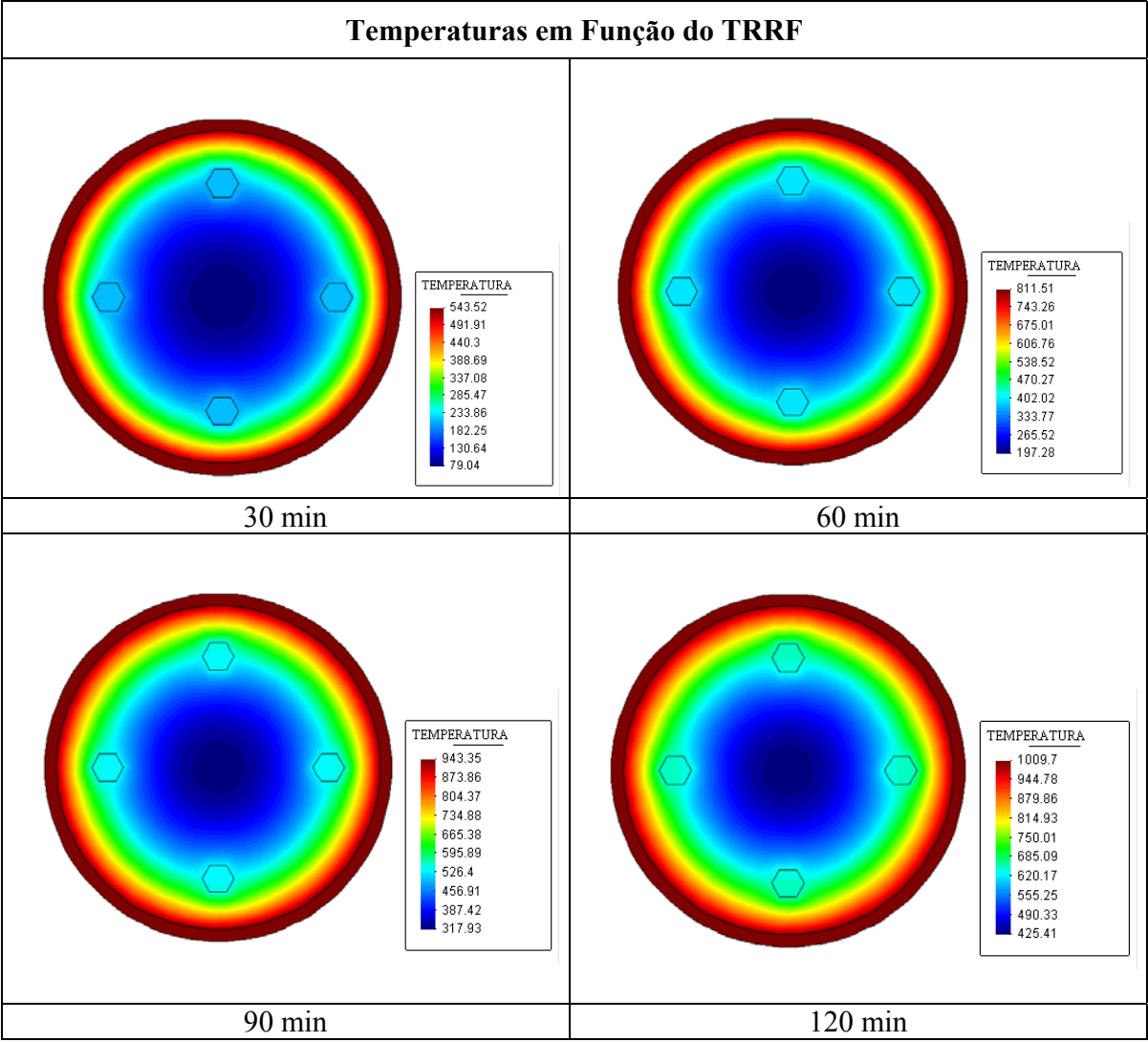
Pilar formado com o Perfil PS 400x62



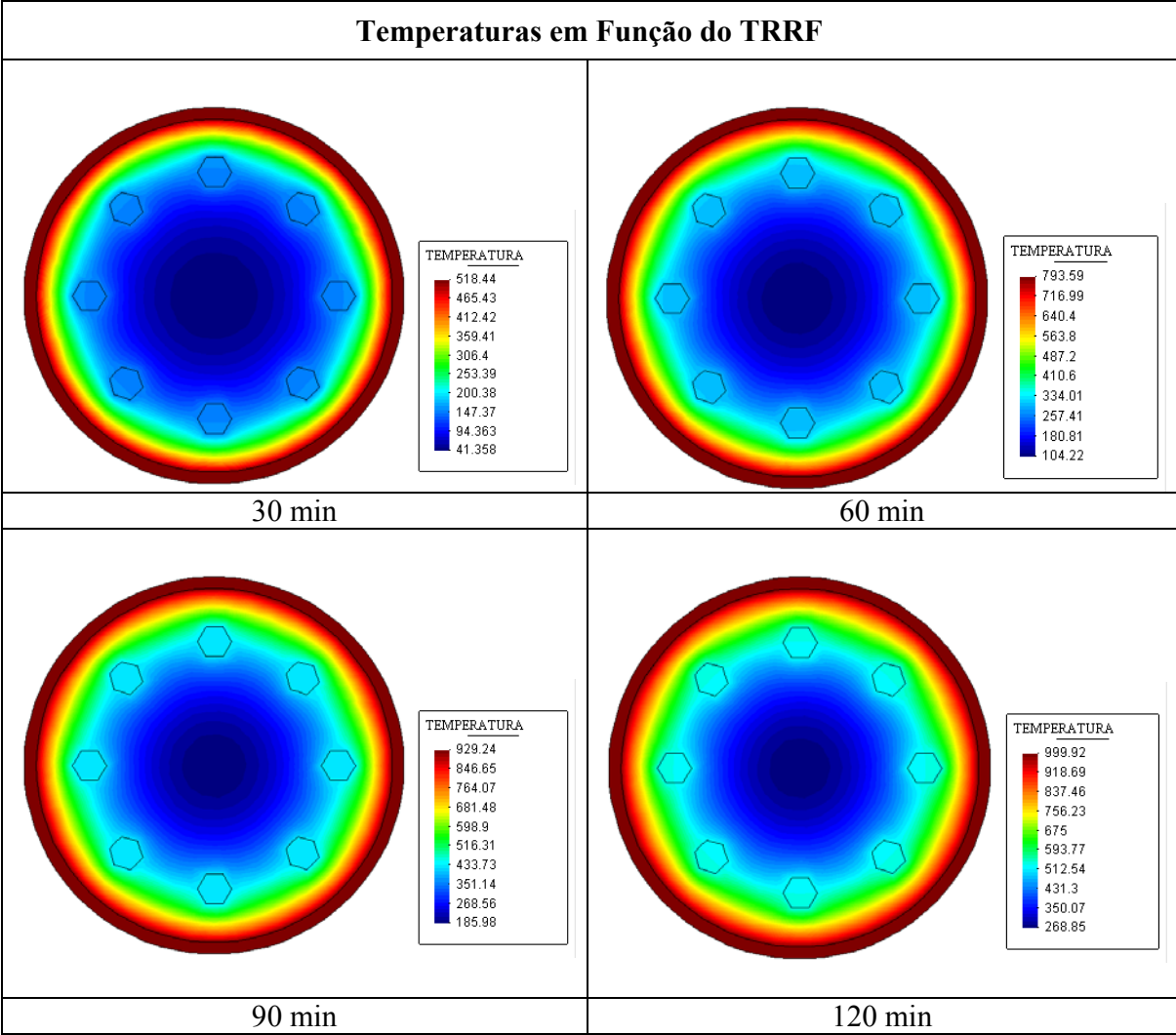
Pilar formado com o Perfil Tubular 219,1x12,7



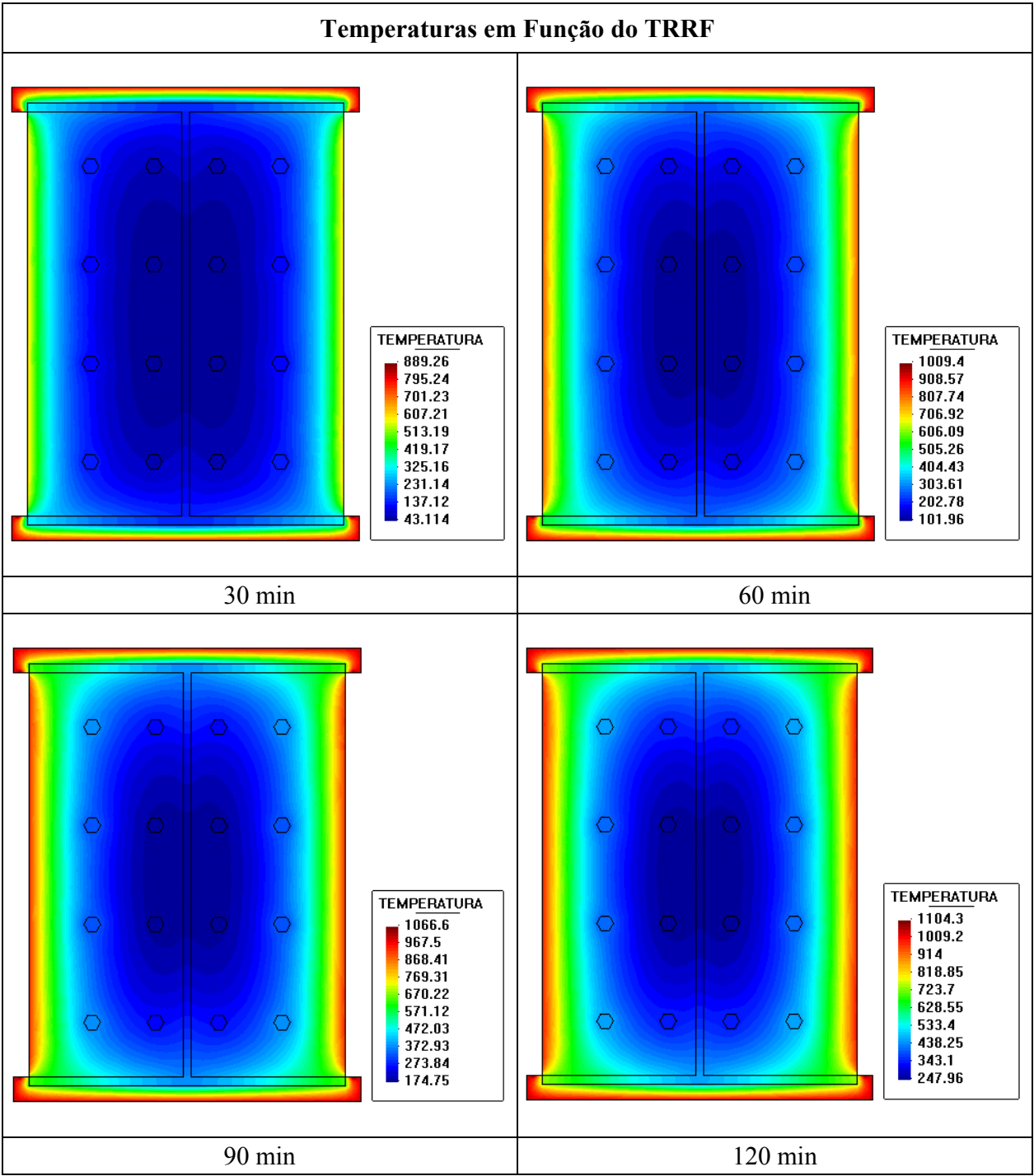
Pilar formado com o Perfil Tubular 273x9,3



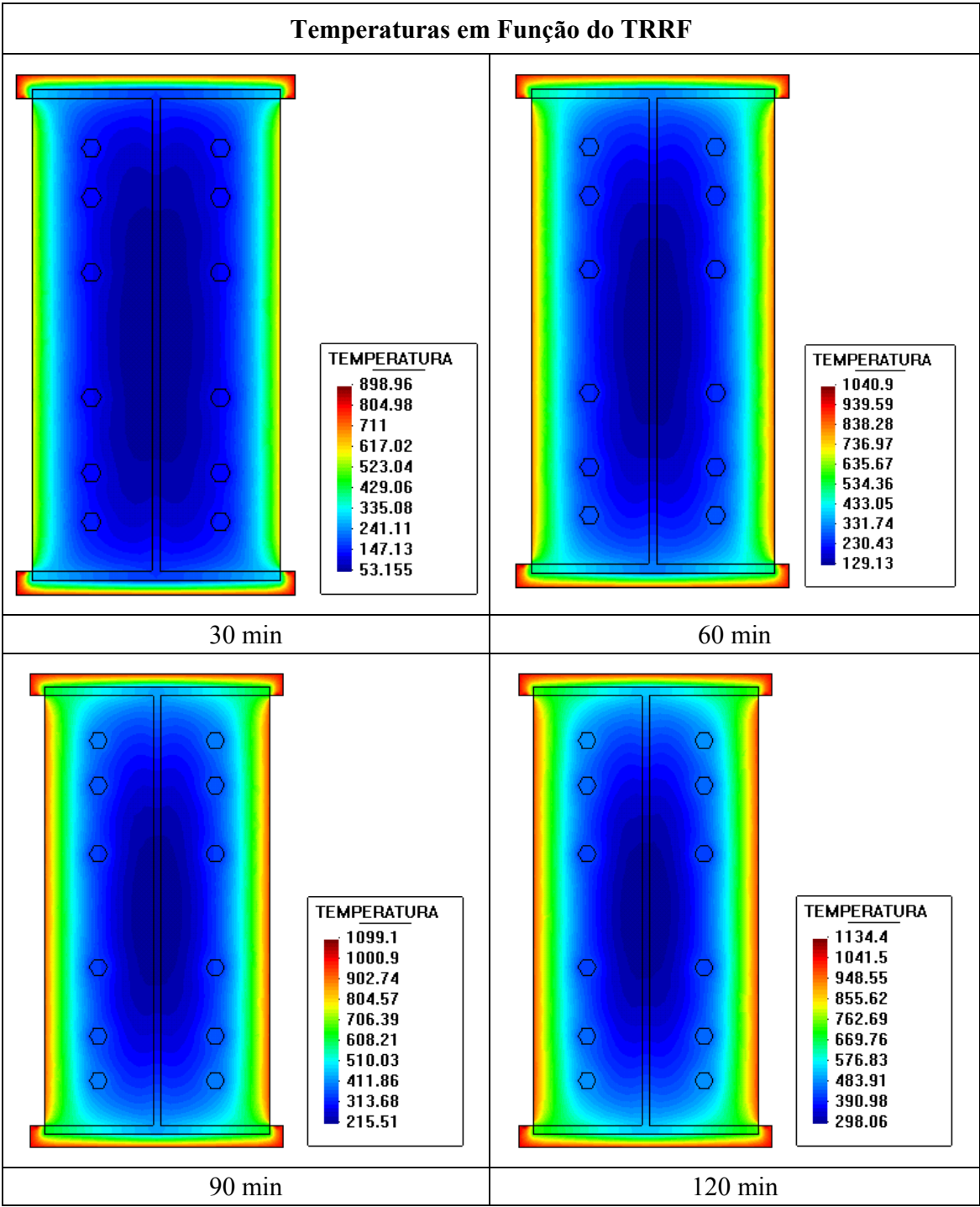
Pilar formado com o Perfil Tubular 355.6x11,1



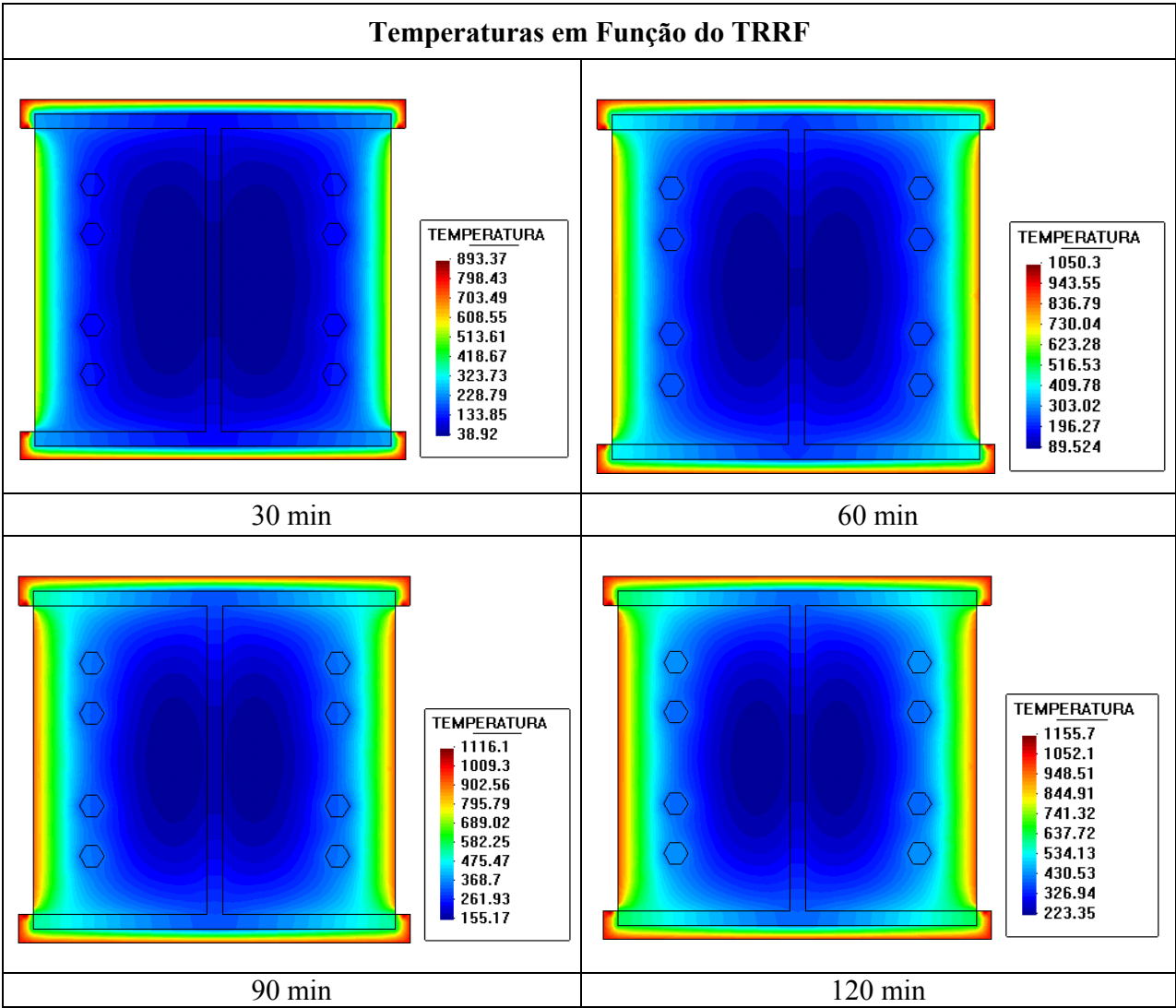
Pilar Formado com o Perfil PS 400x62 com Proteção Térmica



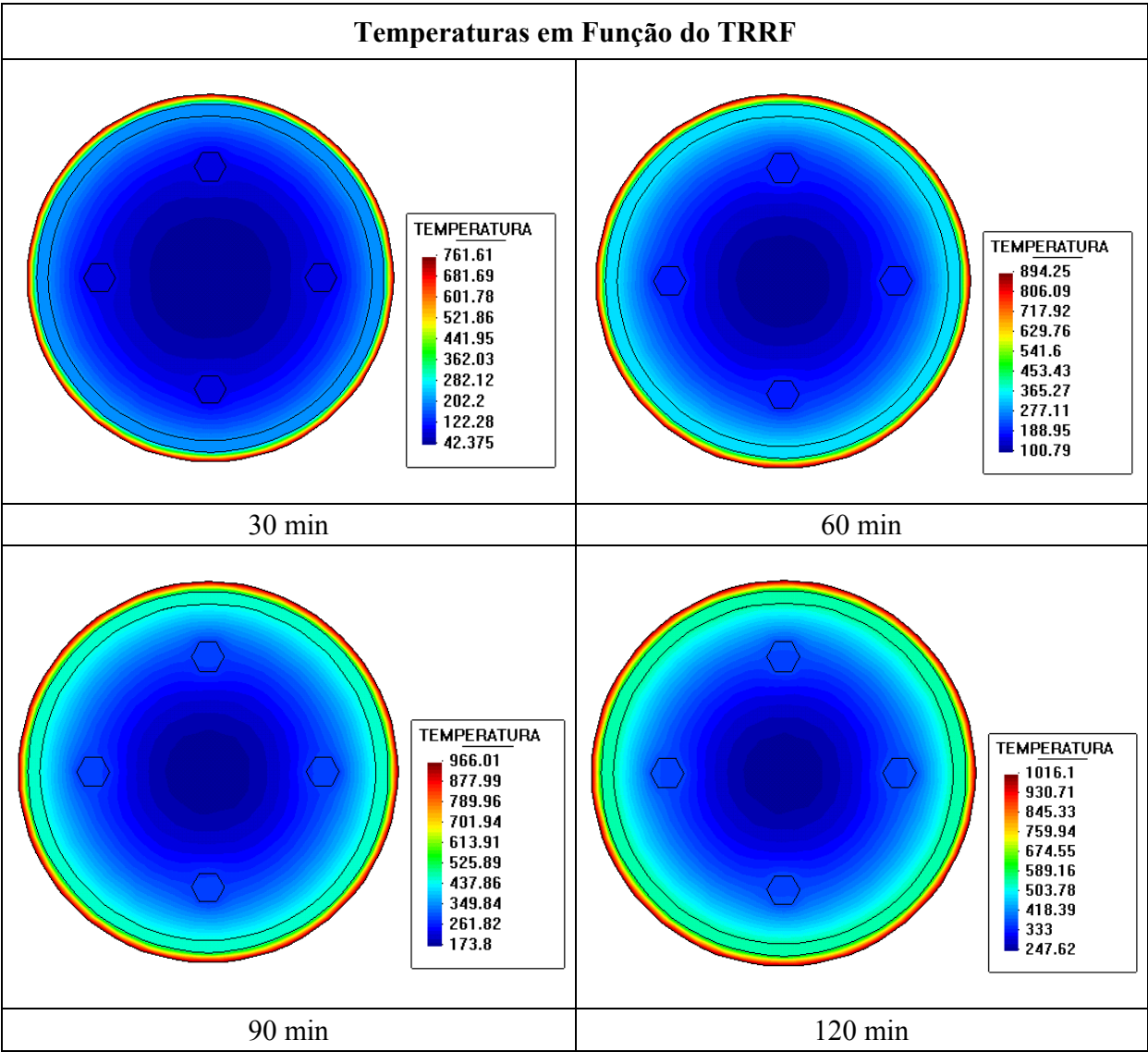
Pilar Formado com o Perfil VE 500x68 com Proteção Térmica



Pilar Formado com o Perfil HP 360x132 com Proteção Térmica



Pilar Formado com o Perfil Tubular 273x9,3 com Proteção Térmica



ANEXO 2

**CÁLCULO DA RESISTÊNCIA EM SITUAÇÃO DE INCÊNDIO
DO PILAR MISTO PARCIALMENTE REVESTIDO POR
CONCRETO FORMADO COM O PERFIL PS 400x62
POR MEIO DO MÉTODO SIMPLIFICADO
ANALÍTICO DE CÁLCULO**

Pilar formado com o Perfil PS 400x62 submetido a 30 minutos de Incêndio

P I L A R P A R C I A L M E N T E R E V E S T I D O				
R E S I S T Ê N C I A A C O M P R E S S Ã O				
E M S I T U A Ç Ã O D E I N C Ê N D I O				
TRRF	30	min	Alma do Perfil Metálico	
Aço Estrutural			$H_t =$	350 mm
Perfil	I 400x300x8x8		$h_{w,fi} =$	14 mm
$f_y =$	300	MPa	$f_{amax,w,t} =$	278,21 MPa
$E =$	205000	MPa	$N_{fi,pl,Rd,w} =$	793 kN
			$(EI)_{fi,w} =$	3 kN m ²
Armadura Adotada		16 ϕ 16	Concreto	
$f_y =$	500	MPa	$b_{c,fi} =$	4 mm
$A_s =$	32,17	cm ²	$\theta_{c,t} =$	202 °C
$I_s =$	1447,65	cm ⁴	$k_{c\theta} =$	0,899
Propriedades do Concreto			$\epsilon_{cu,\theta} =$	4,53 x 10 ⁻³
$f_{ck} =$	30	MPa	$E_{c,sec,\theta} =$	5954 MPa
			$N_{fi,pl,Rd,c} =$	2402 kN
			$(EI)_{fi,c} =$	4558 kN m ²
Dimensões			Armadura	
$h =$	400	mm	$u_1 =$	60 mm
$b =$	300	mm	$u_2 =$	60 mm
$e_f =$	8	mm	$u =$	60,00 mm
$e_w =$	8	mm	$k_{y,t} =$	1,00
$l_\theta =$	2,00	m	$k_{E,t} =$	0,935
$A_m/V =$	11,67	m ⁻¹	$N_{fi,pl,Rd,s} =$	1609 kN
			$(EI)_{fi,s} =$	2775 kN m ²
Mesas do Perfil Metálico			Resistência do Pilar	
$\theta_{0,t} =$	550	°C	$N_{fi,pl,Rd} =$	5262 kN
$k_t =$	9,65	m°C	$\varphi_{f,\theta} =$	1,0
$\theta_{f,t} =$	663	°C	$\varphi_{w,\theta} =$	1,0
$k_{y,\theta} =$	0,3188		$\varphi_{c,\theta} =$	0,8
$k_{E,\theta} =$	0,1966		$\varphi_{s,\theta} =$	1,0
$f_{amax,f,t} =$	95,64	MPa	$(EI)_{fi,eff} =$	7875 kN m ²
$E_{a,f,t} =$	40303	MPa	$N_{fi,cr} =$	19432 kN
$N_{fi,pl,Rd,f} =$	459	kN	$\lambda_\theta =$	0,52
$(EI)_{fi,f} =$	1451	kN m ²	$\chi =$	0,83
			$N_{fi,Rd} =$	4376 kN

Pilar formado com o Perfil PS 400x62 submetido a 60 minutos de Incêndio

P I L A R P A R C I A L M E N T E R E V E S T I D O				
R E S I S T Ê N C I A A C O M P R E S S Ã O				
E M S I T U A Ç Ã O D E I N C Ê N D I O				
TRRF	60	min	Alma do Perfil Metálico	
Aço Estrutural			$H_t =$	770 mm
Perfil			$h_{w,fi} =$	32 mm
$f_y =$			$f_{amax,w,t} =$	249,56 MPa
$E =$			$N_{fi,pl,Rd,w} =$	638 kN
			$(EI)_{fi,w} =$	3 kN m ²
Armadura Adotada		16 ϕ 16	Concreto	
$f_y =$	500	MPa	$b_{c,fi} =$	15 mm
$A_s =$	32,17	cm ²	$\theta_{c,t} =$	322 °C
$I_s =$	1447,65	cm ⁴	$k_{c\theta} =$	0,828
Propriedades do Concreto			$\epsilon_{cu,\theta} =$	6,33 x 10 ⁻³
$f_{ck} =$	30	MPa	$E_{c,sec,\theta} =$	3924 MPa
Dimensões			$N_{fi,pl,Rd,c} =$	1913 kN
$h =$	400	mm	$(EI)_{fi,c} =$	2222 kN m ²
$b =$	300	mm	Armadura	
$e_f =$	8	mm	$u_1 =$	60 mm
$e_w =$	8	mm	$u_2 =$	60 mm
$l_\theta =$	2,00	m	$u =$	60,00 mm
$A_m/V =$	11,67	m ⁻¹	$k_{y,t} =$	1,00
Mesas do Perfil Metálico			$k_{E,t} =$	0,763
$\theta_{0,t} =$	680	°C	$N_{fi,pl,Rd,s} =$	1609 kN
$k_t =$	9,55	m°C	$(EI)_{fi,s} =$	2264 kN m ²
$\theta_{f,t} =$	791	°C	Resistência do Pilar	
$k_{y,\theta} =$	0,1208		$N_{fi,pl,Rd} =$	4333 kN
$k_{E,\theta} =$	0,0936		$\varphi_{f,\theta} =$	0,9
$f_{amax,f,t} =$	36,24	MPa	$\varphi_{w,\theta} =$	1,0
$E_{a,f,t} =$	19188	MPa	$\varphi_{c,\theta} =$	0,8
$N_{fi,pl,Rd,f} =$	174	kN	$\varphi_{s,\theta} =$	0,9
$(EI)_{fi,f} =$	691	kN m ²	$(EI)_{fi,eff} =$	4440 kN m ²
			$N_{fi,cr} =$	10955 kN
			$\lambda_\theta =$	0,63
			$\chi =$	0,77
			$N_{fi,Rd} =$	3328 kN

Pilar formado com o Perfil PS 400x62 submetido a 90 minutos de Incêndio

P I L A R P A R C I A L M E N T E R E V E S T I D O				
R E S I S T Ê N C I A A C O M P R E S S Ã O				
E M S I T U A Ç Ã O D E I N C Ê N D I O				
TRRF	90	min	Alma do Perfil Metálico	
Aço Estrutural			$H_t =$	1100 mm
Perfil	I 400x300x8x8		$h_{w,fi} =$	48 mm
$f_y =$	300	MPa	$f_{amax,w,t} =$	224,50 MPa
$E =$	205000	MPa	$N_{fi,pl,Rd,w} =$	516 kN
Armadura Adotada			$(EI)_{fi,w} =$	3 kN m ²
		16 ϕ 16	Concreto	
$f_y =$	500	MPa	$b_{c,fi} =$	28 mm
$A_s =$	32,17	cm ²	$\theta_{c,t} =$	381 °C
$I_s =$	1447,65	cm ⁴	$k_{c\theta} =$	0,769
Propriedades do Concreto			$\varepsilon_{cu,\theta} =$	7,215 x 10 ⁻³
$f_{ck} =$	30	MPa	$E_{c,sec,\theta} =$	3198 MPa
Dimensões			$N_{fi,pl,Rd,c} =$	1465 kN
$h =$	400	mm	$(EI)_{fi,c} =$	1210 kN m ²
$b =$	300	mm	Armadura	
$e_f =$	8	mm	$u_1 =$	60 mm
$e_w =$	8	mm	$u_2 =$	60 mm
$l_\theta =$	2,00	m	$u =$	60,00 mm
$A_m/V =$	11,67	m ⁻¹	$k_{y,t} =$	0,822
Mesas do Perfil Metálico			$k_{E,t} =$	0,619
$\theta_{0,t} =$	805	°C	$N_{fi,pl,Rd,s} =$	1322 kN
$k_t =$	6,15	m°C	$(EI)_{fi,s} =$	1837 kN m ²
$\theta_{f,t} =$	877	°C	Resistência do Pilar	
$k_{y,\theta} =$	0,0715		$N_{fi,pl,Rd} =$	3406 kN
$k_{E,\theta} =$	0,0727		$\varphi_{f,\theta} =$	0,8
$f_{amax,f,t} =$	21,45	MPa	$\varphi_{w,\theta} =$	1,0
$E_{a,f,t} =$	14903,5	MPa	$\varphi_{c,\theta} =$	0,8
$N_{fi,pl,Rd,f} =$	103	kN	$\varphi_{s,\theta} =$	0,8
$(EI)_{fi,f} =$	537	kN m ²	$(EI)_{fi,eff} =$	2870 kN m ²
			$N_{fi,cr} =$	7081 kN
			$\lambda_\theta =$	0,69
			$\chi =$	0,73
			$N_{fi,Rd} =$	2482 kN

Pilar formado com o Perfil PS 400x62 submetido a 120 minutos de Incêndio

P I L A R P A R C I A L M E N T E R E V E S T I D O				
R E S I S T Ê N C I A A C O M P R E S S Ã O				
E M S I T U A Ç Ã O D E I N C Ê N D I O				
TRRF	120	min	Alma do Perfil Metálico	
Aço Estrutural			$H_t =$	1250 mm
Perfil			$h_{w,fi} =$	56 mm
$f_y =$			$f_{amax,w,t} =$	212,13 MPa
$E =$			$N_{fi,pl,Rd,w} =$	461 kN
			$(EI)_{fi,w} =$	2 kN m ²
Armadura Adotada		16 ϕ 16	Concreto	
$f_y =$	500	MPa	$b_{c,fi} =$	47 mm
$A_s =$	32,17	cm ²	$\theta_{c,t} =$	438 °C
$I_s =$	1447,65	cm ⁴	$k_{c\theta} =$	0,693
Propriedades do Concreto			$\varepsilon_{cu,\theta} =$	8,26 x 10 ⁻³
$f_{ck} =$	30	MPa	$E_{c,sec,\theta} =$	2517 MPa
Dimensões			$N_{fi,pl,Rd,c} =$	963 kN
$h =$	400	mm	$(EI)_{fi,c} =$	489 kN m ²
$b =$	300	mm	Armadura	
$e_r =$	8	mm	$u_1 =$	60 mm
$e_w =$	8	mm	$u_2 =$	60 mm
$l_\theta =$	2,00	m	$u =$	60,00 mm
$A_m/V =$	11,67	m ⁻¹	$k_{y,t} =$	0,436
Mesas do Perfil Metálico			$k_{E,t} =$	0,285
$\theta_{0,t} =$	900	°C	$N_{fi,pl,Rd,s} =$	701 kN
$k_t =$	4,65	m°C	$(EI)_{fi,s} =$	846 kN m ²
$\theta_{f,t} =$	954	°C	Resistência do Pilar	
$k_{y,\theta} =$	0,0292		$N_{fi,pl,Rd} =$	2167 kN
$k_{E,\theta} =$	0,0554		$\varphi_{f,\theta} =$	1,0
$f_{amax,f,t} =$	8,76	MPa	$\varphi_{w,\theta} =$	1,0
$E_{a,f,t} =$	11357	MPa	$\varphi_{c,\theta} =$	0,8
$N_{fi,pl,Rd,f} =$	42	kN	$\varphi_{s,\theta} =$	1,0
$(EI)_{fi,f} =$	409	kN m ²	$(EI)_{fi,eff} =$	1648 kN m ²
			$N_{fi,cr} =$	4067 kN
			$\lambda_\theta =$	0,73
			$\chi =$	0,71
			$N_{fi,Rd} =$	1530 kN

ANEXO 3

**CÁLCULO DA RESISTÊNCIA EM SITUAÇÃO DE INCÊNDIO
DO PILAR MISTO PARCIALMENTE REVESTIDO POR
CONCRETO FORMADO COM O PERFIL PS 400x62
E DO PERFIL PREENCHIDO POR CONCRETO
FORMADO COM O PERFIL TUBULAR 273x9,3
POR MEIO DO MÉTODO AVANÇADO DE CÁLCULO**

Pilar formado com o Perfil PS 400x62 submetido a 30 minutos de Incêndio

PILAR PARCIALMENTE REVESTIDO									
Resistência a Compressão em Situação de Incêndio									
Utilizando Distribuição de Temperatura obtida pelo Caltemi									
Perfil Metálico									
PS 400x62			Dimensões – 400 x 300 x 8 x 8						
fy	300	MPa	l0	2,0	m				
E	205000	MPa	TRRF	30	minutos				
Mesa do Perfil Metálico			Alma do Perfil Metálico						
8/10 divisões	10		9/10/11 divisões	11					
larg faixa	30,00	mm	larg faixa	34,91	mm				
d1	135,00	mm	Área	2,79	cm²				
d2	105,00	mm	temp 1	73	°C				
d3	75,00	mm	k1 y,θ	1,000					
d4	45,00	mm	k1 E,θ	1					
d5	15,00	mm	famax,w,t =	300	MPa				
Área	2,40	cm²	Ea,w,t =	205000	MPa				
temp 1	600	°C	temp 2	86	°C				
k1 y,θ	0,47		k2 y,θ	1,000					
k1 E,θ	0,31		k2 E,θ	1					
famax,f,t =	141	MPa	famax,w,t =	300	MPa				
Ea,f,t =	63550	MPa	Ea,w,t =	205000	MPa				
temp 2	575	°C	temp 3	117	°C				
k2 y,θ	0,5475		k3 y,θ	1,000					
k2 E,θ	0,3825		k3 E,θ	0,983					
famax,f,t =	164,25	MPa	famax,w,t =	300	MPa				
Ea,f,t =	78412,5	MPa	Ea,w,t =	201515	MPa				
temp 3	548	°C	temp 4	175	°C				
k3 y,θ	0,6312		k4 y,θ	1,0000					
k3 E,θ	0,4608		k4 E,θ	0,9250					
famax,f,t =	189,36	MPa	famax,w,t =	300	MPa				
Ea,f,t =	94464	MPa	Ea,w,t =	189625	MPa				
temp 4	522	°C	temp 5	274	°C				
k4 y,θ	0,7118		k5 y,θ	1,0000					
k4 E,θ	0,5362		k5 E,θ	0,8260					
famax,f,t =	213,54	MPa	famax,w,t =	300	MPa				
Ea,f,t =	109921	MPa	Ea,w,t =	169330	MPa				
temp 5	493	°C	temp 6	430	°C				
k5 y,θ	0,7954		k5 y,θ	0,9340					
k5 E,θ	0,6070		k5 E,θ	0,6700					
famax,f,t =	238,62	MPa	famax,f,t =	280,2	MPa				
Ea,f,t =	124435	MPa	Ea,f,t =	137350	MPa				
Nfi,pl,Rd,f =	909	kN	Nfi,pl,Rd,w =	911	kN				
(EI)fi,f =	2726	kNm²	(EI)fi,w =	2,99	kNm²				

Concreto			Armadura		
fck	30	MPa	fy	500	MPa
5	faixas		temp 1	67	°C
larg faixa	29,20	mm	AS1	8,04	cm ²
A1	43,92	cm ²	IS1	72,38	cm ⁴
A2	78,02	cm ²	k1 y,θ	1,0000	
A3	112,13	cm ²	k1 E,θ	1,0000	
A4	146,23	cm ²	famax,s,t	500	MPa
A5	180,34	cm ²	Ea,s,t	205000	MPa
temp 1	66	°C	temp 2	124	°C
k1 c,θ	0,9713		AS2	8,04	cm ²
ε1 cu,θ	3,08	x10 ⁻³	IS2	651,44	cm ⁴
f c,θ	29,14	MPa	k2 y,θ	1,0000	
E c,sec,θ	9476	MPa	k2 E,θ	0,9760	
temp 2	83	°C	famax,s,t	500	MPa
k2 c,θ	0,9606		Ea,s,t	200080	MPa
ε2 cu,θ	3,29	x10 ⁻³	temp 3	168	°C
f c,θ	28,82	MPa	AS3	8,04	cm ²
E c,sec,θ	8766	MPa	IS3	72,38	cm ⁴
temp 3	137	°C	k3 y,θ	1,0000	
k3 c,θ	0,9315		k3 E,θ	0,9320	
ε3 cu,θ	3,87	x10 ⁻³	famax,s,t	500	MPa
f c,θ	27,95	MPa	Ea,s,t	191060	MPa
E c,sec,θ	7221	MPa	temp 4	196	°C
temp 4	226	°C	AS4	8,04	cm ²
k4 c,θ	0,8870		IS4	651,44	cm ⁴
ε4 cu,θ	4,89	x10 ⁻³	k4 y,θ	1,0000	
f c,θ	26,61	MPa	k4 E,θ	0,9040	
E c,sec,θ	5442	MPa	famax,s,t	500	MPa
temp 5	449	°C	Ea,s,t	185320	MPa
k5 c,θ	0,6765		Nfi,pl,Rd,s	1608	kN
ε5 cu,θ	8,48	x10 ⁻³	(EI)fi,s	2797	kNm ²
f c,θ	20,30	MPa	Nfi,pl,Rd	6270	kN
E c,sec,θ	2393	MPa	φf,θ	1,0	
Nfi,pl,Rd,c	2843	kN	φw,θ	1,0	
Inércia correspondente à armadura			φc,θ	0,8	
Faixa 1	36	cm ⁴	φs,θ	1,0	
Faixa 2	0	cm ⁴	(EI)fi,eff	8278	kNm ²
Faixa 3	344	cm ⁴	Nfi,cr	20424	kN
Faixa 4	344	cm ⁴	λθ	0,55	
Faixa 5	0	cm ⁴	χ	0,81	
Inércia 1	146,95	cm ⁴	Nfi,Rd	5093	kN
Inércia 2	1507,49	cm ⁴			
Inércia 3	4810,42	cm ⁴			
Inércia 4	11942,77	cm ⁴			
Inércia 5	24068	cm ⁴			
(EI)fi,c	3439	kNm ²			

Pilar formado com o Perfil PS 400x62 submetido a 60 minutos de Incêndio

PILAR PARCIALMENTE REVESTIDO													
Resistência a Compressão em Situação de Incêndio													
Utilizando Distribuição de Temperatura obtida pelo Caltemi													
Perfil Metálico													
PS 400x62				Dimensões		-	400	x	300	x	8	x	8
fy	300			MPa			lθ	2,0		m			
E	205000			MPa			TRRF	60		minutos			
Mesa do Perfil Metálico						Alma do Perfil Metálico							
8/10 divisões	10						9/10/11 divisões	11					
larg faixa	30,00			mm			larg faixa	34,91			mm		
d1	135,00			mm			Área	2,79			cm ²		
d2	105,00			mm			temp 1	170			°C		
d3	75,00			mm			k1 y,θ	1,0000					
d4	45,00			mm			k1 E,θ	0,9300					
d5	15,00			mm			famax,w,t =	300			MPa		
Área	2,40			cm ²			Ea,w,t =	190650			MPa		
temp 1	850			°C			temp 2	192			°C		
k1 y,θ	0,085						k2 y,θ	1,0000					
k1 E,θ	0,0788						k2 E,θ	0,9080					
famax,f,t =	25,50			MPa			famax,w,t =	300			MPa		
Ea,f,t =	16144			MPa			Ea,w,t =	186140			MPa		
temp 2	825			°C			temp 3	243			°C		
k2 y,θ	0,0975						k3 y,θ	1,0000					
k2 E,θ	0,0844						k3 E,θ	0,8570					
famax,f,t =	29,25			MPa			famax,w,t =	300			MPa		
Ea,f,t =	17297			MPa			Ea,w,t =	175685			MPa		
temp 3	807			°C			temp 4	330			°C		
k3 y,θ	0,1065						k4 y,θ	1,0000					
k3 E,θ	0,0884						k4 E,θ	0,7700					
famax,f,t =	31,95			MPa			famax,w,t =	300			MPa		
Ea,f,t =	18127			MPa			Ea,w,t =	157850			MPa		
temp 4	790			°C			temp 5	470			°C		
k4 y,θ	0,1220						k5 y,θ	0,8460					
k4 E,θ	0,0940						k5 E,θ	0,6300					
famax,f,t =	36,6			MPa			famax,w,t =	253,8			MPa		
Ea,f,t =	19270			MPa			Ea,w,t =	129150			MPa		
temp 5	764			°C			temp 6	685			°C		
k5 y,θ	0,1532						k5 y,θ	0,2660					
k5 E,θ	0,1044						k5 E,θ	0,1570					
famax,f,t =	45,96			MPa			famax,f,t =	79,8			MPa		
Ea,f,t =	21402			MPa			Ea,f,t =	32185			MPa		
Nfi,pl,Rd,f =	162			kN			Nfi,pl,Rd,w =	773			kN		
(EI)fi,f =	612			kNm ²			(EI)fi,w =	2,31			kNm ²		

Concreto			Armadura		
fck	30	MPa	fy	500	MPa
5	faixas		temp 1	160	°C
larg faixa	29,20	mm	AS1	8,04	cm ²
A1	43,92	cm ²	IS1	72,38	cm ⁴
A2	78,02	cm ²	k1 y,θ	1,0000	
A3	112,13	cm ²	k1 E,θ	0,9400	
A4	146,23	cm ²	famax,s,t	500	MPa
A5	180,34	cm ²	Ea,s,t	192700	MPa
temp 1	157	°C	temp 2	257	°C
k1 c,θ	0,9215		AS2	8,04	cm ²
ε1 cu,θ	4,07	x10 ⁻³	IS2	651,44	cm ⁴
f c,θ	27,65	MPa	k2 y,θ	1,0000	
E c,sec,θ	6792	MPa	k2 E,θ	0,8430	
temp 2	187	°C	famax,s,t	500	MPa
k2 c,θ	0,9065		Ea,s,t	172815	MPa
ε2 cu,θ	4,37	x10 ⁻³	temp 3	332	°C
f c,θ	27,20	MPa	AS3	8,04	cm ²
E c,sec,θ	6223	MPa	IS3	72,38	cm ⁴
temp 3	276	°C	k3 y,θ	1,0000	
k3 c,θ	0,8620		k3 E,θ	0,7680	
ε3 cu,θ	5,64	x10 ⁻³	famax,s,t	500	MPa
f c,θ	25,86	MPa	Ea,s,t	157440	MPa
E c,sec,θ	4585	MPa	temp 4	376	°C
temp 4	402	°C	AS4	8,04	cm ²
k4 c,θ	0,7470		IS4	651,44	cm ⁴
ε4 cu,θ	7,54	x10 ⁻³	k4 y,θ	1,0000	
f c,θ	22,41	MPa	k4 E,θ	0,7240	
E c,sec,θ	2972	MPa	famax,s,t	500	MPa
temp 5	680	°C	Ea,s,t	148420	MPa
k5 c,θ	0,3300		Nfi,pl,Rd,s	1608	kN
ε5 cu,θ	13,70	x10 ⁻³	(EI)fi,s	2346	kNm ²
f c,θ	9,90	MPa			
E c,sec,θ	723	MPa			
Nfi,pl,Rd,c	2260	kN			
Inércia correspondente à armadura			Nfi,pl,Rd	4803	kN
Faixa 1	36	cm ⁴	φf,θ	0,9	
Faixa 2	0	cm ⁴	φw,θ	1,0	
Faixa 3	344	cm ⁴	φc,θ	0,8	
Faixa 4	344	cm ⁴	φs,θ	0,9	
Faixa 5	0	cm ⁴	(EI)fi,eff	4030	kNm ²
Inércia 1	146,95	cm ⁴	Nfi,cr	9943	kN
Inércia 2	1507,49	cm ⁴	λθ	0,70	
Inércia 3	4810,42	cm ⁴	χ	0,73	
Inércia 4	11942,77	cm ⁴			
Inércia 5	24068	cm ⁴			
(EI)fi,c	1706	kNm ²	Nfi,Rd	3495	kN

Pilar formado com o Perfil PS 400x62 submetido a 90 minutos de Incêndio

PILAR PARCIALMENTE REVESTIDO													
Resistência a Compressão em Situação de Incêndio													
Utilizando Distribuição de Temperatura obtida pelo Caltemi													
Perfil Metálico													
PS 400x62				Dimensões		-	400	x	300	x	8	x	8
fy	300			MPa			lθ	2,0		m			
E	205000			MPa			TRRF	90		minutos			
Mesa do Perfil Metálico						Alma do Perfil Metálico							
8/10 divisões	10						9/10/11 divisões	11					
larg faixa	30,00			mm			larg faixa	34,91			mm		
d1	135,00			mm			Área	2,79			cm ²		
d2	105,00			mm			temp 1	270			°C		
d3	75,00			mm			k1 y,θ	1,0000					
d4	45,00			mm			k1 E,θ	0,8300					
d5	15,00			mm			famax,w,t =	300			MPa		
Área	2,40			cm ²			Ea,w,t =	170150			MPa		
temp 1	969			°C			temp 2	296			°C		
k1 y,θ	0,0462						k2 y,θ	1,0000					
k1 E,θ	0,0520						k2 E,θ	0,8040					
famax,f,t =	13,86			MPa			famax,w,t =	300			MPa		
Ea,f,t =	10655			MPa			Ea,w,t =	164820			MPa		
temp 2	956			°C			temp 3	352			°C		
k2 y,θ	0,0488						k3 y,θ	1,0000					
k2 E,θ	0,0549						k3 E,θ	0,7480					
famax,f,t =	14,64			MPa			famax,w,t =	300			MPa		
Ea,f,t =	11255			MPa			Ea,w,t =	153340			MPa		
temp 3	939			°C			temp 4	447			°C		
k3 y,θ	0,0522						k4 y,θ	0,8966					
k3 E,θ	0,0587						k4 E,θ	0,6530					
famax,f,t =	15,66			MPa			famax,w,t =	268,98			MPa		
Ea,f,t =	12039			MPa			Ea,w,t =	133865			MPa		
temp 4	922			°C			temp 5	595			°C		
k4 y,θ	0,0556						k5 y,θ	0,4855					
k4 E,θ	0,0626						k5 E,θ	0,3245					
famax,f,t =	16,68			MPa			famax,w,t =	145,65			MPa		
Ea,f,t =	12823			MPa			Ea,w,t =	66523			MPa		
temp 5	898			°C			temp 6	817			°C		
k5 y,θ	0,0610						k5 y,θ	0,1015					
k5 E,θ	0,0680						k5 E,θ	0,0862					
famax,f,t =	18,3			MPa			famax,f,t =	30,45			MPa		
Ea,f,t =	13930			MPa			Ea,f,t =	17666			MPa		
Nfi,pl,Rd,f =	76			kN			Nfi,pl,Rd,w =	668			kN		
(EI)fi,f =	403			kNm ²			(EI)fi,w =	1,85			kNm ²		

Concreto			Armadura		
fck	30	MPa	fy	500	MPa
5	faixas		temp 1	259	°C
larg faixa	29,20	mm	AS1	8,04	cm ²
A1	43,92	cm ²	IS1	72,38	cm ⁴
A2	78,02	cm ²	k1 y,θ	1,0000	
A3	112,13	cm ²	k1 E,θ	0,8410	
A4	146,23	cm ²	famax,s,t	500	MPa
A5	180,34	cm ²	Ea,s,t	172405	MPa
temp 1	255	°C	temp 2	361	°C
k1 c,θ	0,8725		AS2	8,04	cm ²
ε1 cu,θ	5,33	x10 ⁻³	IS2	651,44	cm ⁴
f c,θ	26,18	MPa	k2 y,θ	1,0000	
E c,sec,θ	4915	MPa	k2 E,θ	0,7390	
temp 2	290	°C	famax,s,t	500	MPa
k2 c,θ	0,9065		Ea,s,t	151495	MPa
ε2 cu,θ	4,37	x10 ⁻³	temp 3	460	°C
f c,θ	27,20	MPa	AS3	8,04	cm ²
E c,sec,θ	6223	MPa	IS3	72,38	cm ⁴
temp 3	392	°C	k3 y,θ	0,8680	
k3 c,θ	0,7580		k3 E,θ	0,6400	
ε3 cu,θ	7,38	x10 ⁻³	famax,s,t	434	MPa
f c,θ	22,74	MPa	Ea,s,t	131200	MPa
E c,sec,θ	3081	MPa	temp 4	514	°C
temp 4	528	°C	AS4	8,04	cm ²
k4 c,θ	0,5580		IS4	651,44	cm ⁴
ε4 cu,θ	10,34	x10 ⁻³	k4 y,θ	0,7366	
f c,θ	16,74	MPa	k4 E,θ	0,5594	
E c,sec,θ	1619	MPa	famax,s,t	368,3	MPa
temp 5	806	°C	Ea,s,t	114677	MPa
k5 c,θ	0,1458		Nfi,pl,Rd,s	1449	kN
ε5 cu,θ	14,53	x10 ⁻³	(EI)fi,s	1954	kNm ²
f c,θ	4,37	MPa			
E c,sec,θ	301	MPa			
Nfi,pl,Rd,c	1812	kN			
Inércia correspondente à armadura			Nfi,pl,Rd	4004	kN
Faixa 1	36	cm ⁴	φf,θ	0,8	
Faixa 2	0	cm ⁴	φw,θ	1,0	
Faixa 3	344	cm ⁴	φc,θ	0,8	
Faixa 4	344	cm ⁴	φs,θ	0,8	
Faixa 5	0	cm ⁴	(EI)fi,eff	2711	kNm ²
Inércia 1	146,95	cm ⁴	Nfi,cr	6690	kN
Inércia 2	1507,49	cm ⁴	λθ	0,77	
Inércia 3	4810,42	cm ⁴	χ	0,68	
Inércia 4	11942,77	cm ⁴			
Inércia 5	24068	cm ⁴			
(EI)fi,c	1030	kNm ²	Nfi,Rd	2718	kN

Pilar formado com o Perfil PS 400x62 submetido a 120 minutos de Incêndio

PILAR PARCIALMENTE REVESTIDO													
Resistência a Compressão em Situação de Incêndio													
Utilizando Distribuição de Temperatura obtida pelo Caltemi													
Perfil Metálico													
PS 400x62				Dimensões		-	400	x	300	x	8	x	8
fy	300			MPa		lθ		2,0		m			
E	205000			MPa		TRRF		120		minutos			
Mesa do Perfil Metálico						Alma do Perfil Metálico							
8/10 divisões	10					9/10/11 divisões	11						
larg faixa	30,00		mm	larg faixa	34,91		mm						
d1	135,00		mm	Área	2,79		cm²						
d2	105,00		mm	temp 1	362		°C						
d3	75,00		mm	k1 y,θ	1,0000								
d4	45,00		mm	k1 E,θ	0,7380								
d5	15,00		mm	famax,w,t =	300		MPa						
Área	2,40		cm²	Ea,w,t =	151290		MPa						
temp 1	1027		°C	temp 2	388		°C						
k1 y,θ	0,0346			k2 y,θ	1,0000								
k1 E,θ	0,0389			k2 E,θ	0,7120								
famax,f,t =	10,38		MPa	famax,w,t =	300		MPa						
Ea,f,t =	7980		MPa	Ea,w,t =	145960		MPa						
temp 2	1018		°C	temp 3	446		°C						
k2 y,θ	0,0364			k3 y,θ	0,8988								
k2 E,θ	0,0410			k3 E,θ	0,6540								
famax,f,t =	10,92		MPa	famax,w,t =	269,64		MPa						
Ea,f,t =	8395		MPa	Ea,w,t =	134070		MPa						
temp 3	1006		°C	temp 4	542		°C						
k3 y,θ	0,0388			k4 y,θ	0,6498								
k3 E,θ	0,0437			k4 E,θ	0,4782								
famax,f,t =	11,64		MPa	famax,w,t =	194,94		MPa						
Ea,f,t =	8948		MPa	Ea,w,t =	98031		MPa						
temp 4	994		°C	temp 5	688		°C						
k4 y,θ	0,0412			k5 y,θ	0,2588								
k4 E,θ	0,0464			k5 E,θ	0,1516								
famax,f,t =	12,36		MPa	famax,w,t =	77,64		MPa						
Ea,f,t =	9502		MPa	Ea,w,t =	31078		MPa						
temp 5	975		°C	temp 6	907		°C						
k5 y,θ	0,0450			k5 y,θ	0,0586								
k5 E,θ	0,0506			k5 E,θ	0,0659								
famax,f,t =	13,5		MPa	famax,f,t =	17,58		MPa						
Ea,f,t =	10378		MPa	Ea,f,t =	13515		MPa						
Nfi,pl,Rd,f =	56		kN	Nfi,pl,Rd,w =	564		kN						
(EI)fi,f =	301		kNm²	(EI)fi,w =	1,48		kNm²						

Concreto			Armadura		
fck	30	MPa	fy	500	MPa
5	faixas		temp 1	350	°C
larg faixa	29,20	mm	AS1	8,04	cm ²
A1	43,92	cm ²	IS1	72,38	cm ⁴
A2	78,02	cm ²	k1 y,θ	1,0000	
A3	112,13	cm ²	k1 E,θ	0,7500	
A4	146,23	cm ²	famax,s,t	500	MPa
A5	180,34	cm ²	Ea,s,t	153750	MPa
temp 1	346	°C	temp 2	454	°C
k1 c,θ	0,8040		AS2	8,04	cm ²
ε1 cu,θ	6,69	x10 ⁻³	IS2	651,44	cm ⁴
f c,θ	24,12	MPa	k2 y,θ	0,8812	
E c,sec,θ	3605	MPa	k2 E,θ	0,6460	
temp 2	382	°C	famax,s,t	440,6	MPa
k2 c,θ	0,7680		Ea,s,t	132430	MPa
ε2 cu,θ	7,23	x10 ⁻³	temp 3	561	°C
f c,θ	23,04	MPa	AS3	8,04	cm ²
E c,sec,θ	3187	MPa	IS3	72,38	cm ⁴
temp 3	488	°C	k3 y,θ	0,5909	
k3 c,θ	0,6180		k3 E,θ	0,4231	
ε3 cu,θ	9,26	x10 ⁻³	famax,s,t	295,45	MPa
f c,θ	18,54	MPa	Ea,s,t	86736	MPa
E c,sec,θ	2002	MPa	temp 4	619	°C
temp 4	625	°C	AS4	8,04	cm ²
k4 c,θ	0,4125		IS4	651,44	cm ⁴
ε4 cu,θ	12,88	x10 ⁻³	k4 y,θ	0,4244	
f c,θ	12,38	MPa	k4 E,θ	0,2758	
E c,sec,θ	961	MPa	famax,s,t	212,2	MPa
temp 5	887	°C	Ea,s,t	56539	MPa
k5 c,θ	0,0891		Nfi,pl,Rd,s	1164	kN
ε5 cu,θ	14,94	x10 ⁻³	(EI)fi,s	1405	kNm ²
f c,θ	2,67	MPa			
E c,sec,θ	179	MPa			
Nfi,pl,Rd,c	1445	kN			
Inércia correspondente à armadura			Nfi,pl,Rd	3230	kN
Faixa 1	36	cm ⁴	φf,θ	1,0	
Faixa 2	0	cm ⁴	φw,θ	1,0	
Faixa 3	344	cm ⁴	φc,θ	0,8	
Faixa 4	344	cm ⁴	φs,θ	1,0	
Faixa 5	0	cm ⁴	(EI)fi,eff	2199	kNm ²
Inércia 1	146,95	cm ⁴	Nfi,cr	5427	kN
Inércia 2	1507,49	cm ⁴	λθ	0,77	
Inércia 3	4810,42	cm ⁴	χ	0,68	
Inércia 4	11942,77	cm ⁴			
Inércia 5	24068	cm ⁴			
(EI)fi,c	615	kNm ²	Nfi,Rd	2197	kN

PILAR PREENCHIDO POR CONCRETO									
Resistência a Compressão em Situação de Incêndio									
Utilizando Distribuição de Temperatura obtida pelo Caltemi									
Perfil Metálico									
TC 273x9,3		Dimensões		d	273	mm	t	9.3	mm
Perfil circular = 1 e perfil quadrado = 2					1				
fy	300	MPa		Iθ		2.0	m		
E	205000	MPa		TRRF		30	minutos		
Área	77.04	cm²		Inércia		6690	cm⁴		
temp	540	°C							
k y,θ	0.6560			N _{fi,pl,Rd,p}		1516	kN		
k E,θ	0.4840			(EI) _{fi,p}		6638	kNm²		
Concreto									
fck	30	MPa							
nº de faixas		4		larg faixa		32	mm		
A1	31.77	cm²		A4		222.38	cm²		
A2	95.31	cm²		A5		0.00	cm²		
A3	158.85	cm²		A6		0.00	cm²		
temp 1	83	°C		temp 2		111	°C		
k1 c,θ	0.9606			k2 c,θ		0.9445			
ε1 cu,θ	3.29	x10 ⁻³		ε2 cu,θ		3.61	x10 ⁻³		
f c,θ	28.82	MPa		f c,θ		28.34	MPa		
E c,sec,θ	8766	MPa		E c,sec,θ		7849	MPa		
temp 3	211	°C		temp 4		343	°C		
k3 c,θ	0.8945			k4 c,θ		0.8070			
ε3 cu,θ	4.67	x10 ⁻³		ε4 cu,θ		6.65	x10 ⁻³		
f c,θ	26.84	MPa		f c,θ		24.21	MPa		
E c,sec,θ	5752	MPa		E c,sec,θ		3643	MPa		
N _{fi,pl,Rd,c}		1326		kN					

Inércia correspondente à armadura					
Faixa 1	0	cm ⁴	I1	80	cm ⁴
Faixa 2	0	cm ⁴	I2	1205	cm ⁴
Faixa 3	746	cm ⁴	I3	4474	cm ⁴
Faixa 4	0	cm ⁴	I4	14055	cm ⁴
Faixa 5	0	cm ⁴	I5	0	cm ⁴
Faixa 6	0	cm ⁴	I6	0	cm ⁴
(EI)_{fi,c} 871 kNm²					
Armadura					
fy	500	MPa			
temp	213	°C			
AS	19,63	cm ²			
IS	746,32	cm ⁴			
k _{y,θ}	1,0000				
k _{E,θ}	0,8870				
			N_{fi,pl,Rd,s}	982	kN
			(EI)_{fi,s}	1357	kNm²
N _{fi,pl,Rd}	3824	kN	(EI) _{fi,eff}	8692	kNm ²
φ _{p,θ}	1,0		N _{fi,cr}	21446	
φ _{c,θ}	0,8		λ _θ	0,42	
φ _{s,θ}	1,0		χ	0,89	
N_{fi,Rd} 3386 kN					

Observação: φ_{p,θ} = φ_{f,θ} (mesa do perfil parcialmente revestido)

Pilar formado com o Perfil Tubular 273x9,3 submetido a 60 minutos de Incêndio

PILAR PREENCHIDO POR CONCRETO									
Resistência a Compressão em Situação de Incêndio									
Utilizando Distribuição de Temperatura obtida pelo Caltemi									
Perfil Metálico									
TC 273x9,3		Dimensões		d	273	mm	t	9.3	mm
Perfil circular = 1 e perfil quadrado = 2					1				
fy	300	MPa	Iθ			2.0	m		
E	205000	MPa	TRRF			60	minutos		
Área	77.04	cm²	Inércia			6690	cm⁴		
temp	808	°C							
k y,θ	0.1060				N _{fi,pl,Rd,p}	245	kN		
k E,θ	0.0882				(EI) _{fi,p}	1210	kNm²		
Concreto									
fck	30	MPa							
nº de faixas		4	larg faixa		32	mm			
A1	31.77	cm²	A4		222.38	cm²			
A2	95.31	cm²	A5		0.00	cm²			
A3	158.85	cm²	A6		0.00	cm²			
temp 1	203	°C	temp 2		250	°C			
k1 c,θ	0.8985			k2 c,θ	0.8750				
ε1 cu,θ	4.55	x10 ⁻³	ε2 cu,θ		5.25	x10 ⁻³			
f c,θ	26.96	MPa	f c,θ		26.25	MPa			
E c,sec,θ	5931	MPa	E c,sec,θ		5000	MPa			
temp 3	398	°C	temp 4		566	°C			
k3 c,θ	0.7520			k4 c,θ	0.5010				
ε3 cu,θ	7.47	x10 ⁻³	ε4 cu,θ		11.48	x10 ⁻³			
f c,θ	22.56	MPa	f c,θ		15.03	MPa			
E c,sec,θ	3020	MPa	E c,sec,θ		1309	MPa			
N _{fi,pl,Rd,c}		1028	kN						

Inércia correspondente à armadura					
Faixa 1	0	cm ⁴	I1	80	cm ⁴
Faixa 2	0	cm ⁴	I2	1205	cm ⁴
Faixa 3	746	cm ⁴	I3	4474	cm ⁴
Faixa 4	0	cm ⁴	I4	14055	cm ⁴
Faixa 5	0	cm ⁴	I5	0	cm ⁴
Faixa 6	0	cm ⁴	I6	0	cm ⁴
(EI)_{fi,c} 384 kNm²					
Armadura					
fy	500	MPa			
temp	400	°C			
AS	19,63	cm ²			
IS	746,32	cm ⁴			
k _{y,θ}	1,0000				
k _{E,θ}	0,7000				
			N_{fi,pl,Rd,s}	982	kN
			(EI)_{fi,s}	1071	kNm²
N _{fi,pl,Rd}	2255	kN	(EI) _{fi,eff}	2360	kNm ²
φ _{p,θ}	0,9		N _{fi,cr}	5823	
φ _{c,θ}	0,8		λ _θ	0,62	
φ _{s,θ}	0,9		χ	0,77	
N_{fi,Rd} 1741 kN					

Observação: φ_{p,θ} = φ_{f,θ} (mesa do perfil parcialmente revestido)

PILAR PREENCHIDO POR CONCRETO									
Resistência a Compressão em Situação de Incêndio									
Utilizando Distribuição de Temperatura obtida pelo Caltemi									
Perfil Metálico									
TC 273x9,3		Dimensões		d	273	mm	t	9.3	mm
Perfil circular = 1 e perfil quadrado = 2					1				
fy	300	MPa		Iθ		2.0	m		
E	205000	MPa		TRRF		90	minutos		
Área	77.04	cm ²		Inércia	6690	cm ⁴			
temp	941	°C							
k y,θ	0.0518			N _{fi,pl,Rd,p}		120	kN		
k E,θ	0.0583			(EI) _{fi,p}		799	kNm ²		
Concreto									
fck	30	MPa							
nº de faixas		4		larg faixa		32	mm		
A1	31.77	cm ²		A4	222.38	cm ²			
A2	95.31	cm ²		A5	0.00	cm ²			
A3	158.85	cm ²		A6	0.00	cm ²			
temp 1	325	°C		temp 2	379	°C			
k1 c,θ	0.8250			k2 c,θ	0.7710				
ε1 cu,θ	6.38	x10 ⁻³		ε2 cu,θ	7.19	x10 ⁻³			
f c,θ	24.75	MPa		f c,θ	23.13	MPa			
E c,sec,θ	3882	MPa		E c,sec,θ	3219	MPa			
temp 3	539	°C		temp 4	711	°C			
k3 c,θ	0.5415			k4 c,θ	0.2835				
ε3 cu,θ	10.67	x10 ⁻³		ε4 cu,θ	14.06	x10 ⁻³			
f c,θ	16.25	MPa		f c,θ	8.51	MPa			
E c,sec,θ	1522	MPa		E c,sec,θ	605	MPa			
N _{fi,pl,Rd,c}		746		kN					

Inércia correspondente à armadura					
Faixa 1	0	cm ⁴	I1	80	cm ⁴
Faixa 2	0	cm ⁴	I2	1205	cm ⁴
Faixa 3	746	cm ⁴	I3	4474	cm ⁴
Faixa 4	0	cm ⁴	I4	14055	cm ⁴
Faixa 5	0	cm ⁴	I5	0	cm ⁴
Faixa 6	0	cm ⁴	I6	0	cm ⁴
(EI)_{fi,c} 195 kNm²					
Armadura					
fy	500	MPa			
temp	541	°C			
AS	19,63	cm ²			
IS	746,32	cm ⁴			
k _{y,θ}	0,6529		N_{fi,pl,Rd,s} 641 kN		
k _{E,θ}	0,4811		(EI)_{fi,s} 736 kNm²		
N _{fi,pl,Rd}	1507	kN	(EI) _{fi,eff}	1384	kNm ²
φ _{p,θ}	0,8		N _{fi,cr}	3416	
φ _{c,θ}	0,8		λ _θ	0,66	
φ _{s,θ}	0,8		χ	0,75	
N_{fi,Rd} 1125 kN					

Observação: φ_{p,θ} = φ_{f,θ} (mesa do perfil parcialmente revestido)

Pilar formado com o Perfil Tubular 273x9,3 submetido a 120 minutos de Incêndio

PILAR PREENCHIDO POR CONCRETO									
Resistência a Compressão em Situação de Incêndio									
Utilizando Distribuição de Temperatura obtida pelo Caltemi									
Perfil Metálico									
TC 273x9,3		Dimensões		d	273	mm	t	9.3	mm
Perfil circular = 1 e perfil quadrado = 2					1				
fy	300	MPa		Iθ		2.0	m		
E	205000	MPa		TRRF		120	minutos		
Área	77.04	cm²		Inércia	6690	cm⁴			
temp	1008	°C							
k y,θ	0.0384			N _{fi,pl,Rd,p}		89	kN		
k E,θ	0.0432			(EI) _{fi,p}		592	kNm²		
Concreto									
fck	30	MPa							
nº de faixas	4			larg faixa	32	mm			
A1	31.77	cm²		A4	222.38	cm²			
A2	95.31	cm²		A5	0.00	cm²			
A3	158.85	cm²		A6	0.00	cm²			
temp 1	433	°C		temp 2	488	°C			
k1 c,θ	0.7005			k2 c,θ	0.6180				
ε1 cu,θ	8.16	x10 ⁻³		ε2 cu,θ	9.26	x10 ⁻³			
f c,θ	21.02	MPa		f c,θ	18.54	MPa			
E c,sec,θ	2575	MPa		E c,sec,θ	2002	MPa			
temp 3	647	°C		temp 4	808	°C			
k3 c,θ	0.3795			k4 c,θ	0.1444				
ε3 cu,θ	13.21	x10 ⁻³		ε4 cu,θ	14.54	x10 ⁻³			
f c,θ	11.39	MPa		f c,θ	4.33	MPa			
E c,sec,θ	862	MPa		E c,sec,θ	298	MPa			
N _{fi,pl,Rd,c}		521		kN					

Inércia correspondente à armadura					
Faixa 1	0	cm ⁴	I1	80	cm ⁴
Faixa 2	0	cm ⁴	I2	1205	cm ⁴
Faixa 3	746	cm ⁴	I3	4474	cm ⁴
Faixa 4	0	cm ⁴	I4	14055	cm ⁴
Faixa 5	0	cm ⁴	I5	0	cm ⁴
Faixa 6	0	cm ⁴	I6	0	cm ⁴
(EI) _{fi,c}	107	kNm ²			
Armadura					
fy	500	MPa			
temp	649	°C			
AS	19,63	cm ²			
IS	746,32	cm ⁴			
k _{y,θ}	0,3524		N_{fi,pl,Rd,s} 346 kN		
k _{E,θ}	0,2218		(EI)_{fi,s} 339 kNm ²		
N _{fi,pl,Rd}	955	kN	(EI)_{fi,eff} 1017 kNm ²		
φ _{p,θ}	1,0		N _{fi,cr} 2510		
φ _{c,θ}	0,8		λ _θ 0,62		
φ _{s,θ}	1,0		χ 0,78		
N _{fi,Rd}	741	kN			

Observação: φ_{p,θ} = φ_{f,θ} (mesa do perfil parcialmente revestido)

ANEXO 4

**CÁLCULO DA RESISTÊNCIA EM SITUAÇÃO DE INCÊNDIO
DO PILAR MISTO PARCIALMENTE REVESTIDO POR
CONCRETO FORMADO COM O PERFIL PS 400X62 E
DO PERFIL PREENCHIDO POR CONCRETO
FORMADO COM O PERFIL TUBULAR 273X9,3
COM PROTEÇÃO TÉRMICA
POR MEIO DO MÉTODO AVANÇADO DE CÁLCULO**

Pilar formado com o Perfil PS 400x62 com Proteção submetido a 30 minutos de Incêndio

PILAR PARCIALMENTE REVESTIDO									
Resistência a Compressão em Situação de Incêndio									
Utilizando Distribuição de Temperatura obtida pelo Caltemi									
Perfil Metálico									
PS 400x62 com Proteção				Dimensões		400	x	300	x 8 x 8
f_y	300	MPa		l_0	2,0	m			
E	205000	MPa		TRRF	30	minutos			
Mesa do Perfil Metálico					Alma do Perfil Metálico				
8/10 divisões	10				9/10/11 divisões	10			
larg faixa	30.00	mm			larg faixa	38.40	mm		
d1	135.00	mm			Área	3.07	cm ²		
d2	105.00	mm			temp 1	46	°C		
d3	75.00	mm			k1 y,θ	1.0000			
d4	45.00	mm			k1 E,θ	1.0000			
d5	15.00	mm			f _{amax,w,t} =	300	MPa		
Área	2.40	cm ²			E _{a,w,t} =	205000	MPa		
temp 1	325	°C			temp 2	54	°C		
k1 y,θ	1				k2 y,θ	1.0000			
k1 E,θ	0.7750				k2 E,θ	1.0000			
f _{amax,f,t} =	300.00	MPa			f _{amax,w,t} =	300	MPa		
E _{a,f,t} =	158875	MPa			E _{a,w,t} =	205000	MPa		
temp 2	278	°C			temp 3	70	°C		
k2 y,θ	1.0000				k3 y,θ	1.0000			
k2 E,θ	0.8220				k3 E,θ	1.0000			
f _{amax,f,t} =	300	MPa			f _{amax,w,t} =	300	MPa		
E _{a,f,t} =	168510	MPa			E _{a,w,t} =	205000	MPa		
temp 3	231	°C			temp 4	98	°C		
k3 y,θ	1.0000				k4 y,θ	1.0000			
k3 E,θ	0.8690				k4 E,θ	1.0000			
f _{amax,f,t} =	300	MPa			f _{amax,w,t} =	300	MPa		
E _{a,f,t} =	178145	MPa			E _{a,w,t} =	205000	MPa		
temp 4	195	°C			temp 5	144	°C		
k4 y,θ	1.0000				k5 y,θ	1.0000			
k4 E,θ	0.9050				k5 E,θ	0.9560			
f _{amax,f,t} =	300	MPa			f _{amax,w,t} =	300	MPa		
E _{a,f,t} =	185525	MPa			E _{a,w,t} =	195980	MPa		
temp 5	169	°C			temp 6	0	°C		
k5 y,θ	1.0000				k5 y,θ	0.0000			
k5 E,θ	0.9310				k5 E,θ	0.0000			
f _{amax,f,t} =	300	MPa			f _{amax,f,t} =	0	MPa		
E _{a,f,t} =	190855	MPa			E _{a,f,t} =	0	MPa		
N _{fi,pl,Rd,f} =	1440	kN			N _{fi,pl,Rd,w} =	922	kN		
(EI) _{fi,f} =	5991	kNm ²			(EI) _{fi,w} =	3.33	kNm ²		

Concreto			Armadura		
fck	30	MPa	fy	500	MPa
5	faixas		temp 1	47	°C
larg faixa	29,20	mm	AS1	8,04	cm ²
A1	43,92	cm ²	IS1	72,38	cm ⁴
A2	78,02	cm ²	k1 y,θ	1,0000	
A3	112,13	cm ²	k1 E,θ	1,0000	
A4	146,23	cm ²	famax,s,t	500	MPa
A5	180,34	cm ²	Ea,s,t	205000	MPa
temp 1	46	°C	temp 2	121	°C
k1 c,θ	0,9838		AS2	8,04	cm ²
ε1 cu,θ	2,83	x10 ⁻³	IS2	651,44	cm ⁴
f c,θ	29,51	MPa	k2 y,θ	1,0000	
E c,sec,θ	10447	MPa	k2 E,θ	0,9790	
temp 2	60	°C	famax,s,t	500	MPa
k2 c,θ	0,9750		Ea,s,t	200695	MPa
ε2 cu,θ	3,00	x10 ⁻³	temp 3	76	°C
f c,θ	29,25	MPa	AS3	8,04	cm ²
E c,sec,θ	9750	MPa	IS3	72,38	cm ⁴
temp 3	97	°C	k3 y,θ	1,0000	
k3 c,θ	0,9519		k3 E,θ	1,0000	
ε3 cu,θ	3,46	x10 ⁻³	famax,s,t	500	MPa
f c,θ	28,56	MPa	Ea,s,t	205000	MPa
E c,sec,θ	8247	MPa	temp 4	136	°C
temp 4	166	°C	AS4	8,04	cm ²
k4 c,θ	0,9170		IS4	651,44	cm ⁴
ε4 cu,θ	4,16	x10 ⁻³	k4 y,θ	1,0000	
f c,θ	27,51	MPa	k4 E,θ	0,9640	
E c,sec,θ	6613	MPa	famax,s,t	500	MPa
temp 5	335	°C	Ea,s,t	197620	MPa
k5 c,θ	0,8150		Nfi,pl,Rd,s	1608	kN
ε5 cu,θ	6,53	x10 ⁻³	(EI)fi,s	2892	kNm ²
f c,θ	24,45	MPa			
E c,sec,θ	3747	MPa			
Nfi,pl,Rd,c	3042	kN			
Inércia correspondente à armadura			Nfi,pl,Rd	7012	kN
Faixa 1	36	cm ⁴	φf,θ	1,0	
Faixa 2	0	cm ⁴	φw,θ	1,0	
Faixa 3	344	cm ⁴	φc,θ	0,8	
Faixa 4	344	cm ⁴	φs,θ	1,0	
Faixa 5	0	cm ⁴	(EI)fi,eff	12487	kNm ²
Inércia 1	147,14	cm ⁴	Nfi,cr	30809	kN
Inércia 2	1507,49	cm ⁴	λθ	0,48	
Inércia 3	4810,24	cm ⁴	χ	0,86	
Inércia 4	11942,59	cm ⁴			
Inércia 5	24068	cm ⁴			
(EI)fi,c	4501	kNm ²	Nfi,Rd	6000	kN

Pilar formado com o Perfil PS 400x62 com Proteção submetido a 60 minutos de Incêndio

PILAR PARCIALMENTE REVESTIDO									
Resistência a Compressão em Situação de Incêndio									
Utilizando Distribuição de Temperatura obtida pelo Caltemi									
Perfil Metálico									
PS 400x62 com Proteção				Dimensões		400	x	300	x 8 x 8
fy	300	MPa		l _θ	2,0	m			
E	205000	MPa		TRRF	60	minutos			
Mesa do Perfil Metálico					Alma do Perfil Metálico				
8/10 divisões	10				9/10/11 divisões	10			
larg faixa	30.00	mm			larg faixa	38.40	mm		
d1	135.00	mm			Área	3.07	cm ²		
d2	105.00	mm			temp 1	109	°C		
d3	75.00	mm			k1 y,θ	1.0000			
d4	45.00	mm			k1 E,θ	0.9910			
d5	15.00	mm			f _{amax,w,t} =	300	MPa		
Área	2.40	cm ²			E _{a,w,t} =	203155	MPa		
temp 1	521	°C			temp 2	124	°C		
k1 y,θ	0.7149				k2 y,θ	1.0000			
k1 E,θ	0.5391				k2 E,θ	0.9760			
f _{amax,f,t} =	214.47	MPa			f _{amax,w,t} =	300	MPa		
E _{a,f,t} =	110516	MPa			E _{a,w,t} =	200080	MPa		
temp 2	461	°C			temp 3	153	°C		
k2 y,θ	0.8658				k3 y,θ	1.0000			
k2 E,θ	0.6390				k3 E,θ	0.9470			
f _{amax,f,t} =	259.74	MPa			f _{amax,w,t} =	300	MPa		
E _{a,f,t} =	130995	MPa			E _{a,w,t} =	194135	MPa		
temp 3	397	°C			temp 4	200	°C		
k3 y,θ	1.0000				k4 y,θ	1.0000			
k3 E,θ	0.7030				k4 E,θ	0.9000			
f _{amax,f,t} =	300	MPa			f _{amax,w,t} =	300	MPa		
E _{a,f,t} =	144115	MPa			E _{a,w,t} =	184500	MPa		
temp 4	346	°C			temp 5	269	°C		
k4 y,θ	1.0000				k5 y,θ	1.0000			
k4 E,θ	0.7540				k5 E,θ	0.8310			
f _{amax,f,t} =	300	MPa			f _{amax,w,t} =	300	MPa		
E _{a,f,t} =	154570	MPa			E _{a,w,t} =	170355	MPa		
temp 5	307	°C			temp 6	0	°C		
k5 y,θ	1.0000				k5 y,θ	0.0000			
k5 E,θ	0.7930				k5 E,θ	0.0000			
f _{amax,f,t} =	300	MPa			f _{amax,f,t} =	0	MPa		
E _{a,f,t} =	162565	MPa			E _{a,f,t} =	0	MPa		
N _{fi,pl,Rd,f} =	1319	kN			N _{fi,pl,Rd,w} =	922	kN		
(EI) _{fi,f} =	4484	kNm ²			(EI) _{fi,w} =	3.12	kNm ²		

Concreto			Armadura		
fck	30	MPa	fy	500	MPa
5	faixas		temp 1	111	°C
larg faixa	29,20	mm	AS1	8,04	cm ²
A1	43,92	cm ²	IS1	72,38	cm ⁴
A2	78,02	cm ²	k1 y,θ	1,0000	
A3	112,13	cm ²	k1 E,θ	0,9890	
A4	146,23	cm ²	famax,s,t	500	MPa
A5	180,34	cm ²	Ea,s,t	202745	MPa
temp 1	107	°C	temp 2	236	°C
k1 c,θ	0,9465		AS2	8,04	cm ²
ε1 cu,θ	3,57	x10 ⁻³	IS2	651,44	cm ⁴
f c,θ	28,40	MPa	k2 y,θ	1,0000	
E c,sec,θ	7954	MPa	k2 E,θ	0,8640	
temp 2	135	°C	famax,s,t	500	MPa
k2 c,θ	0,9325		Ea,s,t	177120	MPa
ε2 cu,θ	3,85	x10 ⁻³	temp 3	169	°C
f c,θ	27,98	MPa	AS3	8,04	cm ²
E c,sec,θ	7266	MPa	IS3	72,38	cm ⁴
temp 3	201	°C	k3 y,θ	1,0000	
k3 c,θ	0,8995		k3 E,θ	0,9310	
ε3 cu,θ	4,52	x10 ⁻³	famax,s,t	500	MPa
f c,θ	26,99	MPa	Ea,s,t	190855	MPa
E c,sec,θ	5977	MPa	temp 4	270	°C
temp 4	304	°C	AS4	8,04	cm ²
k4 c,θ	0,8460		IS4	651,44	cm ⁴
ε4 cu,θ	6,06	x10 ⁻³	k4 y,θ	1,0000	
f c,θ	25,38	MPa	k4 E,θ	0,8300	
E c,sec,θ	4188	MPa	famax,s,t	500	MPa
temp 5	523	°C	Ea,s,t	170150	MPa
k5 c,θ	0,5655		Nfi,pl,Rd,s	1608	kN
ε5 cu,θ	10,19	x10 ⁻³	(EI)fi,s	2547	kNm ²
f c,θ	16,97	MPa			
E c,sec,θ	1665	MPa			
Nfi,pl,Rd,c	2645	kN			
Inércia correspondente à armadura			Nfi,pl,Rd	6494	kN
Faixa 1	36	cm ⁴	φf,θ	0,9	
Faixa 2	0	cm ⁴	φw,θ	1,0	
Faixa 3	344	cm ⁴	φc,θ	0,8	
Faixa 4	344	cm ⁴	φs,θ	0,9	
Faixa 5	0	cm ⁴	(EI)fi,eff	8427	kNm ²
Inércia 1	147,14	cm ⁴	Nfi,cr	20793	kN
Inércia 2	1507,49	cm ⁴	λθ	0,56	
Inércia 3	4810,24	cm ⁴	χ	0,81	
Inércia 4	11942,59	cm ⁴			
Inércia 5	24068	cm ⁴			
(EI)fi,c	2619	kNm ²	Nfi,Rd	5257	kN

Pilar formado com o Perfil PS 400x62 com Proteção submetido a 90 minutos de Incêndio

PILAR PARCIALMENTE REVESTIDO									
Resistência a Compressão em Situação de Incêndio									
Utilizando Distribuição de Temperatura obtida pelo Caltemi									
Perfil Metálico									
PS 400x62 com Proteção				Dimensões		400	x	300	x 8 x 8
fy	300	MPa		l _θ	2,0	m			
E	205000	MPa		TRRF	90	minutos			
Mesa do Perfil Metálico					Alma do Perfil Metálico				
8/10 divisões	10				9/10/11 divisões	10			
larg faixa	30.00	mm			larg faixa	38.40	mm		
d1	135.00	mm			Área	3.07	cm ²		
d2	105.00	mm			temp 1	184	°C		
d3	75.00	mm			k1 y,θ	1.0000			
d4	45.00	mm			k1 E,θ	0.9160			
d5	15.00	mm			f _{amax,w,t} =	300	MPa		
Área	2.40	cm ²			E _{a,w,t} =	187780	MPa		
temp 1	647	°C			temp 2	203	°C		
k1 y,θ	0.3572				k2 y,θ	1.0000			
k1 E,θ	0.2254				k2 E,θ	0.8970			
f _{amax,f,t} =	107.16	MPa			f _{amax,w,t} =	300	MPa		
E _{a,f,t} =	46207	MPa			E _{a,w,t} =	183885	MPa		
temp 2	583	°C			temp 3	239	°C		
k2 y,θ	0.5227				k3 y,θ	1.0000			
k2 E,θ	0.3593				k3 E,θ	0.8610			
f _{amax,f,t} =	156.81	MPa			f _{amax,w,t} =	300	MPa		
E _{a,f,t} =	73657	MPa			E _{a,w,t} =	176505	MPa		
temp 3	516	°C			temp 4	295	°C		
k3 y,θ	0.7304				k4 y,θ	1.0000			
k3 E,θ	0.5536				k4 E,θ	0.8050			
f _{amax,f,t} =	219.12	MPa			f _{amax,w,t} =	300	MPa		
E _{a,f,t} =	113488	MPa			E _{a,w,t} =	165025	MPa		
temp 4	460	°C			temp 5	374	°C		
k4 y,θ	0.8680				k5 y,θ	1.0000			
k4 E,θ	0.6400				k5 E,θ	0.7260			
f _{amax,f,t} =	260.4	MPa			f _{amax,w,t} =	300	MPa		
E _{a,f,t} =	131200	MPa			E _{a,w,t} =	148830	MPa		
temp 5	417	°C			temp 6	0	°C		
k5 y,θ	0.9626				k5 y,θ	0.0000			
k5 E,θ	0.6830				k5 E,θ	0.0000			
f _{amax,f,t} =	288.78	MPa			f _{amax,f,t} =	0	MPa		
E _{a,f,t} =	140015	MPa			E _{a,f,t} =	0	MPa		
N _{fi,pl,Rd,f} =	991	kN			N _{fi,pl,Rd,w} =	922	kN		
(EI) _{fi,f} =	2522	kNm ²			(EI) _{fi,w} =	2.82	kNm ²		

Concreto			Armadura		
fck	30	MPa	fy	500	MPa
5	faixas		temp 1	186	°C
larg faixa	29,20	mm	AS1	8,04	cm ²
A1	43,92	cm ²	IS1	72,38	cm ⁴
A2	78,02	cm ²	k1 y,θ	1,0000	
A3	112,13	cm ²	k1 E,θ	0,9140	
A4	146,23	cm ²	famax,s,t	500	MPa
A5	180,34	cm ²	Ea,s,t	187370	MPa
temp 1	181	°C	temp 2	331	°C
k1 c,θ	0,9095		AS2	8,04	cm ²
ε1 cu,θ	4,31	x10 ⁻³	IS2	651,44	cm ⁴
f c,θ	27,29	MPa	k2 y,θ	1,0000	
E c,sec,θ	6331	MPa	k2 E,θ	0,7690	
temp 2	216	°C	famax,s,t	500	MPa
k2 c,θ	0,8920		Ea,s,t	157645	MPa
ε2 cu,θ	4,74	x10 ⁻³	temp 3	261	°C
f c,θ	26,76	MPa	AS3	8,04	cm ²
E c,sec,θ	5646	MPa	IS3	72,38	cm ⁴
temp 3	295	°C	k3 y,θ	1,0000	
k3 c,θ	0,8525		k3 E,θ	0,8390	
ε3 cu,θ	5,93	x10 ⁻³	famax,s,t	500	MPa
f c,θ	25,58	MPa	Ea,s,t	171995	MPa
E c,sec,θ	4316	MPa	temp 4	379	°C
temp 4	410	°C	AS4	8,04	cm ²
k4 c,θ	0,7350		IS4	651,44	cm ⁴
ε4 cu,θ	7,70	x10 ⁻³	k4 y,θ	1,0000	
f c,θ	22,05	MPa	k4 E,θ	0,7210	
E c,sec,θ	2864	MPa	famax,s,t	500	MPa
temp 5	637	°C	Ea,s,t	147805	MPa
k5 c,θ	0,3945		Nfi,pl,Rd,s	1608	kN
ε5 cu,θ	13,06	x10 ⁻³	(EI)fi,s	2250	kNm ²
f c,θ	11,84	MPa			
E c,sec,θ	907	MPa			
Nfi,pl,Rd,c	2303	kN			
Inércia correspondente à armadura			Nfi,pl,Rd	5823	kN
Faixa 1	36	cm ⁴	φf,θ	0,8	
Faixa 2	0	cm ⁴	φw,θ	1,0	
Faixa 3	344	cm ⁴	φc,θ	0,8	
Faixa 4	344	cm ⁴	φs,θ	0,8	
Faixa 5	0	cm ⁴	(EI)fi,eff	5200	kNm ²
Inércia 1	147,14	cm ⁴	Nfi,cr	12831	kN
Inércia 2	1507,49	cm ⁴	λθ	0,67	
Inércia 3	4810,24	cm ⁴	χ	0,74	
Inércia 4	11942,59	cm ⁴			
Inércia 5	24068	cm ⁴			
(EI)fi,c	1724	kNm ²	Nfi,Rd	4314	kN

Pilar formado com o Perfil PS400x62 com Proteção submetido a 120 minutos de Incêndio

PILAR PARCIALMENTE REVESTIDO									
Resistência a Compressão em Situação de Incêndio									
Utilizando Distribuição de Temperatura obtida pelo Caltemi									
Perfil Metálico									
PS 400x62 com Proteção				Dimensões		400	x	300	x 8 x 8
fy	300	MPa		l ₀	2,0	m			
E	205000	MPa		TRRF	120	minutos			
Mesa do Perfil Metálico					Alma do Perfil Metálico				
8/10 divisões	10				9/10/11 divisões	10			
larg faixa	30.00	mm			larg faixa	38.40	mm		
d1	135.00	mm			Área	3.07	cm ²		
d2	105.00	mm			temp 1	259	°C		
d3	75.00	mm			k1 y,θ	1.0000			
d4	45.00	mm			k1 E,θ	0.8410			
d5	15.00	mm			f _{amax,w,t} =	300	MPa		
Área	2.40	cm ²			E _{a,w,t} =	172405	MPa		
temp 1	739	°C			temp 2	280	°C		
k1 y,θ	0.1832				k2 y,θ	1.0000			
k1 E,θ	0.1144				k2 E,θ	0.8200			
f _{amax,f,t} =	54.96	MPa			f _{amax,w,t} =	300	MPa		
E _{a,f,t} =	23452	MPa			E _{a,w,t} =	168100	MPa		
temp 2	674	°C			temp 3	319	°C		
k2 y,θ	0.2924				k3 y,θ	1.0000			
k2 E,θ	0.1768				k3 E,θ	0.7810			
f _{amax,f,t} =	87.72	MPa			f _{amax,w,t} =	300	MPa		
E _{a,f,t} =	36244	MPa			E _{a,w,t} =	160105	MPa		
temp 3	606	°C			temp 4	378	°C		
k3 y,θ	0.4556				k4 y,θ	1.0000			
k3 E,θ	0.2992				k4 E,θ	0.7220			
f _{amax,f,t} =	136.68	MPa			f _{amax,w,t} =	300	MPa		
E _{a,f,t} =	61336	MPa			E _{a,w,t} =	148010	MPa		
temp 4	550	°C			temp 5	461	°C		
k4 y,θ	0.6250				k5 y,θ	0.8658			
k4 E,θ	0.4550				k5 E,θ	0.6390			
f _{amax,f,t} =	187.5	MPa			f _{amax,w,t} =	259.74	MPa		
E _{a,f,t} =	93275	MPa			E _{a,w,t} =	130995	MPa		
temp 5	506	°C			temp 6	0	°C		
k5 y,θ	0.7614				k5 y,θ	0.0000			
k5 E,θ	0.5826				k5 E,θ	0.0000			
f _{amax,f,t} =	228.42	MPa			f _{amax,f,t} =	0	MPa		
E _{a,f,t} =	119433	MPa			E _{a,f,t} =	0	MPa		
N _{fi,pl,Rd,f} =	667	kN			N _{fi,pl,Rd,w} =	897	kN		
(EI) _{fi,f} =	1356	kNm ²			(EI) _{fi,w} =	2.55	kNm ²		

Concreto			Armadura		
fck	30	MPa	fy	500	MPa
5	faixas		temp 1	260	°C
larg faixa	29,20	mm	AS1	8,04	cm ²
A1	43,92	cm ²	IS1	72,38	cm ⁴
A2	78,02	cm ²	k1 y,θ	1,0000	
A3	112,13	cm ²	k1 E,θ	0,8400	
A4	146,23	cm ²	famax,s,t	500	MPa
A5	180,34	cm ²	Ea,s,t	172200	MPa
temp 1	255	°C	temp 2	412	°C
k1 c,θ	0,8725		AS2	8,04	cm ²
ε1 cu,θ	5,33	x10 ⁻³	IS2	651,44	cm ⁴
f c,θ	26,18	MPa	k2 y,θ	1,0000	
E c,sec,θ	4915	MPa	k2 E,θ	0,6880	
temp 2	293	°C	famax,s,t	500	MPa
k2 c,θ	0,8535		Ea,s,t	141040	MPa
ε2 cu,θ	5,90	x10 ⁻³	temp 3	345	°C
f c,θ	25,61	MPa	AS3	8,04	cm ²
E c,sec,θ	4344	MPa	IS3	72,38	cm ⁴
temp 3	376	°C	k3 y,θ	1,0000	
k3 c,θ	0,7740		k3 E,θ	0,7550	
ε3 cu,θ	7,14	x10 ⁻³	famax,s,t	500	MPa
f c,θ	23,22	MPa	Ea,s,t	154775	MPa
E c,sec,θ	3252	MPa	temp 4	468	°C
temp 4	495	°C	AS4	8,04	cm ²
k4 c,θ	0,6075		IS4	651,44	cm ⁴
ε4 cu,θ	9,40	x10 ⁻³	k4 y,θ	0,8504	
f c,θ	18,23	MPa	k4 E,θ	0,6320	
E c,sec,θ	1939	MPa	famax,s,t	425,2	MPa
temp 5	720	°C	Ea,s,t	129560	MPa
k5 c,θ	0,2700		Nfi,pl,Rd,s	1548	kN
ε5 cu,θ	14,10	x10 ⁻³	(EI)fi,s	1999	kNm ²
f c,θ	8,10	MPa			
E c,sec,θ	574	MPa			
Nfi,pl,Rd,c	1975	kN			
Inércia correspondente à armadura			Nfi,pl,Rd	5088	kN
Faixa 1	36	cm ⁴	φf,θ	1,0	
Faixa 2	0	cm ⁴	φw,θ	1,0	
Faixa 3	344	cm ⁴	φc,θ	0,8	
Faixa 4	344	cm ⁴	φs,θ	1,0	
Faixa 5	0	cm ⁴	(EI)fi,eff	4317	kNm ²
Inércia 1	147,14	cm ⁴	Nfi,cr	10651	kN
Inércia 2	1507,49	cm ⁴	λθ	0,69	
Inércia 3	4810,24	cm ⁴	χ	0,73	
Inércia 4	11942,59	cm ⁴			
Inércia 5	24068	cm ⁴			
(EI)fi,c	1198	kNm ²	Nfi,Rd	3715	kN

Pilar formado com o Perfil Tubular 273x9,3 com Proteção submetido a 30 minutos de Incêndio

PILAR PREENCHIDO POR CONCRETO									
Resistência a Compressão em Situação de Incêndio									
Utilizando Distribuição de Temperatura obtida pelo Caltemi									
Perfil Metálico									
TC 273x9,3 c/proteção		Dimensões		d	273	mm	t	9,3	mm
Perfil circular = 1 e perfil quadrado = 2					1				
fy	300	MPa		lθ		2,0		m	
E	205000	MPa		TRRF		30		minutos	
Área	77,04	cm ²		Inércia		6690	cm ⁴		
temp	210	°C							
k y,θ	1,0000			N _{fi,pl,Rd,p}		2311	kN		
k E,θ	0,8900			(EI) _{fi,p}		12206	kNm ²		
Concreto									
fck	30	MPa							
nº de faixas		4		larg faixa		32	mm		
A1	31,77	cm ²		A4		222,38	cm ²		
A2	95,31	cm ²		A5		0,00	cm ²		
A3	158,85	cm ²		A6		0,00	cm ²		
temp 1	45	°C		temp 2		57	°C		
k1 c,θ	0,9844			k2 c,θ		0,9769			
ε1 cu,θ	2,81	x10 ⁻³		ε2 cu,θ		2,96	x10 ⁻³		
f c,θ	29,53	MPa		f c,θ		29,31	MPa		
E c,sec,θ	10500	MPa		E c,sec,θ		9892	MPa		
temp 3	94	°C		temp 4		141	°C		
k3 c,θ	0,9538			k4 c,θ		0,9295			
ε3 cu,θ	3,43	x10 ⁻³		ε4 cu,θ		3,91	x10 ⁻³		
f c,θ	28,61	MPa		f c,θ		27,89	MPa		
E c,sec,θ	8354	MPa		E c,sec,θ		7132	MPa		
N _{fi,pl,Rd,c}		1448				kN			

Inércia correspondente à armadura					
Faixa 1	0	cm ⁴	I1	80	cm ⁴
Faixa 2	0	cm ⁴	I2	1205	cm ⁴
Faixa 3	746	cm ⁴	I3	4474	cm ⁴
Faixa 4	0	cm ⁴	I4	14055	cm ⁴
Faixa 5	0	cm ⁴	I5	0	cm ⁴
Faixa 6	0	cm ⁴	I6	0	cm ⁴
(EI) _{fi,c}	1504	kNm ²			
Armadura					
fy	500	MPa			
temp	95	°C			
As	19,63	cm ²			
IS	746,32	cm ⁴			
k _{y,θ}	1,0000		N _{fi,pl,Rd,s}	982	kN
k _{E,θ}	1,0000		(EI) _{fi,s}	1530	kNm ²
N _{fi,pl,Rd}	4741	kN	(EI) _{fi,eff}	14939	kNm ²
φ _{p,θ}	1,0		N _{fi,cr}	36860	
φ _{c,θ}	0,8		λ _θ	0,36	
φ _{s,θ}	1,0		χ	0,92	
N _{fi,Rd}	4357	kN			

Observação: φ_{p,θ} = φ_{f,θ} (mesa do perfil parcialmente revestido)

Pilar formado com o Perfil Tubular 273x9,3 com Proteção submetido a 60 minutos de Incêndio

PILAR PREENCHIDO POR CONCRETO									
Resistência a Compressão em Situação de Incêndio									
Utilizando Distribuição de Temperatura obtida pelo Caltemi									
Perfil Metálico									
TC 273x9,3 c/ proteção		Dimensões		d	273	mm	t	9,3	mm
Perfil circular = 1 e perfil quadrado = 2					1				
fy	300	MPa		Iθ		2,0	m		
E	205000	MPa		TRRF		60	minutos		
Área	77,04	cm²		Inércia	6690	cm⁴			
temp	352	°C							
k y,θ	1,0000			N _{fi,pl,Rd,p}		2311	kN		
k E,θ	0,7480			(EI) _{fi,p}		10258	kNm²		
Concreto									
fck	30	MPa							
nº de faixas		4			larg faixa	32	mm		
A1	31,77	cm²		A4	222,38	cm²			
A2	95,31	cm²		A5	0,00	cm²			
A3	158,85	cm²		A6	0,00	cm²			
temp 1	105	°C		temp 2	129	°C			
k1 c,θ	0,9475			k2 c,θ	0,9355				
ε1 cu,θ	3,55	x10 ⁻³		ε2 cu,θ	3,79	x10 ⁻³			
f c,θ	28,43	MPa		f c,θ	28,07	MPa			
E c,sec,θ	8007	MPa		E c,sec,θ	7405	MPa			
temp 3	193	°C		temp 4	260	°C			
k3 c,θ	0,9035			k4 c,θ	0,8700				
ε3 cu,θ	4,43	x10 ⁻³		ε4 cu,θ	5,40	x10 ⁻³			
f c,θ	27,11	MPa		f c,θ	26,10	MPa			
E c,sec,θ	6119	MPa		E c,sec,θ	4833	MPa			
N _{fi,pl,Rd,c}		1369	kN						

Inércia correspondente à armadura					
Faixa 1	0	cm ⁴	I1	80	cm ⁴
Faixa 2	0	cm ⁴	I2	1205	cm ⁴
Faixa 3	746	cm ⁴	I3	4474	cm ⁴
Faixa 4	0	cm ⁴	I4	14055	cm ⁴
Faixa 5	0	cm ⁴	I5	0	cm ⁴
Faixa 6	0	cm ⁴	I6	0	cm ⁴
(EI) _{fi,c}	1049	kNm ²			
Armadura					
fy	500	MPa			
temp	131	°C			
As	19,63	cm ²			
IS	746,32	cm ⁴			
k _{y,θ}	1,0000		N _{fi,pl,Rd,s} 982 kN		
k _{E,θ}	0,9690		(EI) _{fi,s} 1483 kNm ²		
N _{fi,pl,Rd}	4662	kN	(EI) _{fi,eff} 11406 kNm ²		
φ _{p,θ}	0,9		N _{fi,cr} 28143		
φ _{c,θ}	0,8		λ _θ 0,41		
φ _{s,θ}	0,9		χ 0,89		
N _{fi,Rd}	4166	kN			

Observação: φ_{p,θ} = φ_{f,θ} (mesa do perfil parcialmente revestido)

Pilar formado com o Perfil Tubular 273x9,3 com Proteção submetido a 90 minutos de Incêndio

PILAR PREENCHIDO POR CONCRETO									
Resistência a Compressão em Situação de Incêndio									
Utilizando Distribuição de Temperatura obtida pelo Caltemi									
Perfil Metálico									
TC 273x9,3 c/proteção		Dimensões		d	273	mm	t	9,3	mm
Perfil circular = 1 e perfil quadrado = 2					1				
fy	300	MPa		lθ		2,0	m		
E	205000	MPa		TRRF		90	minutos		
Área	77,04	cm²		Inércia		6690	cm⁴		
temp	462	°C							
k y,θ	0,8636			N _{fi,pl,Rd,p}		1996	kN		
k E,θ	0,6380			(EI) _{fi,p}		8750	kNm²		
Concreto									
fck	30	MPa							
nº de faixas		4		larg faixa		32	mm		
A1	31,77	cm²		A4		222,38	cm²		
A2	95,31	cm²		A5		0,00	cm²		
A3	158,85	cm²		A6		0,00	cm²		
temp 1	180	°C		temp 2		209	°C		
k1 c,θ	0,9100			k2 c,θ		0,8955			
ε1 cu,θ	4,30	x10 ⁻³		ε2 cu,θ		4,64	x10 ⁻³		
f c,θ	27,30	MPa		f c,θ		26,87	MPa		
E c,sec,θ	6349	MPa		E c,sec,θ		5796	MPa		
temp 3	285	°C		temp 4		361	°C		
k3 c,θ	0,8575			k4 c,θ		0,7890			
ε3 cu,θ	5,78	x10 ⁻³		ε4 cu,θ		6,92	x10 ⁻³		
f c,θ	25,73	MPa		f c,θ		23,67	MPa		
E c,sec,θ	4455	MPa		E c,sec,θ		3423	MPa		
N _{fi,pl,Rd,c}		1278				kN			

Inércia correspondente à armadura					
Faixa 1	0	cm ⁴	I1	80	cm ⁴
Faixa 2	0	cm ⁴	I2	1205	cm ⁴
Faixa 3	746	cm ⁴	I3	4474	cm ⁴
Faixa 4	0	cm ⁴	I4	14055	cm ⁴
Faixa 5	0	cm ⁴	I5	0	cm ⁴
Faixa 6	0	cm ⁴	I6	0	cm ⁴
(EI) _{fi,c}	755	kNm ²			
Armadura					
fy	500	MPa			
temp	286	°C			
As	19,63	cm ²			
IS	746,32	cm ⁴			
k _{y,θ}	1,0000		N _{fi,pl,Rd,s} 982 kN		
k _{E,θ}	0,8140		(EI) _{fi,s} 1245 kNm ²		
N _{fi,pl,Rd}	4255	kN	(EI) _{fi,eff} 8600 kNm ²		
φ _{p,θ}	0,8		N _{fi,cr} 21221		
φ _{c,θ}	0,8		λ _θ 0,45		
φ _{s,θ}	0,8		χ 0,87		
N _{fi,Rd}	3710	kN			

Observação: φ_{p,θ} = φ_{f,θ} (mesa do perfil parcialmente revestido)

Pilar formado com o Perfil Tubular 273x9,3 com Proteção submetido a 120 minutos de Incêndio

PILAR PREENCHIDO POR CONCRETO									
Resistência a Compressão em Situação de Incêndio Utilizando Distribuição de Temperatura obtida pelo Caltemi									
Perfil Metálico									
TC 273x9,3 c/proteção		Dimensões	d	273	mm	t	9,3	mm	
Perfil circular = 1 e perfil quadrado = 2				1					
f _y	300	MPa		l _θ	2,0	m			
E	205000	MPa		TRRF	120	minutos			
Área	77,04	cm ²		Inércia	6690	cm ⁴			
temp	552	°C							
k _{y,θ}	0,6188			N _{fi,pl,Rd,p}	1430	kN			
k _{E,θ}	0,4492			(EI) _{fi,p}	6161	kNm ²			
Concreto									
f _{ck}	30	MPa							
nº de faixas	4			larg faixa	32	mm			
A1	31,77	cm ²		A4	222,38	cm ²			
A2	95,31	cm ²		A5	0,00	cm ²			
A3	158,85	cm ²		A6	0,00	cm ²			
temp 1	254	°C		temp 2	286	°C			
k1 _{c,θ}	0,8730			k2 _{c,θ}	0,8570				
ε1 _{cu,θ}	5,31	x10 ⁻³		ε2 _{cu,θ}	5,79	x10 ⁻³			
f _{c,θ}	26,19	MPa		f _{c,θ}	25,71	MPa			
E _{c,sec,θ}	4932	MPa		E _{c,sec,θ}	4440	MPa			
temp 3	368	°C		temp 4	447	°C			
k3 _{c,θ}	0,7820			k4 _{c,θ}	0,6795				
ε3 _{cu,θ}	7,02	x10 ⁻³		ε4 _{cu,θ}	8,44	x10 ⁻³			
f _{c,θ}	23,46	MPa		f _{c,θ}	20,39	MPa			
E _{c,sec,θ}	3342	MPa		E _{c,sec,θ}	2415	MPa			
N _{fi,pl,Rd,c}	1154	kN							

Inércia correspondente à armadura					
Faixa 1	0	cm ⁴	I1	80	cm ⁴
Faixa 2	0	cm ⁴	I2	1205	cm ⁴
Faixa 3	746	cm ⁴	I3	4474	cm ⁴
Faixa 4	0	cm ⁴	I4	14055	cm ⁴
Faixa 5	0	cm ⁴	I5	0	cm ⁴
Faixa 6	0	cm ⁴	I6	0	cm ⁴
(EI)_{fi,c} 546 kNm²					
Armadura					
fy	500	MPa			
temp	369	°C			
As	19,63	cm ²			
IS	746,32	cm ⁴			
k _{y,θ}	1,0000				
k _{E,θ}	0,7310				
			N_{fi,pl,Rd,s}	982	kN
			(EI)_{fi,s}	1118	kNm²
N _{fi,pl,Rd}	3566	kN	(EI) _{fi,eff}	7716	kNm ²
φ _{p,θ}	1,0		N _{fi,cr}	19039	
φ _{c,θ}	0,8		λ _θ	0,43	
φ _{s,θ}	1,0		χ	0,88	
N_{fi,Rd} 3137 kN					

Observação: φ_{p,θ} = φ_{f,θ} (mesa do perfil parcialmente revestido)

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

1. **American Institute of Steel Construction (AISC).** 1999. *Load and Resistant Factor Design*, AISC/LRFD, Chicago.
2. **Associação Brasileira de Normas Técnicas (ABNT).** 1986. *Projeto e Execução de Estruturas de Aço de Edifícios*, NBR 8800, Rio de Janeiro.
3. **Associação Brasileira de Normas Técnicas (ABNT).** 1999. *Dimensionamento de Estruturas de Aço de Edifícios em Situação de Incêndio*, NBR 14323, Rio de Janeiro.
4. **Associação Brasileira de Normas Técnicas (ABNT).** 2000. *Exigências de Resistência ao Fogo de Elementos Construtivos de Edificações*, NBR 14432, Rio de Janeiro.
5. **ECCS: 2001. European Convention for Constructional Steelwork. Technical Committee No. 3.** *Model Code on Fire Engineering, No. 111, First. Edition*, Bruxelas.
6. **European Committee for Standardization (CEN).** 1995. *Eurocode 1, Part 2.2: Basis of Design and Actions on Structures Exposed to Fire*, prEN 1991-2-2, Bruxelas.
7. **European Committee for Standardization (CEN).** 1995. *Eurocode 3: Design of Steel Structures, Part 1.2: Structural Fire Design*, prEN 1993-1-2, Bruxelas.

8. **European Committee for Standardization (CEN).** 1992. *Eurocode 4: Design of Composite Steel and Concrete Structures, Part 1.1: General Rules and Rules for Buildings*, prEN 1994-1-1, Bruxelas.
9. **European Committee for Standardization (CEN).** 1994. *Eurocode 4: Design of Composite Steel and Concrete Structures, Part 1.2: General Rules and Rules for Buildings – Supplementary Rules for Structural Fire Design*, prEN 1994-1-2, Bruxelas.
10. **Fakury, R. H.** *Estágio Atual dos Trabalhos de Revisão das Normas Brasileiras NBR 8800 e NBR 14323*, IV Seminário Internacional “O Uso de Estruturas Metálicas na Construção Civil” e I Congresso Internacional da Construção Metálica – I CICOM, Novembro, 2001.
11. **Figueiredo Júnior, F. P.** *Simulação Via Método dos Elementos Finitos da Distribuição da Temperatura em Estruturas Metálicas e Mistas no Caso de Incêndio*. Belo Horizonte. Dissertação de Mestrado. UFMG, 2002.
12. **Figueiredo, L. M. B.** *Projeto e Construção de Pilares Mistos Aço-Concreto*. São Carlos. Dissertação de Mestrado. USP, 1998.
13. **International Organization for Standardization.** 1994. *Fire Resistance Tests – Elements of Buildings Construction*, ISO 834, Genebra.
14. **Lawson, R. M.** *Fire Engineering Design of Steel and Composite Buildings*. Journal of Construction Steel Research, Nº 57, Julho, 2001.
15. **Lawson, R. M.; Newmam G. M.** *Structural Fire to EC3 and EC4, and Comparison with BS 5950*. Technical Report, SCI publication 159, The Steel Construction Institute, UK, 1996.

16. **Lie, T. T.; Irwin, R. J.** *Fire Resistance of Rectangular Steel Columns Filled with Bar-reinforced Concrete*. Journal of Structural Engineering, Vol. 121, N° 5, Maio, 1995.
17. **Lie, T. T.; Kodur, V. K. R.** *Fire Resistance of Steel Columns Filled with Bar-reinforced Concrete*. Journal of Structural Engineering, Vol. 122, N° 1, Janeiro, 1996.
18. **Queiroz, G.; Pimenta, R. J.; Mata, L. A. C.** *Elementos das Estruturas Mistas Aço-concreto*, Belo Horizonte, 2001.
19. **Robinson, J.** *Advances In Fire Engineering*, IV Seminário Internacional “O Uso de Estruturas Metálicas na Construção Civil” e I Congresso Internacional da Construção Metálica – I CICOM, Novembro, 2001.
20. **Wang, Y. C.** *Some Considerations in the Design of Unprotected Concrete-Filled Steel Tubular Columns Under Fire Conditions*. Journal of Construction Steel Research, Vol. 44, N° 3, 1997.
21. **Wang, Y. C.** *The Effects of Structural Continuity on the Fire Resistance of Concrete Filled Columns in Non-sway Frames*. Journal of Construction Steel Research, N° 50, Outubro, 1998.

BIBLIOGRAFIA

1. **American Institute of Steel Construction (AISC).** 1999. *Load and Resistant Factor Design*, AISC/LRFD, Chicago.
2. **Associação Brasileira de Normas Técnicas (ABNT).** 1980. *Componentes Construtivos Estruturais – Determinação de Resistência ao Fogo*, NBR 5628, Rio de Janeiro.
3. **Associação Brasileira de Normas Técnicas (ABNT).** 1984. *Ações e Segurança nas Estruturas*, NBR 8681, Rio de Janeiro.
4. **Associação Brasileira de Normas Técnicas (ABNT).** 1986. *Projeto e Execução de Estruturas de Aço de Edifícios*, NBR 8800, Rio de Janeiro.
5. **Associação Brasileira de Normas Técnicas (ABNT).** 1999. *Dimensionamento de Estruturas de Aço de Edifícios em Situação de Incêndio*, NBR 14323, Rio de Janeiro.
6. **Associação Brasileira de Normas Técnicas (ABNT).** 2000. *Exigências de Resistência ao Fogo de Elementos Construtivos de Edificações*, NBR 14432, Rio de Janeiro.
7. **CEB-FIP Model Code (CEB).** 1982. *Design of Concrete Structures for Fire Resistance*.
8. **Drysdale, D. D.** *Special Issue on Response of Composite Structures to Fire*, Fire Safety Journal, Nº 36, 2001.

9. **ECCS: 1988. European Convention for Constructional Steelwork. Technical Committee No. 3. *Fire Safety of Steel Structures Technical Note – Calculation of the Fire Resistance of Centrally Loaded Composite Steel-Concrete Columns Exposed to the Standard Fire*, No. 55, First. Edition, Bruxelas.**

10. **European Committee for Standardization (CEN). 1995. *Eurocode 1, Part 2.2: Basis of Design and Actions on Structures Exposed to Fire*, prEN 1991-2-2, Bruxelas.**

11. **European Committee for Standardization (CEN). 1995. *Eurocode 2, Design of Concrete Structures - Part 1.2: Structural Fire Design*, prEN 1992-1-2, Bruxelas.**

12. **European Committee for Standardization (CEN). 1995. *Eurocode 3: Design of Steel Structures, Part 1.2: Structural Fire Design*, prEN 1993-1-2, Bruxelas.**

13. **European Committee for Standardization (CEN). 1992. *Eurocode 4: Design of Composite Steel and Concrete Structures, Part 1.1: General Rules and Rules for Buildings*, prEN 1994-1-1, Bruxelas.**

14. **European Committee for Standardization (CEN). 1994. *Eurocode 4: Design of Composite Steel and Concrete Structures, Part 1.2: General Rules and Rules for Buildings – Supplementary Rules for Structural Fire Design*, prEN 1994-1-2, Bruxelas.**

15. **Fakury, R. H. *Dimensionamento de Estruturas Mistas em Situação de Incêndio*. Departamento de Engenharia de Estruturas – Escola de Engenharia da UFMG, Belo Horizonte, 2001.**

16. **Fakury, R. H. *Estágio Atual dos Trabalhos de Revisão das Normas Brasileiras NBR 8800 e NBR 14323*, IV Seminário Internacional “O Uso de Estruturas Metálicas na Construção Civil” e I Congresso Internacional da Construção Metálica – I CICOM, Novembro, 2001.**

17. **Fakury, R. H.; Martins, M. M.; Silva, V. P.** *Temperatura Crítica de Elementos Estruturais de Aço em Situação de Incêndio*, XXIX Jornadas Sudamericanas de Ingeniería Estructural, Punta del Este, Uruguai, 2000.
18. **Figueiredo Júnior, F. P.** *Simulação Via Método dos Elementos Finitos da Distribuição da Temperatura em Estruturas Metálicas e Mistas no Caso de Incêndio*. Belo Horizonte. Dissertação de Mestrado. UFMG, 2002.
19. **Figueiredo, L. M. B.** *Projeto e Construção de Pilares Mistos Aço-Concreto*. São Carlos. Dissertação de Mestrado. USP, 1998.
20. **Incropera, F.P.; Dewitt, D. P.** *Fundamentos de Transferência de Calor e Massa*, Terceira Edição, Editora Guanabara Koogan S. A., Rio de Janeiro, 1992.
21. **International Iron and Steel Institute.** *International Fire Engineering Design for Steel Structures: State of The Art*, Bruxelas, 1993.
22. **International Organization for Standardization.** 1994. *Fire Resistance Tests – Elements of Buildings Construction*, ISO 834, Genebra.
23. **Kodur, V. K. R.; Lie, T. T.** *Fire Resistance of Circular Steel Columns Filled with Fiber-reinforced Concrete*. Journal of Structural Engineering, Vol. 122, N°7, Julho, 1996.
24. **Lawson, R. M.** *Fire Engineering Design of Steel and Composite Buildings*. Journal of Construction Steel Research, N° 57, Julho, 2001.
25. **Lawson, R. M.; Newmam G. M.** *Structural Fire to EC3 and EC4, and Comparison with BS 5950*. Technical Report, SCI publication 159, The Steel Construction Institute, UK, 1996.

26. **Lie, T. T.; Irwin, R. J.** *Fire Resistance of Rectangular Steel Columns Filled with Bar-reinforced Concrete*. Journal of Structural Engineering, Vol. 121, Nº 5, Maio, 1995.
27. **Lie, T. T.; Kodur, V. K. R.** *Fire Resistance of Steel Columns Filled with Bar-reinforced Concrete*. Journal of Structural Engineering, Vol. 122, Nº 1, Janeiro, 1996.
28. **Martins, M. M.** *Dimensionamento de Estruturas Metálicas em Situação de Incêndio*. Belo Horizonte. Dissertação de Mestrado. UFMG, 2000.
29. **Prestes, J. A. S.; Queiroz, G.** *Pilares Mistos Parcialmente Revestidos de Concreto*, IV Seminário Internacional “O Uso de Estruturas Metálicas na Construção Civil” e I Congresso Internacional da Construção Metálica – I CICOM, Novembro, 2001.
30. **Queiroz, G.; Pimenta, R. J.; Mata, L. A. C.** *Elementos das Estruturas Mistas Aço-concreto*, Belo Horizonte, 2001.
31. **Robinson, J.** *Advances In Fire Engineering*, IV Seminário Internacional “O Uso de Estruturas Metálicas na Construção Civil” e I Congresso Internacional da Construção Metálica – I CICOM, Novembro, 2001.
32. **Silva, V. P.** *Estruturas de Aço em Situação de Incêndio*, São Paulo, Zigutare Editora, 2001.
33. **Wang, Y. C.** *A Simple Method for Calculating The Fire Resistance of Concrete-filled CHS Columns*. Journal of Construction Steel Research, Nº 54, Setembro, 1999.
34. **Wang, Y. C.** *Some Considerations in the Design of Unprotected Concrete-Filled Steel Tubular Columns Under Fire Conditions*. Journal of Construction Steel Research, Vol. 44, Nº 3, 1997.

35. **Wang, Y. C.** *The Effects of Structural Continuity on the Fire Resistance of Concrete Filled Columns in Non-sway Frames.* Journal of Construction Steel Research, N° 50, Outubro, 1998.