

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

**PROJETO DE PILARES MISTOS PREENCHIDOS COM  
CONCRETO REFRAATÓRIO DE ALTO DESEMPENHO À  
TEMPERATURA AMBIENTE E EM SITUAÇÃO DE INCÊNDIO**

Dissertação apresentada como requisito parcial  
para a obtenção do grau de Mestre  
em Engenharia de Estruturas  
por  
Rodrigo Eduardo Niquini da Costa

Outubro de 2005

# **Livros Grátis**

<http://www.livrosgratis.com.br>

Milhares de livros grátis para download.

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

**“PROJETO DE PILARES MISTOS PREENCHIDOS COM  
CONCRETO REFRAATÓRIO DE ALTO DESEMPENHO À  
TEMPERATURA AMBIENTE E EM SITUAÇÃO DE INCÊNDIO”**

Rodrigo Eduardo Niquini da Costa

Dissertação apresentada ao Curso de Pós-Graduação 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  
DEES - UFMG (Orientador)

---

Prof. Dr. Ney Amorim Silva  
DEES - UFMG

---

Prof. Dr. José Luiz Rangel Paes  
DEC - UFV

Belo Horizonte, Outubro de 2005

*A Deus e aos meus pais.*

## **AGRADECIMENTOS**

A Deus, por ter me dado todas as condições para a realização deste trabalho.

Ao Prof. Ricardo Hallal Fakury, pela confiança em mim depositada, apoio, dedicação e orientação ao longo de todo este trabalho.

Ao Prof. Gustavo de Souza Veríssimo, pela amizade, apoio, conselhos e incentivo.

Aos meus pais e irmãos, pelo incentivo, apoio e suporte familiar.

Aos amigos José Carlos Lopes Ribeiro, Daniel de Carvalho Vidigal e Marcelo Nacif Rocha pela amizade demonstrada nos momentos difíceis.

A todos professores e funcionários do Departamento de Engenharia de Estruturas da UFMG, pela atenção e disponibilidade sempre que foi necessário. Aos colegas e amigos do mestrado, pelo convívio agradável. E a todos que, direta ou indiretamente, contribuíram para a realização deste trabalho.

À MAGNESITA pelo suporte técnico dado, que foi de grande valia para a elaboração deste trabalho. E à USIMINAS, pelo apoio financeiro sem o qual seria impossível o desenvolvimento do mesmo.

## SUMÁRIO

<b>1. INTRODUÇÃO.....</b>	<b>1</b>
1.1. GENERALIDADES.....	1
1.2. OBJETIVOS .....	3
1.3. ORGANIZAÇÃO DO TEXTO .....	4
<b>2. CONCEITOS BÁSICOS E REVISÃO BIBLIOGRÁFICA .....</b>	<b>6</b>
2.1. CONCEITOS BÁSICOS .....	6
2.2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA .....	8
<b>3. PROPRIEDADES MECÂNICAS E TÉRMICAS DOS MATERIAIS 3</b>	

C. Alongamento.....	25
3.3.2. PROPRIEDADES TÉRMICAS .....	27
A. Calor específico .....	27
B. Condutividade térmica.....	28
<b>4. DIMENSIONAMENTO DOS PILARES MISTOS .....</b>	<b>32</b>
4.1. CONSIDERAÇÕES PRELIMINARES .....	32
4.2. DIMENSIONAMENTO DOS PILARES MISTOS EM TEMPERATURA AMBIENTE.....	33
4.2.1. Hipóteses básicas para o dimensionamento .....	33
4.2.2. Limites de aplicabilidade .....	34
4.2.3. Flambagem local dos elementos de aço .....	34
4.2.4. Resistências da seção transversais de barras comprimidas .....	35
A. Seções tubulares retangulares preenchidas com concreto .....	35
B. Seções tubulares circulares preenchidas com concreto .....	36
4.2.5. Força normal resistente de cálculo .....	37
4.2.6. Esbeltez relativa .....	37
4.2.7. Força normal de flambagem elástica.....	38
4.2.8. Rigidez efetiva .....	38
4.2.9. Efeitos da retração e deformação lenta .....	39
4.3. RESISTÊNCIA DE PILARES SUBMETIDOS À FLEXO-COMPRESSÃO EM TEMPERATURA AMBIENTE.....	40
4.3.1. Generalidades .....	40
4.3.2. Momento fletor resistente de plastificação de cálculo .....	40
4.3.3. Módulos de resistência plásticos .....	41
A. Seção retangular .....	41
B. Seção circular.....	42
4.3.4. Tensões combinadas.....	43
4.4. DIMENSIONAMENTO DOS PILARES MISTOS EM SITUAÇÃO DE INCÊNDIO .....	44
4.4.1. Considerações básicas para o dimensionamento estrutural .....	44
4.4.2. Método tabular .....	45
4.4.3. Método analítico.....	48
A. Força normal resistente de compressão .....	48
B. Força normal de plastificação de cálculo.....	48
C. Índice de esbeltez reduzido.....	49

D. Força normal de flambagem elástica crítica.....	49
E. Rigidez efetiva .....	49
F. Tensões térmicas .....	50
4.5. MOMENTOS FLETORES RESISTENTES DE CÁLCULO.....	51
4.5.1. Generalidades .....	51
4.5.2. Tensões combinadas.....	51
<b>5. CONSIDERAÇÕES SOBRE O PROGRAMA <i>THERSYS</i> .....</b>	<b>53</b>
5.1. CONSIDERAÇÕES PRELIMINARES .....	53
5.2. MÉTODO DOS ELEMENTOS FINITOS APLICADO À TRANSFERÊNCIA DE CALOR.....	57
5.2.1. Mecanismos de transferência de calor .....	57
A. Condução .....	57
B. Convecção.....	61
C. Radiação .....	62
D. Problemas de domínio sólido .....	64
5.2.2. Equações básicas .....	65
5.2.3. Formulação.....	67
5.2.4. Problemas estacionários .....	70
5.2.5. Problemas transientes.....	71
5.3. CARACTERÍSTICAS DO PROGRAMA <i>THERSYS</i> .....	73
5.3.1. Curvas de incêndio .....	73
5.3.2. Propriedades dos materiais.....	75
5.3.3. Tipos de elementos finitos disponíveis .....	75
5.3.4. Condição inicial .....	77
5.3.5. Condição de contorno .....	77
5.3.6. Métodos de solução do sistema de equações lineares.....	77
<b>6. ESTUDO COMPARATIVO ENTRE PILARES MISTOS PREENCHIDOS COM CRAD E COM CONCRETO CONVENCIONAL ....</b>	<b>78</b>
6.1. CONSIDERAÇÕES PRELIMINARES .....	78
6.2. CONDIÇÕES DO PROBLEMA E FERRAMENTAS COMPUTACIONAIS.....	78
6.3. PILARES DE SEÇÃO CIRCULAR.....	81
6.3.1. TC 219,1 × 7,9 .....	81
6.3.2. TC 219,1 × 15,9 .....	84

6.3.3. TC 355,6 × 9,5 .....	90
6.3.4. TC 355,6 × 19,1 .....	94
6.4. PILARES DE SEÇÃO RETANGULAR .....	100
6.4.1. TR 225,0 × 225,0 × 7,9 .....	100
6.4.2. TR 225,0 × 225,0 × 12,7 .....	103
6.4.3. TR 360,0 × 225,0 × 8,4 .....	109
6.4.4. TR 360,0 × 225,0 × 12,7 .....	112
<b>7. MÉTODO TABULAR PARA O DIMENSIONAMENTO DE PILARES PREENCHIDOS COM CRAD .....</b>	<b>119</b>
7.1. CONSIDERAÇÕES PRELIMINARES .....	119
7.2. CONDIÇÕES DO PROBLEMA .....	120
7.3. PERFIS COM RESISTÊNCIA AO ESCOAMENTO DE 300 MPA E 350 MPA PREENCHIDOS COM CONCRETO REFRAATÁRIO DE ALTO DESEMPENHO.....	122
7.3.1. Seção 100,0 × 100,0 × 4,0.....	122
7.3.2. Seção 120,0 × 120,0 × 4,8.....	123
7.3.3. Seção 150,0 × 150,0 × 6,0.....	124
7.3.4. Seção 220,0 × 220,0 × 8,8.....	125
7.3.5. Seção 300,0 × 300,0 × 12,0.....	126
7.3.6. Seção 200,0 × 200,0 × 8,0.....	128
7.3.7. Seção 350,0 × 350,0 × 14,0.....	129
7.3.8. Seção 500,0 × 500,0 × 20,0.....	130
7.3.9. Seção 230,0 × 230,0 × 9,2.....	131
7.3.10. Seção 400,0 × 400,0 × 16,0.....	132
7.4. MÉTODO TABULAR PARA PILARES PREENCHIDOS COM CONCRETO REFRAATÁRIO DE ALTO DESEMPENHO .....	134
<b>8. CONSIDERAÇÕES FINAIS E SUGESTÕES DE TRABALHOS FUTUROS .....</b>	<b>136</b>
8.1. CONSIDERAÇÕES FINAIS .....	136
8.2. SUGESTÕES DE TRABALHOS FUTUROS .....	141
<b>ANEXO A - PROGRAMA PARA DIMENSIONAMENTO DE PILARES MISTOS PREENCHIDOS COM CONCRETO REFRAATÁRIO DE ALTO DESEMPENHO.....</b>	<b>143</b>
<b>REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....</b>	<b>155</b>

## LISTA DE FIGURAS

FIGURA 1.1 - Tipos de pilares mistos .....	2
FIGURA 3.1 - Fatores de redução da resistência ao escoamento e do módulo de elasticidade longitudinal para aços estruturais .....	16
FIGURA 3.2 - Alongamento do aço estrutural laminado em função da temperatura ....	17
FIGURA 3.3 - Calor específico do aço em função da temperatura.....	18
FIGURA 3.4 - Condutividade térmica do aço em função da temperatura .....	19
FIGURA 3.5 - Fatores de redução da resistência característica à compressão e módulo de deformação longitudinal do concreto convencional de densidade normal.....	22
FIGURA 3.6 - Fatores de redução da resistência característica à compressão e módulo de deformação longitudinal do concreto refratário de alto desempenho ...	23
FIGURA 3.7 - Comparação entre os valores de redução da resistência característica à compressão do concreto convencional e do CRAD .....	24
FIGURA 3.8 - Comparação entre os valores de redução do módulo de deformação longitudinal do concreto convencional e do CRAD.....	24
FIGURA 3.9 - Variação do alongamento do concreto convencional de densidade normal com a temperatura.....	27
FIGURA 3.10 - Variação do calor específico do concreto convencional de densidade normal com a temperatura de acordo com o texto-base de revisão da NBR 14323 (2003) .....	28

FIGURA 3.11 - Variação da condutividade térmica do concreto convencional de densidade normal com a temperatura de acordo com o texto-base de revisão da NBR 14323 (2003) .....	29
FIGURA 3.12 - Variação da condutividade térmica do CRAD com a temperatura .....	30
FIGURA 3.13 - Comparação da condutividade térmica do CRAD e do concreto convencional.....	31
FIGURA 4.1 - Seção tubular retangular preenchida com concreto.....	41
FIGURA 4.2 - Seção tubular circular preenchida com concreto.....	43
FIGURA 5.1 - Exemplos de malhas geradas pelo GID para análise dos pilares compostos por perfis tubulares circulares e retangulares preenchidos com concreto .....	54
FIGURA 5.2 - Parte do relatório com os resultados da análise térmica realizada pelo <i>THERSYS</i> para um pilar misto circular preenchido com concreto.....	55
FIGURA 5.3 - Distribuição de temperatura dos pilares mistos compostos por perfis tubulares circulares e retangulares preenchidos com concreto .....	56
FIGURA 5.4 - Fluxo de calor em um elemento tridimensional infinitesimal .....	58
FIGURA 5.5 - Condições de contorno em um problema de domínio sólido .....	66
FIGURA 5.6 - Variação da temperatura no intervalo $\Delta t$ .....	71
FIGURA 6.1 - Distribuição de temperatura na seção transversal do pilar misto .....	79
FIGURA 6.2 - Distribuição da armadura na seção TC 219,1 $\times$ 7,9.....	81
FIGURA 6.3 - Malha de elementos finitos para a seção TC 219,1 $\times$ 7,9.....	81
FIGURA 6.4 - Temperaturas médias (em graus Celsius) para a seção TC 219,1 $\times$ 7,9 preenchida por concreto convencional.....	82
FIGURA 6.5 - Temperaturas médias (em graus Celsius) para a seção TC 219,1 $\times$ 7,9 preenchida por concreto refratário de alto desempenho.....	83
FIGURA 6.6 - Forças normais resistentes de cálculo em função do tempo de resistência ao fogo para o pilar TC 279,1 $\times$ 7,9 .....	84
FIGURA 6.7 - Distribuição da armadura na seção TC 219,1 $\times$ 15,9.....	85
FIGURA 6.8 - Malha de elementos finitos para a seção TC 219,1 $\times$ 15,9.....	85
FIGURA 6.9 - Temperaturas médias (em graus Celsius) para a seção TC 219,1 $\times$ 15,9 preenchida por concreto convencional.....	86

FIGURA 6.10 - Temperaturas médias (em graus Celsius) para a seção TC 219,1 × 15,9 preenchida por concreto refratário de alto desempenho.....	87
FIGURA 6.11 - Forças normais resistentes de cálculo em função do tempo de resistência ao fogo para o pilar TC 279,1 × 15,9 .....	88
FIGURA 6.12 - Resistência à compressão de cálculo para os pilares com diâmetro de 279,1 mm preenchidos com concreto refratário de alto desempenho .....	90
FIGURA 6.13 - Distribuição da armadura na seção TC 355,6 × 9,5.....	90
FIGURA 6.14 - Malha de elementos finitos para a seção TC 355,6 × 9,5.....	91
FIGURA 6.15 - Temperaturas médias (em graus Celsius) para a seção TC 355,6 × 9,5 preenchida por concreto convencional .....	92
FIGURA 6.16 - Temperaturas médias (em graus Celsius) para a seção TC 355,6 × 9,5 preenchida por concreto refratário de alto desempenho.....	93
FIGURA 6.17 - Forças normais resistentes de cálculo em função do tempo de resistência ao fogo para o pilar TC 355,6 × 9,5 .....	94
FIGURA 6.18 - Distribuição da armadura na seção TC 355,6 × 19,1.....	94
FIGURA 6.19 - Malha de elementos finitos para a seção TC 355,6 × 19,1.....	95
FIGURA 6.20 - Temperaturas médias (em graus Celsius) para a seção TC 355,6 × 19,1 preenchida por concreto convencional .....	96
FIGURA 6.21 - Temperaturas médias (em graus Celsius) para a seção TC 355,6 × 19,1 preenchida por concreto refratário de alto desempenho.....	97
FIGURA 6.22 - Forças normais resistentes de cálculo em função do tempo de resistência ao fogo para o pilar TC 355,6 × 19,1 .....	98
FIGURA 6.23 - Resistência à compressão de cálculo para os pilares com diâmetro de 355,6 mm preenchidos com concreto refratário de alto desempenho .....	99
FIGURA 6.24 - Distribuição da armadura na seção TR 225,0 × 225,0 × 7,9 .....	100
FIGURA 6.25 - Malha de elementos finitos para a seção TR 255,0 × 255,0 × 7,9.....	100
FIGURA 6.26 - Temperaturas médias (em graus Celsius) para a seção TR 225,0 × 225,0 × 7,9 preenchida por concreto convencional.....	101
FIGURA 6.27 - Temperaturas médias (em graus Celsius) para a seção TR 225,0 × 225,0 × 7,9 preenchida por concreto refratário de alto desempenho .....	102
FIGURA 6.28 - Forças normais resistentes de cálculo em função do tempo de resistência ao fogo para o pilar TR 225,0 × 225,0 × 7,9 .....	103

FIGURA 6.29 - Distribuição da armadura na seção TR 225,0 × 225,0 × 12,7 .....	103
FIGURA 6.30 - Malha de elementos finitos para a seção TR 255,0 × 255,0 × 12,7....	104
FIGURA 6.31 - Temperaturas médias (em graus Celsius) para a seção TR 225,0 × 225,0 × 12,7 preenchida por concreto convencional.....	105
FIGURA 6.32 - Temperaturas médias (em graus Celsius) para a seção TR 225,0 × 225,0 × 7,9 preenchida por concreto refratário de alto desempenho .....	106
FIGURA 6.33 - Forças normais resistentes de cálculo em função do tempo de resistência ao fogo para o pilar TR 225,0 × 225,0 × 12,7 .....	107
FIGURA 6.34 - Forças normais resistentes de cálculo para os pilares quadrados com lado de 225,0 mm preenchidos por concreto refratário de alto desempenho.....	108
FIGURA 6.35 - Distribuição da armadura na seção TR 360,0 × 225,0 × 8,4 .....	109
FIGURA 6.36 - Malha de elementos finitos para a seção TR 360,0 × 255,0 × 8,4.....	109
FIGURA 6.37 - Temperaturas médias (em graus Celsius) para a seção TR 360,0 × 225,0 × 8,4 preenchida por concreto convencional.....	110
FIGURA 6.38 - Temperaturas médias (em graus Celsius) para a seção TR 360,0 × 225,0 × 8,4 preenchida por concreto refratário de alto desempenho .....	111
FIGURA 6.39 - Forças normais resistentes de cálculo em função do tempo de resistência ao fogo para o pilar TR 360,0 × 225,0 × 8,4 .....	112
FIGURA 6.40 - Distribuição da armadura na seção TR 360,0 × 225,0 × 12,7 .....	112
FIGURA 6.41 - Malha de elementos finitos para a seção TR 360,0 × 255,0 × 12,7....	113
FIGURA 6.42 - Temperaturas médias (em graus Celsius) para a seção TR 360,0 × 225,0 × 12,7 preenchida por concreto convencional.....	114
FIGURA 6.43 - Temperaturas médias (em graus Celsius) para a seção TR 360,0 × 225,0 × 7,9 preenchida por concreto refratário de alto desempenho .....	115
FIGURA 6.44 - Forças normais resistentes de cálculo em função do tempo de resistência ao fogo para o pilar TR 360,0 × 225,0 × 12,7 .....	116
FIGURA 6.45 - Forças normais resistentes de cálculo para os pilares retangulares com lados de 360,0 mm e 225,0 mm preenchidos por concreto refratário de alto desempenho .....	117
FIGURA A.1 - Tela de apresentação do programa .....	145
FIGURA A.2 - Tela principal do programa.....	146

FIGURA A.3 - Menu <i>Arquivo</i> do programa.....	147
FIGURA A.4 - Tela de identificação da obra do programa.....	147
FIGURA A.5 - Tela para edição dos materiais componentes do pilar .....	148
FIGURA A.6 - Tela para edição das propriedades dos tubos retangulares .....	149
FIGURA A.7 - Tela para edição das propriedades dos tubos circulares .....	150
FIGURA A.8 - Tela para edição do carregamento de cálculo do pilar .....	151
FIGURA A.9 - Tela com o resumo dos resultados do programa .....	152
FIGURA A.10 - Tela de apresentação do memorial de cálculo do programa.....	153
FIGURA A.11 - Tela do banco de dados dos aços estruturais disponíveis no programa.....	154

## LISTA DE TABELAS

TABELA 3.1 - Redução da resistência ao escoamento e do módulo de elasticidade do aço estrutural laminado .....	15
TABELA 3.2 - Massa específica do concreto refratário de alto desempenho obtida em laboratório .....	20
TABELA 3.3 - Fatores de redução da resistência característica à compressão e módulo de elasticidade longitudinal do concreto de densidade normal de acordo com o texto-base de revisão da NBR 14323 (2003).....	21
TABELA 3.4 - Fatores de redução da resistência característica à compressão e módulo de elasticidade longitudinal do concreto refratário de alto desempenho obtidos em ensaios de laboratório .....	22
TABELA 3.5 - Condutividade térmica do concreto refratário de alto desempenho .....	30
TABELA 4.1 - Valores limites de $\lambda_{rel}$ para desprezar retração e deformação lenta do concreto .....	40
TABELA 4.2 - Dimensões mínimas da seção transversal, taxas mínimas de armadura e distâncias mínimas entre os eixos das barras da armadura à face do perfil, para perfis tubulares preenchidos com concreto.....	47
TABELA 4.3 - Coeficientes de redução $\varphi_{i,\theta}$ .....	50
TABELA 5.1 - Elementos utilizáveis no programa <i>THERSYS</i> .....	76
TABELA 6.1 - Seções circulares a serem estudadas.....	80
TABELA 6.2 - Seções retangulares a serem estudadas.....	80
TABELA 6.3 - Resistência à compressão de cálculo para o pilar TC 279,1 × 7,9.....	83

TABELA 6.4 - Resistência à compressão de cálculo para o pilar TC 279,1 × 15,9.....	87
TABELA 6.5 - Comparação das temperaturas do núcleo central de concreto dos pilares circulares com diâmetro de 279,1 mm preenchidos com CRAD .....	88
TABELA 6.6 - Resistência à compressão de cálculo para os pilares com diâmetro de 279,1 mm preenchidos com CRAD.....	89
TABELA 6.7 - Resistência à compressão de cálculo para o pilar TC 355,6 × 9,5.....	93
TABELA 6.8 - Resistência à compressão de cálculo para o pilar TC 355,6 × 19,1.....	97
TABELA 6.9 - Comparação das temperaturas do núcleo central de concreto dos pilares circulares com diâmetro de 355,6 mm preenchidos com CRAD .....	98
TABELA 6.10 - Resistência à compressão de cálculo para os pilares com diâmetro de 355,6 mm preenchidos com CRAD.....	99
TABELA 6.11 - Resistência à compressão de cálculo para o pilar TR 225,0 × 225,0 × 7,9.....	102
TABELA 6.12 - Resistência à compressão de cálculo para o pilar TR 225,0 × 225,0 × 12,7.....	106
TABELA 6.13 - Comparação das temperaturas do núcleo central de concreto dos pilares quadrados com lado de 225,0 mm preenchidos com CRAD.....	107
TABELA 6.14 - Resistência à compressão de cálculo para os pilares quadrados com lado de 225,0 mm preenchidos com CRAD .....	108
TABELA 6.15 - Resistência à compressão de cálculo para o pilar TR 360,0 × 225,0 × 8,4.....	111
TABELA 6.16 - Resistência à compressão de cálculo para o pilar TR 360,0 × 225,0 × 12,7.....	115
TABELA 6.17 - Comparação das temperaturas do núcleo central de concreto dos pilares retangulares com lados de 360,0 mm e 225,0 mm preenchidos com CRAD.....	116
TABELA 6.18 - Resistência à compressão de cálculo para os pilares retangulares com lados de 360,0 mm e 225,0 mm preenchidos com CRAD .....	117
TABELA 7.1 - Distribuição de temperatura na seção 100 × 100 × 4,0.....	122
TABELA 7.2 - Resistências à compressão do pilar constituído pela seção 100 × 100 × 4,0.....	123
TABELA 7.3 - Distribuição de temperatura na seção 120 × 120 × 4,8.....	123

TABELA 7.4 - Resistências à compressão do pilar constituído pela seção $120 \times 120 \times 4,8$ .....	124
TABELA 7.5 - Distribuição de temperatura na seção $150 \times 150 \times 6,0$ .....	125
TABELA 7.6 - Resistências à compressão do pilar constituído pela seção $150 \times 150 \times 6,0$ .....	125
TABELA 7.7 - Distribuição de temperatura na seção $220 \times 220 \times 8,8$ .....	126
TABELA 7.8 - Resistências à compressão do pilar constituído pela seção $220 \times 220 \times 8,8$ .....	126
TABELA 7.9 - Distribuição de temperatura na seção $300 \times 300 \times 12,0$ .....	127
TABELA 7.10 - Resistências à compressão do pilar constituído pela seção $300 \times 300 \times 12,0$ .....	127
TABELA 7.11 - Distribuição de temperatura na seção $200 \times 200 \times 8,0$ .....	128
TABELA 7.12 - Resistências à compressão do pilar constituído pela seção $200 \times 200 \times 8,0$ .....	129
TABELA 7.13 - Distribuição de temperatura na seção $350 \times 350 \times 14,0$ .....	129
TABELA 7.14 - Resistências à compressão do pilar constituído pela seção $350 \times 350 \times 14,0$ .....	130
TABELA 7.15 - Distribuição de temperatura na seção $500 \times 500 \times 20,0$ .....	131
TABELA 7.16 - Resistências à compressão do pilar constituído pela seção $500 \times 500 \times 20,0$ .....	131
TABELA 7.17 - Distribuição de temperatura na seção $230 \times 230 \times 9,2$ .....	132
TABELA 7.18 - Resistências à compressão do pilar constituído pela seção $230 \times 230 \times 9,2$ .....	132
TABELA 7.19 - Distribuição de temperatura na seção $400 \times 400 \times 16,0$ .....	133
TABELA 7.20 - Resistências à compressão do pilar constituído pela seção $400 \times 400 \times 16,0$ .....	133
TABELA 7.21 - Dimensões mínimas da seção transversal, taxas mínimas de armadura e distâncias mínimas entre os eixos das barras da armadura à face do perfil, para perfis tubulares com limite de escoamento de 300 MPa ou 350 MPa e preenchidos com concreto refratário de alto desempenho .....	135

## RESUMO

Neste trabalho determina-se a capacidade resistente à compressão axial de pilares mistos formados por um tubo circular ou retangular preenchido com um concreto refratário de alto desempenho (CRAD) em temperatura ambiente e em situação de incêndio, e compara-se com o desempenho de pilares preenchidos por concreto convencional. Também apresenta-se um método tabular para o dimensionamento de pilares mistos constituídos por perfis de aço tubulares preenchidos por CRAD. Este método proposto acompanha a lógica do método tabular preconizado pelo texto-base de revisão da NBR 14323 (2003) que trata do dimensionamento de estruturas mistas de aço e concreto em situação de incêndio. Determina-se a distribuição de temperatura na seção transversal dos pilares mistos estudados com auxílio do programa computacional *THERSYS*, baseado no Método dos Elementos Finitos. Para a determinação da capacidade resistente axial de pilares mistos preenchidos com CRAD foi desenvolvido o programa computacional *PCRAD*, que considera a metodologia apresentada pelo texto-base de revisão da NBR 8800 (2003). Os resultados são pilares com maior capacidade resistente ou pilares com menor seção transversal.

## **ABSTRACT**

In this work the axial compressive strength for composite columns made by circular or rectangular tube filled with high performance refractory concrete (CRAD), under fire condition or under usual condition, is determined and its compressive strength is compared with that composite columns filled with conventional concrete. Also a new method by table to design composite columns filled with CRAD is developed. This new method follows the logical of the method of design by table from the review text of the standard NBR 14323 (2003) that attends the design of composite structures under fire condition. The temperature distribution in the columns is obtained by a software THERSYS, based on the Finite Element Method. The axial strength for composite columns is obtained by a software PCRAD, developed in this work, that attend the method of the review text of the standard NBR 8800 (2003). The results are columns more resistant or columns with smaller cross section.

# 1

## INTRODUÇÃO

### 1.1 - Generalidades

No Brasil, apenas recentemente começaram a serem usados na construção civil pilares mistos constituídos por perfil de aço trabalhando de maneira solidária com partes de concreto. Esses pilares podem ser formados por um perfil I ou H de aço totalmente revestido com concreto ou parcialmente revestido (com concreto entre as mesas do perfil) ou por um tubo redondo ou retangular de aço preenchido com concreto (FIG.1.1). Uma das razões para isso decorre do fato de esse tipo de elemento estrutural ter passado a integrar normas nacionais somente a partir de 1999, com a edição pela ABNT (Associação Brasileira de Normas Técnicas) da NBR 14323 (1999), que contém os procedimentos a serem seguidos no dimensionamento à temperatura ambiente e em situação de incêndio.

No momento encontra-se em fase de discussão na ABNT um texto-base de revisão da norma NBR 8800 (2003), que passará a incorporar toda a parte relacionada ao projeto de estruturas mistas para edifícios à temperatura ambiente, incluindo o dimensionamento de pilares mistos.

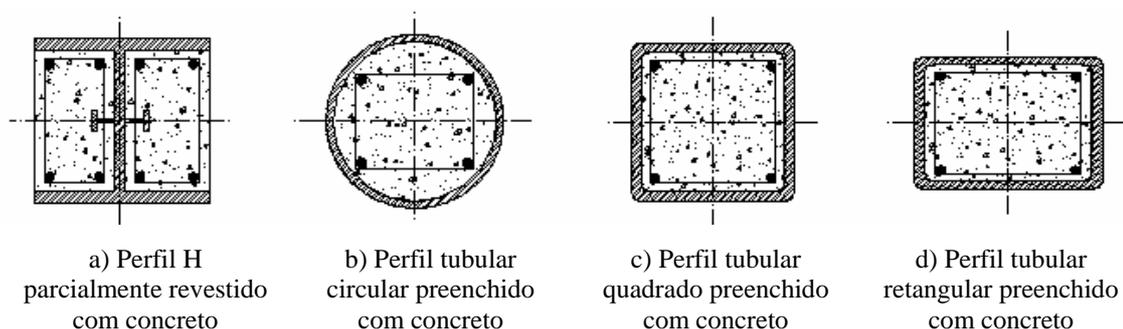


FIGURA 1.1 - Tipos de pilares mistos

Apesar disso, ainda é praticamente desconhecido o comportamento dos pilares mistos quando se usa concreto de alto desempenho, com resistência característica à compressão superior a 50 MPa, à temperatura ambiente e em situação de incêndio. Salienta-se que as normas brasileiras, entre as quais a NBR 15200 (2004), adotam esse valor como um limite superior, além do qual suas prescrições perdem a validade.

Um ponto importante é o fato de os perfis tubulares fornecerem excelentes propriedades estruturais tais como: alta resistência, alta ductilidade e excelente capacidade de absorção de energia. O bom comportamento dos perfis tubulares preenchidos com concreto se deve à ação conjunta do aço e do concreto. O aço atua como armaduras longitudinal e transversal, proporcionando excelentes condições de confinamento ao concreto, além de ser usado como fôrma. E, por outro lado, o núcleo de concreto proporciona maior rigidez ao perfil metálico.

O emprego dos pilares mistos preenchidos com concreto, permite um considerável ganho de tempo de construção e a dispensa do uso de fôrmas.

Procurando melhorar ainda mais o comportamento dos pilares mistos preenchidos com concreto, a empresa Magnesita S.A. desenvolveu nos últimos anos um novo concreto de alto desempenho, que alia alta resistência característica à compressão com propriedades refratárias, tendo assim um comportamento em incêndio superior ao dos concretos de alto desempenho normalmente empregados. Trata-se de um produto à base de cimento, aditivos especiais e agregados minerais refratários com granulometria reduzida em

comparação com os concretos convencionais, tecnicamente competitivo, à temperatura ambiente e que apresenta excelente capacidade de resistência em situação de incêndio.

Com o desenvolvimento deste trabalho, espera-se avaliar se os pilares mistos compostos por perfis tubulares de aço preenchidos com concreto refratário de alto desempenho permitem o emprego de peças com menor área de seção transversal, o que pode contribuir para uma melhor inserção desses elementos na construção de edifícios de múltiplos andares.

## **1.2 - Objetivos**

Este trabalho tem por objetivo principal desenvolver um estudo do comportamento de pilares mistos aço-concreto compostos por perfis tubulares circulares ou retangulares preenchidos com concreto refratário de alto desempenho (CRAD), com resistência característica à compressão de 100 MPa, à temperatura ambiente e em situação de incêndio. Para alcançar esse objetivo principal, se estabelecem alguns objetivos parciais:

- Conhecer o comportamento desse tipo de elemento estrutural à temperatura ambiente e em situação de incêndio, obtendo-se uma solução segura e econômica para pilares de edifícios;
- Verificar a possibilidade de utilização do procedimento do texto-base de revisão da NBR 8800 (2003) para o dimensionamento de pilares mistos com perfis tubulares preenchidos com concreto de alto desempenho à temperatura ambiente, propondo, se necessário, algum ajuste ou adaptação do mesmo;
- Verificar a possibilidade de utilização do procedimento do texto-base de revisão da NBR 14323 (2003) para o dimensionamento de pilares mistos com perfis tubulares preenchidos com concreto de alto desempenho em situação de incêndio, propondo, se necessário, algum ajuste ou adaptação do mesmo;

Neste estudo será utilizado um concreto refratário de alto desempenho específico, com resistência característica à compressão de 100 MPa, fabricado pela IKERA ind. e com.,

controlada pela MAGNESITA S.A., uma empresa especializada em produtos refratários e materiais similares.

### **1.3 - Organização do texto**

No capítulo 2 apresentam-se alguns conceitos básicos sobre o comportamento dos pilares mistos, incluindo as especificidades cabíveis quando se trata de perfis tubulares preenchidos com o concreto refratário de alto desempenho. Nesse capítulo também é apresentada uma revisão bibliográfica abrangendo alguns dos estudos mais recentes e importantes realizados sobre os pilares mistos preenchidos com concreto refratário de alto desempenho.

No capítulo 3 são apresentadas as propriedades mais importantes do concreto refratário de alto desempenho e do aço estrutural para o dimensionamento dos pilares mistos. Apresentam-se as propriedades dos dois materiais tanto à temperatura ambiente quanto em situação de incêndio, tendo em vista o dimensionamento desses pilares em ambas as situações.

No capítulo 4 serão apresentados os procedimentos para o dimensionamento de pilares mistos constituídos por perfis tubulares preenchidos com concreto (de densidade normal e resistência característica à compressão de até 50 MPa) à temperatura ambiente, de acordo com o texto-base de revisão da NBR 8800 (2003), em situação de incêndio, de acordo com o texto-base de revisão da NBR 14323 (2003).

No capítulo 5 apresentam-se alguns aspectos sobre o programa *THERSYS*, desenvolvido por RIBEIRO (2004) na Universidade Federal de Minas Gerais. Trata-se de um programa baseado na plataforma do CALTEMI, desenvolvido por FIGUEIREDO JÚNIOR (2002), e do programa CALTEP, do Centro Integrado de Métodos Numéricos em Engenharia (CIMNE) da Universidade Politécnica da Catalunha, na Espanha. Neste trabalho, utiliza-se o programa *THERSYS* para a realização das análises térmicas necessárias para a realização do dimensionamento dos pilares em situação de incêndio, de acordo com a metodologia apresentada no capítulo 4.

No capítulo 6 é apresentado um estudo comparativo entre pilares preenchidos com concreto refratário de alto desempenho e concreto convencional, onde se avalia a influência dos materiais na resistência à compressão axial do pilares. No capítulo 7 apresenta-se uma metodologia para o dimensionamento simplificado de pilares mistos preenchidos com concreto refratário de alto desempenho, de maneira similar à proposição contida no texto-base de revisão da NBR 14323 (2003).

As conclusões e as sugestões para trabalhos futuros serão apresentadas no capítulo 8.

Finalmente, no Anexo A apresenta-se o programa computacional denominado *Programa para Dimensionamento de Pilares Mistos Preenchidos com Concreto Refratário de Alto Desempenho - PCRAD 1.0*, desenvolvido ao longo deste trabalho. O PCRAD 1.0 realiza o dimensionamento dos pilares mistos preenchidos com concreto (CRAD ou concreto convencional) de acordo com o texto-base de revisão da NBR 8800 (2003) para o dimensionamento em temperatura ambiente, e de acordo com o texto-base de revisão da NBR 14323 (2003) para o dimensionamento em situação de incêndio.

# 2

## CONCEITOS BÁSICOS E REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

### 2.1 - Conceitos básicos

São denominados pilares mistos os elementos estruturais submetidos à compressão pura, flexo-compressão ou flexão oblíqua composta, nos quais um perfil de aço trabalha de maneira solidária do concreto, armado ou não. Assumindo a interação completa entre aço e concreto.

Mesmo quando se considera um pilar puramente comprimido, ele é sujeito a momentos fletores devido a imperfeições iniciais (curvaturas e excentricidades) não previstas.

Os pilares mistos considerados neste estudo são constituídos de perfis tubulares circulares ou retangulares preenchidos com concreto convencional de densidade normal e com concreto refratário de alto desempenho. Em ambos os casos, 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 apresenta uma 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.

O simples preenchimento do perfil tubular com concreto promove um considerável acréscimo em sua resistência em situação de incêndio. Esse tipo de pilar 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 para a radiação e 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.

De uma maneira geral, o colapso de um pilar misto sujeito à compressão se dá por plastificação da seção transversal crítica devido ao efeito combinado da força de compressão e do momento fletor (considerando os efeitos das imperfeições iniciais e efeitos de segunda ordem). Considera-se que seções planas permanecem planas e que ocorre interação completa entre aço e concreto até a plastificação total da seção.

O texto-base de revisão da NBR 14323 (2003) preconiza dois métodos simplificados de dimensionamento de pilares mistos preenchidos com concreto em situação de incêndio: o método tabular e o método simplificado analítico. Também são permitidos dimensionamento através de ensaios e métodos avançados de cálculo.

O método tabular é baseado em resultados de testes e permite obter a resistência do pilar em situação de incêndio em função da carga aplicada e das dimensões da seção transversal. Esse 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, sua utilização requer o conhecimento da distribuição não-uniforme de temperatura na seção

transversal do pilar misto. Para solucionar esse problema, no caso de pilares mistos preenchidos por concreto, devem ser primeiramente implementados procedimentos numéricos para a obtenção da distribuição não-uniforme da temperatura na seção do pilar, e, em seguida, avaliada a capacidade de carga baseada na distribuição não-uniforme de resistência e rigidez do material.

Os métodos avançados, conforme o texto-base de revisão da NBR 14323 (2003), 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.

## **2.2 - Revisão bibliográfica**

Apresenta-se a seguir uma síntese de trabalhos sobre pilares mistos preenchidos com concreto, seja o convencional de densidade normal ou o de alto desempenho, além de outros trabalhos sobre análise térmica de estruturas de aço ou estruturas mistas de aço e concreto, e sobre as propriedades do concreto de alto desempenho, que são de fundamental importância para a realização desta dissertação.

LAHLOU et al. (1992) apresentam um estudo experimental onde investigam o efeito do confinamento em concretos de alto desempenho. Os estudos se limitam a colunas circulares curtas submetidas à compressão axial. Os resultados mostram que: (i) o confinamento do concreto de alto desempenho que preenchem tubos circulares de aço aumenta consideravelmente a resistência dos pilares e isso se estende aos concretos ultra-resistentes; (ii) o confinamento do concreto de alto desempenho em tubos de aço proporciona ductilidade; (iii) a eficiência do confinamento aumenta suavemente com o aumento de resistência dos concretos.

DE NARDIN (1999) apresenta, em sua dissertação de mestrado, um estudo teórico-experimental de pilares mistos compostos por tubos preenchidos com concreto de alta resistência ( $f_{ck} = 50$  MPa). A autora fez uma avaliação da capacidade resistente da seção mista e dos modelos teóricos para seu cálculo, avaliação das parcelas de resistência atribuídas ao perfil tubular e ao concreto do preenchimento, análise do comportamento pós-pico do pilar misto e análise da ductilidade de pilares mistos aço-concreto preenchidos com concretos de alta resistência, submetidos à compressão axial.

ZHAO e SHEN (1999) realizaram um estudo teórico-experimental do comportamento de pórticos de aço sem proteção contra incêndio, submetido a diferentes níveis de carregamento e condições de contorno. Os dados dos ensaios foram comparados com os resultados obtidos por meio do NASFAF, um programa bidimensional com base no Método dos Elementos Finitos. Dentre as principais conclusões, Zhao e Shen observaram que a distribuição de temperatura nos perfis de aço é bastante não-uniforme sob condições reais de incêndio. Observaram também que a velocidade de aquecimento afeta a resistência ao fogo dos componentes estruturais, sendo que quanto mais rápido o aquecimento, maior a temperatura crítica de colapso.

AİTCIN (2000) teve seu livro traduzido para o português e lançado no Brasil. Nesse livro, o concreto de alto desempenho é tratado de uma maneira bastante ampla e, ao mesmo tempo, detalhada. Aİtcin apresenta uma perspectiva histórica sobre esse tipo de concreto, tratando de seus fundamentos e princípios. Também é apresentada uma revisão sobre propriedades importantes de alguns materiais que compõem o concreto de alto desempenho, dentre esses destacando-se: o cimento Portland, os materiais cimentícios complementares e os redutores de água. Discorre sobre a seleção dos materiais. São apresentados métodos de dosagem e preparação de concreto de alto desempenho e sua concretagem, entrega, lançamento, controle e cura. Aİtcin também apresenta as propriedades do concreto fresco. Considerações sobre a durabilidade do concreto de alto desempenho, os concretos de alto desempenho especiais e apresenta materiais ultra-resistentes à base de cimento e as tendências para o futuro.

SILVA e CALMON (2000) desenvolveram um programa de análise térmica baseado no método dos elementos finitos para domínios bidimensionais denominado PFEM\_2D. Esse programa é capaz de determinar campos de temperaturas para diferentes tipos de estruturas e condições de contorno, realizando análises linear e não-linear, no que se refere a propriedades térmicas dos materiais. Esses autores analisaram um perfil VS 600 x 114 por meio do PFEM\_2D e dos procedimentos da NBR 14323 (1999). Concluíram que o procedimento da norma brasileira é relativamente conservador. Silva e Calmon analisaram também um pilar de concreto armado de 50 cm x 50 cm por meio do PFEM\_2D, onde concluíram que após uma hora de exposição ao incêndio, a temperatura praticamente não variou numa faixa de 20 cm do centro do pilar à superfície. Analisaram ainda através do PFEM\_2D um pilar misto constituído de um tubo de aço retangular de seção 305 mm x 305 mm preenchido com concreto armado onde concluíram que as altas temperaturas ocorrem apenas no tubo, ficando o núcleo de concreto com poucas alterações térmicas.

MARTINS (2000) aborda as prescrições da NBR 14323 (1999) para o dimensionamento de elementos estruturais de aço em situação de incêndio, incluindo as características dos incêndios, os conceitos relativos a ações e segurança, obtenção do TRRF através da NBR 14432 (2000), tipos de proteção térmica, procedimentos para a obtenção da elevação da temperatura nos elementos estruturais e os métodos para obtenção das resistências de cálculo. Martins desenvolveu um exemplo completo de dimensionamento em situação de incêndio de um edifício comercial segundo a NBR 14323 (1999). Também foi desenvolvido um programa para dimensionamento de barras em situação de incêndio e a temperatura ambiente.

FAKURY (2001) produziu um trabalho com o objetivo de divulgar e ilustrar o uso da NBR 14323 (1999), apresentando detalhadamente o método simplificado de cálculo para elementos mistos e mostrando aspectos relativos às propriedades do aço e concreto em situação de incêndio. Também são abordados tópicos relativos aos métodos avançados de análise estrutural e térmica para estruturas mistas aço-concreto em situação de incêndio.

QUEIROZ et al. (2001) apresentam informações sobre os materiais utilizados em estruturas mistas, propriedades das seções transversais, ações e análise estrutural. Os autores tratam de conectores de cisalhamento, vigas mistas, lajes mistas, pilares mistos, ligações mistas, sistemas resistentes a cargas horizontais em edifícios, estruturas híbridas e verificação de estruturas mistas em situação de incêndio. O livro considera o dimensionamento proposto pela NBR 8800 (1986), mas também faz referências aos métodos preconizados pelo EUROCODE 4 (1992) e pelo AISC-LRFD (1999).

SILVA (2001) trata das estruturas de aço em situação de incêndio, determinação da temperatura nos elementos estruturais, segurança e comportamento das estruturas em situação de incêndio e o método simplificado de dimensionamento. Silva também aborda os materiais de proteção térmica, os procedimentos de dimensionamento das estruturas em situação de incêndio e fornece alguns conceitos básicos sobre estruturas de concreto armado em situação de incêndio.

FIGUEIREDO JÚNIOR (2002) apresenta a formulação utilizada no desenvolvimento de um programa para análise térmica bidimensional via Método dos Elementos Finitos. Em seu trabalho, Figueiredo apresenta as prescrições da NBR 14323 (1999), do EUROCODE 3 - Part 1.2 (1995) e do EUROCODE 4 - Part 1.2 (1994), comparando com os resultados obtidos pela análise numérica. O programa denominado *CALTEMI*, foi desenvolvido com base no *CALTEP*, criado pelo CIMNE - UPC (1997), e realiza análise térmica não-linear transiente ou estacionária.

MORAIS e MAGALHÃES (2002) desenvolveram um programa com base no Método dos Elementos Finitos para análise termo-mecânica em regime transiente não-linear de estruturas tridimensionais. Com este programa, analisaram um pórtico formado por perfis do tipo VKT300 submetido ao incêndio-padrão ISO 834-1 (1999) e aos carregamentos devido ao peso próprio, neve, vento e sobrecarga. Moraes e Magalhães concluíram sobre a importância de se considerar a influência dos esforços térmicos no cálculo da resistência da estrutura.

HU et al. (2003) analisaram várias seções de pilares constituídos por tubos preenchidos por concreto convencional por meio de análise não-linear pelo Método dos Elementos Finitos, utilizando o programa *ABAQUS*. Fazem também uma comparação dos dados obtidos computacionalmente com dados experimentais de outros autores. As seções transversais são organizadas em três categorias: seção circular, seção quadrada e seção quadrada enrijecida. Hu et al. mostraram que, para seções circulares, os tubos fornecem bom confinamento ao concreto especialmente com pequenas relações diâmetro-espessura ( $D/t < 40$ ). Para seções quadradas o confinamento não é tão bom quanto nas seções circulares, especialmente para grandes relações largura-espessura ( $B/t > 30$ ). O efeito do confinamento nos tubos quadrados enrijecidos é intensificado, especialmente quando o espaçamento dos enrijecedores é menor e o diâmetro dos mesmos é maior.

NÓBREGA (2003) apresenta uma avaliação crítica dos métodos simplificados apresentados pelo EUROCODE 4 - Part 1.2 (1994) quando aplicados aos pilares mistos parcialmente revestidos de concreto ou aos pilares circulares preenchidos por concreto, axialmente comprimidos, utilizando o *CALTEMI*, desenvolvido por FIGUEIREDO JÚNIOR (2002), confirmando a consistência dos resultados obtidos para a resistência de cálculo. Também são apresentados um histórico dos pilares mistos no Brasil e no exterior, e as propriedades do aço e do concreto em situação de incêndio.

RIBEIRO (2004) apresenta a formulação utilizada no desenvolvimento de um programa para análise térmica tridimensional via Método dos Elementos Finitos. Esse trabalho é uma continuação do trabalho desenvolvido por FIGUEIREDO JÚNIOR (2002). No programa *THERSYS* o usuário pode introduzir novas curvas de incêndio e novos materiais, e também estão implementados outros métodos de solução dos sistemas de equações lineares, diminuindo o tempo de processamento. Ribeiro também apresenta as características dos incêndios, as propriedades térmicas de materiais constituintes das estruturas e de proteções térmicas e são feitas considerações sobre os elementos estruturais em situação de incêndio. Também são apresentados os mecanismos de transferência de calor e sua aplicação pelo Método dos Elementos Finitos.

# 3

## PROPRIEDADES MECÂNICAS E TÉRMICAS DOS MATERIAIS

### 3.1 - Considerações preliminares

O concreto de alto desempenho é uma evolução dos concretos convencionais contendo sílica ativa, que atua preenchendo os vazios e como material pozolânico, e superplastificantes, que permitem a obtenção de baixas relações água/material cimentício mantendo uma trabalhabilidade adequada para a utilização em obras.

Quando os superplastificantes começaram a serem utilizados para reduzir a relação água/cimento ou água/aglomerante, descobriu-se que concretos com uma relação água/cimento ou água/aglomerante muito baixa também tinham outras características melhoradas, tais como fluidez mais elevada, módulo de elasticidade mais alto, resistência à flexão maior, menor permeabilidade, resistência à abrasão melhorada e maior durabilidade. Todas essas propriedades são as que caracterizam um concreto de alto desempenho.

Este concreto refratário de alto desempenho é semelhante aos concretos de alto desempenho convencionais, porém é constituído por agregados minerais refratários. Vale lembrar que os outros materiais constituintes, tais como cimento, agregado miúdo, plastificantes e sílica ativa, não apresentam propriedades refratárias.

O concreto refratário de alto desempenho também apresenta todas as características de um concreto de alto desempenho além de possuir um melhor comportamento quando submetido a elevadas temperaturas.

Vale ressaltar que as propriedades dos concretos de alto desempenho são muito específicas, variando para cada concreto de alto desempenho, portanto os valores obtidos para este concreto são válidos somente para o mesmo. Obviamente, os resultados desta pesquisa serão válidos para todos os concretos de alto desempenho, desde que se façam ajustes em função das diferenças existentes entre os concretos de alto desempenho.

A exposição do aço e do concreto a altas temperaturas faz degenerar suas características físicas e químicas, o que causa alterações em suas propriedades.

Neste capítulo será apresentada, de acordo com o texto-base de revisão da NBR 14323 (2003), a variação, em função da temperatura, das propriedades mecânicas e térmicas dos aços estruturais e dos concretos convencionais de densidade normal. Também será apresentada a variação das propriedades mecânicas e térmicas do concreto refratário de alto desempenho, obtidas a partir de ensaios de laboratório realizados na empresa MAGNESITA S.A., em função da temperatura.

## **3.2 - Aço estrutural laminado**

### **3.2.1 - Propriedades mecânicas**

#### **A. Massa específica**

A massa específica do aço estrutural laminado ( $\rho_a$ ) em qualquer temperatura pode ser considerada constante e igual a 7850 kg/m<sup>3</sup>.

### B. Resistência ao escoamento e módulo de elasticidade

A TAB.3.1 apresenta os fatores de redução, com o aumento da temperatura, da resistência ao escoamento ( $\sigma_{\theta}$ ) e do módulo de elasticidade ( $E_{\theta}$ ), relativos aos valores a 20°C.

$$\sigma_{\theta} = \frac{\sigma}{\sigma_{\theta}} \quad (3.1)$$

$$E_{\theta} = \frac{E}{E_{\theta}} \quad (3.2)$$

TABELA 3.1 - Redução da resistência ao escoamento e do módulo de elasticidade do aço estrutural laminado

Temperatura $\theta$ (°C)	Fator de redução para a resistência ao escoamento dos aços laminados ( $\sigma_{\theta}$ )	Fator de redução para o módulo de elasticidade longitudinal dos aços laminados ( $E_{\theta}$ )
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	0,000

**Nota:** Para valores intermediários da temperatura do aço, pode ser feita interpolação linear.

A FIG.3.1 ilustra os valores apresentados na TAB.3.1.

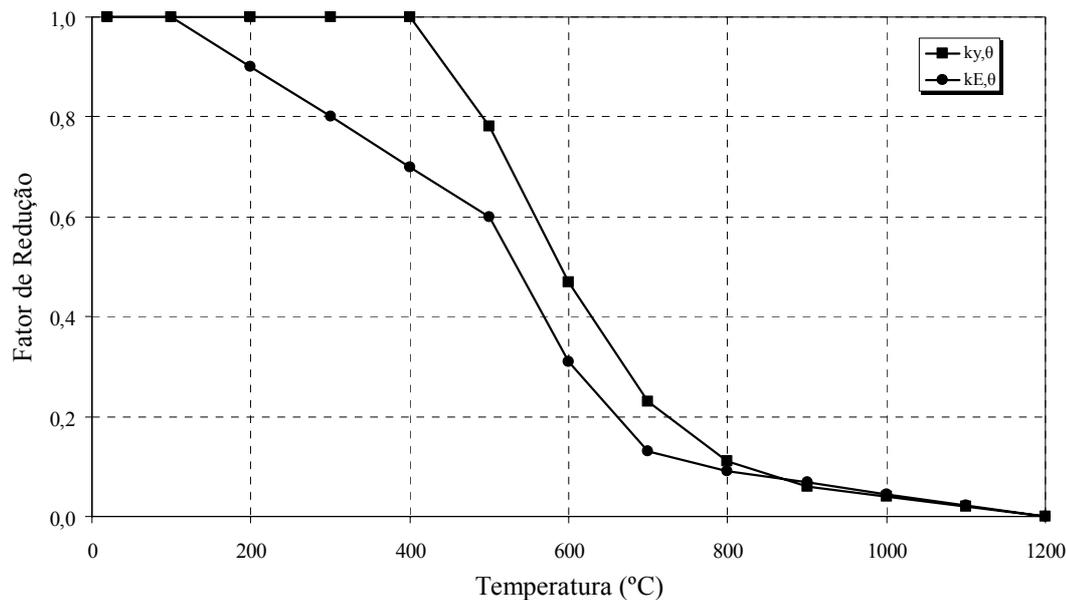


FIGURA 3.1 - Fatores de redução da resistência ao escoamento e do módulo de elasticidade longitudinal para os aços estruturais

### C. Alongamento

O alongamento do aço varia com o aumento da temperatura da seguinte maneira:

- Para  $20^{\circ}\text{C} \leq \theta < 750^{\circ}\text{C}$

$$\frac{\Delta \ell}{\ell} = 1,2 \times 10^{-5} \theta + 0,4 \times 10^{-8} \theta^2 - 2,416 \times 10^{-4} \quad (3.3.a)$$

- Para  $750^{\circ}\text{C} \leq \theta \leq 860^{\circ}\text{C}$

$$\frac{\Delta \ell}{\ell} = 1,1 \times 10^{-2} \quad (3.3.b)$$

- Para  $860^{\circ}\text{C} < \theta \leq 1200^{\circ}\text{C}$

$$\frac{\Delta \ell}{\ell} = 2,0 \times 10^{-5} \theta - 6,2 \times 10^{-3} \quad (3.3.c)$$

Onde:

$\ell$  é o comprimento da peça de aço a  $20^{\circ}\text{C}$ ;

$\Delta \ell$  é a expansão térmica da peça de aço provocada pela temperatura;

Entretanto, o alongamento pode, simplificadaamente, ser tomado com a variação linear e igual a:

$$\frac{\Delta \ell}{\ell} = 14 \times 10^{-6} (\theta - 20) \quad (3.4)$$

A FIG.3.2 ilustra o alongamento do aço estrutural laminado em função da temperatura:

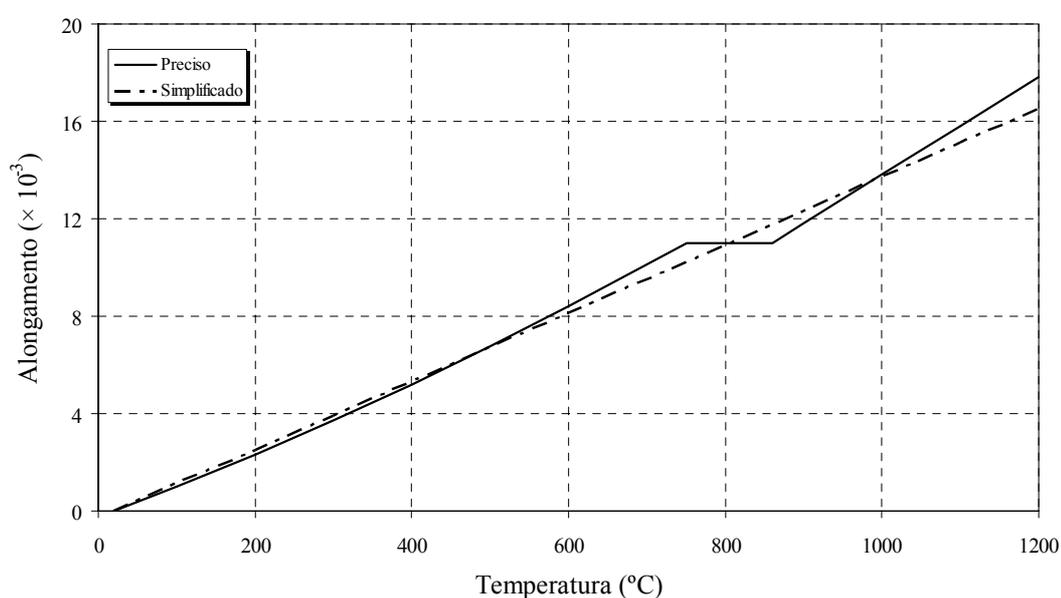


FIGURA 3.2 - Alongamento do aço estrutural laminado em função da temperatura

### 3.2.2 - Propriedades térmicas

#### A. Calor específico

O calor específico do aço ( ), ou seja, a relação entre a quantidade de calor fornecida ao mesmo e a elevação de temperatura correspondente, varia com o aumento da temperatura, sendo determinado da seguinte maneira:

$$\begin{aligned} & - \text{ Para } 20^{\circ}\text{C} \leq \theta < 600^{\circ}\text{C} \\ & \quad = 425 + 0,773 \theta - 1,69 \times 10^{-3} \theta^2 + 2,22 \times 10^{-6} \theta^3 \end{aligned} \quad (3.5.a)$$

- Para  $600^{\circ}\text{C} \leq \theta < 735^{\circ}\text{C}$

$$= 666 + \frac{13002}{738 - \theta} \quad (3.5.b)$$

- Para  $735^{\circ}\text{C} \leq \theta < 900^{\circ}\text{C}$

$$= 545 + \frac{17820}{\theta - 731} \quad (3.5.c)$$

- Para  $900^{\circ}\text{C} \leq \theta < 1200^{\circ}\text{C}$

$$= 650 \text{ J/kg}^{\circ}\text{C} \quad (3.5.d)$$

Entretanto, para efeito prático, em cálculo simplificado, o calor específico pode ser tomado como constante e igual a  $600 \text{ J/kg}^{\circ}\text{C}$ .

A FIG.3.3 ilustra a EQ.3.5 e o valor simplificado do calor específico.

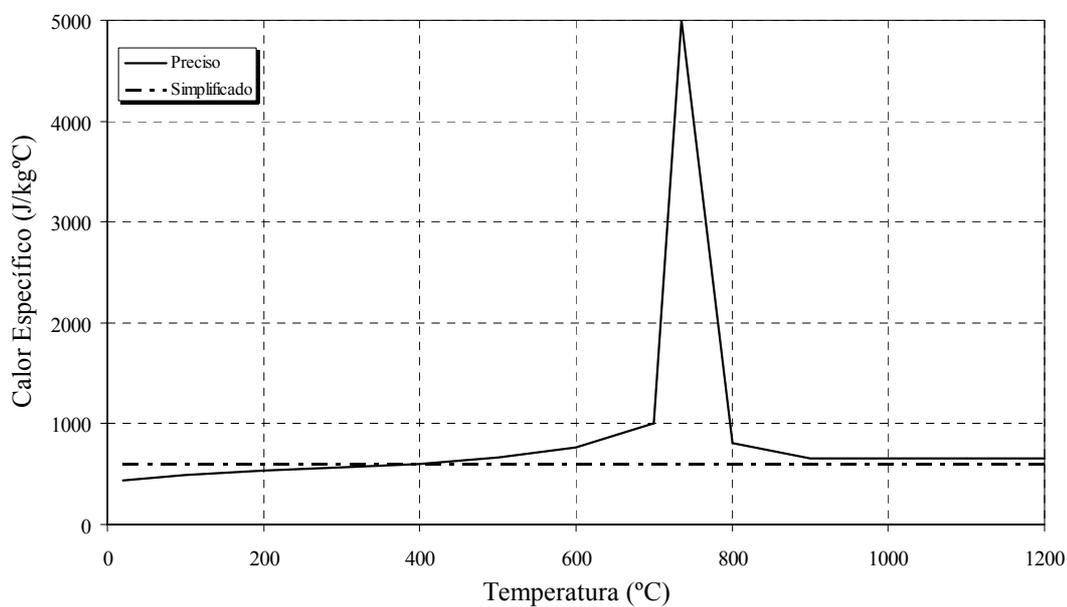


FIGURA 3.3 - Calor específico do aço em função da temperatura

## B. Condutividade térmica

A condutividade térmica do aço ( $\lambda$ ), definida como a capacidade de transmissão de calor de uma face à outra, também varia com o aumento de temperatura, podendo ser calculada a partir de:

- Para  $20^{\circ}\text{C} \leq \theta < 800^{\circ}\text{C}$

$$\lambda = 54 - 3,33 \times 10^{-2} \theta \quad (3.6.a)$$

- Para  $800^{\circ}\text{C} \leq \theta < 1200^{\circ}\text{C}$

$$\lambda = 27,3 \text{ W/m}^{\circ}\text{C} \quad (3.6.b)$$

Entretanto, a condutividade térmica pode ser, simplificada, considerada constante e igual a  $45 \text{ W/m}^{\circ}\text{C}$ .

A FIG.3.4 ilustra a EQ.3.6 e o valor simplificado da condutividade térmica.

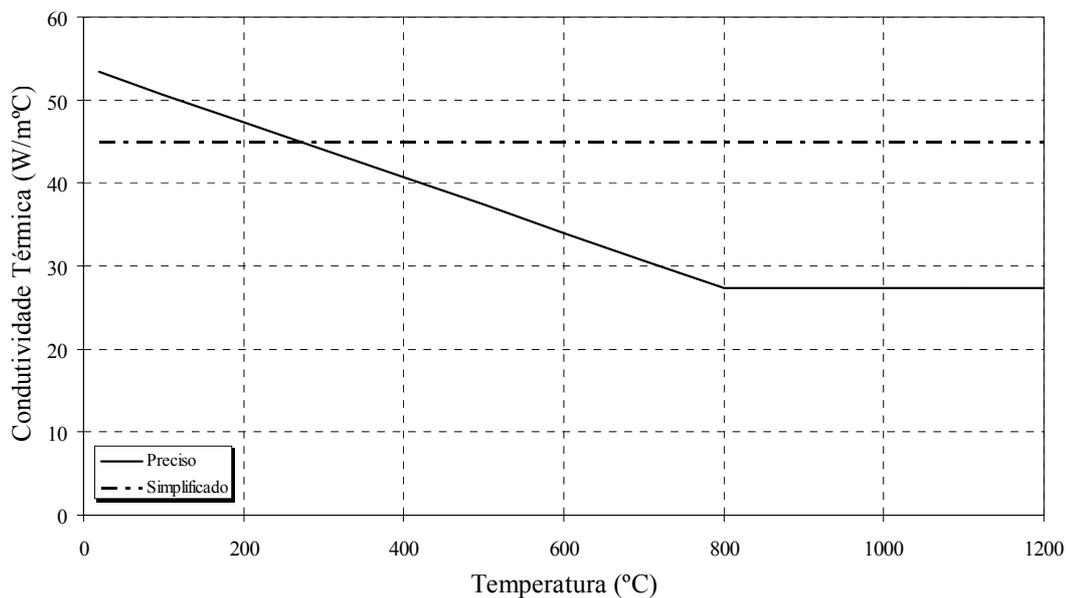


FIGURA 3.4 - Condutividade térmica do aço em função da temperatura

### 3.3 - Concreto convencional e concreto refratário de alto desempenho

#### 3.3.1 - Propriedades mecânicas

##### A. Massa específica

A massa específica do concreto convencional de densidade normal ( $\rho$ ) em qualquer temperatura pode ser considerada constante e igual a 2400 kg/m<sup>3</sup>.

Para a determinação da variação da massa específica do concreto refratário de alto desempenho ( $\rho$ ) foram realizados ensaios de laboratório e os valores obtidos são apresentados na TAB.3.2.

TABELA 3.2 – Massa específica do concreto refratário de alto desempenho obtida em laboratório

Temperatura (°C)	Massa específica (kg/m <sup>3</sup> )
20	2410
200	2300
400	2270
600	2210
800	2180
1000	2140

##### B. Resistência à compressão e módulo de deformação longitudinal

A TAB.3.3 apresenta os valores de redução, com a elevação de temperatura, relativos aos valores a 20°C, da resistência características à compressão ( $f_{c,\theta}$ ) e do módulo de deformação longitudinal ( $E_{c,\theta}$ ) do concreto convencional de densidade normal de resistência característica de até 50 MPa. E também apresenta os valores da deformação correspondente a  $\epsilon_{c,\theta}$ , sendo:

$$f_{c,\theta} = \frac{f_{c,20}}{k_{f,c,\theta}} \quad (3.7)$$

$$E_{c,\theta} = \frac{E_{c,20}}{k_{E,c,\theta}} \quad (3.8)$$

TABELA 3.3 - Fatores de redução da resistência característica à compressão e módulo de elasticidade longitudinal do concreto de densidade normal de acordo com o texto-base de revisão da NBR 14323 (2003)

Temperatura $\theta$ (°C)	Fator de redução da resistência característica à compressão	Fator de redução para o módulo de deformação longitudinal	Deformação correspondente a $\varepsilon_{\theta} \times 10^3$
20	1,000	1,000	2,5
100	0,950	0,940	3,5
200	0,900	0,820	4,5
300	0,850	0,700	6,0
400	0,750	0,580	7,5
500	0,600	0,460	9,5
600	0,450	0,340	12,5
700	0,300	0,220	14,0
800	0,150	0,100	14,5
900	0,080	0,000	15,0
1000	0,040	0,000	15,0
1100	0,010	0,000	15,0
1200	0,000	0,000	15,0

**Nota:** Para valores intermediários da temperatura do concreto, pode ser feita interpolação linear.

Os valores dos fatores de redução da resistência característica à compressão e módulo de deformação longitudinal do concreto convencional de densidade normal, apresentados na TAB.3.3, estão ilustrados na FIG.3.5:

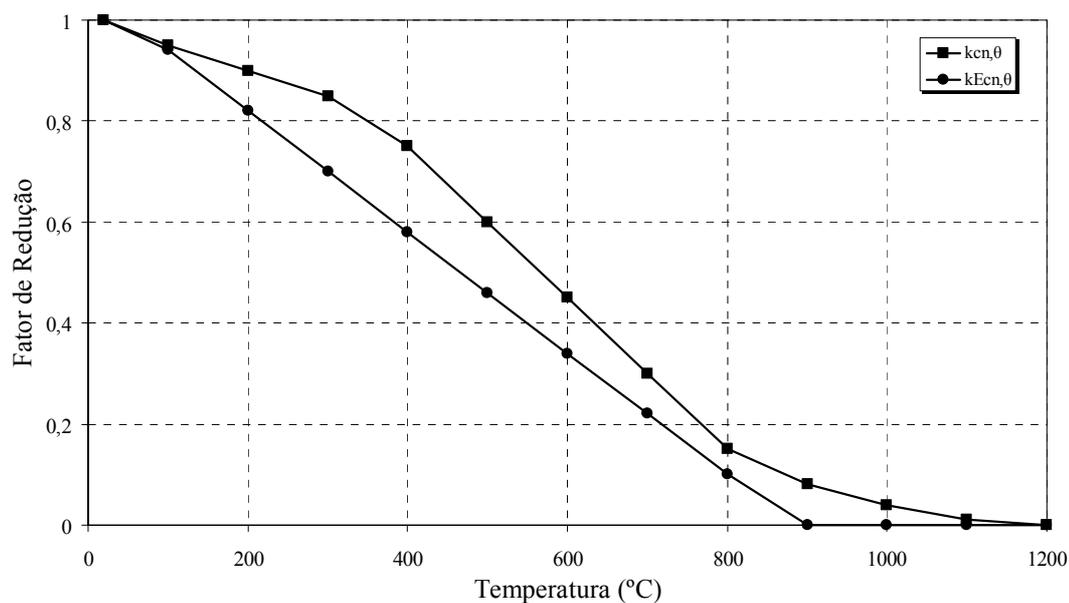


FIGURA 3.5 - Fatores de redução da resistência característica à compressão e módulo de elasticidade longitudinal do concreto convencional de densidade normal

A TAB.3.4 apresenta os valores de redução, com a elevação de temperatura, da resistência características à compressão ( $f_{cd}$ ) e do módulo de deformação longitudinal ( $E_{cd}$ ) do concreto refratário de alto desempenho.

TABELA 3.4 - Fatores de redução da resistência característica à compressão e módulo de deformação longitudinal do concreto refratário de alto desempenho obtidos em ensaios de laboratório

Temperatura (°C)	Fator de redução da resistência característica à compressão $f_{cd}$	Fator de redução do módulo de deformação longitudinal $E_{cd}$
20	1,000	1,000
200	0,825	0,841
400	0,647	0,449
600	0,325	0,123
800	0,197	0,074
1000	0,020	0,032
1200	0,000	0,000

A FIG.3.6 ilustra os valores apresentados na TAB.3.4:

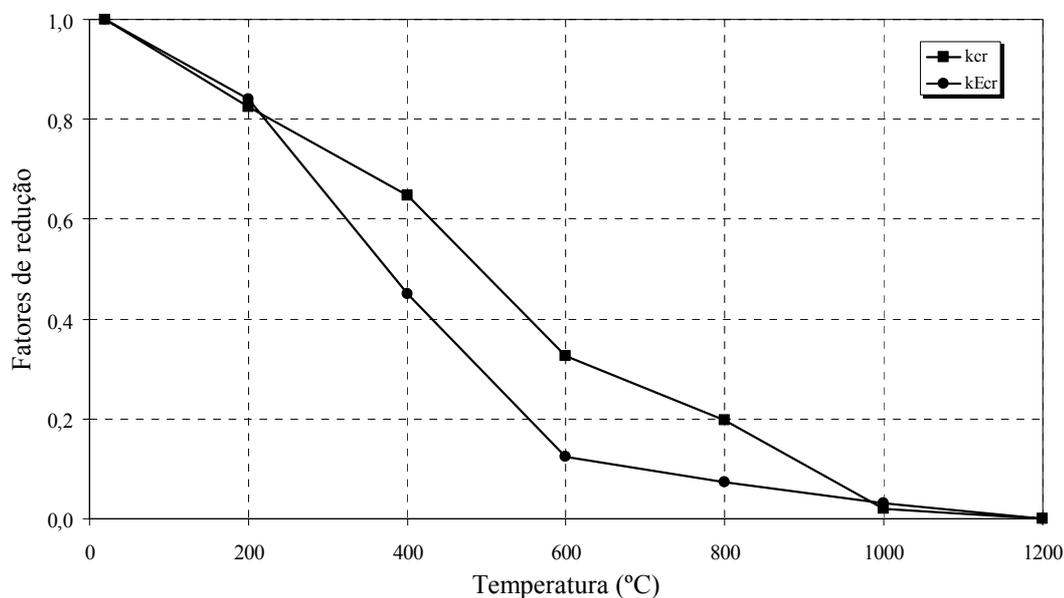
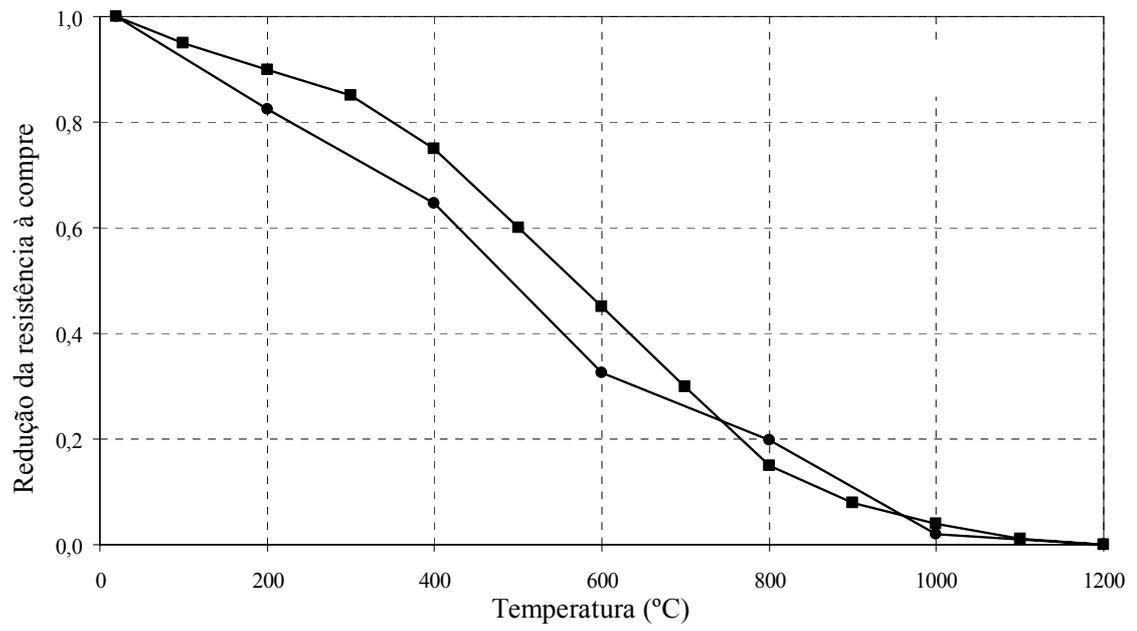


FIGURA 3.6 - Fatores de redução da resistência característica à compressão e módulo de deformação longitudinal do concreto refratário de alto desempenho

A FIG.3.7 ilustra a comparação entre valores de redução da resistência à compressão do concreto convencional e do CRAD, apresentados nas TAB.3.3 e TAB.3.4, respectivamente:

Da mesma forma, a FIG.3.8 ilustra a comparação entre os valores de redução do módulo de deformação longitudinal do concreto convencional e do CRAD, apresentados nas TAB.3.3 e TAB.3.4, respectivamente:



O fato dos valores dos fatores de redução da resistência característica à compressão e do módulo de deformação longitudinal corresponde ao CRAD serem inferiores aos valores correspondentes ao concreto convencional de densidade normal é plausível uma vez que alguns autores afirmam que a resistência ao fogo do concreto de alto desempenho é menor do que a do concreto convencional de densidade normal.

AÏTCIN (2000) diz que, durante um incêndio, a natureza porosa do concreto convencional e a quantidade de água livre que o mesmo contém contribuem para um excelente comportamento do mesmo. O concreto de alto desempenho não é tão poroso quanto o concreto usual. Ele não contém praticamente nenhuma água livre e, quando submetido a um rápido aumento de temperatura, a sua tendência é lascar.

NEVILLE (1997) diz que o concreto de alto desempenho apresenta baixa resistência ao fogo, por que a baixa permeabilidade não permite a saída do vapor formado pela água da pasta de cimento hidratada.

O concreto refratário de alto desempenho apresenta as mesmas características intrínsecas ao concreto de alto desempenho, como a tendência a lascar e a baixa permeabilidade, porém contém agregados minerais refratários em sua constituição. Estes agregados melhoram significativamente as propriedades térmicas do concreto refratário de alto desempenho, mas os outros materiais constituintes não apresentam propriedades refratárias.

Quanto à deformação específica do CRAD correspondente a  $\epsilon_{0,2}$ , por falta de maiores estudos, será considerado que é a mesma do concreto convencional de densidade normal.

### **C. Alongamento**

De acordo com o texto-base de revisão da NBR 14323 (2003), o alongamento do concreto convencional de densidade normal varia com a temperatura da seguinte maneira:

- Para  $20^{\circ}\text{C} \leq \theta < 700^{\circ}\text{C}$

$$\frac{\Delta\ell}{\ell} = 9 \times 10^{-6} \theta + 2,3 \times 10^{-11} \theta^3 - 1,8 \times 10^{-4} \quad (3.9.a)$$

- Para  $700^{\circ}\text{C} \leq \theta \leq 1200^{\circ}\text{C}$

$$\frac{\Delta\ell}{\ell} = 14 \times 10^{-3} \quad (3.9.b)$$

onde:

$\ell$  é o comprimento da peça de de concreto convencional a  $20^{\circ}\text{C}$ ;

$\Delta\ell$  é a expansão térmica da peça de concreto convencional provocada pela temperatura;

$\theta$  é a temperatura do concreto convencional, em graus Celsius.

Entretanto, o alongamento do concreto convencional pode, de forma simplificada, ser tomado com uma variação linear igual a:

$$\frac{\Delta\ell}{\ell} = 18 \times 10^{-6} (\theta - 20) \quad (3.10)$$

A FIG.3.9 ilustra a variação do alongamento do concreto convencional de densidade normal com a temperatura.

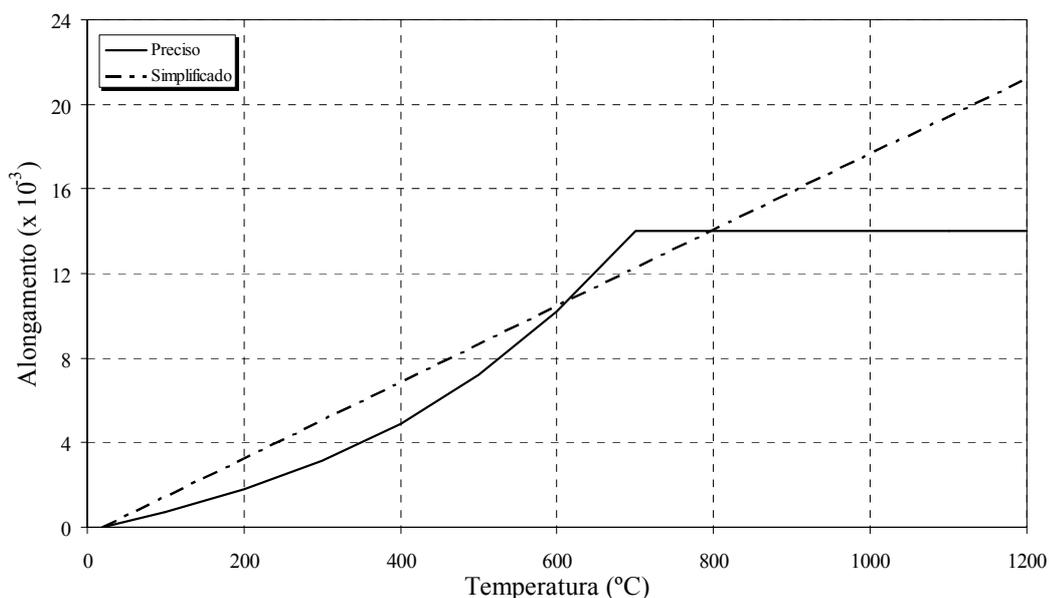


FIGURA 3.9 - Variação do alongamento do concreto convencional de densidade normal com a temperatura

### 3.3.2 - Propriedades térmicas

#### A. Calor específico

De acordo com o texto-base de revisão da NBRE 14323 (2003), o calor específico do concreto convencional de densidade normal ( ), em Joules por quilograma e por grau Celsius ( $J/kg^{\circ}C$ ), varia com o aumento da temperatura e pode ser calculado por:

- Para  $20^{\circ}C \leq \theta \leq 1200^{\circ}C$

$$= 900 + 80 \frac{\theta}{120} - 4 \left( \frac{\theta}{120} \right)^2 \quad (3.11)$$

Entretanto, pode-se, de forma simplificada, tomar o calor específico do concreto convencional de densidade normal em função da temperatura como sendo constante e igual a  $1000 J/kg^{\circ}C$ .

O calor específico do concreto, em função da umidade, pode sofrer um aumento brusco a partir de  $100^{\circ}C$ , atingindo um pico a  $130^{\circ}C$  e voltando rapidamente à curva

a 200°C. Para a umidade de 2% esse pico é de 1875 J/kg°C, para 4% é de 2750 J/kg°C e para 10% é de 5600 J/kg°C.

A FIG.3.10 ilustra a variação do calor específico do concreto convencional em função da temperatura.

O valor obtido no laboratório da MAGNESITA S.A. para o calor específico do concreto refratário de alto desempenho ( ) foi de 1900 J/kg°C, praticamente constante com a temperatura.

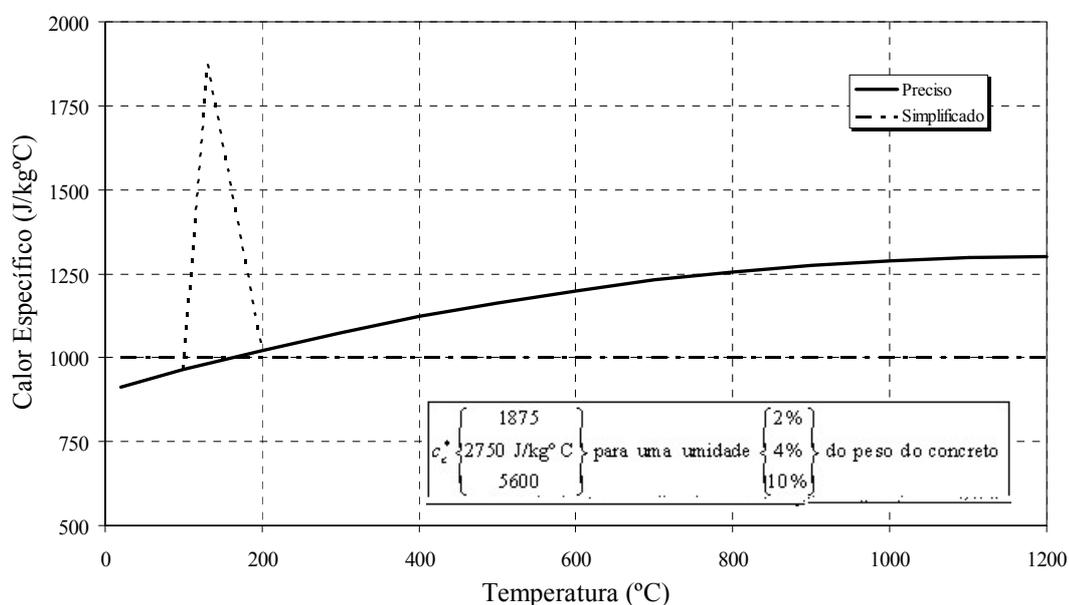


FIGURA 3.10 - Variação do calor específico do concreto convencional de densidade normal com a temperatura de acordo com o texto-base de revisão da NBR14323 (2003)

## B. Condutividade térmica

A condutividade térmica do concreto convencional de densidade normal ( $\lambda$ ), em Watt por metro e por grau Celsius (W/m°C), varia com o aumento de temperatura e pode ser calculado por:

- Para  $20^{\circ}\text{C} \leq \theta \leq 1200^{\circ}\text{C}$

$$\lambda = 2 - 0,24 \frac{\theta}{120} + 0,012 \left( \frac{\theta}{120} \right)^2 \quad (3.12)$$

Entretanto, pode-se, de forma simplificada, tomar a condutividade térmica do concreto convencional de densidade normal em função da temperatura como sendo constante e igual a  $1,6 \text{ W/m}^{\circ}\text{C}$ .

A FIG.3.11 ilustra a variação da condutividade térmica do concreto convencional de densidade normal com a temperatura:

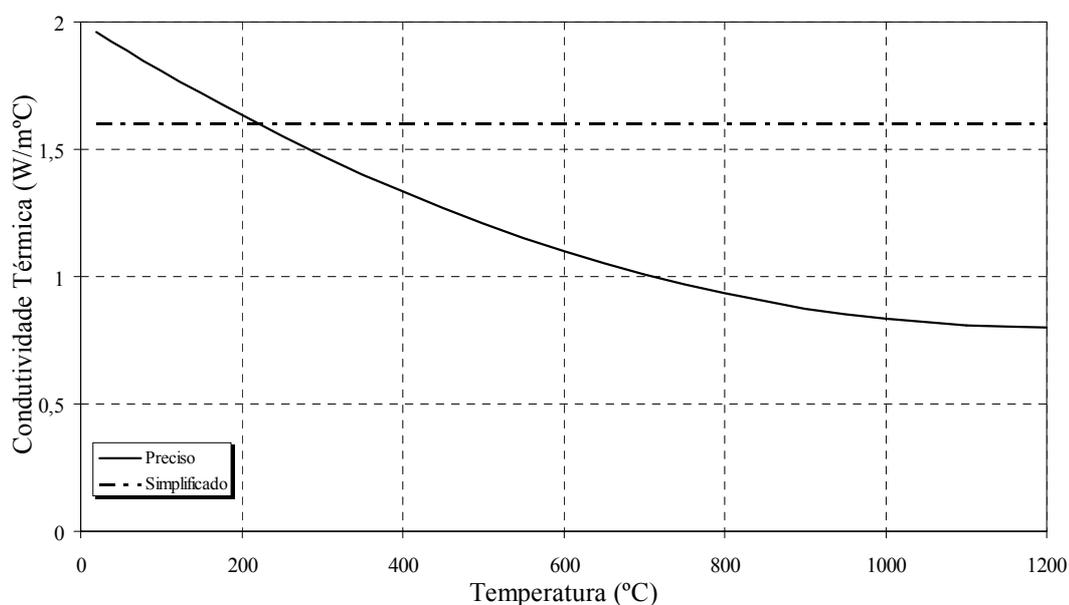


FIGURA 3.11 - Variação da condutividade térmica do concreto convencional de densidade normal com a temperatura de acordo com o texto-base de revisão da NBR14323 (2003)

Os valores obtidos no laboratório da MAGNESITA S.A. para a condutividade térmica do concreto refratário de alto desempenho ( $\lambda$ ) estão apresentados na TAB.3.5.

TABELA 3.5 - Condutividade térmica do concreto refratário de alto desempenho

Temperatura (°C)	Condutividade térmica (W/m°C)
193	2,19
399	1,62
603	1,32
805	1,20
1056	1,18

Para a condutividade térmica do CRAD foi ajustada a equação de regressão, dada a seguir e representada na FIG.3.12:

$$\lambda = 1,46415 \times 10^{-9} \theta^3 + 4,80967 \times 10^{-6} \theta^2 - 5,18755 \times 10^{-3} \theta - 3,02 \quad (3.13)$$

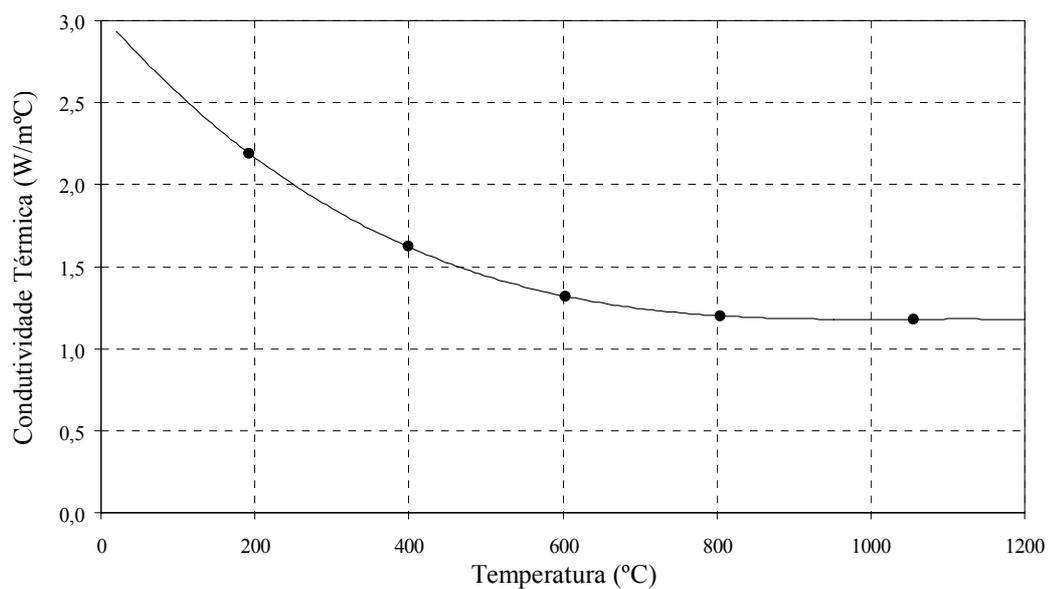


FIGURA 3.12 - Variação da condutividade térmica do CRAD com a temperatura

Fazendo-se a comparação entre os valores de condutividade térmica do CRAD, calculados a partir da equação de regressão, EQ.3.13, e do concreto convencional, tem-se o gráfico da FIG.3.13.

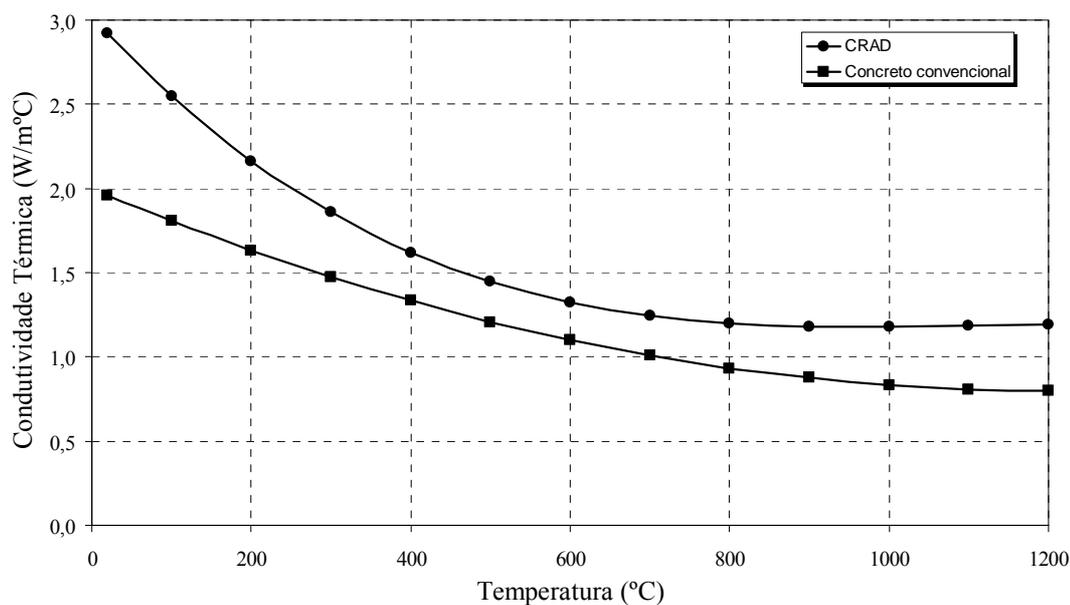


FIGURA 3.13 - Comparação da condutividade térmica do CRAD e do concreto convencional em função da temperatura

Os materiais refratários devem funcionar a temperaturas elevadas e ser capazes de resistir às solicitações químicas, térmicas e mecânicas que neles se desenvolvem, por prazos suficientemente longos. Isso não implica necessariamente que a condutividade térmica seja baixa. Há exemplos de materiais refratários com condutividade térmica próxima à do aço.

No caso específico do CRAD, sua condutividade térmica é superior à do concreto convencional devido à diferença de porosidade entre os materiais. A proximidade maior entre as partículas, no CRAD, faz com que a condução seja maior, aumentando sua condutividade térmica.

O fato de o CRAD ter o valor da condutividade térmica superior à do concreto convencional pode parecer desfavorável, entretanto o valor do seu calor específico é superior, fazendo com que seja necessária uma quantidade maior de energia para o seu aquecimento. Como consequência disto, para uma mesma curva de incêndio, peças com CRAD apresentam valor de temperatura inferior aos das peças de concreto convencional.

# 4

## **DIMENSIONAMENTO DOS PILARES MISTOS**

### **4.1 - Considerações preliminares**

Neste capítulo serão apresentados os procedimentos para dimensionamento de pilares mistos compostos por perfis tubulares circulares e retangulares preenchidos com concreto à temperatura ambiente e em situação de incêndio, de acordo com o texto-base de revisão da NBR 8800 (2003) e o texto-base de revisão da NBR 14323 (2003), respectivamente.

Deve-se salientar que os textos-base de revisão da NBR 8800 (2003) e da NBR 14323 (2003) consideram 50 MPa como limite superior para a resistência característica à compressão do concreto, além do qual suas equações perdem a validade. Como algumas propriedades físicas e mecânicas do concreto refratário de alto desempenho são conhecidas, neste estudo será admitido que tais equações também podem ser utilizadas para concretos com resistência característica superior a 50 MPa.

As normas brasileiras de dimensionamento de estruturas de concreto e de estruturas mistas aço-concreto, a NBR 6118 (2003) e o texto-base de revisão da NBR 8800 (2003), limitam a resistência do concreto em 50 MPa devido à diferença do modo de ruptura e, conseqüentemente, da curva tensão  $\times$  deformação entre o concreto convencional e o concreto de alto desempenho.

Como é pequena a diferença entre os módulos de elasticidade da pasta de cimento endurecida de altíssima resistência e do agregado, o comportamento do concreto de alto desempenho é mais monolítico e é maior a resistência da interface agregado-matriz.

Como é menor a fissuração de aderência e a parte linear da curva tensão-deformação se estende até mais de 85% da tensão de ruptura, ou às vezes até mais do que isso, a ruptura que se segue tem lugar através do agregado graúdo e da matriz. Assim as partículas do agregado não atuam como barreira à fissuração, sendo rápida a ruptura.

Com isso, a parte ascendente da curva tensão-deformação é mais linear e íngreme, e a deformação correspondente à tensão máxima é um pouco maior para concretos de alto desempenho. Como o concreto de alto desempenho exibe uma menor fissuração para uma dada deformação axial, tem-se como resultado um menor incremento de deformação lateral.

## **4.2 - Dimensionamento dos pilares mistos em temperatura ambiente**

Neste item será apresentado o procedimento para dimensionamento de pilares mistos compostos por perfis tubulares circulares e retangulares preenchidos com concreto de acordo com o texto-base de revisão da NBR 8800 (2003).

### **4.2.1 - Hipóteses básicas para o dimensionamento**

O texto-base de revisão da NBR 8800 (2003) trata do dimensionamento de pilares mistos aço concreto através de um método simplificado que tem as seguintes hipóteses básicas:

- Há interação completa entre o concreto e o aço no colapso;
- As imperfeições iniciais são consistentes com aquelas adotadas para a determinação da resistência de barras de aço axialmente comprimidas;
- Não ocorre flambagem local dos elementos de aço da seção transversal.

#### **4.2.2 - Limites de aplicabilidade**

O método simplificado possui os seguintes limites de aplicabilidade:

1. Os pilares mistos devem ter dupla simetria e seção transversal constante;
2. O concreto utilizado deve possuir densidade normal;
3. O fator de contribuição do aço  $\delta$  deve ser superior a 0,2 e inferior a 0,9. Se  $\delta$  for igual ou inferior a 0,2 o pilar deve ser dimensionado de acordo com a NBR 6118 (2003) como pilar de concreto, e, se  $\delta$  for igual ou superior a 0,9, o pilar deve ser dimensionado de acordo com o texto-base de revisão da NBR 8800 (2003), como pilar de aço;
4. A esbelteza relativa  $\lambda$  não pode ser maior do que 2,0;
5. Seções transversais preenchidas com concreto podem ser fabricadas sem qualquer armadura, exceto para algumas condições em situação de incêndio (nesta situação, usar o texto-base de revisão da NBR 14323 (2003));
6. Quando a concretagem for feita com o pilar montado, deve-se comprovar que o pilar puramente metálico resiste às ações aplicadas antes da cura do concreto;
7. O projeto das armaduras deve atender aos requisitos da NBR 6118 (2003).

#### **4.2.3 - Flambagem local dos elementos de aço**

As resistências de todos os materiais devem ser atingidas sem que ocorra a flambagem local dos elementos componentes do perfil de aço da seção transversal. Para evitar a flambagem local, não podem ser ultrapassadas as relações largura/espessura dadas a seguir:

a) para seções tubulares circulares preenchidas com concreto:

$$\frac{t}{D} \leq 0,10 \quad (4.1)$$

b) para seções tubulares retangulares preenchidas com concreto:

$$\frac{t}{b} \leq 1,76 \sqrt{\frac{t}{E}} \quad (4.2)$$

Onde:

$E$  é o módulo de elasticidade do aço;

$f_y$  é a resistência ao escoamento do aço;

$D$  é o diâmetro externo da seção tubular circular;

$b$  é a maior dimensão paralela a um eixo de simetria da seção tubular retangular;

$t$  é a espessura da parede da seção tubular.

É interessante destacar que o ANSI/AISC (2005), tendo em vista estudos recentes considerando a contenção proporcionada pelo concreto à flambagem local, eleva os limites das EQs. 4.1 e 4.2 para  $0,15$  e  $2,26 \sqrt{\frac{t}{E}}$ , respectivamente.

#### 4.2.4 - Resistências das seções transversais de barras axialmente comprimidas

##### A. Seções tubulares retangulares preenchidas com concreto

A força normal resistente de cálculo da seção transversal à plastificação total,  $N_{t, \ell}$ , é definida como sendo a soma das resistências de cálculo de seus componentes:

$$N_{t, \ell} = \frac{A_s}{\gamma} + \frac{\alpha A_c}{\gamma} + \frac{A_{lc}}{\gamma} \quad (4.3)$$

onde:

$A_s$  é a área da seção transversal do perfil de aço;

$A_{lc}$  é a área da seção transversal da armadura longitudinal

é área da seção transversal de concreto;

é a resistência ao escoamento do aço do perfil;

é a resistência ao escoamento do aço da armadura;

é a resistência característica do concreto à compressão;

$\gamma$  é o coeficiente de ponderação da resistência do aço do perfil, igual a 1,10;

$\gamma$  é o coeficiente de ponderação da resistência do aço da armadura, igual a 1,15;

$\gamma$  é o coeficiente de ponderação da resistência do concreto, igual a 1,40;

$\alpha$  é um coeficiente, relacionado ao efeito Rüsçh, igual a 1,0 para seções tubulares retangulares

### B. Seções tubulares circulares preenchidas com concreto

A força normal resistente de cálculo à plastificação total da seção transversal do perfil tubular circular preenchido com concreto, para  $e \leq t/10$  e  $\lambda \leq 0,5$ , é dada por:

$$N_{t,c} = \eta_2 \frac{A_c}{\gamma} + \frac{A_s}{\gamma} \left[ 1 + \eta_1 \left( \frac{e}{t} \right) \right] + \frac{A_{s1}}{\gamma} \quad (4.4)$$

onde:

é a espessura da parede do tubo de aço e

$$\eta_1 = \eta_{10} \left( 1 - 10 \frac{e}{t} \right) \quad (4.5)$$

$$\eta_2 = \eta_{20} + (1 - \eta_{20}) 10 \frac{e}{t} \quad (4.6)$$

$$\eta_{10} = 4,9 - 18,5 \lambda + 17 \lambda^2 \geq 0 \quad (4.7)$$

$$\eta_{20} = 0,25(3 + 2 \lambda) \leq 1,0 \quad (4.8)$$

sendo  $D$  o diâmetro externo da seção tubular circular

é a excentricidade do carregamento igual a:

$$= \frac{M_{\text{max}}}{N} \quad (4.9)$$

$\lambda$  é esbeltez relativa;

$M_{\text{max}}$  é o máximo momento fletor solicitante de cálculo na barra, determinado por meio de análise de primeira ordem;

$N$  é a força normal solicitante de cálculo na barra, considerada como constante ao longo da barra.

O efeito do confinamento só é de fato verificado em condições muito particulares,  $e \leq e_{\text{lim}}/10$  e  $\lambda \leq 0,5$ .

Quando a esbeltez relativa  $\lambda$  exceder 0,5 ou a excentricidade exceder  $e_{\text{lim}}/10$ , deve-se considerar  $\eta_1 = 0$  e  $\eta_2 = 1,0$ .

#### 4.2.5 - Força normal resistente de cálculo

A força normal de cálculo de pilares mistos axialmente comprimidos sujeitos a instabilidade por flexão é dada por:

$$N_{\text{rd}} = \chi \cdot N_{\text{pl,Rd}} \quad (4.10)$$

onde:

$N_{\text{pl,Rd}}$  é a resistência da seção transversal calculada de acordo com o item 4.2.4;

$\chi$  é o fator de redução obtido em função da esbeltez relativa  $\lambda$  e da curva de flambagem, sendo a curva  $\alpha$  para seções tubulares preenchidas com concreto.

#### 4.2.6 - Esbeltez relativa

A esbeltez relativa  $\lambda$  para o plano de flexão considerado é dada por:

$$\lambda = \sqrt{\frac{\gamma_1 \ell}{\gamma_2 \ell}} \quad (4.11)$$

onde:

$\ell$  é o valor de  $\ell$  quando os coeficientes de ponderação da resistência  $\gamma_1$ ,  $\gamma_2$  são tomados iguais a 1,00.

#### 4.2.7 - Força normal de flambagem elástica

A força normal de flambagem elástica ( $N_{cr}$ ), dada por:

$$N_{cr} = \frac{\pi^2 EI}{(\ell)^2} \quad (4.12)$$

onde  $\ell$  é o comprimento de flambagem do pilar.

#### 4.2.8 - Rigidez efetiva

A rigidez efetiva à flexão da seção mista ( $EI_{ef}$ ) é determinada de acordo com (inclusive para análise estrutural):

$$EI_{ef} = EI_{aço} + 0,8 \frac{EI_{armadura}}{1,35} + EI_{concreto} \quad (4.13)$$

onde:

$EI_{aço}$  é o momento de inércia da seção transversal do perfil de aço;

$EI_{armadura}$  é o momento de inércia da seção transversal da armadura do concreto;

$EI_{concreto}$  é o momento de inércia da seção transversal do concreto;

$E_{aço}$  é o módulo de elasticidade do aço estrutural;

$E_{armadura}$  é o módulo de elasticidade do aço da armadura, igual a 205000 MPa;

$E_{concreto}$  é o módulo de deformação longitudinal do concreto.

#### 4.2.9 - Efeitos da retração e de deformação lenta

Os efeitos de retração e de deformação lenta do concreto devem ser levados em conta na rigidez efetiva à flexão da seção transversal, quando:

- A esbeltez relativa  $\lambda$  no plano de flexão (ou de instabilidade) considerado, calculada sem os efeitos da retração e deformação lenta, exceder os limites dados na TAB.4.1 e, adicionalmente;
- $\lambda / \lambda_{lim} < 2$  (notar que esta condição sempre acontece para compressão axial).

onde:

$e$  é a excentricidade do carregamento, definida no item 4.5.2;

$h$  é a altura da seção mista no plano de flexão considerado.

Os efeitos da retração e de deformação lenta do concreto podem ser simulados por uma redução do módulo de deformação longitudinal do concreto, tomando-se no lugar de  $E_c$ , o valor de  $E_{c,ef}$ , dado por:

$$E_{c,ef} = \left[ 1 - 0,5 \left( \frac{N_d}{N_{Rd}} \right) \right] E_c \quad (4.14)$$

onde:

$N_d$  é a força normal solicitante de cálculo;

$N_{Rd}$  é a parcela desta força normal solicitante de cálculo devida à ação permanente e à ação decorrente do uso de caráter quase permanente.

TABELA 4.1: Valores limites de  $\lambda$  para desprezar retração e deformação lenta do concreto

	Estruturas Indeslocáveis	Estruturas Deslocáveis
Seções Tubulares Preenchidas com Concreto <sup>1)</sup>	$\frac{0,8}{(1-\delta)}$	$\frac{0,5}{(1-\delta)}$
1) $\delta$ é o fator de contribuição do aço, dado por:  $\delta = \frac{\gamma}{\gamma + \ell}$		

### 4.3 - Resistência de pilares mistos submetidos à flexo-compressão à temperatura ambiente

#### 4.3.1 - Generalidades

O presente item aplica-se a pilares mistos sujeitos aos efeitos combinados de força normal de compressão e momento fletor em torno de um ou de ambos os eixos de simetria da seção transversal.

As forças cortantes que agem segundo os eixos de simetria da seção mista podem ser assumidas como atuando apenas no perfil de aço.

#### 4.3.2 - Momento fletor resistente de plastificação de cálculo

O momento fletor resistente de plastificação de cálculo,  $M_{pl,Rd}$ , em torno do eixo x ou do eixo y (respectivamente  $M_{pl,Rd,x}$  e  $M_{pl,Rd,y}$ ) de seções mistas duplamente simétricas pode ser calculado por:

$$M_{pl,Rd} = \left( \frac{M_{pl,Rd,steel}}{\gamma} \right) + 0,5 \left( \frac{M_{pl,Rd,concrete}}{\gamma} \right) + \left( \frac{M_{pl,Rd,steel}}{\gamma} \right) \quad (4.15)$$

onde:

$$\gamma = \frac{f_{yk}}{f_{yk}} \quad (4.16)$$

$$= \quad / \gamma \quad (4.17)$$

$$= \alpha \cdot \quad / \gamma \quad (4.18)$$

é o módulo de resistência plástico da seção do perfil de aço;

é o módulo de resistência plástico da seção da armadura do concreto;

é o módulo de resistência plástico da seção de concreto, considerado não fissurado;

, e são módulos de resistência plásticos definidos na subseção 4.3.3.

### 4.3.3 - Módulos de resistência plásticos

#### A. Seção Retangular

Para a seção tubular retangular, considere a FIG.4.1:

$$= \sum_{i=1}^n \quad (4.20)$$

onde  $e_i$  são as distâncias dos eixos das barras da armadura de área  $A_i$  ao eixo de simetria relevante da seção e  $r$  é o raio de curvatura da borda do perfil metálico;

$$= \frac{A_i - (2 - e_i)}{2 + 4(2 - e_i)} \quad (4.21)$$

$$= (e_i - 2)^2 - \quad (4.22)$$

$$= e_i^2 - \quad (4.23)$$

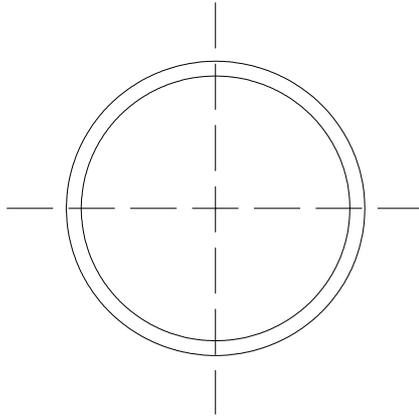
$$= \sum_{i=1}^n \quad (4.24)$$

onde  $A_i$  são as áreas das barras da armadura na região de  $2$  e  $e_i$  são as distâncias dos eixos das barras ao eixo  $x$ .

Devem ser utilizadas as equações relativas ao eixo  $y$ , permutando-se entre si as dimensões  $e$  e  $e_y$ , bem como os índices subscritos  $i$  e  $y$ .

### B. Seção Circular

Podem ser utilizadas as equações relativas às seções tubulares retangulares, com boa aproximação, substituindo-se  $e$  por  $r$ , e por  $(r/2 - e)$ .



i

a

,

0

”

2

,

”

0

ma

onde:

$M_x$  e  $M_y$  são os momentos fletores solicitantes de cálculo, respectivamente em torno dos eixos  $x$  e  $y$  da seção transversal;

$M_{rx}$  e  $M_{ry}$  são os momentos fletores resistentes de cálculo, respectivamente em torno dos eixos  $x$  e  $y$  da seção transversal, determinados de acordo com o item 4.3.2.

## **4.4 - Dimensionamento dos pilares mistos em situação de incêndio**

Neste item será apresentado o procedimento para dimensionamento de pilares mistos compostos por perfis tubulares circulares e retangulares preenchidos com concreto de acordo com o texto-base de revisão da NBR 14323 (2003).

### **4.4.1 - Considerações básicas para o dimensionamento estrutural**

O dimensionamento de uma estrutura em situação de incêndio pode ser feito por meio de resultados de ensaios, ou por meio de métodos analíticos de cálculo. Neste último caso, pode ser usado o método simplificado de dimensionamento ou o método avançado de dimensionamento, ou ainda por uma combinação entre ensaios e métodos analíticos.

O dimensionamento por meio de resultados de ensaios somente pode ser feito se os ensaios tiverem sido realizados em laboratório nacional ou laboratório estrangeiro, de acordo com Norma Brasileira específica ou de acordo com norma ou especificação estrangeira.

Neste trabalho, o dimensionamento será feito por meio de métodos analíticos e, portanto, deve-se levar em conta que as propriedades do aço e do concreto debilitam-se progressivamente com o aumento da temperatura e como consequência, pode ocorrer o colapso de um elemento estrutural.

O método simplificado aplica-se aos elementos que compõem a estrutura individualmente. Os métodos avançados de análise estrutural e térmica são aqueles em

que os princípios da engenharia de incêndio são aplicados de maneira realística a situações específicas.

O esforço resistente de cálculo em situação de incêndio, obtido a partir de qualquer método de dimensionamento, não pode ser tomado com valor superior ao esforço resistente de cálculo à temperatura ambiente, determinado conforme o texto-base de revisão da NBR 8800 (2003).

#### **4.4.2 - Método tabular**

Neste item será considerado o método tabular preconizado pelo texto-base de revisão da NBR 14323 (2003) que consiste do uso de tabelas, dependendo do tipo de seção transversal.

As tabelas são válidas tanto para cargas axiais quanto para cargas excêntricas aplicadas, desde que:

- a estrutura seja contraventada;
- o incêndio seja limitado a somente um andar e neste andar, o pilar esteja submetido à temperatura uniforme ao longo de seu comprimento;
- os pilares possuam um comprimento máximo de 30 vezes a menor dimensão externa da seção transversal.

No cálculo da força normal de compressão resistente de cálculo à temperatura ambiente,  $N_{Rd}$ , o comprimento de flambagem do pilar deve ser tomado igual a 2 vezes o comprimento do pilar em situação de incêndio. Nos pórticos de vários andares, os pilares contínuos podem ser considerados com a rotação perfeitamente impedida abaixo e acima do compartimento incendiado, desde que a resistência ao fogo dos componentes que isolam este compartimento não seja menor que a resistência ao fogo do pilar.

Os pilares mistos constituídos por perfis tubulares de aço preenchidos por concreto são classificados em função do nível de carga  $\eta$ , da taxa de armadura  $\rho$  ( $\rho = \frac{A_s}{A_c}$ ), das

distâncias mínimas entre eixos das barras da armadura à face interna do perfil, e ainda das dimensões externas da seção transversal,  $e$  e  $e_1$ , no caso do perfil de aço retangular, e o diâmetro  $d$  no caso do perfil de aço circular.

O nível de carga é definido como:

$$\eta = \frac{N_d}{N_{Rd}} \quad (4.27)$$

onde:

$N_d$  é a força normal de compressão solicitante de cálculo no pilar em situação de incêndio;

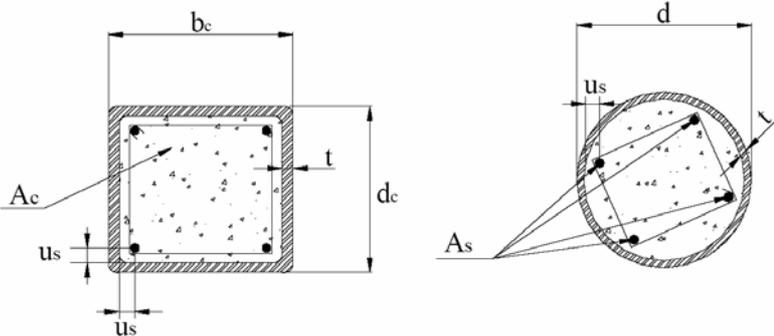
$N_{Rd}$  é a força normal de compressão resistente de cálculo à temperatura ambiente, considerando o comprimento de flambagem conforme exposto acima.

Na determinação de  $N_{Rd}$  e de  $N_d = \eta N_{Rd}$ , ao se usar a TAB.4.2, as seguintes regras se aplicam:

- independentemente das características mecânicas do aço dos perfis tubulares, deve ser considerado para a resistência ao escoamento o valor máximo de 250 MPa;
- a espessura  $t$  da parede do perfil de aço não pode exceder  $1/25$  de  $t_{max}$  ou de  $t_{min}$ , o que for menor e a do perfil tubular,  $1/25$  de  $t_{max}$ ;
- taxas de armaduras maiores que 3% não podem ser levadas em conta;
- o aço da armadura deve ser o CA-50 ou equivalente.

A TAB.4.2 apresenta as dimensões mínimas da seção transversal, taxas mínimas de armadura e distâncias mínimas entre os eixos das barras da armadura à face do perfil, para perfis tubulares preenchidos com concreto.

TABELA 4.2 - Dimensões mínimas da seção transversal, taxas mínimas de armadura e distâncias mínimas entre os eixos das barras da armadura à face do perfil, para perfis tubulares preenchidos com concreto

		Tempo Requerido de Resistência ao Fogo (min)			
Seção de aço: $(t/d) \geq 25$ e $(t/b_c) \geq 25$ ou $(t/d) \geq 25$		30	60	90	120
1	Dimensões mínimas da seção transversal para o nível de carga $\eta \leq 0,3$ .				
1.1	Dimensões mínimas de $b_c$ e $d_c$ ou diâmetro mínimo (mm)	160	200	220	260
1.2	Taxa mínima de armadura $A_s/(b_c + d_c)$ em %	0	1,5	3,0	6,0
1.3	Distância mínima da face ao eixo das barras da armadura $u_s$ (mm)	-	30	40	50
2	Dimensões mínimas da seção transversal para o nível de carga $\eta \leq 0,5$ .				
2.1	Dimensões mínimas de $b_c$ e $d_c$ ou diâmetro mínimo (mm)	260	260	400	450
2.2	Taxa mínima de armadura $A_s/(b_c + d_c)$ em %	0	3,0	6,0	6,0
2.3	Distância mínima da face ao eixo das barras da armadura $u_s$ (mm)	-	30	40	50
3	Dimensões mínimas da seção transversal para o nível de carga $\eta \leq 0,7$ .				
3.1	Dimensões mínimas de $b_c$ e $d_c$ ou diâmetro mínimo (mm)	260	450	550	-
3.2	Taxa mínima de armadura $A_s/(b_c + d_c)$ em %	3,0	6,0	6,0	-
3.3	Distância mínima da face ao eixo das barras da armadura $u_s$ (mm)	25	30	40	-
<b>Nota:</b> É permitida a interpolação linear entre todos os dados da tabela, exceto os dados identificados por "-".					

### 4.4.3 - Método analítico

#### A. Força normal resistente de compressão

A força normal resistente de cálculo dos pilares mistos em situação de incêndio é dada por:

$$= \chi \quad \ell \quad (4.28)$$

onde:

$\chi$  é o fator de redução associado à curva de resistência à compressão do texto-base de revisão da NBR8800 (2003), obtido em função do índice de esbeltez reduzido  $\lambda_{0\theta}$ ;

$\ell$  é a força normal de plastificação de cálculo em situação de incêndio.

#### B. Força normal de plastificação de cálculo

A força normal de plastificação de cálculo dos pilares mistos em situação de incêndio é dada por:

$$, \ell, = \sum ( \quad , \theta \quad , \theta ) + \sum ( \quad , \theta \quad , \theta ) + \sum ( \quad , \theta \quad , \theta ) \quad (4.29)$$

onde:

$\sum ( \quad , \theta \quad , \theta )$  é o somatório dos produtos da área dos elementos componentes do perfil de aço pelo limite de escoamento do aço dos mesmos;

$\sum ( \quad , \theta \quad , \theta )$  é o somatório dos produtos da área das barras da armadura pelo limite de escoamento do aço das mesmas;

$\sum ( \quad , \theta \quad , \theta )$  é o somatório dos produtos dos elementos de área do concreto pela resistência característica à compressão do mesmo.

### C. Índice de esbeltez reduzido

O índice de esbeltez reduzido para o pilar misto em situação de incêndio é dado por:

$$\lambda_{0,\theta} = \sqrt{\frac{N_{pl,Rd}}{N_{cr,\theta}}} \quad (4.30)$$

Onde:

$N_{pl,Rd}$  é a força normal de plastificação de cálculo em situação de incêndio.

$N_{cr,\theta}$  é a carga de flambagem de Euler ou carga elástica crítica em situação de incêndio.

### D. Força normal de flambagem elástica crítica

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

$$N_{cr,\theta} = \frac{\pi^2 (EI_{\theta})}{\ell_{\theta}^2} \quad (4.31)$$

onde:

$\ell_{\theta}$  é o comprimento de flambagem do pilar em situação de incêndio;

$(EI_{\theta})$  é a rigidez efetiva do pilar misto à flexão.

### E. Rigidez efetiva

A rigidez efetiva do pilar misto à flexão é dada por:

$$(EI_{\theta})_{\text{ef}} = \sum (EI_{\theta, \text{aço}}) + \sum (EI_{\theta, \text{armadura}}) + \sum (EI_{\theta, \text{concreto}}) \quad (4.32)$$

onde:

$E$  é o módulo de elasticidade de cada parte da seção transversal em situação de incêndio (o índice  $\theta$  relaciona-se ao perfil de aço, o índice  $\theta$  à armadura e o índice  $\theta$  ao concreto).

é o momento de inércia de cada parte da seção transversal para flexão em torno do eixo de maior ou menor momento de inércia;

$\varphi_{\theta}$  é um coeficiente de redução que depende dos efeitos das tensões térmicas.

Para a parte de concreto,  $\varepsilon_{\theta}$  é o módulo de deformação longitudinal secante deste material à temperatura que o mesmo se encontra, na tensão de compressão  $\sigma_{\theta}$ , dada por:

$$\varphi_{\theta} = \frac{\sigma_{\theta}}{\varepsilon_{\theta}} \quad (4.33)$$

onde  $\sigma_{\theta}$  e  $\varepsilon_{\theta}$  devem ser obtidos de acordo com o item 3.3.1.

#### F. Tensões térmicas

O coeficiente de redução  $\varphi_{\theta}$ , que depende dos efeitos das tensões térmicas, para pilares mistos tubulares preenchidos por concreto, é dado na TAB.4.3:

TABELA 4.3 - Coeficientes de redução  $\varphi_{\theta}$

Tempo requerido de resistência ao fogo (minuto)	Perfil de aço $\varphi_{\theta}$	Concreto $\varphi_{\theta}$	Armadura $\varphi_{\theta}$
30	1,0	0,8	1,0
60	0,9	0,8	0,9
90	0,8	0,8	0,8
120	1,0	0,8	1,0

Chama-se a atenção aqui que, conforme o EUROCODE 4 - Part 1-2 (1994), os coeficientes de tensões térmicas  $\varphi_{\theta}$  somente devem ser aplicados a pilares totalmente revestidos com concreto, com valores distintos, no caso do perfil de aço para a alma e as mesas.

## **4.5 - Momentos fletores resistentes de cálculo em situação de incêndio**

### **4.5.1 - Generalidades**

Os momentos fletores resistentes de cálculo dos pilares mistos em situação de incêndio, para flexão em torno dos eixos de maior inércia,  $M_{x,Ed}$  e  $M_{y,Ed}$ , devem ser determinados pelo mesmo processo usado para a determinação destes momentos à temperatura ambiente, dado no anexo R do texto-base de revisão da NBR8800 (2003), apresentado no item 4.2, tomando a resistência do escoamento do aço do perfil, das barras da armadura longitudinal e a resistência característica  $f_{yk}$  e  $f_{yk}$ .

$N_{Rd}$ ,  $N_{Rd}$  é a força normal resistente de plastificação de cálculo em situação de incêndio, determinada de acordo com o item 4.4.3.B;

$M_{Rd}$  e  $M_{Rd}$  são os momentos fletores solicitantes de cálculo em situação de incêndio, respectivamente em torno dos eixos  $x$  e  $y$  da seção transversal;

$M_{Rd}$ ,  $M_{Rd}$  e  $M_{Rd}$ ,  $M_{Rd}$  são os momentos fletores resistentes de plastificação de cálculo em situação de incêndio, respectivamente em torno dos eixos  $x$  e  $y$  da seção transversal, determinados de acordo com o item 4.5.

# 5

## CONSIDERAÇÕES SOBRE O PROGRAMA THERSYS

### 5.1 - Considerações preliminares

As análises térmicas realizadas neste trabalho utilizaram o programa *THERSYS* (Sistema para simulação via MEF da distribuição tridimensional de temperatura em estruturas em situação de incêndio) desenvolvido e validado por RIBEIRO (2004). O programa é baseado no Método dos Elementos Finitos e realiza análise térmica transiente e não-linear, para elementos bidimensionais e tridimensionais de geometria qualquer.

O *Thersys* foi desenvolvido tendo por base o programa elaborado por FIGUEIREDO Jr. (2002) na Universidade Federal de Minas Gerais, denominado *CALTEMI*, e o programa desenvolvido por ZÁRATE e OÑATE (1993) no Centro Internacional de Métodos Numéricos em Engenharia (CIMNE) da Universidade Politécnica da Catalunha, na Espanha, denominado *CALTEP*.

Para a utilização do *THERSYS*, primeiramente, é necessário gerar a malha de elementos finitos em um pré-processador. Neste trabalho, utilizou-se o programa GID que é um

pré e pós processador para programas de análise estrutural, desenvolvido no CIMNE, na UPC - Espanha..

A FIG.5.1 mostra a malha gerada para os pilares mistos fabricados com perfis tubulares, retangular e circular, preenchidos com concreto.

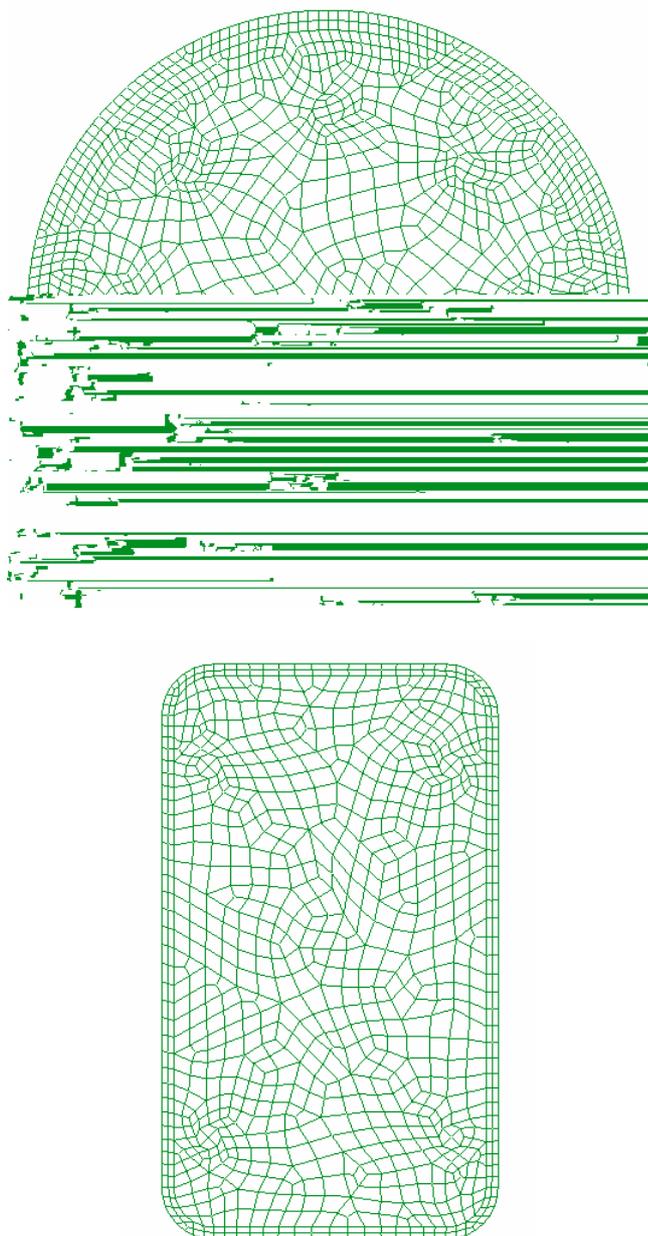


FIGURA 5.1 - Exemplos de malhas geradas pelo GID para análise dos pilares compostos por perfis tubulares circulares e retangulares preenchidos com concreto

Após definir a malha de elementos finitos, são fornecidos ao programa os demais dados, tais como os tipos e as propriedades térmicas dos materiais que compõem o pilar, as condições de contorno do problema, a discretização temporal escolhida, a consideração ou não da não-linearidade física dos materiais e etc. Após o processamento o *THERSYS* gera um relatório com as temperaturas em todos os nós da malha gerada, permitindo o estudo do comportamento do elemento em situação de incêndio (FIG.5.2).

```

DE MINAS GERAIS
ENHARIA
RIA DE ESTRUTURAS

:los Lopes Ribeiro
Hallal Fakury
Barbosa de Las Casas

:cular

rio: 1          Elemento: 3
Elem: 1732      NTemp: 0
:ref: 0         NIncendio: 188
IPGF: 2         DeltaT: 5 s
:cia: 0.0100 °C

o da análise
dados do intervalo de 30 minutos
dados do intervalo de 60 minutos
dados do intervalo de 90 minutos
dados do intervalo de 120 minutos
usão da análise

:7

)      qx (W/m²)   qy (W/m²)   qz (W/m²)
-----
:1      6510.73   -29668.41   0.00
:4      7489.70   -29481.55   0.00
:2      5482.68   -30069.89   0.00
:7      6274.70   -26978.47   0.00
:7      5296.02   -27202.69   0.00
:5      7096.22   -26836.18   0.00

```

```

UNIVERSIDADE FEDERAL
ESCOLA DE ENG
DEPARTAMENTO DE ENGENHA

Copyright 2003@ by: José Car
Orientador: Ricardo
Co-orientador: Estevam

TÍTULO: Pilar Misto Tubular Ci

DADOS:
Problema: 0          Transité
NJoint: 1827        NI
NFluxo: 0           NAr
NPGV: 4             M
Memória: 1.9 MB     Tolerâr

ANÁLISE:
30/06/2004 [14:47:38] - inici
30/06/2004 [14:48:45] - resul
30/06/2004 [14:49:56] - resul
30/06/2004 [14:51:00] - resul
30/06/2004 [14:52:05] - resul
30/06/2004 [14:52:05] - concl

Tempo total de análise: 00:04:2

RESULTADOS:

Tempo (min)   Nó   Temper (°C)
-----
30.0          1    600.396
              2    600.468
              3    600.330
              4    595.875
              5    595.787
              6    595.963

```

FIGURA 5.2 - Parte do relatório com os resultados da análise térmica realizada pelo *THERSYS* para um pilar misto circular preenchido com concreto

Outra forma de se avaliar os resultados é através do próprio GID, que nesta situação, será utilizado como pós-processador. O GID fornece a distribuição de temperatura no elemento analisado também por meio de uma escala de cores (FIG.5.3).

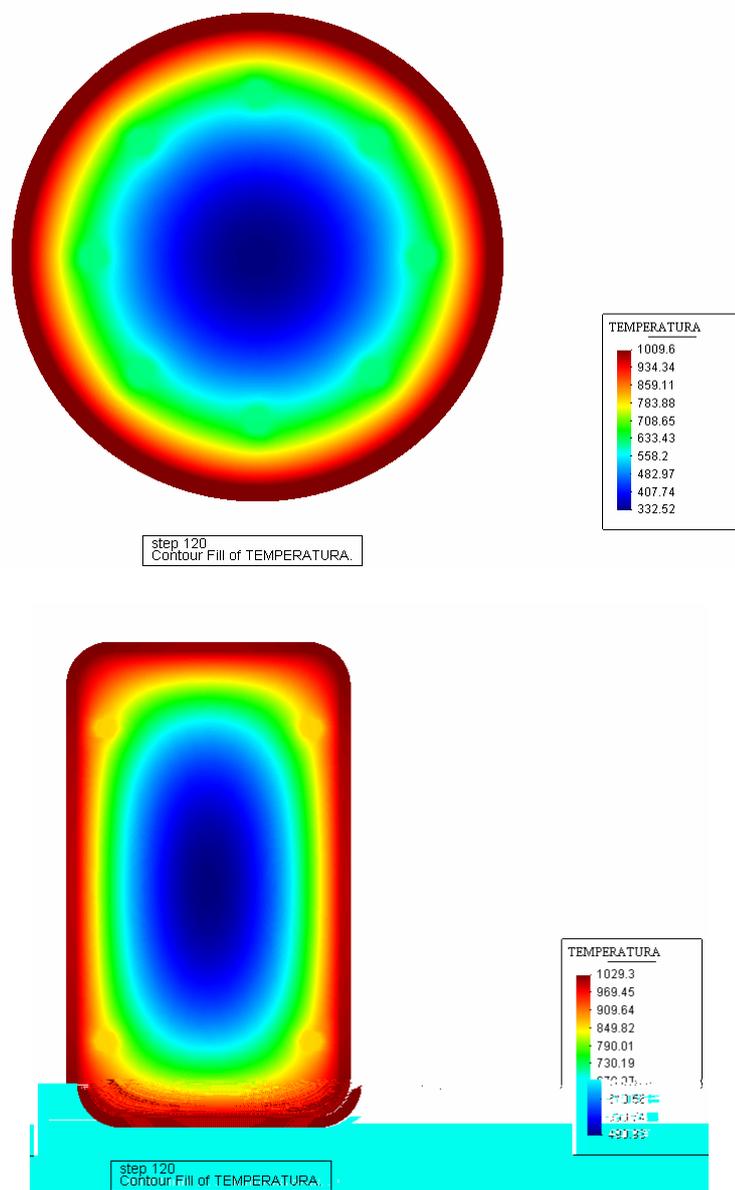


FIGURA 5.3 - Distribuição de temperatura dos pilares mistos compostos por perfis tubulares circulares e retangulares preenchidos com concreto

A seguir serão apresentados aspectos relevantes sobre o *THERSYS* e a teoria utilizada para o seu desenvolvimento, conforme RIBEIRO (2004).

## 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

A condução é um processo pelo qual o calor é transmitido de uma região de elevada temperatura para outra de temperatura mais baixa dentro de um meio (sólido, líquido ou gasoso), ou entre meios diferentes em contato físico direto.

A lei fundamental que rege a transmissão de calor por condução foi proposta por J. B. Fourier em 1822. Segundo esta lei, a quantidade de calor que atravessa uma área  $A$ , normal à direção do fluxo calorífico, na unidade de tempo, é proporcional ao produto da área pelo gradiente térmico:

$$Q = -\lambda A \frac{d\theta}{dn} \quad (5.1)$$

onde:  $Q$  - a quantidade de calor que atravessa a área  $A$  segundo a sua normal  $n$ ;

$\lambda$  - constante de proporcionalidade, denominada *condutibilidade* ou *condutividade térmica do material*;

$A$  - área da seção transversal através da qual o calor flui por condução, medida perpendicularmente à direção do fluxo;

$\frac{d\theta}{dn}$  - gradiente de temperatura na seção, isto é, a razão da variação da temperatura  $\theta$  com a distância, na direção  $n$  do fluxo.

O sinal negativo na expressão na EQ. 5.1 serve para assegurar que o fluxo de calor ocorre em sentido contrário ao gradiente de temperatura. A quantidade de calor por unidade de área e por unidade de tempo é chamada de fluxo de calor, sendo dada por:

$$q = \frac{Q}{A} = -\lambda \frac{d\theta}{dn} \quad (5.2)$$

Essa é a expressão matemática para o princípio básico da condução de calor unidimensional em regime permanente.

Para a determinação das equações básicas que governam a condução de calor em um sólido, considerou-se um elemento tridimensional infinitesimal em um domínio  $\Omega$ , conforme a FIG.5.4. Foram consideradas também as hipóteses de isotropia, meio contínuo, homogeneidade térmica, isto é, as propriedades térmicas são independentes do ponto considerado, e permanência térmica, ou seja, a condutividade térmica e o calor específico são variáveis com a temperatura.

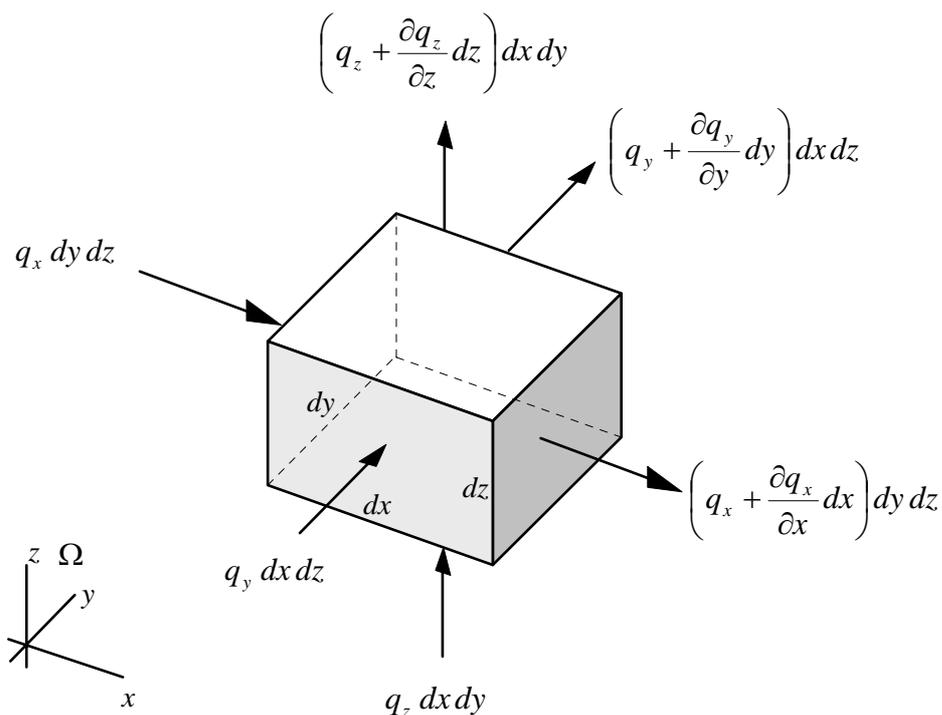


FIGURA 5.4 - Fluxo de calor em um elemento tridimensional infinitesimal

Aplicando-se a primeira lei da termodinâmica, Lei da Conservação da Energia, no elemento tridimensional infinitesimal apresentado na FIG.5.4, tem-se:

$$\text{fluxo de calor que entra} - \text{fluxo de calor que sai} + \text{calor gerado internamente} = \text{variação da energia interna do elemento} \quad (5.3)$$

Se o calor que flui na direção dos eixos  $x$ ,  $y$  e  $z$  por unidade de tempo é denominado  $q_x$ ,  $q_y$  e  $q_z$ , respectivamente, a diferença entre o fluxo que sai e o fluxo que entra no elemento é dada por:

$$dx dy \left( q_z + \frac{\partial q_z}{\partial z} dz - q_z \right) + dx dz \left( q_y + \frac{\partial q_y}{\partial y} dy - q_y \right) + dy dz \left( q_x + \frac{\partial q_x}{\partial x} dx - q_x \right) \quad (5.4)$$

O calor gerado no elemento na unidade de tempo pode ser expresso por:

$$Q dx dy dz \quad (5.5)$$

A variação da energia interna na unidade de tempo pode ser expressa por:

$$\rho c \frac{\partial \theta}{\partial t} dx dy dz \quad (5.6)$$

onde:  $Q$  - calor gerado no interior do elemen

$$\frac{\partial q_x}{\partial x} + \frac{\partial q_y}{\partial y} + \frac{\partial q_z}{\partial z} - Q + \rho c \frac{\partial \theta}{\partial t} = 0 \quad (5.8)$$

Aplicando-se a Lei de Fourier (EQ.5.2) à EQ.5.8, chega-se à *equação diferencial da condução de calor*:

$$\frac{\partial}{\partial x} \left( \lambda_x \frac{\partial \theta}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left( \lambda_y \frac{\partial \theta}{\partial y} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left( \lambda_z \frac{\partial \theta}{\partial z} \right) + Q - \rho c \frac{\partial \theta}{\partial t} = 0 \quad (5.9)$$

Para solucionar a equação diferencial da condução de calor (EQ.5.9), precisa-se especificar as condições iniciais (no tempo  $t = t_0$  no domínio  $\Omega$ ) e as condições de contorno na superfície  $\Gamma$  para um problema particular. As condições podem ser divididas em essenciais ou naturais.

O campo inicial de temperatura deve ser especificado como:

$$\theta = \theta(x, y, z, 0) = \theta_0(x, y, z) \text{ em } \Omega \quad (5.10)$$

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  $\Gamma_\theta$  é prescrito, podendo ser constante ou variar com o tempo, isto é:

$$\theta = \theta(x, y, z, t) \text{ em } \Gamma_\theta \quad (5.11)$$

Na condição de contorno natural, os valores de fluxo saindo da direção normal ao contorno  $\Gamma_\theta$  são prescritos como  $q(x, y, z, t)$ . Assim:

$$q = -\lambda \frac{\partial \theta}{\partial n} = q(x, y, z, t) \text{ em } \Gamma_\theta \quad (5.12)$$

## B. Convecção

A convecção é um processo pelo qual o calor é transmitido entre as partes em movimento de um fluido (líquido ou gasoso) ou entre esse e superfícies sólidas a diferentes temperaturas.

As correntes de convecção num fluido estão sempre associadas a diferenças de pressão. Quando as correntes de convecção desenvolvem-se devido unicamente à diferença de densidade do fluido oriunda dos gradientes térmicos, a convecção é dita *natural*. Se as diferenças de pressão forem motivadas por causas externas como ventiladores, bombas, explosões ou reações de queima, a convecção é dita *forçada*.

Isaac Newton, observando o fenômeno da convecção, propôs em 1701 que a quantidade de calor que atravessa uma área  $A$  é proporcional à diferença entre a temperatura do fluido e a temperatura da superfície do sólido. Essa relação é conhecida como *Lei de Arrefecimento de Newton* e é expressa por:

$$Q_c = \alpha_c A (\theta_s - \theta_f) \quad (5.13)$$

onde:  $Q_c$  - quantidade de calor que atravessa a área  $A$ ;

$\alpha_c$  - constante de proporcionalidade, denominada *coeficiente de transmissão de calor por convecção*;

$A$  - área da interface sólido-fluido através da qual o calor flui por convecção, medida perpendicularmente à direção do fluxo;

$\theta_s$  - temperatura da superfície do sólido; e

$\theta_f$  - temperatura média do fluido.

O fluxo de calor devido à convecção é dado por:

$$q = \frac{Q_c}{A} = \alpha_c (\theta_s - \theta_f) \quad (5.14)$$

Utilizando-se a convecção como condição de contorno para um problema de domínio sólido, tem-se uma condição de contorno natural denominada *contorno convectivo*. Para essa condição tem-se o fluxo de calor prescrito numa parte  $\Gamma_c$  do contorno por:

$$q = -\lambda \frac{\partial \theta}{\partial n} = \alpha_c (\theta_s - \theta_f) \text{ em } \Gamma_c \quad (5.15)$$

Em um compartimento incendiado, o aumento de volume proporcionado pela combustão dos materiais presentes faz com que as correntes de convecção geradas no meio sejam de direções extremamente aleatórias e de altas velocidades. Em tais casos, fica configurada um convecção forçada, sendo as correntes convectivas independentes do gradiente térmico entre os gases e a superfície da estrutura.

O texto-base de revisão da NBR 14323 (2003) recomenda simplificarmente o valor de 25 W/m°C para o coeficiente de transferência de calor por convecção  $\alpha_c$  entre os gases e a superfície da estrutura. Tal valor para o coeficiente de transferência de calor por convecção produz bons resultados quando se tem uma curva de incêndio do tipo padrão, ou seja, de comportamento monotônico.

### C. Radiação

A radiação térmica é o processo de transmissão de calor entre corpos por emissão ou absorção de radiações eletromagnéticas. Contrariamente à convecção e a condução, a radiação não necessita de presença de um meio material para que possa ocorrer. Segundo VILA REAL (1998), a transmissão de calor por radiação tem sua eficiência máxima no vácuo.

Simplificarmente, o mecanismo da radiação consiste na emissão de ondas eletromagnéticas por um corpo aquecido, que, ao serem absorvidas por um receptor, transformam-se em energia térmica. O fluxo máximo de calor que pode ser emitido de uma superfície por radiação é dado pela Lei de Stefan-Boltzmann:

$$q = \sigma \theta^4 \quad (5.16)$$

sendo:  $q$  - fluxo de calor emitido pela superfície aquecida, em  $\text{W/m}^2$ ;

$\sigma$  - constante de proporcionalidade de St

sendo:  $q$  - quantidade líquida de calor emitido por radiação, em  $W/m^2$ ;

$\varepsilon_{res}$  - emissividade resultante da superfície;

$\theta_s$  - temperatura absoluta da superfície do sólido (em Kelvin);

$\theta_f$  - temperatura absoluta média do fluido (em Kelvin).

O texto-base de revisão da NBR 14323 (2003) recomenda simplificada para a emissividade resultante da superfície o valor de 0,5, considerando-se a troca de calor por radiação entre os gases quentes da combustão e uma superfície típica de aço.

Reescrevendo a EQ.5.19 de forma similar à utilizada para convecção:

$$q = \alpha_r (\theta_s - \theta_f) \quad (5.20)$$

com o coeficiente de transmissão de calor por radiação  $\alpha_r$ , definido por:

$$\alpha_r = \varepsilon_{res} \sigma (\theta_s + \theta_f) (\theta_s^2 - \theta_f^2) \quad (5.21)$$

Utilizando-se a radiação como condição de contorno para um problema de domínio sólido, tem-se uma condição de contorno natural denominada *contorno radiativo*. Para essa condição tem-se o fluxo de calor prescrito numa parte  $\Gamma_r$  do contorno por:

$$q = -\lambda \frac{\partial \theta}{\partial n} = \alpha_r (\theta_s - \theta_f) \quad (5.22)$$

#### **D. Problemas de domínio sólido**

Para os corpos sólidos, as trocas de calor no domínio (volume do corpo) ocorrem apenas por condução, segundo a EQ.5.9. Estando um corpo sólido envolvido por um fluido, pode-se utilizar a convecção juntamente com a radiação como condição de contorno para o problema de domínio sólido (contorno convectivo-radiativo), além de um fluxo de calor prescrito. Nesta condição, o fluxo de calor é dado numa parte  $\Gamma_q$  do contorno saindo da direção  $n$  normal ao contorno por:

$$q = -\lambda \frac{\partial \theta}{\partial n} = q(x, y, z, t) + \alpha_c (\theta_s - \theta_f) + \alpha_r (\theta_s - \theta_f) \text{ em } \Gamma_q \quad (5.23.a)$$

ou

$$q = -\lambda \frac{\partial \theta}{\partial n} = q(x, y, z, t) + \alpha (\theta_s - \theta_f) \text{ em } \Gamma_q \quad (5.23.b)$$

onde  $q(x, y, z, t)$  é o fluxo de calor prescrito no instante  $t$  e  $\alpha$  é coeficiente combinado de transmissão de calor por convecção e radiação, expresso por:

$$\alpha = \alpha_c + \alpha_r \quad \text{ou} \quad \alpha = \alpha_c + \varepsilon_{res} \sigma (\theta_s + \theta_f) (\theta_s^2 - \theta_f^2) \quad (5.24)$$

sendo as temperaturas dadas em Kelvin.

### 5.2.2 - Equações básicas

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

$$\nabla^T \mathbf{D} \nabla \theta + \rho_r - \rho c \frac{\partial \theta}{\partial t} = 0 \text{ em } \Omega \quad (5.25)$$

onde  $\theta$  representa a temperatura,  $t$  a variável tempo,  $\rho$  a densidade do material,  $c$  o calor específico,  $\rho_r$  a densidade de calor devido a uma fonte de calor interna e  $\mathbf{D}$  a matriz constitutiva, formada pelas condutividades térmicas:

$$\mathbf{D} = \begin{bmatrix} \lambda_x & 0 & 0 \\ 0 & \lambda_y & 0 \\ 0 & 0 & \lambda_z \end{bmatrix} \quad (5.26)$$

O símbolo  $\nabla$  indica o operador gradiente, sendo expresso por:

$$\nabla = \left[ \frac{\partial}{\partial x} \quad \frac{\partial}{\partial y} \quad \frac{\partial}{\partial z} \right]^T \quad (5.27)$$

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

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

$$\theta - \bar{\theta} = 0 \text{ em } \Gamma_{\theta} \quad (5.28)$$

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

$$-\mathbf{n}q + \bar{q} + \alpha(\theta - \theta_f) = 0 \text{ em } \Gamma_q \quad (5.29)$$

onde:  $\bar{\theta}$  - temperatura com valor conhecido no contorno;

$\alpha$  - coeficiente de transmissão de calor por convecção-radiação;

$\bar{q}$  - fluxo de calor com valor conhecido no contorno, normal ao mesmo;

$\theta$  - temperatura na superfície do sólido;

$\theta_f$  - temperatura dos gases fora do domínio;

$\mathbf{n} = [n_x \quad n_y \quad n_z]^T$ , vetor normais ao contorno;

$\mathbf{q}_n = \mathbf{n}q = [q_x \quad q_y \quad q_z]^T = -\mathbf{D}\nabla\theta$ , vetor gradiente de temperatura normal a  $\Gamma_q$ .

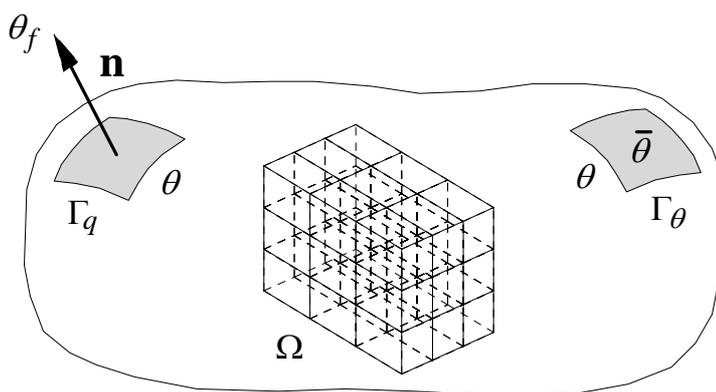


FIGURA 5.5 - Condições de contorno em um problema de domínio sólido

Em função dos parâmetros da EQ.5.28, tem-se:

**a) contorno isolado**

Representa um fluxo de calor nulo na interface do domínio com o meio externo:

$$\mathbf{n} \cdot \mathbf{q} = 0, \text{ pois } \bar{q} = \alpha = 0 \quad (5.30.a)$$

**b) contorno com entrada ou saída de calor**

Representa um fluxo de calor conhecido no contorno:

$$\mathbf{n} \cdot \mathbf{q} = \bar{q}, \text{ uma vez que } \alpha = 0 \quad (5.30.b)$$

**c) contorno com entrada ou saída de calor por convecção-radiação**

Representa um fluxo de calor no contorno em função da diferença de temperatura entre o meio externo e o domínio, sendo dado pelas leis da termodinâmica

$$R_{\Gamma_q} = -\mathbf{n}q + \bar{q} + \alpha(\theta - \theta_f) \quad (5.33)$$

logo:

$$\int_{\Gamma} \bar{W}_i R_{\Gamma_q} d\Gamma = \int_{\Gamma} \bar{W}^T (-\mathbf{q}_n + \bar{q} + \alpha(\theta - \theta_f)) \partial\Gamma \quad (5.34)$$

Conjugando-se os resíduos obtidos nas expressões acima obtém-se a EQ.5.35, denominada *equação de resíduos*:

$$\int_{\Omega} W^T \left( \nabla^T \mathbf{D} \nabla \theta + \rho_r - \rho c \frac{\partial \theta}{\partial t} \right) d\Omega + \int_{\Gamma} \bar{W}^T (-\mathbf{q}_n + \bar{q} + \alpha\theta - \alpha\theta_f) \partial\Gamma = 0 \quad (5.35)$$

Na equação dos resíduos não foi considerada a parcela correspondente ao resíduo da condição de contorno essencial (Dirichlet), pois sendo as temperaturas conhecidas, o resíduo pode ser exatamente anulado pela imposição das temperaturas prescritas.

Integrando-se por partes o termo  $\nabla^T \mathbf{D} \nabla \theta$  segundo o Teorema de Green e reagrupando-se a expressão obtida, vem:

$$\begin{aligned} & - \int_{\Omega} \nabla^T \mathbf{W}^T \mathbf{D} \nabla \theta \partial\Omega + \oint_{\Gamma_{\theta} + \Gamma_q + \Gamma_{G_a}} W^T \mathbf{D} \nabla \theta \partial\Gamma + \int_{\Omega} \mathbf{W}^T \rho_r \partial\Omega - \int_{\Omega} \mathbf{W}^T \rho c \frac{\partial \theta}{\partial t} \partial\Omega + \\ & + \oint_{\Gamma_q + \Gamma_a} \bar{\mathbf{W}}^T \mathbf{D} \nabla \theta \partial\Gamma + \oint_{\Gamma_q} \bar{\mathbf{W}}^T \bar{q} \partial\Gamma_q + \oint_{\Gamma_a} \bar{\mathbf{W}}^T \alpha \theta \partial\Gamma - \oint_{\Gamma_a} \bar{\mathbf{W}}^T \alpha \theta_f \partial\Gamma = 0 \end{aligned} \quad (5.36)$$

Sendo as funções de peso arbitrárias, pode-se tomar  $W_i = -\bar{W}_i$ , o que leva a:

$$\begin{aligned} & - \int_{\Omega} \nabla^T \mathbf{W}^T \mathbf{D} \nabla \theta \partial\Omega + \oint_{\Gamma_{\theta} + \Gamma_q + \Gamma_{G_a}} W^T \mathbf{D} \nabla \theta \partial\Gamma + \int_{\Omega} \mathbf{W}^T \rho_r \partial\Omega - \int_{\Omega} \mathbf{W}^T \rho c \frac{\partial \theta}{\partial t} \partial\Omega + \\ & - \oint_{\Gamma_q + \Gamma_a} \mathbf{W}^T \mathbf{D} \nabla \theta \partial\Gamma - \oint_{\Gamma_q} \mathbf{W}^T \bar{q} \partial\Gamma_q - \oint_{\Gamma_a} \mathbf{W}^T \alpha \theta \partial\Gamma + \oint_{\Gamma_a} \mathbf{W}^T \alpha \theta_f \partial\Gamma = 0 \end{aligned} \quad (5.37)$$

Cabe ressaltar que a integral  $\oint_{\Gamma_\theta} \mathbf{W}^T \mathbf{D} \nabla \theta \partial \Gamma$  pode ser ignorada, uma vez que a mesma ocorre no contorno de temperaturas prescritas ( $\Gamma_\theta$ ), sendo essas impostas ao nível da resolução do sistema de equações.

Assim, simplificando-se a EQ.5.37, chega-se a:

$$\begin{aligned} & - \int_{\Omega} \nabla^T \mathbf{W}^T \mathbf{D} \nabla \theta \partial \Omega + \int_{\Omega} \mathbf{W}^T \rho_r \partial \Omega - \int_{\Omega} \mathbf{W}^T \rho c \frac{\partial \theta}{\partial t} \partial \Omega + \\ & - \oint_{\Gamma_q} \mathbf{W}^T \bar{q} \partial \Gamma_q - \oint_{\Gamma_\alpha} \mathbf{W}^T \alpha \theta \partial \Gamma + \oint_{\Gamma_\alpha} \mathbf{W}^T \alpha \theta_f \partial \Gamma = 0 \end{aligned} \quad (5.38)$$

Após a discretização do domínio em elementos finitos, as temperaturas são interpoladas no interior de cada elemento como:

$$\theta = \sum N_i \theta_i = \mathbf{N} \mathbf{a}^{(e)} \quad (5.39)$$

onde:  $\mathbf{N}$  - a matriz das funções de forma definidas em cada elemento;  
 $\mathbf{a}^{(e)}$  - vetor dos valores da temperaturas nodais do elemento ( $e$ ).

O vetor gradientes em cada elemento é obtido por:

$$\mathbf{g} = \nabla \theta = \nabla \mathbf{N} \mathbf{a}^{(e)} = \mathbf{B} \mathbf{a}^{(e)} \quad (5.40)$$

sendo a matriz  $\mathbf{B} = [\mathbf{B}_1, \mathbf{B}_2, \dots, \mathbf{B}_n]$  e  $\mathbf{B}_i$  dado por:

$$\mathbf{B}_i = \left[ \frac{\partial N_i}{\partial x} \quad \frac{\partial N_i}{\partial y} \quad \frac{\partial N_i}{\partial z} \right]^T \quad (5.41)$$

O vetor do fluxo de calor pode ser calculado em função dos valores nodais de temperatura pela expressão:

$$\mathbf{q} = -\mathbf{DBa}^{(e)} \quad (5.42)$$

Substituindo-se a EQ.5.39 e a EQ.5.40 na EQ.5.38 e fazendo-se  $\mathbf{W}$  igual a  $\mathbf{N}$ , segundo o método de Galerkin, obtém-se um sistema matricial de equações que pode ser escrito na forma:

$$\mathbf{M} \frac{\partial \mathbf{a}}{\partial t} + \mathbf{Ka} = \mathbf{f} \quad (5.43)$$

onde:  $\mathbf{M}$  - matriz de massa;

$\mathbf{K}$  - matriz de rigidez térmica;

$\mathbf{f}$  - vetor de fluxos nodais equivalentes;

$\mathbf{a}$  - vetor de incógnitas contendo a temperatura em todos os nós da malha.

Para cada elemento essas matrizes podem ser obtidas pelas seguintes expressões:

$$\mathbf{M}^{(e)} = \int_{\Omega^{(e)}} \rho c \mathbf{N}^T \mathbf{N} \partial \Omega^{(e)} \quad (5.44)$$

$$\mathbf{K}^{(e)} = \int_{\Omega^{(e)}} \mathbf{B}^T \mathbf{DB} \partial \Omega + \alpha \oint_{\Gamma_a^{(e)}} \mathbf{N}^T \mathbf{N} \partial \Gamma_\alpha^{(e)} \quad (5.45)$$

$$\mathbf{f}^{(e)} = \int_{\Omega^{(e)}} \mathbf{N}^T \rho_f \partial \Omega^{(e)} - \oint_{\Gamma_q^{(e)}} \mathbf{N}^T \bar{q} \partial \Gamma_q^{(e)} + \alpha \oint_{\Gamma_\alpha^{(e)}} \mathbf{N}^T \theta_f \partial \Gamma_\alpha^{(e)} \quad (5.46)$$

#### 5.2.4 - Problemas estacionários

Para problemas estacionários, a temperatura não varia com o tempo, assim o termo  $\partial \mathbf{a} / \partial t = 0$  e o sistema de equações reduz a:

$$\mathbf{Ka} = \mathbf{f} \quad (5.47)$$

Obtidas as temperaturas nodais  $\mathbf{a}$ , os fluxos de calor em cada ponto de integração de Gauss são calculados através da EQ.5.42.

### 5.2.5 - Problemas transientes

A EQ.5.43 é resultante apenas da discretização do espaço, representando um sistema de equações diferenciais ordinárias de primeira ordem. Na solução deste sistema de equações empregam-se métodos numéricos que requerem a discretização do domínio no tempo.

A discretização do tempo que será utilizada corresponde a uma aplicação do método das diferenças finitas, baseado nas hipóteses:

- A EQ.5.43 é satisfeita apenas em pontos discretos  $t_{n+\beta}$  de cada intervalo de tempo  $\Delta t$  em que se discretizou o domínio tempo (FIG.5.6);
- As temperaturas variam linearmente ao longo do intervalo de tempo  $\Delta t$ , desde o instante  $t_n$  até  $t_{n+1} = t_n + \Delta t$ .

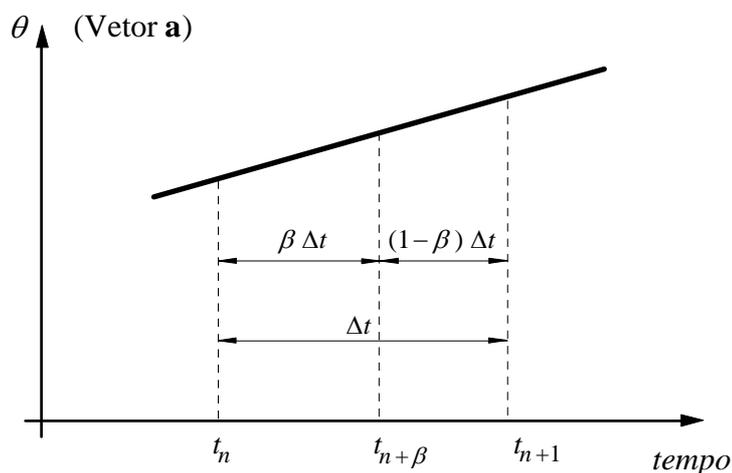


FIGURA 5.6 - Variação da temperatura no intervalo  $\Delta t$

As temperaturas  $\mathbf{a}_{n+\beta}$  no instante  $t_{n+\beta} = t_n + \beta \Delta t$  podem ser dadas então por:

$$\mathbf{a}_{n+\beta} = \mathbf{a}_n + \beta \Delta t (\mathbf{a}_{n+1} - \mathbf{a}_n) / \Delta t \text{ com } \begin{cases} \beta \in (0,1) \\ n \in (0,1,\dots,N-1) \end{cases} \quad (5.48)$$

sendo  $N$  o número total de intervalos e  $\beta$  é um parâmetro que define dentro de cada intervalo de tempo o instante em que a EQ.5.43 é satisfeita.

Pela segunda hipótese, a derivada da temperatura em relação ao tempo é constante dentro de cada e dada por:

$$\frac{\partial a_{n+\beta}}{\partial t} = \frac{\mathbf{a}_{n+1} - \mathbf{a}_n}{\Delta t} \quad (5.49)$$

Substituindo-se a EQ.5.48 e a EQ.5.49 na EQ.5.43 chega-se à seguinte fórmula de recorrência:

$$\left( \frac{\mathbf{M}_{n+\beta}}{\beta \Delta t} + \mathbf{K}_{n+\beta} \right) \mathbf{a}_{n+\beta} = \mathbf{f}_{n+\beta} + \frac{\mathbf{M}_{n+\beta}}{\beta \Delta t} \mathbf{a}_n \quad (5.50)$$

As matrizes  $\mathbf{M}_{n+\beta}$ ,  $\mathbf{K}_{n+\beta}$  e  $\mathbf{f}_{n+\beta}$  são avaliadas no instante  $t_{n+\beta}$ . Reescrevendo a fórmula de recorrência de outra forma, obtém-se:

$$\hat{\mathbf{K}}_{n+\beta} \mathbf{a}_{n+\beta} = \hat{\mathbf{f}}_{n+\beta} \quad (5.51)$$

onde:

$$\hat{\mathbf{K}}_{n+\beta} = \frac{\mathbf{M}_{n+\beta}}{\beta \Delta t} + \mathbf{K}_{n+\beta} \quad (5.51.a)$$

$$\hat{\mathbf{f}}_{n+\beta} = \mathbf{f}_{n+\beta} + \frac{\mathbf{M}_{n+\beta}}{\beta \Delta t} \mathbf{a}_n \quad (5.51.b)$$

Resolvido o sistema de equações (EQ.5.51) para  $\mathbf{a}_{n+\beta}$ , as temperaturas no final do intervalo de tempo  $t_{n+1}$  são dadas por:

$$\mathbf{a}_{n+1} = \frac{1}{\beta} \mathbf{a}_{n+\beta} + \left(1 - \frac{1}{\beta}\right) \mathbf{a}_n \quad (5.52)$$

sendo essas temperaturas iniciais  $\mathbf{a}_n$  quando se avança para o intervalo de tempo seguinte.

Em função do valor do operador  $\beta$  na EQ.5.50 obtém-se vários esquemas de integração no tempo:

- a) esquema explícito de Euler:  $\beta = 0$ ;
- b) esquema explícito de Crank-Nicolson:  $\beta = 1/2$ ;
- c) esquema explícito de Galerkin:  $\beta = 2/3$ ;
- d) esquema implícito de Euler-Backward:  $\beta = 1$ .

O algoritmo mostrado acima tem os mesmos critérios de estabilidade tanto para problemas lineares quanto para problemas não-lineares. Segundo HOGGE (1981), para  $\beta < 1/2$  os esquemas de integração são *condicionalmente estáveis* enquanto que para  $1/2 \leq \beta \leq 1$  são designados incondicionalmente estáveis, mesmo que tal convergência processe com oscilações.

### 5.3 - Características do programa *THERSYS*

A seguir serão mostradas as características do programa *THERSYS* no que se refere às curvas de incêndio, propriedades dos materiais, tipos de elementos utilizáveis, condições de contorno e métodos de solução de sistemas de equações.

#### 5.3.1 - Curvas de incêndio

O programa *CALTEMI*, no qual se baseou o programa *THERSYS*, utiliza apenas a curva de incêndio da NBR 14432 (2000). Para viabilizar a análise de qualquer problema térmico, o programa *THERSYS* foi elaborado com a possibilidade de uso das seguintes curvas de incêndio:

- Incêndio definido pelo usuário;
- Incêndio-padrão NBR 14432 (2000);
- Incêndio externo (ENV-2-2);
- Incêndio de hidrocarbonetos (ENV-2-2);
- *Odden test* (BFD);
- *Car test* (BFD);
- *Swedish Test D2* (BFD);
- *EBS test D2* (BFD);
- *JRFO test R* (BFD);
- *JRFO test Q* (BFD);
- *EBS test 9* (BFD);
- *EBS test 16* (BFD);
- *CIB/W14 (a)* (BFD);
- *CIB/W14 (b)* (BFD);
- *CTICM test 35* (BFD);
- *CTICM test 63* (BFD);
- *Cardington test 2* (BFD);
- *Cardington test 5* (BFD);
- *Cardington test 6* (BFD);
- *Cardington test 7* (BFD).

Na opção “incêndio definido pelo usuário”, o programa permite que a curva de incêndio seja fornecida através de uma tabela de valores: tempo × temperatura dos gases. Para valores intermediários aos fornecidos da tabela, o programa faz interpolação linear. Essa opção torna possível o uso de uma curva de incêndio que não seja implementada no programa.

As curvas de incêndio correspondentes a resultados de ensaios são modeladas através das equações de Barnett (curvas BFD).

### 5.3.2 - Propriedades dos materiais

O programa *THERSYS* permite que todas as propriedades varie com a temperatura para qualquer material. O programa pode trabalhar com os seguintes materiais:

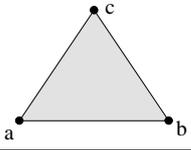
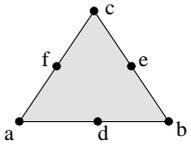
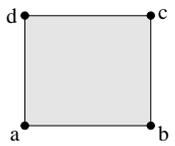
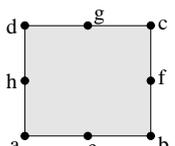
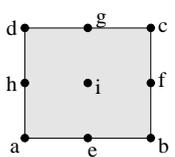
- material definido pelo usuário;
- aço estrutural, segundo o texto-base de revisão da NBR 14323 (2003);
- concreto de densidade normal, segundo o texto-base de revisão da NBR 14323 (2003);
- concreto de baixa densidade, segundo o texto-base de revisão da NBR 14323 (2003);
- *Blaze Shield II*, segundo SILVA (2001);
- concreto celular autoclavado, segundo catálogo do fabricante (SICAL);
- placas de vermiculita, segundo MARTINS (2000);
- ar atmosférico, segundo INCROPERA (1992).

Na opção “material definido pelo usuário”, o programa permite que as propriedades do material (massa específica, calor específico e condutividade térmica) sejam fornecidas através de tabelas: temperatura  $\times$  valor da propriedade. Para valores intermediários aos fornecidos pela tabela, o programa faz interpolação linear. Com essa opção é possível a modelagem de qualquer material.

### 5.3.3 - Tipos de elementos finitos disponíveis

O programa *THERSYS* utiliza todos os elementos bidimensionais e tridimensionais isoparamétricos. A TAB5.1 ilustra os elementos utilizáveis pelo *THERSYS*, bem como o número de pontos de Gauss possíveis no domínio e no contorno do elemento. Entre parênteses, é mostrado o número padrão de pontos de Gauss para cada elemento (valor adotado pelo programa quando se inicia um novo modelo).

TABELA 5.1 - Elementos utilizáveis no programa *THERSYS*

Denominação	Pontos de Gauss no domínio	Pontos de Gauss no contorno	Esquema
Elemento triangular lagrangiano de 3 nós	1, 3 ou 4 (3)	1, 2 ou 3 (1)	
Elemento triangular serendíptico de 6 nós	1, 3 ou 4 (3)	1, 2 ou 3 (2)	
Elemento quadrilateral lagrangiano de 4 nós	4 ou 9 (4)	2 ou 3 (2)	
Elemento quadrilateral serendíptico de 8 nós	4 ou 9 (9)	2 ou 3 (3)	
Elemento quadrilateral lagrangiano de 9 nós	4 ou 9 (9)	2 ou 3 (3)	

Elem

### 5.3.4 - Condição inicial

O programa admite como condição inicial um único valor de temperatura prescrita em todo o domínio no início da análise (tempo  $t = 0$ ), dada pela EQ.5.10.

### 5.3.5 - Condição de contorno

O programa admite quatro formas distintas de condição de contorno:

- nós com temperatura prescrita, segundo a EQ.5.11;
- superfícies com fluxo de calor prescrito, segundo a EQ.5.12;
- superfícies com arrefecimento por convecção natural e radiação, segundo a EQ.5.23;
- superfícies com incêndio por convecção forçada e radiação, segundo a EQ.5.23.

O programa admite ainda que alguns materiais possam ter geração de calor interna, atuando no domínio do elemento, segundo a EQ.5.9.

### 5.3.6 - Métodos de solução do sistema de equações lineares

O programa, visando melhorar o desempenho do algoritmo de solução, armazena as matrizes de rigidez em *skyline* e possibilita a solução do sistema de equações pelos métodos:

- Fatorização de Cholesky ( $n < 3000$  incógnitas);
- Método de Gauss-Seidel ( $3000 < n < 50000$  incógnitas);
- Método dos Gradientes Conjugados Pré-Condicionado ( $n > 50000$  incógnitas).

# 6

## **ESTUDO COMPARATIVO ENTRE PILARES MISTOS PREENCHIDOS COM CRAD E COM CONCRETO CONVENCIONAL**

### **6.1 - Considerações preliminares**

Neste capítulo, será realizado um estudo comparativo entre pilares preenchidos com concreto refratário de alto desempenho e pilares preenchidos com concreto convencional. Neste estudo serão comparadas as resistências à compressão de cálculo dos pilares, tanto à temperatura ambiente quanto em situação de incêndio.

### **6.2 - Condições do problema e ferramentas computacionais**

Para o dimensionamento dos pilares à temperatura ambiente, será usado o texto-base de revisão da NBR 8800 (2003), apresentado no item 4.2. Para o dimensionamento dos pilares em situação de incêndio, será empregado o método analítico simplificado, especificado pelo texto-base de revisão da NBR 14323 (2003), apresentado no item 4.4.

Para a determinação da distribuição de temperatura na seção transversal dos pilares será utilizado o programa *THERSYS*, desenvolvido por RIBEIRO (2004). Os pilares estarão submetidos ao incêndio-padrão, definido pela NBR 14432 (2000), e serão dimensionados considerando a temperatura ambiente e os tempos de 30, 60, 90 e 120 minutos.

A distribuição de temperatura no perfil de aço será considerada constante, por possuir uma condutividade térmica alta e pequena espessura. O mesmo se aplica às barras da armadura que possui alta condutividade térmica e pequeno diâmetro. A temperatura das barras da armadura dependerá de sua posição. Já o núcleo de concreto da seção transversal dos pilares foi dividido em 4 coroas circulares ou retangulares de mesma espessura, conforme NÓBREGA (2003), e para cada coroa foram obtidas as temperaturas médias, em graus Celsius.

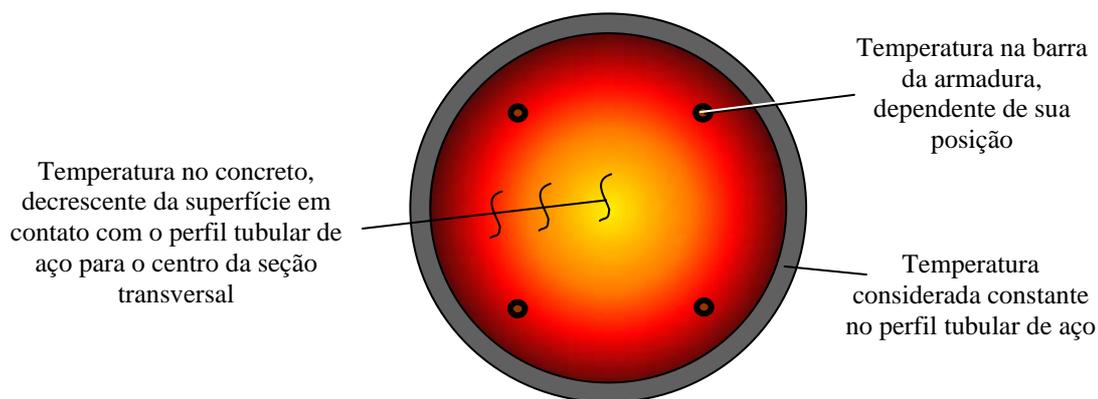


FIGURA 6.1 - Distribuição de temperatura na seção transversal do pilar misto

Os pilares serão considerados com sendo de um edifício de múltiplos andares tendo, portanto, continuidade, cujo comprimento de flambagem à temperatura ambiente é de 4,00m. Conseqüentemente, de acordo com o item 4.4.2, o comprimento de flambagem em situação de incêndio será de 2,00m.

Os perfis serão compostos por aço com resistência ao escoamento de 300 MPa e as barras da armadura terão resistência ao escoamento de 500 MPa.

Inicialmente, os pilares serão preenchidos com concreto convencional com resistência característica à compressão de 30 MPa e, posteriormente, com concreto refratário de alto desempenho (CRAD) com resistência característica à compressão de 100 MPa.

A força normal resistente de cálculo de cada pilar será determinada usando o programa PCRAD 1.0, desenvolvido especialmente para este trabalho e que se encontra no Anexo A. Inicialmente, deve ser obtida a temperatura média de cada parte da seção transversal, ou seja, do perfil de aço, de cada barra da armadura em função da sua posição e de cada coroa de concreto, usando o programa *THERSYS* desenvolvido por Ribeiro (2004). A distribuição de temperatura e a geometria do pilar serão os dados de entrada para o programa PCRAD 1.0.

As seções circulares e retangulares a serem estudadas estão apresentadas, respectivamente, na TAB.6.1 e na TAB.6.2:

TABELA 6.1 - Seções circulares a serem estudadas

Perfil	Diâmetro (mm)	Espessura (mm)	Massa linear (kg/m)
TC 219,1 × 7,9	219,1	7,9	41,2
TC 219,1 × 15,9	219,1	15,9	79,6
TC 355,6 × 9,5	355,6	9,5	81,3
TC 355,6 × 19,1	355,6	19,1	158

TABELA 6.2 - Seções retangulares a serem estudadas

Perfil	Altura (mm)	Largura (mm)	Espessura (mm)	Massa linear (kg/m)
TR 225 × 225 × 7,9	225	225	7,9	51,0
TR 225 × 225 × 12,7	225	225	12,7	81,5
TR 360 × 225 × 8,4	360	225	8,4	74,4
TR 360 × 225 × 12,7	360	225	12,7	107

### 6.3 - Pilares de seção circular

#### 6.3.1 - TC 219,1 × 7,9

A armadura da seção é composta por 8 barras de 12,5 mm de diâmetro, dispostas conforme o exposto na FIG.6.2:

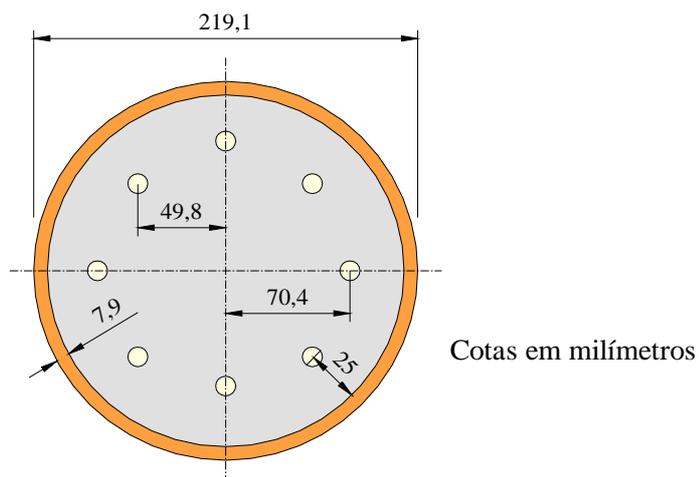


FIGURA 6.2 - Distribuição da armadura na seção TC 219,1 × 7,9

Para esta seção transversal, foi gerada uma malha com 1331 nós e 1254 elementos lineares quadrilaterais, mostrada na FIG.6.3:

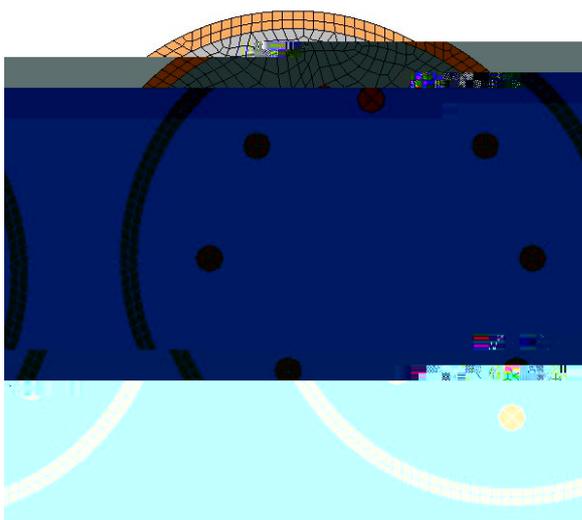


FIGURA 6.3 - Malha de elementos finitos para a seção TC 219,1 × 7,9

Para esta malha, mostrada na FIG.6.3, foram obtidas as distribuições de temperatura para os pilares preenchidos por concreto convencional e por concreto refratário de alto desempenho.

A FIG.6.4 mostra a distribuição de temperatura, em graus Celsius, para o perfil TC 219,1 × 7,9 preenchido por concreto convencional.

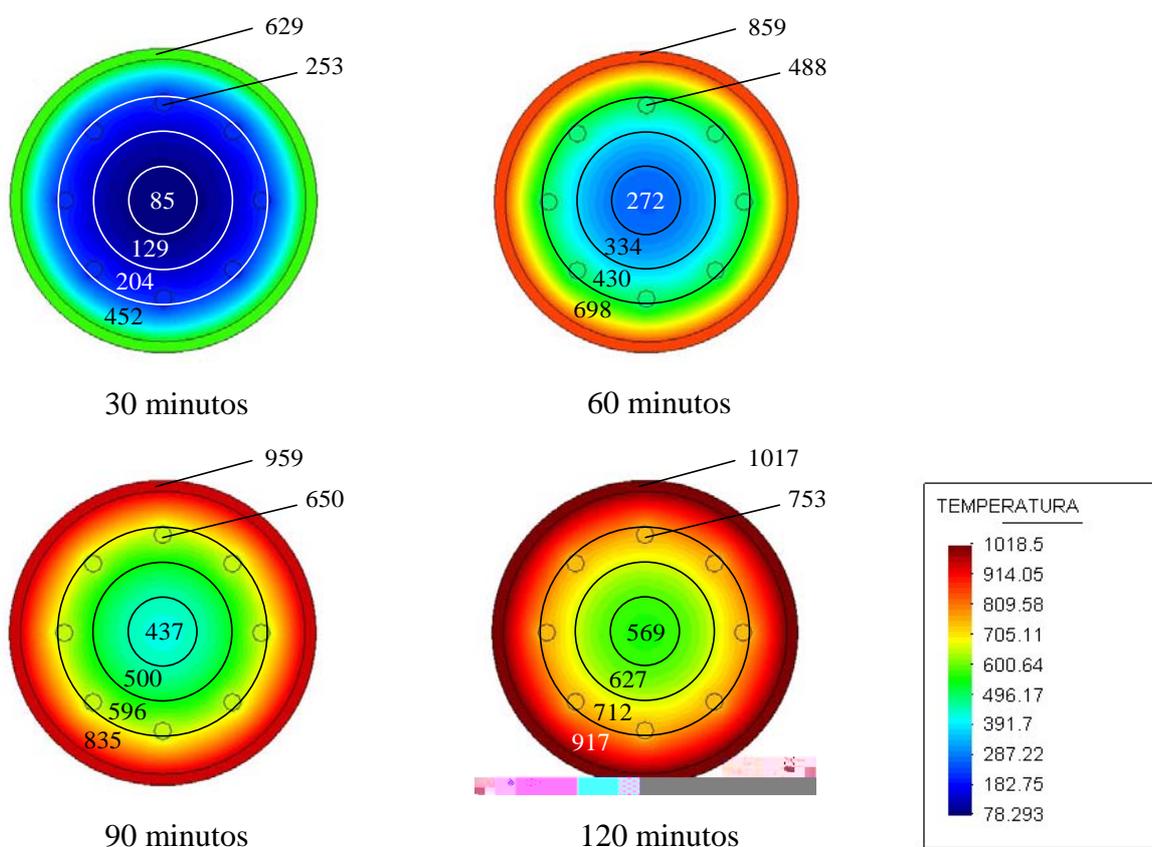


FIGURA 6.4 - Temperaturas médias (em graus Celsius) para a seção TC 219,1 × 7,9 preenchida por concreto convencional

A FIG.6.5 mostra a distribuição de temperatura, em graus Celsius, para o perfil TC 219,1 × 7,9 preenchido por concreto refratário de alto desempenho.

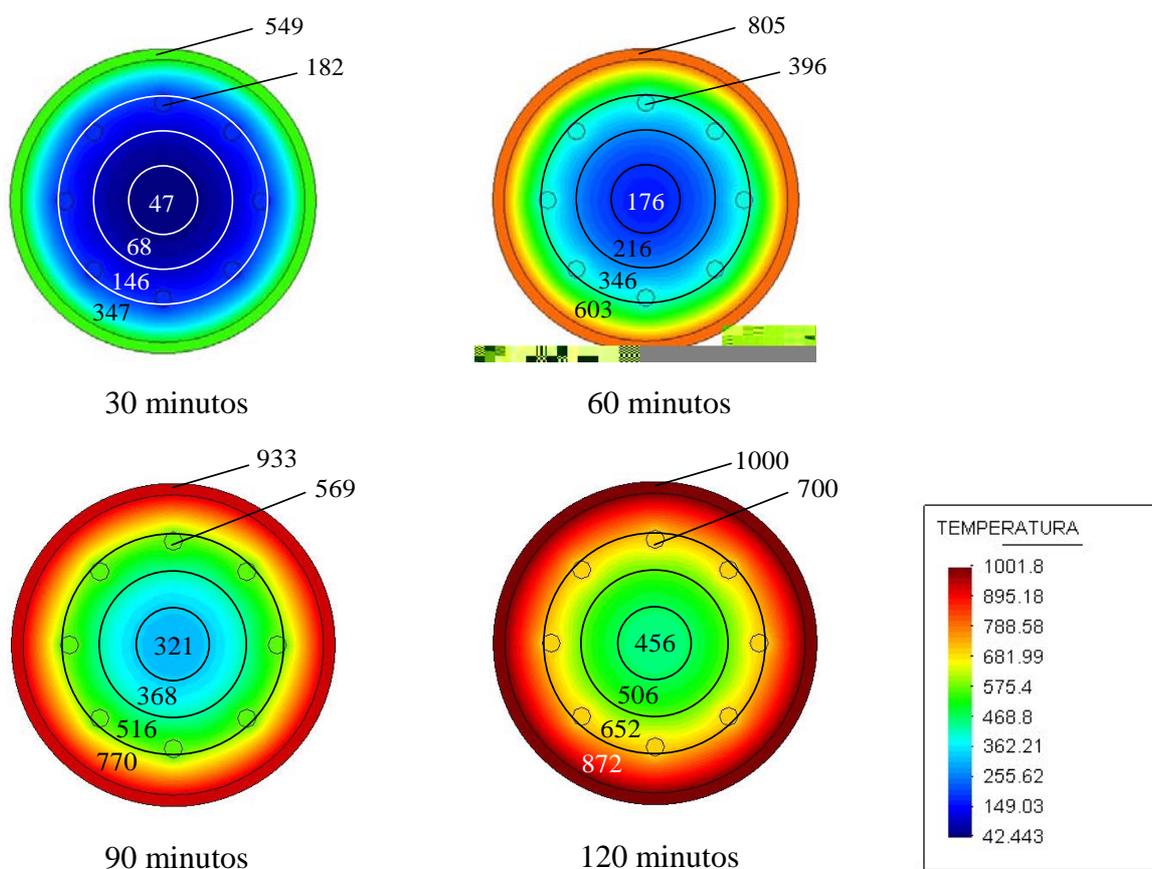


FIGURA 6.5 - Temperaturas médias (em graus Celsius) para a seção TC 219,1 × 7,9 preenchida por concreto refratário de alto desempenho

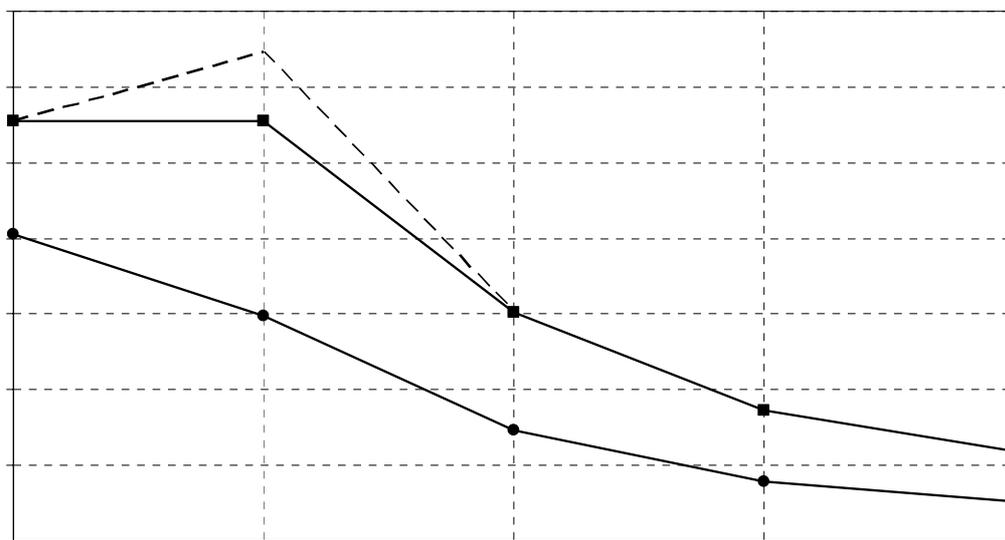
A partir destas distribuições de temperatura apresentadas para cada tempo requerido de resistência ao fogo, foram obtidos os valores da força normal resistente de cálculo para o pilar estudado. Os valores são apresentados na TAB.6.3.

TABELA 6.3 - Resistência à compressão de cálculo para o pilar TC 279,1 × 7,9

Situação de dimensionamento	Resistência de Cálculo (kN)	
	Concreto Convencional	CRAD
Temperatura ambiente	2024	2774
TRRF = 30 min	1491	3231
TRRF = 60 min	734	1511
TRRF = 90 min	391	862
TRRF = 120 min	263	596

De acordo o texto-base de revisão da NBR 14323 (2003), a resistência de um pilar dimensionado em situação de incêndio não pode ser superior à resistência do mesmo pilar quando dimensionado a temperatura ambiente. Portanto, a resistência à compressão de cálculo em situação de incêndio, para o pilar preenchido com o concreto refratário de alto desempenho, para o tempo requerido de resistência ao fogo (TRRF) igual a 30 minutos, deve ser tomada como sendo igual à resistência à compressão de cálculo a temperatura ambiente.

A FIG.6.6 apresenta os valores obtidos para as forças normais resistentes de cálculo para o pilar composto pela seção TC 279,1 × 7,9.



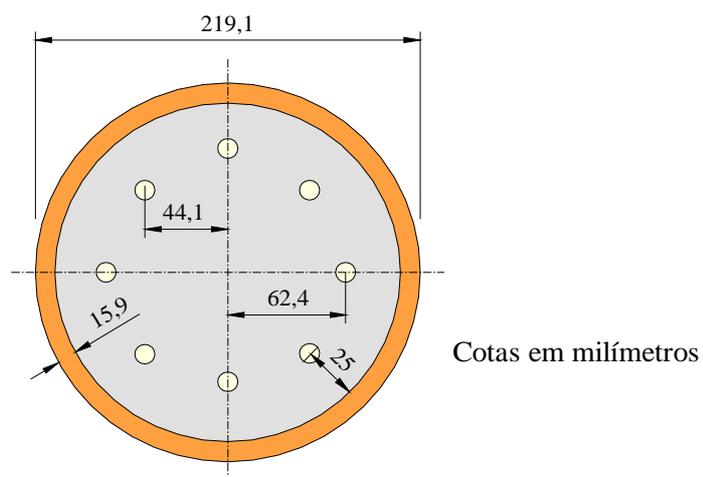


FIGURA 6.7 - Distribuição da armadura na seção TC 219,1 × 15,9

Para esta seção transversal, foi gerada uma malha com 1215 nós e 1138 elementos lineares quadrilaterais, mostrada na FIG.6.8:

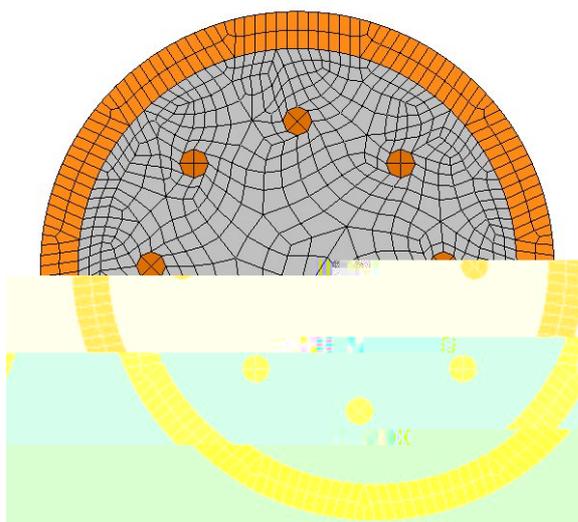


FIGURA 6.8 - Malha de elementos finitos para a seção TC 219,1 × 15,9

A FIG.6.9 mostra a distribuição de temperatura, em graus Celsius, para o perfil TC 219,1 × 15,9 preenchido por concreto convencional.

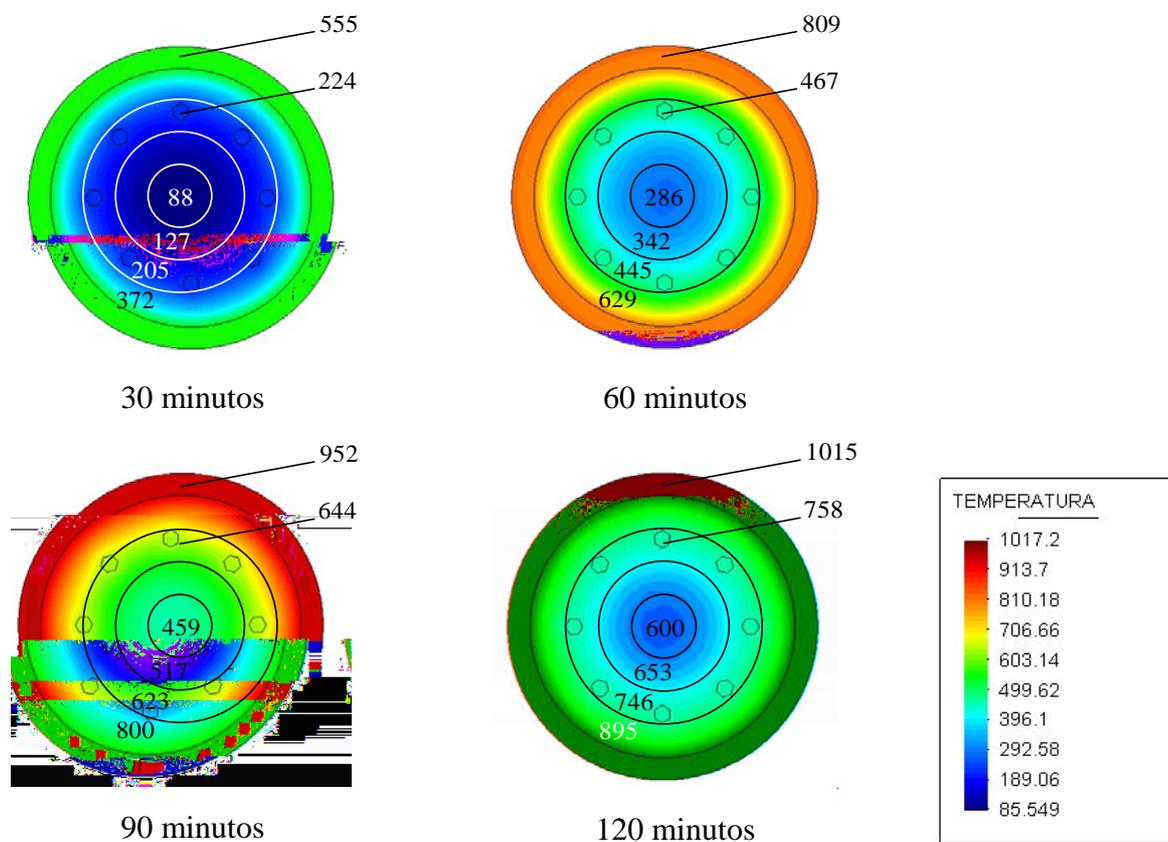


FIGURA 6.9 - Temperaturas médias (em graus Celsius) para a seção TC 219,1 × 15,9 preenchida por concreto convencional

A FIG.6.10 mostra a distribuição de temperatura, em graus Celsius, para o perfil TC 219,1 × 15,9 preenchido por concreto refratário de alto desempenho.

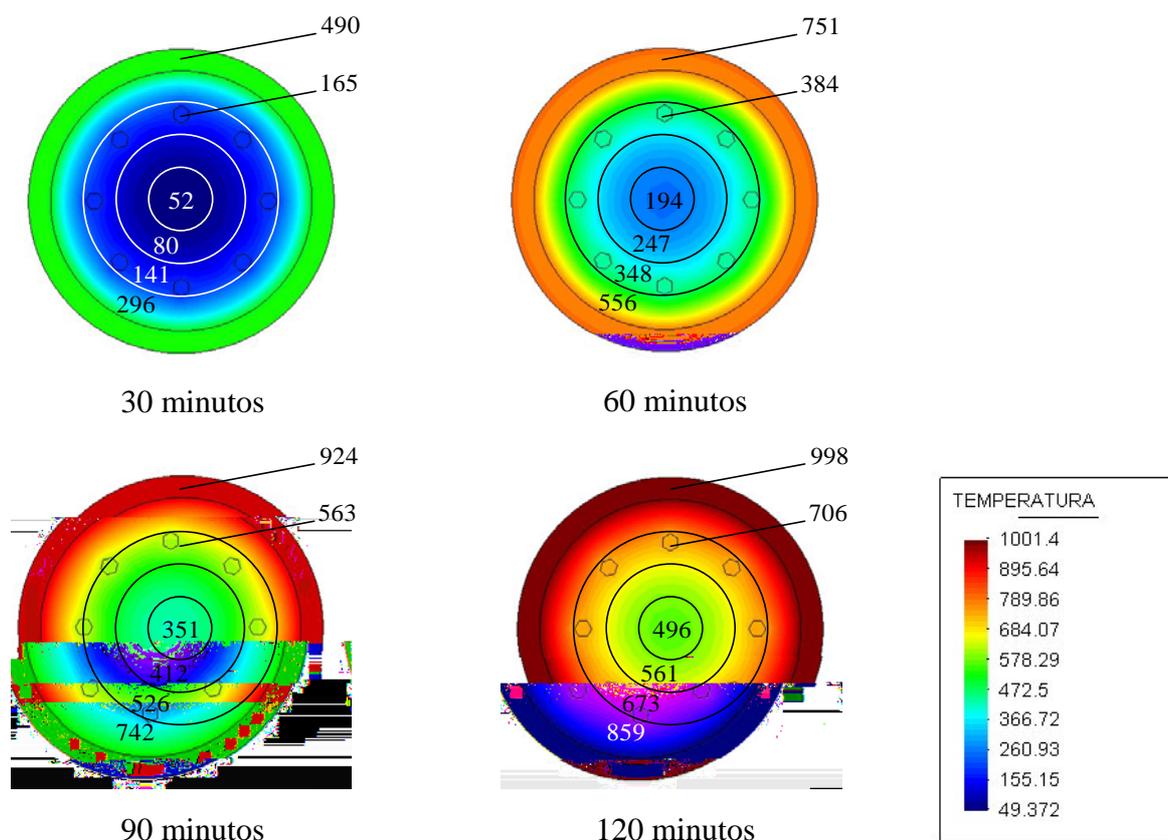


FIGURA 6.10 - Temperaturas médias (em graus Celsius) para a seção TC 219,1 × 15,9 preenchida por concreto refratário de alto desempenho

A partir destas distribuições de temperatura apresentadas para cada tempo requerido de resistência ao fogo, foram obtidos os valores da força normal resistente de cálculo para o pilar estudado. Os valores são apresentados na TAB.6.4.

TABELA 6.4 - Resistência à compressão de cálculo para o pilar TC 279,1 × 15,9

Situação de dimensionamento	Resistência de Cálculo (kN)	
	Concreto Convencional	CRAD
Temperatura ambiente	3075	3784
TRRF = 30 min	2584	4408
TRRF = 60 min	913	1794
TRRF = 90 min	456	982
TRRF = 120 min	293	647

A FIG.6.11 apresenta os valores obtidos para as forças normais resistentes de cálculo para o pilar composto pela seção TC 279,1 × 15,9.

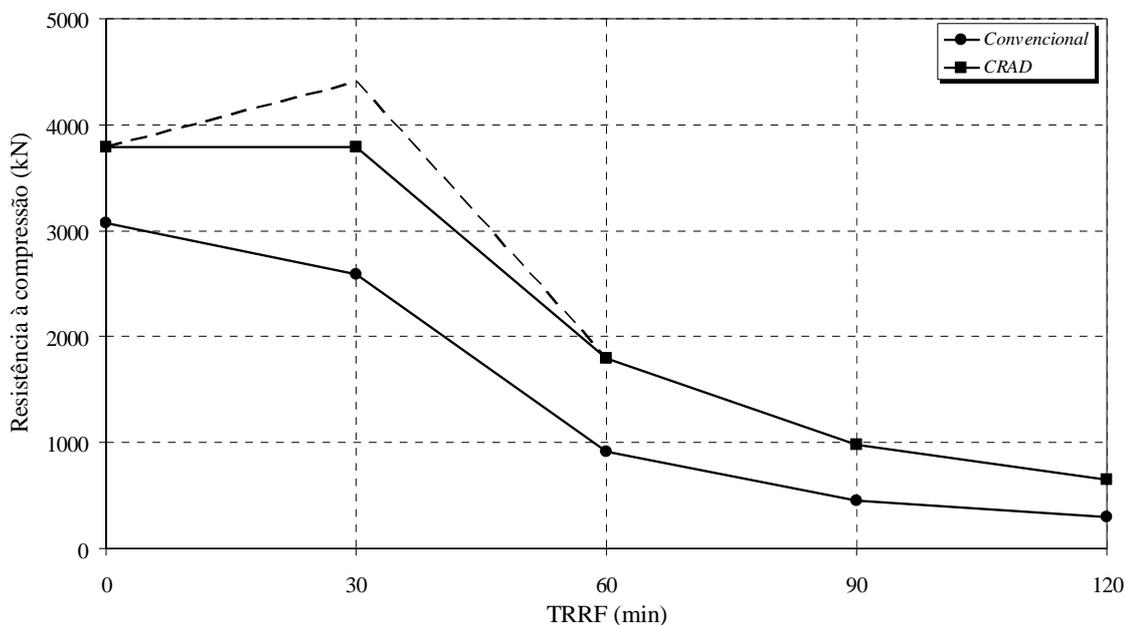


FIGURA 6.11 - Forças normais resistentes de cálculo em função do tempo de resistência ao fogo para o pilar TC 279,1 × 15,9

Para avaliar a influência da espessura de aço na distribuição de temperatura das seções transversais dos pilares preenchidos com concreto refratário de alto desempenho submetidos a incêndio, fez-se uma comparação das temperaturas no núcleo central de concreto. Tal comparação é apresentada na TAB.6.5:

TABELA 6.5 - Comparação das temperaturas do núcleo central de concreto dos pilares circulares com diâmetro de 279,1 mm preenchidos com CRAD

Pilar preenchido com CRAD	Temperatura do núcleo (°C)			
	30 min	60 min	90 min	120 min
TC 219,1 × 7,9	47	176	321	456
TC 219,1 × 15,9	52	194	351	496
Diferença	10,6%	10,2%	9,3%	8,8%

As diferenças de temperatura apresentadas são causadas pelo fato de que a maior espessura de parede reduz a área de concreto no interior do perfil. Com uma área de concreto menor e a alta condutividade do aço, os perfis de maior espessura apresentam maiores temperaturas em seu interior.

Para avaliar a influência da espessura de aço na resistência à compressão do pilar preenchido com concreto refratário de alto desempenho, em situação de incêndio, fez-se uma comparação entre as resistências dos mesmos. O resultado é apresentado na TAB.6.6 e na FIG.6.12.

TABELA 6.6 - Resistência à compressão de cálculo para os pilares

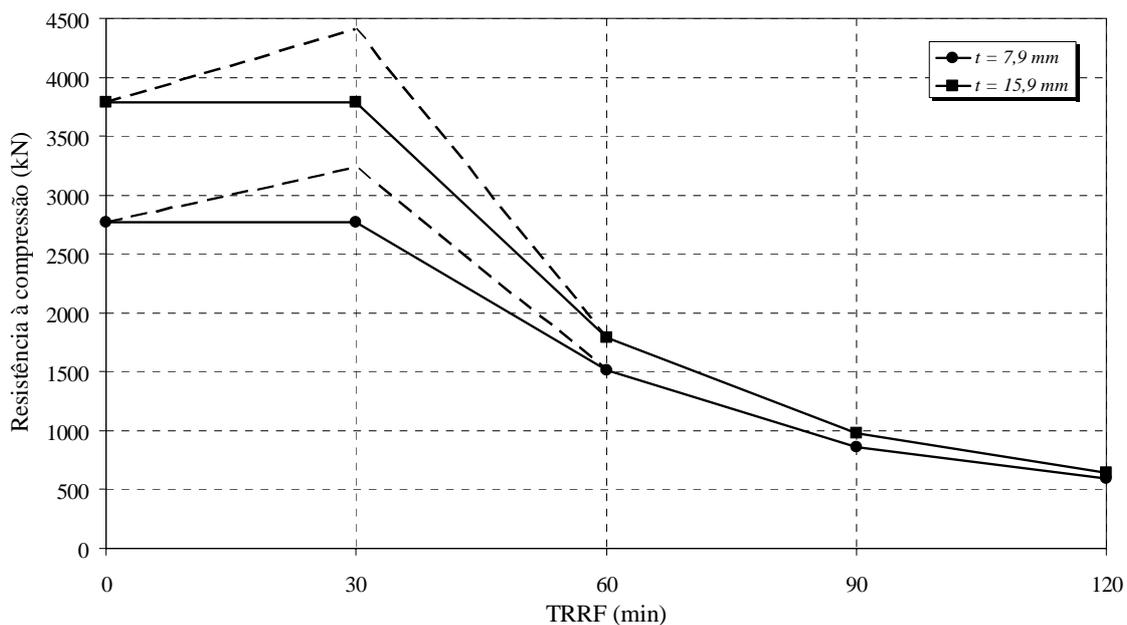


FIGURA 6.12 - Resistência à compressão de cálculo para os pilares com diâmetro de 279,1 mm preenchidos com concreto refratário de alto desempenho

### 6.3.3 - TC 355,6 × 9,5

A armadura da seção é composta por 8 barras de 20,0 mm de diâmetro, dispostas conforme o exposto na FIG.6.13:

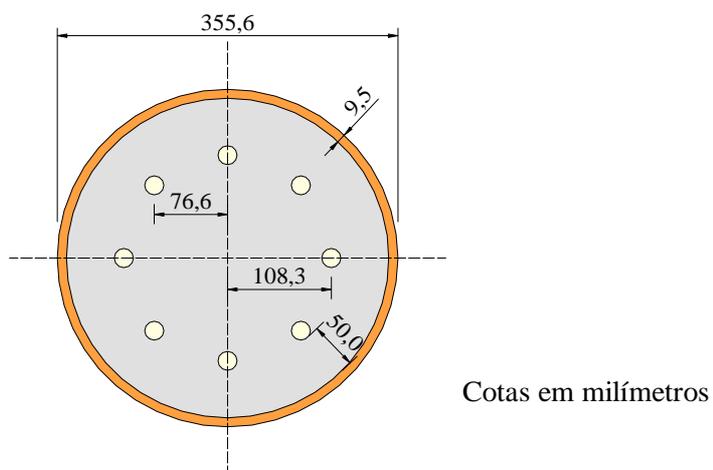


FIGURA 6.13 - Distribuição da armadura na seção TC 355,6 × 9,5

Para esta seção transversal, foi gerada uma malha com 1569 nós e 1483 elementos lineares quadrilaterais, mostrada na FIG.6.14:

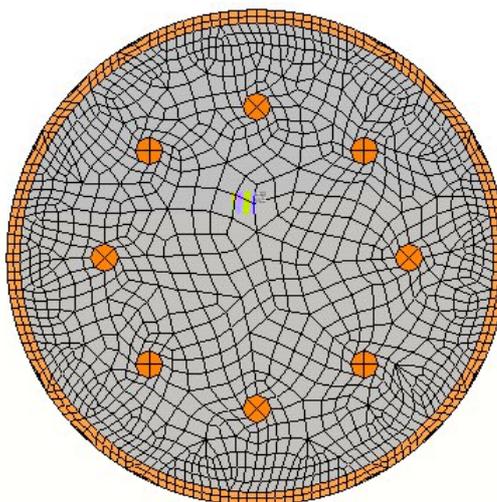


FIGURA 6.14 - Malha de elementos finitos para a seção TC 355,6 × 9,5

Para esta malha, mostrada na FIG.6.14, foram obtidas as distribuições de temperatura para os pilares preenchidos por concreto convencional e por concreto refratário de alto desempenho.

A FIG.6.15 mostra a distribuição de temperatura, em graus Celsius, para o perfil TC 355,6 × 9,5 preenchido por concreto convencional.

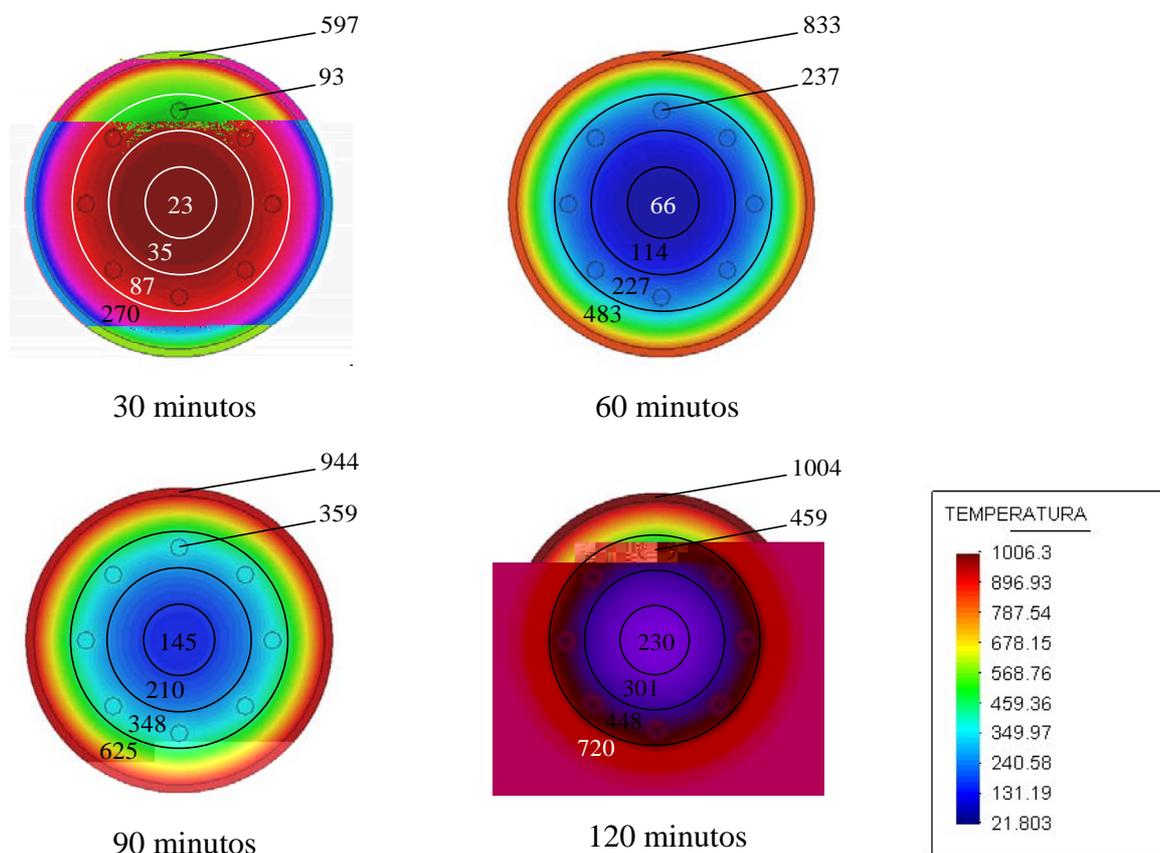


FIGURA 6.15 - Temperaturas médias (em graus Celsius) para a seção TC  $355,6 \times 9,5$  preenchida por concreto convencional

A FIG.6.16 mostra a distribuição de temperatura, em graus Celsius, para o perfil TC  $355,6 \times 9,5$  preenchido por concreto refratário de alto desempenho.

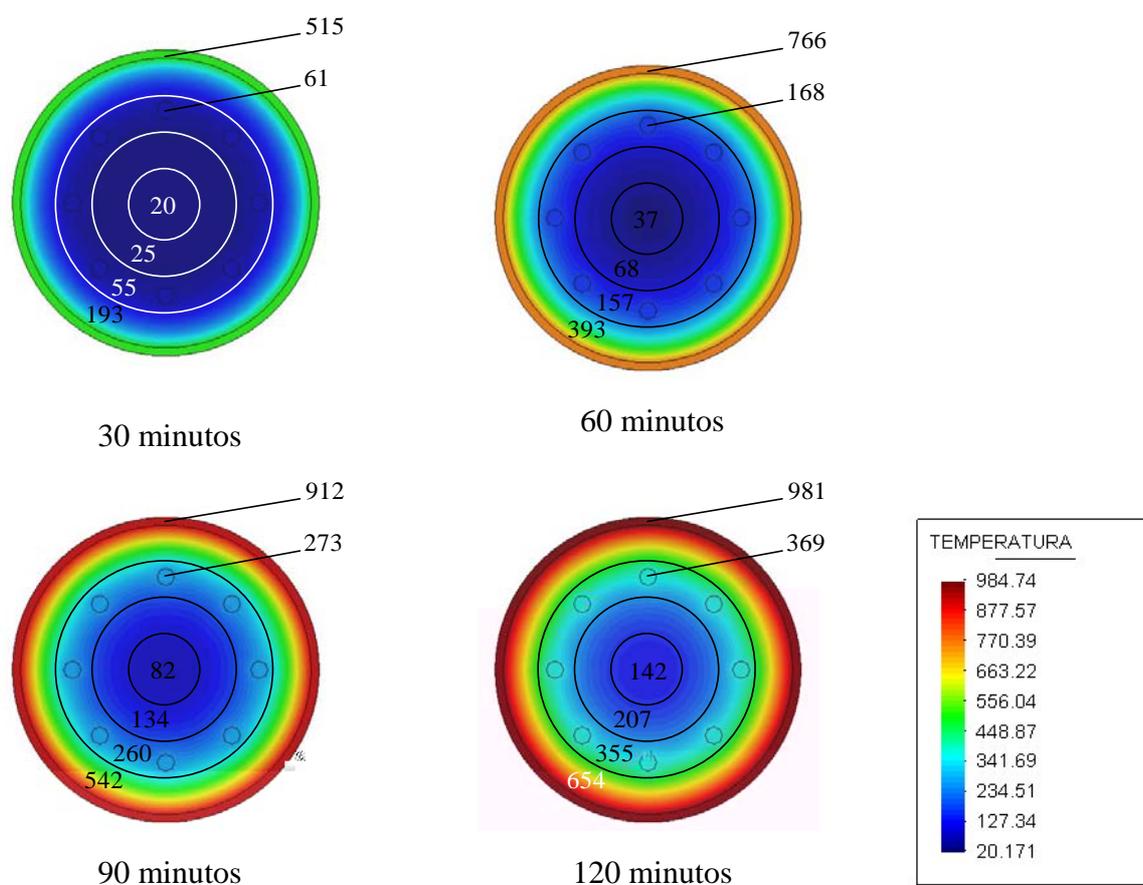


FIGURA 6.16 - Temperaturas médias (em graus Celsius) para a seção TC 355,6 × 9,5 preenchida por concreto refratário de alto desempenho

A partir destas distribuições de temperatura apresentadas para cada tempo requerido de resistência ao fogo, foram obtidos os valores da força normal resistente de cálculo para o pilar estudado. Os valores são apresentados na TAB.6.7:

TABELA 6.7 - Resistência à compressão de cálculo para o pilar TC 355,6 × 9,5

Situação de dimensionamento	Resistência de Cálculo (kN)	
	Concreto Convencional	CRAD
Temperatura ambiente	5318	8816
TRRF = 30 min	4722	10629
TRRF = 60 min	3053	9171
TRRF = 90 min	2536	5884
TRRF = 120 min	2181	5113

A FIG.6.17 apresenta os valores obtidos para as forças normais resistentes de cálculo para o pilar composto pela seção TC  $355,6 \times 9,5$ .

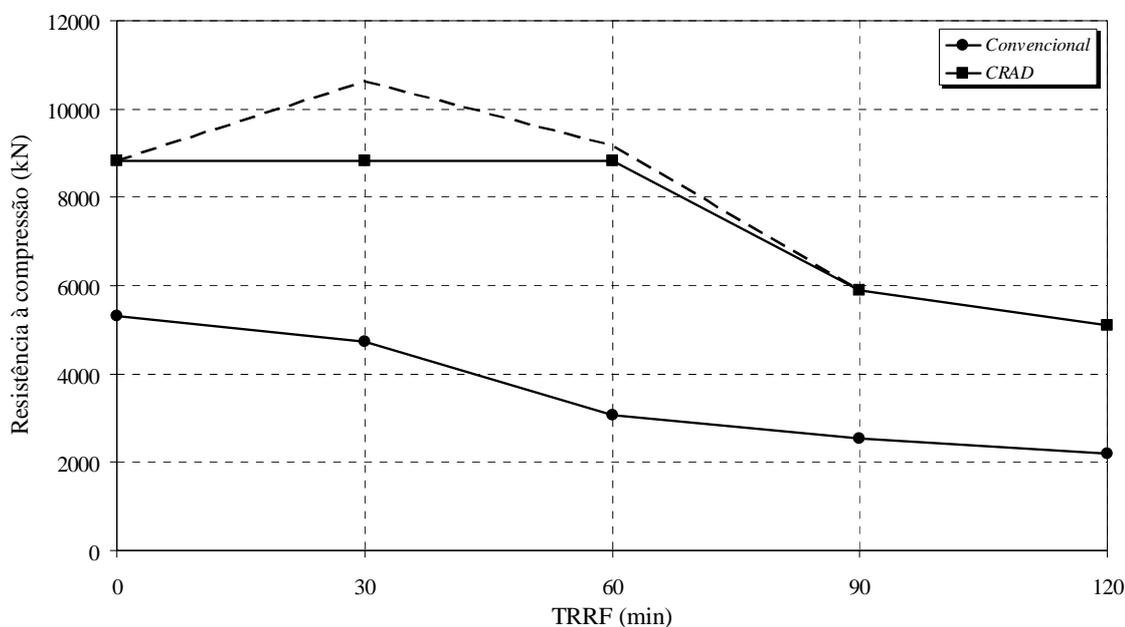


FIGURA 6.17 - Forças normais resistentes de cálculo em função do tempo de resistência ao fogo para o pilar TC  $355,6 \times 9,5$

#### 6.3.4 - TC $355,6 \times 19,1$

A armadura da seção é composta por 8 barras de 20,0 mm de diâmetro, dispostas conforme o exposto na FIG.6.18:

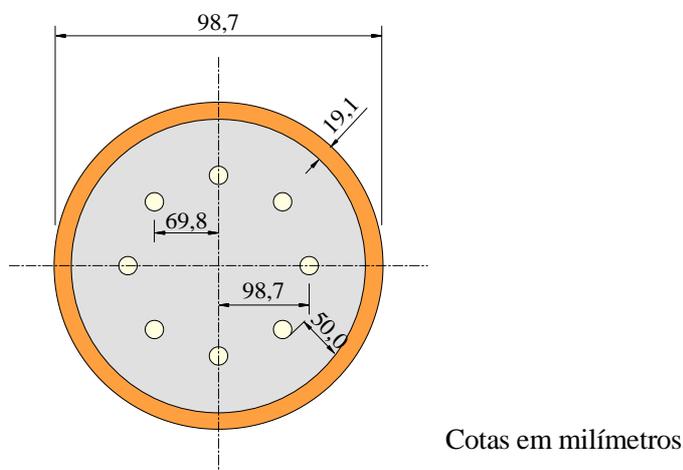


FIGURA 6.18 - Distribuição da armadura na seção TC  $355,6 \times 19,1$

Para esta seção transversal, foi gerada uma malha com 1451 nós e 1365 elementos lineares quadrilaterais, mostrada na FIG.6.19:

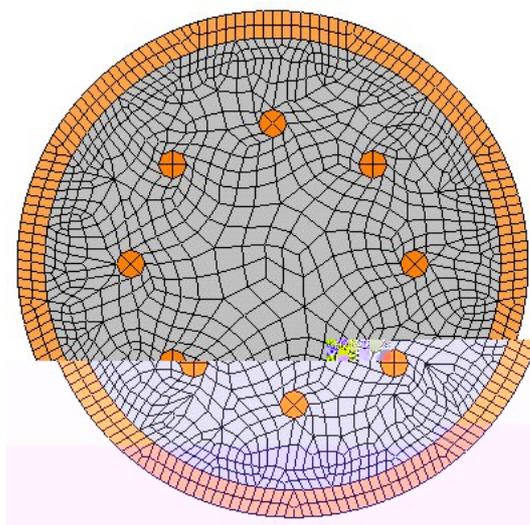


FIGURA 6.19 - Malha de elementos finitos para a seção TC 355,6 × 19,1

Para esta malha, mostrada na FIG.6.19, foram obtidas as distribuições de temperatura para os pilares preenchidos por concreto convencional e por concreto refratário de alto desempenho.

A FIG.6.20 mostra a distribuição de temperatura, em graus Celsius, para o perfil TC 355,6 × 19,1 preenchido por concreto convencional.

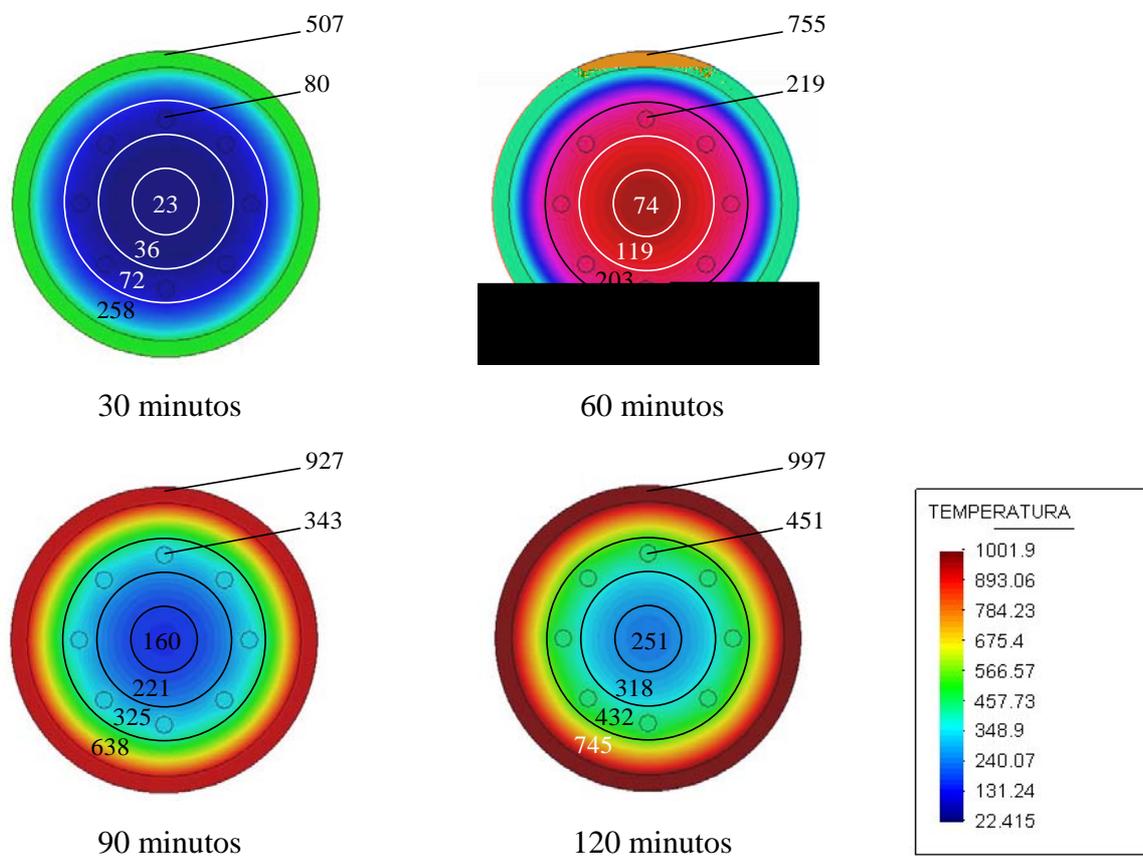


FIGURA 6.20 - Temperaturas médias (em graus Celsius) para a seção TC  $355,6 \times 19,1$  preenchida por concreto convencional

A FIG.6.21 mostra a distribuição de temperatura, em graus Celsius, para o perfil TC  $355,6 \times 19,1$  preenchido por concreto refratário de alto desempenho.

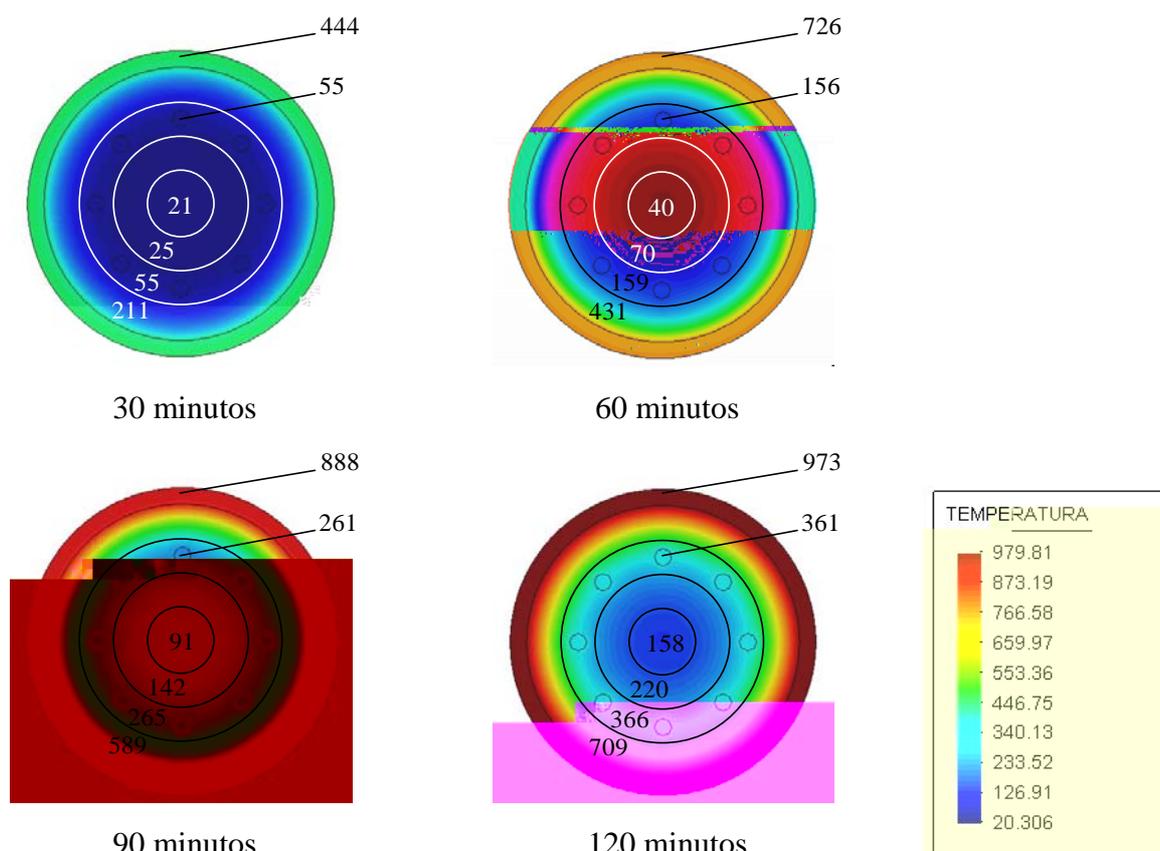


FIGURA 6.21 - Temperaturas médias (em graus Celsius) para a seção TC 355,6 × 19,1 preenchida por concreto refratário de alto desempenho

A partir destas distribuições de temperatura apresentadas para cada tempo requerido de resistência ao fogo, foram obtidos os valores da força normal resistente de cálculo para o pilar estudado. Os valores são apresentados na TAB.6.8:

TABELA 6.8 - Resistência à compressão de cálculo para o pilar TC 355,6 × 19,1

Situação de dimensionamento	Resistência de Cálculo (kN)	
	Concreto Convencional	CRAD
Temperatura ambiente	7615	10872
TRRF = 30 min	7631	12994
TRRF = 60 min	3583	7363
TRRF = 90 min	2609	5483
TRRF = 120 min	2215	4724

A FIG.6.22 apresenta os valores obtidos para as forças normais resistentes de cálculo para o pilar composto pela seção  $TC\ 355,6 \times 19,1$ .

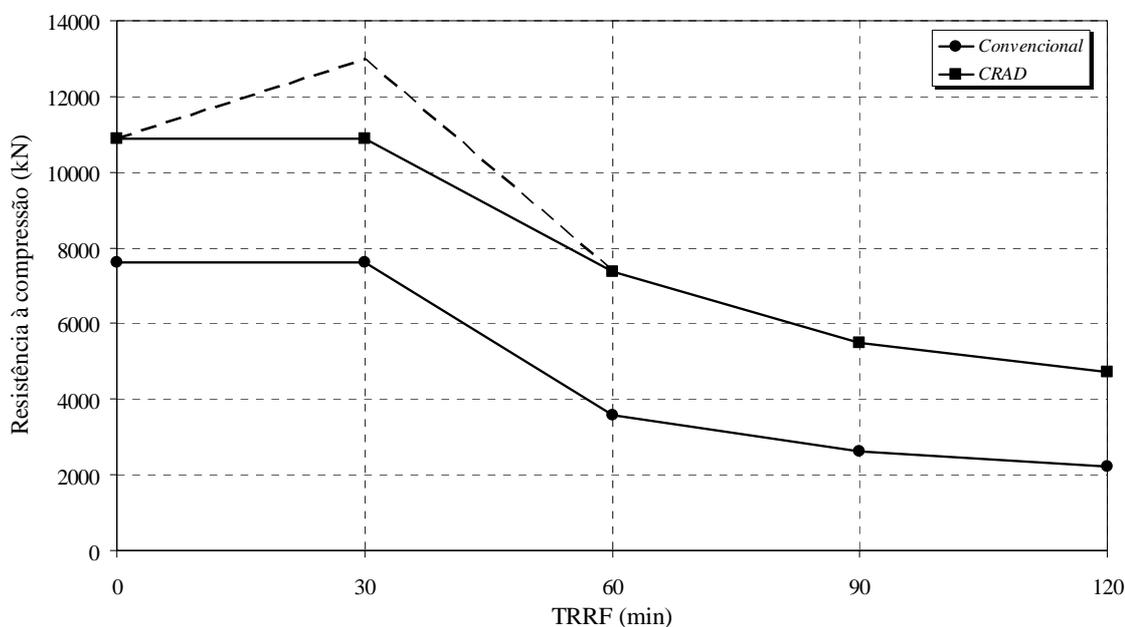


FIGURA 6.22 - Forças normais resistentes de cálculo em função do tempo de resistência ao fogo para o pilar  $TC\ 355,6 \times 19,1$

Da mesma forma do que para os pilares circulares com 279,1 mm de diâmetro, para avaliar a influência da espessura de aço na distribuição de temperatura das seções transversais dos pilares preenchidos com concreto refratário de alto desempenho submetidos a incêndio, fez-se uma comparação das temperaturas no núcleo central de concreto. Tal comparação é apresentada na TAB.6.9:

TABELA 6.9 - Comparação das temperaturas do núcleo central de concreto dos pilares circulares com diâmetro de 355,6 mm preenchidos com CRAD

Pilar preenchido com CRAD	Temperatura do núcleo (°C)			
	30 min	60 min	90 min	120 min
TC 355,6 × 9,5	20	37	82	142
TC 355,6 × 19,1	21	40	91	158
Diferença	5,0%	8,1%	11,0%	11,3%

Da mesma forma do que para os pilares circulares com 279,1 mm de diâmetro, foi feita uma avaliação da influência da espessura de aço do perfil metálico para os perfis com diâmetro de 355,6 mm. O resultado é apresentado na TAB.6.10 e na FIG.6.23.

TABELA 6.10 - Resistência à compressão de cálculo para os pilares com diâmetro de 355,6 mm preenchidos com CRAD

Situação de dimensionamento	$t = 9,5 \text{ mm}$	$t = 19,1 \text{ mm}$	Diferença (kN)	Diferença (%)
Temperatura ambiente	8816	10872	2056	23,32
30 min de incêndio	10629	12994	2365	22,25
60 min de incêndio	9171	7363	-1808	-19,71
90 min de incêndio	5884	5483	-401	-6,82
120 min de incêndio	5113	4724	-389	-7,61

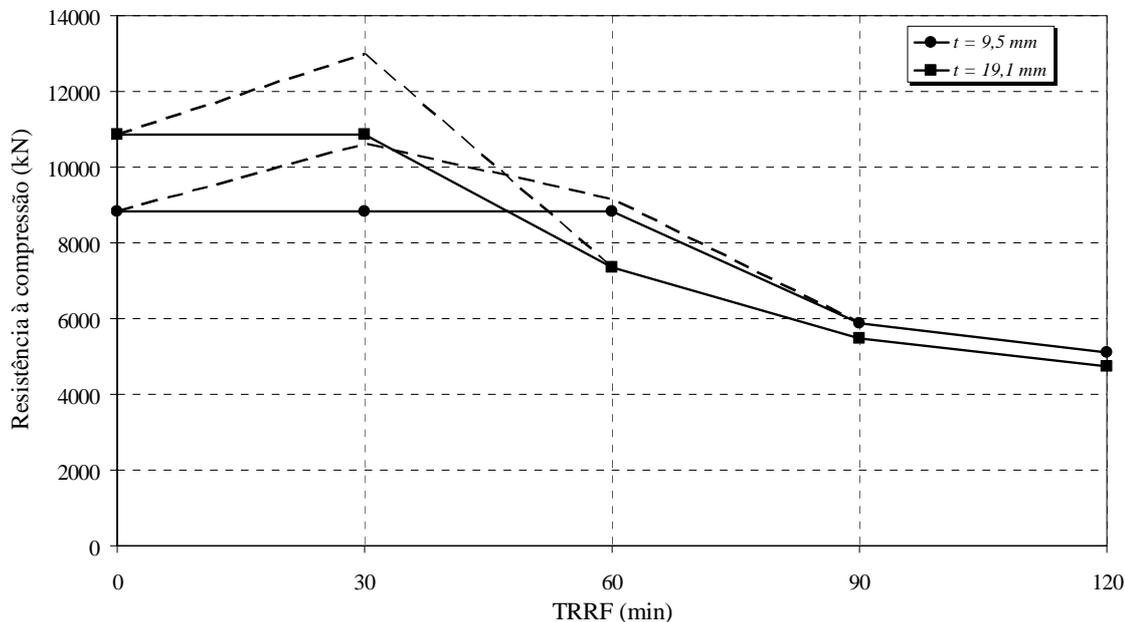
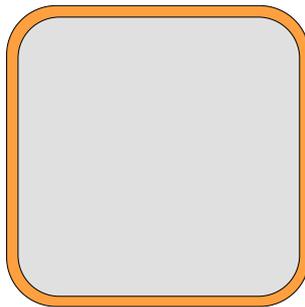


FIGURA 6.23 - Resistência à compressão de cálculo para os pilares com diâmetro de 355,6 mm preenchidos com concreto refratário de alto desempenho

## 6.4 - Pilares de seção retangular

### 6.4.1 - TR 225,0 × 225,0 × 7,9

A armadura da seção é composta por 4 barras de 16,0 mm de diâmetro, dispostas conforme o exposto na FIG.6.24:



Para esta malha, mostrada na FIG.6.25, foram obtidas as distribuições de temperatura para os pilares preenchidos por concreto convencional e por concreto refratário de alto desempenho.

A FIG.6.26 mostra a distribuição de temperatura, em graus Celsius, para o perfil TR 225,0 × 225,0 × 7,9 preenchido por concreto convencional.

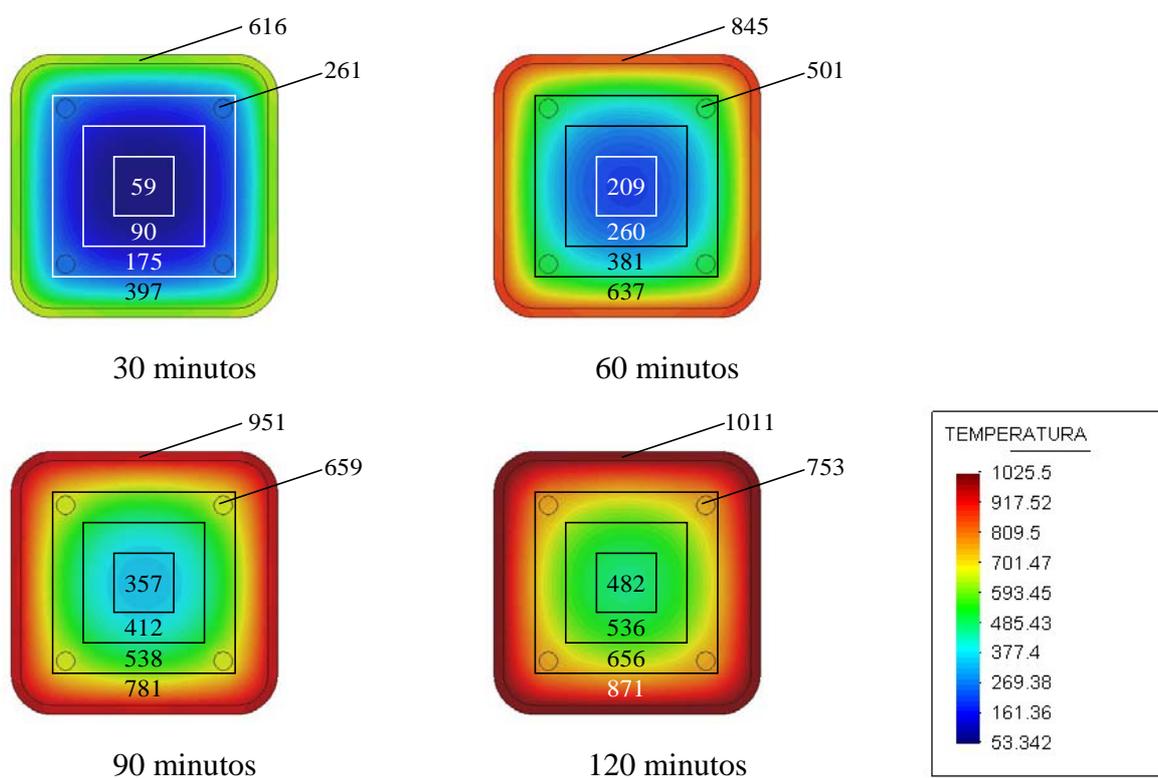


FIGURA 6.26 - Temperaturas médias (em graus Celsius) para a seção TR 225,0 × 225,0 × 7,9 preenchida por concreto convencional

A FIG.6.27 mostra a distribuição de temperatura, em graus Celsius, para o perfil TR 225,0 × 225,0 × 7,9 preenchido por concreto refratário de alto desempenho.

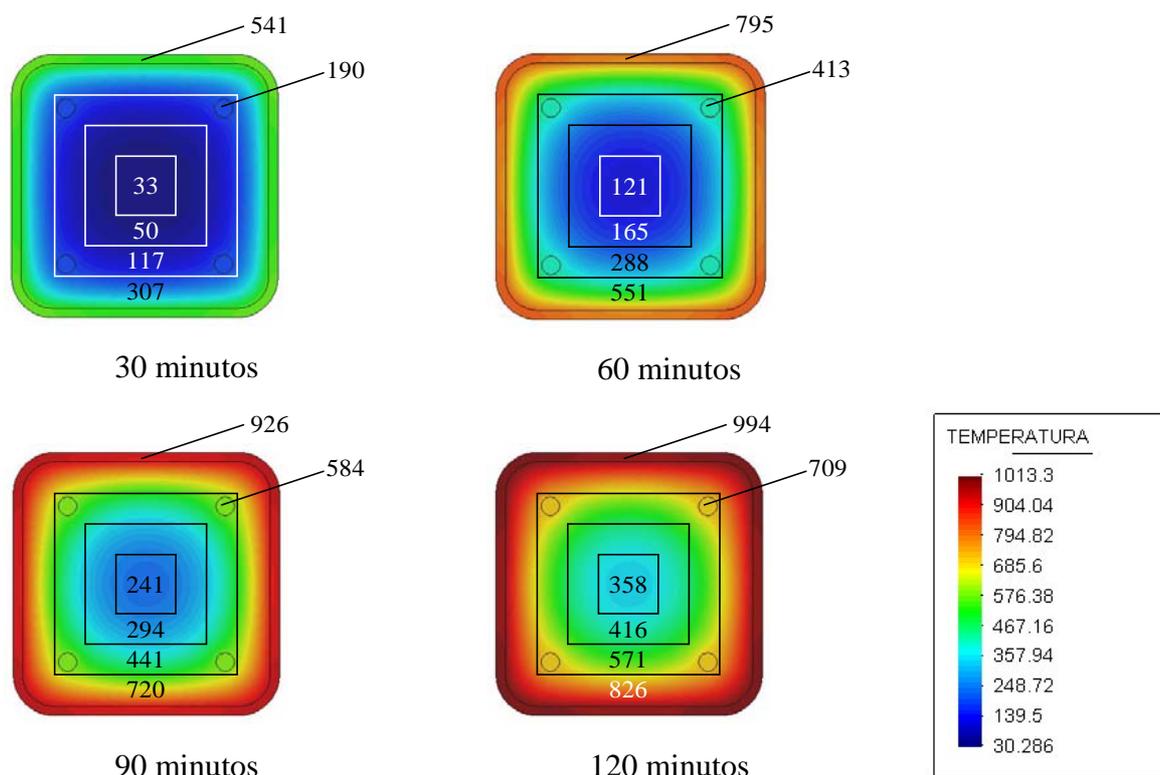


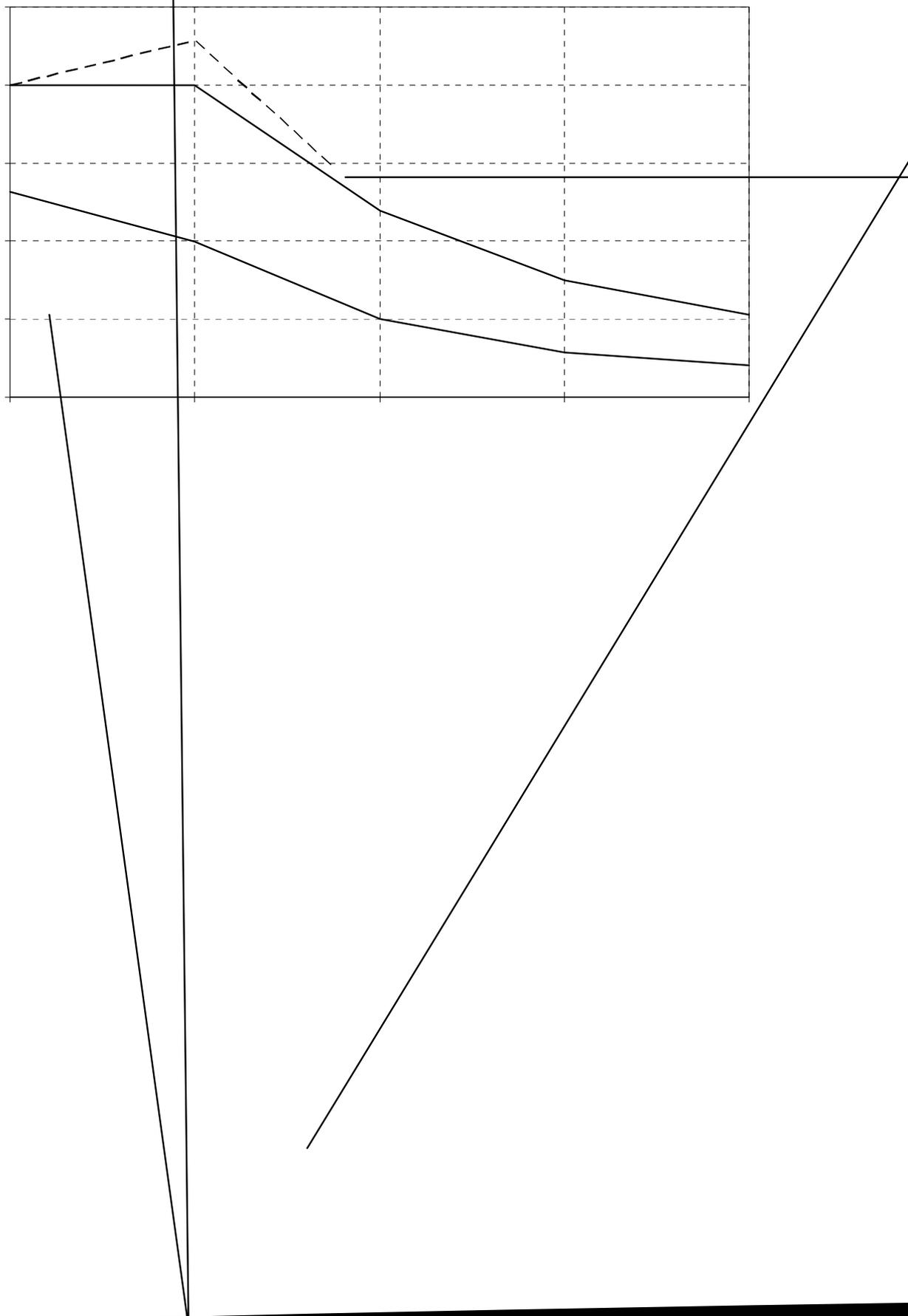
FIGURA 6.27 - Temperaturas médias (em graus Celsius) para a seção TR 225,0 x 225,0 x 7,9 preenchida por concreto refratário de alto desempenho

A partir destas distribuições de temperatura apresentadas para cada tempo requerido de resistência ao fogo, foram obtidos os valores da força normal resistente de cálculo para o pilar estudado. Os valores são apresentados na TAB.6.11:

TABELA 6.11 - Resistência à compressão de cálculo para o pilar TR 225,0 x 225,0 x 7,9

Situação de dimensionamento	Resistência de Cálculo (kN)	
	Concreto Convencional	CRAD
Temperatura ambiente	2628	3994
TRRF = 30 min	1996	4570
TRRF = 60 min	998	2385
TRRF = 90 min	577	1499
TRRF = 120 min	409	1055

A FIG.6.28 apresenta os valores obtidos para as forças normais resistentes de cálculo para o pilar composto pela seção TR 225,0 × 225,0 × 7,9.



Para esta seção transversal, foi gerada uma malha com 1265 nós e 1188 elementos lineares quadrilaterais, mostrada na FIG.6.30:

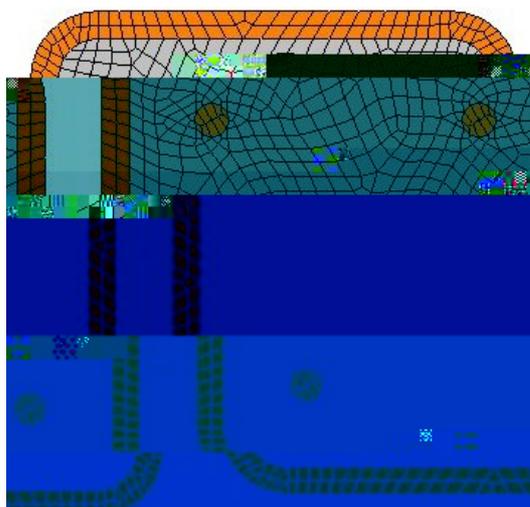


FIGURA 6.30 - Malha de elementos finitos para a seção TR 255,0 × 255,0 × 12,7

Para esta malha, mostrada na FIG.6.30, foram obtidas as distribuições de temperatura para os pilares preenchidos por concreto convencional e por concreto refratário de alto desempenho.

A FIG.6.31 mostra a distribuição de temperatura, em graus Celsius, para o perfil TR 225,0 × 225,0 × 12,7 preenchido por concreto convencional.

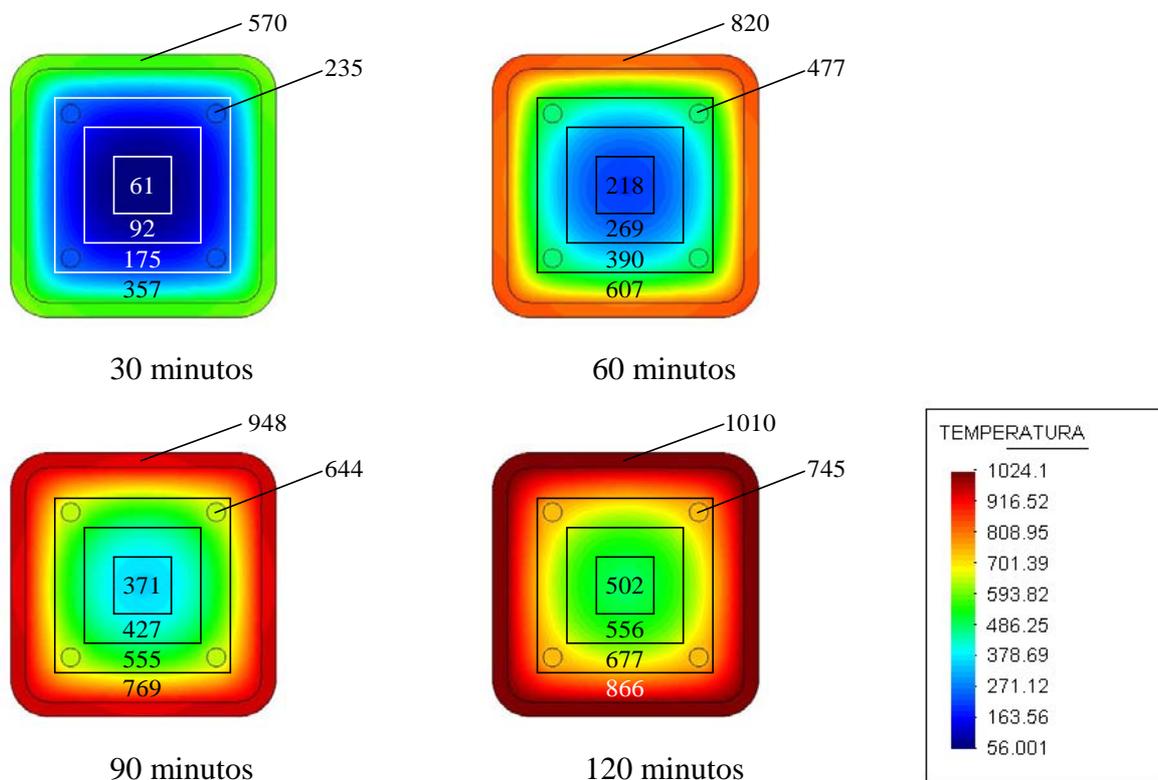


FIGURA 6.31 - Temperaturas médias (em graus Celsius) para a seção TR 225,0 × 225,0 × 12,7 preenchida por concreto convencional

A FIG.6.32 mostra a distribuição de temperatura, em graus Celsius, para o perfil TR 225,0 × 225,0 × 12,7 preenchido por concreto refratário de alto desempenho.

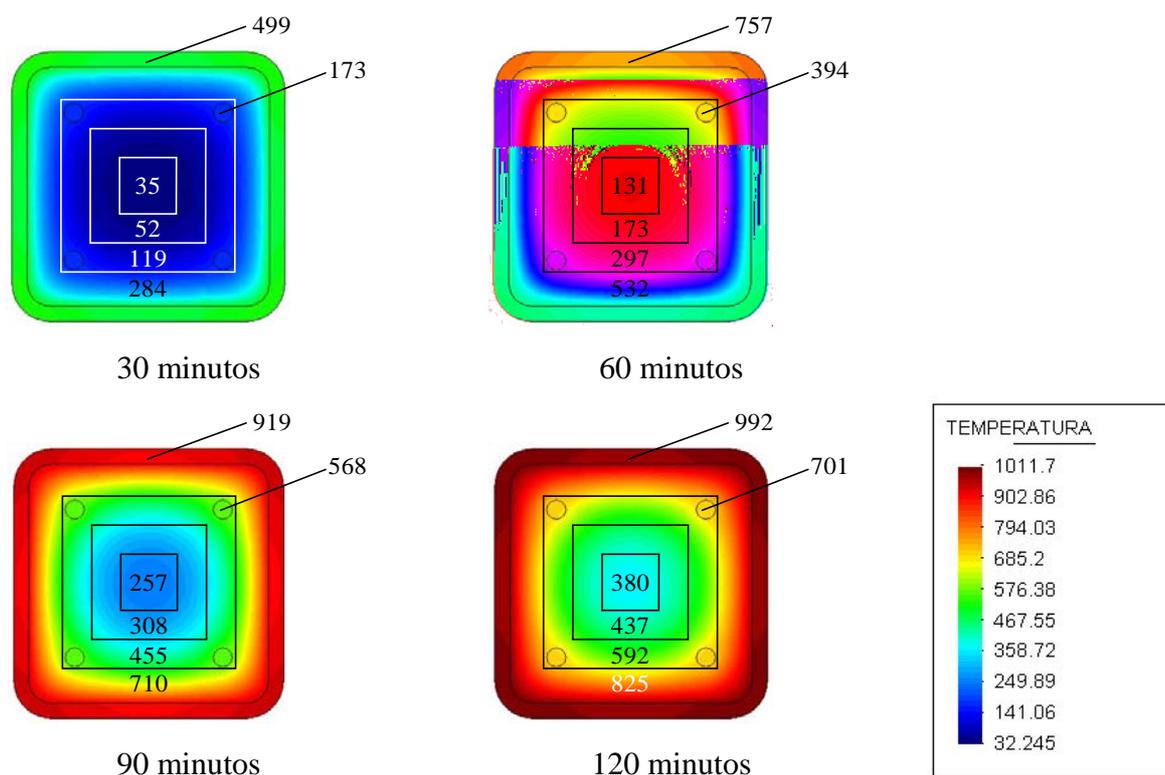


FIGURA 6.32 - Temperaturas médias (em graus Celsius) para a seção TR 225,0 × 225,0 × 7,9 preenchida por concreto refratário de alto desempenho

A partir destas distribuições de temperatura apresentadas para cada tempo requerido de resistência ao fogo, foram obtidos os valores da força normal resistente de cálculo para o pilar estudado. Os valores são apresentados na TAB.6.12:

TABELA 6.12 - Resistência à compressão de cálculo para o pilar TR 225,0 × 225,0 × 12,7

Situação de dimensionamento	Resistência de Cálculo (kN)	
	Concreto Convencional	CRAD
Temperatura ambiente	3513	4839
TRRF = 30 min	2823	5541
TRRF = 60 min	1129	2607
TRRF = 90 min	634	1573
TRRF = 120 min	434	1104

A FIG.6.33 apresenta os valores obtidos para as forças normais resistentes de cálculo para o pilar composto pela seção TR 225,0 × 225,0 × 12,7.

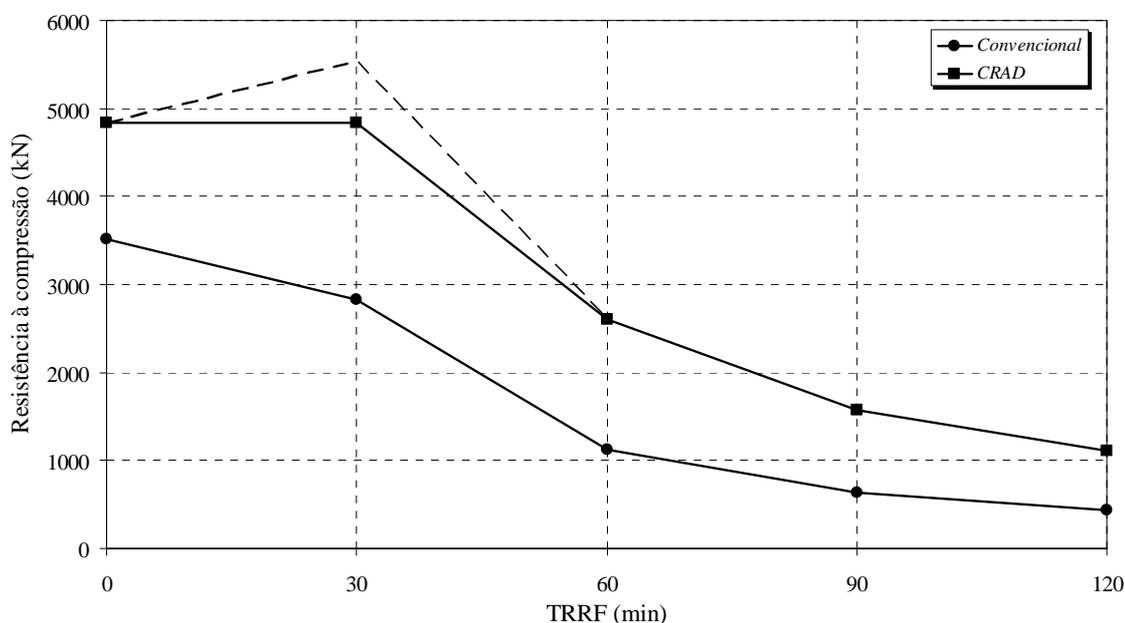


FIGURA 6.33 - Forças normais resistentes de cálculo em função do tempo de resistência ao fogo para o pilar TR 225,0 × 225,0 × 12,7

Da mesma forma do que para os pilares circulares, para avaliar a influência da espessura de aço na distribuição de temperatura das seções transversais dos pilares preenchidos com concreto refratário de alto desempenho submetidos a incêndio, fez-se uma comparação das temperaturas no núcleo central de concreto. Tal comparação é apresentada na TAB.6.13:

TABELA 6.13 - Comparação das temperaturas do núcleo central de concreto dos pilares quadrados com lado de 225,0 mm preenchidos com CRAD

Pilar preenchido com CRAD	Temperatura do núcleo (°C)			
	30 min	60 min	90 min	120 min
TR 225,0 × 225,0 × 7,9	33	121	241	358
TR 225,0 × 225,0 × 12,7	35	131	257	380
Diferença	6,1%	8,3%	6,6%	6,1%

Da mesma forma do que para os pilares circulares, foi feita uma avaliação da influência da espessura de aço do perfil metálico para os perfis quadrados com lado de 225,0 mm. O resultado é apresentado na TAB.6.14 e na FIG.6.34.

TABELA 6.14 - Resistência à compressão de cálculo para os pilares quadrados com lado de 225,0 mm preenchidos com CRAD

Situação de dimensionamento	$t = 7,9 \text{ mm}$	$t = 12,7 \text{ mm}$	Diferença (kN)	Diferença (%)
Temperatura ambiente	3994	4839	845	21,16
30 min de incêndio	4570	5541	971	21,25
60 min de incêndio	2385	2607	222	9,31
90 min de incêndio	1499	1573	74	4,94
120 min de incêndio	1055	1104	49	4,64

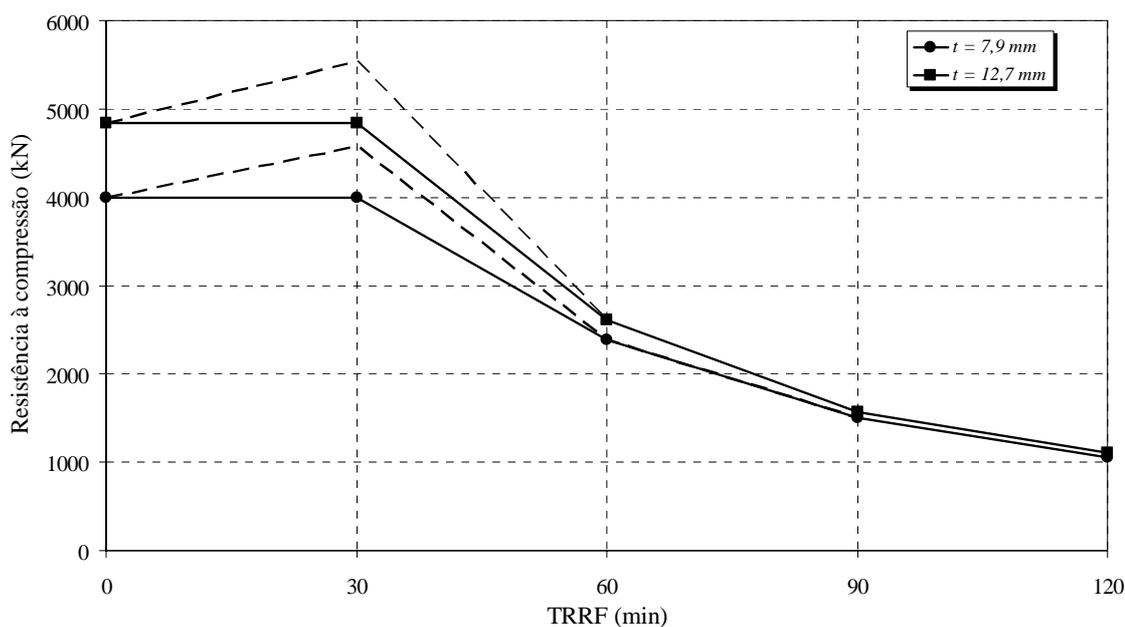


FIGURA 6.34 - Forças normais resistentes de cálculo para os pilares quadrados com lado de 225,0 mm preenchidos por concreto refratário de alto desempenho

#### 6.4.3 - TR 360,0 × 225,0 × 8,4

A armadura da seção é composta por 6 barras de 16,0 mm de diâmetro, dispostas conforme o exposto na FIG.6.35:

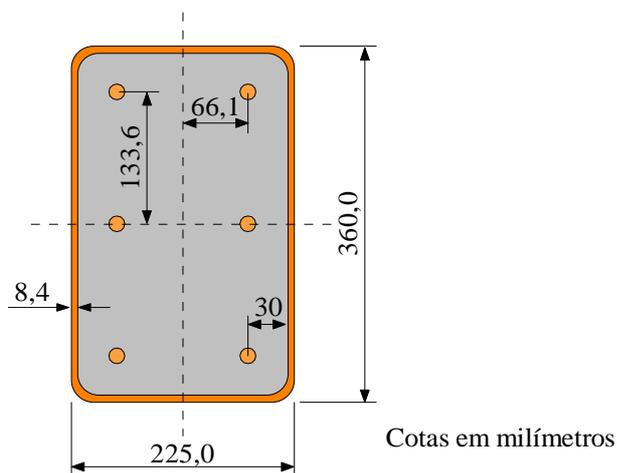


FIGURA 6.35 - Distribuição da armadura na seção TR 360,0 × 225,0 × 8,4

Para esta seção transversal, foi gerada uma malha com 1535 nós e 1460 elementos lineares quadrilaterais, mostrada na FIG.6.36:

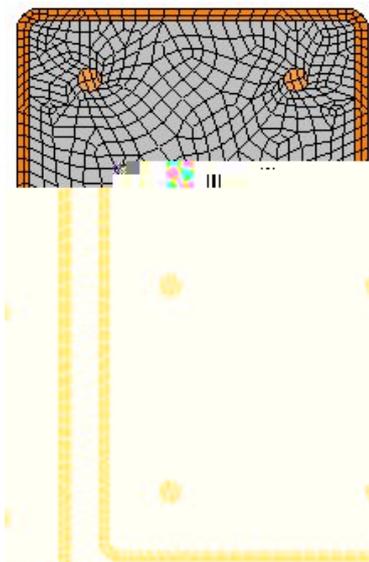


FIGURA 6.36 - Malha de elementos finitos para a seção TR 360,0 × 225,0 × 8,4

Para esta malha, mostrada na FIG.6.36, foram obtidas as distribuições de temperatura para os pilares preenchidos por concreto convencional e por concreto refratário de alto desempenho.

A FIG.6.37 mostra a distribuição de temperatura, em graus Celsius, para o perfil TR 360,0 × 225,0 × 8,4 preenchido por concreto convencional.

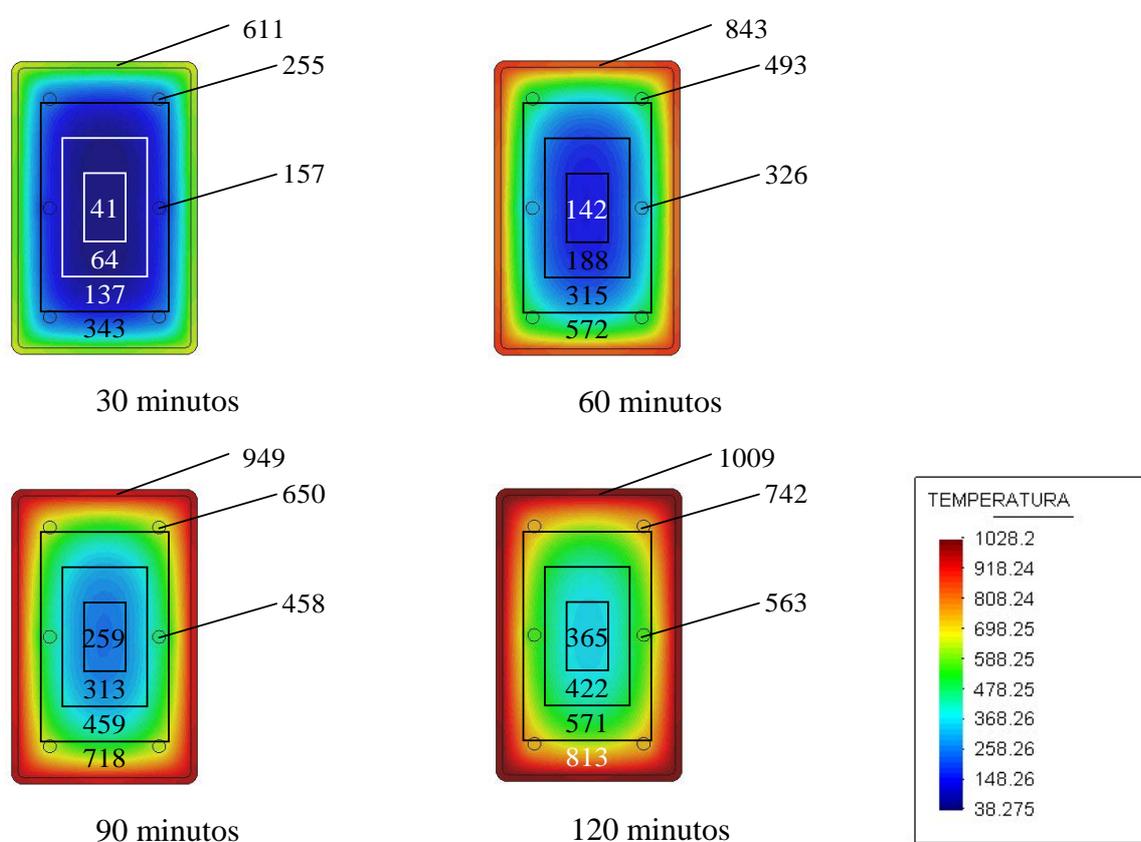


FIGURA 6.37 - Temperaturas médias (em graus Celsius) para a seção TR 360,0 × 225,0 × 8,4 preenchida por concreto convencional

A FIG.6.38 mostra a distribuição de temperatura, em graus Celsius, para o perfil TR 360,0 × 225,0 × 8,4 preenchido por concreto refratário de alto desempenho.

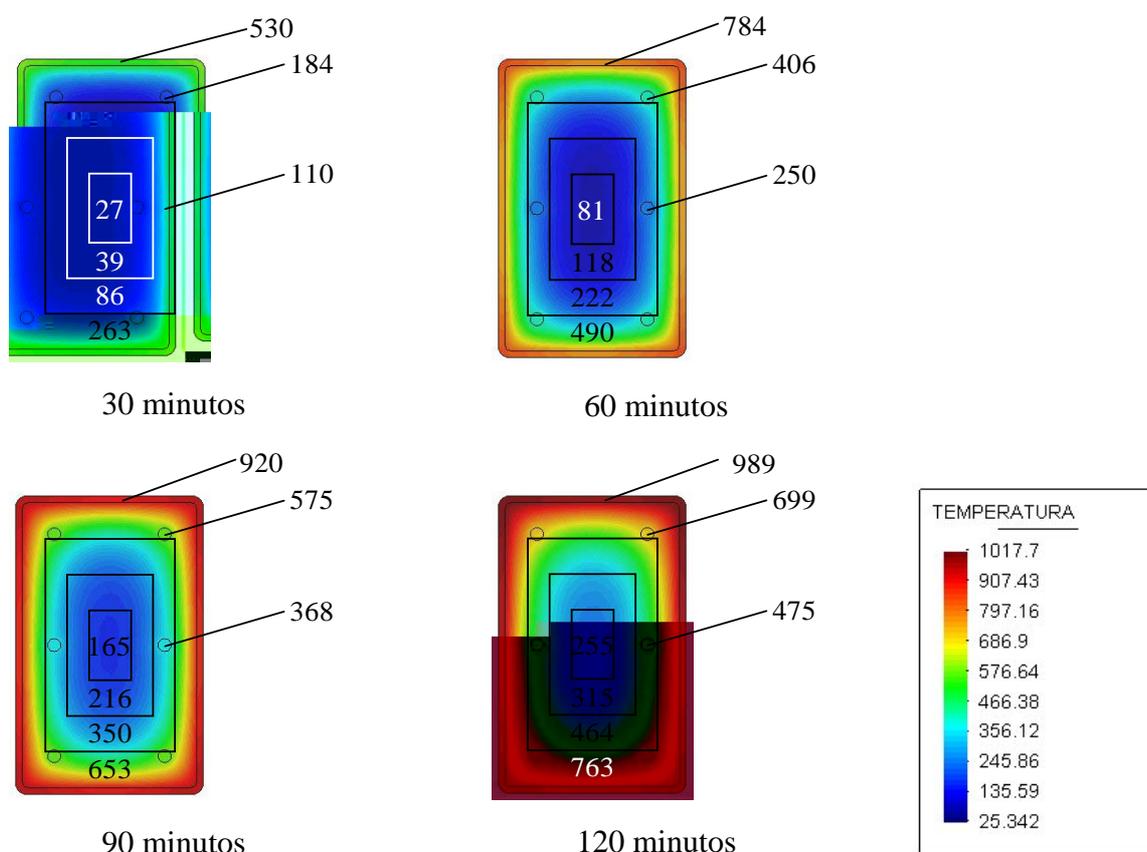


FIGURA 6.38 - Temperaturas médias (em graus Celsius) para a seção TR 360,0 × 225,0 × 8,4 preenchida por concreto refratário de alto desempenho

A partir destas distribuições de temperatura apresentadas para cada tempo requerido de resistência ao fogo, foram obtidos os valores da força normal resistente de cálculo para o pilar estudado. Os valores são apresentados na TAB.6.15:

TABELA 6.15 - Resistência à compressão de cálculo para o pilar TR 360,0 × 225,0 × 8,4

Situação de dimensionamento	Resistência de Cálculo (kN)	
	Concreto Convencional	CRAD
Temperatura ambiente	4034	6345
TRRF = 30 min	3212	7537
TRRF = 60 min	1734	4275
TRRF = 90 min	1154	2901
TRRF = 120 min	861	2253

A FIG.6.39 apresenta os valores obtidos para as forças normais resistentes de cálculo para o pilar composto pela seção TR 225,0 × 225,0 × 12,7.

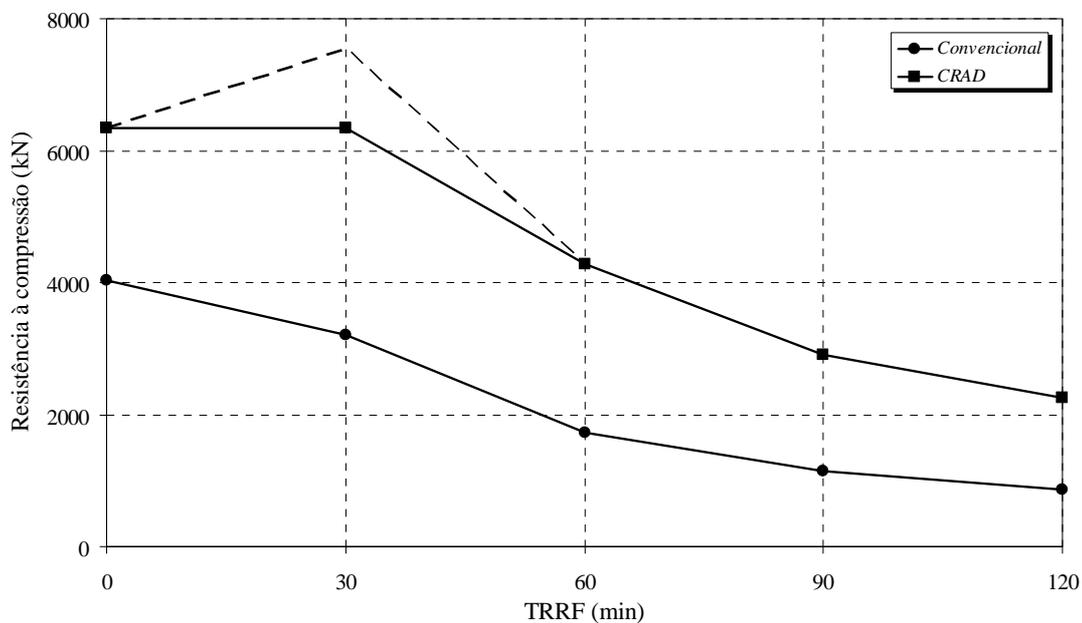


FIGURA 6.39 - Forças normais resistentes de cálculo em função do tempo de resistência ao fogo para o pilar TR 360,0 × 225,0 × 8,4

#### 6.4.4 - TR 360,0 × 225,0 × 12,7

A armadura da seção é composta por 6 barras de 16,0 mm de diâmetro, dispostas conforme o exposto na FIG.6.40:

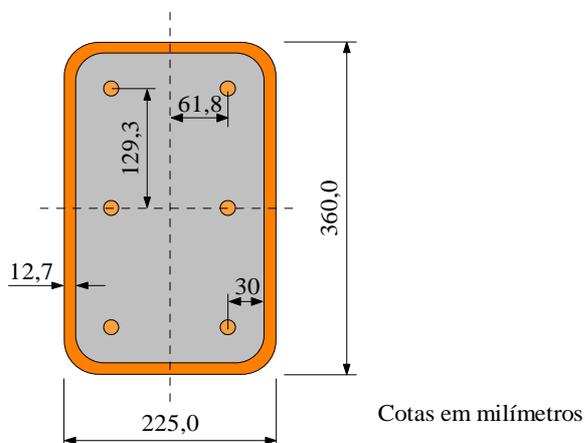


FIGURA 6.40 - Distribuição da armadura na seção TR 360,0 × 225,0 × 12,7

Para esta seção transversal, foi gerada uma malha com 1463 nós e 1380 elementos lineares quadrilaterais, mostrada na FIG.6.41:

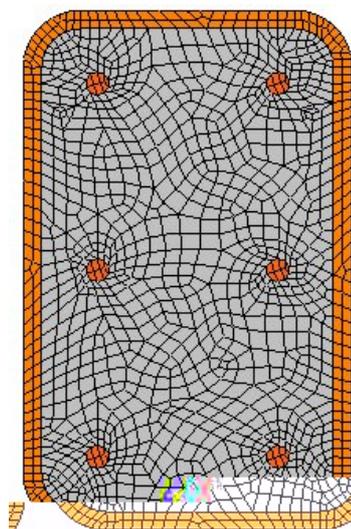


FIGURA 6.41 - Malha de elementos finitos para a seção TR 360,0 × 255,0 × 12,7

Para esta malha, mostrada na FIG.6.41, foram obtidas as distribuições de temperatura para os pilares preenchidos por concreto convencional e por concreto refratário de alto desempenho.

A FIG.6.42 mostra a distribuição de temperatura, em graus Celsius, para o perfil TR 360,0 × 225,0 × 12,7 preenchido por concreto convencional.

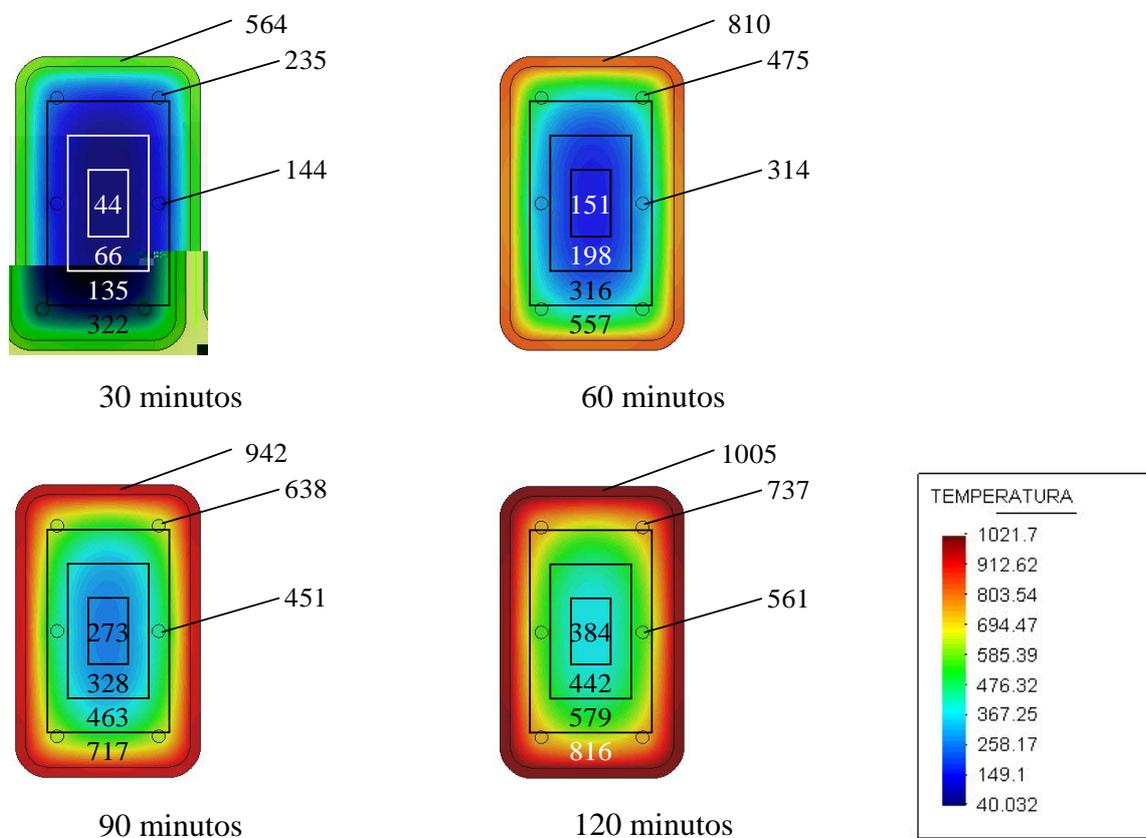


FIGURA 6.42 - Temperaturas médias (em graus Celsius) para a seção TR 360,0 × 225,0 × 12,7 preenchida por concreto convencional

A FIG.6.43 mostra a distribuição de temperatura, em graus Celsius, para o perfil TR 360,0 × 225,0 × 12,7 preenchido por concreto refratário de alto desempenho.

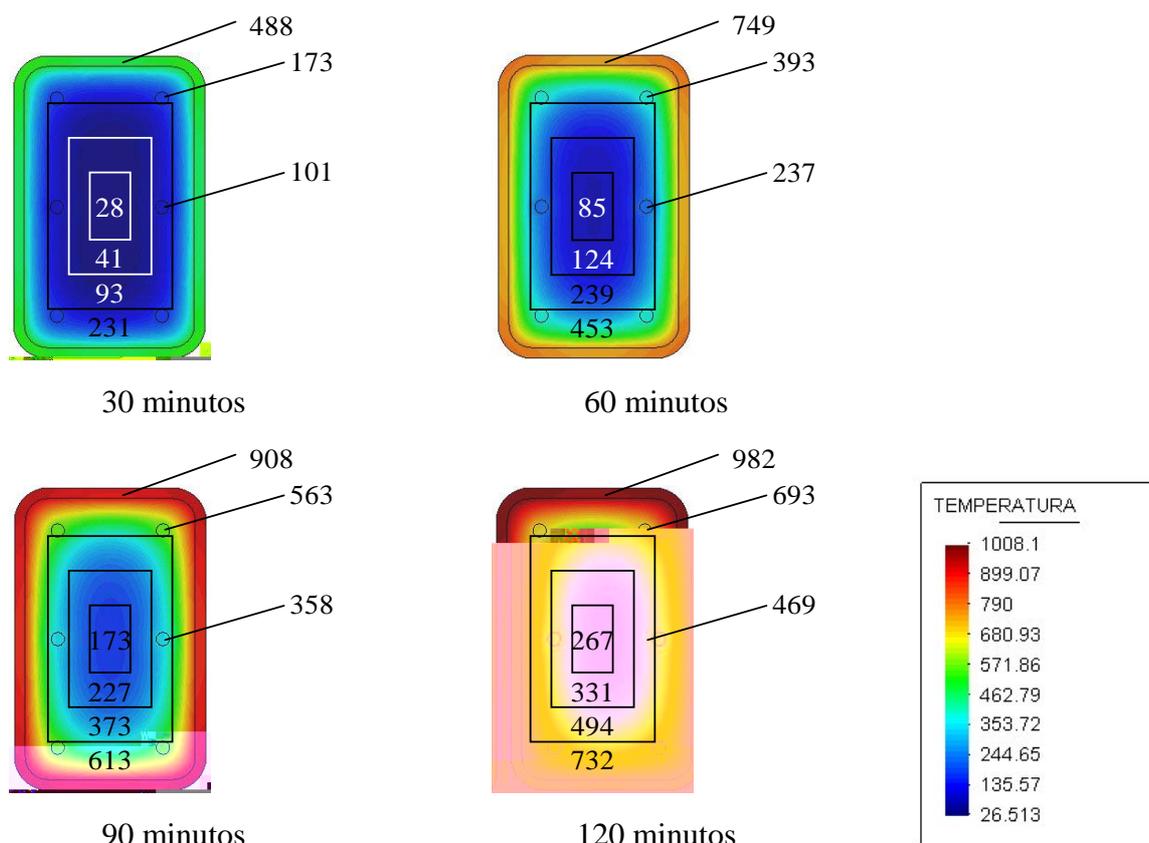


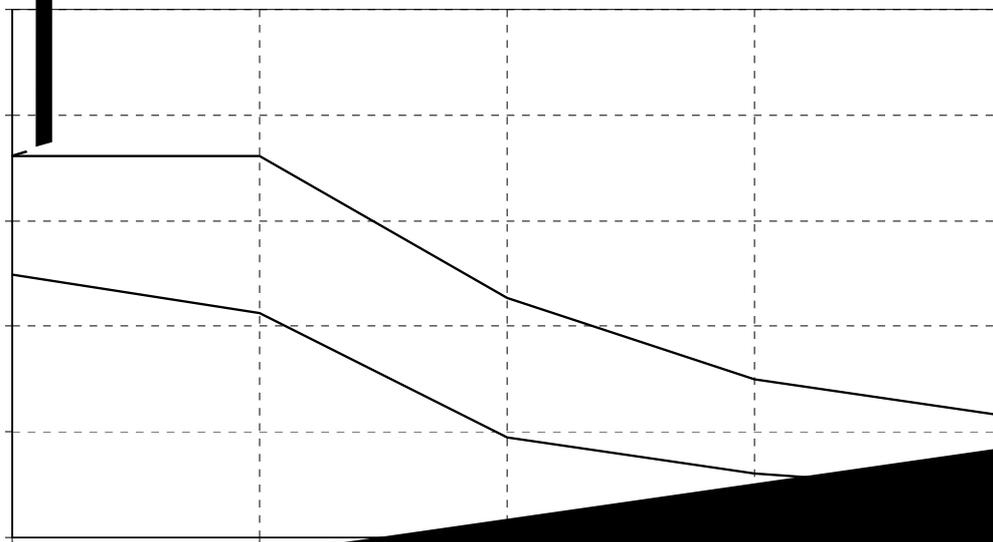
FIGURA 6.43 - Temperaturas médias (em graus Celsius) para a seção TR 360,0 × 225,0 × 7,9 preenchida por concreto refratário de alto desempenho

A partir destas distribuições de temperatura apresentadas para cada tempo requerido de resistência ao fogo, foram obtidos os valores da força normal resistente de cálculo para o pilar estudado. Os valores são apresentados na TAB.6.16:

TABELA 6.16 - Resistência à compressão de cálculo para o pilar TR 360,0 × 225,0 × 12,7

Situação de dimensionamento	Resistência de Cálculo (kN)	
	Concreto Convencional	CRAD
Temperatura ambiente	4978	7231
TRRF = 30 min	4242	8664
TRRF = 60 min	1886	4548
TRRF = 90 min	1211	2987
TRRF = 120 min	888	2314

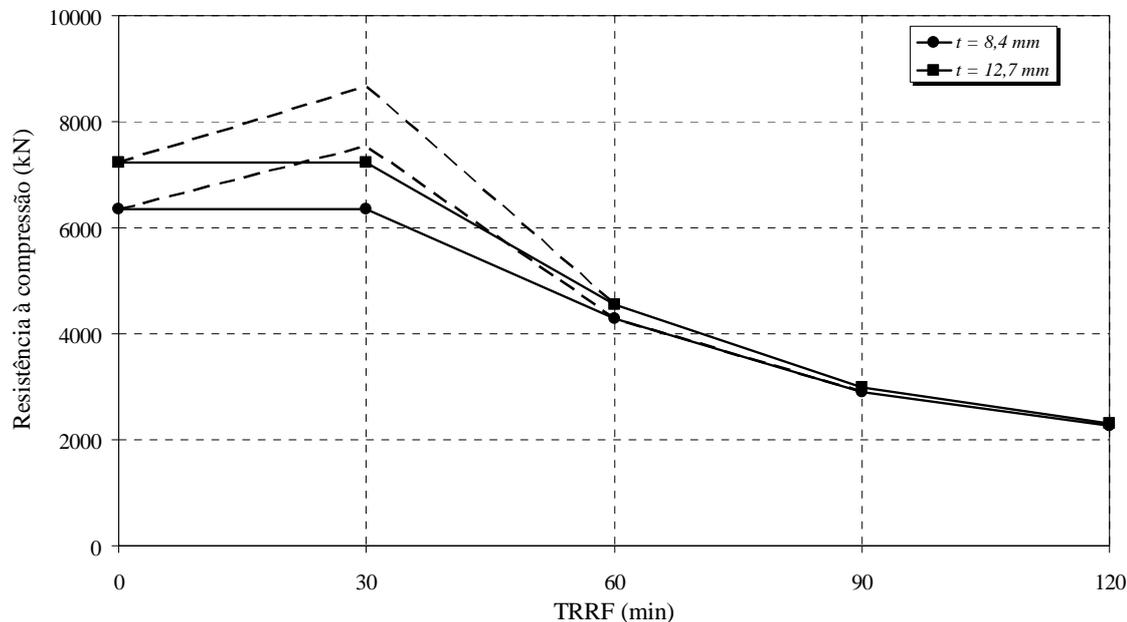
A FIG. 44 apresenta os valores obtidos para as forças normais resistentes de cálculo para o pilar composto pela seção TR  $360,0 \times 225,0 \times 12,7$ .



Da mesma forma do que para os pilares circulares, foi feita uma avaliação da influência da espessura de aço do perfil metálico para os perfis retangulares com lados de 360,0 mm e 225,0 mm. O resultado é apresentado na TAB.6.18 e na FIG.6.45.

TABELA 6.18 - Resistência à compressão de cálculo para os pilares retangulares com lados de 360,0 mm e 225,0 mm preenchidos com CRAD

Situação de dimensionamento	$t = 8,4 \text{ mm}$	$t = 12,7 \text{ mm}$	Diferença (kN)	Diferença (%)
Temperatura ambiente	6345	7231	886	13,96
30 min de incêndio	7537	8664	1127	14,95
60 min de incêndio	4275	4548	273	6,39
90 min de incêndio	2901	2987	86	2,96
120 min de incêndio	2253	2314	61	2,71



As seções com maiores espessuras de parede do perfil de aço, ou seja, as com menores áreas de concreto, apresentaram resistência inferior às seções de mesmo diâmetro porém com menor espessura da parede de aço do perfil. E outro ponto importante que contribui para essa menor resistência é o fato de que as seções com menores áreas de concreto apresentam maiores temperaturas em seu núcleo, conseqüentemente há maior degradação das propriedades mecânicas dos materiais.

# 7

## MÉTODO TABULAR PARA O DIMENSIONAMENTO DE PILARES PREENCHIDOS COM CRAD

### 7.1 - Considerações preliminares

Neste capítulo apresenta-se o método tabular para o dimensionamento simplificado de pilares mistos preenchidos com concreto refratário de alto desempenho. Tal método será desenvolvido de maneira semelhante ao método tabular apresentado no texto-base de revisão da NBR 14323 (2003) para o dimensionamento de pilares mistos preenchidos por concreto convencional.

Assim como no Capítulo 6, para este estudo, a temperatura média de cada parte da seção transversal será determinada usando o programa *THERSYS* desenvolvido por RIBEIRO (2004). A distribuição de temperatura e a geometria do pilar serão os dados de entrada para o programa PCRAD 1.0, que irá determinar a força normal resistente de cálculo de cada pilar.

## 7.2 - Condições do problema

A tabela é válida para o dimensionamento de pilares submetidos a cargas axiais desde que:

- a) a estrutura seja contraventada;
- b) o incêndio seja limitado somente a um andar e neste andar, o pilar esteja submetido à temperatura uniforme ao longo de seu comprimento;
- c) os pilares possuam comprimento máximo menor do que 30 vezes a menor dimensão externa da seção transversal.

Para o uso do método tabular para pilares preenchidos com o concreto refratário de alto desempenho, deve-se determinar o nível de carga como sendo:

$$\eta_{fi} = \frac{N_{fi,Sd}}{N_{Rd}} \quad (7.1)$$

onde:

$N_{fi,Sd}$  é a força normal de compressão solicitante de cálculo no pilar em situação de incêndio;

$N_{Rd}$  é a força normal de compressão resistente de cálculo à temperatura ambiente, considerando o comprimento de flambagem adequado.

Na determinação de  $N_{Rd}$  e de  $N_{fi,Sd} = \eta_{fi} N_{Rd}$ , ao se usar o método, as seguintes regras se aplicam:

- A espessura  $t$  da parede do perfil de aço não pode exceder  $1/25$  de  $b_c$  ou de  $d_c$ , o que for menor e a do perfil tubular,  $1/25$  de  $d$ ;
- Taxas de armaduras maiores que 3% não podem ser levadas em conta;
- O aço da armadura deve ser o CA-50 ou equivalente.

Neste trabalho, será elaborada uma tabela, sendo os pilares dimensionados considerando o aço do perfil estrutural com as seguintes resistências ao escoamento: 300 MPa e 350 MPa.

O concreto refratário de alto desempenho deverá ter as mesmas características do apresentado no Capítulo 3 deste trabalho.

A parte interna da seção preenchida com concreto refratário de alto desempenho foi dividida em 4 coroas (circulares ou quadradas) de igual espessura. Para cada coroa foi determinada a temperatura média correspondente ao tempo de incêndio determinado.

Para a determinação das dimensões mínimas que cada seção deve ter em função do tempo requerido de resistência ao fogo, do nível de carga máximo, da taxa de armadura mínima e da distância mínima entre a face interna do perfil de aço às barras da armadura transversal, na EQ.7.1, a força normal de compressão solicitante de cálculo no pilar em situação de incêndio é substituída pela força normal de compressão resistente de cálculo em situação de incêndio.

Assumindo que o Método dos Estados Limites deve ser respeitado, tem-se que a seguinte condição deve ser respeitada:

$$N_{fi,Sd} \leq N_{fi,Rd} \quad (7.2)$$

Para que se possa fazer dimensionamento dos pilares de forma segura, deve-se garantir que o nível de carga máximo, para cada situação, não ultrapasse o seguinte critério:

$$\eta_{fi} \leq \frac{N_{fi,Rd}}{N_{Rd}} \quad (7.3)$$

Para a elaboração da tabela vários pilares foram verificados de modo a serem agrupados por tempo requerido de resistência ao fogo e nível de carga. Os tempos requeridos de resistência ao fogo considerados foram de 30, 60, 90 e 120 minutos e os níveis de carga desejados foram de 0,3; 0,5 e 0,7, assim como no texto base de revisão da NBR 14323 (2003). As verificações foram feitas de modo a obter seções que melhor se aproximassem, a favor da segurança, dos níveis de carga desejados.

### 7.3 - Perfis com resistência ao escoamento de 300 MPa e 350 MPa preenchidos com Concreto Refratário de Alto Desempenho

#### 7.3.1 - Seção 100 × 100 × 4,0 mm

São dados utilizados para a análise da seção:

- Tempo requerido de resistência ao fogo de 30 min;
- Taxa de armadura de 0%;
- Nível de carga mínimo esperado: 0,30;
- Comprimento: 3,00 m;
- Comprimento de flambagem em situação de incêndio: 1,50 m.

A TAB.7.1 apresenta a distribuição de temperatura nas seções circular e quadrada de um pilar composto por um perfil de aço de 100 × 100 × 4,0 mm preenchido por CRAD.

TABELA 7.1 - Distribuição de temperatura na seção 100 × 100 × 4,0

Parte da Seção	Dimensão (mm)	Temperatura (°C)	
		Seção Quadrada	Seção Circular
Perfil de Aço	100 × 100 × 4,0	660	654
Armadura	-	-	-
Coroa 1	92,0	554	576
Coroa 2	69,0	409	423
Coroa 3	46,0	312	338
Coroa 4	23,0	266	303

Com base nas características descritas anteriormente e na distribuição de temperatura da TAB.7.1 têm-se as seguintes resistências à compressão em temperatura ambiente e em situação de incêndio, apresentadas na TAB.7.2.

TABELA 7.2 - Resistências à compressão do pilar  
constituído pela seção  $100 \times 100 \times 4,0$

Limite de Escoamento do Aço do Perfil	Geometria da Seção	Resistência à Compressão em Temperatura Ambiente - $N_{Rd}$ (kN)	Resistência à Compressão em Situação de Incêndio - $N_{fi,Rd}$ (kN)	Nível de Carga Real ( $\eta$ )
300 MPa	Quadrada	449	310	0,69
	Circular	277	204	0,74
350 MPa	Quadrada	459	315	0,69
	Circular	282	207	0,73

### 7.3.2 - Seção $120 \times 120 \times 4,8$ mm

São dados utilizados para a análise da seção:

- Tempo requerido de resistência ao fogo de 30 min;
- Taxa de armadura de 0%;
- Nível de carga mínimo esperado: 0,70;
- Comprimento: 3,60 m;
- Comprimento de flambagem em situação de incêndio: 1,80 m.

A TAB.7.3 apresenta a distribuição de temperatura nas seções circular e quadrada de um pilar composto por um perfil de aço de  $120 \times 120 \times 4,8$  mm preenchido por CRAD.

TABELA 7.3 - Distribuição de temperatura na seção  $120 \times 120 \times 4,8$

Parte da Seção	Dimensão (mm)	Temperatura (°C)	
		Seção Quadrada	Seção Circular
Perfil de Aço	$120 \times 120 \times 4,8$	628	625
Armadura	-	-	-
Coroa 1	110,4	484	505
Coroa 2	82,8	380	336
Coroa 3	55,2	256	245
Coroa 4	27,6	204	213

Com base nas características descritas anteriormente e na distribuição de temperatura da TAB.7.3 têm-se as seguintes resistências à compressão em temperatura ambiente e em situação de incêndio, apresentadas na TAB.7.4.

TABELA 7.4 - Resistências à compressão do pilar  
constituído pela seção  $120 \times 120 \times 4,8$

Limite de Escoamento do Aço do Perfil	Geometria da Seção	Resistência à Compressão em Temperatura Ambiente - $N_{Rd}$ (kN)	Resistência à Compressão em Situação de Incêndio - $N_{fi,Rd}$ (kN)	Nível de Carga Real ( $\eta$ )
---------------------------------------	--------------------	--	---	--------------------------------

TABELA 7.5 - Distribuição de temperatura na seção  $150 \times 150 \times 6,0$ 

Parte da Seção	Dimensão (mm)	Temperatura (°C)	
		Seção Quadrada	Seção Circular
Perfil de Aço	$150 \times 150 \times 6,0$	845	848
Armadura	$4 \times \phi 10,0$	486	469
Coroa 1	138,0	702	707
Coroa 2	103,5	493	508
Coroa 3	69,0	381	426
Coroa 4	34,5	336	383

Com base nas características descritas anteriormente e na distribuição de temperatura da TAB.7.5 têm-se as seguintes resistências à compressão em temperatura ambiente e em situação de incêndio, apresentadas na TAB.7.6.

TABELA 7.6 - Resistências à compressão do pilar constituído pela seção  $150 \times 150 \times 6,0$

Limite de Escoamento do Aço do Perfil	Geometria da Seção	Resistência à Compressão em Temperatura Ambiente - $N_{Rd}$ (kN)	Resistência à Compressão em Situação de Incêndio - $N_{fi,Rd}$ (kN)	Nível de Carga Real ( $\eta$ )
300 MPa	Quadrada	1041	380	0,37
	Circular	652	256	0,39
350 MPa	Quadrada	1060	382	0,36
	Circular	662	257	0,39

#### 7.3.4 - Seção $220 \times 220 \times 8,8$ mm

São dados utilizados para a análise da seção:

- Tempo requerido de resistência ao fogo de 60 min;
- Taxa de armadura de 3,0%;
- Distância da face interna do perfil às barras da armadura: 30 mm;
- Nível de carga mínimo esperado: 0,50;
- Comprimento: 6,60 m;
- Comprimento de flambagem em situação de incêndio: 3,30 m.

A TAB.7.7 apresenta a distribuição de temperatura nas seções circular e quadrada de um pilar composto por um perfil de aço de  $220 \times 220 \times 8,8$  mm preenchido por CRAD.

TABELA 7.7 - Distribuição de temperatura na seção  $220 \times 220 \times 8,8$

Parte da Seção	Dimensão (mm)	Temperatura (°C)	
		Seção Quadrada	Seção Circular
Perfil de Aço	$220 \times 220 \times 8,8$	802	800
Armadura	$4 \times \phi 20,0$	393	332
Coroa 1	202,4	578	581
Coroa 2	151,8	308	336
Coroa 3	101,2	190	229
Coroa 4	50,6	135	178

Com base nas características descritas anteriormente e na distribuição de temperatura da TAB.7.7 têm-se as seguintes resistências à compressão em temperatura ambiente e em situação de incêndio, apresentadas na TAB.7.8.

TABELA 7.8 - Resistências à compressão do pilar constituído pela seção  $220 \times 220 \times 8,8$

Limite de Escoamento do Aço do Perfil	Geometria da Seção	Resistência à Compressão em Temperatura Ambiente - $N_{Rd}$ (kN)	Resistência à Compressão em Situação de Incêndio - $N_{fi,Rd}$ (kN)	Nível de Carga Real ( $\eta$ )
300 MPa	Quadrada	2346	1325	0,56
	Circular	1436	800	0,56
350 MPa	Quadrada	2387	1330	0,56
	Circular	1455	802	0,55

### 7.3.5 -

- Nível de carga mínimo esperado: 0,70;
- Comprimento: 9,00 m;
- Comprimento de flambagem em situação de incêndio: 4,50 m.

A TAB.7.9 apresenta a distribuição de temperatura nas seções circular e quadrada de um pilar composto por um perfil de aço de  $300 \times 300 \times 12,0$  mm preenchido por CRAD.

TABELA 7.9 - Distribuição de temperatura na seção  $300 \times 300 \times 12,0$

Parte da Seção	Dimensão (mm)	Temperatura (°C)	
		Seção Quadrada	Seção Circular
Perfil de Aço	$300 \times 300 \times 12,0$	762	752
Armadura	$8 \times \phi 20,0$	376 (extremidade) 236 (centro)	284
Coroa 1	276,0	461	458
Coroa 2	207,0	214	225
Coroa 3	138,0	94	114
Coroa 4	69,0	51	70

Com base nas características descritas anteriormente e na distribuição de temperatura da TAB.7.9 têm-se as seguintes resistências à compressão em temperatura ambiente e em situação de incêndio, apresentadas na TAB.7.10.

TABELA 7.10 - Resistências à compressão do pilar constituído pela seção  $300 \times 300 \times 12,0$

Limite de Escoamento do Aço do Perfil	Geometria da Seção	Resistência à Compressão em Temperatura Ambiente - $N_{Rd}$ (kN)	Resistência à Compressão em Situação de Incêndio - $N_{fi,Rd}$ (kN)	Nível de Carga Real ( $\eta$ )
300 MPa	Quadrada	4362	3096	0,71
	Circular	2725	2080	0,76
350 MPa	Quadrada	4438	3111	0,70
	Circular	2762	2089	0,76

### 7.3.6 - Seção 200 × 200 × 8,0 mm

São dados utilizados para a análise da seção:

- Tempo requerido de resistência ao fogo de 90 min;
- Taxa de armadura de 3,0%;
- Distância da face interna do perfil às barras da armadura: 40 mm;
- Nível de carga mínimo esperado: 0,30;
- Comprimento: 6,00 m;
- Comprimento de flambagem em situação de incêndio: 3,00 m.

A TAB.7.11 apresenta a distribuição de temperatura nas seções circular e quadrada de um pilar composto por um perfil de aço de 200 × 200 × 8,0 mm preenchido por CRAD.

TABELA 7.11 - Distribuição de temperatura na seção 200 × 200 × 8,0

Parte da Seção	Dimensão (mm)	Temperatura (°C)	
		Seção Quadrada	Seção Circular
Perfil de Aço	200 × 200 × 8,0	939	939
Armadura	4 × $\phi$ 16,0	496	478
Coroa 1	276,0	783	793
Coroa 2	207,0	504	552
Coroa 3	138,0	383	452
Coroa 4	69,0	321	383

Com base nas características descritas anteriormente e na distribuição de temperatura da TAB.7.11 têm-se as seguintes resistências à compressão em temperatura ambiente e em situação de incêndio, apresentadas na TAB.7.12.

TABELA 7.12 - Resistências à compressão do pilar  
constituído pela seção  $200 \times 200 \times 8,0$

Limite de Escoamento do Aço do Perfil	Geometria da Seção	Resistência à Compressão em Temperatura Ambiente - $N_{Rd}$ (kN)	Resistência à Compressão em Situação de Incêndio - $N_{fi,Rd}$ (kN)	Nível de Carga Real ( $\eta$ )
300 MPa	Quadrada	1873	559	0,30
	Circular	1156	325	0,28
350 MPa	Quadrada	1906	560	0,29
	Circular	1172	326	0,28

### 7.3.7 - Seção $350 \times 350 \times 14,0$ mm

São dados utilizados para a análise da seção:

- Tempo requerido de resistência ao fogo de 90 min;
- Taxa de armadura de 4,0%;
- Distância da face interna do perfil às barras da armadura: 40 mm;
- Nível de carga mínimo esperado: 0,50;
- Comprimento: 10,50 m;
- Comprimento de flambagem em situação de incêndio: 5,25 m.

A TAB.7.13 apresenta a distribuição de temperatura nas seções circular e quadrada de um pilar composto por um perfil de aço de  $350 \times 350 \times 14,0$  mm preenchido por CRAD.

TABELA 7.13 - Distribuição de temperatura na seção  $350 \times 350 \times 14,0$

Parte da Seção	Dimensão (mm)	Temperatura (°C)	
		Seção Quadrada	Seção Circular
Perfil de Aço	$350 \times 350 \times 14,0$	903	902
Armadura	$8 \times \phi 25,0$	406 (extremidade) 255 (centro)	313
Coroa 1	322,0	577	583
Coroa 2	241,5	262	281
Coroa 3	161,0	115	150
Coroa 4	80,5	70	95

Com base nas características descritas anteriormente e na distribuição de temperatura da TAB.7.13 têm-se as seguintes resistências à compressão em temperatura ambiente e em situação de incêndio, apresentadas na TAB.7.14.

TABELA 7.14 - Resistências à compressão do pilar  
constituído pela seção  $350 \times 350 \times 14,0$

Limite de Escoamento do Aço do Perfil	Geometria da Seção	Resistência à Compressão em Temperatura Ambiente - $N_{Rd}$ (kN)	Resistência à Compressão em Situação de Incêndio - $N_{fi,Rd}$ (kN)	Nível de Carga Real ( $\eta$ )
300 MPa	Quadrada	5970	3124	0,52
	Circular	3731	2038	0,55
350 MPa	Quadrada	6071	3130	0,52
	Circular	3780	2041	0,54

### 7.3.8 - Seção $500 \times 500 \times 20,0$ mm

São dados utilizados para a análise da seção:

- Tempo requerido de resistência ao fogo de 90 min;
- Taxa de armadura de 5,0%;
- Distância da face interna do perfil às barras da armadura: 40 mm;
- Nível de carga mínimo esperado: 0,70;
- Comprimento: 15,00 m;
- Comprimento de flambagem em situação de incêndio: 7,50 m.

A TAB.7.15 apresenta a distribuição de temperatura nas seções circular e quadrada de um pilar composto por um perfil de aço de  $500 \times 500 \times 20,0$  mm preenchido por CRAD.

TABELA 7.15 - Distribuição de temperatura na seção  $500 \times 500 \times 20,0$ 

Parte da Seção	Dimensão (mm)	Temperatura (°C)	
		Seção Quadrada	Seção Circular
Perfil de Aço	$500 \times 500 \times 20,0$	865	868
Armadura	$8 \times \phi 40,0$	340 (extremidade) 202 (centro)	242
Coroa 1	460,0	411	428
Coroa 2	345,0	135	157
Coroa 3	230,0	46	57
Coroa 4	115,0	28	30

Com base nas características descritas anteriormente e na distribuição de temperatura da TAB.7.15 têm-se as seguintes resistências à compressão em temperatura ambiente e em situação de incêndio, apresentadas na TAB.7.16.

TABELA 7.16 - Resistências à compressão do pilar constituído pela seção  $500 \times 500 \times 20,0$ 

Limite de Escoamento do Aço do Perfil	Geometria da Seção	Resistência à Compressão em Temperatura Ambiente - $N_{Rd}$ (kN)	Resistência à Compressão em Situação de Incêndio - $N_{fi,Rd}$ (kN)	Nível de Carga Real ( $\eta$ )
300 MPa	Quadrada	12578	9307	0,74
	Circular	7900	6130	0,78
350 MPa	Quadrada	12786	9327	0,73
	Circular	8001	6140	0,77

### 7.3.9 - Seção $230 \times 230 \times 9,2$ mm

São dados utilizados para a análise da seção:

- Tempo requerido de resistência ao fogo de 120 min;
- Taxa de armadura de 5,0%;
- Distância da face interna do perfil às barras da armadura: 40 mm;
- Nível de carga mínimo esperado: 0,30;
- Comprimento: 6,90 m;
- Comprimento de flambagem em situação de incêndio: 3,45 m.

A TAB.7.17 apresenta a distribuição de temperatura nas seções circular e quadrada de um pilar composto por um perfil de aço de  $230 \times 230 \times 9,2$  mm preenchido por CRAD.

TABELA 7.17 - Distribuição de temperatura na seção  $230 \times 230 \times 9,2$

Parte da Seção	Dimensão (mm)	Temperatura (°C)	
		Seção Quadrada	Seção Circular
Perfil de Aço	$230 \times 230 \times 9,2$	996	997
Armadura	$4 \times \phi 25,0$	570	545
Coroa 1	211,6	835	854
Coroa 2	158,7	570	598
Coroa 3	105,8	433	501
Coroa 4	52,9	360	438

Com base nas características descritas anteriormente e na distribuição de temperatura da TAB.7.17 têm-se as seguintes resistências à compressão em temperatura ambiente e em situação de incêndio, apresentadas na TAB.7.18.

TABELA 7.18 - Resistências à compressão do pilar constituído pela seção  $230 \times 230 \times 9,2$

Limite de Escoamento do Aço do Perfil	Geometria da Seção	Resistência à Compressão em Temperatura Ambiente - $N_{Rd}$ (kN)	Resistência à Compressão em Situação de Incêndio - $N_{fi,Rd}$ (kN)	Nível de Carga Real ( $\eta$ )
300 MPa	Quadrada	2573	755	0,29
	Circular	1586	466	0,29
350 MPa	Quadrada	2616	757	0,29
	Circular	1606	467	0,29

### 7.3.10 - Seção $400 \times 400 \times 16,0$ mm

São dados utilizados para a análise da seção:

- Tempo requerido de resistência ao fogo de 120 min;
- Taxa de armadura de 5,0%;
- Distância da face interna do perfil às barras da armadura: 50 mm;

- Nível de carga mínimo esperado: 0,50;
- Comprimento: 12,00 m;
- Comprimento de flambagem em situação de incêndio: 6,00 m.

A TAB.7.19 apresenta a distribuição de temperatura nas seções circular e quadrada de um pilar composto por um perfil de aço de  $400 \times 400 \times 16,0$  mm preenchido por CRAD.

TABELA 7.19 - Distribuição de temperatura na seção  $400 \times 400 \times 16,0$

Parte da Seção	Dimensão (mm)	Temperatura (°C)	
		Seção Quadrada	Seção Circular
Perfil de Aço	$400 \times 400 \times 16,0$	972	972
Armadura	$8 \times \phi 25,0$	406 (extremidade) 259 (centro)	320
Coroa 1	368,0	660	640
Coroa 2	276,0	288	310
Coroa 3	184,0	136	176
Coroa 4	92,0	81	114

Com base nas características descritas anteriormente e na distribuição de temperatura da TAB.7.19 têm-se as seguintes resistências à compressão em temperatura ambiente e em situação de incêndio, apresentadas na TAB.7.20.

TABELA 7.20 - Resistências à compressão do pilar constituído pela seção  $400 \times 400 \times 16,0$

Limite de Escoamento do Aço do Perfil	Geometria da Seção	Resistência à Compressão em Temperatura Ambiente - $N_{Rd}$ (kN)	Resistência à Compressão em Situação de Incêndio - $N_{fi,Rd}$ (kN)	Nível de Carga Real ( $\eta$ )
300 MPa	Quadrada	7908	4255	0,54
	Circular	4949	2862	0,58
350 MPa	Quadrada	8037	4262	0,53
	Circular	5011	2865	0,57

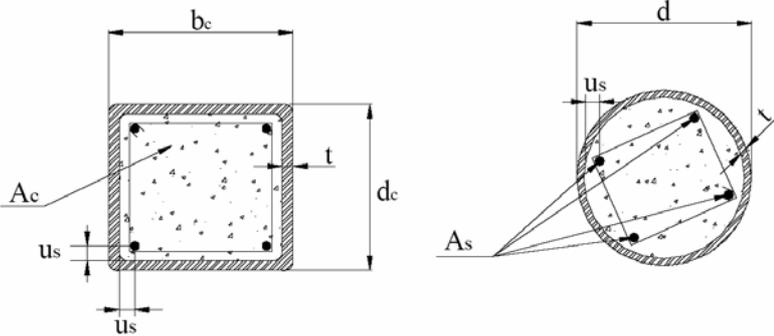
#### **7.4 - Método tabular para pilares preenchidos com concreto refratário de alto desempenho**

Para a utilização do método tabular para pilares constituídos por perfis de aço com 300 MPa ou 350 MPa de resistência ao escoamento e preenchidos com CRAD devem ser respeitados todos os critérios apresentados no item 7.2.

Todos os pilares verificados no item 7.3. foram agrupados de modo a gerar a tabela a ser utilizada pelo método.

A TAB.7.21 apresenta as dimensões mínimas da seção transversal, taxas mínimas de armadura e distâncias mínimas entre os eixos das barras da armadura à face do perfil, para perfis tubulares com limite de escoamento de 300 MPa ou 350 MPa e preenchidos com concreto refratário de alto desempenho

TABELA 7.21 - Dimensões mínimas da seção transversal, taxas mínimas de armadura e distâncias mínimas entre os eixos das barras da armadura à face do perfil, para perfis tubulares com limite de escoamento de 300 MPa ou 350 MPa e preenchidos com concreto refratário de alto desempenho

		Tempo Requerido de Resistência ao Fogo (min)			
		30	60	90	120
Seção de aço: $(b_c/t) \geq 25$ e $(d_c/t) \geq 25$ ou $(d/t) \geq 25$					
1	Dimensões mínimas da seção transversal para o nível de carga $\eta_{fi} \leq 0,3$ .				
1.1	Dimensões mínimas de $b_c$ e $d_c$ ou diâmetro mínimo $d$ (mm)	100	150	200	230
1.2	Taxa mínima de armadura $A_s/(A_s + A_c)$ em %	0	1,5	3,0	5,0
1.3	Distância mínima da face do eixo das barras da armadura $u_s$ (mm)	-	30	40	40
2	Dimensões mínimas da seção transversal para o nível de carga $\eta_{fi} \leq 0,5$ .				
2.1	Dimensões mínimas de $b_c$ e $d_c$ ou diâmetro mínimo $d$ (mm)	100	220	350	400
2.2	Taxa mínima de armadura $A_s/(A_s + A_c)$ em %	0	3,0	4,0	5,0
2.3	Distância mínima da face do eixo 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	Dimensões mínimas de $b_c$ e $d_c$ ou diâmetro mínimo $d$ (mm)	120	300	500	-
3.2	Taxa mínima de armadura $A_s/(A_s + A_c)$ em %	0	4,0	5,0	-
3.3	Distância mínima da face do eixo das barras da armadura $u_s$ (mm)	-	30	40	-
<b>Nota:</b> É permitida a interpolação linear entre todos os dados da tabela, exceto os dados identificados por "-".					

# 8

## CONSIDERAÇÕES FINAIS E SUGESTÕES DE TRABALHOS FUTUROS

### 8.1 - Considerações finais

Neste trabalho foram apresentados um novo concreto de alto desempenho com características refratárias, os métodos (analítico e tabular) de dimensionamento preconizados pelo texto-base de revisão da NBR 8800 (2003) e pelo texto-base de revisão da NBR 14323 (2003) para o dimensionamento de pilares mistos constituídos por perfis tubulares (retangulares ou circulares) de aço e preenchidos por concreto, um procedimento numérico, via Método dos Elementos Finitos, para a determinação da distribuição de temperatura em estruturas mistas aço-concreto, cuja implementação foi feita por meio do programa computacional *THERSYS*. A distribuição de temperatura fornecida por este programa é uma ferramenta fundamental para uso do método simplificado analítico de cálculo.

Os pilares utilizados para o estudo do Capítulo 6 foram selecionados de modo a poder se avaliar duas situações. A primeira é a influência do concreto no cálculo da força

normal resistente de compressão da peça como um todo, ou seja, qual o ganho de resistência à compressão que se obtém quando se troca o concreto convencional (de densidade normal) pelo concreto refratário de alto desempenho. A segunda é a influência que a espessura do perfil de aço na resistência da seção, uma vez que se aumenta a influência do aço, que é mais resistente mas, ao mesmo tempo, mais suscetível à elevação de temperatura que o concreto refratário de alto desempenho.

Considerando o dimensionamento dos pilares à temperatura ambiente, o maior incremento na força normal resistente de cálculo de um pilar foi o da seção circular com 355,6 mm de diâmetro e 9,5 mm de espessura, de 66%. A força normal resistente de cálculo com concreto convencional foi de 5318 kN enquanto que com o CRAD foi para 8816 kN. Já o menor incremento foi o da seção circular com 219,1 mm de diâmetro e 15,9 mm de espessura com 23% de ganho na resistência. A força normal resistente de cálculo com concreto convencional foi de 3075 kN enquanto que com o CRAD foi de 3784 kN.

Deve-se salientar que apesar do universo de pilares estudados ser pequeno, apenas 8 pilares, pode-se apontar um grande ganho na força normal resistente de cálculo dos pilares, principalmente quando estes são constituídos por perfis de pequena espessura, onde a influência do núcleo de concreto é maior.

E quando se faz a mesma comparação entre os pilares, considerando-os em situação de incêndio, os pilares preenchidos com CRAD apresentam resultados ainda mais satisfatórios do que os pilares preenchidos por concreto convencional. A seção circular com 355,6 mm de diâmetro e 9,5 mm de espessura preenchida com CRAD apresentou, para um TRRF de 60 minutos, uma resistência 3 vezes superior ao pilar preenchido com concreto convencional. Já a seção circular com 355,6 mm de diâmetro e 19,1 mm de espessura preenchida com CRAD apresentou, para um TRRF de 30 minutos, ganho de 70% de resistência.

Quando o tempo de exposição ao incêndio padrão é superior a 90 minutos, a temperatura do aço do perfil se torna bastante elevada, geralmente superior a 900°C, o

que diminui a contribuição de resistência da parcela do perfil de aço. Nesses casos, o núcleo de concreto torna-se essencial para a manutenção da resistência da peça quando submetida a incêndio.

Quando se compara o desempenho dos pilares preenchidos por CRAD, em situação de incêndio, variando a espessura do perfil de aço, nota-se que menores espessuras de aço são mais vantajosas. Com menor espessura o consumo de aço é menor e o núcleo de concreto é maior. Quando o perfil atinge altas temperaturas e sua resistência ao escoamento é reduzida drasticamente, o núcleo de concreto passa a ter grande influência no valor da força normal resistente de cálculo do pilar.

O pilar circular com 355,6 mm de diâmetro e 19,1 mm de espessura para tempo requerido de resistência ao fogo igual ou superior a 60 minutos apresentou um valor de força normal resistente de cálculo 20% inferior ao pilar circular de mesmo diâmetro mas com 9,5 mm de espessura do perfil de aço.

Isso ocorre por que o perfil com a maior espessura da parede de aço possui menor área do núcleo de concreto no interior do perfil. Por estar em contato com o incêndio, possuir elevada condutividade térmica e pequena espessura, quando comparada com a seção como o todo, o perfil de aço, em elevadas temperaturas, contribui de maneira insignificante para a resistência da seção. Portanto a seção que possuir menor área de concreto também apresentará menor resistência.

Para pilares submetidos à temperatura ambiente, a força normal resistente de cálculo apresentou valores superiores para os pilares com perfil de maior espessura. Este fato se deve à resistência ao escoamento do aço laminado considerado, 300 MPa, ser maior que a resistência característica do CRAD, 100 MPa.

O maior ganho na força normal resistente de cálculo, à temperatura ambiente, observado neste trabalho, quando se varia a espessura do perfil de aço, foi de 36% para a seção circular com 219,1 mm de diâmetro. O menor ganho foi de 14% para a seção retangular de 360,0 mm × 225,0 mm.

O outro ponto, além do incremento de resistência quando se usa o CRAD, que se pretende avaliar neste trabalho, é a redução da seção transversal dos pilares permitindo melhores arranjos arquitetônicos.

Comparando-se o método tabular preconizado pelo texto-base de revisão da NBR 14323 (2003) para pilares compostos por perfis de aço com 250 MPa de limite de escoamento e preenchido com concreto convencional com o método tabular, desenvolvido neste trabalho, para pilares compostos por perfis de aço com 300 MPa ou 350 MPa de limite de escoamento e preenchido com CRAD, nota-se apreciável redução das dimensões das seções transversais dos pilares.

Foi possível observar que a influência do valor da resistência ao escoamento do aço é reduzida, uma vez que a área de aço em relação à de concreto é pequena. O aumento do valor do limite de escoamento do aço aumenta também a resistência da peça, seja em temperatura ambiente ou em situação de incêndio. Esse pequeno aumento de resistência, quando se substitui o perfil de aço de 300 MPa por um de 350 MPa, faz com que o nível de carga real, encontrado nos pilares estudados neste trabalho, não varie mais que 1%. Vale lembrar que a distribuição de temperatura no pilar é a mesma, independente da resistência ao escoamento do aço, fazendo com que a degradação da resistência também seja a mesma.

Onde se observou a maior redução da seção transversal foi para o pilar com nível de carga de 0,50 e TRRF de 30 minutos que teve sua dimensão característica reduzida de 260 mm para 100 mm. Essa redução foi portanto de 62%, e de 85% na área da seção transversal, no caso de considerá-la quadrada.

Onde se observou a menor redução percentual da seção transversal foi para os pilares com nível de carga de 0,30 e 0,70 e TRRF de 90 minutos, que teve sua dimensão característica reduzida em 9%. Para o pilar com nível de carga de 0,30, a redução foi de 220 mm para 200 mm e para o pilar com 0,70 a redução foi de 550 mm para 500 mm.

As maiores reduções da dimensão característica dos pilares foram observadas para menores TRRF, 30 ou 60 minutos, pois a menores temperaturas a influência da alta resistência característica à compressão do CRAD é maior, tornando mais discrepante a diferença em relação ao concreto convencional. Entretanto a maiores TRRF, 90 ou 120 minutos, a elevada temperatura, tanto do aço quanto do concreto, faz com a influência da alta resistência característica à compressão do CRAD seja menor, tornando os resultados menos discrepantes.

Os pilares preenchidos com CRAD dimensionados para um tempo requerido de resistência ao fogo de 30 minutos apresentaram valores de resistência à compressão sempre superior a 70% do valor da resistência à compressão de quando dimensionados para temperatura ambiente. Isso ocorre por que apesar da redução das resistências do aço e do CRAD em função da temperatura mais elevada há um aumento da resistência devido ao aumento de rigidez, uma vez que o comprimento de flambagem em temperatura ambiente é duas vezes o comprimento de flambagem em situação de incêndio. O efeito da rigidez foi preponderante ao efeito da temperatura, uma vez que o CRAD apresenta elevada resistência característica à compressão e propriedades refratárias.

Todos os oito pilares, preenchidos por CRAD, dimensionados para comparação das resistências com os mesmos pilares preenchidos por concreto convencional apresentaram resistência aos 30 minutos de incêndio superior à resistência à compressão em temperatura ambiente. Como o texto-base de revisão da NBR 14323 (2003) não permite que a resistência de um componente submetido a incêndio seja maior do que a resistência desse mesmo componente em temperatura ambiente, para o dimensionamento dos pilares submetidos a um tempo requerido de resistência ao fogo de 30 min, deve-se assumir que a força resistente de compressão de cálculo em situação de incêndio é igual à força resistente de compressão de cálculo à temperatura ambiente.

Isso ocorre porque, no dimensionamento em situação de incêndio, não há o coeficiente de redução das resistências características dos materiais e o incremento de temperatura é baixo, havendo pequena degeneração do material.

Por meio deste trabalho foi possível mostrar o ganho de resistência que se tem ao substituir o concreto convencional pelo concreto refratário de alto desempenho e também a redução das dimensões das seções transversais dos pilares preenchidos por concreto refratário de alto desempenho. Acredita-se que sua principal contribuição foi a elaboração de uma tabela, semelhante à do texto-base de revisão da NBR 14323 (2003), para o dimensionamento dos pilares mistos preenchidos por concreto refratário de alto desempenho sem que seja necessário o uso de métodos avançados para a determinação da distribuição de temperatura ao longo da seção mista.

Vale ressaltar novamente que as propriedades dos concretos de alto desempenho são muito específicas, variando para cada concreto de alto desempenho, portanto os valores obtidos para este concreto são válidos somente para o mesmo. Obviamente, os resultados desta pesquisa serão válidos para todos os concretos de alto desempenho, desde que se façam ajustes em função das diferenças existentes entre os concretos de alto desempenho.

## **8.2 - Sugestões de trabalhos futuros**

Com a finalidade de ampliar os conhecimentos sobre resistência de pilares mistos constituídos por aço e concreto refratário de alto desempenho em situação de incêndio, serão apresentadas algumas sugestões para trabalhos futuros.

Sugere-se realizar estudos semelhantes para outras geometrias de pilares, por exemplo, pilares constituídos por perfis I, parcialmente ou totalmente revestidos por concreto de alto desempenho.

Também há a possibilidade da criação de um banco de dados com a distribuição das temperaturas das seções transversais dos pilares pré-determinadas. De posse dessa distribuição de temperaturas, o dimensionamento pelo método analítico simplificado do texto-base de revisão da NBR 14323 (2003) se torna bastante simples.

Outra possibilidade, entretanto mais complexa, é a verificação do comportamento das seções mistas através de ensaios de laboratório em escala real. Através destes ensaios é possível verificar as extrapolações feitas neste trabalho, de que o concreto refratário de alto desempenho se comporta como o concreto convencional, salvo as especificidades do CRAD apresentadas neste trabalho.

**ANEXO A**

**PROGRAMA PARA DIMENSIONAMENTO DE PILARES  
MISTOS PREENCHIDOS COM CONCRETO REFRAATÓRIO DE  
ALTO DESEMPENHO**

## O PROGRAMA

### A.1 - Apresentação

Para a realização do dimensionamento dos pilares estudados nos Capítulos 6 e 7 foi desenvolvido um programa computacional, chamado *PCRAD, Versão 1.0 (Programa para Dimensionamento de Pilares Mistos Preechidos com Concreto Refratário de Alto Desempenho)*

Este programa consiste dos procedimentos preconizados pelo texto-base de revisão da NBR8800 (2003) e o texto-base de revisão da NBR14323 (2003), respectivamente para o dimensionamento dos pilares em temperatura ambiente e em situação de incêndio.

O programa foi desenvolvido utilizando a linguagem *Delphi 7*, quer se trata de uma linguagem de alto nível. Além disso o *Delphi 7* permite grandes facilidades para o desenvolvimento da interface, organização dos procedimentos de cálculo e apresentação dos resultados.

Ao se iniciar o programa, é mostrada uma tela de apresentação que contém o nome do programa, os nomes dos autores e a sua finalidade.

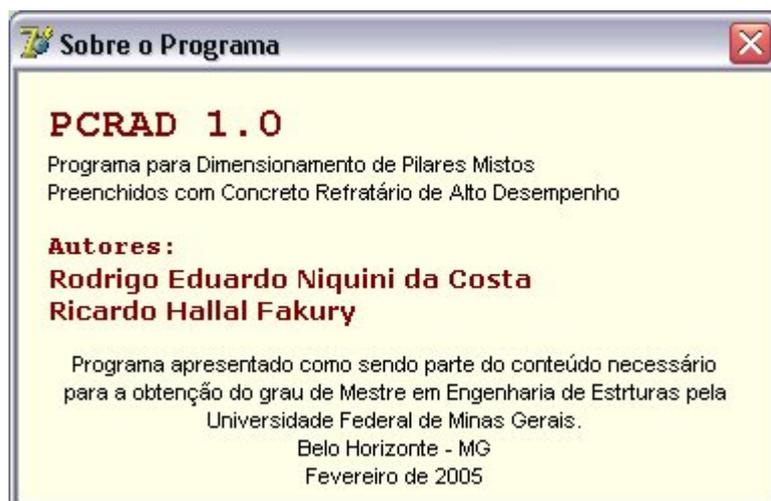


FIGURA A.1 - Tela de apresentação do programa

## A.2 - Tela Principal

Na tela principal do programa são apresentados os dados dos materiais (aço do perfil, concreto e armadura) e da seção transversal.

Entre os dados dos materiais, são apresentados:

### *Aço*

- Nomenclatura do aço estrutural;
- Limite de escoamento do aço do perfil ( $f_y$ ), em  $\text{kN/cm}^2$ ;
- Limite de ruptura do aço do perfil ( $f_u$ ), em  $\text{kN/cm}^2$ ;
- Módulo de elasticidade do aço do perfil ( $E_a$ ), em  $\text{kN/cm}^2$ .

### *Armadura*

- Tipo de aço da armadura (CA-50 ou CA-60);
- Limite de escoamento do aço da armadura ( $f_{ys}$ ), em  $\text{kN/cm}^2$ ;
- Módulo de elasticidade do aço da armadura ( $E_s$ ), em  $\text{kN/cm}^2$ .

## Concreto

- Tipo de concreto (comum ou CRAD);
- Resistência característica à compressão ( $f_{ck}$ ), em MPa;
- Módulo de deformação longitudinal do concreto ( $E_c$ ), em  $\text{kN/cm}^2$ .

Além destas informações, na tela principal estão localizados botões que permitem fácil acesso às telas de entrada de dados dos programas. São eles: dados sobre o projeto em que se está trabalhando, dados dos materiais, dados da seção transversal do pilar, carregamento, *calcula*, memorial de cálculo e *sair*.

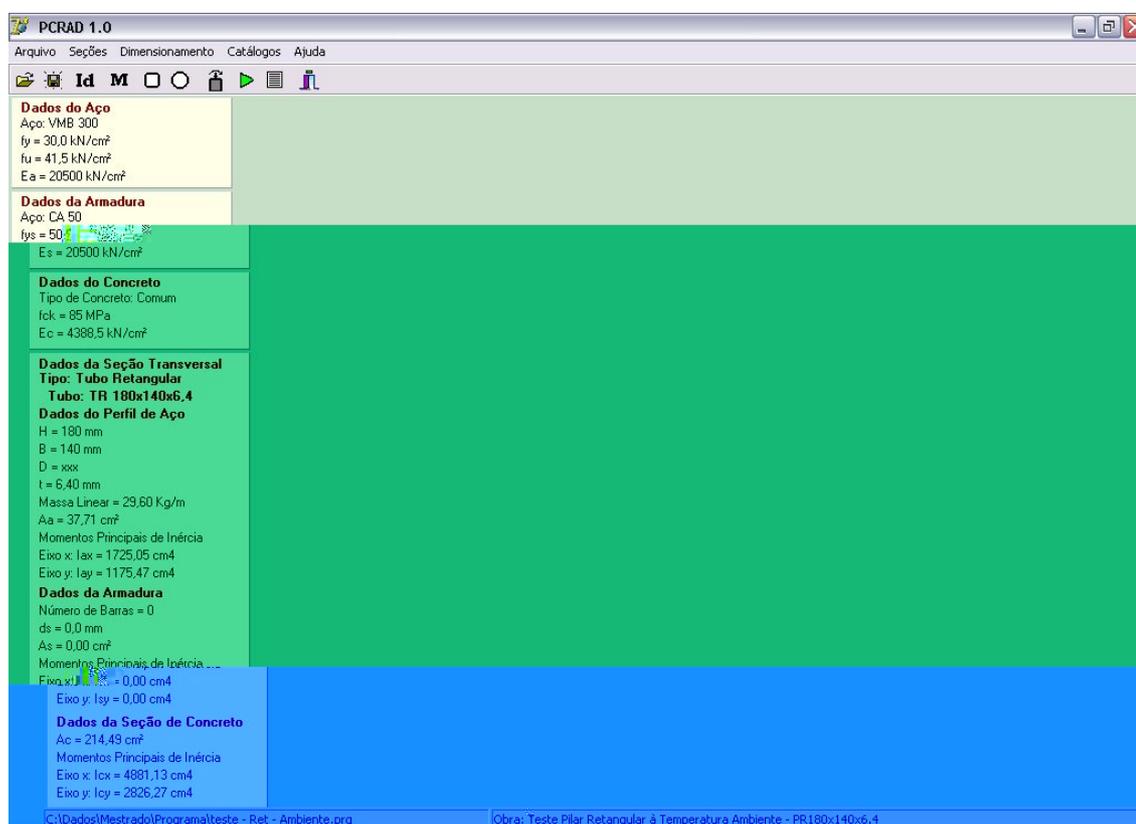


FIGURA A.2 - Tela principal do programa

## A.3 - Menu *Arquivo*

No menu *Arquivo*, tem-se as opções de abrir um arquivo existente, salvar o arquivo que se está trabalhando (pode-se salvar como um outro arquivo) e fechar o programa. No

menu estão disponíveis as respectivas teclas de atalho para cada comando. Tais funções também podem ser acessadas através dos botões de fácil acesso, localizados na tela principal do programa.

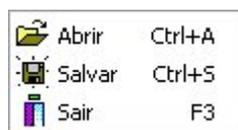


FIGURA A.3 - Menu *Arquivo* do programa

#### **A.4 - Menu *Seção Transversal***

No menu *Seção Transversal*, edita-se os dados de identificação do projeto em que se está trabalhando, os materiais e a geometria da seção transversal (tubo retangular ou circular).

##### ***Identificação***

Na tela de *Identificação da Obra* pode-se editar dados como o nome do cliente, endereço, cidade, estado, proprietário, responsável e a identificação do pilar.

A imagem mostra uma janela de diálogo intitulada 'Identificação da Obra'. Ela contém campos de entrada para: 'Nome:', 'Endereço:', 'Cidade:', 'Proprietário:', 'Responsável:' e 'Identificação do Pilar:'. Ao lado do campo 'Cidade:' há um campo 'UF:' com uma seta para baixo. Na base da janela, há dois botões: 'OK' com um ícone de checkmark verde e 'Cancel' com um ícone de X vermelho.

FIGURA A.4 - Tela de identificação da obra do programa

##### ***Materiais***

Na tela *Materiais* é onde se escolhe o tipo de aço do perfil, que está gravado no catálogo de aço do programa. Para editar este catálogo, ver *Catálogos*.

Além do aço do perfil, pode-se escolher o tipo de aço da armadura e o tipo de concreto que irão constituir a seção transversal do pilar.

No caso de se escolher o concreto comum, deve-se fornecer a resistência característica à compressão ( $f_{ck}$ ), em MPa, do mesmo. No caso do CRAD, o programa assume que o concreto possui as características determinadas em ensaios e apresentadas no Capítulo 3.



FIGURA A.5 - Tela para edição dos materiais componentes do pilar

### ***Tubos Retangulares***

Na tela *Tubos Retangulares* é onde se edita as propriedades da seção transversal caso se trabalhe com tubos retangulares. No caso de se trabalhar com tubos circulares, deve-se escolher a tela *Tubos Circulares*.

Entre os dados de entrada da tela, além dos dados da seção transversal, estão algumas condições essenciais para o dimensionamento que não são da seção transversal propriamente dita, como o comprimento de flambagem, o tipo de situação de dimensionamento e, no caso de dimensionamento em situação de incêndio, o tempo

requerido de resistência ao fogo (TRRF) e as temperaturas de cada parte da seção transversal.

Entre os dados do perfil estão: altura, largura, espessura e massa linear do perfil. A massa linear do perfil é importante pois é através dela que se obtém a área de aço do perfil e o raio de curvatura dos cantos do perfil. Estas informações são fundamentais para o cálculo de outras propriedades geométricas do perfil, como o momento de inércia e o módulo plástico. No caso de dimensionamento em situação de incêndio, deve-se informar o TRRF e a temperatura do perfil de aço, considerado constante.

Entre as propriedades da armadura estão: o número e o diâmetro das barras, a posição relativa de cada barra da seção transversal e a temperatura, no caso de dimensionamento em situação de incêndio, de cada barra.

**Dados do Perfil Metálico**

Altura (H): 290 mm  
 Largura (B): 200 mm  
 Espessura (t): 7,9 mm  
 Massa Linear: 55,90 Kg/m

**Dados da Armadura**

Diâmetro: 12,5 mm  
 Número de Barras: 4

Posição das Barras da Armadura:

	exi (mm)	eyi (mm)	Temp (°C)
1	65	100	450
2	-65	100	450
3	-65	-100	450
4	65	-100	450

**Para o Dimensionamento em Situação de Incêndio**

Situação de Dimensionamento:  Ambiente  Incêndio

Tempo Requerido de Resistência ao Fogo: 60 min  
 Temperatura do Perfil de Aço: 658 °C

Número de Coroas Retangulares de Concreto: 2

	Bext (mm)	Temp (°C)
1	184	350
2	90	200

**Comprimento de Flambagem:**

L: 4,50 m  
 kx: 1,00  
 ky: 1,00

OK Cancel

FIGURA A.6 - Tela para edição das propriedades dos tubos retangulares

Para o concreto, em caso de dimensionamento em situação de incêndio, deve-se editar a largura externa das coroas de concreto, consideradas retangulares, e suas respectivas temperaturas médias. A divisão da seção de concreto em coroas retangulares é

necessária para considerar a não-uniformidade da distribuição de temperatura no interior do tubo preenchido por concreto.

Para o comprimento de flambagem, deve-se informar o comprimento adequado à situação de dimensionamento considerada, de acordo com as prescrições do texto-base de revisão da NBR8800 (2003) e do texto-base de revisão da NBR14323 (2003).

### ***Tubos Circulares***

Na tela *Tubos Circulares* é onde se edita as propriedades da seção transversal caso se trabalhe com tubos circulares. Para os tubos circulares são válidas as mesmas considerações feitas para os tubos retangulares, com exceção das propriedades geométricas do perfil de aço e das coroas de concreto. Estas, caso se dimensione o pilar em situação de incêndio. Deve-se informar o diâmetro do perfil de aço, ao invés da altura e largura. E, no caso das coroas de concreto, estas são circulares e deverão ser informados os diâmetros externos das mesmas.

**Dados do Perfil Metálico**

Diâmetro: 306 mm  
 Espessura (t): 8,70 mm  
 Massa Linear: 57,00 Kg/m

**Dados da Armadura**

Diâmetro das Barras: 12,5 mm  
 Número de Barras: 4

**Para o Dimensionamento em Situação de Incêndio**

Situação de Dimensionamento:  
 Ambiente  Incêndio

Tempo Requerido de Resistência ao Fogo: 60 min  
 Temperatura do Perfil de Aço: 450 °C  
 Número de Coroas Circulares de Concreto: 2

	Dext (mm)	Temp (°C)
1	306	350
2	150	250

**Comprimento de Flambagem:**

L: 4,50 m  
 kx: 1,00  
 ky: 1,00

	exi (mm)	eyi (mm)	Temp (°C)
1	80	80	350
2	-80	80	350
3	-80	-80	350
4	80	-80	350

FIGURA A.7 - Tela para edição das propriedades dos tubos circulares

## A.5 - Menu *Dimensionamento*

No menu *Dimensionamento*, edita-se os carregamentos do pilar, que podem ser força normal (usualmente de compressão) e momento fletores nas duas direções principais da seção transversal do pilar. Calcula-se a capacidade resistente do pilar e apresenta-se um memorial de cálculo com todos os procedimentos realizados pelo programa.

### *Carregamento*

Na tela *Carregamento*, edita-se o carregamento de cálculo, já feitas todas as devidas combinações de acordo com o texto-base de revisão da NBR8800 (2003) ou com o texto-base de revisão da NBR14323 (2003), o que for pertinente.

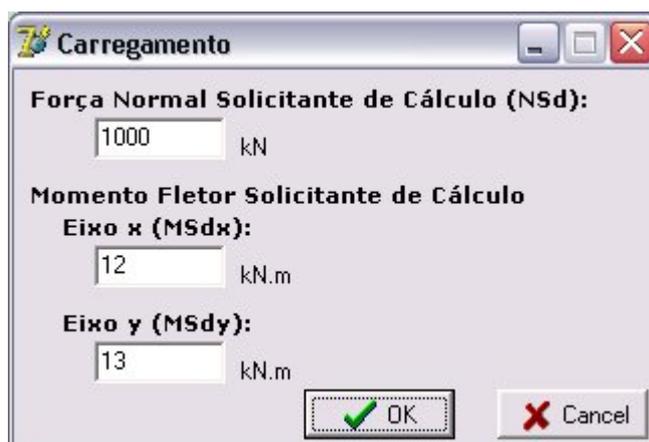


FIGURA A.8 - Tela para edição do carregamento de cálculo do pilar

### *Calcula*

Através do botão *Calcula*, o programa realiza todos os cálculos necessários para se obter as resistências de cálculo à força normal de compressão e aos momentos fletores. O programa também fornece uma análise sobre os efeitos das tensões combinadas no pilar.

Após a realização dos cálculos, o programa mostra uma tela com um resumo dos resultados. Nesta tela apresentam-se os resultados da verificação de cálculo resultado de acordo com os textos-base de revisão da NBR 8800 (2003) e NBR 14323 (2003). No

caso do pilar não atender, deve-se editar as propriedades da seção transversal de modo a conseguir um dimensionamento que seja seguro e econômico.

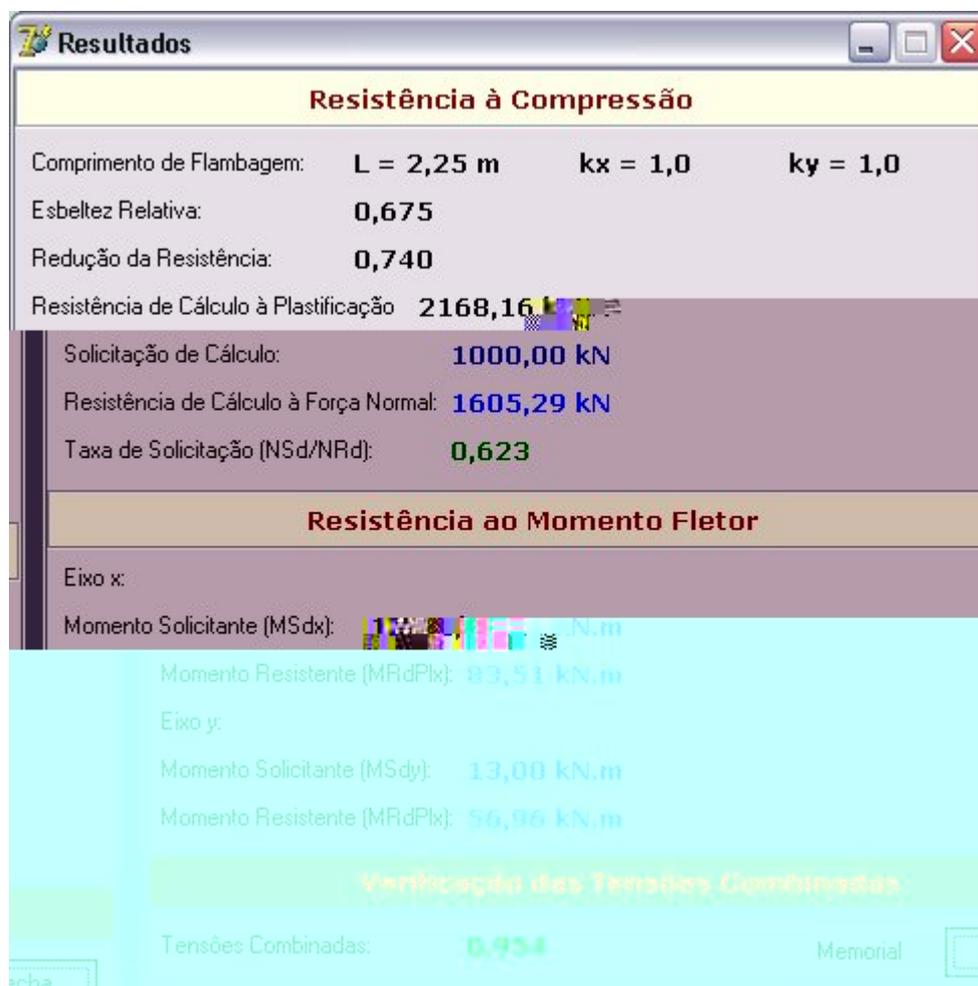


FIGURA A.9 - Tela com o resumo dos resultados do programa

### **Memorial**

No caso de se atingir o dimensionamento desejável, do ponto de vista da segurança e da economia, o trabalho está concluído. Sendo assim, o programa exibe um memorial completo com todos os dados de entrada e de saída do programa. Além disso o programa exibe todo o procedimento de cálculo realizado.

O memorial exibido pode ser copiado e colado em qualquer editor de texto.

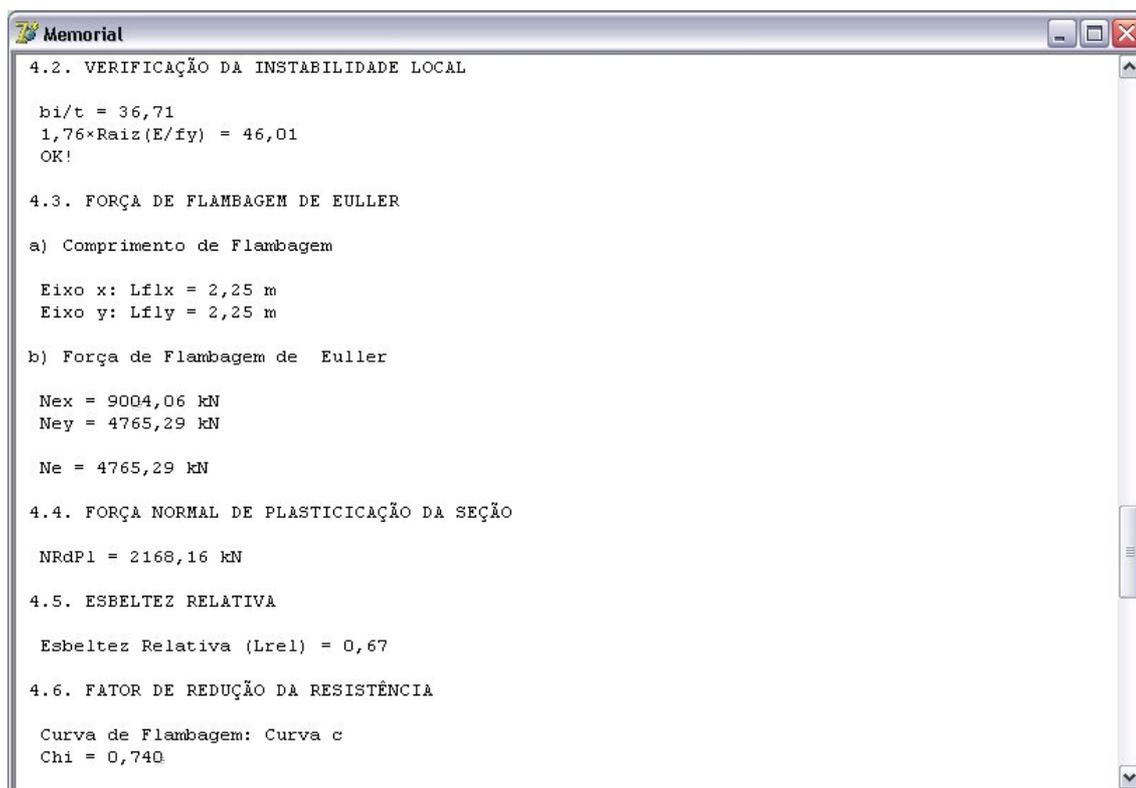


FIGURA A.10 - Tela de apresentação do memorial de cálculo do programa

## A.6 - Menu *Catálogos*

Neste menu, edita-se o banco de dados com um catálogo de aços que há no programa. É através deste catálogo que a tela materiais disponibiliza determinados tipos de aço e obtém suas respectivas resistências ao escoamento e à ruptura.

Pode-se inserir ou excluir qualquer tipo de aço e editar o valor de suas resistências ao escoamento e à ruptura. Pode-se também informar o nome do fabricante ou fornecedor do aço estrutural.

Nome	$f_y$ (kN/cm <sup>2</sup> )	$f_u$ (kN/cm <sup>2</sup> )	Fabricante
VMB 250	25,00	40,00	Vallourec & Mannesmann
VMB 300	30,00	41,50	Vallourec & Mannesmann
VMB 350	35,00	48,50	Vallourec & Mannesmann
ASTM A-36	25,00	40,00	
ASTM A36 MG	30,00	40,00	
ASTM A36 FADIGA	18,00	33,00	
ASTM A-36	34,50	41,50	
ASTM A-283 Grau C	20,68	37,90	
ASTM A-570 Grau 40	28,00	38,00	
ASTM A-570 Grau 45	31,00	41,00	
ASTM A-570 Grau C	23,20	36,60	
ASTM A-441 perfis Grupos 1 e 2	34,50	48,50	
ASTM A-441 perfis Grupo 3	31,50	46,00	
ASTM A-441 chapas $t \leq 19$ mm	34,50	48,50	
ASTM A-441 chapas $38 < t \leq 100$	29,00	43,50	
ASTM A-441 chapas $100 < t \leq 200$	27,50	41,50	

FIGURA A.11 - Tela do banco de dados dos aços estruturais disponíveis no programa

## A.7 - Menu *Ajuda*

No menu *Ajuda*, têm-se duas opções: *Sobre...* onde é mostrada a tela de apresentação do programa; e *Help* onde é mostrado o arquivo de ajuda do programa.

O arquivo de ajuda do programa é baseado neste anexo da dissertação.

## REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

1. AÏTCIN, P. C. *Concreto de Alto Desempenho*. Tradução de Geraldo G. Serra. Editora Pini. São Paulo - SP. 2000.
2. AMERICAN INSTITUTE OF STEEL CONSTRUCTION. *Load and Resistance Factor Design for Steel Building, Manual of Steel Construction - Load and Resistance Factor Design*. 3rd. Edition. Chicago - USA. 1999.
3. ANSI/AISC 360-05. *Specification for structural steel buildings*. AISC - American Institute of Steel Construction. Chicago - USA. 2005.
4. ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. *NBR 14323: Dimensionamento de Estruturas de Aço e de Estruturas Mistas Aço-Concreto de Edifícios em Situação de Incêndio*. Rio de Janeiro - RJ. 1999.
5. ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. *NBR 14323: Dimensionamento de Estruturas de Aço e de Estruturas Mistas Aço-Concreto de Edifícios em Situação de Incêndio: texto-base de revisão*. Rio de Janeiro - RJ. Outubro de 2003.

6. ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. *NBR 14423: Exigências de resistência ao fogo de elementos construtivos de edificações - Procedimento*. Rio de Janeiro - RJ. 2000.
7. ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. *NBR 6118: Projeto de Estruturas de Concreto*. Rio de Janeiro - RJ. 2003.
8. ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. *NBR 8800: Projeto e Execução de Estruturas de Aço e de Estruturas Mistas Aço-Concreto de Edifícios: texto-base de revisão*. Rio de Janeiro. Outubro de 2003.
9. CARVALHO, M. D. *Materiais Refratários*. Departamento de Metalurgia - UFOP. Ouro Preto - MG. 1993.
10. DE NARDIN, S. *Estudo Teórico-Experimental de Pilares Compostos por Tubos de Aço Preenchidos com Concreto de Alta Resistência*. Dissertação de Mestrado. EESC-USP. São Carlos - SP. 1999.
11. EUROPEAN COMMITTEE FOR STANDARDIZATION. *Design of Composite Steel and Concrete Structures - Part 1-1: General Rules and Rules for Building*. EUROCODE 4. ENV 1994-1-1. Bruxelas. 1992.
12. EUROPEAN COMMITTEE FOR STANDARDIZATION. *Design of Composite Steel and Concrete Structures - Part 1-2: Structural fire design*. EUROCODE 4. ENV 1994-1-2. Bruxelas. 1994.
13. FAKURY, R. H. *Dimensionamento de Estruturas Mistas de Edifícios em Situação de Incêndio*. IV Seminário Internacional - "O uso de estruturas metálicas na construção civil" e I Congresso Internacional da Construção Metálica. São Paulo - SP. 2001.

14. FIGUEIREDO JÚNIOR, F. P. *Simulação Via Método dos Elementos Finitos da Distribuição de Temperatura em Estruturas Metálicas e Mistas no Caso de Incêndio*. Dissertação de Mestrado. UFMG. Belo Horizonte - MG. 2002.
15. HU, H. T., HUANG, C. S., WU, M. H. e WU, Y. M. *Non Linear Analysis of Axially Loaded Concrete-Filled Tube Columns with Confinement Effect*. Journal of Structural Engineering. Vol 129. No. 10. p1322-1329. ASCE. 2003.
16. INCROPERA, F. P. e DEWITT, D. P. *Fundamentos de transferência de calor e de massa*. Editora Guanabara Koogan. 3ª. edição. Rio de Janeiro - RJ. 1992.
17. ISO 834-1. *Fire Resistance Tests - Elements of building construction, Part 1: General Requirements*. ISO - International Organization for Standardization. Geneva. 1991.
18. LAHLOU, K., AİTCIN, P. C. e CHAALLAL, O. *Behavior of High Strenght Concrete Under Confined Stress*. Cement & Concrete Composites 14. p185-193. Elsevier Science Publishers Ltd. London - UK. 1992.
19. MARTINS, M. M. *Dimensionamento de estruturas de aço em situação de incêndio*. Dissertação de Mestrado. UFMG. Belo Horizonte - MG. 2000.
20. MORAIS, E. M. e MAGALHÃES, C. A. *Métodos Avançados de Cálculo de Estruturas Metálicas Submetidas à Ação do Fogo*. Revista Internacional de Métodos Numéricos para Calculo y Diseño en Ingeniería. Vol 18, 3 p367-384. Catalunya - España. 2002.
21. NEVILLE, A. M. *Propriedades do Concreto*. Editora Pini. 2ª. edição. São Paulo - SP. 1997.

22. NÓBREGA, A. P. M. *Análise do Comportamento de Pilares Mistos Aço-Concreto em Situação de Incêndio*. Dissertação de Mestrado. UFMG. Belo Horizonte - MG. 2003.
23. QUEIROZ, G., PIMENTA, R. J. e DA MATA, L. A. C. *Elementos das Estruturas Mistas Aço-Concreto*. Editora O Lutador. Belo Horizonte - MG. Novembro de 2001.
24. RIBEIRO, J. C. L. *Simulação Via Método dos Elementos Finitos da Distribuição Tridimensional de Temperatura em Estruturas em Situação de Incêndio*. Dissertação de Mestrado. UFMG. Belo Horizonte - MG. 2004.
25. SILVA, C. J. e CALMON, J. L. *Análise Térmica Bidimensional em Regime Transiente Pelo Método dos Elementos Finitos*. Aplicação em Estruturas Metálicas e Mistas em Situação de Incêndio. Revista Engenharia, Ciência e Tecnologia. Edição 17. p72-82. Setembro/Outubro de 2000.
26. SILVA, V. P. *Estruturas de aço em situação de incêndio*. Tese de doutorado. Escola Politécnica (PEF). São Paulo - SP. 1997.
27. SILVA, V. P. *Estruturas de aço em situação de incêndio*. Zigurate Editora. São Paulo - SP. 2001.
28. VILA REAL, P. M. M. *Modelação por elementos finitos do comportamento térmico e termo-elástico de sólidos sujeitos a elevados gradientes térmicos*. Dissertação de mestrado. Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto, Porto - Portugal, 1998.
29. ZHAO, J. C. e SHEN, Z. Y. *Experimental Studies of the Behaviour of Unprotected Steel Frames in Fire*. Journal of Construction Steel Research 50. p137-150. Elsevier Science Publishers Ltd. London - UK. 1999.

# Livros Grátis

( <http://www.livrosgratis.com.br> )

Milhares de Livros para Download:

[Baixar livros de Administração](#)

[Baixar livros de Agronomia](#)

[Baixar livros de Arquitetura](#)

[Baixar livros de Artes](#)

[Baixar livros de Astronomia](#)

[Baixar livros de Biologia Geral](#)

[Baixar livros de Ciência da Computação](#)

[Baixar livros de Ciência da Informação](#)

[Baixar livros de Ciência Política](#)

[Baixar livros de Ciências da Saúde](#)

[Baixar livros de Comunicação](#)

[Baixar livros do Conselho Nacional de Educação - CNE](#)

[Baixar livros de Defesa civil](#)

[Baixar livros de Direito](#)

[Baixar livros de Direitos humanos](#)

[Baixar livros de Economia](#)

[Baixar livros de Economia Doméstica](#)

[Baixar livros de Educação](#)

[Baixar livros de Educação - Trânsito](#)

[Baixar livros de Educação Física](#)

[Baixar livros de Engenharia Aeroespacial](#)

[Baixar livros de Farmácia](#)

[Baixar livros de Filosofia](#)

[Baixar livros de Física](#)

[Baixar livros de Geociências](#)

[Baixar livros de Geografia](#)

[Baixar livros de História](#)

[Baixar livros de Línguas](#)

[Baixar livros de Literatura](#)  
[Baixar livros de Literatura de Cordel](#)  
[Baixar livros de Literatura Infantil](#)  
[Baixar livros de Matemática](#)  
[Baixar livros de Medicina](#)  
[Baixar livros de Medicina Veterinária](#)  
[Baixar livros de Meio Ambiente](#)  
[Baixar livros de Meteorologia](#)  
[Baixar Monografias e TCC](#)  
[Baixar livros Multidisciplinar](#)  
[Baixar livros de Música](#)  
[Baixar livros de Psicologia](#)  
[Baixar livros de Química](#)  
[Baixar livros de Saúde Coletiva](#)  
[Baixar livros de Serviço Social](#)  
[Baixar livros de Sociologia](#)  
[Baixar livros de Teologia](#)  
[Baixar livros de Trabalho](#)  
[Baixar livros de Turismo](#)