CARLA NEVES COSTA

DIMENSIONAMENTO DE ELEMENTOS DE CONCRETO ARMADO EM SITUAÇÃO DE INCÊNDIO

Tese apresentada à Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, para obtenção do título de Doutor em Engenharia.

v. 2

ed. revisada

São Paulo
2008

14

Janus

Universidade de São Paulo

RELATÓRIO DE DEFESA

Aluno: 3144 - 3026046 - 3 / Página 1 de 1

Relatório de defesa pública de Tese do(a) Senhor(a) Carla Neves Costa no Programa: Engenharia Civil, do(a) Escola Politécnica da Universidade de São Paulo.

Aos 26 dias do mês de março de 2008, realizou-se a Defesa da Tese do(a) Senhor(a) Carla Neves Costa, apresentada para a obtenção do título de Doutor em Engenharia Civil - Área: Engenharia de Estruturas, intitulada:

"Dimensionamento de elementos de concreto armado em situação de incêndio"

Após declarada aberta a sessão, o(a) Sr(a) Presidente passa a palavra aos examinadores para as devidas argüições que se desenvolvem nos termos regimentais. Em seguida, a Comissão Julgadora proclama o resultado:

Nome dos Participantes da Banca	Vínculo do Docente	Sigla da Unidade	Resultado
Valdir Pignatta e Silva	Presidente	EP - USP	Aprovado
Ricardo Leopoldo e Silva Franca	Titular	EP - USP	APROVADA
Fernando Reboucas Stucchi	Titular	EP - USP	APROVADA
Ana Elisabete Paganelli Guimarães de Avila Jacintho	Titular	UNICAMP - Externo	Aprovada
Luiz Carlos Pinto da Silva Filho	Titular	UFRGS - Externo	APROVADA

Resultado Final: Aprovada

Parecer da Comissão Julgadora *

Eu, Elisabete Aparecida Fernandes da Silva Ramos Elisabete Ramos, Técnico Acadêmico, lavrei a presente ata, que assino juntamente com os(as) Senhores(as). São Paulo, aos 26 dias do mês de março de 2008.

Ricardo Leopoldo e Silva Franca

Fernando Reboucas Stucchi

Ana Elisabete Paganelli Guimarães de Avila Jacintho

Luiz Carlos Pinto da Silva Filho

Valdir Pignatta e Silva
Orientador(a)

* Obs: Se o candidato for reprovado por algum dos membros, o preenchimento do parecer é obrigatório.

Título homologado pela Comissão de Pós-Graduação em _____

Presidente da Comissão de Pós-Graduação

Prof. Dr. Paulo Eigi Miyagi
Presidente da Comissão de Pós-Graduação

CARLA NEVES COSTA

DIMENSIONAMENTO DE ELEMENTOS DE CONCRETO ARMADO EM SITUAÇÃO DE INCÊNDIO

Tese apresentada à Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, para obtenção do título de Doutora em Engenharia.

Área de concentração:
Engenharia de Estruturas e Geotécnica
Subárea: Engenharia de Estruturas

Orientador: Prof. Dr.
Valdir Pignatta e Silva

São Paulo
2008

Este exemplar foi revisado e alterado em relação à versão original, sob responsabilidade única do autor e com a anuência de seu orientador.

São Paulo, 26 de abril de 2008.

Assinatura do autor:

Assinatura do orientador:

FICHA CATALOGRÁFICA

Costa, Carla Neves
Dimensionamento de elementos de concreto armado em situação de incêndio / C. N. Costa. – São Paulo, 2008.
2 v. Edição revisada.

Tese (Doutorado) – Escola Politécnica da Universidade de São Paulo. Departamento de Engenharia de Estruturas e Geotécnica.

1. Estruturas de concreto armado (Projeto; Dimensionamento) 2. Incêndio (Medidas de segurança) I.Universidade de São Paulo. Escola Politécnica. Departamento de Engenharia de Estruturas e Geotécnica II.t.

RESUMO

A maioria dos materiais estruturais de Construção Civil tem suas propriedades mecânicas reduzidas, quando submetidos a temperaturas elevadas. Por isso, a capacidade resistente das estruturas de concreto armado dos edifícios pode ser reduzida devido à ação térmica de incêndios.

Se os meios de proteção ativa dos edifícios não forem eficientes, o incêndio desenvolve-se em proporções catastróficas. A temperatura dos elementos estruturais se eleva o suficiente para induzir à redução da resistência e rigidez e, por conseguinte, à ruptura localizada ou até ao colapso progressivo do edifício.

O objetivo principal da segurança contra-incêndio é a proteção à vida dos ocupantes das edificações.

Este trabalho tem o objetivo de fornecer informações às futuras revisões de normas pertinentes ao projeto de estruturas de concreto e às pesquisas subseqüentes e contribuir à escassa literatura técnica em português sobre o tema. São apresentados: os efeitos do calor sobre as propriedades térmicas e mecânicas dos materiais – concreto e aço – e suas influências sobre o comportamento estrutural de edifícios de concreto armado, os métodos de cálculo disponíveis na literatura técnica internacional para o projeto de estruturas de concreto armado em situação de incêndio e proposta de um método simplificado expedito mais preciso para o projeto de elementos submetidos à flexão simples e normal composta para os padrões geométricos e características do concreto usuais no Brasil.

Palavras-chave: incêndio, segurança estrutural, concreto armado, projeto estrutural.

ABSTRACT

The thermal and mechanical properties of building materials are reduced at high temperatures, and the structural resistance of reinforced concrete buildings, as well.

If the means of active protection are not efficient the fire will develop and the consequential increase in temperature can take an important role on the local failure of a single member or the progressive collapse of the building.

The structural design must take into account the possibility of a fire happening as an accidental action during the lifetime of the building, aiming mainly at the protection of the users' lives.

This doctoral thesis aims to contribute to the development of the technical references in Portuguese about the fire design of reinforced concrete structures, to stimulate further researches and afterwards standard reviews related to the structural design in fire of reinforced concrete buildings.

The work reviews the heat effects on the thermal and mechanical properties of the materials and the consequential impact on the structural behaviour of reinforced concrete buildings, the calculation methods available in the international technical reference for the fire design of reinforced concrete structures and presents a proposal of an optimized simplified calculation method for the members under simple bending or composed axial-moment load, considering the geometric and concrete characteristics very usual in Brazil.

Keywords: fire, structural safety, reinforced concrete, fire design.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1.1: Incêndio no Cond. Ed. Conjunto Nacional – São Paulo (VEJA SÃO PAULO, 2005). 58

Figura 1.2: Incêndio no Shopping Total – Porto Alegre (G1, 2007). 58

Figura 1.3: Danos nos elementos estruturais do Cond. Ed. Cacique – Porto Alegre (KLEIN et al., 2000; LIMA et al. 2004). 58

Figura 1.4: Ed. Hern Stoltz da Eletrobrás – Rio de Janeiro (Fonte: Eng° Godart Sepeda; Wilian Cézar Aguiar). 58

Figura 1.5: Colapso parcial do Ronan Point, em Londres – UK, 1978 (PEARSON & DELATTE, 2005). 60

Figura 1.6: Colapso parcial de um depósito devido ao incêndio, em Ghent – Bélgica, 1973 (FELLINGER & BREUNESE, 2005). 60

Figura 1.7: Colapso parcial da Katrantzos Sport em Atenas – Grécia, 1980 (PAPAIOANNOU, 1986). 60

Figura 1.8: Colapso parcial do edifício Sede II da CESP em São Paulo – Brasil, 1987 (Revista Incêndio, 2000; BEITEL & IWANKIW, 2002). 61

Figura 1.9: Colapso total do depósito das lojas Zêlo S/A , em Barueri (S. P.) – Brasil, 1994 (COSTA, 2002). 61

Figura 1.10: Danos na estrutura do Mercado Modelo, Montevideo – Uruguai, 1995 (IET, 2002). 61

Figura 1.11: Colapso total da Biblioteca Municipal de Linköping – Suécia, 1996 (ANDERSSON, 2001; CULLHED, 2003). 62

Figura 1.12: Colapso total da fábrica de roupas em Alexandria – Egito, 2000 (BBC News, 2000). 62

Figura 1.13: Colapso total de um edifício em Nova Iguaçu, R.J. – Brasil, 2000. 62

Figura 1.14: Colapso total de um edifício residencial em São Petersburgo – Rússia, 2002 (O ESTADO DE SÃO PAULO, 2002; BBC News, 2002). 63

Figura 1.15: Colapso total de um edifício residencial no Cairo – Egito, 2004 (CBC News, 2004; CHINAdaily.com.cn, 2004). 63

Figura 1.16: Colapso localizado da laje de cobertura de um estacionamento subterrâneo em Gretzenbach – Suíça, 2004 (FEUERWEHRVEREIN HINWIL, 2004). 63

Figura 1.17: Incêndio na Torre Windsor em Madri, 2005 (9 – 11 RESEARCH, 2005). 64

Figura 2.1: Fatores que caracterizam o cenário de incêndio que influenciam a severidade do incêndio. 72

Figura 2.2: Principais estágios de um incêndio real. 73

Figura 2.3: Desempenho dos meios de proteção no comportamento do incêndio real. 74

Figura 2.4: Curvas nominais para materiais celulósicos. 77

Figura 2.5: Curva "H" para materiais hidrocarbonetos (EN 1991-1-2:2002). 79

Figura 2.6: Curva de incêndio externo (EN 1991-1-2:2002). 79

Figura 2.7: Dimensões pertinentes a incêndios localizados do Eurocode 1 (EN 1991-1-2:2002) (ONE STOP SHOP IN STRUCTURAL FIRE ENGINEERING, 2004a e 2004b; adaptados). 82

Figura 2.8: Modelo de uma zona (one-zone model). 86

Figura 2.9: Modelo de duas zonas (two-zone model). 87

Figura 2.10: Uma parte do fluxo total de calor radiante incidente é absorvida e a outra parte, refletida pela superfície do sólido. 89

Figura 3.1: Comparação entre os campos de temperaturas do perfil metálico isolado e coligado à alvenaria ou

laje de concreto após 30 min de aquecimento ISO 834:1975. 94
Figura 3.2: Temperatura no elemento estrutural com base no incêndio natural (COSTA & SILVA, 2003). 95
Figura 3.3: Temperatura no elemento estrutural com base na curva-padrão (COSTA & SILVA, 2003). 95
Figura 3.4: Campo de temperaturas e isotermas da seção de uma viga T, para t = 120 min de incêndio-padrão. 97
Figura 3.5: Processo de dimensionamento de um elemento estrutural em situação de incêndio. 98
Figura 3.6: Conceito de tempo equivalente. 104
Figura 3.7: Relação carga de incêndio do tempo equivalente obtida por Ingberg (1928) apud Harmathy (1987). 105
Figura 3.8: Conceito de tempo equivalente com base na idéia da igualdade de áreas de Ingberg (1928). 106
Figura 3.9: Inércia térmica do concreto endurecido e do aço em função da temperatura elevada. 109
Figura 3.10:Variação de W em função da ventilação e da altura do compartimento (Costa & Silva, 2005c). ... 119

Figura 4.1: Esquematização da freqüência das ações incidentes sobre uma estrutura durante sua vida útil. 126
Figura 4.2: Resposta estrutural à ação eólica e à ação térmica devido ao incêndio. 129
Figura 4.3: Valores efetivos da ação variável na combinação de ações. 131
Figura 4.4: Viga isostática solicitada a uma ação concentrada variável "Q" e a uma ação permanente distribuída uniforme "q". 133
Figura 4.5: Fator de combinação (ψ_0) da ação variável "Q" em função do coeficiente de variação das ações para a viga isostática. 133
Figura 4.6: Variação do fator de redução η_{fi} com a ação variável principal relativa ξ. 138
Figura 4.7: Nível de carregamento em situação de incêndio. 141

Figura 5.1: Transformações físico-químicas do concreto endurecido em altas temperaturas (KHOURY, 2000; adaptado). 146
Figura 5.2: Variação da massa específica do concreto usual em função da temperatura (EN 1992-1-2:2004)... 148
Figura 5.3: Variação da massa específica do concreto usual em função da temperatura, cujo valor à temperatura ambiente é ρ_c = 2400 kg/m³. 148
Figura 5.4: Valor de pico do calor específico do concreto em função do teor de umidade. 149
Figura 5.5: Calor específico por unidade de massa do concreto usual em função da temperatura (EN 1992-1-2:2004). 150
Figura 5.6: Calor específico por unidade de volume do concreto usual em função da temperatura, para concreto de massa específica ρc = 2400 kg/m³ a 20 °C (COSTA et al., 2007). 150
Figura 5.7: Comparação entre curvas de condutividade térmica do concreto em função da temperatura, apresentados em códigos internacionais. 152
Figura 5.8: Condutividade térmica do concreto usual, em função da temperatura (EN 1992-1-2:2004). 152
Figura 5.9: Seções de elementos e localização dos pontos de medição de temperatura (⊗) para a calibração do limite superior da condutividade térmica (SCHLEICH, 2005). 153
Figura 5.10: Seções de elementos e localização dos pontos de medição de temperatura (⊗) para a calibração do limite inferior da condutividade térmica (ANDERBERG, 2001). 153
Figura 5.11: Comparação entre as curvas de condutividade térmica do concreto em função da temperatura na UE. 154
Figura 5.12: Alongamento térmico do concreto em função da temperatura (EN 1992-1-2:2004; SCHLEICH, 2005). 155
Figura 5.13: Comparação entre os alongamentos térmicos do concreto e do aço (EN 1992-1-2:2004). 155

Figura 5.14: Calor específico do aço em função da temperatura (ECCS–MC, 2001; EN 1994-1-2:2005; SCHLEICH, 2005). 157

Figura 5.15: Comparação entre o calor específico do aço em função da temperatura proposto por diversas publicações. 157

Figura 5.16: Condutividade térmica do aço em função da temperatura elevada. 158

Figura 5.17: Comparação entre os valores de condutividade térmica do aço em função da temperatura proposto em algumas publicações. 158

Figura 5.18: Alongamento térmico do aço em função da temperatura (EN 1992-1-2:2004). 159

Figura 5.19: Alongamento térmico do aço em função da temperatura proposto por diversas publicações. 159

Figura 5.20: Coeficiente de redução da resistência do concreto endurecido à temperatura elevada proposto por diversas publicações. 161

Figura 5.21: Coeficiente de redução do módulo de elasticidade do concreto endurecido à temperatura elevada. 162

Figura 5.22: Relação tensão-deformação do concreto de resistência usual em função da temperatura, dada pela equação de Popovics (1973) de ordem 3 para os ramos ascendente e descendente (EN 1992-1-2:2004). 165

Figura 5.23: Relação tensão-deformação do concreto de resistência usual em função da temperatura, com o ramo ascendente dado pela equação de Popovics (1973) de ordem 3, e o ramo descendente linear (EN 1992-1-2:2004). 165

Figura 5.24: Deformação do concreto aquecido ($\varepsilon_{c1,\theta}$) em função da temperatura elevada (EN 1992-1-2:2004). 166

Figura 5.25: Comparação entre os valores do coeficiente redutor $\kappa_{s,\theta}$ apresentados em diversas normas. 170

Figura 5.26: Modelo do princípio de determinação da tensão de prova às deformações residuais de 0,2% e 2%. 170

Figura 5.27: Comparação entre os valores do coeficiente redutor $\kappa_{sE,\theta}$ para armaduras de concreto armado, apresentados em diversas normas. 172

Figura 5.28: Relação tensão-deformação real dos aços laminado à quente e trabalhado a frio ASTM A-36 à temperatura elevada (ACI 216R, 1989). 173

Figura 5.29: Relação tensão-deformação dos aços laminado à quente e trabalhado a frio de ductilidade normal, em função da temperatura (EN 1992-1-2:2004). 173

Figura 6.1: Critérios de resistência ao fogo segundo a estabilidade, a estanqueidade e o isolamento de uma laje. 179

Figura 6.2: Função corta-fogo de uma placa de concreto (JACOB, 2007). 179

Figura 6.3: Efeito de colapsos localizados devido a um incêndio, sobre um edifício. 181

Figura 6.4: Mecanismo de colapso em estruturas isostáticas. 183

Figura 6.5: Mecanismos de ruptura de vigas em edifícios correntes (BUCHANAN, 2001; adaptado). 184

Figura 6.6: Efeito do calor sobre o diagrama de momento fletor de uma viga contínua de dois vãos com carregamento distribuído uniforme "p_d" sem o efeito da restrição a dilatação térmica. 185

Figura 6.7: Restrição à dilatação térmica (GOSSELIN, 1987). 187

Figura 6.8: Efeito de continuidade das estruturas de múltiplos vãos (GOSSELIN, 1987). 187

Figura 6.9: Forças de ação térmica e de reação das estruturas adjacentes frias à dilatação horizontal dos elementos aquecidos. 189

Figura 6.10: Força de reação à dilatação térmica da laje ou viga. 190

Figura 6.11: Ação de membrana em lajes de concreto armado assinalada pelo snap through. 191

Figura 6.12: Ação de membrana em lajes sob grandes flechas. 192

Figura 6.13: Ação de membrana de tração verificada nos ensaios de lajes com fôrma de aço incorporada do laboratório BRE em Cardington (LAMONT, 2001). 193

Figura 6.14: Extensão dos lascamentos (spalling) na superfície inferior de lajes de concreto armado do ensaio em escala real em Cardington (BAILEY, 2002a)..... 194

Figura 6.15: Ação de catenária em laje de concreto armadas em uma direção. 195

Figura 6.16: Posição dos pilares e quantidade de faces expostas ao fogo dentro de um compartimento de incêndio. 196

Figura 6.17: Military Personnel Record Center em Overland – USA, 1973 (BEITEL & IWANKIW, 2002).... 201

Figura 6.18: Mercado Modelo em Montevidéo – Uruguai, 1995 (RODRIGUEZ et al., 1997). 201

Figura 6.19: Biblioteca Municipal de Linköping – Suécia, 1996 (ANDERBERG & BERNANDER, 1996)..... 201

Figura 6.20: Aeroporto Santos Dumont no Rio de Janeiro, 1998 (BATTISTA et al., 2001)..... 201

Figura 6.21: Ed. Cacique em Porto Alegre, 2000 (KLEIN et al., 2000). 202

Figura 6.22: Ed. Hern Stoltz da Eletrobrás no Rio de Janeiro, 2004 (Fonte: Eng° Godart Sepeda). 202

Figura 6.23: Tipos característicos principais de lascamentos do concreto devido ao incêndio – lascamento explosivo. 203

Figura 7.1: Hierarquia de modelos de incêndio e de estrutura para análise termestrutural otimizada (IWANKIW, 2006; adaptado). 211

Figura 7.2: Posição das armaduras em relação a face exposta ao calor. 214

Figura 7.3: Espessura total da laje a ser considerada no método tabular da NBR 15200:2004..... 216

Figura 7.4: Procedimentos de cálculo para o ajuste de c_1, quando a temperatura da armadura for diferente daquelas da Tabela 7.6. 220

Figura 7.5: Comparação entre os resultados experimentais e teóricos (FRANSSEN, 2001)..... 232

Figura 7.6: Divisão da seção de concreto do pilar em faixas (EN 1992-1-2:2004, adaptado). 237

Figura 7.7: O modelo do pilar-padrão e sua linha elástica senoidal..... 238

Figura 7.8: Determinação dos momentos fletores último ($M_{Rd,fi}$), de 2ª ordem ($M_{2,fi}$) e último de 1ª ordem ($M_{1Rd,fi}$) do pilar esbelto em situação de incêndio (EN 1992-1-2:2004)..... 241

Figura 7.9: Seção reduzida dos elementos expostos ao fogo, desprezando uma espessura fictícia "a_z". 248

Figura 7.10: Procedimentos de cálculo da capacidade resistente da seção de concreto armado via métodos simplificados. 251

Figura 7.11: Esforços internos resistentes na seção de momentos positivos..... 252

Figura 7.12: Esforços internos resistentes na seção de momentos negativos..... 252

Figura 7.13: Esforços internos resistentes na seção aquecida nas 4 faces, solicitada à flexão composta..... 254

Figura 7.14: Diagrama de interação ($N_{Rd,fi}$; $M_{Rd,fi}$) de uma seção de concreto armado sob flexão normal composta em situação de incêndio e possíveis modos de ruptura do elemento. 254

Figura 7.15: Relações tensão-deformação dos materiais à temperatura elevada para o método DTU (1974). ... 258

Figura 7.16: Fator de redução da resistência dos materiais (DTU, 1974). 258

Figura 7.17: Fator de redução do módulo de elasticidade dos materiais (DTU, 1974). 258

Figura 7.18: Divisão da zona comprimida em várias fatias para o cálculo da resistência do concreto aquecido.260

Figura 7.19: Posição da linha de ação da força de reação de compressão de alguns tipos de apoios (CARLSON et al., 1965)..... 261

Figura 7.20: Fator de redução da resistência do concreto (ACI 216R, 1989). 263

Figura 7.21: Fator de redução da resistência do aço (ACI 216R, 1989). 263

Figura 7.22: Medida da temperatura do concreto para redução de resistência para o método PCI. 263

Figura 7.23: Fluxograma de cálculo dos efeitos da restrição térmica no projeto de lajes ou vigas. 265

Figura 7.24: Diagrama do corpo livre para uma laje de concreto armado isostática com restrição à dilatação térmica (COSTA & SILVA, 2006b). 265

Figura 7.25: Nomogramas para determinar a intensidade da força de reação "T" devido à restrição à dilatação térmica das lajes de concreto (ISSEN et al., 1970 apud ACI 216R, 1989). 266

Figura 7.26: Os pilares de extremidade devem resistir à força "T" devido ao movimento horizontal do pavimento. 267

Figura 7.27: Temperatura do concreto para redução de resistência para o método ISE (1978). 268

Figura 7.28: Fatores de redução dos materiais para uso do método ISE (1978). 269

Figura 7.29: Deslocamento horizontal no topo de um pilar engastado na base, devido à movimentação do pavimento. 269

Figura 7.30: Forças de ação térmica incidentes na seção longitudinal da viga de canto e na seção transversal de lajes e vigas aquecidas dentro do compartimento. 271

Figura 7.31: Uniformização da temperatura e da resistência do concreto na seção aquecida para o Método das Faixas. 272

Figura 7.32: Fator de redução ($\kappa_{c,\theta M}$) da resistência a compressão do concreto (agregados silicosos) em função da largura efetiva da seção (EN 1992-1-2:2004). 274

Figura 7.33: Divisão da seção em faixas para o cálculo da espessura desprezável "a_z". 274

Figura 7.34: Fator de redução da resistência dos materiais para os Métodos das Faixas e dos 500 °C (EN 1992-1-2:2004). 275

Figura 7.35: Fator de redução do módulo de elasticidade para os Métodos das Faixas e dos 500 °C (EN 1992-1-2:2004). 275

Figura 7.36: Comparação entre as relações tensão-deformação do concreto usada por Hertz (1985) e a parábola-retângulo. 276

Figura 7.37: Resistência do concreto na seção aquecida nas 4 faces, para o Método dos 500 °C. 280

Figura 7.38: Análise termomecânica, incluindo o fenômeno do lascamento no campo de temperaturas e na resistência da seção. 285

Figura 8.1: Procedimentos da análise termestrutural de uma seção de concreto armado via Super Tempcalc® v.5 (COSTA & SILVA, 2007). 288

Figura 8.2: Exemplo de discretização de uma seção de concreto armado em elementos finitos no ambiente SuperTempcalc® (FSD (2000)). 289

Figura 8.3: Deformações específicas, tensões e forças resultantes atuantes em uma seção retangular de concreto armado sujeita à flexão simples. 293

Figura 8.4: Fluxos de calor por radiação nas superfícies de uma laje aquecida na superfície inferior. 296

Figura 8.5: Seção transversal genérica de lajes maciças de concreto armado. 297

Figura 8.6: Seção transversal genérica de lajes nervuradas de concreto armado (COSTA et al., 2007). 299

Figura 8.7: Seção transversal dos perfis nervurados moldados com fôrmas industrializadas (Tabela 8.3). 300

Figura 8.8: Erro entre os resultados numéricos e experimentais para condutividade térmica igual ao limite superior do Eurocode 2 (EN 1992-1-2:2004). 301

Figura 8.9: Erro entre os resultados numéricos e experimentais para condutividade térmica igual ao limite inferior do Eurocode 2 (EN 1992-1-2:2004). 302

Figura 8.10: Evolução da temperatura na superfície não-exposta ao calor em função do tempo. 304

Figura 8.11: Temperatura na superfície não-exposta ao calor de lajes maciças sem revestimento, em função do tempo de aquecimento ISO 834:1975. 307

Figura 8.12: TRF de lajes maciças sem revestimento, segundo o critério de isolamento térmico. 308

Figura 8.13: Espessuras mínimas de lajes maciças sem revestimento para assegurar a temperatura $\theta \leq 160$ °C na superfície não-exposta ao calor. 309

Figura 8.14: Temperatura dentro da seção de lajes maciças sem revestimento, em função da distância "c1" , medida à partir da superfície exposta ao calor, para 30, 60, 90 e 120 min de aquecimento ISO 834:1975. 310

Figura 8.15: Impacto das dimensões das nervuras sobre a resistência ao fogo da mesa, segundo o critério de isolamento térmico. 312

Figura 8.16: Impacto das dimensões das nervuras sobre a resistência ao fogo da capa, segundo o critério de isolamento térmico (COSTA et al., 2007). 313

Figura 8.17: Pontos de para medição das temperaturas. 315

Figura 8.18: Tempo de resistência ao fogo (TRF) de lajes nervuradas segundo o critério de isolamento térmico. 315

Figura 8.19: Perfil geométrico e posição das barras da seção transversal das lajes maciças. 317

Figura 8.20: Posição das barras na seção transversal das vigas. 319

Figura 8.21: TRF segundo o critério de estabilidade estrutural, de seções de momento positivo de lajes maciças projetadas segundo a NBR 6118:2003, $\mu_{fi} = 0,6$. 323

Figura 8.22: TRF segundo o critério de estabilidade estrutural, de seções de momento positivo de lajes maciças projetadas segundo a NBR 6118:2003, $\mu_{fi} = 0,7$. 324

Figura 8.23: TRF segundo o critério de estabilidade estrutural, de seções de momento negativo de lajes maciças projetadas segundo a NBR 6118:2003, $\mu_{fi} = 0,6$, $\rho_s = 0,15\%$. 325

Figura 8.24: TRF segundo o critério de estabilidade estrutural, de seções de momento negativo de lajes maciças projetadas segundo a NBR 6118:2003, $\mu_{fi} = 0,6$, $\rho_s = 1\%$. 326

Figura 8.25: TRF segundo o critério de estabilidade estrutural, de seções de momento negativo de lajes maciças projetadas segundo a NBR 6118:2003, $\mu_{fi} = 0,7$, $\rho_s = 0,15\%$. 327

Figura 8.26: TRF segundo o critério de estabilidade estrutural, de seções de momento negativo de lajes maciças projetadas segundo a NBR 6118:2003, $\mu_{fi} = 0,7$, $\rho_s = 1\%$. 328

Figura 8.27: Momento fletor resistente relativo em função do tempo de aquecimento ISO 834:1975 de seções de momentos positivos e negativos de lajes maciças. 329

Figura 8.28: Momento fletor resistente relativo em função do tempo de aquecimento ISO 834:1975 – seções de momento positivo de lajes maciças, $\rho s = 0,15\%$. 330

Figura 8.29: TRF segundo o critério de estabilidade estrutural, de seções de momento negativo de lajes maciças aquecidas em ambas as faces, projetadas segundo a NBR 6118:2003, $\mu_{fi} = 0,6$. 335

Figura 8.30: TRF segundo o critério de estabilidade estrutural, de seções de momento negativo de lajes maciças aquecidas em ambas as faces, projetadas segundo a NBR 6118:2003, $\mu_{fi} = 0,7$. 336

Figura 8.31: Momento fletor resistente relativo em função do tempo de aquecimento ISO 834:1975 – laje de espessura h = 150 mm aquecida em ambas as superfícies. 337

Figura 8.32: TRF segundo o critério de estabilidade estrutural, de lajes nervuradas segundo o critério de estabilidade estrutural e o valor de cálculo do momento fletor resistente. 339

Figura 8.33: Momento fletor resistente relativo em situação de incêndio em função do tempo de aquecimento ISO 834:1975 para as amostras 1 a 6. 340

Figura 8.34: Momento fletor resistente relativo em situação de incêndio em função do tempo de aquecimento ISO 834:1975 para as amostras 7 a 10. 341

Figura 8.35: TRF segundo o critério de estabilidade estrutural, de seções de momento positivo de vigas T de altura 40 cm $\leq$ hw $\leq$ 60 cm. 343

Figura 8.36: TRF segundo o critério de estabilidade estrutural, de seções de momento negativos de vigas de largura b_w = 14 cm e altura 40 cm $\leq h_w \leq$ 60 cm, para $\mu_{fi} = 0,6$, armadura distribuída em 1 camada. 344

Figura 8.37: TRF segundo o critério de estabilidade estrutural, de seções de momento negativos de vigas de largura b_w = 14 cm e altura 40 cm ≤ h_w ≤ 60 cm, para μ_{fi} = 0,7, armadura distribuída em 1 camada. 345

Figura 8.38: TRF segundo o critério de estabilidade estrutural, de seções de momento negativos de vigas de de largura b_w = 19 cm e altura 40 cm ≤ h_w ≤ 60 cm, para μ_{fi} = 0,6, armadura distribuída em 1 camada. 346

Figura 8.39: TRF segundo o critério de estabilidade estrutural, de seções de momento negativos de vigas de altura 40 cm ≤ h_w ≤ 60 cm, μ_{fi} ≤ 0,6, armadura distribuída em 2 ou 3 camadas iguais. 347

Figura 8.40: TRF segundo o critério de estabilidade estrutural, de seções de momento negativos de vigas de altura 40 cm ≤ h_w ≤ 60 cm, μ_{fi} ≤ 0,7, armadura distribuída em 2 ou 3 camadas iguais. 348

Figura 8.41: Momento fletor resistente relativo em situação de incêndio em função do tempo de aquecimento ISO 834:1975 e da taxa de armadura ρ_s para a vigas T 14 cm x 40 cm. 349

Figura 8.42: Momento fletor resistente relativo em situação de incêndio em função do tempo de aquecimento ISO 834: para a vigas T 14 cm x 40 cm sem e com o revestimento de 10 mm de argamassa de cimento Portland & areia. 349

Figura 8.43: Momento fletor resistente relativo em situação de incêndio em função do tempo de aquecimento ISO 834:1975 para as vigas T de largura b_w = 14 cm e 19 cm. 350

Figura 8.44: Momento fletor resistente relativo em situação de incêndio em função do tempo de aquecimento ISO 834:1975 para as vigas T 14 cm x 40 cm e T 19 cm x 40 cm. 351

Figura 9.1: Redistribuição de momentos para carregamento distribuído uniforme em lajes ou vigas contínuas. 358

Figura 9.2: Procedimentos para determinar o tempo de resistência ao fogo (TRF) de seções armadas, com o auxílio dos gráficos para o dimensionamento. 361

Figura A.1: Geometria das lajes maciças – contorno inferior aquecido e malha # 1000 mm x 0,005 mm. 403

Figura A.2: Geometria das lajes maciças – contorno inferior aquecido e malha # 1000 mm x 0,005 mm. 404

Figura A.3: Geometria genérica – contorno inferior aquecido e malha quadrada # 5 mm. 406

Figura A.4: Seção transversal genérica de lajes nervuradas reticuladas (COSTA et al., 2007). 406

Figura A.5: Seção transversal das lajes nervuradas moldadas com fôrmas industrializadas. 407

Figura A.6: Geometria das amostras 1 e 4 – contorno inferior aquecido e malha triangular ℓ ≤ 0,01 m com refinamento localizado ℓ ≤ 0,005. 408

Figura A.7: Geometria das amostras 5 a 8 – contorno inferior aquecido e malha triangular ℓ ≤ 0,01 m com refinamento localizado ℓ ≤ 0,005. 409

Figura A.8: Geometria das amostras 9 e 10 – contorno inferior aquecido e malha triangular ℓ ≤ 0,01 m com refinamento localizado ℓ ≤ 0,005. 410

Figura A.9: Geometria das vigas T com largura b_w = 14 cm – contorno lateral inferior aquecido e malha quadrada #5 mm. 411

Figura A.10: Geometria das vigas T com largura b_w = 19 cm – contorno lateral inferior aquecido e malha quadrada #5 mm. 412

Figura A.11: Geometria das vigas retangulares– contorno lateral inferior aquecido e malha quadrada # 5 mm. 413

Figura A.12: Isotermas de lajes maciças de espessura h = 50 mm, 60 mm e 70 mm. 416

Figura A.13: Isotermas de lajes maciças de espessura h = 80 mm, 100 mm e 120 mm. 417

Figura A.14: Isotermas de lajes maciças de espessura h = 140 mm, 150 mm e 160 mm. 418

Figura A.15: Temperatura na superfície não-exposta ao calor, em função do tempo de aquecimento ISO 834:1975. 419

Figura A.16: Isotermas de lajes maciças de espessura h = 100 mm, 150 mm e 200 mm. 420

Figura A.17: Temperatura na superfície exposta ao calor, em função do tempo de aquecimento ISO 834:1975.

..... 421

Figura A.18: Temperatura na superfície não-exposta ao calor, em função do tempo de aquecimento ISO 834:1975 e da altura das nervuras. 423

Figura A.19: Temperatura na superfície não-exposta ao calor, em função do tempo de aquecimento ISO 834:1975 e da largura das nervuras. 424

Figura A.20: Temperatura na superfície não-exposta ao calor, em função do tempo de aquecimento ISO 834:1975, da largura e da distância entre nervuras para o intereixo constante. 425

Figura A.21: Temperatura na superfície não-exposta ao calor, em função do tempo de aquecimento ISO 834:1975 e da distância entre nervuras para largura de nervuras constante. 426

Figura A.22: Isotermas para a amostras 1 e 2. 428

Figura A.23: isotermas para a amostras 3 e 4..... 429

Figura A.24: isotermas para a amostras 5 e 6..... 430

Figura A.25: isotermas para a amostras 7 e 8..... 431

Figura A.26: isotermas para a amostras 9 e 10..... 432

Figura A.27: Isotermas gerada pelo SuperTempcalc® para as seções de viga T 14 cm x 40 cm e T 14 cm x 50 cm. 433

Figura A.28: Isotermas gerada pelo SuperTempcalc® para a seção de viga T 14 cm x 55 cm. 434

Figura A.29: Isotermas gerada pelo SuperTempcalc® para a seção de viga T 14 cm x 60 cm. 435

Figura A.30: Isotermas gerada pelo SuperTempcalc® para as seções de viga T 19 cm x 40 cm e T 19 cm x 50 cm. 436

Figura A.31: Isotermas gerada pelo SuperTempcalc® para a seção de viga T 19 cm x 55 cm. 437

Figura A.32: Isotermas gerada pelo SuperTempcalc® para a seção de viga T 19 cm x 60 cm. 438

Figura A.33: isotermas nas seções de vigas retangulares de largura b_w = 14 cm. 439

Figura A.34: isotermas nas seções de vigas retangulares de largura b_w = 19 cm. 440

Figura B.1: Redução do momento fletor resistente positivo relativo em função do tempo de aquecimento para lajes de espessura h = 50 mm. 445

Figura B.2: Redução do momento fletor resistente positivo relativo em função do tempo de aquecimento para lajes de espessura h = 60 mm. 448

Figura B.3: Redução do momento fletor resistente positivo relativo em função do tempo de aquecimento para lajes de espessura h = 70 mm. 451

Figura B.4: Redução do momento fletor resistente positivo relativo em função do tempo de aquecimento para lajes de espessura h = 80 mm. 454

Figura B.5: Redução do momento fletor resistente positivo relativo em função do tempo de aquecimento para lajes de espessura h = 100 mm para as classes de agressividade ambiental I e II..... 457

Figura B.6: Redução do momento fletor resistente positivo relativo em função do tempo de aquecimento para lajes de espessura h = 100 mm para as classes de agressividade ambiental III e IV. 458

Figura B.7: Redução do momento fletor resistente positivo relativo em função do tempo de aquecimento para lajes de espessura h = 120 mm para as classes de agressividade ambiental I e II..... 463

Figura B.8: Redução do momento fletor resistente positivo relativo em função do tempo de aquecimento para lajes de espessura h = 120 mm para as classes de agressividade ambiental III e IV. 464

Figura B.9: Redução do momento fletor resistente positivo relativo em função do tempo de aquecimento para lajes de espessura h = 140 mm para as classes de agressividade ambiental I e II..... 469

Figura B.10: Redução do momento fletor resistente positivo relativo em função do tempo de aquecimento para lajes de espessura h = 140 mm para as classes de agressividade ambiental III e IV. 470

Figura B.11: Redução do momento fletor resistente positivo relativo em função do tempo de aquecimento para lajes de espessura h = 150 mm para as classes de agressividade ambiental I e II..... 475

Figura B.12: Redução do momento fletor resistente positivo relativo em função do tempo de aquecimento para lajes de espessura h = 150 mm para as classes de agressividade ambiental I e II..... 476

Figura B.13: Redução do momento fletor resistente positivo relativo em função do tempo de aquecimento para lajes de espessura h = 160 mm para as classes de agressividade ambiental I e II..... 481

Figura B.14: Redução do momento fletor resistente positivo relativo em função do tempo de aquecimento para lajes de espessura h = 160 mm para as classes de agressividade ambiental III e IV. 482

Figura B.15: Redução do momento fletor resistente negativo relativo em função do tempo de aquecimento para lajes de espessura h = 50 mm. 485

Figura B.16: Redução do momento fletor resistente negativo relativo em função do tempo de aquecimento para lajes de espessura h = 60 mm. 488

Figura B.17: Redução do momento fletor resistente negativo relativo em função do tempo de aquecimento para lajes de espessura h = 70 mm. 491

Figura B.18: Redução do momento fletor resistente negativo relativo em função do tempo de aquecimento para lajes de espessura h = 80 mm para as classes de agressividade ambiental I e II. 494

Figura B.19: Redução do momento fletor resistente negativo relativo em função do tempo de aquecimento para lajes de espessura h = 100 mm para as classes de agressividade ambiental I e II..... 497

Figura B.20: Redução do momento fletor resistente negativo relativo em função do tempo de aquecimento para lajes de espessura h = 100 mm para as classes de agressividade ambiental III. 498

Figura B.21: Redução do momento fletor resistente negativo relativo em função do tempo de aquecimento para lajes de espessura h = 120 mm para as classes de agressividade ambiental I e II..... 503

Figura B.22: Redução do momento fletor resistente negativo relativo em função do tempo de aquecimento para lajes de espessura h = 120 mm para as classes de agressividade ambiental III e IV. 504

Figura B.23: Redução do momento fletor resistente negativo relativo em função do tempo de aquecimento para lajes de espessura h = 140 mm para as classes de agressividade ambiental III e IV. 509

Figura B.24: Redução do momento fletor resistente negativo relativo em função do tempo de aquecimento para lajes de espessura h = 140 mm para as classes de agressividade ambiental III e IV. 510

Figura B.25: Redução do momento fletor resistente negativo relativo em função do tempo de aquecimento para lajes de espessura h = 150 mm para as classes de agressividade ambiental I e II..... 515

Figura B.26: Redução do momento fletor resistente negativo relativo em função do tempo de aquecimento para lajes de espessura h = 150 mm para as classes de agressividade ambiental III e IV. 516

Figura B.27: Redução do momento fletor resistente negativo relativo em função do tempo de aquecimento para lajes de espessura h = 160 mm para as classes de agressividade ambiental I e II..... 521

Figura B.28: Redução do momento fletor resistente negativo relativo em função do tempo de aquecimento para lajes de espessura h = 160 mm para as classes de agressividade ambiental III e IV. 522

Figura B.29: Redução do momento fletor resistente positivo ou negativo relativo em função do tempo de aquecimento para lajes de espessura h = 100 mm para as classes de agressividade ambiental I e II. 525

Figura B.30: Redução do momento fletor resistente positivo ou negativo relativo em função do tempo de aquecimento para lajes de espessura h = 100 mm para as classes de agressividade ambiental III e IV. ... 526

Figura B.31: Redução do momento fletor resistente positivo ou negativo relativo em função do tempo de aquecimento para lajes de espessura h = 150 mm para as classes de agressividade ambiental I e II. 531

Figura B.32: Redução do momento fletor resistente positivo ou negativo relativo em função do tempo de aquecimento para lajes de espessura h = 150 mm para as classes de agressividade ambiental III e IV. ... 532

Figura B.33: Redução do momento fletor resistente positivo ou negativo relativo em função do tempo de aquecimento para lajes de espessura h = 200 mm para as classes de agressividade ambiental I e II. 537

Figura B.34: Redução do momento fletor resistente positivo relativo em função do tempo de aquecimento para lajes de espessura h = 200 mm para as classes de agressividade ambiental III e IV. 538

Figura B.35: Redução do momento fletor resistente positivo relativo em função do tempo de aquecimento para as amostras 1 a 2 de lajes nervuradas..... 540

Figura B.36: Redução do momento fletor resistente positivo relativo em função do tempo de aquecimento para as amostras 3 a 4 de lajes nervuradas..... 541

Figura B.37: Redução do momento fletor resistente positivo relativo em função do tempo de aquecimento para as amostras 5 a 6 de lajes nervuradas..... 542

Figura B.38: Redução do momento fletor resistente positivo relativo em função do tempo de aquecimento para as amostras 7 a 8 de lajes nervuradas..... 543

Figura B.39: Redução do momento fletor resistente positivo relativo em função do tempo de aquecimento para as amostras 9 a 10 de lajes nervuradas..... 544

Figura B.40: Redução do momento fletor resistente positivo relativo em função do tempo de aquecimento de vigas T 14 cm x 40 cm, classe de agressividade ambiental I..... 548

Figura B.41: Redução do momento fletor resistente positivo relativo em função do tempo de aquecimento de vigas T 14 cm x 40 cm, classe de agressividade ambiental II. 549

Figura B.42: Redução do momento fletor resistente positivo relativo em função do tempo de aquecimento de vigas T 14 cm x 40 cm, classe de agressividade ambiental III. 550

Figura B.43: Redução do momento fletor resistente positivo relativo em função do tempo de aquecimento de vigas T 14 cm x 40 cm, classe de agressividade ambiental IV..... 551

Figura B.44: Redução do momento fletor resistente positivo relativo em função do tempo de aquecimento de vigas T 14 cm x 50 cm, classe de agressividade ambiental I..... 555

Figura B.45: Redução do momento fletor resistente positivo relativo em função do tempo de aquecimento de vigas T 14 cm x 50 cm, classe de agressividade ambiental II. 556

Figura B.46: Redução do momento fletor resistente positivo relativo em função do tempo de aquecimento de vigas T 14 cm x 50 cm, classe de agressividade ambiental III. 557

Figura B.47: Redução do momento fletor resistente positivo relativo em função do tempo de aquecimento de vigas T 14 cm x 50 cm, classe de agressividade ambiental IV..... 558

Figura B.48: Redução do momento fletor resistente positivo relativo em função do tempo de aquecimento de vigas T 14 cm x 55 cm, classe de agressividade ambiental I..... 562

Figura B.49: Redução do momento fletor resistente positivo relativo em função do tempo de aquecimento de vigas T 14 cm x 55 cm, classe de agressividade ambiental II. 563

Figura B.50: Redução do momento fletor resistente positivo relativo em função do tempo de aquecimento de vigas T 14 cm x 55 cm, classe de agressividade ambiental III. 564

Figura B.51: Redução do momento fletor resistente positivo relativo em função do tempo de aquecimento de vigas T 14 cm x 55 cm, classe de agressividade ambiental IV..... 565

Figura B.52: Redução do momento fletor resistente positivo relativo em função do tempo de aquecimento de vigas T 14 cm x 60 cm, classe de agressividade ambiental I..... 569

Figura B.53: Redução do momento fletor resistente positivo relativo em função do tempo de aquecimento de vigas T 14 cm x 60 cm, classe de agressividade ambiental II. 570

Figura B.54: Redução do momento fletor resistente positivo relativo em função do tempo de aquecimento de vigas T 14 cm x 60 cm, classe de agressividade ambiental III. 571

Figura B.55: Redução do momento fletor resistente positivo relativo em função do tempo de aquecimento de vigas T 14 cm x 60 cm, classe de agressividade ambiental IV..... 572

Figura B.56: Redução do momento fletor resistente positivo relativo em função do tempo de aquecimento de vigas T 19 cm x 40 cm, classe de agressividade ambiental I..... 576

Figura B.57: Redução do momento fletor resistente positivo relativo em função do tempo de aquecimento de vigas T 19 cm x 40 cm, classe de agressividade ambiental II. 577

Figura B.58: Redução do momento fletor resistente positivo relativo em função do tempo de aquecimento de vigas T 19 cm x 40 cm, classe de agressividade ambiental III. 578

Figura B.59: Redução do momento fletor resistente positivo relativo em função do tempo de aquecimento de vigas T 19 cm x 40 cm, classe de agressividade ambiental IV. 579

Figura B.60: Redução do momento fletor resistente positivo relativo em função do tempo de aquecimento de vigas T 19 cm x 50 cm, classe de agressividade ambiental I. 583

Figura B.61: Redução do momento fletor resistente positivo relativo em função do tempo de aquecimento de vigas T 19 cm x 50 cm, classe de agressividade ambiental II. 584

Figura B.62: Redução do momento fletor resistente positivo relativo em função do tempo de aquecimento de vigas T 19 cm x 50 cm, classe de agressividade ambiental III. 585

Figura B.63: Redução do momento fletor resistente positivo relativo em função do tempo de aquecimento de vigas T 19 cm x 50 cm, classe de agressividade ambiental IV. 586

Figura B.64: Redução do momento fletor resistente positivo relativo em função do tempo de aquecimento de vigas T 19 cm x 55 cm, classe de agressividade ambiental I. 590

Figura B.65: Redução do momento fletor resistente positivo relativo em função do tempo de aquecimento de vigas T 19 cm x 55 cm, classe de agressividade ambiental II. 591

Figura B.66: Redução do momento fletor resistente positivo relativo em função do tempo de aquecimento de vigas T 19 cm x 55 cm, classe de agressividade ambiental III. 592

Figura B.67: Redução do momento fletor resistente positivo relativo em função do tempo de aquecimento de vigas T 19 cm x 55 cm, classe de agressividade ambiental IV. 593

Figura B.68: Redução do momento fletor resistente positivo relativo em função do tempo de aquecimento de vigas T 19 cm x 60 cm, classe de agressividade ambiental I. 597

Figura B.69: Redução do momento fletor resistente positivo relativo em função do tempo de aquecimento de vigas T 19 cm x 60 cm, classe de agressividade ambiental II. 598

Figura B.70: Redução do momento fletor resistente positivo relativo em função do tempo de aquecimento de vigas T 19 cm x 60 cm, classe de agressividade ambiental III. 599

Figura B.71: Redução do momento fletor resistente positivo relativo em função do tempo de aquecimento de vigas T 19 cm x 60 cm, classe de agressividade ambiental IV. 600

Figura B.72: Redução do momento fletor resistente negativo relativo em função do tempo de aquecimento de vigas T 14 cm x 40 cm, classe de agressividade ambiental I. 604

Figura B.73: Redução do momento fletor resistente negativo relativo em função do tempo de aquecimento de vigas T 14 cm x 40 cm, classe de agressividade ambiental II. 605

Figura B.74: Redução do momento fletor resistente negativo relativo em função do tempo de aquecimento de vigas T 14 cm x 40 cm, classe de agressividade ambiental III. 606

Figura B.75: Redução do momento fletor resistente negativo relativo em função do tempo de aquecimento de vigas T 14 cm x 40 cm, classe de agressividade ambiental IV. 607

Figura B.76: Redução do momento fletor resistente negativo relativo em função do tempo de aquecimento de vigas T 14 cm x 50 cm, classe de agressividade ambiental I. 611

Figura B.77: Redução do momento fletor resistente negativo relativo em função do tempo de aquecimento de vigas T 14 cm x 50 cm, classe de agressividade ambiental II. 612

Figura B.78: Redução do momento fletor resistente negativo relativo em função do tempo de aquecimento de vigas T 14 cm x 50 cm, classe de agressividade ambiental III. 613

Figura B.79: Redução do momento fletor resistente negativo relativo em função do tempo de aquecimento de vigas T 14 cm x 50 cm, classe de agressividade ambiental IV. 614

Figura B.80: Redução do momento fletor resistente negativo relativo em função do tempo de aquecimento de vigas T 14 cm x 55 cm, classe de agressividade ambiental II. 617

Figura B.81: Redução do momento fletor resistente negativo relativo em função do tempo de aquecimento de vigas T 14 cm x 55 cm, classe de agressividade ambiental II. 618

Figura B.82: Redução do momento fletor resistente negativo relativo em função do tempo de aquecimento de vigas T 14 cm x 55 cm, classe de agressividade ambiental III. 619

Figura B.83: Redução do momento fletor resistente negativo relativo em função do tempo de aquecimento de vigas T 14 cm x 55 cm, classe de agressividade ambiental IV. 620

Figura B.84: Redução do momento fletor resistente negativo relativo em função do tempo de aquecimento de vigas T 14 cm x 60 cm, classe de agressividade ambiental I. 625

Figura B.85: Redução do momento fletor resistente negativo relativo em função do tempo de aquecimento de vigas T 14 cm x 60 cm, classe de agressividade ambiental II. 626

Figura B.86: Redução do momento fletor resistente negativo relativo em função do tempo de aquecimento de vigas T 14 cm x 60 cm, classe de agressividade ambiental III. 627

Figura B.87: Redução do momento fletor resistente negativo relativo em função do tempo de aquecimento de vigas T 14 cm x 60 cm, classe de agressividade ambiental IV. 628

Figura B.88: Redução do momento fletor resistente negativo relativo em função do tempo de aquecimento de vigas T 19 cm x 40 cm, classe de agressividade ambiental I. 632

Figura B.89: Redução do momento fletor resistente negativo relativo em função do tempo de aquecimento de vigas T 19 cm x 40 cm, classe de agressividade ambiental II. 633

Figura B.90: Redução do momento fletor resistente negativo relativo em função do tempo de aquecimento de vigas T 19 cm x 40 cm, classe de agressividade ambiental III. 634

Figura B.91: Redução do momento fletor resistente negativo relativo em função do tempo de aquecimento de vigas T 19 cm x 40 cm, classe de agressividade ambiental IV. 635

Figura B.92: Redução do momento fletor resistente negativo relativo em função do tempo de aquecimento de vigas T 19 cm x 50 cm, classe de agressividade ambiental I. 639

Figura B.93: Redução do momento fletor resistente negativo relativo em função do tempo de aquecimento de vigas T 19 cm x 50 cm, classe de agressividade ambiental II. 640

Figura B.94: Redução do momento fletor resistente negativo relativo em função do tempo de aquecimento de vigas T 19 cm x 50 cm, classe de agressividade ambiental III. 641

Figura B.95: Redução do momento fletor resistente negativo relativo em função do tempo de aquecimento de vigas T 19 cm x 50 cm, classe de agressividade ambiental IV. 642

Figura B.96: Redução do momento fletor resistente negativo relativo em função do tempo de aquecimento de vigas T 19 cm x 55 cm, classe de agressividade ambiental I. 646

Figura B.97: Redução do momento fletor resistente negativo relativo em função do tempo de aquecimento de vigas T 19 cm x 55 cm, classe de agressividade ambiental II. 647

Figura B.98: Redução do momento fletor resistente negativo relativo em função do tempo de aquecimento de vigas T 19 cm x 55 cm, classe de agressividade ambiental III. 648

Figura B.99: Redução do momento fletor resistente negativo relativo em função do tempo de aquecimento de vigas T 19 cm x 55 cm, classe de agressividade ambiental IV. 649

Figura B.100: Redução do momento fletor resistente negativo relativo em função do tempo de aquecimento de vigas T 19 cm x 60 cm, classe de agressividade ambiental I. 653

Figura B.101: Redução do momento fletor resistente negativo relativo em função do tempo de aquecimento de vigas T 19 cm x 60 cm, classe de agressividade ambiental II. 654

Figura B.102: Redução do momento fletor resistente negativo relativo em função do tempo de aquecimento de vigas T 19 cm x 60 cm, classe de agressividade ambiental III. 655

Figura B.103: Redução do momento fletor resistente negativo relativo em função do tempo de aquecimento de vigas T 19 cm x 60 cm, classe de agressividade ambiental IV. 656

Figura C.1: Isotermas para seções de lajes maciças em função da distância "c_1" em relação à superfície exposta ao calor. 658

Figura C.2: Isotermas para seção de largura b_w = 14 cm e b_w = 15 cm, aquecida nas 3 superfícies. 659

Figura C.3: Isotermas para seção de largura b_w = 20 cm e h ≥ 25 cm, aquecida nas 3 superfícies. 660

Figura C.4: Isotermas para seção 40 cm x 40 cm aquecida em 4 faces. 661
Figura C.5: Isotermas para seções aquecidas nas 4 faces. 662
Figura C.6: Isotermas para seções aquecidas nas 4 faces. 663
Figura C.7: Isotermas para seções aquecidas nas 4 faces. 664
Figura C.8: Isotermas para seção 20 cm x 20 cm aquecida em 2 faces. 665
Figura C.9: Isotermas para seção 20 cm x 30 cm aquecida em 2 faces. 666
Figura C.10: Isotermas para seção 20 cm x 40 cm aquecida em 2 faces. 667
Figura C.11: Isotermas para seção 20 cm x 50 cm aquecida em 2 faces. 668
Figura C.12: Isotermas para seção 20 cm x 100 cm aquecida em 2 faces. 669
Figura C.13: Isotermas para seção 20 cm x 120 cm aquecida em 2 faces. 670
Figura C.14: Isotermas para seção 20 cm x 150 cm aquecida em 2 faces. 671
Figura C.15: Isotermas para seção 30 cm x 30 cm aquecida nas 2 faces. 672
Figura C.16: Isotermas para seção 30 cm x 100 cm aquecida em 2 faces. 673
Figura C.17: Isotermas para seção 30 cm x 150 cm aquecida em 2 faces. 674
Figura C.18: Isotermas para seção 40 cm x 40 cm aquecidas nas 2 faces. 675
Figura C.19: Isotermas para seção 40 cm x 40 cm. 676
Figura C.20: Momento fletor resistente relativo em situação de incêndio para lajes com cobrimento de armaduras da classe de agressividade ambiental I. 678
Figura C.21: Momento fletor resistente relativo em situação de incêndio para lajes – cobrimento de armaduras da classe de agressividade ambiental II. 679
Figura C.22: Momento fletor resistente relativo em situação de incêndio para lajes com cobrimento de armaduras da classe de agressividade ambiental III e IV. 680
Figura C.23: Momento fletor resistente relativo em situação de incêndio para lajes com cobrimento de armaduras da classe de agressividade ambiental I. 681
Figura C.24: Momento fletor resistente relativo em situação de incêndio para lajes com cobrimento de armaduras da classe de agressividade ambiental II. 682
Figura C.25: Momento fletor resistente relativo em situação de incêndio para lajes com cobrimento de armaduras da classe de agressividade ambiental III. 683
Figura C.26: Momento fletor resistente relativo em situação de incêndio para lajes com cobrimento de armaduras da classe de agressividade ambiental IV. 684
Figura C.27: Momento fletor resistente relativo em situação de incêndio para lajes com cobrimento de armaduras da classe de agressividade ambiental I. 685
Figura C.28: Momento fletor resistente relativo em situação de incêndio para lajes com cobrimento de armaduras da classe de agressividade ambiental II. 686
Figura C.29: Momento fletor resistente relativo em situação de incêndio para lajes com cobrimento de armaduras da classe de agressividade ambiental III. 687
Figura C.30: Momento fletor resistente relativo em situação de incêndio para lajes com cobrimento de armaduras da classe de agressividade ambiental IV. 688
Figura C.31: Momento fletor resistente relativo em situação de incêndio para lajes nervuradas moldadas com fôrmas industrializadas de seção e arranjo de armaduras padronizado pelo fabricante. 689
Figura C.32: Momento fletor resistente relativo em situação de incêndio para lajes nervuradas moldadas com fôrmas industrializadas de seção e arranjo de armaduras padronizado pelo fabricante. 690
Figura C.33: Momento fletor resistente relativo em situação de incêndio para lajes nervuradas moldadas com fôrmas industrializadas de seção e arranjo de armaduras padronizado pelo fabricante. 691
Figura C.34: Momento fletor resistente relativo em situação de incêndio para lajes nervuradas moldadas com

fôrmas industrializadas de seção e arranjo de armaduras padronizado pelo fabricante. 692

Figura C.35: Momento fletor resistente relativo em situação de incêndio para lajes nervuradas moldadas com fôrmas industrializadas de seção e arranjo de armaduras padronizado pelo fabricante. 693

Figura C.36: Seções T 14 cm x $h_w \geq 40$ cm e T 19 cm x $h_w \geq 40$ cm para momentos positivos. 694

Figura C.37: Momentos negativos, seções T 14 cm x 40 cm $\leq h_w \leq 60$ cm, armadura distribuída em 1 camada. 695

Figura C.38: Momentos negativos, seções T 19 cm x 40 cm $\leq h_w \leq 60$ cm, armadura distribuída em 1 camada. 696

Figura C.39: Momentos negativos, seções T 14 cm x 40 cm $\leq h_w \leq 60$ cm, armadura em 2 camadas iguais. 696

Figura C.40: Momentos negativos, seções T 19 cm x 40 cm $\leq h_w \leq 60$ cm, armadura em 2 camadas iguais. 697

LISTA DE TABELAS

Tabela 1.1: Edificações de concreto armado que sofreram algum tipo de colapso estrutural durante o incêndio. 59

Tabela 2.1: Curva-padrão ASTM E119 (2000). 77

Tabela 2.2: Valores do coeficiente de transferência de calor por convecção (EN 1992-1-1:2002). 91

Tabela 3.1: Tempo requerido de resistência ao fogo – TRRF (min) das edificações (NBR 14432:2001). 100

Tabela 3.2: Classificação das edificações em função da ocupação (NBR 14432:2001). 101

Tabela 3.3: Relação entre a carga de incêndio (q) e o tempo equivalente (t_e) (GEWAIN et al., 2003). 105

Tabela 3.4: Valores de γ_{s1} (EN 1991-1-2:2002). 114

Tabela 3.5: Valores de γ_{s2} (EN 1991-1-2:2002). 114

Tabela 3.6: Fator κ em função da inércia térmica do material da compartimentação. 115

Tabela 3.7: Fatores de ponderação das medidas de segurança contra incêndio. 115

Tabela 3.8: Valores de γ_{s2} em função do risco de ativação. 117

Tabela 3.9: Valores de ρ, c e λ de concreto e tijolo (SILVA, 2004). 118

Tabela 3.10: Valores para γ_{s1} recomendados pela IT 08:04. 120

Tabela 4.1: Coeficientes de ponderação das ações para combinações últimas (NBR 8681:2003). 130

Tabela 4.2: Fatores de combinação ($\psi 0$) e de redução ($\psi 2$) para as ações variáveis em edifícios (NBR 8681:2003). 130

Tabela 4.3: Desvio-padrão das variáveis aleatórias X e Y e a soma $Z = X + Y$. 134

Tabela 4.4: Coeficientes de ponderação das resistências no ELU (NBR 6118:2003; NBR 15200:2004). 142

Tabela 5.1: Valor de pico do calor específico do concreto situado entre 100 e 200 °C (ECCS–MC, 2001; EN 1992-1-2:2004, EN 1994-1-2:2005, SCHLEICH, 2005). 149

Tabela 5.2: Coeficiente de redução da resistência à compressão do concreto, em função da temperatura. 161

Tabela 5.3: Deformação específica do concreto em função da temperatura elevada (EN 1992-1-2:2004). 164

Tabela 5.4: Coeficientes de redução para a resistência ($\kappa_{s,\theta}$), o limite de elasticidade ($\kappa_{sp,\theta}$) e o módulo de elasticidade ($\kappa_{sE,\theta}$) do aço de armadura passiva (EN 1992:1-2:2004; NBR 15200:2004). 169

Tabela 7.1: Dimensões mínimas para lajes apoiadas em vigas (NBR 15200:2004). 217

Tabela 7.2: Dimensões mínimas[‡‡] para lajes lisas ou cogumelo (NBR 15200:2004). 217

Tabela 7.3: Dimensões mínimas para lajes nervuradas biapoiadas (NBR 15200:2004). 217

Tabela 7.4: Dimensões mínimas para lajes nervuradas apoiadas em três ou quatro lados ou contínuas (NBR 15200:2004). 217

Tabela 7.5: Dimensões mínimas para vigas biapoiadas (NBR 15200:2004). 217

Tabela 7.6: Temperatura crítica das armaduras consideradas pelo método tabular (EN 1992-1-2:2004). 218

Tabela 7.7: Nível de tensão das armaduras[*], consideradas pelo método tabular (EN 1992-1-2:2004). 218

Tabela 7.8: Dimensões mínimas para vigas contínuas (NBR 15200:2004). 221

Tabela 7.9: Dimensões mínimas para pilares (NBR 15200:2004). 221

Tabela 7.10: Dimensões mínimas para pilares-parede (NBR 15200:2004). 222

Tabela 7.11: Laboratórios responsáveis pelos ensaios dos pilares empregados na calibração do método "A" da EN 1992-1-2:2004 (DOTREPPE et al., 1996; FRANSSEN, 2000; FRANSSEN, 2001). 223

Tabela 7.12: Dimensões mínimas para pilares de seções retangular e circular sujeitos à flexão composta (valores moderados para momentos de 1ª ordem: excentricidade e = 0,5.b ≤ 200 mm) com taxa mecânica de armadura ω = 1 (EN 1992-1-2:2004)..... 236

Tabela 7.13: Coeficientes de ponderação das resistências dos materiais no ELU para as combinações últimas excepcionais e outras grandezas particulares ao método. 257

Tabela 7.14: Classificação da construção, quanto à restrição a dilatação térmica (ASTM Designation E119-00). 262

Tabela 7.15: Altura da linha de ação da força "T" para lajes de concreto moldadas in loco (CRSI, 1980). 265

Tabela 7.16: Largura "w" da seção transversal dos elementos estruturais, onde "b_w" corresponde à largura, considerada como a menor dimensão ($b_w \leq h$) dessa seção (EN 1991-1-2:2004). 273

Tabela 7.17: Largura mínima em função do TRRF, para uso do Método dos 500 °C (EN 1992-1-2:2004)..... 281

Tabela 7.18: Largura mínima em função da carga de incêndio, para uso do Método dos 500 °C com curvas paramétricas (EN 1992-1-2:2004). 281

Tabela 7.19: Fator de ajuste da espessura "a_{500}" para concretos de alta resistência (EN 1992-1-2:2004). 281

Tabela 7.20: Comparação entre as limitações de uso dos métodos simplificados. 283

Tabela 8.1: Combinação entre o coeficiente de transferência de calor por convecção (α_c) e a emissividade resultante (ε_r) para análise térmica (EN 1991-1-2:2002; EN 1992-1-2:2004). 295

Tabela 8.2: Dimensões das seções transversais das amostras utilizadas análise paramétrica dimensional. 298

Tabela 8.3: Dimensões das seções transversais dos perfis nervurados moldados com fôrmas industrializadas. 299

Tabela 8.4: Valores do tempo de resistência ao fogo (TRF) em função da espessura da laje (FIP-CEB Bulletins N° 145 (1982), N° 174 (1987) e N° 208 (1991); EN 1992-1-2:2004). 301

Tabela 8.5: Espessuras mínimas da laje maciça sem revestimento para assegurar a temperatura θ ≤ 160 °C na superfície não-exposta ao calor. 309

Tabela 8.6: Alturas (espessuras) mínimas da laje maciça sem revestimento, que interferem no campo de temperaturas próximo à superfície exposta ao calor. 310

Tabela 8.7: Fatores de redução para a resistência $\kappa_{c,\theta}$ (concreto) e $\kappa_{s,\theta}$ (aço) (NBR 15200:2004). 316

Tabela 8.8: Coeficientes de minoração da resistência dos materiais (NBR 8681:2003; NBR 15200:2004)..... 316

Tabela 8.9: Cobrimentos e posição do CG das barras de aço das lajes maciças analisadas. 318

Tabela 8.10: Dimensões das seções transversais das vigas de concreto armado utilizadas na investigação computacional. 318

Tabela 8.11: Cobrimentos e posição do CG das barras de aço das vigas analisadas..... 319

Tabela 8.12: Valor de cálculo do momento fletor resistente em situação de incêndio de lajes nervuradas. 339

Tabela 9.1: Fatores de redução para combinação excepcional das ações em situação de incêndio. 357

Tabela A.1: Dimensões das seções nervuradas reticuladas das amostras (Figura A.4)..... 405

Tabela A.2: Dimensões das seções transversais das amostras utilizadas na investigação computacional. 407

Tabela A.3: Temperatura na superfície não-exposta ao calor em função do tempo de aquecimento ISO 834:1975,

do teor de umidade livre e das condições de contorno (fluxos de calor por convecção e radiação), para a condutividade térmica igual ao limite superior da EN 1992-1-2:2004. 414

Tabela A.4: Erro entre os valores de temperatura via análises numérica e experimental, na superfície não-exposta ao calor em função do tempo de aquecimento ISO 834:1975, para a condutividade térmica igual ao limite superior da EN 1992-1-2:2004. 414

Tabela A.5: Temperatura na superfície não exposta ao calor em função do tempo de aquecimento ISO 834:1975, do teor de umidade livre e das condições de contorno (fluxos de calor por convecção e radiação), para a condutividade térmica igual ao limite inferior da EN 1992-1-2:2004. 415

Tabela A.6: Erro entre os valores de temperatura via análises numérica e experimental, na superfície não-exposta ao calor em função do tempo de aquecimento ISO 834:1975, para a condutividade térmica igual ao limite inferior da EN 1992-1-2:2004. 415

Tabela A.7: Temperatura na superfície não-exposta ao calor em função do tempo de aquecimento ISO 834:1975. 419

Tabela A.8: Temperatura na superfície exposta ao calor em função do tempo de aquecimento ISO 834:1975. 421

Tabela A.9: Temperatura na superfície não exposta ao calor da mesa, entre as nervuras, em função do tempo de aquecimento ISO 834:1975 – amostras do grupo "H". 423

Tabela A.10: Temperatura na superfície não exposta ao calor da mesa, entre as nervuras, em função do tempo de aquecimento ISO 834:1975 – amostras do grupo "BW". 424

Tabela A.11: Temperatura na superfície não exposta ao calor da mesa, entre as nervuras, em função do tempo de aquecimento ISO 834:1975 – amostras do grupo "BWI". 425

Tabela A.12: Temperatura na superfície não exposta ao calor da mesa, entre as nervuras, em função do tempo de aquecimento ISO 834:1975 – amostras "BE". 426

Tabela A.13: Temperatura na superfície não exposta ao calor da mesa entre as nervuras dos perfis industrializados. 427

Tabela B.1: Cobrimentos e posição do CG das barras de aço das lajes maciças. 441

Tabela B.2: Cobrimentos e posição do CG das barras de aço das vigas. 441

Tabela B.3: Fatores de redução para a resistência $\kappa_{c,\theta}$ (concreto) e $\kappa_{s,\theta}$ (aço) (NBR 15200:2004). 442

Tabela B.4: Coeficientes de minoração da resistência dos materiais (NBR 8681:2003; NBR 15200:2004). 442

Tabela B.5: Variação da resistência (momento positivo) da seção de concreto armado de lajes de espessura h = 50 mm. Coeficiente redutor do aço ($\kappa_{s,\theta}$) para a tensão de prova estabelecida pela deformação residual $\varepsilon_{s,\theta}$ = 2%. 443

Tabela B.6: Variação da resistência (momento positivo) da seção de concreto armado de lajes de espessura h = 50 mm. Coeficiente redutor do aço ($\kappa_{s,\theta}$) para a tensão de prova estabelecida pela deformação residual $\varepsilon_{s,\theta}$ = 0,2%. 444

Tabela B.7: Variação da resistência (momento positivo) da seção de concreto armado de lajes de espessura h = 60 mm. Coeficiente redutor do aço ($\kappa_{s,\theta}$) para a tensão de prova estabelecida pela deformação residual $\varepsilon_{s,\theta}$ = 2%. 446

Tabela B.8: Variação da resistência (momento positivo) da seção de concreto armado de lajes de espessura h = 60 mm. Coeficiente redutor do aço ($\kappa_{s,\theta}$) para a tensão de prova estabelecida pela deformação residual $\varepsilon_{s,\theta}$ = 0,2%. 447

Tabela B.9: Variação da resistência (momento positivo) da seção de concreto armado de lajes de espessura h = 70 mm. Coeficiente redutor do aço ($\kappa_{s,\theta}$) para tensão de prova estabelecida pela deformação residual $\varepsilon_{s,\theta}$ = 2%. 449

Tabela B.10: Variação da resistência (momento positivo) da seção de concreto armado de lajes de espessura h = 70 mm. Coeficiente redutor do aço ($\kappa_{s,\theta}$) para a tensão de prova estabelecida pela deformação residual $\varepsilon_{s,\theta}$ = 0,2%. 450

Tabela B.11: Variação da resistência (momento positivo) da seção de concreto armado de lajes de espessura h =

80 mm. Coeficiente redutor do aço ($\kappa_{s,\theta}$) para a tensão de prova estabelecida pela deformação residual $\varepsilon_{s,\theta}$ = 2%..... 452

Tabela B.12: Variação da resistência (momento positivo) da seção de concreto armado de lajes de espessura h = 80 mm. Coeficiente redutor do aço ($\kappa_{s,\theta}$) para a tensão de prova estabelecida pela deformação residual $\varepsilon_{s,\theta}$ = 0,2%..... 453

Tabela B.13: Variação da resistência (momento positivo) da seção de concreto armado de lajes de espessura h = 100 mm. Coeficiente redutor do aço ($\kappa_{s,\theta}$) para a tensão de prova estabelecida pela deformação residual $\varepsilon_{s,\theta}$ = 2%. 455

Tabela B.14: Variação da resistência (momento positivo) da seção de concreto armado de lajes de espessura h = 100 mm. Coeficiente redutor do aço ($\kappa_{s,\theta}$) para a tensão de prova estabelecida pela deformação residual $\varepsilon_{s,\theta}$ = 0,2%. 456

Tabela B.15: Variação da resistência (momento positivo) da seção de concreto armado de lajes de espessura h = 120 mm. Coeficiente redutor do aço ($\kappa_{s,\theta}$) para a tensão de prova estabelecida pela deformação residual $\varepsilon_{s,\theta}$ = 2%. 459

Tabela B.16: Variação da resistência (momento positivo) da seção de concreto armado de lajes de espessura h = 120 mm. Coeficiente redutor do aço ($\kappa_{s,\theta}$) para a tensão de prova estabelecida pela deformação residual $\varepsilon_{s,\theta}$ = 0,2%. 461

Tabela B.17: Variação da resistência (momento positivo) da seção de concreto armado de lajes de espessura h = 140 mm. Coeficiente redutor do aço ($\kappa_{s,\theta}$) para a tensão de prova estabelecida pela deformação residual $\varepsilon_{s,\theta}$ = 2%. 465

Tabela B.18: Variação da resistência (momento positivo) da seção de concreto armado de lajes de espessura h = 140 mm. Coeficiente redutor do aço ($\kappa_{s,\theta}$) para a tensão de prova estabelecida pela deformação residual $\varepsilon_{s,\theta}$ = 0,2%. 467

Tabela B.19: Variação da resistência (momento positivo) da seção de concreto armado de lajes de espessura h = 150 mm. Coeficiente redutor do aço ($\kappa_{s,\theta}$) para a tensão de prova estabelecida pela deformação residual $\varepsilon_{s,\theta}$ = 2%. 471

Tabela B.20: Variação da resistência (momento positivo) da seção de concreto armado de lajes de espessura h = 150 mm. Coeficiente redutor do aço ($\kappa_{s,\theta}$) para a tensão de prova estabelecida pela deformação residual $\varepsilon_{s,\theta}$ = 0,2%. 473

Tabela B.21: Variação da resistência (momento positivo) da seção de concreto armado de lajes de espessura h = 160 mm. Coeficiente redutor do aço ($\kappa_{s,\theta}$) para a tensão de prova estabelecida pela deformação residual $\varepsilon_{s,\theta}$ = 0,2%. 477

Tabela B.22: Variação da resistência (momento positivo) da seção de concreto armado de lajes de espessura h = 160 mm. Coeficiente redutor do aço ($\kappa_{s,\theta}$) para a tensão de prova estabelecida pela deformação residual $\varepsilon_{s,\theta}$ = 0,2%. 479

Tabela B.23: Variação da resistência (momento negativo) da seção de concreto armado de lajes de espessura h = 50 mm. Coeficiente redutor do aço ($\kappa_{s,\theta}$) para a tensão de prova estabelecida pela deformação residual $\varepsilon_{s,\theta}$ = 2%..... 483

Tabela B.24: Variação da resistência (momento negativo) da seção de concreto armado de lajes de espessura h = 50 mm. Coeficiente redutor do aço ($\kappa_{s,\theta}$) para a tensão de prova estabelecida pela deformação residual $\varepsilon_{s,\theta}$ = 0,2%..... 484

Tabela B.25: Variação da resistência (momento negativo) da seção de concreto armado de lajes de espessura h = 60 mm. Coeficiente redutor do aço ($\kappa_{s,\theta}$) para a tensão de prova estabelecida pela deformação residual $\varepsilon_{s,\theta}$ = 2%..... 486

Tabela B.26: Variação da resistência (momento negativo) da seção de concreto armado de lajes de espessura h = 60 mm. Coeficiente redutor do aço ($\kappa_{s,\theta}$) para a tensão de prova estabelecida pela deformação residual $\varepsilon_{s,\theta}$ = 0,2%..... 487

Tabela B.27: Variação da resistência (momento negativo) da seção de concreto armado de lajes de espessura h = 70 mm. Coeficiente redutor do aço ($\kappa_{s,\theta}$) para a tensão de prova estabelecida pela deformação residual $\varepsilon_{s,\theta}$ = 2%..... 489

Tabela B.28: Variação da resistência (momento negativo) da seção de concreto armado de lajes de espessura h = 70 mm. Coeficiente redutor do aço ($\kappa_{s,\theta}$) para a tensão de prova estabelecida pela deformação residual $\varepsilon_{s,\theta}$ =

0,2%..... 490

Tabela B.29: Variação da resistência (momento negativo) da seção de concreto armado de lajes de espessura h = 80 mm. Coeficiente redutor do aço ($\kappa_{s,\theta}$) para a tensão de prova estabelecida pela deformação residual $\varepsilon_{s,\theta}$ = 2%..... 492

Tabela B.30: Variação da resistência (momento negativo) da seção de concreto armado de lajes de espessura h = 80 mm. Coeficiente redutor do aço ($\kappa_{s,\theta}$) para a tensão de prova estabelecida pela deformação residual $\varepsilon_{s,\theta}$ = 0,2%..... 493

Tabela B.31: Variação da resistência (momento negativo) da seção de concreto armado de lajes de espessura h = 100 mm. Coeficiente redutor do aço ($\kappa_{s,\theta}$) para a tensão de prova estabelecida pela deformação residual $\varepsilon_{s,\theta}$ = 2%. 495

Tabela B.32: Variação da resistência (momento negativo) da seção de concreto armado de lajes de espessura h = 100 mm. Coeficiente redutor do aço ($\kappa_{s,\theta}$) para a tensão de prova estabelecida pela deformação residual $\varepsilon_{s,\theta}$ = 0,2%. 496

Tabela B.33: Variação da resistência (momento negativo) da seção de concreto armado de lajes de espessura h = 120 mm. Coeficiente redutor do aço ($\kappa_{s,\theta}$) para a tensão de prova estabelecida pela deformação residual $\varepsilon_{s,\theta}$ = 2%. 499

Tabela B.34: Variação da resistência (momento negativo) da seção de concreto armado de lajes de espessura h = 120 mm. Coeficiente redutor do aço ($\kappa_{s,\theta}$) para a tensão de prova estabelecida pela deformação residual $\varepsilon_{s,\theta}$ = 0,2%. 501

Tabela B.35: Variação da resistência (momento negativo) da seção de concreto armado de lajes de espessura h = 140 mm. Coeficiente redutor do aço ($\kappa_{s,\theta}$) para a tensão de prova estabelecida pela deformação residual $\varepsilon_{s,\theta}$ = 2%. 505

Tabela B.36: Variação da resistência (momento negativo) da seção de concreto armado de lajes de espessura h = 140 mm. Coeficiente redutor do aço ($\kappa_{s,\theta}$) para a tensão de prova estabelecida pela deformação residual $\varepsilon_{s,\theta}$ = 0,2%. 507

Tabela B.37: Variação da resistência (momento negativo) da seção de concreto armado de lajes de espessura h = 150 mm. Coeficiente redutor do aço ($\kappa_{s,\theta}$) para a tensão de prova estabelecida pela deformação residual $\varepsilon_{s,\theta}$ = 2%. 511

Tabela B.38: Variação da resistência (momento negativo) da seção de concreto armado de lajes de espessura h = 150 mm. Coeficiente redutor do aço ($\kappa_{s,\theta}$) para a tensão de prova estabelecida pela deformação residual $\varepsilon_{s,\theta}$ = 0,2%. 513

Tabela B.39: Variação da resistência (momento negativo) da seção de concreto armado de lajes de espessura h = 160 mm. Coeficiente redutor do aço ($\kappa_{s,\theta}$) para a tensão de prova estabelecida pela deformação residual $\varepsilon_{s,\theta}$ = 2%. 517

Tabela B.40: Variação da resistência (momento negativo) da seção de concreto armado de lajes de espessura h = 160 mm. Coeficiente redutor do aço ($\kappa_{s,\theta}$) para a tensão de prova estabelecida pela deformação residual $\varepsilon_{s,\theta}$ = 0,2%. 519

Tabela B.41: Variação da resistência (momentos positivo e negativo) da seção de concreto armado de lajes de espessura h = 100 mm. Coeficiente redutor do aço ($\kappa_{s,\theta}$) para a tensão de prova estabelecida pela deformação residual $\varepsilon_{s,\theta}$ = 2%. 523

Tabela B.42: Variação da resistência (momentos positivo e negativo) da seção de concreto armado de lajes de espessura h = 100 mm. Coeficiente redutor do aço ($\kappa_{s,\theta}$) para a tensão de prova estabelecida pela deformação residual $\varepsilon_{s,\theta}$ = 0,2%. 524

Tabela B.43: Variação da resistência (momentos positivo e negativo) da seção de concreto armado de lajes de espessura h = 150 mm. Coeficiente redutor do aço ($\kappa_{s,\theta}$) para a tensão de prova estabelecida pela deformação residual $\varepsilon_{s,\theta}$ = 2%. 527

Tabela B.44: Variação da resistência (momentos positivo e negativo) da seção de concreto armado de lajes de espessura h = 150 mm. Coeficiente redutor do aço ($\kappa_{s,\theta}$) para a tensão de prova estabelecida pela deformação residual $\varepsilon_{s,\theta}$ = 0,2%. 529

Tabela B.45: Variação da resistência (momentos positivo e negativo) da seção de concreto armado de lajes de espessura h = 200 mm. Coeficiente redutor do aço ($\kappa_{s,\theta}$) para a tensão de prova estabelecida pela deformação residual $\varepsilon_{s,\theta}$ = 2%. 533

Tabela B.46: Variação da resistência (momentos positivo e negativo) da seção de concreto armado de lajes de espessura h = 200 mm. Coeficiente redutor do aço ($\kappa_{s,\theta}$) para a tensão de prova estabelecida pela deformação residual $\varepsilon_{s,\theta}$ = 0,2%. 535

Tabela B.47: Variação da resistência (momento positivo) da seção de concreto armado de lajes nervuradas moldadas com fôrmas industrializadas. Coeficiente redutor do aço ($\kappa_{s,\theta}$) para a tensão de prova estabelecida pela deformação residual $\varepsilon_{s,\theta}$ = 2%..... 539

Tabela B.48: Variação da resistência (momento positivo) da seção de concreto armado de vigas T 14 cm x 40 cm – arranjo de armaduras e 1 camada. 545

Tabela B.49: Variação da resistência (momento positivo) da seção de concreto armado de vigas T 14 cm x 40 cm – arranjo de armaduras e várias camadas. 547

Tabela B.50: Variação da resistência (momento positivo) da seção de concreto armado de vigas T 14 cm x 50 cm – arranjo de armaduras e 1 camada. 552

Tabela B.51: Variação da resistência (momento positivo) da seção de concreto armado de vigas T 14 cm x 50 cm – arranjo de armaduras e várias camadas. 554

Tabela B.52: Variação da resistência (momento positivo) da seção de concreto armado de vigas T 14 cm x 55 cm – arranjo de armaduras e 1 camada. 559

Tabela B.53: Variação da resistência (momento positivo) da seção de concreto armado de vigas T 14 cm x 55 cm – arranjo de armaduras e várias camadas. 561

Tabela B.54: Variação da resistência (momento positivo) da seção de concreto armado de vigas T 14 cm x 60 cm – arranjo de armaduras e 1 camada. 566

Tabela B.55: Variação da resistência (momento positivo) da seção de concreto armado de vigas T 14 cm x 60 cm – arranjo de armaduras e várias camadas. 568

Tabela B.56: Variação da resistência (momento positivo) da seção de concreto armado de vigas T 19 cm x 40 cm – arranjo de armaduras e 1 camada. 573

Tabela B.57: Variação da resistência (momento positivo) da seção de concreto armado de vigas T 19 cm x 40 cm – arranjo de armaduras e várias camadas. 575

Tabela B.58: Variação da resistência (momento positivo) da seção de concreto armado de vigas T 19 cm x 50 cm – arranjo de armaduras e 1 camada. 580

Tabela B.59: Variação da resistência (momento positivo) da seção de concreto armado de vigas T 19 cm x 50 cm – arranjo de armaduras e várias camadas. 582

Tabela B.60: Variação da resistência (momento positivo) da seção de concreto armado de vigas T 19 cm x 55 cm – arranjo de armaduras e 1 camada. 587

Tabela B.61: Variação da resistência (momento positivo) da seção de concreto armado de vigas T 19 cm x 55 cm – arranjo de armaduras e várias camadas. 589

Tabela B.62: Variação da resistência (momento positivo) da seção de concreto armado de vigas T 19 cm x 60 cm – arranjo de armaduras e 1 camada. 594

Tabela B.63: Variação da resistência (momento positivo) da seção de concreto armado de vigas T 19 cm x 60 cm – arranjo de armaduras e várias camadas. 596

Tabela B.64: Variação da resistência (momento negativo) da seção de concreto armado de vigas 14 cm x 40 cm – arranjo de armaduras e 1 camada. 601

Tabela B.65: Variação da resistência (momento negativo) da seção de concreto armado de vigas 14 cm x 40 cm – arranjo de armaduras e várias camadas. 603

Tabela B.66: Variação da resistência (momento negativo) da seção de concreto armado de vigas 14 cm x 50 cm – arranjo de armaduras e 1 camada. 608

Tabela B.67: Variação da resistência (momento negativo) da seção de concreto armado de vigas 14 cm x 50 cm – arranjo de armaduras e várias camadas. 610

Tabela B.68: Variação da resistência (momento negativo) da seção de concreto armado de vigas 14 cm x 55 cm – arranjo de armaduras e 1 camada. 615

Tabela B.69: Variação da resistência (momento negativo) da seção de concreto armado de vigas 14 cm x 55 cm – arranjo de armaduras e várias camadas. 621

Tabela B.70: Variação da resistência (momento negativo) da seção de concreto armado de vigas 14 cm x 60 cm – arranjo de armaduras e 1 camada. 622

Tabela B.71: Variação da resistência (momento negativo) da seção de concreto armado de vigas 14 cm x 60 cm – arranjo de armaduras e várias camadas. 624

Tabela B.72: Variação da resistência (momento negativo) da seção de concreto armado de vigas 19 cm x 40 cm – arranjo de armaduras e 1 camada. 629

Tabela B.73: Variação da resistência (momento negativo) da seção de concreto armado de vigas 19 cm x 40 cm – arranjo de armaduras e várias camadas. 631

Tabela B.74: Variação da resistência (momento negativo) da seção de concreto armado de vigas 19 cm x 50 cm – arranjo de armaduras e 1 camada. 636

Tabela B.75: Variação da resistência (momento negativo) da seção de concreto armado de vigas 19 cm x 50 cm – arranjo de armaduras e várias camadas. 638

Tabela B.76: Variação da resistência (momento negativo) da seção de concreto armado de vigas 19 cm x 55 cm – arranjo de armaduras e 1 camada. 643

Tabela B.77: Variação da resistência (momento negativo) da seção de concreto armado de vigas 19 cm x 55 cm – arranjo de armaduras e várias camadas. 645

Tabela B.78: Variação da resistência (momento negativo) da seção de concreto armado de vigas 19 cm x 60 cm – arranjo de armaduras e 1 camada. 650

Tabela B.79: Variação da resistência (momento negativo) da seção de concreto armado de vigas 19 cm x 60 cm – arranjo de armaduras e várias camadas. 652

Tabela D.1: Comparação entre os métodos de determinação do TRRF das estruturas de concreto..... 705

Tabela D.2: Combinações possíveis de dimensões mínimas de vigas contínuas ou de pórticos (Tabela 9 da NBR 15200:2004)..... 706

Tabela D.3: Combinações possíveis de dimensões mínimas de pilares (Tabela 10 da NBR 15200:2004)..... 707

Tabela D.4: Fatores de redução para a resistência $\kappa_{c,\theta}$ (concreto) e $\kappa_{s,\theta}$ (aço) (NBR 15200:2004)..... 709

Tabela D.5: Coeficientes de minoração da resistência dos materiais (NBR 8681:2003; NBR 15200:2004)..... 709

Tabela D.6: Características mecânicas dos materiais utilizados para o concreto armado das lajes e vigas em estudo. 710

Tabela D.7: Combinação de ações e coeficientes de ponderação recomendados pelas normas européias e brasileiras. 710

Tabela D.8:Medição de temperaturas no meio das faixas da seção. 711

Tabela D.9: Redução da resistência dos materiais para lajes maciças deste exemplo..... 712

Tabela D.10: Valor de cálculo dos momentos positivos nos vãos das lajes maciças. 713

Tabela D.11: Valor de cálculo dos momentos resistentes positivos reais nos vãos das lajes maciças. 713

Tabela D.12: Valor de cálculo dos momentos fletores negativos na região dos apoios das lajes maciças..... 713

Tabela D.13: Temperatura das armaduras, fatores de redução de resistência e deformações lineares em função da temperatura. 719

Tabela D.14: Medição de temperaturas no meio das faixas da seção. 722

SUMÁRIO

1 Introdução 57

1.1 Objetivos da tese 64

1.2 Justificativa 65

1.3 Procedimentos metodológicos 66

1.4 Antecedentes históricos 67

1.5 Organização do texto 68

2 Ação térmica em situação de incêndio 71

2.1 Introdução 71

2.2 O incêndio real 72

2.3 O incêndio padronizado 76

2.3.1 ISO 834:1975 – Fire Resistance Tests – Elements of Building Construction 76

2.3.2 Curva "H" (EN 1991-2-2:2002) 78

2.3.3 Curva de incêndio externo (EN 1991-1-2:2002) – External fire curve 79

2.4 Curvas naturais 80

2.4.1 Curvas naturais simplificadas 81

2.4.1.1 Curvas paramétricas do Eurocode 1 (EN 1991-1-2:2002) 81

2.4.1.2 Curvas para incêndios localizados do Eurocode 1 (EN 1991-1-2:2002) 82

2.4.1.2.1 Curvas para chamas internas ao compartimento 82

2.4.1.2.2 Curvas para chamas provenientes de aberturas (EN 1991-1-2:2002) 82

2.4.2 Curvas naturais avançadas 83

2.4.2.1 Modelos de campo (Field models) 83

2.4.2.2 Modelos de zonas (zone models) 85

2.4.2.2.1 Modelos de uma zona (one-zone models) 85

2.4.2.2.2 Modelos de duas zonas (two-zone models) 86

2.4.2.3 Curva BFD 87

2.5 Transferência de calor 88

2.5.1 Radiação 89

2.5.2 Convecção 90

2.5.3 Condução 91

3 Tempo requerido de resistência ao fogo (TRRF) 93

3.1 Introdução 93

3.2 Temperatura dos elementos estruturais 93

3.2.1 Elementos de seções finas 94
3.2.2 Elementos de seções robustas 96
3.3 Tempo de resistência ao fogo (TRF) 97
3.4 Métodos para determinar o TRRF 99
3.4.1 Método tabular 99
3.4.2 Método do tempo equivalente 104
3.4.2.1 Equivalência de Ingberg 105
3.4.2.2 Equivalência de Kawagoe & Sekine 106
3.4.2.3 Equivalência de Magnusson & Thelandersson 107
3.4.2.4 Equivalência de Law 107
3.4.2.5 Equivalência de Pettersson 108
3.4.2.6 Equivalência de Harmathy & Mehaffey 108
3.4.2.7 Equivalência do CIB W14 111
3.4.2.8 Equivalência da Norma DIN 18230-1 111
3.4.2.9 Equivalência do Eurocode 1-1-2 (EN 1991-1-2:2002) 112
3.4.2.10 Proposta de Costa & Silva (2005c) 114
3.4.2.11 Limitações de uso do método do tempo equivalente conforme Instrução Técnica do Corpo de Bombeiros do Estado de São Paulo 120
3.4.3 Método de Gretener para avaliação de risco 121
4 Ações nas estruturas em situação de incêndio 125
4.1 Introdução 125
4.2 Ações mecânicas 127
4.2.1 Combinação última excepcional de ações 129
4.2.1.1 Fator de combinação efetivo de cada uma das ações variáveis (ψ_{2j}) 132
4.2.2 Combinação última normal de ações 136
4.2.3 Relação entre as combinações últimas excepcionais e normais de ações 137
4.3 Resistência dos materiais 142
5 Propriedades dos materiais à temperatura elevada 145
5.1 Introdução 145
5.2 Propriedades térmicas 145
5.2.1 Concreto endurecido 147
5.2.1.1 Massa específica 147
5.2.1.2 Calor específico 148
5.2.1.3 Condutividade térmica 150
5.2.1.4 Alongamento térmico 154
5.2.2 Aço 156
5.2.2.1 Massa específica 156

5.2.2.2 Calor específico ... 156
5.2.2.3 Condutividade térmica ... 157
5.2.2.4 Alongamento térmico ... 158
5.3 Propriedades mecânicas ... 159
5.3.1 Concreto endurecido ... 160
5.3.1.1 Resistência à compressão ... 160
5.3.1.2 Módulo de elasticidade ... 162
5.3.1.3 Relação tensão-deformação ... 163
5.3.2 Aço ... 168
5.3.2.1 Resistência à tração ... 168
5.3.2.2 Módulo de elasticidade ... 171
5.3.2.3 Relação tensão-deformação ... 172
6 Comportamento estrutural ... 177
6.1 Introdução ... 177
6.2 Colapso de elementos estruturais de concreto em situação de incêndio ... 179
6.3 Modos de ruptura de elementos de concreto em situação de incêndio ... 183
6.3.1 Flexão simples ... 183
6.3.1.1 Rótulas plásticas e mecanismos de colapso ... 186
6.3.2 O efeito das restrições às deformações térmicas ... 187
6.4 Ações de membrana e de catenária ... 191
6.4.1 Ação de membrana ... 191
6.4.2 Ação de catenária ... 195
6.5 Flexão composta ... 196
6.6 Tração ... 197
6.7 Cisalhamento e Torção ... 197
6.8 Outros fatores que podem levar à ruptura do concreto ... 198
6.8.1 Aderência entre o aço e o concreto ... 198
6.8.2 Lascamentos (Spalling) ... 202
7 Métodos de dimensionamento ... 207
7.1 Introdução ... 207
7.2 Filosofia de projeto de estruturas de concreto em situação de incêndio ... 208
7.3 Métodos de dimensionamento de estruturas de concreto em situação de incêndio ... 212
7.3.1 Método tabular ... 212
7.3.1.1 Método “A” do Eurocode 2 (EN 1992-1-2:2004) ... 222
7.3.1.2 Método “B” do Eurocode 2 (EN 1992-1-2:2004) ... 234

7.3.1.2.1 O método do pilar-padrão ... *237*
7.3.1.2.2 Diagrama momento-normal-curvatura (M x N x 1/r) ... *242*
7.3.1.3 Outros métodos prescritivos de nível 1 para o dimensionamento de pilares ... 245
7.3.2 Métodos simplificados ... 246
7.3.2.1 Método DTU, 1974 ... 256
7.3.2.2 Método PCI ... 260
7.3.2.3 Método ISE (1978) ... 268
7.3.2.4 Método das Faixas ... 271
7.3.2.5 Método dos 500 °C (FIP-CEB-Bulletin D'Information N° 145 (1982), 174 (1987) e 208 (1991)). 279
7.3.2.6 Comparação entre métodos simplificados. ... 282
7.3.3 Métodos gerais de cálculo ... 284
8 Análise termestrutural de elementos sujeitos à flexão simples ... 287
8.1 Introdução ... 287
8.2 Modelagem computacional ... 287
8.2.1 Análise térmica ... 287
8.2.1.1 Discretização do domínio ... 289
8.2.2 Análise estrutural em situação de incêndio ... 292
8.3 Avaliação de resistência segundo o critério de isolamento térmico ... 295
8.3.1 Modelagem da ação térmica ... 295
8.3.2 Propriedades térmicas dos materiais ... 296
8.3.3 Características geométricas das amostras ... 297
8.3.3.1 Lajes maciças ... 297
8.3.3.2 Lajes nervuradas reticuladas ... 297
8.3.3.3 Lajes nervuradas moldadas com fôrmas industrializadas ... 299
8.3.4 Resultados e comentários ... 300
8.3.4.1 Validação da análise térmica numérica ... 300
8.3.4.2 Análise da sensibilidade do isolamento térmico ao teor de umidade livre do concreto ... 305
8.3.4.3 Análise da sensibilidade do campo de temperaturas em função da espessura da laje maciça sem revestimento ... 309
8.3.4.4 Análise paramétrica dimensional do isolamento térmico em função das dimensões das nervuras de lajes nervuradas ... 311
8.3.4.5 Análise do isolamento térmico das lajes nervuradas moldadas com fôrmas industrializadas 314
8.4 Avaliação de resistência segundo o critério de estabilidade estrutural para elementos sujeitos à flexão simples ... 316
8.4.1 Propriedades mecânicas dos materiais ... 316
8.4.2 Características geométricas das amostras ... 317

8.4.2.1 Lajes maciças ... 317
8.4.2.2 Lajes nervuradas moldadas com fôrmas industrializadas ... 318
8.4.2.3 Vigas ... 318
8.4.3 Resultados e comentários ... 319
8.4.3.1 Lajes maciças aquecidas na superfície inferior ... 321
8.4.3.2 Lajes maciças aquecidas em ambas as superfícies ... 334
8.4.3.3 Lajes nervuradas ... 338
8.4.3.4 Vigas ... 341

9 Proposta de dimensionamento de elementos de concreto armado à flexão simples em situação de incêndio ... 355

9.1 Introdução ... 355
9.2 Ações e segurança ... 355
9.3 Método expedito de dimensionamento de estruturas de concreto armado sujeitas à flexão simples ... 359

10 Conclusões ... 363

10.1 Análise térmica ... 363
10.1.1 Lajes maciças ... 364
10.1.2 Lajes nervuradas ... 365
10.2 Análise termestrutural ... 365
10.2.1 Lajes maciças ... 366
10.2.2 Lajes nervuradas com nervuras moldadas em fôrmas industrializadas ... 367
10.2.3 Vigas ... 367
10.3 Considerações finais ... 368
10.4 Trabalhos futuros ... 369

REFERÊNCIAS ... 373

APÊNDICE A – Análise térmica ... 403

A.1 Características geométricas e discretização da seção ... 403
A.1.1 Lajes maciças ... 403
A.1.2 Lajes nervuradas para análises paramétricas dimensionais de nervuras ... 405
A.1.3 Lajes nervuradas moldadas com fôrmas industrializadas ... 407
A.1.4 Vigas T ... 411
A.1.5 Vigas retangulares ... 413
A.2 Resultados ... 414

A.2.1 Validação do modelo matemático da ação térmica **414**
A.2.2 Lajes maciças **416**
A.2.2.1 Aquecidas na superfície inferior. 416
A.2.2.2 Lajes maciças com ambas as superfícies expostas ao calor 420
A.2.3 Lajes nervuradas para análises paramétricas dimensionais de nervuras **422**
A.2.4 Lajes nervuradas moldadas com fôrmas industrializadas **427**
A.2.5 Vigas T **433**
A.2.6 Vigas retangulares **439**

APÊNDICE B – Análise termestrutural **441**

B.1 Características geométricas e discretização da seção **441**
B.2 Resultados do cálculo da capacidade resistente das seções de concreto armado **443**
B.2.1 Lajes maciças com a superfície inferior exposta ao calor **443**
B.2.1.1 Seções de momento positivo 443
B.2.1.2 Seções de momento negativo 483
B.2.2 Lajes maciças com ambas as superfícies expostas ao calor **523**
B.2.3 Lajes nervuradas moldadas com fôrmas industrializadas **539**
B.2.4 Vigas T **545**
B.2.4.1 Seções de momento positivo 545
B.2.4.2 Seções de momento negativo 601

APÊNDICE C – Ferramentas de auxílio para cálculos simplificados **657**

C.1 Isotermas de seções usuais de elementos de concreto armado **657**
C.1.1 Lajes maciças **658**
C.1.2 Vigas **659**
C.1.3 Pilares **661**
C.1.3.1 Aquecimento em 4 faces 661
C.1.3.2 Aquecimento em 2 faces 665
C.2 Ábacos para dimensionamento à flexão simples de seções de concreto armado **676**
C.2.1 Lajes maciças **676**
C.2.1.1 Momentos positivos 676
C.2.1.2 Momentos negativos 681
C.2.1.3 Momentos positivos ou negativos para lajes aquecidas em ambas as superfícies 685
C.2.2 Lajes nervuradas moldadas com fôrmas industrializadas **689**
C.2.3 Vigas T **694**
C.2.4 Vigas I **695**

APÊNDICE D – Exemplos de cálculo 699

D.1 Determinação do TRRF – tempo requerido de resistência ao fogo 699

D.1.1 Método tabular (NBR 14432:2001) 699

D.1.2 Tempo equivalente 701

D.2 Dimensionamento de elementos de concreto armado em situação de incêndio 705

D.2.1 Método tabular (NBR 15200:2004) 705

D.2.1.1 Lajes 705

D.2.1.2 Vigas 706

D.2.1.3 Pilares 707

D.2.2 Métodos simplificados 709

D.2.2.1 Lajes maciças 709

D.2.2.1.1 Método das Faixas 711

D.2.2.1.2 Método dos 500 °C 715

D.2.2.1.3 Método simplificado proposto nesta tese 715

D.2.2.2 Pilares 718

D.2.2.2.1 Método dos 500 °C 720

D.2.2.2.2 Método das Faixas 721

APÊNDICE A – Análise térmica

A.1 Características geométricas e discretização da seção

A.1.1 Lajes maciças

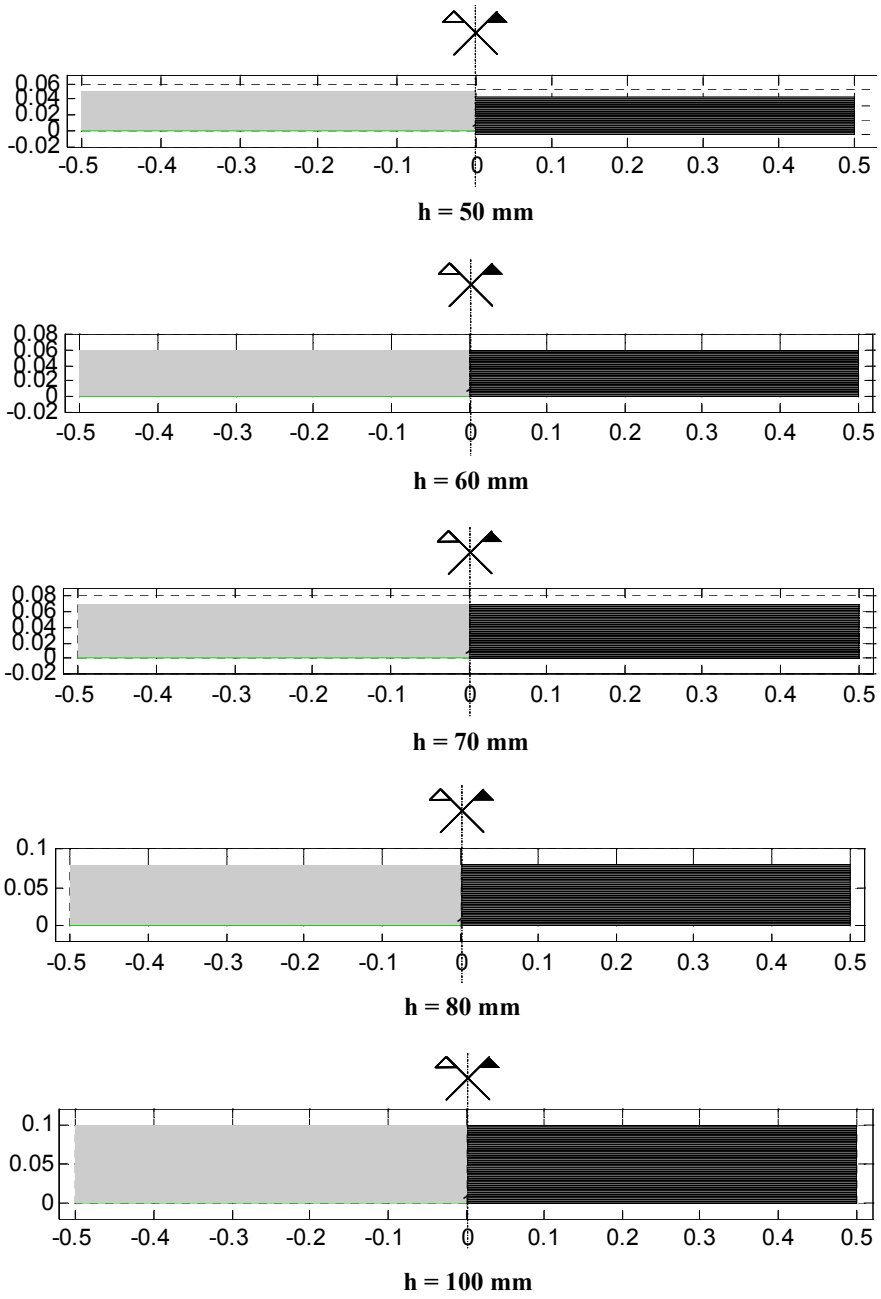


Figura A.1: Geometria das lajes maciças – contorno inferior aquecido e malha # 1000 mm x 0,005 mm.

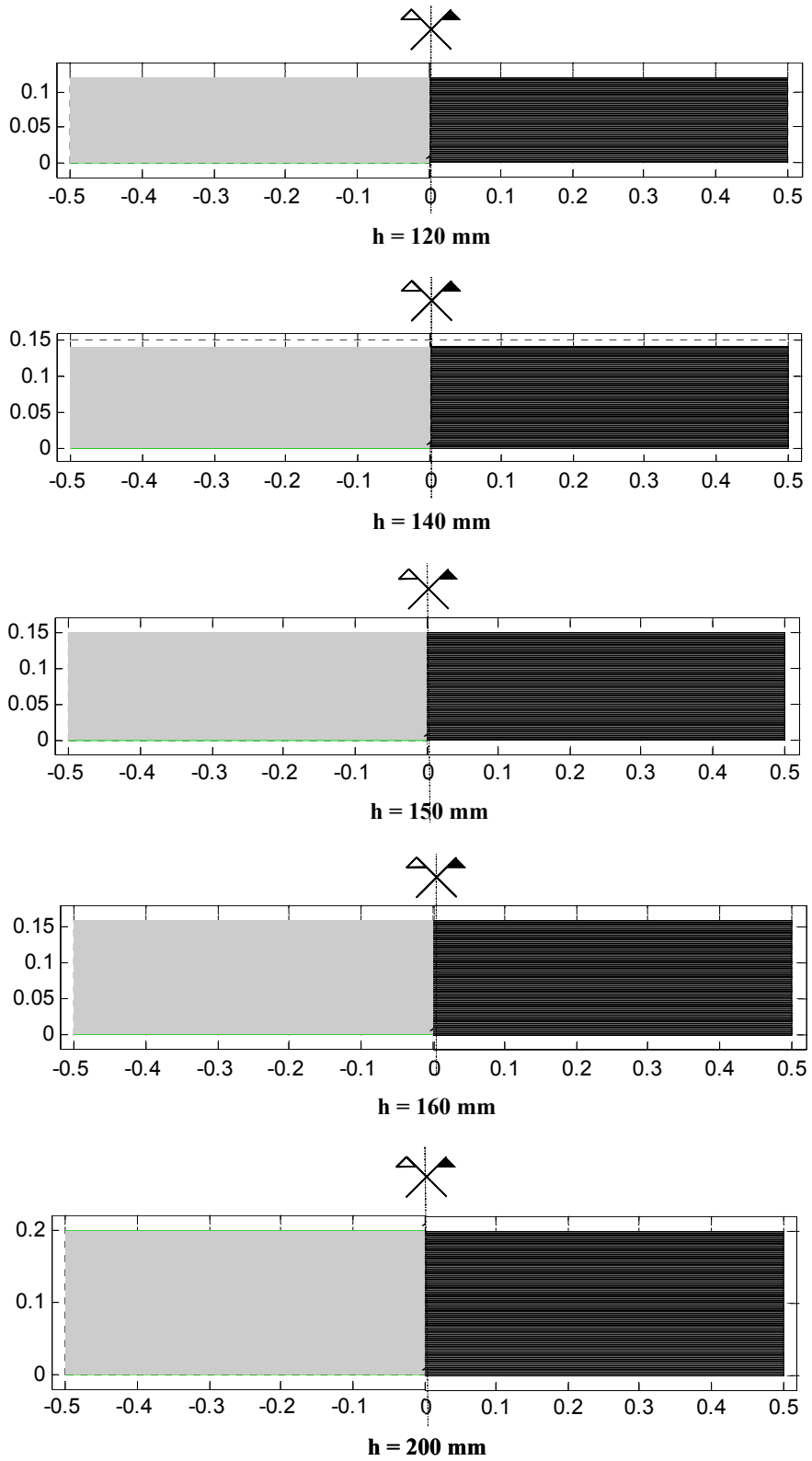


Figura A.2: Geometria das lajes maciças – contorno inferior aquecido e malha # 1000 mm x 0,005 mm.

A.1.2 Lajes nervuradas para análises paramétricas dimensionais de nervuras

Tabela A.1: Dimensões das seções nervuradas reticuladas das amostras (Figura A.4).

n°	Amostra	Dimensões (mm)				
		i	b_e	b_w	h_e	h_{capa}
1	**H-00**	10	50	50	0	50
2	**H-01**	10	50	50	10	50
3	**H-02**	10	50	50	20	50
4	**H-03**	10	50	50	30	50
5	**H-04**	10	50	50	40	50
6	**H-05**	10	50	50	50	50
7	**H-06**	10	50	50	60	50
8	**H-07**	10	50	50	70	50
9	**H-08**	10	50	50	80	50
10	**H-09**	10	50	50	90	50
11	**H-10**	10	50	50	100	50
12	**BW-10**	460	450	10	150	50
13	**BW-50**	500	450	50	150	50
14	**BW-100**	550	450	100	150	50
15	**BW-150**	600	450	150	150	50
16	**BW-200**	650	450	200	150	50
17	**BW-250**	700	450	250	150	50
18	**BW-300**	750	450	300	150	50
19	**BW-350**	800	450	350	150	50
20	**BW-400**	850	450	400	150	50
21	**BW-450**	900	450	450	150	50
22	**BW-500**	950	450	500	150	50
23	**BWI-50**	300	50	250	150	50
24	**BWI-100**	300	100	200	150	50
25	**BWI-150**	300	150	150	150	50
26	**BWI-200**	300	200	100	150	50
27	**BWI-250**	300	250	50	150	50
28	**BWI-300**	300	300	0	150	50
29	**BE-00**	5	0	5	150	50
30	**BE-I-00**	5	0	5	150	50
31	**BE-05**	10	5	5	150	50
32	**BE-10**	15	10	5	150	50
33	**BE-15**	20	15	5	150	50
34	**BE-20**	25	20	5	150	50
35	**BE-25**	30	25	5	150	50
36	**BE-50**	55	50	5	150	50
37	**BE-100**	105	100	5	150	50
38	**BE-200**	205	200	5	150	50

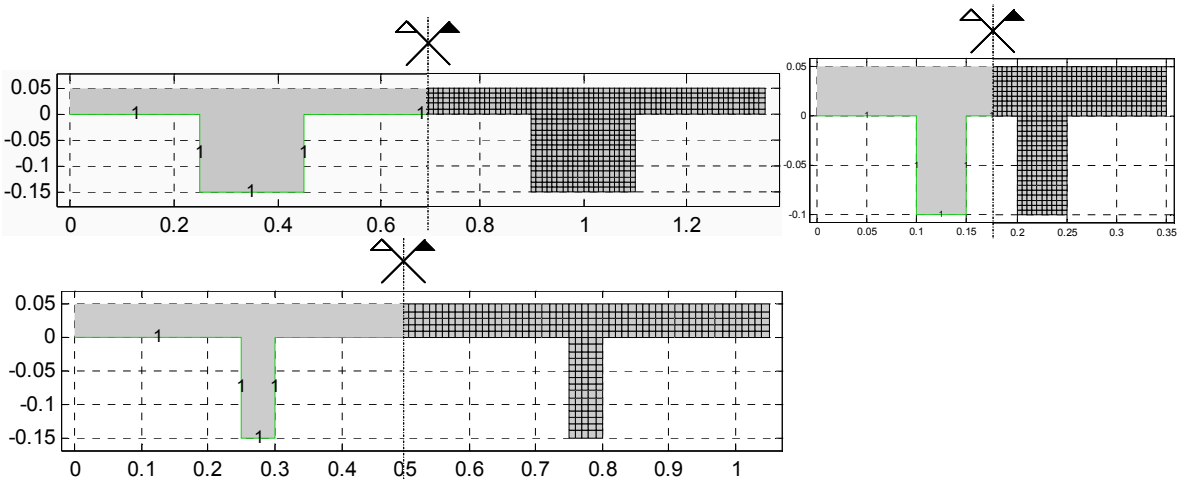


Figura A.3: Geometria genérica – contorno inferior aquecido e malha quadrada # 5 mm.

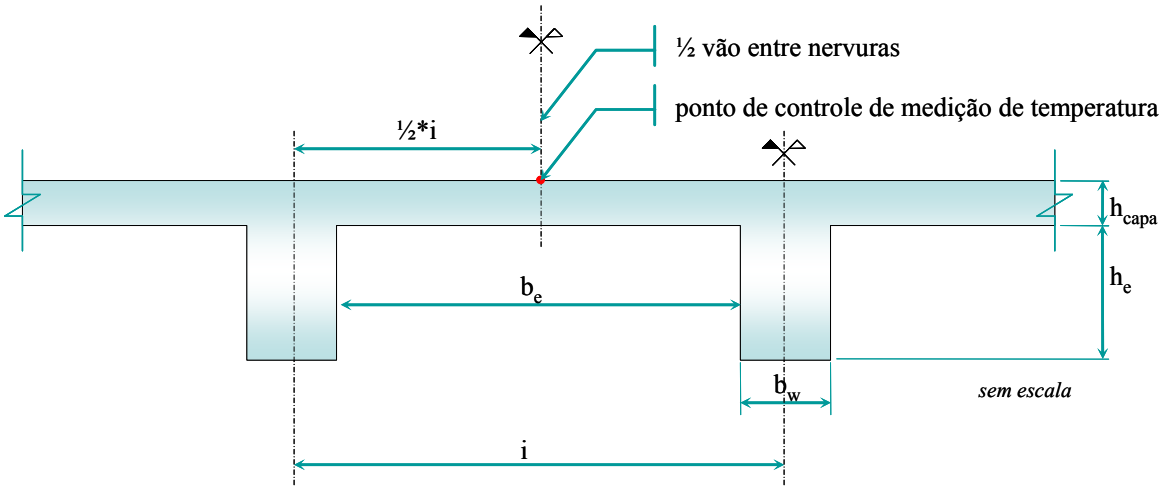


Figura A.4: Seção transversal genérica de lajes nervuradas reticuladas (COSTA *et al*., 2007).

A.1.3 Lajes nervuradas moldadas com fôrmas industrializadas

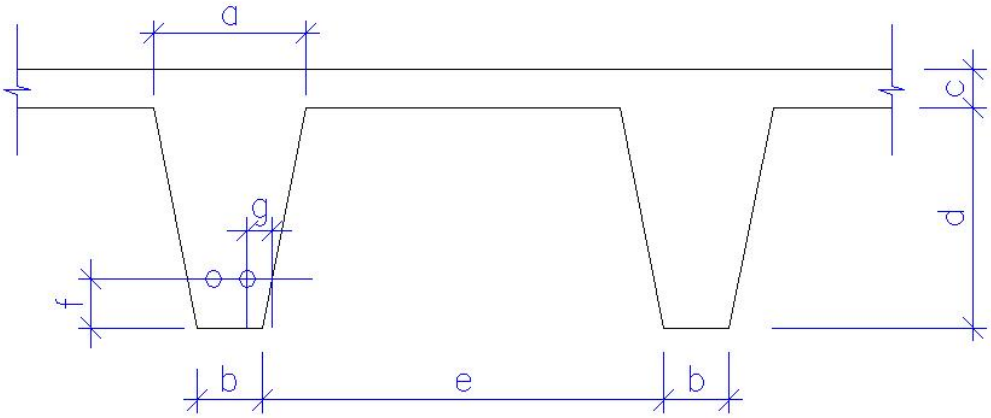


Figura A.5: Seção transversal das lajes nervuradas moldadas com fôrmas industrializadas.

Tabela A.2: Dimensões das seções transversais das amostras utilizadas na investigação computacional.

Amostra	Modelo	Fabricante	Dimensões (cm)							Diâmetro das barras (mm)
			a	b	c	d	e	f	g	2 ø
1	AS	Astra S/A Indústria e Comércio	15,09	7	5	15	53	2,5	3,2	10
2	AS	Astra S/A Indústria e Comércio	15,09	7	7	15	53	2,5	3,2	10
3	AT	Atex do Brasil Ltda.	12,5	8	5	18	52	2,5	2,8	10
4	AT	Atex do Brasil Ltda.	12,5	8	8	18	52	2,62	2,9	12,5
5	UL	Ulma Andaimes, Fôrmas e Escoramentos, Ltda.	17,5	12	5	20	68	2,62	3,0	12,5
6	UL	Ulma Andaimes, Fôrmas e Escoramentos, Ltda.	17,5	12	8	20	68	2,8	3,2	16
7	UL	Ulma Andaimes, Fôrmas e Escoramentos, Ltda.	23,14	12	5	30	68	2,8	3,3	16
8	UL	Ulma Andaimes, Fôrmas e Escoramentos, Ltda.	23,14	12	8	30	68	3,0	3,6	20
9	AT	Atex do Brasil Ltda.	25,8	12,5	5	40	67,5	2,8	3,3	16
10	AS	Atex do Brasil Ltda.	25,8	12,5	8	40	67,5	3,0	3,5	20

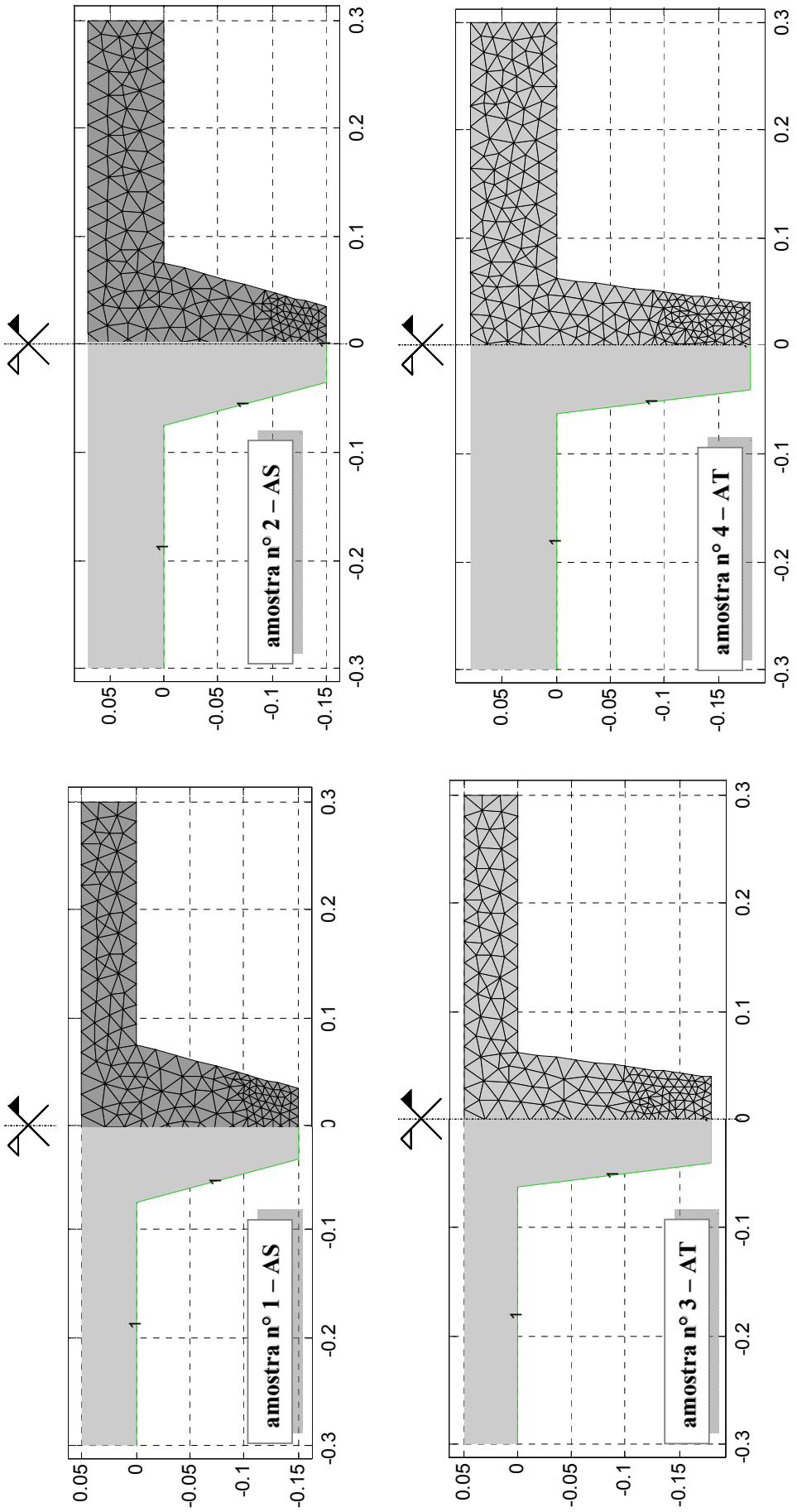


Figura A.6: Geometria das amostras 1 e 4 – contorno inferior aquecido e malha triangular $\ell \leq 0{,}01$ m com refinamento localizado $\ell \leq 0{,}005$.

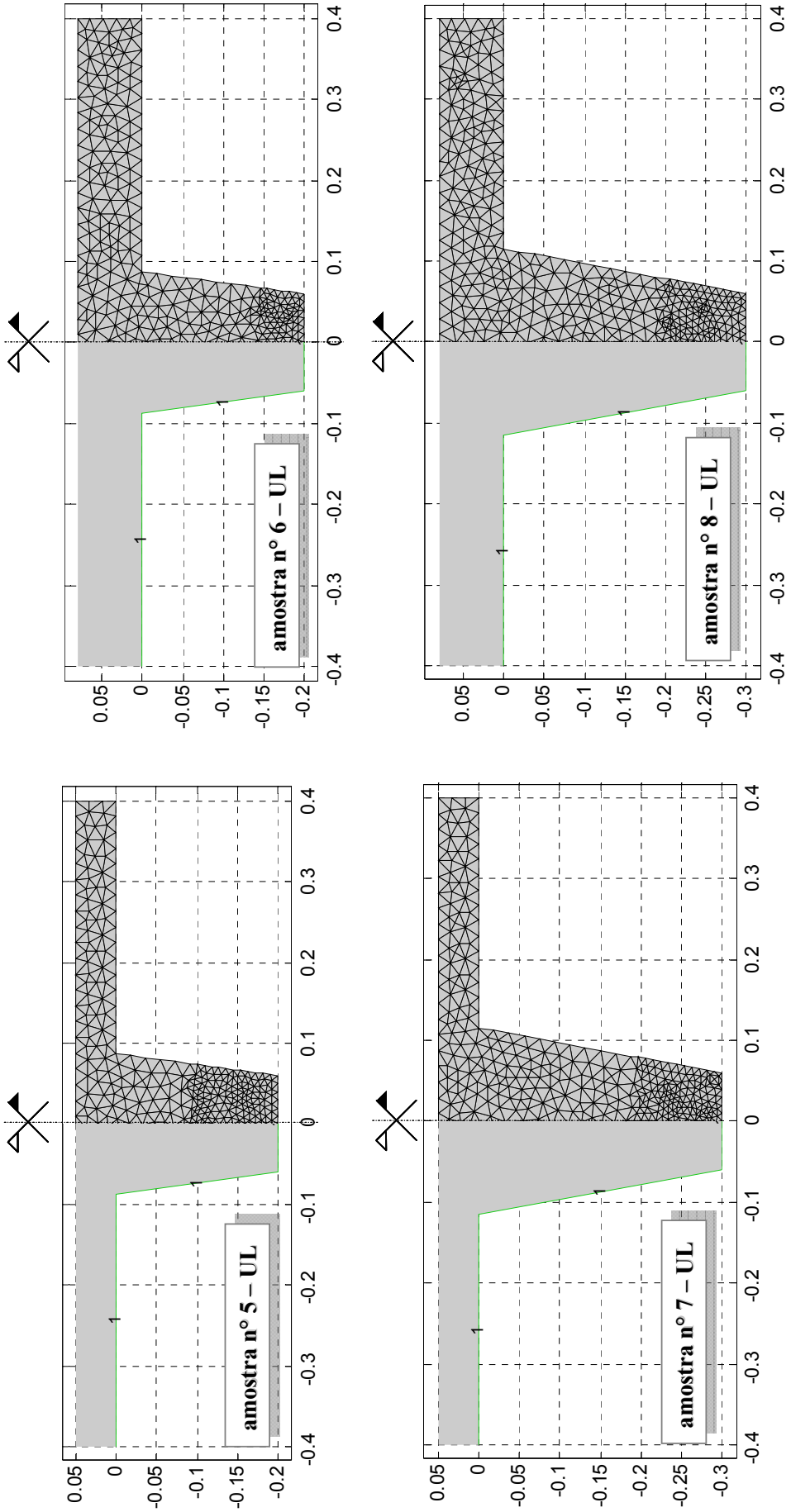


Figura A.7: Geometria das amostras 5 a 8 – contorno inferior aquecido e malha triangular $\ell \leq 0{,}01$ m com refinamento localizado $\ell \leq 0{,}005$.

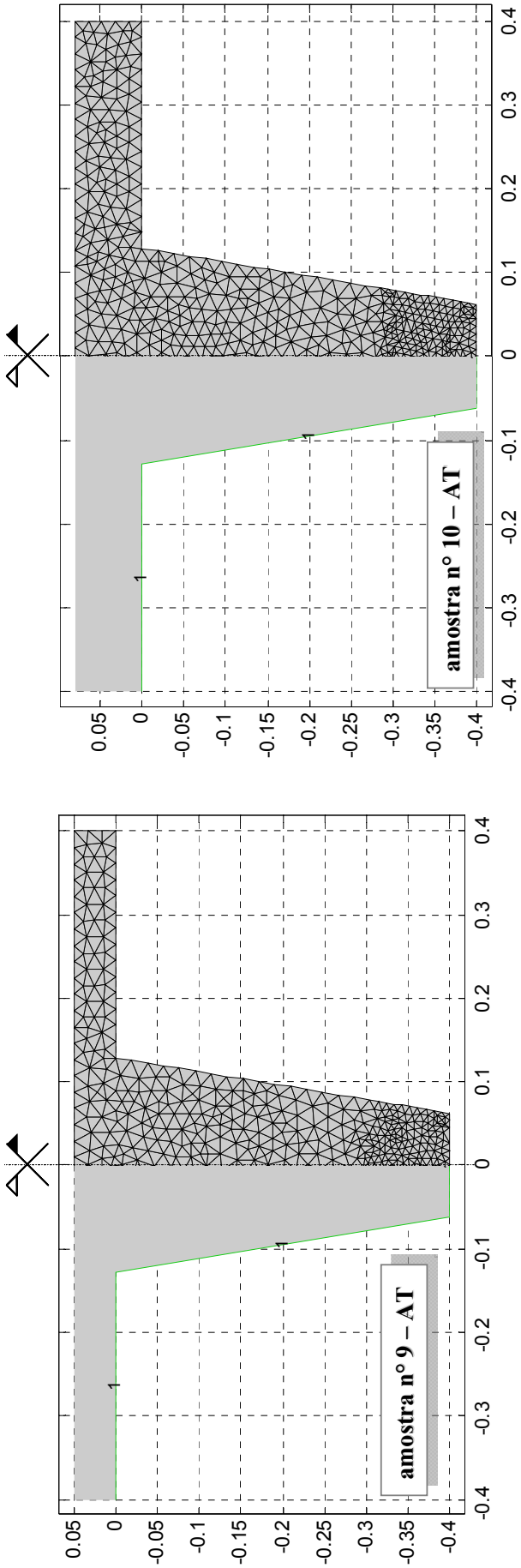


Figura A.8: Geometria das amostras 9 e 10 – contorno inferior aquecido e malha triangular $\ell \leq 0{,}01$ m com refinamento localizado $\ell \leq 0{,}005$.

A.1.4 Vigas T

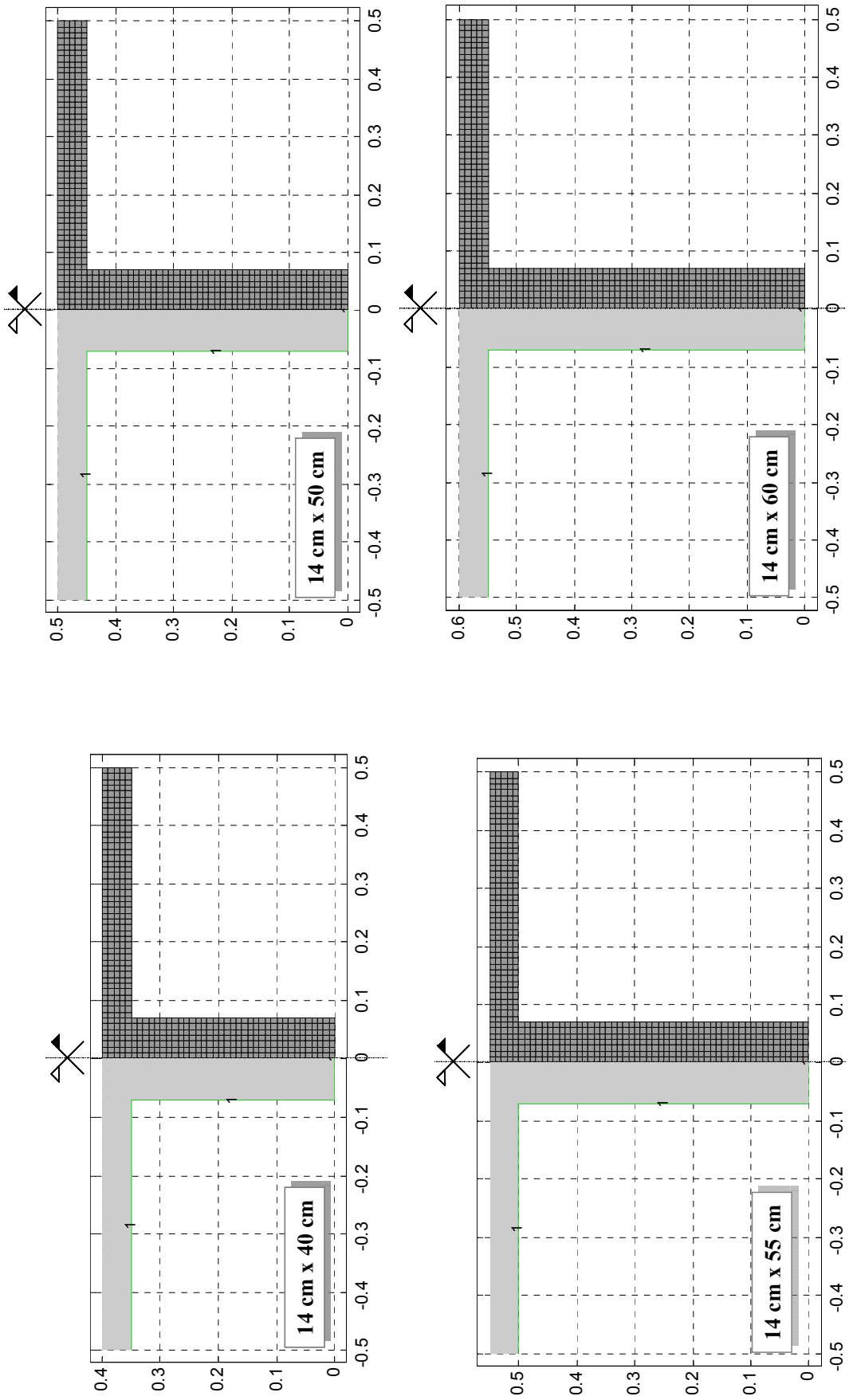


Figura A.9: Geometria das vigas T com largura b_w = 14 cm – contorno lateral inferior aquecido e malha quadrada #5 mm.

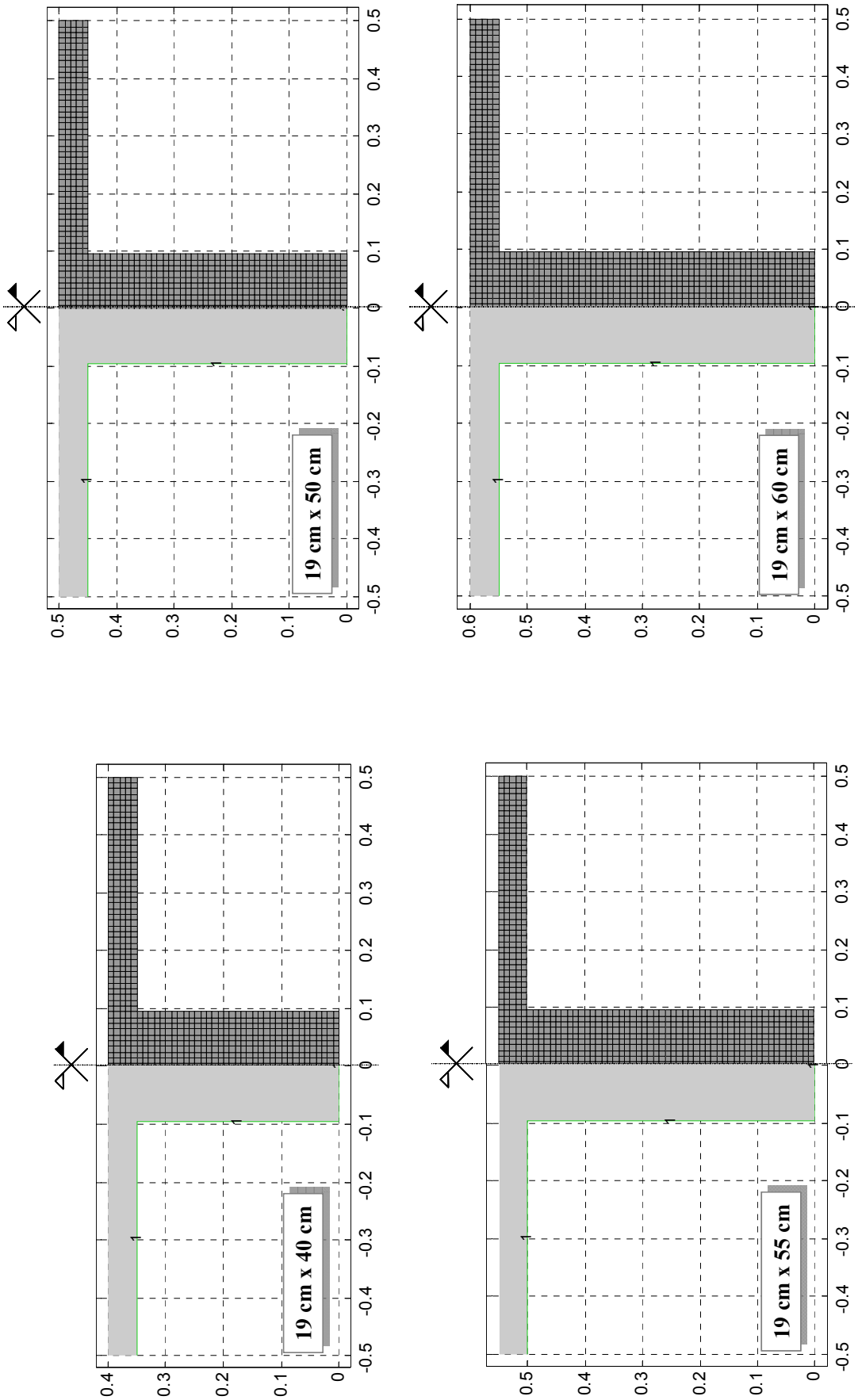


Figura A.10: Geometria das vigas T com largura b_w = 19 cm – contorno lateral inferior aquecido e malha quadrada #5 mm.

A.1.5 Vigas retangulares

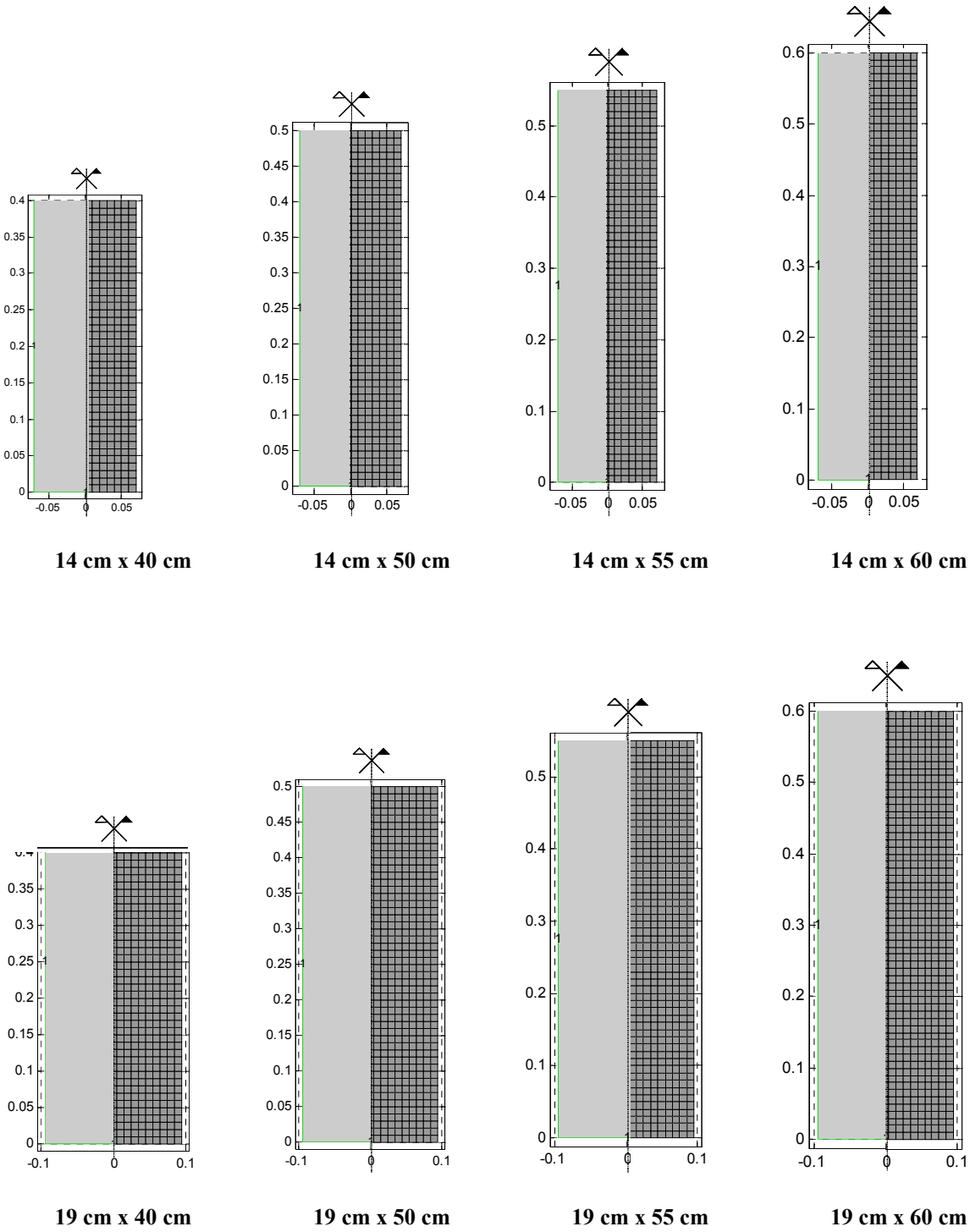


Figura A.11: Geometria das vigas retangulares– contorno lateral inferior aquecido e malha quadrada # 5 mm.

A.2 Resultados

A.2.1 Validação do modelo matemático da ação térmica.

As temperaturas (Tabela A.3 e Tabela A.5) foram tomadas na superfície não-exposta ao calor de lajes maciças moldadas em concreto de densidade normal (agregados silicosos) com massa específica ρ_c = 2300 kg/m³ e umidade livre 2% ≤ U ≤ 3% (FIP-CEB Bulletins N° 145 (1982), N° 174 (1987) e N° 208 (1991)).

O erro entre os valores obtidos via análises numérica e experimental foi medido pela diferença entre o valor numérico e o valor experimental-padrão θ = 160 °C (Tabela A.4 e Tabela A.6):

$$\text{Erro} = \frac{160\,°\text{C} - \theta}{160\,°\text{C}} \tag{A.1}$$

onde: Erro = diferença relativa entre a temperatura θ_c na superfície não-exposta da laje e a temperatura-padrão de 160 °C;

θ = temperatura na superfície não-exposta da laje maciça, obtida via análise numérica.

Tabela A.3: Temperatura na superfície não-exposta ao calor em função do tempo de aquecimento ISO 834:1975, do teor de umidade livre e das condições de contorno (fluxos de calor por convecção e radiação), para a condutividade térmica igual ao limite **superior** da EN 1992-1-2:2004.

TRF (min)	**h** (mm)	FIP-CEB Bulletins N° 145 174 e 208	**θ** (°C)					
			ε_r = 0,7; α_c = 4 W/m²/ºC		ε_r = 0; α_c = 9 W/m²/ºC		face não-exposta adiabática	
			U = 2%	U = 3%	U = 2%	U = 3%	U = 2%	U = 3%
0	todas	20	20	20	20	20	20	20
30	60	160	131	126	130	125	143	136
60	80	160	189	182	182	175	222	240
90	100	160	194	188	185	179	235	227
120	120	160	182	175	173	167	226	218

Tabela A.4: Erro entre os valores de temperatura via análises numérica e experimental, na superfície não-exposta ao calor em função do tempo de aquecimento ISO 834:1975, para a condutividade térmica igual ao limite **superior** da EN 1992-1-2:2004.

TRF (min)	**h** (mm)	**Erro** (%)					
		ε_r = 0,7; α_c = 4 W/m²/ºC		ε_r = 0; α_c = 9 W/m²/ºC		face não-exposta adiabática	
		U = 2%	U = 3%	U = 2%	U = 3%	U = 2%	U = 3%
0	todas	0	0	0	0	0	0
30	60	18	21	19	22	11	15
60	80	-18	-14	-14	-9	-39	-50
90	100	-21	-18	-16	-12	-47	-42
120	120	-14	-9	-8	-4	-41	-36

Tabela A.5: Temperatura na superfície não exposta ao calor em função do tempo de aquecimento ISO 834:1975, do teor de umidade livre e das condições de contorno (fluxos de calor por convecção e radiação), para a condutividade térmica igual ao limite **inferior** da EN 1992-1-2:2004.

TRF (min)	**h** (mm)	FIP-CEB Bulletins	**θ** (°C)					
			ε_r = 0,7; α_c = 4 W/m²/ºC		ε_r = 0; α_c = 9 W/m²/ºC		superfície não-exposta adiabática	
			U = 2%	U = 3%	U = 2%	U = 3%	U = 2%	U = 3%
0	todas	20	20	20	20	20	20	20
30	30	160	100	99	101	99	108	106
60	60	160	126	121	128	123	147	140
90	90	160	127	122	130	124	154	147
120	120	160	119	115	122	117	147	140

Tabela A.6: Erro entre os valores de temperatura via análises numérica e experimental, na superfície não-exposta ao calor em função do tempo de aquecimento ISO 834:1975, para a condutividade térmica igual ao limite **inferior** da EN 1992-1-2:2004.

TRF (min)	**h** (mm)	**Erro** (%)					
		$\boldsymbol{\varepsilon_r}$ = 0,7; $\boldsymbol{\alpha_c}$ = 4 W/m²/ºC		$\boldsymbol{\varepsilon_r}$ = 0; $\boldsymbol{\alpha_c}$ = 9 W/m²/ºC		superfície não-exposta adiabática	
		U = 2%	U = 3%	U = 2%	U = 3%	U = 2%	U = 3%
0	todas	0	0	0	0	0	0
30	60	38	38	37	38	33	34
60	80	21	24	20	23	8	13
90	100	21	24	19	23	4	8
120	120	26	28	24	27	8	13

A.2.2 Lajes maciças

A.2.2.1 Aquecidas na superfície inferior.

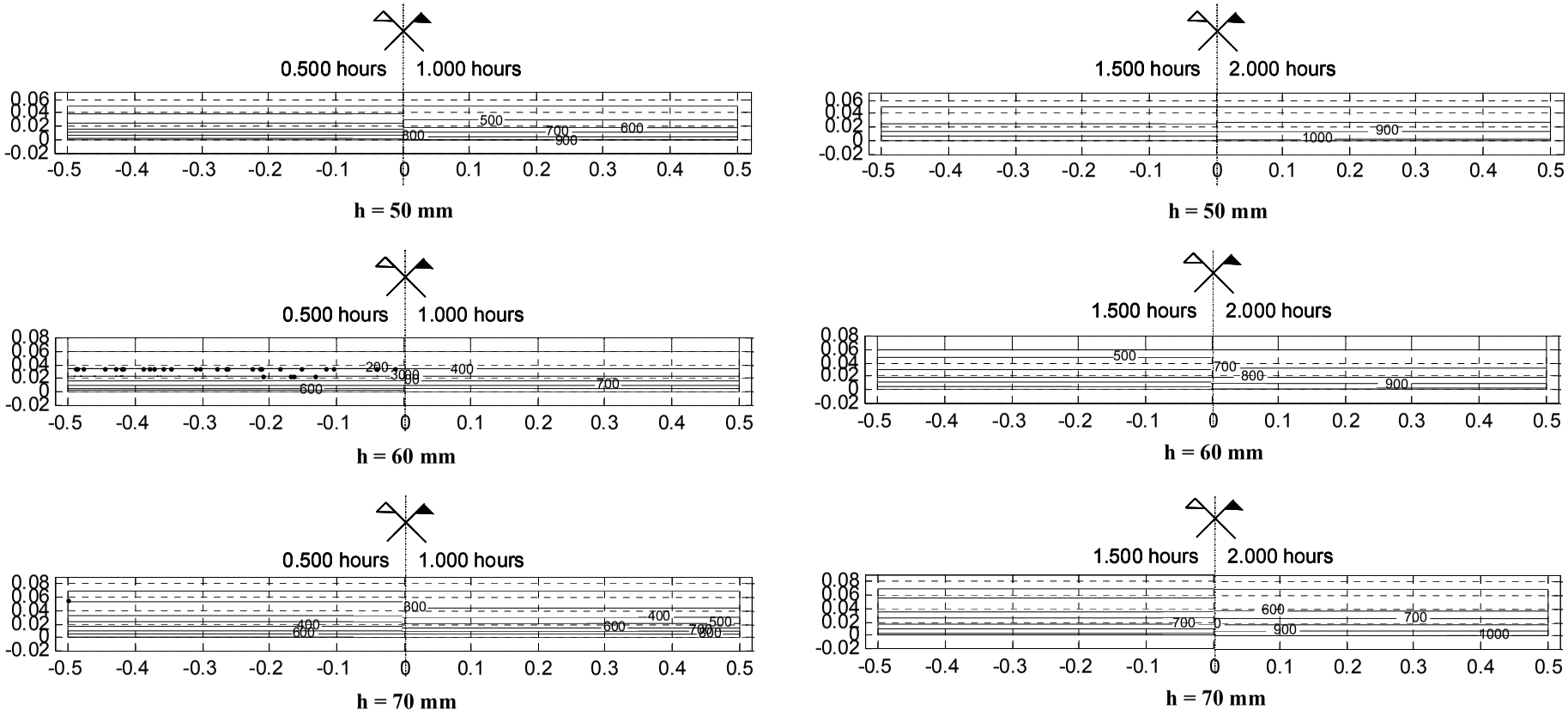


Figura A.12: Isotermas de lajes maciças de espessura h = 50 mm, 60 mm e 70 mm.

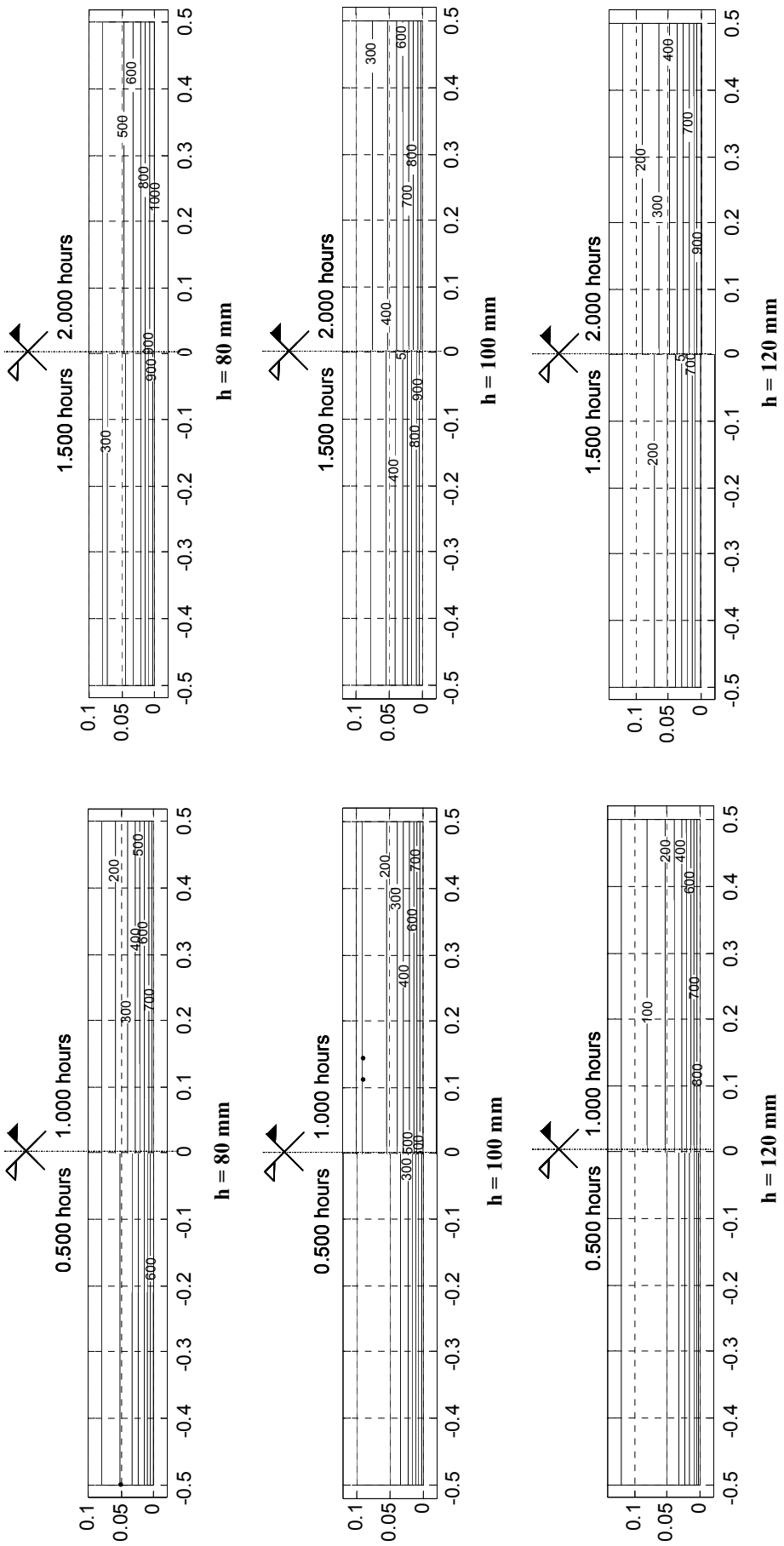


Figura A.13: Isotermas de lajes maciças de espessura h = 80 mm, 100 mm e 120 mm.

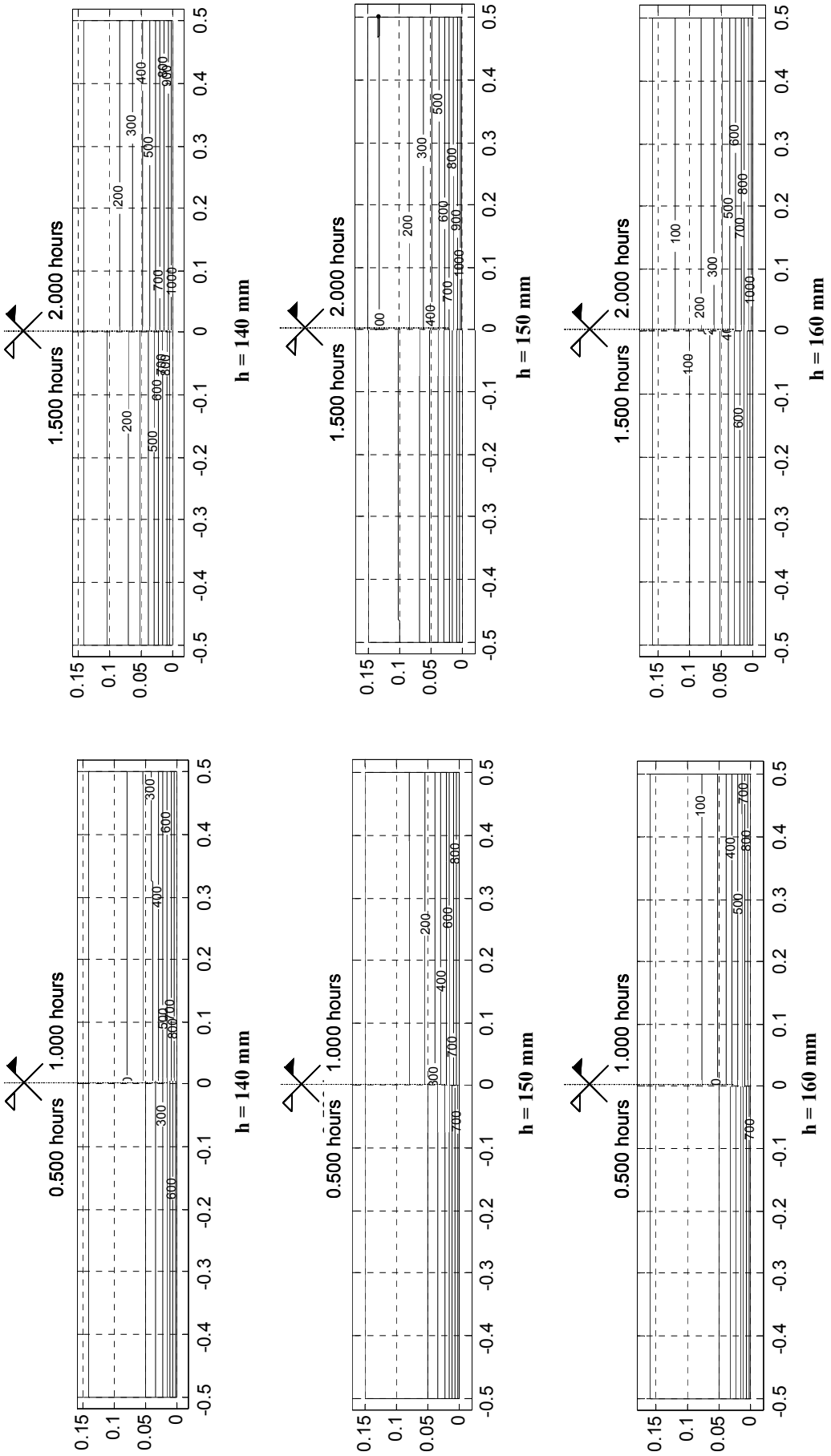
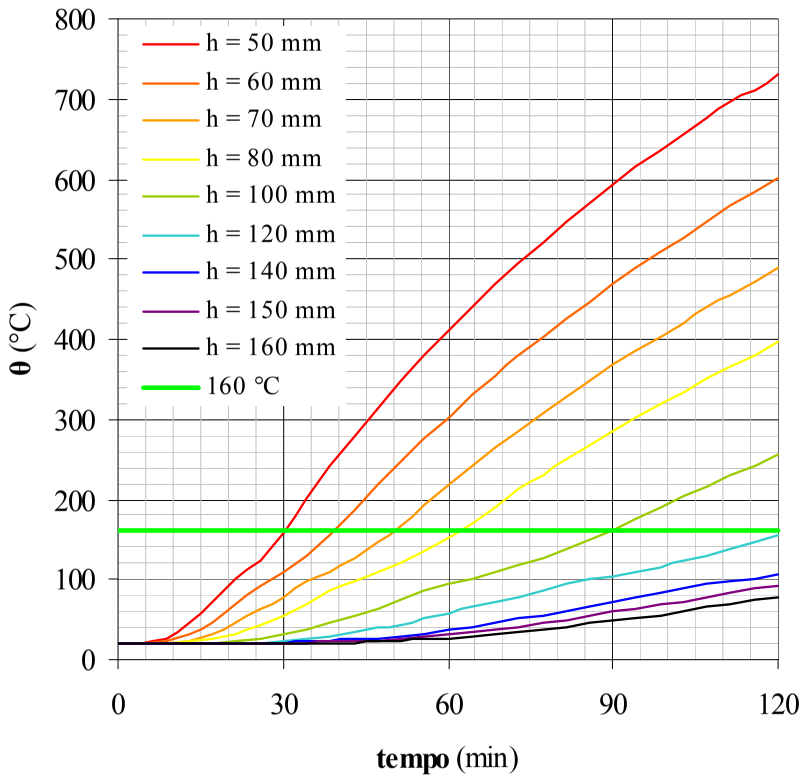


Figura A.14: Isotermas de lajes maciças de espessura h = 140 mm, 150 mm e 160 mm.

Tabela A.7: Temperatura na superfície não-exposta ao calor em função do tempo de aquecimento ISO 834:1975.

tempo (min)	**θ** (°C)								
	h=50 mm	**h=60 mm**	**h=70 mm**	**h=80 mm**	**h=100 mm**	**h=120 mm**	**h=140 mm**	**h=150 mm**	**h=160 mm**
0	20	20	20	20	20	20	20	20	20
5	21	20	20	20	20	20	20	20	20
10	33	25	22	21	20	20	20	20	20
15	59	39	28	24	20	20	20	20	20
20	91	61	42	31	22	21	20	20	20
25	121	87	59	41	25	21	20	20	20
30	159	108	79	56	32	23	21	20	20
35	208	133	99	72	39	26	22	21	20
40	254	165	115	90	49	31	24	22	21
45	297	202	136	103	59	36	26	23	21
50	338	238	161	117	71	42	29	25	23
55	376	271	189	133	83	50	32	28	25
60	411	303	218	153	95	57	37	31	27
65	445	334	246	174	103	66	42	35	29
70	478	363	272	198	112	74	48	39	33
75	509	391	297	222	123	83	54	43	37
80	539	417	321	244	134	92	59	48	40
85	567	443	345	265	148	99	66	53	44
90	593	468	367	285	162	104	72	59	48
95	619	492	388	305	177	111	79	65	53
100	644	515	410	324	194	118	85	70	58
105	667	538	430	343	210	127	92	76	63
110	689	560	450	361	226	135	97	81	68
115	709	580	469	379	241	146	102	87	73
120	730	601	489	396	255	155	106	93	78

Notas: * concreto de densidade normal (ρ_c = 2400 kg/m³), umidade livre U = 1,5%;
** superfície não-exposta adiabática.



Nota: h = espessura da laje.

Figura A.15: Temperatura na superfície não-exposta ao calor, em função do tempo de aquecimento ISO 834:1975.

A.2.2.2 Lajes maciças com ambas as superfícies expostas ao calor

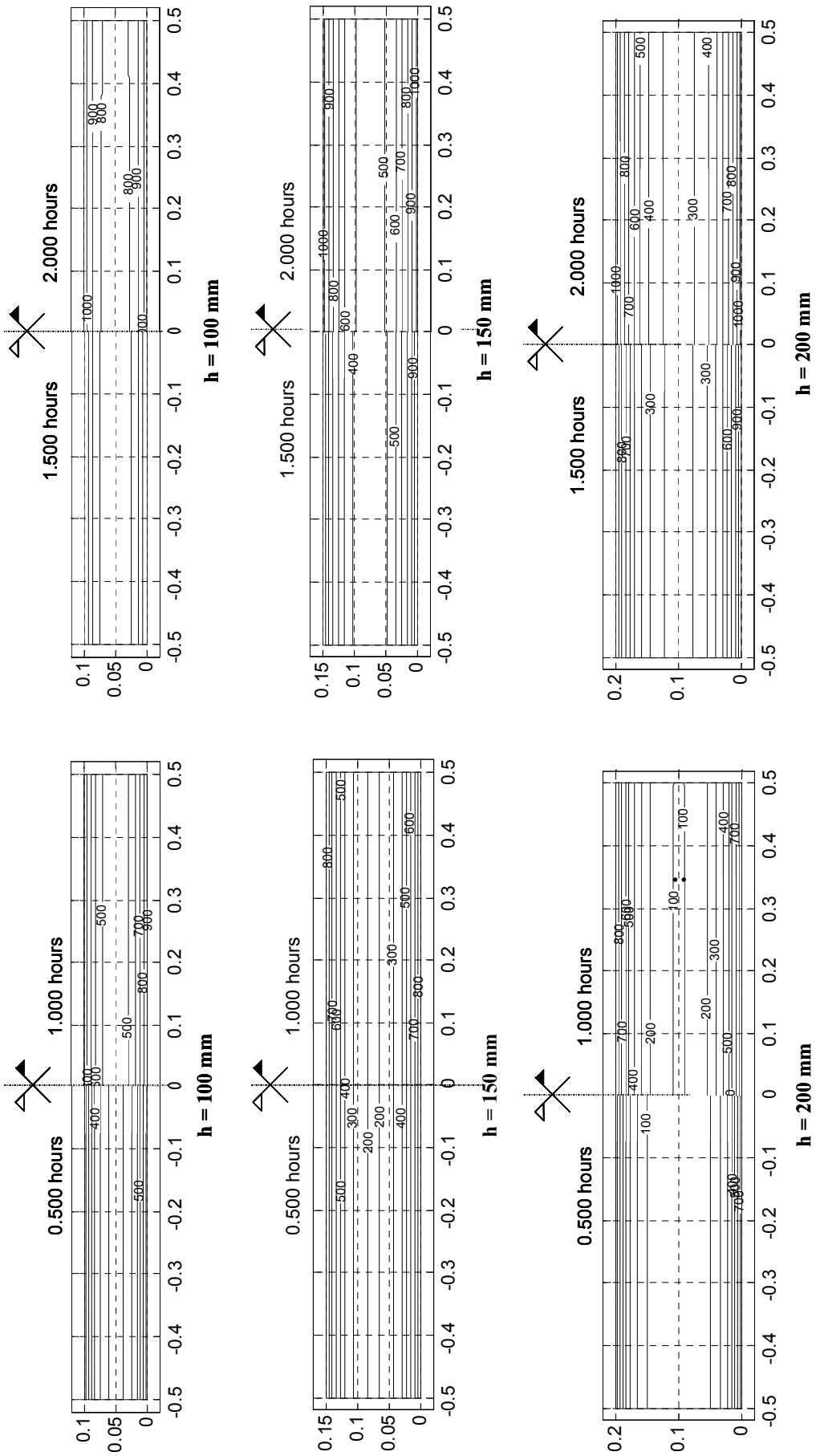


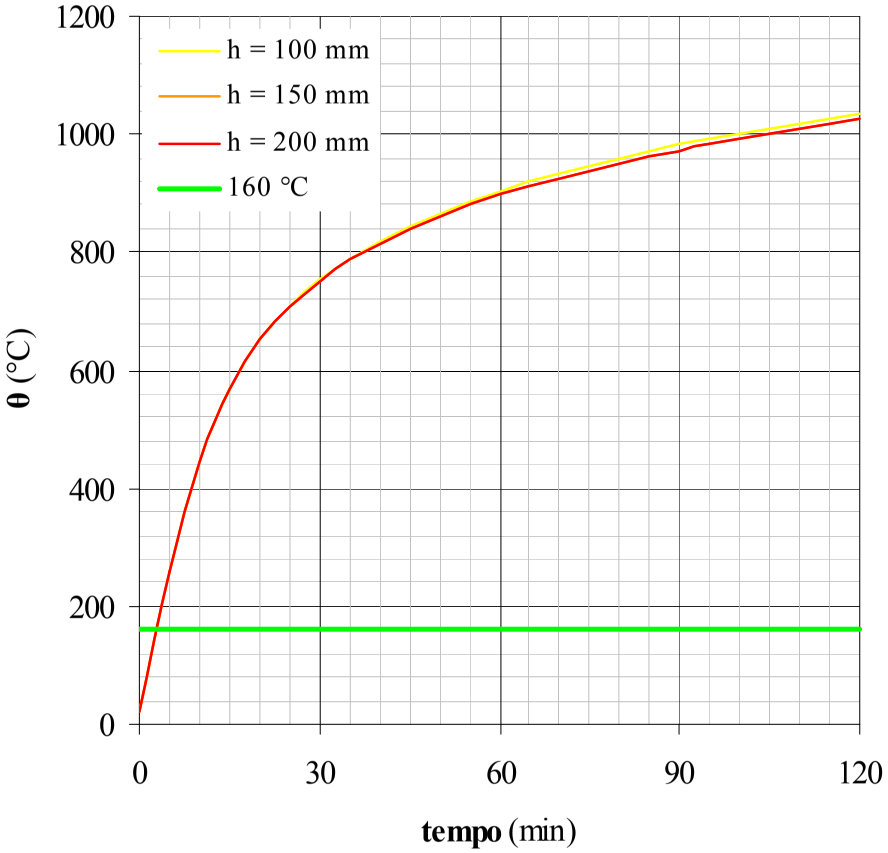
Figura A.16: Isotermas de lajes maciças de espessura h = 100 mm, 150 mm e 200 mm.

Tabela A.8: Temperatura na superfície exposta ao calor em função do tempo de aquecimento ISO 834:1975.

tempo (min)	**θ** (°C)		
	h = 100 mm	**h =150 mm**	**h = 200 mm**
0	20	20	20
5	257	257	257
10	447	447	447
15	570	570	570
20	653	652	652
25	710	709	709
30	754	752	752
35	789	787	787
40	819	815	815
45	844	840	840
50	867	861	861
55	886	880	880
60	904	897	897
65	920	912	912
70	934	926	926
75	947	939	939
80	960	951	951
85	971	962	962
90	982	973	973
95	991	983	983
100	1001	992	992
105	1010	1001	1001
110	1018	1009	1009
115	1026	1017	1017
120	1033	1025	1025

Notas: * concreto de densidade normal (ρ_c = 2400 kg/m³), umidade livre U = 1,5%;

** superfície não-exposta adiabática.



Nota: h = espessura da laje.

Figura A.17: Temperatura na superfície exposta ao calor, em função do tempo de aquecimento ISO 834:1975.

A.2.3 Lajes nervuradas para análises paramétricas dimensionais de nervuras

As temperaturas foram tomadas na superfície não-exposta ao calor no meio da mesa entre as nervuras (Tabela A.9 a Tabela A.12, Figura A.18 a Figura A.21). Adotou-se: concreto de densidade normal de massa específica ρ_c = 2400 kg/m³ e umidade livre U = 1,5%, superfície não-exposta adiabática.

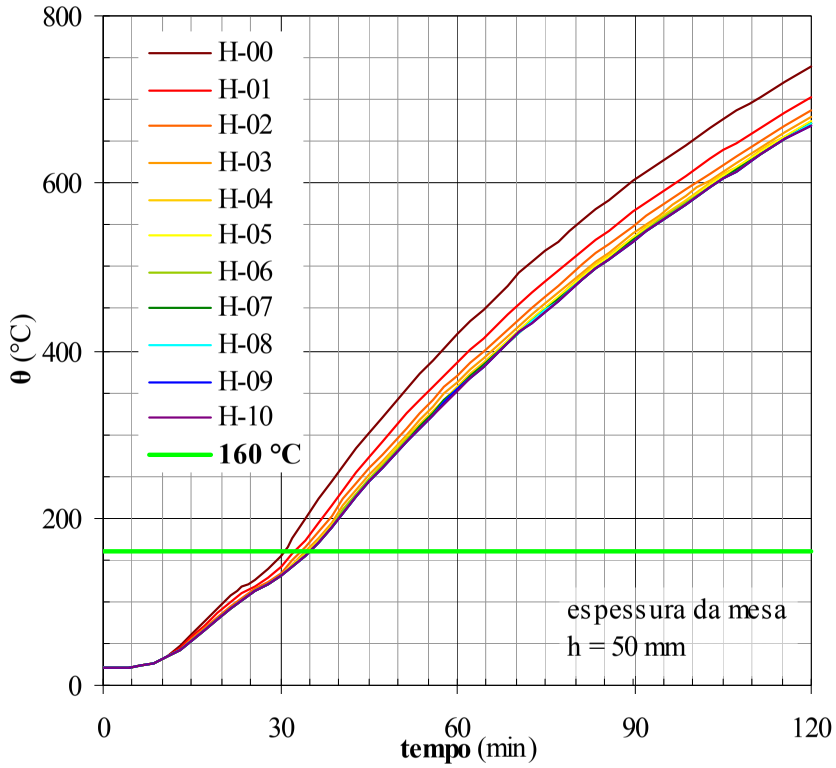


Figura A.18: Temperatura na superfície não-exposta ao calor, em função do tempo de aquecimento ISO 834:1975 e da altura das nervuras.

Tabela A.9: Temperatura na superfície não exposta ao calor da mesa, entre as nervuras, em função do tempo de aquecimento ISO 834:1975 – amostras do grupo "H".

tempo (min)	**θ** (°C)										
	H-00	**H-01**	**H-02**	**H-03**	**H-04**	**H-05**	**H-06**	**H-07**	**H-08**	**H-09**	**H-10**
0	20	20	20	20	20	20	20	20	20	20	20
5	21	21	21	21	21	21	21	21	21	21	21
10	34	32	32	32	31	31	31	31	31	31	31
15	62	57	55	54	53	53	53	53	53	53	53
20	96	89	85	83	83	83	82	82	82	82	82
25	123	115	112	110	110	110	110	110	110	110	110
30	155	141	135	132	131	130	130	130	130	130	130
35	206	181	170	165	162	161	161	160	160	160	160
40	256	229	215	207	203	202	201	201	201	201	201
45	302	273	258	250	246	244	244	243	243	243	243
50	343	313	297	289	285	283	282	281	281	281	281
55	382	351	335	327	323	320	319	319	318	318	318
60	419	386	370	362	357	355	354	353	353	353	352
65	454	419	403	394	390	388	386	386	385	385	385
70	487	452	435	427	422	420	418	418	417	417	417
75	518	482	465	457	452	450	449	448	448	447	447
80	548	512	495	486	482	479	478	477	477	477	476
85	576	539	522	514	510	507	506	505	505	505	504
90	603	566	549	541	536	534	533	532	531	531	531
95	629	592	575	566	562	560	559	558	557	557	557
100	653	616	599	591	587	584	583	582	582	582	582
105	676	639	622	614	610	608	606	606	605	605	605
110	698	661	644	637	633	631	629	629	628	628	628
115	719	682	666	658	654	652	651	650	650	649	649
120	739	702	686	679	675	673	672	671	671	670	670

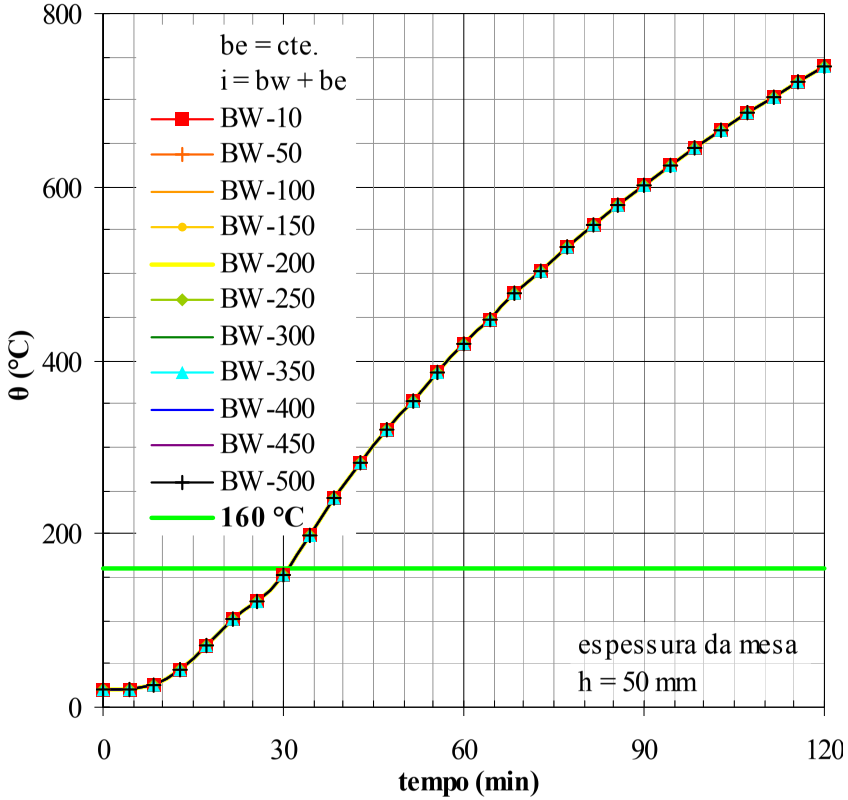
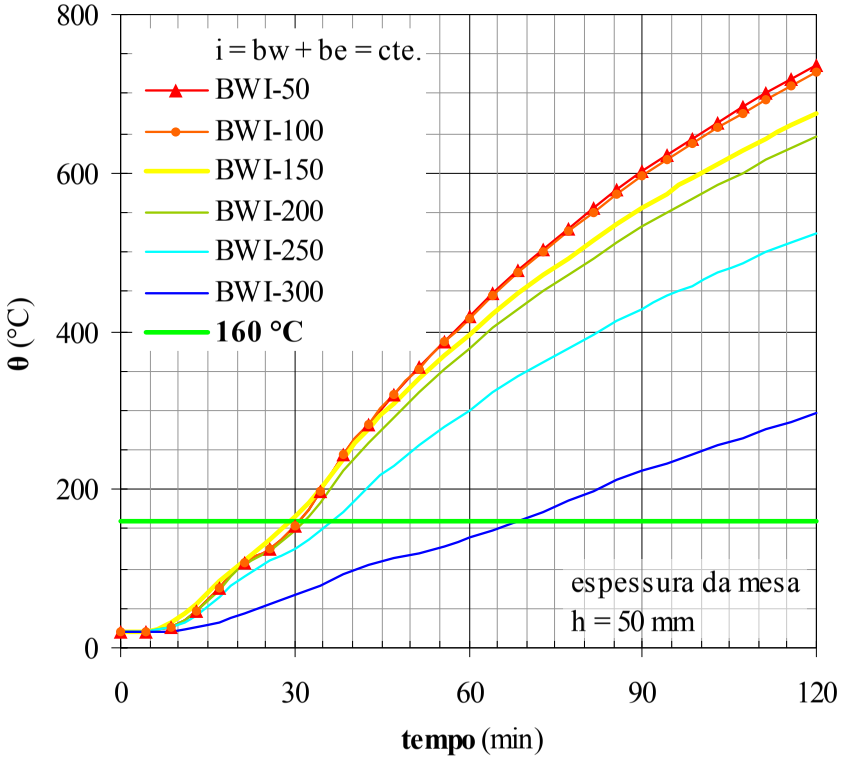


Figura A.19: Temperatura na superfície não-exposta ao calor, em função do tempo de aquecimento ISO 834:1975 e da largura das nervuras.

Tabela A.10: Temperatura na superfície não exposta ao calor da mesa, entre as nervuras, em função do tempo de aquecimento ISO 834:1975 – amostras do grupo "BW".

tempo (min)	**θ** (°C)										
	BW-10	**BW-50**	**BW-100**	**BW-150**	**BW-200**	**BW-250**	**BW-300**	**BW-350**	**BW-400**	**BW-450**	**BW-500**
0	20	20	20	20	20	20	20	20	20	20	20
5	21	21	21	21	21	21	21	21	21	21	21
10	31	31	31	31	31	31	31	31	31	31	31
15	58	58	58	58	58	58	58	58	58	58	58
20	92	92	92	92	92	92	92	92	92	92	92
25	119	119	119	119	119	119	119	119	119	119	119
30	152	152	152	152	152	152	152	152	152	152	152
35	204	204	204	204	204	204	204	204	204	204	204
40	254	254	254	254	254	254	254	254	254	254	254
45	300	300	300	300	300	300	300	300	300	300	300
50	342	342	342	342	342	342	342	342	342	342	342
55	381	381	381	381	381	381	381	381	381	381	381
60	418	418	418	418	418	418	418	418	418	418	418
65	453	453	453	453	453	453	453	453	453	453	453
70	486	486	486	486	486	486	486	486	486	486	486
75	518	518	518	518	518	518	518	518	518	518	518
80	548	548	548	548	548	548	548	548	548	548	548
85	576	576	576	576	576	576	576	576	576	576	576
90	603	603	603	603	603	603	603	603	603	603	603
95	629	629	629	629	629	629	629	629	629	629	629
100	653	653	653	653	653	653	653	653	653	653	653
105	676	676	676	676	676	676	676	676	676	676	676
110	698	698	698	698	698	698	698	698	698	698	698
115	719	719	719	719	719	719	719	719	719	719	719
120	739	739	739	739	739	739	739	739	739	739	739

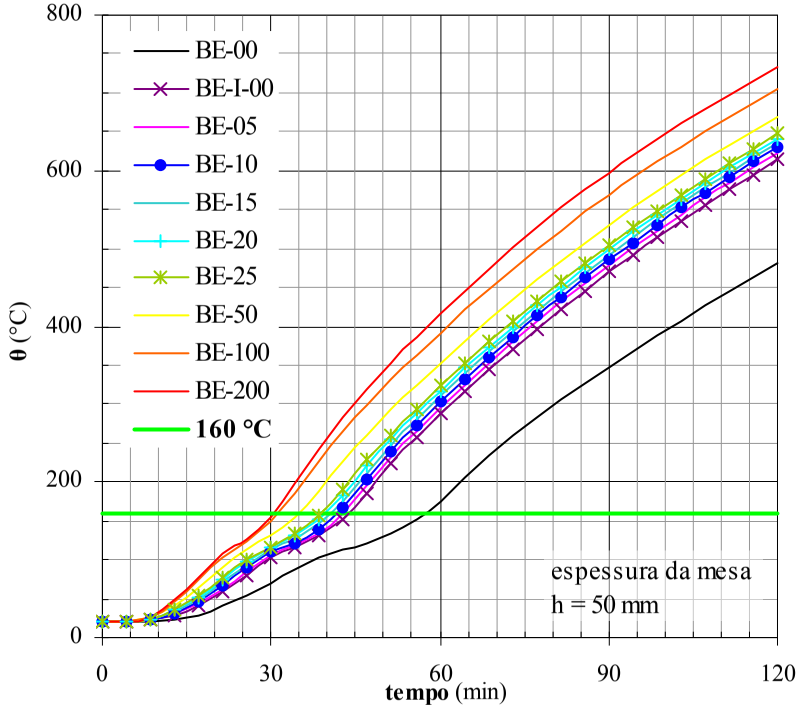


Nota: intereixo i = 0,3 m.

Figura A.20: Temperatura na superfície não-exposta ao calor, em função do tempo de aquecimento ISO 834:1975, da largura e da distância entre nervuras para o intereixo constante.

Tabela A.11: Temperatura na superfície não exposta ao calor da mesa, entre as nervuras, em função do tempo de aquecimento ISO 834:1975 – amostras do grupo "BWI".

tempo (min)	**θ** (°C)					
	BWI-50	**BWI-100**	**BWI-150**	**BWI-200**	**BWI-250**	**BWI-300**
0	20	20	20	20	20	20
5	21	21	23	21	21	20
10	34	34	40	34	31	23
15	62	62	69	60	53	29
20	96	96	102	94	80	40
25	123	122	133	119	107	53
30	155	155	166	147	126	67
35	206	206	208	189	151	82
40	256	256	252	235	183	96
45	301	301	292	275	216	109
50	343	342	330	312	247	118
55	382	380	364	346	275	127
60	419	416	396	377	301	139
65	453	450	426	407	325	151
70	486	482	455	435	348	165
75	517	513	482	461	370	179
80	547	542	508	486	390	194
85	575	569	532	510	410	209
90	601	595	555	532	428	223
95	627	620	577	553	446	236
100	651	644	599	573	463	249
105	674	666	619	592	480	261
110	696	687	638	611	495	273
115	716	707	656	629	510	284
120	736	727	674	645	525	296



Nota: b_w = 0,05 m

Figura A.21: Temperatura na superfície não-exposta ao calor, em função do tempo de aquecimento ISO 834:1975 e da distância entre nervuras para largura de nervuras constante.

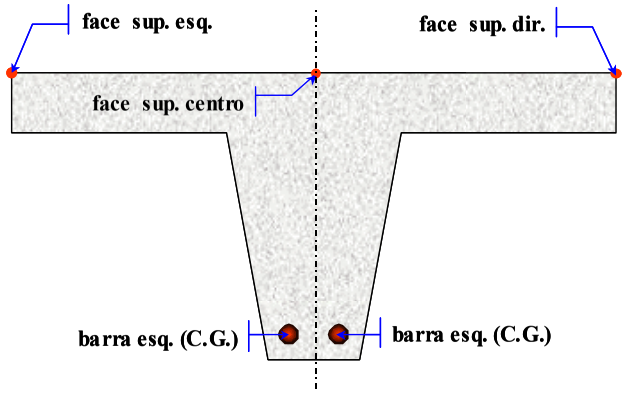
Tabela A.12: Temperatura na superfície não exposta ao calor da mesa, entre as nervuras, em função do tempo de aquecimento ISO 834:1975 – amostras "BE".

tempo (min)	**θ** (°C)									
	BE-00	**BE-I-00**	**BE-05**	**BE-10**	**BE-15**	**BE-20**	**BE-25**	**BE-50**	**BE-100**	**BE-200**
0	20	20	20	20	20	20	20	20	20	20
5	20	20	20	20	20	21	21	21	21	21
10	21	24	25	26	26	28	28	31	34	34
15	26	35	37	39	41	43	45	53	60	62
20	36	54	56	60	64	66	70	82	94	96
25	52	77	81	85	89	93	97	110	120	122
30	70	102	106	110	113	115	117	130	148	155
35	90	118	122	125	129	134	138	160	193	206
40	107	138	143	149	156	162	169	201	239	256
45	117	169	177	185	193	201	209	243	282	301
50	129	210	219	227	235	243	250	281	321	342
55	148	250	259	266	274	281	288	318	358	380
60	176	287	296	303	310	317	323	352	392	417
65	211	321	329	337	343	350	356	385	425	450
70	242	354	362	369	376	383	389	417	457	483
75	271	384	393	400	407	413	419	447	487	514
80	298	414	423	430	437	443	449	476	515	544
85	323	442	451	458	465	471	477	504	543	572
90	348	470	479	486	492	499	504	531	569	598
95	371	496	505	512	519	525	531	557	594	623
100	394	521	530	537	544	550	556	581	618	647
105	417	546	555	562	569	574	580	605	641	670
110	439	569	578	585	592	597	603	628	663	692
115	460	592	601	608	614	620	625	649	684	712
120	480	614	623	630	636	641	647	670	704	732

A.2.4 Lajes nervuradas moldadas com fôrmas industrializadas

Tabela A.13: Temperatura na superfície não exposta ao calor da mesa entre as nervuras dos perfis industrializados.

t (min)	θ (°C)																			
	n° 1 – AS		n° 2 – AS		n° 3 – AT		n° 4 – AT		n° 5 – UL		n° 6 – UL		n° 7 – UL		n° 8 – UL		n° 9 – AT		n° 10 – AS	
	½ nervura	½ vão	½ nervura	½ vão	½ nervura	½ vão	½ nervura	½ vão	½ nervura	½ vão	½ nervura	½ vão	½ nervura	½ vão	½ nervura	½ vão	½ nervura	½ vão	½ nervura	½ vão
0	20	20	20	20	20	20	20	20	20	20	20	20	20	20	20	20	20	20	20	20
30	37	160	27	76	51	165	26	51	28	160	22	52	21	160	20	53	20	159	20	53
60	118	411	87	221	152	417	84	155	91	412	53	156	49	411	34	157	37	411	28	156
90	237	594	153	368	297	599	148	287	163	595	106	287	101	594	69	288	77	594	54	288
120	351	731	253	490	418	735	245	397	264	731	155	398	149	731	110	398	118	731	90	398



seção transversal genérica dos perfis

Figura 6.1: Pontos de controle para medição das temperaturas relevantes à verificação das funções de compartimentação e de estabilidade estrutural.

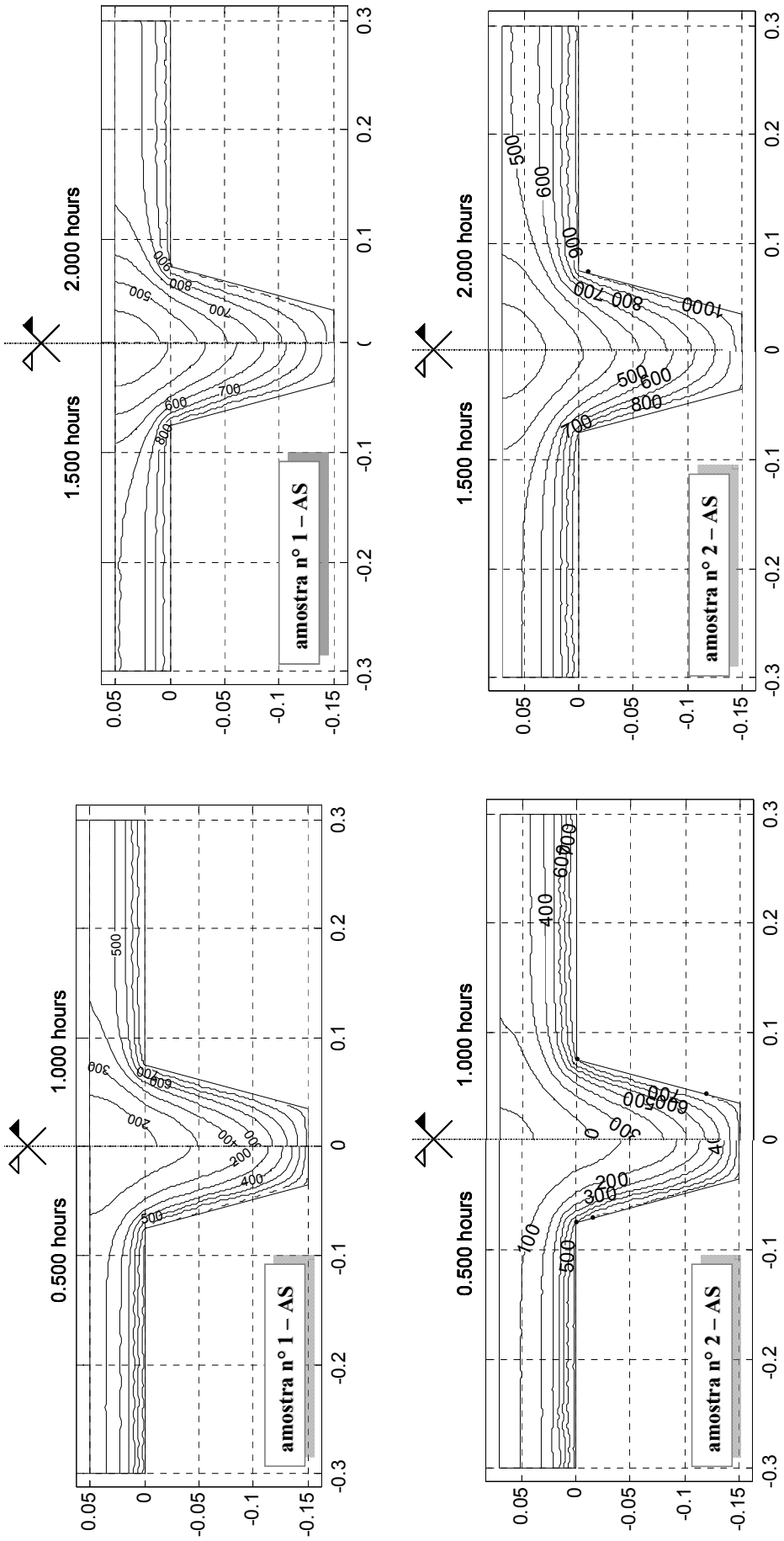


Figura A.22: Isotermas para a amostras 1 e 2.

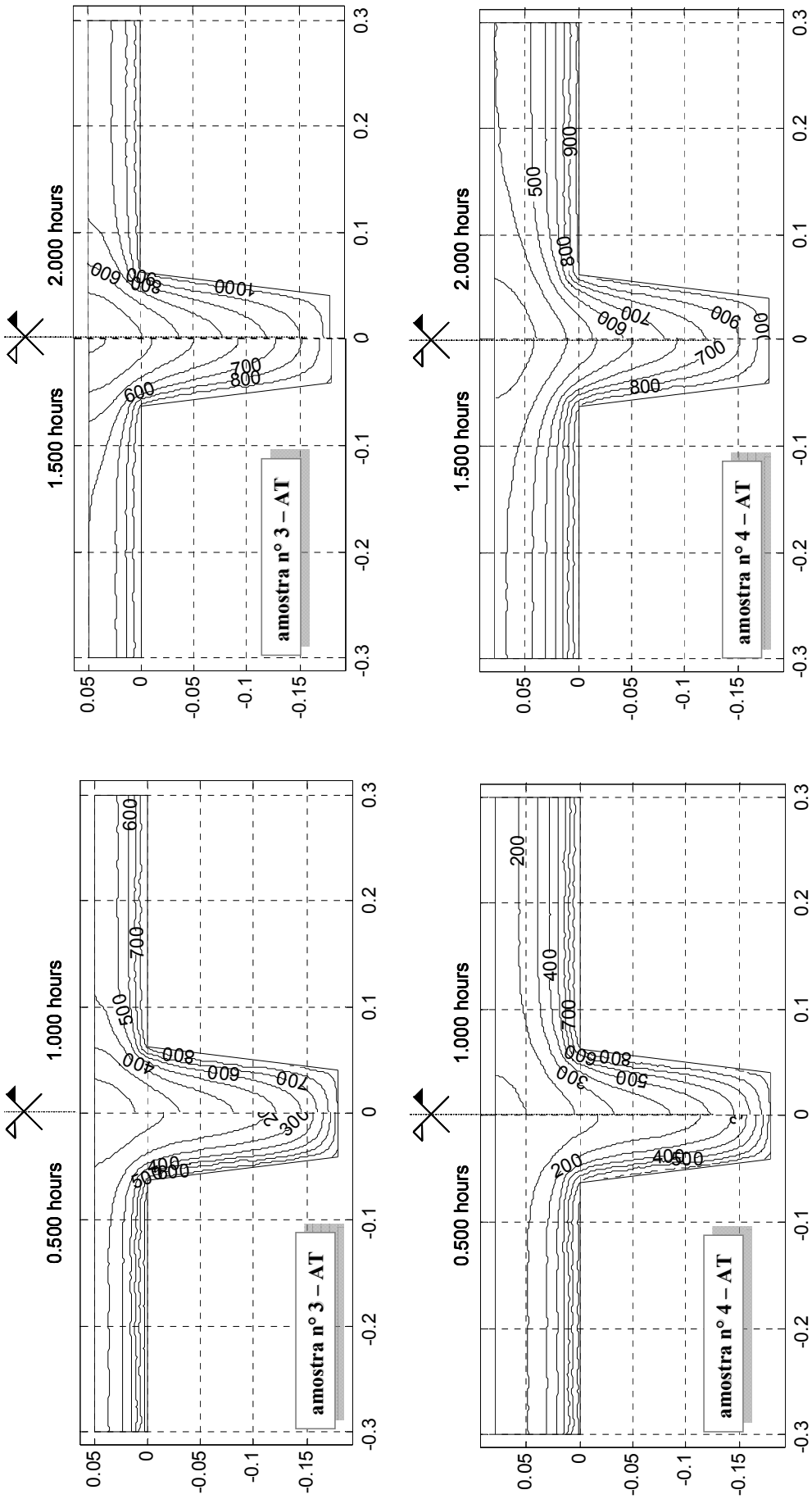


Figura A.23: isotermas para a amostras 3 e 4.

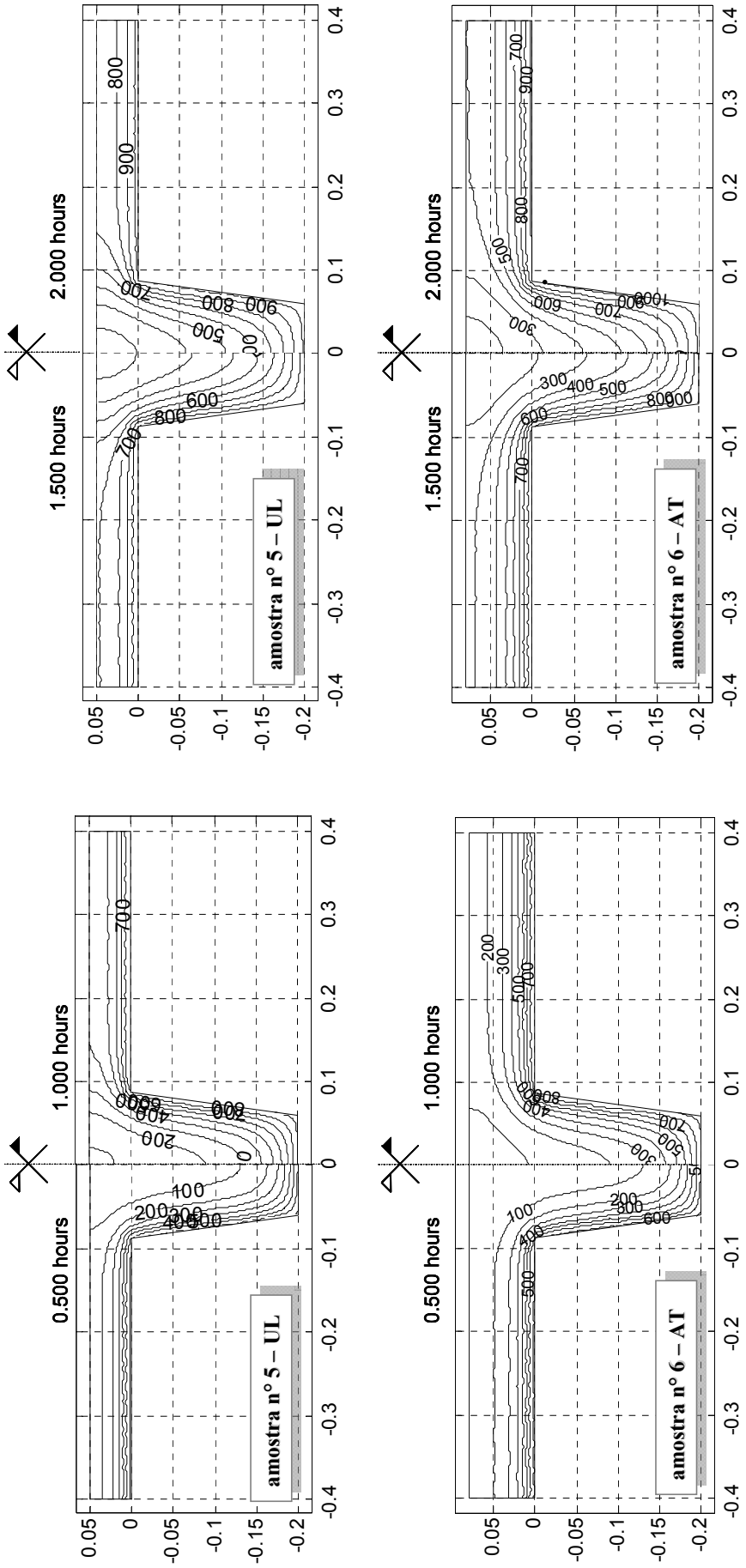


Figura A.24: isotermas para a amostras 5 e 6.

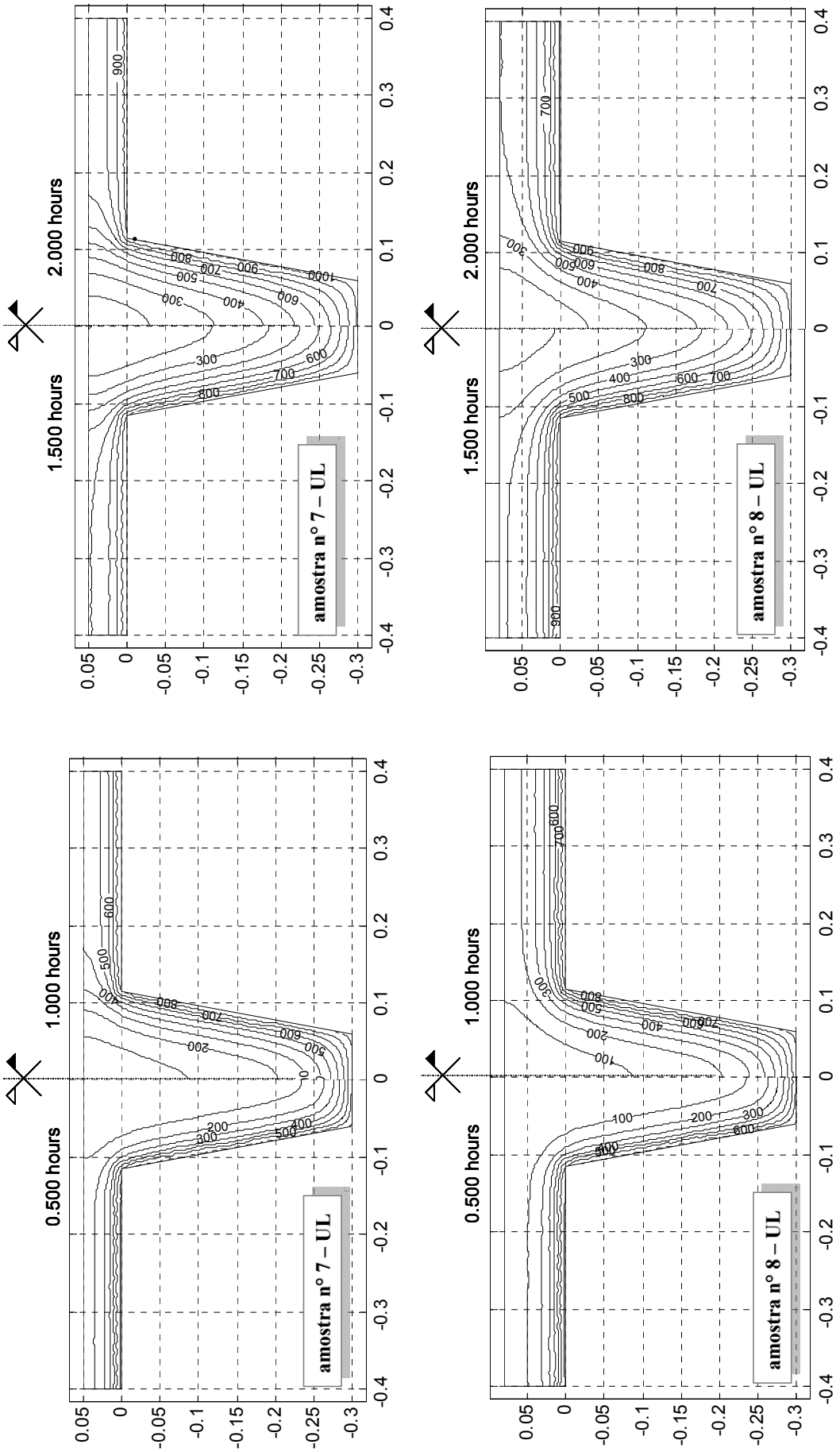


Figura A.25: isotermas para a amostras 7 e 8.

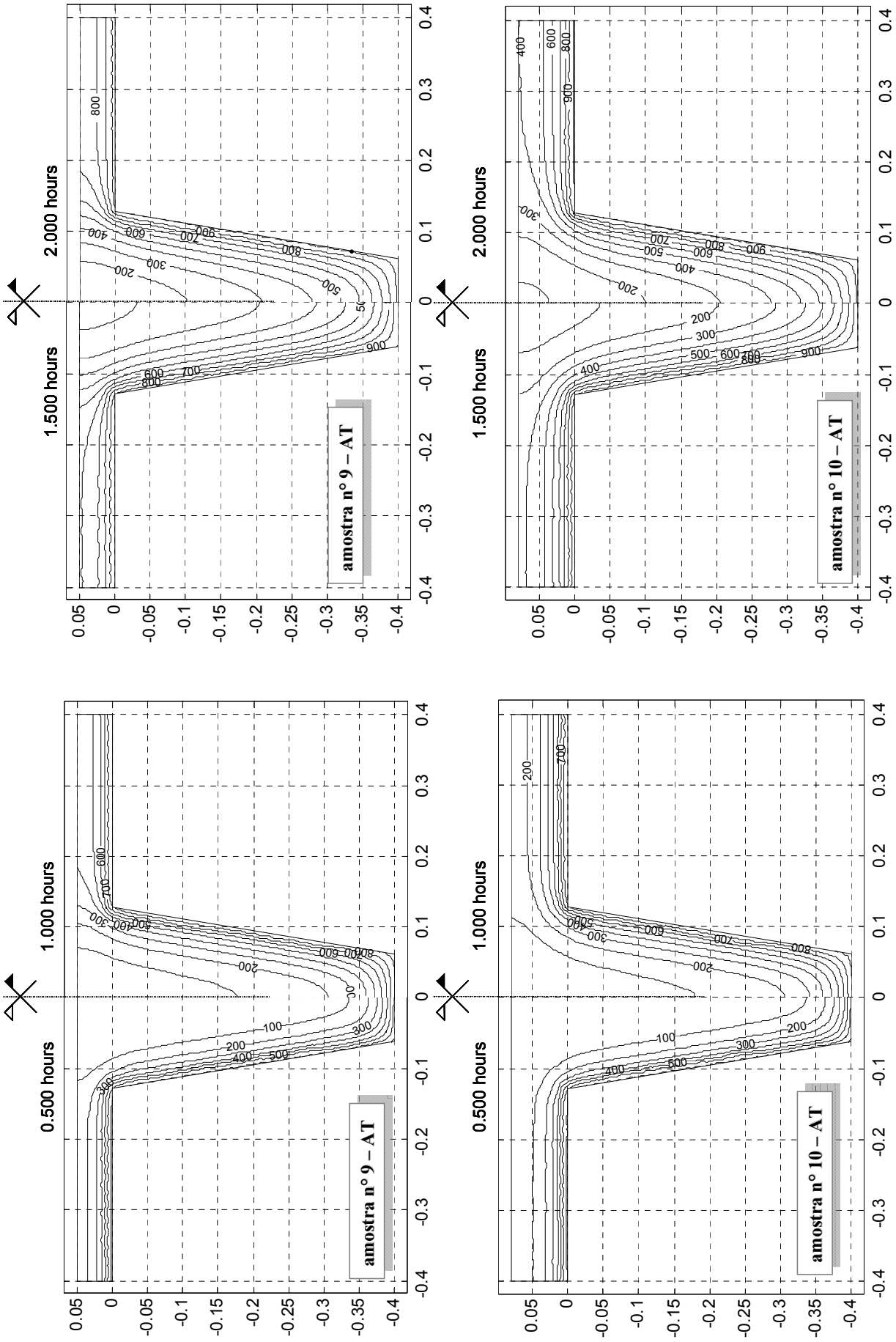


Figura A.26: isotermas para a amostras 9 e 10.

A.2.5 Vigas T

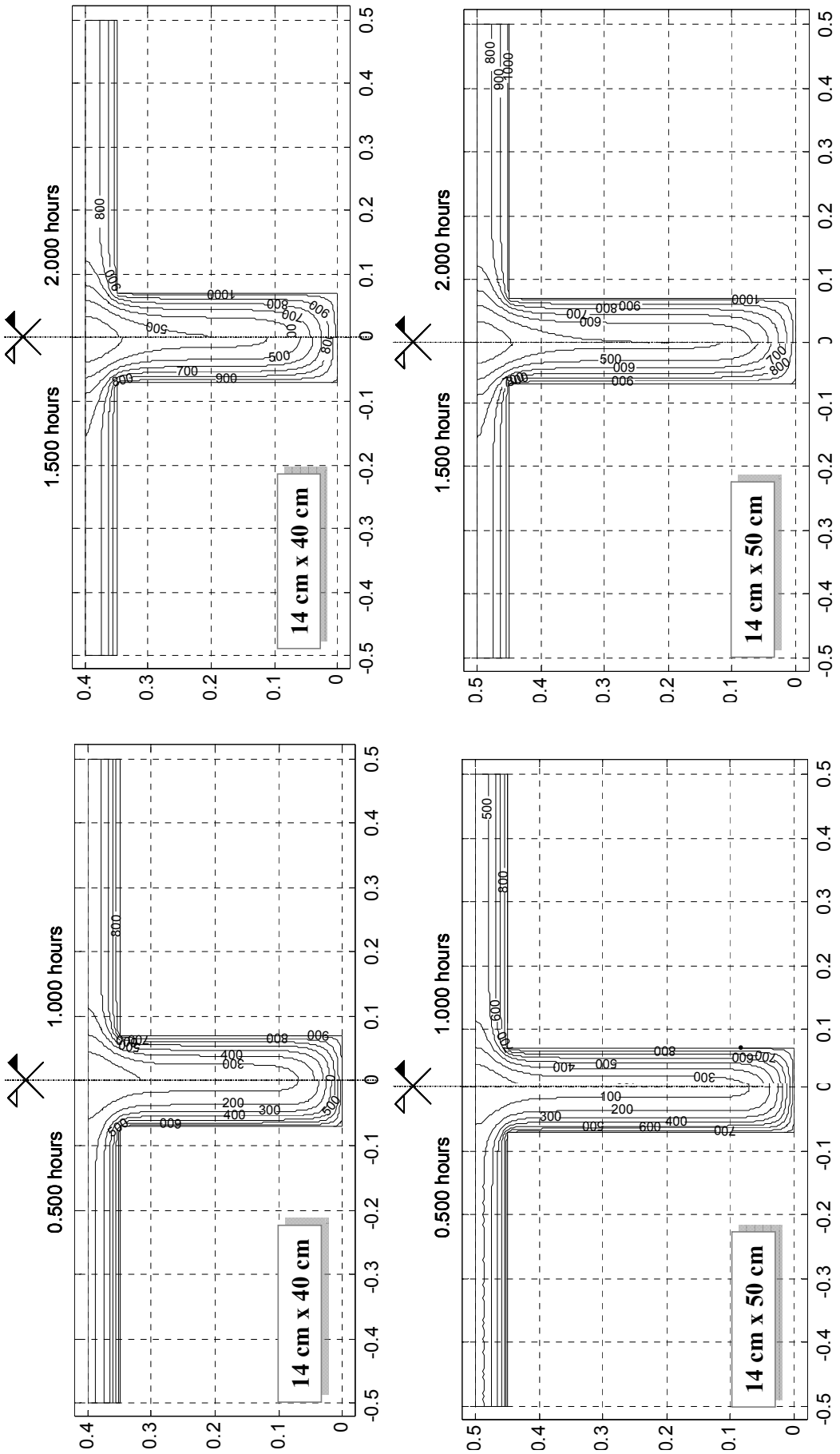


Figura A.27: Isotermas gerada pelo *SuperTempcalc*® para as seções de viga T 14 cm x 40 cm e T 14 cm x 50 cm.

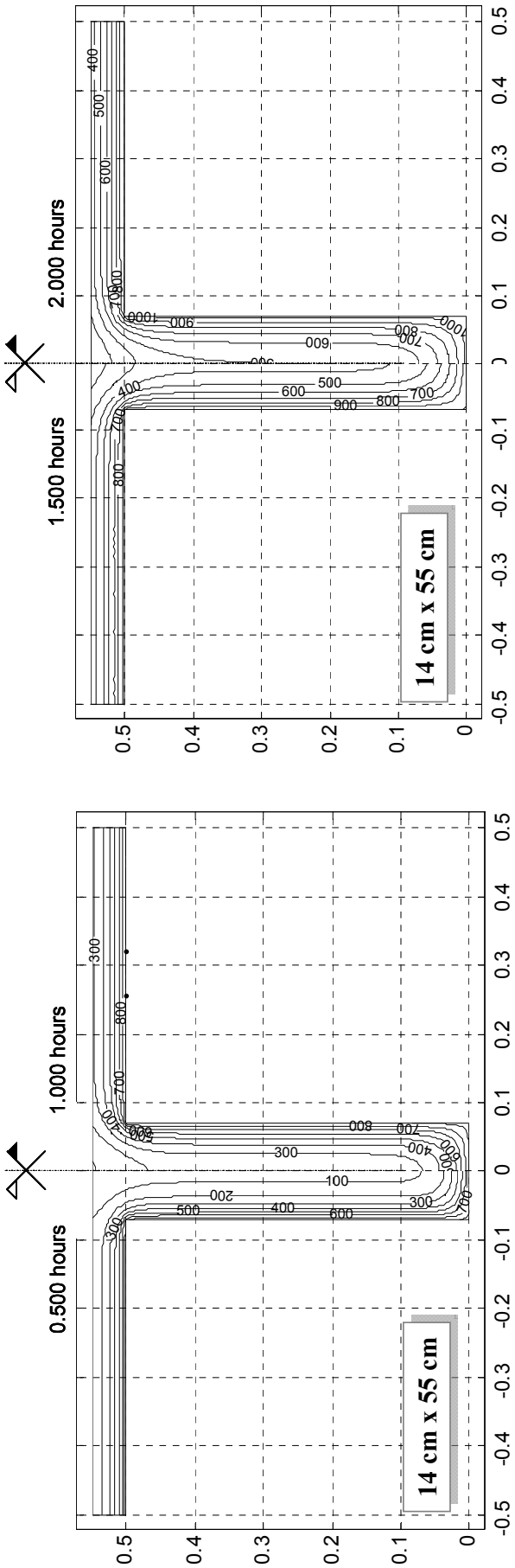


Figura A.28: Isotermas gerada pelo *SuperTempcalc*® para a seção de viga T 14 cm x 55 cm.

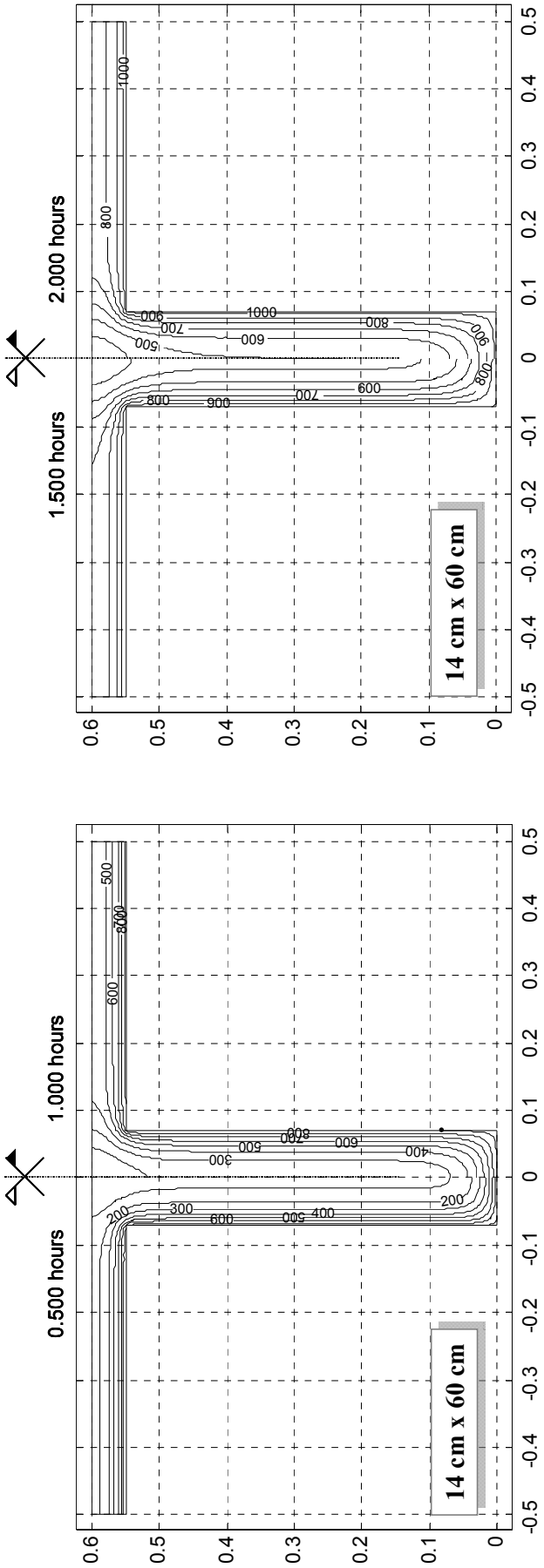


Figura A.29: Isotermas gerada pelo *SuperTempcalc*® para a seção de viga T 14 cm x 60 cm.

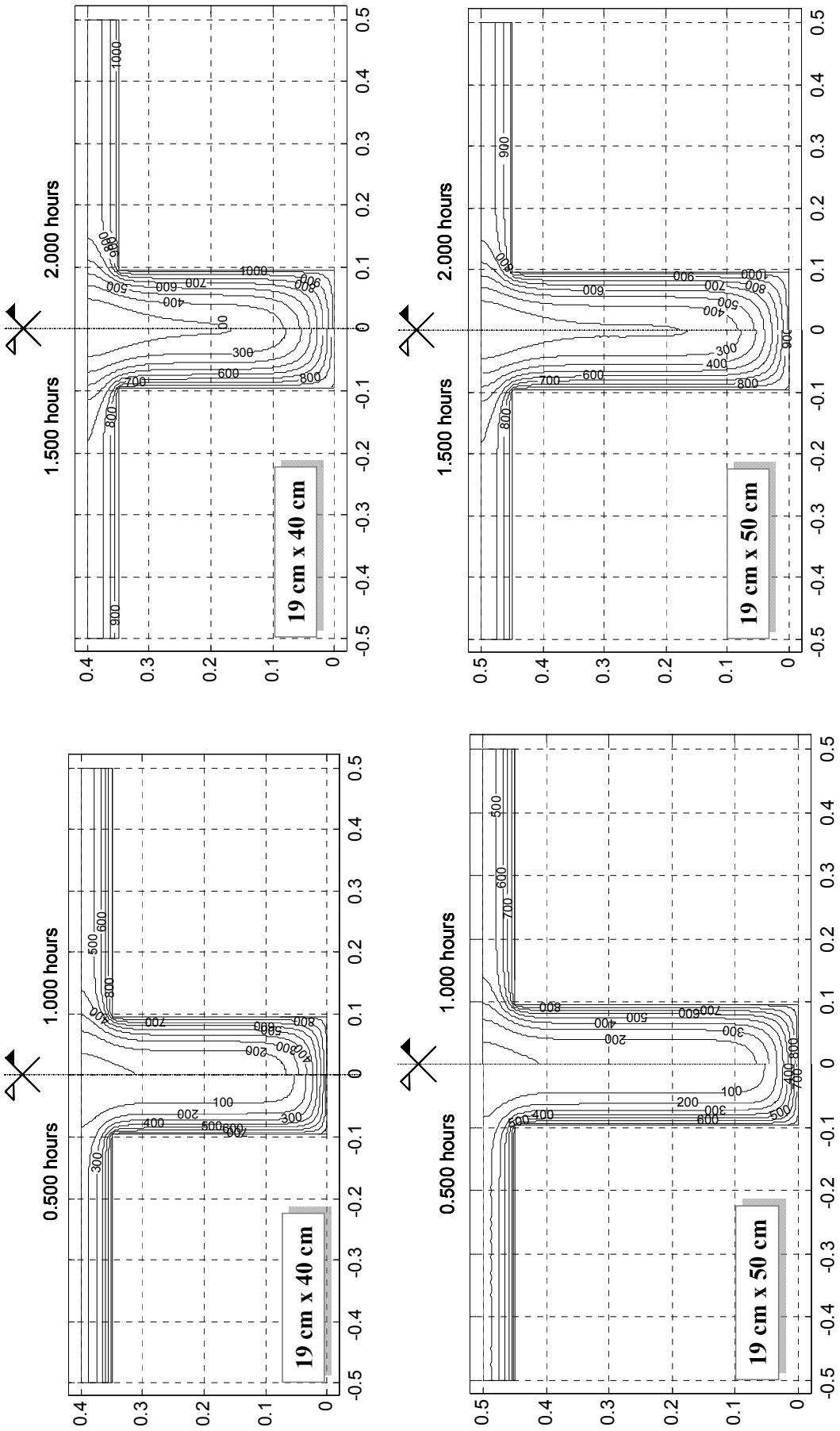


Figura A.30: Isotermas gerada pelo *SuperTempcalc*® para as seções de viga T 19 cm x 40 cm e T 19 cm x 50 cm.

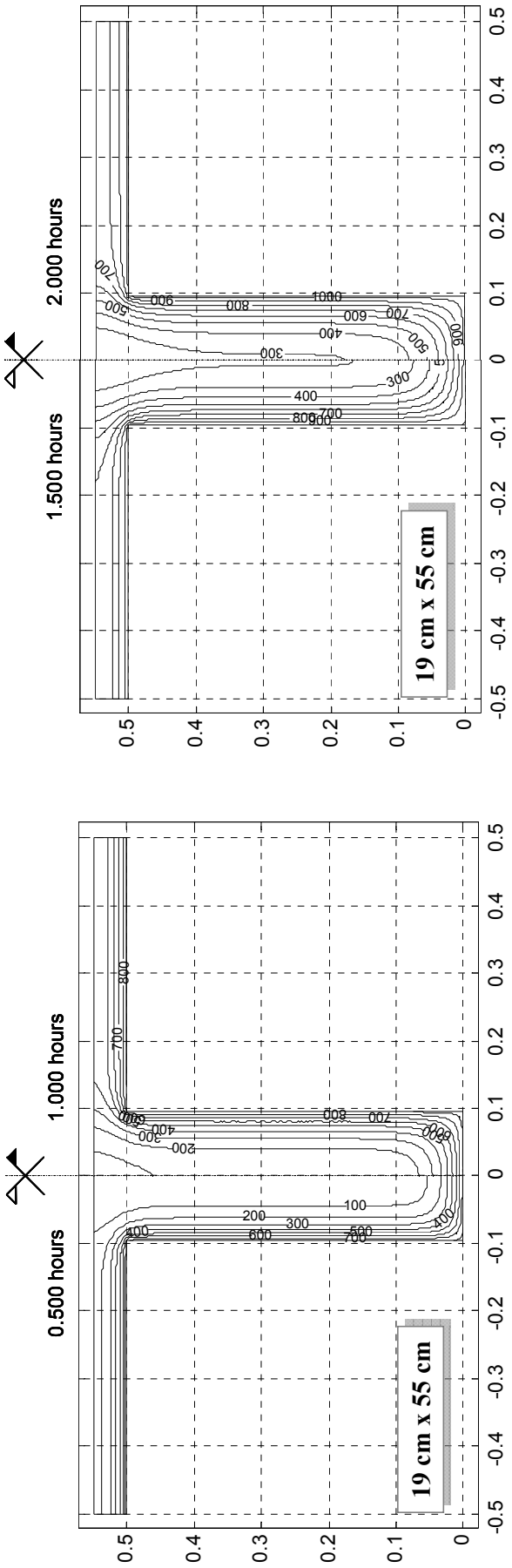


Figura A.31: Isotermas gerada pelo *SuperTempcalc*® para a seção de viga T 19 cm x 55 cm.

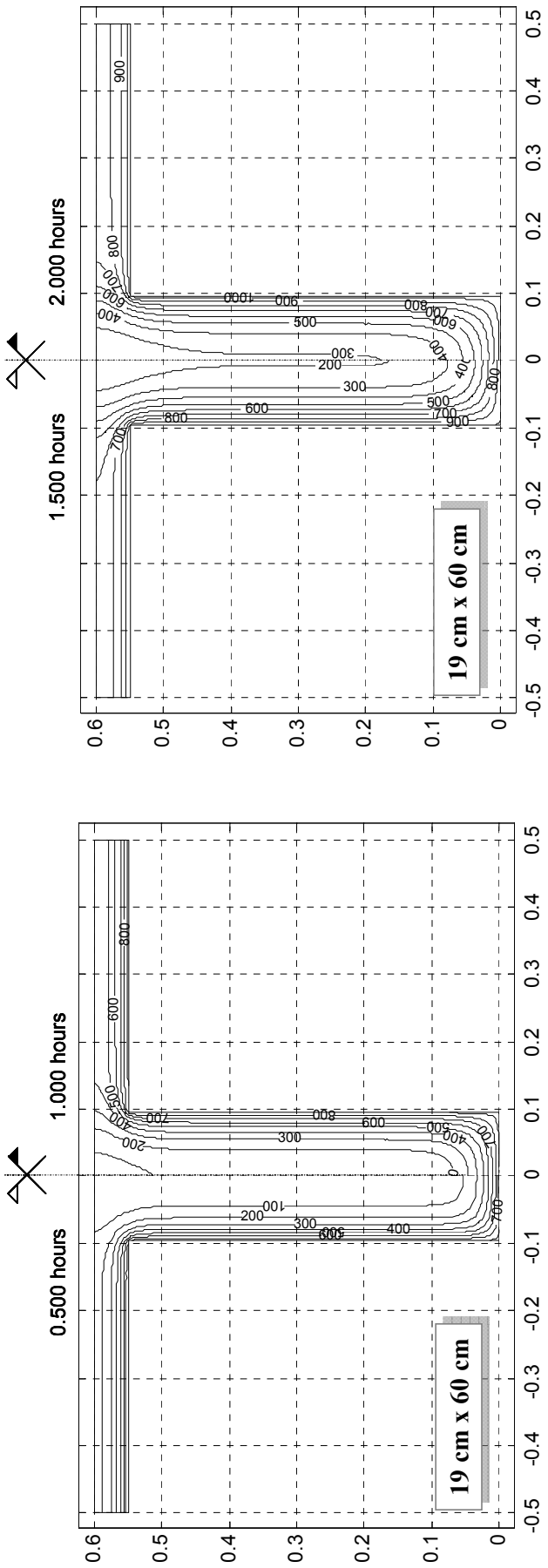


Figura A.32: Isotermas gerada pelo *SuperTempcalc*® para a seção de viga T 19 cm x 60 cm.

A.2.6 Vigas retangulares

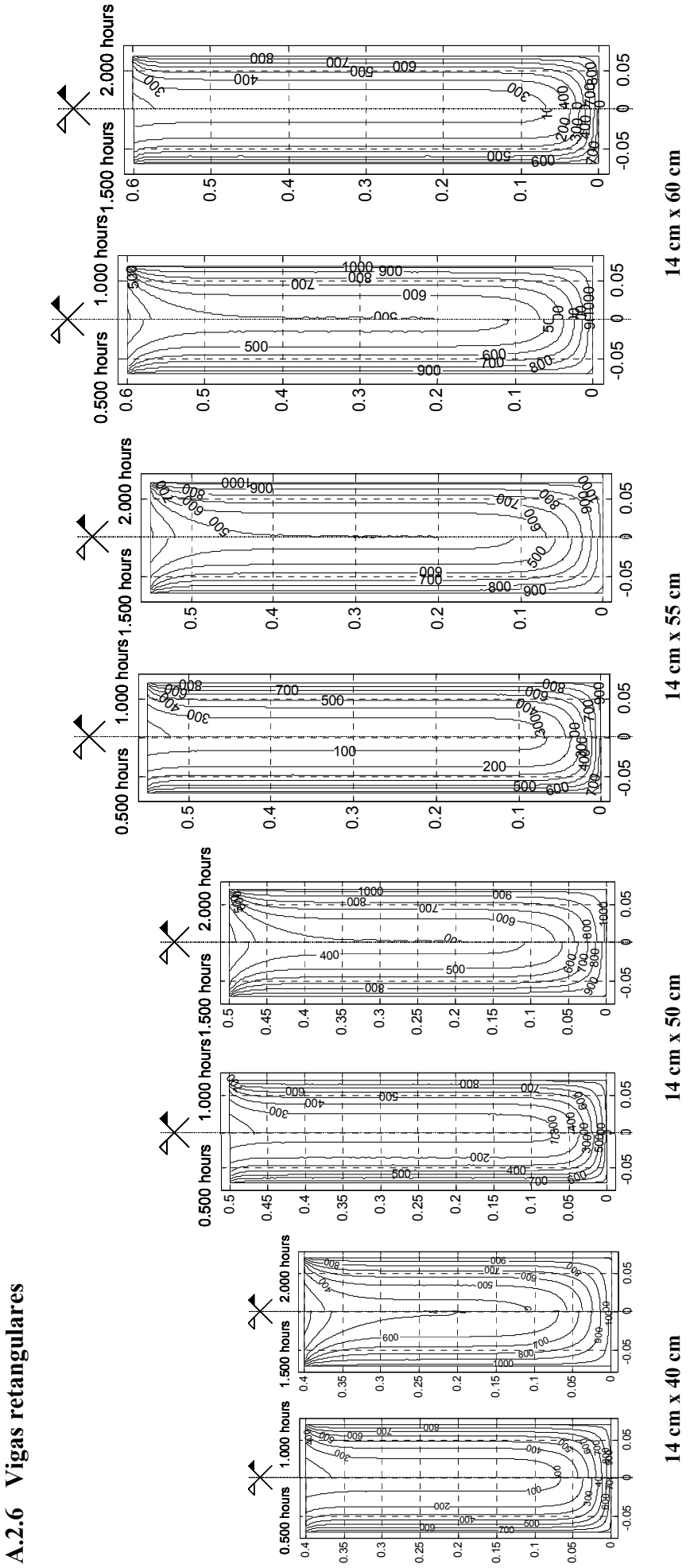


Figura A.33: isotermas nas seções de vigas retangulares de largura $b_w = 14$ cm.

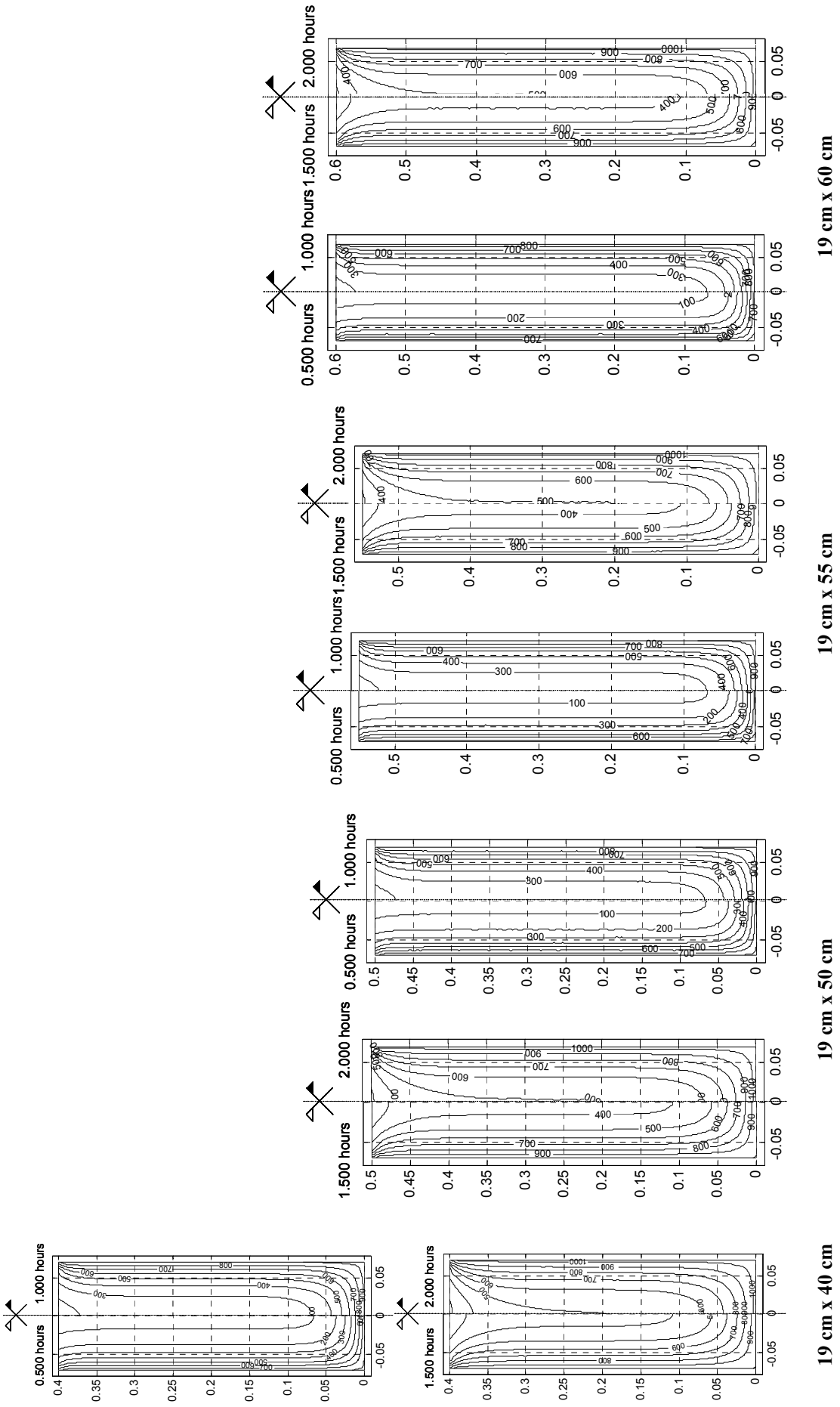


Figura A.34: isotermas nas seções de vigas retangulares de largura b_w = 19 cm.