

INFLUÊNCIA DA ESPESSURA DO BETÃO NA RESISTÊNCIA A UM INCÊNDIO NATURAL EM LAJES MISTAS

Felipe Macêdo Gomes

Dissertação apresentada à
Escola Superior de Tecnologia e de Gestão
Instituto Politécnico de Bragança
Para obtenção do grau de mestre em
Engenharia da Construção

Dezembro - 2020

INFLUÊNCIA DA ESPESSURA DO BETÃO DA RESISTÊNCIA A UM
INCÊNDIO NATURAL EM LAJES MISTAS

Felipe Macêdo Gomes

Dissertação apresentada no âmbito da Dupla Diplomação entre o

Instituto Politécnico de Bragança e a Universidade Unicristos

Para obtenção do grau de mestre em

Engenharia da Construção

Orientadores:

Prof. Dr. Paulo Alexandre Gonçalves Piloto (IPB)

Prof. Dr. Carlos Jorge da Rocha Balsa (IPB)

Coorientador:

Prof. Mestre Bergson da Silva Matias, M. Sc. (Unichristus)

Dezembro - 2020

RESUMO

As lajes mistas consistem em estruturas de concreto com aço colaborante moldadas a frio que permanecem durante toda a utilização da estrutura. As chapas de aço agem como forma para a concretagem e posteriormente para resistir aos esforços que serão solicitados. As lajes mistas tiveram seu início durante a década de 80 em grandes edifícios, como alternativas economicamente vantajosas quando aplicadas em larga escala.

As chapas de aço por serem localizadas em uma região exposta ao fogo, refletem uma maior exigência sobre a sua integridade perante situações distintas de incêndio. O aço quando aquecido por elevadas temperaturas altera consideravelmente suas propriedades de resistência e deformabilidade, podendo expor riscos neste elemento de estrutura.

Existem normas responsáveis por padronizar os modelos e métodos de projeto e de cálculo para garantir segurança na sua elaboração e utilização. A norma europeia EN 1994-1-2 é uma das normas responsáveis por promover métodos simplificados de cálculo para lajes mistas em situação de incêndio padrão (ISO834). Entretanto, estes métodos simplificados não são aplicáveis a situações de incêndio paramétrica, que simulam de maneira mais realística um incêndio natural.

É apresentado neste trabalho um estudo feito sobre a resistência ao fogo de lajes mistas quando solicitadas a cenários de incêndio paramétrico utilizando o auxílio dos softwares MATLAB e ANSYS Mechanical APDL. Para criar uma confiabilidade nestes testes, foi realizado uma validação numérica através de testes experimentais realizados por outros autores.

No total, foram realizadas 225 simulações para a validação e a elaboração do estudo paramétrico. Para cada um dos cenários de incêndio paramétrico foi feito um estudo paramétrico a partir do qual é proposto um novo modelo de cálculo simplificado, para estimar a resistência ao fogo segundo o critério de isolamento (I). São ainda apresentados novos coeficientes para estimar as temperaturas dos componentes presentes no critério da capacidade de carga (R) (anexo D do euro código 4 parte 1.2). Foram propostos novos coeficientes para o cálculo simplificado do tempo de resistência ao

critério de isolamento (I) e capacidade de carga (R) para 6 tipos diferentes de curvas de incêndios paramétrico.

Palavras-Chave: Lajes mistas; Resistência ao fogo; Incêndio Natural; Incêndio Paramétrico; Modelo numérico.

ABSTRACT

The composite slabs consist of cold formed concrete structures with cooperating steel that remains during the whole use of the structure. The steel deck act as a form for the concreting and later to resist the demands that will be requested. The composite slabs had their beginning during the 80's in large buildings, as economically advantageous alternatives when applied on a large scale.

The steel deck, as they are located in a zone exposed to fire, requires a higher degree of integrity when dealing with different fire situations. When heated by high temperatures, steel considerably changes its resistance and deformability properties, being able to expose risks in this structure element.

There are standards responsible for standardizing the models and methods of design and calculation to guarantee safety in their preparation and utilization. The European standard EN 1994-1-2 is one of the standards responsible for promoting simplified calculation methods for composite slabs in parametric fire situations (ISO834). However, these simplified methods are not applicable to natural fire situations, which simulate a real fire in a more realistic way.

This work presents a study made on the fire resistance of composite slabs when requested to natural fire scenarios using the software MATLAB and ANSYS Mechanical APDL. To create a confidence in these tests, a numerical validation was performed through experimental tests performed by other authors.

In total, 225 simulations were performed for the validation and elaboration of the parametric study. For each of the scenarios of natural fire, a parametric study was performed, from which a new model of simplified calculation is proposed, to estimate the resistance to fire according to the isolation criteria (I). New coefficients are also presented

to estimate the temperatures of the components present in the load capacity criterion (R)
(Annex D of Eurocode 4 part 1.2).

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 Rupturas da laje mista de C.G Bailey	4
Figura 2 Fatores de vista de uma laje mista	14
Figura 3 Fatores geométricos das lajes mistas.....	14
Figura 4 Calor específico do concreto convencional a variados fatores de umidade.....	19
Figura 5 Densidade do concreto convencional.....	20
Figura 6 Condutividade do concreto	21
Figura 7 Calor específico do aço	22
Figura 8 Condutividade do aço.....	23
Figura 9 Densidade do aço	23
Figura 10 Propriedades térmicas do ar	25
Figura 11 Distâncias u_1 para o cálculo da temperatura das Reforços.....	29
Figura 12 Curvas de incêndio padrão Euro-código 1991-1-2	33
Figura 13 Estágio do desenvolvimento de uma curva de incêndio natural	34
Figura 14.1 Curvas de incêndio natural Euro-código.....	40
Figura 15 Elementos finitos SHELL131	44
Figura 16 Elemento Finito SOLID70	45
Figura 17 : Elemento finito LINK33	45
Figura 18 Parâmetros para dimensionamento da largura da laje mista MATLAB	47
Figura 19 Parâmetros para dimensionamento da espessura da chapa de aço e camada de ar MATLAB	47
Figura 20 Parâmetros para dimensionamento do comprimento da laje mista MATLAB	48
Figura 21 Parâmetros para dimensionamento das nervuras da laje mista MATLAB	48
Figura 22 Parâmetros para dimensionamento das nervuras da laje mista MATLAB	49
Figura 23 Exemplo da malha de elementos finitos MATLAB.....	49
Figura 24 Perfil da laje mista de S.Guo.....	51
Figura 25 Curvas de incêndio por S.Guo	52
Figura 26 Laje mista para validação do modelo numérico.....	53
Figura 27 Coeficientes de convecção para curva de incêndio natural.....	54
Figura 28 Temperaturas na secção do Modelo#M1.1-A	56
Figura 29 Temperaturas na secção do Modelo#M1.2-A	57
Figura 30 Temperaturas na secção do Modelo#M2.1-A	57

Figura 31 Temperaturas na secção do Modelo#M2.2-A	58
Figura 32 Temperaturas da secção do Modelo#M3.1-A	59
Figura 33 Temperaturas da secção do Modelo#M3.2-A	59
Figura 34 Temperaturas da secção do Modelo#M1.1-B	60
Figura 35 Temperaturas da secção do Modelo#M1.1-C	61
Figura 36 Temperaturas da secção do Modelo#M1.1-D	61
Figura 37 Temperaturas da secção do Modelo#M1.1-E.....	62
Figura 38 Temperaturas da secção do Modelo#A1.0	63
Figura 39 Comparação das temperaturas da secção do Modelo#MA1.0	64
Figura 40 Comparação das temperaturas da secção do Modelo#MA2.0	65
Figura 41 Dimensões Polideck 59S.....	66
Figura 42 Dimensões Confraplus 60	67
Figura 43 Dimensões Multideck 50.....	67
Figura 44 Dimensões Bondeck.....	68
Figura 45 Laje mista Polideck 59S paramétrico.....	69
Figura 46 Laje mista Confraplus 60 paramétrico	70
Figura 47 Laje mista Multideck 50 paramétrico	70
Figura 48 Laje mista Bondeck paramétrico.....	70
Figura 49 Curvas de resistência ao fogo segundo critério (I) Multideck 50 h1=50mm qf, d= 1500 [Mj/m ²]	71
Figura 50 Curvas de resistência ao fogo segundo critério (I) Multideck 50 h1=70mm qf, d= 1500 [Mj/m ²]	72
Figura 51 Curvas de resistência ao fogo segundo critério (I) Multideck 50 h1=90mm qf, d= 1500 [Mj/m ²]	73
Figura 52 Curvas de resistência ao fogo segundo critério (I) Multideck 50 h1=110mm qf, d= 1500 [Mj/m ²]	73
Figura 53 Curvas de resistência ao fogo segundo critério (I) Confraplus 60 h1=50mm qf, d= 780 [Mj/m ²]	75
Figura 54 Curvas de resistência ao fogo segundo critério (I) Confraplus 60 h1=70mm qf, d= 780 [Mj/m ²]	75
Figura 55 Curvas de resistência ao fogo segundo critério (I) Confraplus 60 h1=90mm qf, d= 780 [Mj/m ²]	76
Figura 56 Curvas de resistência ao fogo segundo critério (I) Confraplus 60 h1=110mm qf, d= 780 [Mj/m ²]	76

Figura 57 Tempo de resistência (ti) qf, d = 1500.....	78
Figura 58 Tempo de resistência (ti) qf, d = 780.....	79
Figura 59 Tempo de resistência (ti) qf, d = 400.....	81
Figura 60 Tempo de resistência (ti) O = 0.1	82
Figura 61 Tempo de resistência (ti) O = 0.02	83
Figura 62 Nós do flange inferior Confraplus60.....	84
Figura 63 Nós do flange lateral Polideck59s.....	85
Figura 64 Nós do flange lateral Multideck50.....	85
Figura 65 Nó do vergalhão longitudinal Bondeck.....	86
Figura 66 Temperatura Flange superior aos 60min qf, d = 1500.....	88
Figura 67 Temperatura Flange inferior aos 60min qf, d = 1500.....	88
Figura 68 Temperatura Flange lateral aos 60min qf, d = 1500.....	88
Figura 69 Temperatura Vergalhão aos 60min qf, d = 1500	88
Figura 70 Temperatura Flange superior aos 120min qf, d = 1500.....	88
Figura 71 Temperatura Flange inferior aos 120min qf, d = 1500.....	88
Figura 72 Temperatura Flange lateral aos 120min qf, d = 1500.....	89
Figura 73 Temperatura Vergalhão aos 120min	89

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 Resistência do concreto para cada classe.....	15
Tabela 2 Resistencia das chapas aço enformadas a frio pela sua pela classe.....	16
Tabela 3 Propriedades térmicas do ar.....	24
Tabela 4 Coeficientes ai para determinação da resistência ao fogo segundo critério de isolamento (I).....	26
Tabela 5 Coeficientes bi para determinação das temperaturas das chapas de aço (R)...	28
Tabela 6 Fatores ci para cálculo da temperatura em Reforços	30
Tabela 7 Tempo de resistência TRRF em função da espessura efetiva mínima NBR14323	30
Tabela 8 Fatores do compartimento para cálculo do q_f, d	37
Tabela 9 Fatores de ocupação para o cálculo do q_f, d	37
Tabela 10 Fatores de combate contra o incêndio para cálculo do q_f, d	38
Tabela 11 Taxa máxima de liberação de calor por unidade de área RHR_f	38
Tabela 12 Lajes mistas de S.Guo.....	52
Tabela 13 Fatores de vista Polideck 59S	66
Tabela 14 Fatores de vista Confraplus 60	67
Tabela 15 Fatores de vista Multideck 50.....	67
Tabela 16 Fatores de vista Bondeck	68
Tabela 17 Modelos térmicos elaborados para estudo paramétrico.....	69
Tabela 18 Tempo de resistência para laje mista Multideck 50.....	74
Tabela 19 Tempo de resistência para laje mista Multideck 50.....	76
Tabela 20 Coeficientes propostos ai para determinar a resistência ao fogo nesse cenário de incêndio paramétrico. ($q_f, d = 1500; O = 0.05$).....	78
Tabela 21 Coeficientes propostos ai para determinar a resistência ao fogo nesse cenário de incêndio paramétrico ($q_f, d = 780; O = 0.05$).....	80
Tabela 22 Coeficientes propostos ai para determinar a resistência ao fogo nesse cenário de incêndio paramétrico ($q_f, d = 400; O = 0.05$).....	81
Tabela 23 Coeficientes propostos ai para determinar a resistência ao fogo nesse cenário de incêndio paramétrico ($O = 0.1$ $q_f, d = 420$).....	82
Tabela 24 Coeficientes propostos ai para determinar a resistência ao fogo nesse cenário de incêndio paramétrico I ($O = 0.02$ $q_f, d = 420$).....	83
Tabela 25 Coeficientes propostos bi para curva de incêndio paramétrico	86

Tabela 26 Coeficientes propostos c_i para curva de incêndio paramétrico 87

Tabela 27 Coeficientes propostos b_i para curva de incêndio paramétrico **Erro!**

Indicador não definido.

Tabela 28 Coeficientes propostos b_i para curva de incêndio paramétrico 90

Tabela 29 Coeficientes propostos b_i para curva de incêndio paramétrico 91

Tabela 30 Coeficientes propostos b_i para curva de incêndio paramétrico 93

Tabela 31 Coeficientes propostos c_i para curva de incêndio paramétrico 94

Tabela 32 Coeficientes propostos c_i para curva de incêndio paramétrico 95

Tabela 33 Coeficientes propostos c_i para curva de incêndio paramétrico 96

Tabela 34 Coeficientes propostos c_i para curva de incêndio paramétrico 96

LISTA DE SÍMBOLOS

A – Área [m²]

T – Temperatura [°C ou °K]

h_{cd} – Fluxo de calor por condução [W/m²]

$h_{net,c}$ – Fluxo de calor por convecção [W/m²]

$h_{net,r}$ – Fluxo de calor por radiação [W/m²]

h_{eff} – Espessura efetiva das lajes mistas [m ou mm]

c_a – Calor específico do aço [J/kgK]

c_p – Calor específico do concreto [J/kgK]

c_{ar} – Calor específico do ar [J/kgK]

t – Tempo [s]

t_i – Resistência ao fogo segundo o critério de isolamento (I) [min]

t_{Rd} – Resistência ao fogo segundo o critério de capacidade de carga (R) [min]

u – Teor de umidade do concreto [%]

$f_{y,\theta}$ – Resistência característica do aço [MPa]

$f_{p,\theta}$ – Tensão do limite elástico do aço [MPa]

$f_{c,\theta}$ – Resistência mecânica do concreto [MPa]

$E_{a,\theta}$ – Módulo de elasticidade do aço [GPa]

$E_{c,\theta}$ – Módulo de elasticidade do concreto [GPa]

$k_{y,\theta}$ – Coeficiente de redução da resistência mecânica das chapas de aço

$k_{sy,\theta}$ – Coeficiente de redução da resistência mecânica das Reforços

LETRAS GREGAS

∇ - Operador gradiente

λ_a – Condutividade térmica do aço [W/mK]

λ_{ar} – Condutividade térmica do ar [W/mK]

λ_c – Condutividade térmica do concreto [W/mK]

α_c – Coeficiente de convecção [W/m²°C]

ε – Emissividade

Φ_{sup} – Fator de vista da flange superior das chapas de aço

Φ_{inf} – Fator de vista da flange inferior das chapas de aço

Φ_{alma} – Fator de vista da alma das chapas de aço

σ – Constante de Stefan-Boltzmann [W/m²K⁴]

ρ_a – Densidade do aço [kg/m³]

ρ_c – Densidade do concreto [kg/m³]

ρ_{ar} – Densidade do ar [kg/m³]

θ_a – Temperatura do aço [°C]

θ_c – Temperatura do concreto [°C]

SUMÁRIO

1.	INTRODUÇÃO.....	1
2.	ESTADO DA ARTE	2
3.	TRANSFERENCIA DE CALOR.....	10
3.1	CONDUÇÃO	11
3.2	CONVECÇÃO	11
3.3	RADIAÇÃO	12
3.4	FATOR DE VISTA	13
4.	MATERIAIS	14
4.1	CONCRETO.....	15
4.2	AÇO ESTRUTURAL.....	16
5.	PROPRIEDADES TÉRMICAS DOS MATERIAS.....	17
5.1	CONCRETO.....	18
5.2	AÇO.....	21
5.3	AR.....	24
6.	MÉTODO SIMPLIFICADO DE CÁLCULO	25
6.1	EURO-CÓDIGO 4–PART 1-2 ERRO! INDICADOR NÃO DEFINIDO.	
6.2	ISOLAMENTO TÉRMICO (I)	26
6.3	CAPACIDADE DE CARGA (R).....	27
6.4	NORMA BRASILEIRA NBR 14323	30
7.	CURVAS DE INCÊNDIO	31
7.1	CURVA DE INCÊNDIO PADRÃO	31
7.2	CURVA DE INCENDIO NATURAL	33
8.	MÉTODO AVANÇADO DE CÁLCULO	41
8.1	MODELO DE ELEMENTO FINITOS	42
8.2	ANSYS	43
8.2.1	SHELL131	43
8.2.2	SOLID70	44

8.2.3	LINK33.....	45
8.3	MATLAB	46
8.4	GERANDO A GEOMETRIA DA LAJE MISTA.....	46
8.5	PROPRIEDADES TÉRMICAS	49
8.6	FLUXO DE CALOR.....	ERRO! INDICADOR NÃO DEFINIDO.
9.	MODELO DE VALIDAÇÃO.....	50
9.1	S.GUO. & BAILEY, C. G. (2010)	50
9.1.1	CONFIGURAÇÃO DO EXPERIMENTO	51
9.1.2	MODELO NUMÉRICO.....	53
9.1.3	RESULTADOS	55
10.	ESTUDO PARAMÉTRICO.....	65
10.1	MODELO NUMÉRICO.....	66
10.2	RESISTENCIA AO CRITÉRIO DE ISOLAMENTO (I).....	70
10.3	TEMPERATURA NOS COMPONENTES DE AÇO PELO MÉTODO DA CAPACIDADE RESISTENTE (C)	84
11.	CONCLUSÃO.....	97
12.	BIBLIOGRAFIA:.....	99

1. INTRODUÇÃO

O concreto é um material que apresenta boa resistência à compressão e a grandes variações de temperaturas. O aço é um material que possui bastante eficiência na tração e fornece ductilidade à estrutura. Com a devida utilização de cada um desses materiais em conjunto, sendo concreto na área de compressão e aço na zona de tração, o resultado é uma estrutura mais eficaz aos esforços solicitantes.

Com a revolução industrial e os avanços na área de construção civil, foi alavancado a busca por métodos construtivos mais econômicos, rápidos e adequados para cada tipo de edificação. Segundo (Wright, 1998) em 1950 existem registros, pela primeira vez, da utilização de malhas de aço soldadas na superfície de um perfil de concreto padrão. Durante a década seguinte, o uso de chapas perfiladas em vez de telas foi introduzido, se tornando o método conhecido até hoje como laje mista. Na Europa, o primeiro registro de construção utilizando lajes mistas ocorreu em 1978 no National Westminster Bank.

As lajes mistas são construídas com chapas de aço perfiladas formadas a frio, que atuam no período de construção como forma e posteriormente são mantidas para reforço da laje de concreto. Ganham popularidades ao longo desses últimos 20 anos na Europa devido ao seu sucesso em relação a resistência à rigidez alcançada e velocidade construtiva. Esse método construtivo traz benefícios atuando como plataforma de trabalho segura, suporta cargas durante a fase de construção, reduz o uso de escoramento, atua como cofragem para a laje de concreto e restringe as vigas de aço através de pinos conectores de cisalhamento soldados (Herrmann & Bucksch, 2014).

Os modelos de lajes mistas variam de acordo com a vida útil destinada, do produto da resistência resultante e dos requisitos de rigidez calculada. Estes modelos podem ser divididos em perfis de calha aberta (trapezoidais) ou perfis de reentrante (Herrmann & Bucksch, 2014). Em ambos modelos a estrutura metálica da chapa de aço se posiciona exposta ao ambiente, despertando maiores cuidados sobre possíveis agentes externos, como por exemplo a ação do fogo.

O objetivo deste trabalho foi realizar simulações numéricas de lajes mistas quando sujeitas a diferentes cenários de incêndio paramétrico e observar as temperaturas médias

e máximas atingidas na face não exposta, e em determinados pontos no interior da laje e a variação das mesmas quando se altera a espessura efetiva (h_{ef}) de concreto.

2. ESTADO DA ARTE

Em 1822, Fourier [16] realiza um estudo, por meio de ensaios experimentais para se aprofundar no comportamento mecânico, observando sobre o fluxo de calor em um elemento e a proporcionalidade em relação à sua área. A partir deste pressuposto foi estudado detalhadamente a transmissão de calor por condução. Desde então foi possível desenvolver o ramo da termodinâmica dos materiais, com base nas três leis fundamentais elaboradas por Fourier. Desde então, tem-se utilizado os fundamentos propostos por Fourier em diversas áreas do conhecimento.

Em 1950, Jeager [9] aborda problemas práticos importantes na condução de calor em lajes mista. São esses o fluxo de calor através de lajes mistas composta de camadas com diversas propriedades, como as que decorrem em paredes de fornos, salas e câmaras refrigeradas. J. C Jeager discute, em detalhes, a previsão do comportamento transitório de uma determinada parede sob condições de incêndio e a reação do comportamento transitório de duas paredes diferentes. Buscou encontrar a quantidade total de calor que passa pela área unitária de uma parede, desde o tempo zero até certo tempo “ t ”, por meio de cálculo aritmético.

Em 1998, Wright et al [1] aborda a origem da laje mista, de suas geometria e composições. Demonstra as principais características que ela deve possuir na fase de construção, ao longo do seu período de utilização e de sua evolução no método de análise em função da fissura gerada pelo cisalhamento da peça. Wright *et al* cita sobre os primeiros testes de incêndio em lajes mistas realizados na década de 1980 na Grande-Bretanha por um consorcio de fabricantes aonde obtiveram bons resultados, apesar do aço estar exposto. Concluiu que a laje mista se tornou uma das formas mais populares de revestimento de aço estrutural do mundo e sugeriu realizar mais pesquisas sobre a capacidade de abrangência de situações em que a laje mista pode se submeter.

Em 2000, a University of Edinburgh realiza o primeiro teste de incêndio de Cardington em grande escala, utilizando modelos computacionais para analisá-lo. Foram destacadas as diferenças entre estruturas simples e mistas, onde as simples tendem a

apresentar rupturas estruturais primeiro, por não possuírem meios para recompensar a carga excedente em determinado ponto. Já as estruturas mistas, podem aliviar os pontos que já atingiram o limite transmitindo a carga para outro elemento estrutural próximo. A metodologia utilizada para alcançar os objetivos era desenvolver modelos rigorosos do teste de incêndio da *British steel* usando o *software* comercial de elementos finitos ABAQUS.

Em 2000, C.G Bailey et al [4] realizaram um grande programa de testes de incêndio em lajes mistas. Observaram que a laje mista obteve uma resistência ao fogo superior em comparação com a resistência sugerida pelos métodos de cálculo de projetos da época. Desta forma decidiram realizar testes para se entender melhor o comportamento da laje mista carregada em um incêndio. Neste estudo consideram que a ação da membrana de tração que ocorre na laje para grandes deslocamentos era benéfica para a resistência da mesma, sendo assim, os testes foram realizados à temperatura ambiente e foi removido a deck de aço da peça, pois como o efeito membrana ocorre apenas em elevadas temperaturas considera-se que a chapa de aço teria deformado e perdido suas propriedades de resistência. CG Bailey et al [4] concluíram com ensaios das ações da membrana elástica que a carga de falha era de aproximadamente o dobro da sugerida pela teoria clássica da linha de rendimento. As principais diferenças entre a laje testada e o comportamento de uma laje submetida a incêndio em um edifício real foram destacadas.

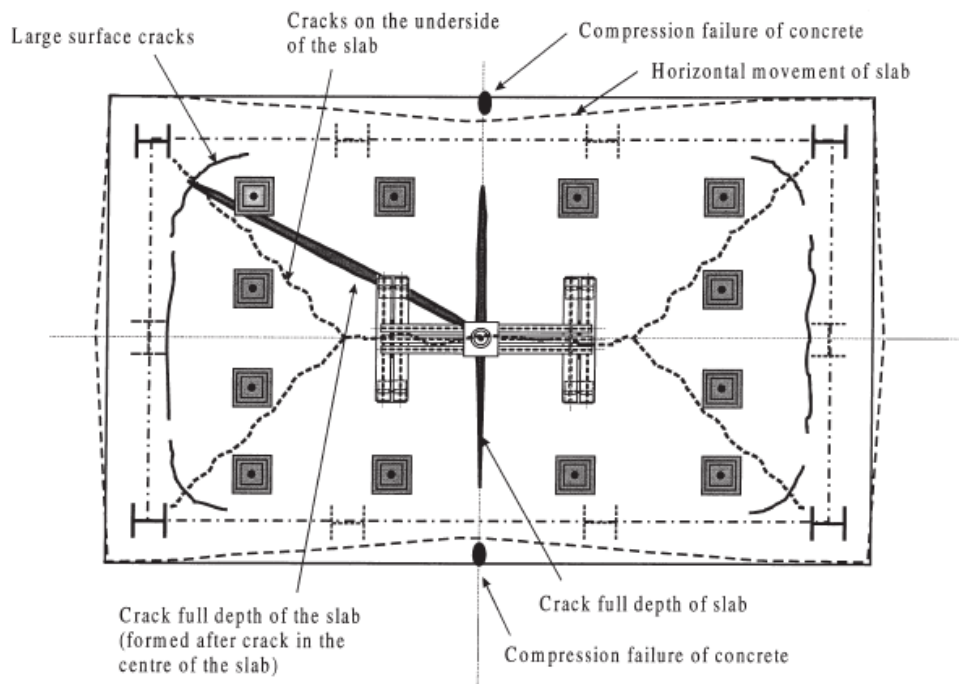


Figura 1 Rupturas da laje mista de C.G Bailey [4]

Em 2000, Huang, Burgess & Plank [14] desenvolveram um modelo para representar corretamente a influência de lajes mistas sobre o comportamento estrutural de edifícios em chamas. Três testes padrão de incêndio em lajes mistas e um teste de fogo natural em grande escala em Cardington foram modelados numericamente neste artigo para validar a formulação. Demonstraram que a modelagem por rigidez efetiva das lajes fornece a melhor previsão. Demonstraram ainda que, nos estágios iniciais, quando a temperatura permanece abaixo de 400 C, diferentes modelos de chapas produzem pouca diferença. Isso ocorre porque a viga de aço é relativamente rígida e curva-se, devido ao diferencial térmico, fazendo com que a expansão domine o comportamento estrutural. Quando a temperatura aumenta ainda mais, o aço perde consideravelmente sua resistência, tornando-se importante modelar as lajes de concreto corretamente. Demonstraram que quando o aço da chapa está a temperatura elevada, a influência das nervuras através do fundo da laje torna-se significativamente efetiva.

Em 2000, Dos Santos WN [33] desenvolveu uma pesquisa sobre o comportamento da condutividade térmica e do calor específico de materiais cerâmicos porosos quando possuem umidade presente em sua composição em comparação com os materiais secos. A técnica adotada neste trabalho foi a “frio e quente”, considerando ser um meio eficaz e

preciso para determinar a temperatura e condutividade em materiais refratários. Os testes foram realizados em matérias primas presentes na composição do concreto, como areia, agregado e cimento Portland, aonde foram pesados e misturados com uma quantidade de água para dar a consistência desejável. Os ensaios experimentais mostraram que a condutividade térmica e o calor específico são alterados devido a presença de água. Quando os materiais atingem a marca de 100 °C passam pelo processo da transição da fase líquida para gasosa, diminuindo a quantidade de água absorvida e aumentando a porosidade da estrutura, refletindo em uma redução da condutividade térmica.

Em 2001, S. Lamont et al [40] utilizam o software HADAPT para desenvolver modelos numéricos e comparar com as simulações de incêndio de Cardington. Demonstraram que os parâmetros selecionados juntamente com o software, eram eficazes para a simulação da evolução da temperatura nos elementos de concreto até um certo período. Retificaram que o concreto alcançava a temperatura de 100 °C, os ensaios experimentais apresentavam uma breve estabilização da temperatura e logo em seguida um decaimento acelerado. Já as modelações numéricas apresentavam uma maior estabilidade da temperatura na fase de aquecimento. S. Lamont et al concluíram com suas análises que esta diferença da resposta da estrutura era devido à desigualdade entre a umidade do concreto utilizado na modelação em comparação ao concreto do ensaio de Cardington.

Em 2003, Lennon & Moore [12] com o apoio da Comunidade Europeia do Carvão e do Aço (CECA) Realizaram 8 ensaios experimentais com incêndio natural em lajes mistas. Foi levado em consideração todos os fatores que consideraram relevantes, como carga de incêndio, condições de ventilação, geometria do compartimento e eficiência de medidas de proteção ativa, visando obter um novo conceito de segurança contra incêndios. Em todos os testes, o valor da carga de incêndio adotada foi de 40kg de madeira por metro quadrado de área útil e um fator de abertura variado. Os resultados dos ensaios foram comparados aos previstos no Eurocódigo sobre curva padrão e incêndio natural, onde abordam o fato da curva paramétrica fornecer uma estimativa razoável do valor máximo de temperatura, mas subestima grosseiramente a duração do incêndio e a influência dos revestimentos desses compartimentos perante um incêndio. Em termos de duração, a equação numérica para a fase de resfriamento tende a prever uma duração muito curta e resfriamento muito rápido, mencionando que seu desenvolvimento requer mais estudos.

Em 2004, Brown & Mark [11] realizam um ensaio de Cardington à escala real com o objetivo de obter resultados que auxiliem a desenvolver estudos para retificar a compreensão do comportamento das estruturas de aço perante um incêndio. O teste ao fogo foi realizado nos 4 andares do edifício, com uma área medindo 11x7 (m²) por piso. Foi aplicada uma carga de 110 kN no 5 pavimento em uma área de 18x10,5 (m²). A carga de fogo foi fornecida por 40kg de madeira por m² de piso e área de ventilação de 1,27m de altura por 9m de comprimento.

Em 2006, Wald et al [13] analisam a curva tempo-temperatura do gás (ar) em diferentes compartimentos, incluindo lajes normais e mistas, sujeitos a incêndio natural. Na análise foram comparadas as temperaturas registradas com as curvas paramétricas apresentadas no eurocódigo. Foram examinadas as fendas geradas na laje mista ao longo da “zona fraca” presente na extremidade da vida-flange composta, as rachaduras perpendiculares e contínuas e as conexões em ambos os lados da laje. As câmeras do compartimento registraram perdas do estado de limite de integridade da laje de concreto após 54 min momento este onde foi registrado a maior temperatura do compartimento durante o incêndio, de 1107.9°C. O colapso da estrutura não foi alcançado durante e depois do ensaio. Retificaram que os resultados encontrados apoiam totalmente o conceito de vigas desprotegidas e conexões com colunas desprotegidas como um sistema viável para lajes mistas.

Em 2011, Chen & Shi [5] discutem brevemente sobre o conceito de lajes mistas e abordam sobre a análise da falha ao cisalhamento e a adesão/atrito entre o aço e o concreto. Foi estudada e comparada a modelação da laje mista pelo método de elementos finitos (FE) e compararam com os resultados experimentais obtidos. Estes investigadores apresentam uma calibração do modelo que se aproximou fielmente aos resultados dos testes reais, onde a laje mista tende a falhar no cisalhamento longitudinal, citando novamente que a força de cisalhamento longitudinal máxima seja uma propriedade inerente a cada laje mista específica.

Em 2012, S.Guo [3] realizou uma série de 6 testes em lajes mistas, realizados na Universidade de Manchester. Os ensaios foram realizados por dois tipos diferentes de aquecimento e resfriamento. No primeiro ensaio o forno foi aquecido por 40 minutos até uma temperatura máxima de 950 ° C e seguido por a fase de resfriamento. No segundo ensaio, o forno foi aquecido durante 60 minutos e a temperatura máxima atingida foi de

800 ° C, depois o resfriamento. Para estes dois tipos de ensaio, foram testados diferentes cenários e cargas de incêndio, buscando maiores quantidade de variáveis. Encontraram, nos testes submetidos, que o deslocamento vertical máximo na laje aconteceu na fase de aquecimento. Demonstraram que o deslocamento máximo depende mais da temperatura do forno atingido e das cargas. S.Guo conclui ainda que os resultados dependem da variação da composição do concreto, da espessura do deck de aço e do tamanho das malhas de aço.

Em 2014 Herrmann & Bucksch [6], realizam uma investigação sobre estruturas de lajes mistas, ressaltando o aumento na utilização dela ao longo dos últimos 20 anos. Neste artigo foram citadas as principais vantagens da utilização de lajes mistas durante seu período de construção e ao longo do seu período de utilização. Ressaltam os vários modelos de chapas de aço perfilada usados, como também o dimensionamento delas utilizando as equações fornecidas pela EN 1993-1-3 para se determinar a rigidez necessária para resistir aos estágios de construção.

Em 2015, Shuyuan Lin et al [2], realizam uma investigação sobre os impactos gerados na utilização de suportes verticais em lajes mistas sujeitas a um incêndio ISO834 e a um incêndio natural. Afirmaram ser notório que as ações de membrana de tração nas lajes mistas devido ao incêndio dependem do suporte vertical ao longo das extremidades das lajes, mas eram escassas as pesquisas sobre a influência desses suportes verticais na membrana de tração das lajes. Sendo assim, foi desenvolvido um modelo tridimensional genérico de 45x45m, utilizado software de elementos finitos VULCAN, capaz de modelar o desempenho tridimensional de estruturas mistas e em aço sujeitos a um incêndio. Foram aplicadas diferentes condições de suportes verticais durante os testes, tendo utilizado três modelos de malhas de aço, ampliando a validação dos impactos desses suportes. Foram utilizados dois modelos robustos de elementos de conexão de 2 nós desenvolvidos para modelar o comportamento das conexões iniciais e finais da placa. Como resultado obteve-se uma apuração de dados numéricos em larga escala sobre os efeitos de vigas protegidas e das suas conexões na resistência ao fogo de edificações com elementos mistos.

Em 2015, Gernay et al [28] realiza um estudo abordando os critérios de desempenho de estruturas submetidas a um incêndio serem respaldadas abundantemente pelo tempo de resistência ao fogo durante condições crescente de temperatura. É citado o fato dessa resistência ao fogo ser um indicador onde deve cumprir os critérios

predefinidos durante as condições crescentes de temperatura, desconsiderando a influência do período de arrefecimento para a resistência global da estrutura. Estes autores consideram ainda que os incêndios em edifícios devem ser caracterizados por fase de aquecimento seguido por uma fase de arrefecimento e que o facto de não desconsiderar essa fase pode trazer riscos acrescidos para as brigadas de incêndio e pessoas. Neste trabalho foram realizadas simulações numéricas para dois incêndios naturais e para um incêndio padrão ISO834, com intuito de simular os critérios de resistência da estrutura, principalmente durante a fase de resfriamento. Como conclusão, observou-se que a falha estrutural pode ocorrer também na fase de resfriamento, para o caso de um incêndio natural, sugerindo uma metodologia para caracterizar o comportamento da estrutura em condições naturais de incêndio. O indicador derivado (DHP) foi utilizado para quantificar a influência dos meios físicos na resposta estrutural, podendo ser utilizado para analisar diferentes modelos estruturais e realizar comparações, como, por exemplo, respostas estruturais durante o período de arrefecimento de um incêndio.

Em 2018, Jian Jiang et al [41] realizam uma investigação sistemática utilizando o método de elementos finitos para determinar uma modelagem da transferência de calor em lajes mistas e comparam com medições experimentais disponíveis na literatura. Realizaram ainda um estudo paramétrico visando analisar a influência das condições de contorno térmico, propriedades térmicas do concreto e geometria da laje sobre as condições de temperaturas propostas na laje. O estudo paramétrico utilizado considerou uma vasta faixa de parâmetros utilizados por C.Both 1998 [8], para englobar a geometria das lajes compostas usadas na prática. A análise de transferência de calor foi realizada com a utilização do software de elementos finitos LS-DYNA e foi utilizado o incêndio padrão ISSO 834 para curva de temperatura do gás. Como resultados, concluíram que o teor de umidade do concreto tem uma relevância significativa na distribuição da temperatura. Foi apresentada uma nova emissividade para o aço, fornecendo uma melhora significativa para a previsão da temperatura. A espessura da camada de concreto foi determinada como o principal fator geométrico que influencia na transferência de calor através da laje.

Em 2019, Sharma et al [39] realizam um estudo sobre a relação entre o aço e o concreto estrutural em lajes mistas sujeitas a incêndio, focando principalmente o estudo na separação entre os dois materiais, devido ao processo de aquecimento. Neste trabalho foram utilizados dois métodos de análises para prever a camada de ar entre a chapa de

aço e a laje de concreto. Os métodos utilizados foram o método iterativo sequencialmente acoplado e o método da transferência de calor totalmente acoplada, onde ambas essas abordagens simulam a radiação e a condução através da camada de ar entre a chapa de aço e o concreto. O método iterativo sequencial pressupõe que se as temperaturas dos componentes de aço e do concreto forem conhecidas, pode ser calculado os alongamento térmicas diferenciais dos componentes em conjunto, de maneira iterativa. O método de análise totalmente acoplada requer soluções simultânea dos problemas de transferência de calor, além de neste método proporcionar ignorar as deformações mecânicas em comparação com as deformações térmicas. Os resultados numéricos obtidos destas análises foram validados comparando com resultados de ensaios experimentais realizados em escala real, tendo demonstrado diferenças consideráveis, quando não se considera a separação da chapa de aço ao concreto durante o aquecimento. Essa diferenças foram justificadas pelo efeito de isolamento que a camada de ar oferece na transferência de calor da face inferior para a face superior da laje. Neste estudo concluíram que os dois métodos analisados possuem razoável precisão, sendo que o método da transferência de calor totalmente acoplado parece ser mais versátil por poder utilizar diferentes chapas de aço, mantendo precisão nos resultados Observaram que a desconsideração da ligação mecânica entre a chapa de aço e a laje de concreto pouco afetou nas previsões de temperaturas do concreto.

Em 2019, Piloto et all [35, 36, 37] realizam uma série de simulações numéricas de lajes mistas submetidas a um incêndio com carga mecânica aplicada, com o principal intuito de validar o modelo numérico. Foram produzidos vários modelos térmicos e mecânicos destinados a estudar a influência da espessura do concreto em relação com a sua resistência ao fogo, seguindo o critério de isolamento (I) e a influência do carregamento sobre a resistência ao fogo, seguindo o critério de capacidade de carga (R). Com os resultados numéricos, perceberam que ao aplicar uma fina camada de ar (air gap) entre a superfície inferior de concreto e a superfície superior da chapa de aço, os resultados térmicos e mecânicos tendem a se aproximar dos resultados obtidos pelos ensaios experimentais. Constaram ainda que a utilização de uma camada de ar com uma espessura de 1mm entre o concreto e a chapa de aço, foi possível reduzir o erro relativo segundo o critério de isolamento(I) de 14% para 6 %.

Em 2019, Balsa et al [38] realizam um estudo buscando um aprimoramento dos modelos numéricos termomecânicos em lajes mistas, realizados com o auxílio do

software ANSYS [30]. Numa primeira fase, a técnica de modelação utilizava o elemento SOLID para modelar a camada de ar presentes entre a chapa de aço e o concreto, sendo posteriormente substituída pela utilização dos elementos de casca SHELL. A nova modelação proporcionou uma redução do número de nós criado pelos elementos finitos, resultando em modelos térmicos com menos tempo de processamento. Seguindo o critério de isolamento (I) de resistência ao fogo, os resultados utilizando o elemento de casca SHELL para representar a camada de ar alcançaram melhores erros relativos em comparação com a utilização do elemento SOLID, reduzindo de 6% para 3,88% em comparação com os resultados experimentais.

No seguimento desta linha de investigação, esta tese apresenta um estudo sobre as propriedades térmicas de elementos e a transferência de calor entre os elementos presentes na laje mistas quando submetidas a situação de mudança de temperatura. Será apresentado tabelas e equação presentes nas normas regulamentadores, que servem para encontrarmos as propriedades termodinâmicas dos materiais.

3. TRANSFERÊNCIA DE CALOR

Transferência de calor ou propagação de calor é a transição de energia térmica de um corpo de maior temperatura para um corpo de menor temperatura, de forma que o corpo entre num estado de equilíbrio. Porém, essa transferência de calor é influenciada pelas propriedades térmicas dos materiais desse sistema.

Nas lajes mistas em situação de incêndio a transferência de calor será influenciada pelas propriedades do concreto, pelas propriedades da chapa aço pelas dimensões da geometria, as temperaturas máximas obtidas, a taxa de fluxo de calor por unidade de tempo e se os materiais possuem contato perfeito. O contato perfeito é suposição onde dois ou mais elementos em análise então em total contato, sem nenhuma camada de ar entre eles [9].

Para entender o mecanismo de transferência de calor, é necessário compreender os três tipos de mecanismos de transferência existentes: convecção, condução e radiação [15]. A combinação destes é que determina a magnitude da variação de temperatura entre os elementos do sistema.

3.1 CONDUÇÃO

A condução de calor, é a transferência de energia entre as partículas de um corpo de maior energia para um corpo de menor energia [15]. Quando um corpo possui temperatura inferior a um outro e entram em contato, as temperaturas tendem a estabelecer um equilíbrio térmico. Este conceito foi apresentado pela primeira vez por Fourier em 1822 [16], tendo apresentado uma Equação para determinar o fluxo de calor h_{cd} [W/m^2] do corpo em análise.

$$h_{cd} = -\lambda \frac{dT}{dx} \quad (1)$$

Na Equação (1), λ representa a condutividade térmica que um material possui em [W/mK], O dT representa a diferença de temperatura dos corpos em contato em [K] e dx é a distância do fluxo de calor entre as áreas [m^2] da superfície de contato.

Considerando a distribuição tridimensional do corpo, o aquecimento para um pedaço do corpo varia a temperatura em função do tempo e espaço, definido pela seguinte Equação [15]:

$$\vec{h}_{cd} = -\lambda \cdot (\partial_x, \partial_y, \partial_z)^T \cdot T \quad (2)$$

O vetor da Equação acima que possui a magnitude e a direção do aumento máximo de temperatura em cada ponto é chamado de gradiente de temperatura [15].

3.2 CONVECÇÃO

A transferência por convecção é definida como um movimento ascendente ou descendente de um fluido líquido ou gasoso que transporta calor juntamente com o fluxo de matéria de um fluido. Simplificadamente, é quando um determinado corpo com uma superfície de temperatura T_a transfere calor para outro determinado corpo de temperatura T_b devido a dinâmica de movimento e atrito entre as partículas, sendo T_a diferente de T_b .

O fenômeno de transferência de calor por convecção ocorre de duas maneiras, sendo elas a convecção forçada e a convecção natural. A convecção forçada ocorre devido ao fluxo de movimento do corpo ser forçado com auxílio de outros sistemas externos ou por campos gravitacionais como bombas, ventiladores e outros meios mecânicos. A convecção natural ocorre devido a forças induzidas somente pela diferença de temperatura entre os corpos desse sistema.

Segundo o estudo realizado por Fourier [16], o fluxo de calor pelo processo de convecção é encontrado pela equação a seguir, que utiliza a diferença de temperatura da superfície do corpo T_s [°C] e o meio em contacto “ T_g ” [°C] e um coeficiente a_c que expressa o coeficiente de convecção em [W/m² °C] .

$$\dot{h}_{net,c} = a_c(T_s - T_g) \quad (3)$$

3.3 RADIAÇÃO

A transferência de calor por radiação consiste na propagação de energia de um ponto a outro por meio da alteração das partículas ou ondas eletromagnéticas. Todos os corpos geram constantemente energia pelo processo de radiação eletromagnética, mas a intensidade dessa energia de radiação depende da temperatura em que esse corpo se encontra e da natureza da superfície do corpo [15].

Para análise de calor devido a um incêndio, a radiação é o principal mecanismo de transferência de calor que provoca o aumento da temperatura da laje, principalmente quando são atingidas temperaturas elevadas. A transferência por radiação é complexa de ser calculado por levar em consideração o posicionamento da chama e do elemento a receber a energia térmica, ou seja, o fator de vista (Φ).

Para encontrar o fluxo de calor proporcionado pela radiação, utiliza-se a emissividade (ϵ) do elemento, parâmetro que possibilita estimar a eficácia que um corpo tem em emitir energia térmica. Este parâmetro relaciona a energia irradiada por um determinado material e a energia irradiada por um corpo negro para um mesmo comprimento de onda. Entende-se como corpo negro um material fictício que tem as propriedades de um radiador térmico ideal, ou seja, possui a capacidade de absorver e

converter 100% da energia térmica que irradia sobre esse corpo, possuindo assim uma emissividade (ϵ) igual a um [15].

De acordo com o Eurocódigo 1 – Part 1-2 [17], a Equação do fluxo de calor por radiação na superfície exposta ao incêndio é definida segundo a Equação (4), onde σ é a constante de Stefan-Boltzmann, com valor de 5.67×10^{-8} em $[W/m^2K^4]$, Φ é o fator de vista, que é adimensional, podendo variar de 0 a 1, ϵ_m representa a emissividade do material, ϵ_f representa a emissividade do fogo (chamas) e θ_r e θ_m são respectivamente, a temperatura de radiação efetiva do ambiente de incêndio[°C] e a temperatura da superfície do elemento[°C].

$$\dot{h}_{net,r} = \epsilon_m \cdot \epsilon_f \cdot \Phi \cdot \sigma \cdot [(\theta_r + 273)^4 - (\theta_m + 273)^4] \quad (4)$$

3.4 FATOR DE VISTA

O fator de vista (Φ) é utilizado para quantificar geometricamente a fração da transferência de calor por radiação difusa da superfície A que incide para na superfície B [17]. Em outras palavras, é a medida que uma determinada superfície é influenciada pela superfície de radiação em função da sua localização e disposição geométrica.

Apesar do cálculo do fator de vista ser complexo, a literatura nos disponibiliza, para o casos de lajes mistas, um modelo simplificado, em que a laje está sujeita a três tipos de fatores de vistas possíveis, sendo eles o Φ do banzo superior, o Φ do banzo inferior e o Φ da alma. O fator de vista pode variar de 0 a 1, onde, segundo o Eurocódigo, o fator de vista deverá ser considerado como $\Phi = 1,0$ sempre que esta Norma ou as partes sobre dimensionamento ao fogo das EN 1992 a EN 1996 e da EN 1999 não forneçam valores específicos. Poderá optar-se por um valor inferior para ter em conta os chamados efeitos de posição e de sombra [17]. A Figura a seguir permite visualizar os locais pertencentes a cada cálculo de fator de vista.

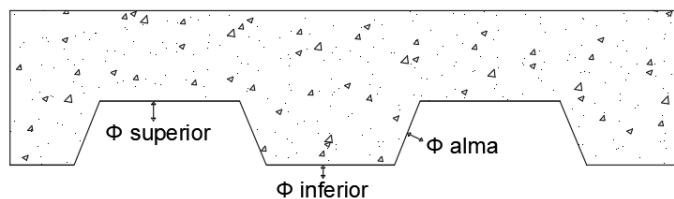


Figura 2 Fatores de vista de uma laje mista

O fator de vista referente ao banzo inferior da laje (Φ inferior) possui valor máximo e igual a 1. Para encontrar os outros dois fatores de vista, Φ do banzo superior e Φ da alma, podem ser utilizadas as Equações 5 e 6. Na Figura 3 são apresentadas as informações necessárias com relação à geometria das lajes para a realização dos cálculos.

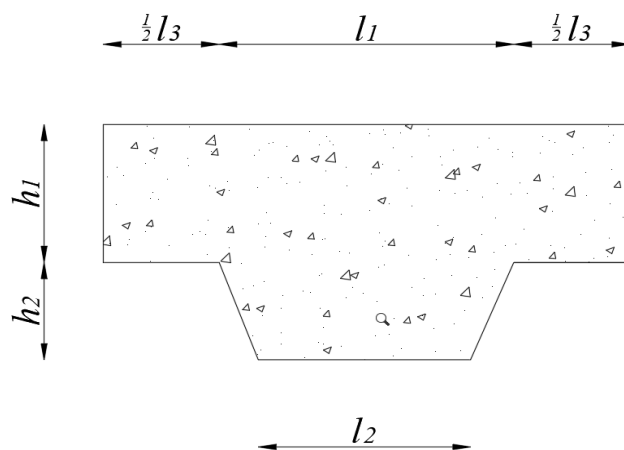


Figura 3 Fatores geométricos das lajes mistas

$$\Phi_{superior} = \frac{\sqrt{h_2^2 + \left(l_3 + \frac{l_1 - l_2}{2}\right)^2} - \sqrt{h_2^2 + \left(\frac{l_1 - l_2}{2}\right)^2}}{l_3} \quad (5)$$

$$\Phi_{alma} = \frac{\sqrt{h_2^2 + \left(\frac{l_1 - l_2}{2}\right)^2} + (l_3 + l_1 - l_2) - \sqrt{h_2^2 + \left(l_3 + \frac{l_1 - l_2}{2}\right)^2}}{2\sqrt{h_2^2 + \left(\frac{l_1 - l_2}{2}\right)^2}} \quad (6)$$

4. MATERIAIS

Nesta secção será feita uma apresentação dos materiais que constituem a laje mista (concreto e o aço). Será apresentado o surgimento, bem como suas primeiras

funções de utilização, principais utilidades na atualidade e suas equações para o cálculo da resistência.

4.1 CONCRETO

O concreto é um material que está presente nas construções há milhares de anos, sendo produzidos pela mistura de cimento, argila areia, cascalho e água. Existem registros desse material sendo utilizado há 5600AC em Lpepskivin [19]. Nas antigas civilizações ele foi utilizado principalmente como pavimento, paredes e fundações.

No ano de 1824, Joseph Aspdin apresentou o cimento Portland, nome dado devido a cor do cimento ser parecida com a da rocha Portland, que inicia o grande desenvolvimento da aplicação do concreto no ramo da construção civil. O cimento Portland é o tipo de cimento mais utilizado ao redor do mundo até os dias atuais, é produzido a partir da queima de calcário e argila em um forno, com posteriormente uma adição de gipsita (gesso).

O concreto, atualmente, é um material utilizado principalmente em elementos com função estrutural para edifícios, pórticos, pontes e infraestruturas em geral. Possui uma resistência à compressão cerca de 7 vezes maior que a sua resistência à tração, por isso, é amplamente utilizado para resistir aos esforços de compressão. A Tabela 1, a seguir, demonstra a classe de resistência do concreto ao ensaio de compressão (f_{ck}) e tração (f_{ctk}) há 28 dias.

Tabela 1 Resistência do concreto para cada classe

Classe	f_{ck} (MPa)	f_{ctk} (MPa)	f_{cd} (MPa)	E_{cm} (GPa)
C20/25	20	2,9	13,3	30
C25/30	25	3,3	16,7	31
C30/37	30	3,8	20	33
C35/45	35	4,2	23,3	34
C40/50	40	4,6	26,7	35
C45/55	45	4,9	30	36
C50/60	50	5,3	33,3	37
C55/67	55	5,5	36,7	38

O valor da tensão de rotura à compressão do concreto (f_{cd}) é encontrado utilizando o valor característico dividido por um coeficiente parcial relativo concreto (γ_c), onde:

$$f_{cd} = \frac{f_{ck}}{\gamma_c} \quad (7)$$

4.2 AÇO ESTRUTURAL

O aço estrutural teve a sua utilização na construção civil no fim do século XVIII, em 1779, na Inglaterra, onde foi utilizado na construção da ponte sobre o Rio Severn. Nos séculos seguintes, cada vez mais foi-se vendo necessário a utilização do aço nas estruturas, principalmente para criação de estruturas de grande porte.

O aço é material derivado da interação entre Ferro (Fe) e o Carbono (C), sendo um material que possui elevada resistência em comparação ao seu peso, e diferente do concreto, ele possui a capacidade de resistir a grandes esforços de tração e compressão. Na construção civil, o aço pode ser dividido em três grupos: perfis enformados a frio, perfis laminados a quente e os perfis soldados. Em contrapartida ao peso, os perfis enformados a frio e fazem parte da divisão dos perfis leves enquanto os perfis laminados a quente e soldados constituem a divisão dos perfis pesados.

Segundo as normas da EN 1994-1-1 [21] os perfis disponíveis para serem fabricados, de acordo com a EN 10149-2 e EN10149-3 para chapas de aço enformadas a frio e EN 10147 para aços galvanizados são demonstrados na Figura a seguir.

Tabela 2 Resistência das chapas aço enformadas a frio pela sua pela classe

CLASSE DA CHAPA PELA NORMA		
EN 10149-2	EN 10149-3	EN 10147
S315 MC	S260 NC	S220 GD
S355 MC	S315 NC	S250 GD
S420 MC	S355 NC	S280 GD
S460 MC	S420 NC	S320 GD
S500 MC	-	S350 GD

S600 MC	-	S550 GD
S650 MC	-	-
S700 MC	-	-

As chapas de aço devem possuir uma espessura mínima de 0.70mm, com as superfícies expostas da chapa adequadamente protegidas para resistir aos efeitos agressivos. É necessário utilizar um revestimento de zinco, se especificado, respeitando aos requisitos do EM 10326. O revestimento de zinco com 275g/m² somando os dois lados é o satisfatório para ambientes não agressivos, podendo variar de acordo com as condições [21].

Para encontrar a tensão de ruptura do aço de chapa perfilada ($f_{yp,d}$) é necessário utilizar o valor definido de resistência do aço (f_{yp}) dividido por um coeficiente parcial relativo ao aço (γ_p) que segundo a norma EN1993-1-1[24], $\gamma_p = 1,15$, e o cálculo é feito conforme a Equação a seguir

$$f_{yp,d} = \frac{f_{yp}}{\gamma_p} \quad (8)$$

5. PROPRIEDADES TÉRMICAS DOS MATERIAS

As propriedades térmicas de cada material determinam as suas respostas mecânicas quando submetidos a uma variação da temperatura. Possuem total influência nos resultados das simulações numéricas, pois é o que determina as respostas da estrutura para a variação da temperatura. O Eurocódigo EN 1994-1-2 [23] determina, para o concreto e para o aço, as suas propriedades quando submetidos a temperaturas elevadas.

Como é considerado uma espessura de ar entre a chapa de aço e concreto, é necessário conhecer as propriedades térmicas do ar. Para isso utilizou-se como referência o estudo disponível de Y.A Çengel [17].

5.1 CONCRETO

As propriedades térmicas do concreto que serão apresentadas se baseiam nas normas do Eurocódigo 2 – Part 1-2 [23], que determinam o calor específico do concreto quando seco, ou seja, humidade (u) equivalente a zero. As normas são determinadas para concreto que contém agregado da sílica e agregado do calcário.

O calor específico do concreto (c_p) quando seco (u=0%) é determinado por uma função que modifica de acordo com a variação da temperatura do concreto (θ) em graus Celsius ($^{\circ}C$) demonstrada pelas Equações apresentadas a seguir.

$$c_p(\theta) = 900 \left(\frac{J}{kg} K \right) \quad \text{para } 20^{\circ} \leq \theta \leq 100^{\circ}C \quad (9)$$

$$c_p(\theta) = 900 + (\theta - 100) \left(\frac{J}{kg} K \right) \quad \text{para } 100^{\circ} \leq \theta \leq 200^{\circ}C \quad (10)$$

$$c_p(\theta) = 1000 + \frac{\theta - 200}{2} \left(\frac{J}{kg} K \right) \quad \text{para } 200^{\circ} \leq \theta \leq 400^{\circ}C \quad (11)$$

$$c_p(\theta) = 1100 \left(\frac{J}{kg} K \right) \quad \text{para } 400^{\circ} \leq \theta \leq 1200^{\circ}C \quad (12)$$

Em casos que o teor de umidade não for considerado explicitamente no método de cálculo, a função para se obter o calor específico do concreto seja ele com agregado de sílica ou calcário, pode ser modelado utilizando um calor constante $c_{p,peak}$, que se situa entre $100^{\circ}C$ e $115^{\circ}C$ com redução linear entre $115^{\circ}C$ e $200^{\circ}C$ [23].

$$c_{p,peak} = 900 \left(\frac{J}{kg} K \right) \quad \text{para } u = 0\% \quad (13)$$

$$c_{p,peak} = 1470 \left(\frac{J}{kg} K \right) \quad \text{para } u = 1.5\% \quad (14)$$

$$c_{p,peak} = 2020 \left(\frac{J}{kg} K \right) \quad \text{para } u = 3.0\% \quad (15)$$

Quando possuir valores de umidade diferentes dos citados na Equação acima, a interpolação linear é aceitável para encontrar o calor específico. A Figura a seguir demonstra o calor específico para 6 diferentes teores de umidade.

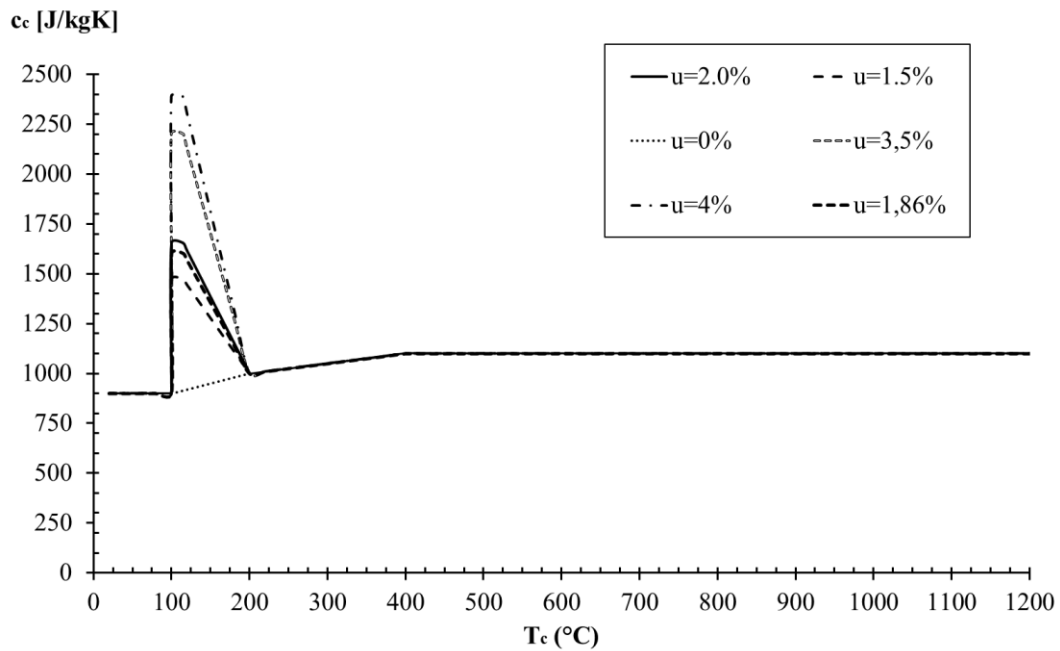


Figura 4 Calor específico do concreto convencional a variados fatores de umidade

Analisando as curvas, podemos observar que o calor específico do concreto varia em comparação a diferentes teores de umidades apenas nos intervalos entre $100^{\circ}C$ e $200^{\circ}C$. Isso ocorre por conta do processo de evaporação da água [3].

De acordo com o Eurocódigo 2 – Part 1-2 [23], a densidade do concreto em função da temperatura é influenciada pela perda de água e é definida pelas seguintes Equações, sendo a densidade normal do concreto para a temperatura ambiente de $20^{\circ}C$ $\{\rho(20^{\circ}C)\}$ igual a 2300 kg/m^3 .

$$\rho(\theta) = \rho(20^{\circ}C) \quad \text{para } 20^{\circ}C \leq \theta \leq 115^{\circ}C \quad (16)$$

$$\rho(\theta) = \rho(20^{\circ}C) \cdot \left(1 - \frac{0,02(\theta-115)}{85}\right) \quad \text{para } 115^{\circ}C \leq \theta \leq 200^{\circ}C \quad (17)$$

$$\rho(\theta) = \rho(20^{\circ}C) \cdot \left(0,98 - \frac{0,03(\theta-200)}{200}\right) \quad \text{para } 200^{\circ}C \leq \theta \leq 400^{\circ}C \quad (18)$$

$$\rho(\theta) = \rho(20^{\circ}C) \cdot \left(0,95 - \frac{0,07(\theta-400)}{800}\right) \quad \text{Para } 400^{\circ}C \leq \theta \leq 1200^{\circ}C \quad (19)$$

Esboçando um gráfico utilizando as Equações acima, obtemos a curva da densidade do concreto $\rho(\theta)$ $[\text{kg/m}^3]$ em função da temperatura do concreto (θ), sendo ilustrado na seguinte Figura 5.

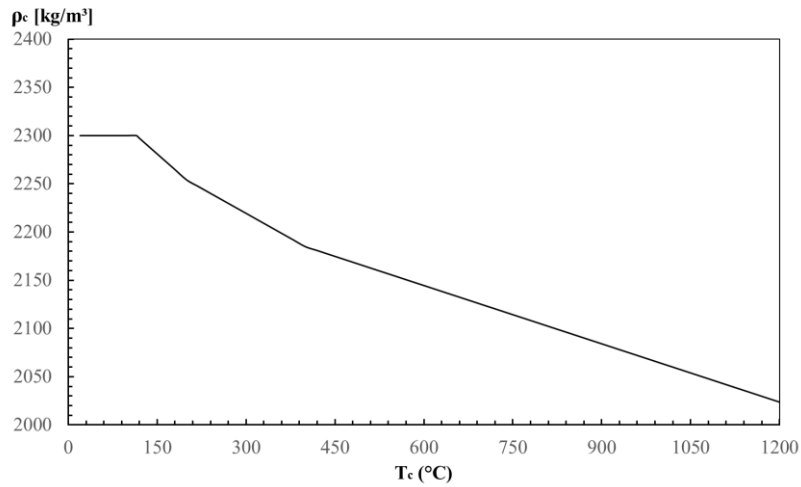


Figura 5 Massa específica do concreto convencional

O Eurocódigo 2 – Part 1-2 [23] estabelece que a condutividade térmica do concreto (λ_c) [W/mK] pode ser encontrada pelos limites inferiores e pelo limite superior. A escolha vai depender do projetista, onde ele escolherá a que melhor representará a situação em que o concreto estará sujeito. Sendo o limite inferior encontrado pela Equação. Este limite inferior é recomendado para elementos mistos [22].

$$\lambda_{c,inferior} = 1.36 - 0.136 \cdot \left(\frac{\theta}{100}\right) + 0.0057 \cdot \left(\frac{\theta}{100}\right)^2 \text{ para } 20^0 \leq \theta \leq 1200^0 C \quad (20)$$

Para o limite superior, a condutividade térmica limite do concreto (λ_c) [W/mK] é encontrada com a Equação.

$$\lambda_{c,superior} = 2 - 0.2451 \cdot \left(\frac{\theta}{100}\right) + 0.0107 \cdot \left(\frac{\theta}{100}\right)^2 \text{ para } 20^0 \leq \theta \leq 1200^0 C \quad (21)$$

Com as Equações apresentadas acima, é possível desenhar um gráfico da condutividade térmica do concreto (λ_c) em função da temperatura, para os valores de limite superior e inferior, ilustrado na seguinte Figura.

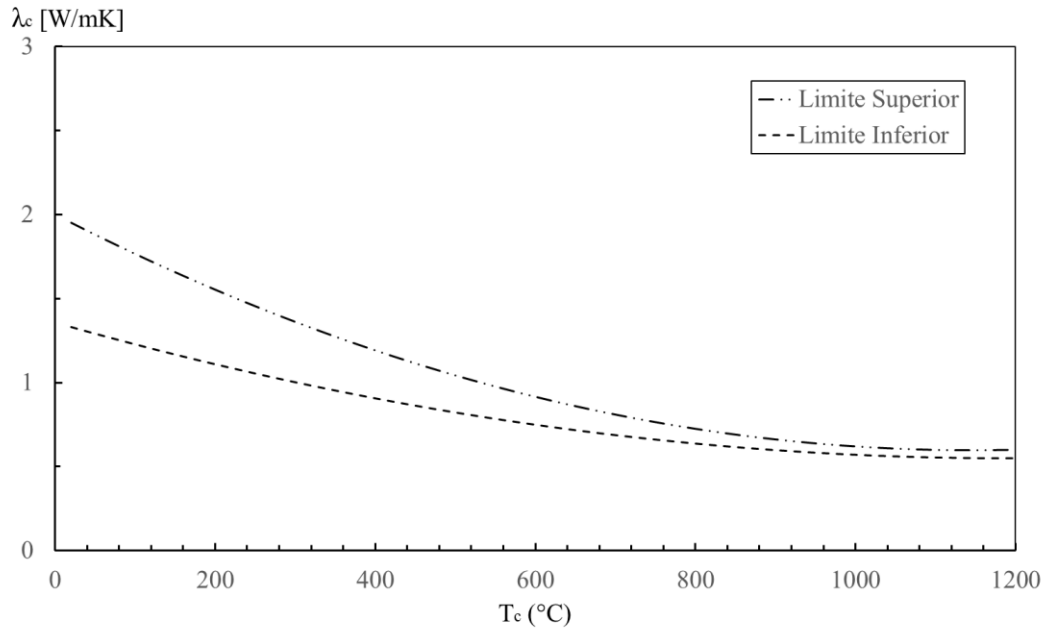


Figura 6 Condutividade do concreto

5.2 AÇO

Para as propriedades do aço, utilizou-se as normas do Eurocódigo 3 – Part 1-2[24] que são válidas para os aços em chapas, como os utilizados em lajes mistas. As normas estabelecem o cálculo do calor específico do aço (c_a) [J/kg K] por meio de Equações definidas para cada intervalo de temperatura do aço (θ_a).

$$c_a = 425 + 7.73 \times 10^{-1} \cdot \theta_a - 1.69 \times 10^{-3} \cdot \theta_a^2 + 10^{-6} \theta_a^3 \quad p/ 20^0 \leq \theta_a \leq 600^0 C \quad (22)$$

$$c_a = 666 + 13002 / (738 - \theta_a) \quad \text{para } 660^0 \leq \theta_a \leq 735^0 C \quad (23)$$

$$c_a = 545 + 17820 / (\theta_a - 731) \quad \text{para } 735^0 \leq \theta_a \leq 900^0 C \quad (24)$$

$$c_a = 650 \quad \text{para } 900^0 \leq \theta_a \leq 1200^0 C \quad (25)$$

Com as Equações apresentadas acima, a variação do calor específico do aço pela temperatura é ilustrada na seguinte Figura. A variação que se verifica entre os 700 e os 800 °C está relacionado com a transformação alotrópica da fase ferrítica para fase austenítica.

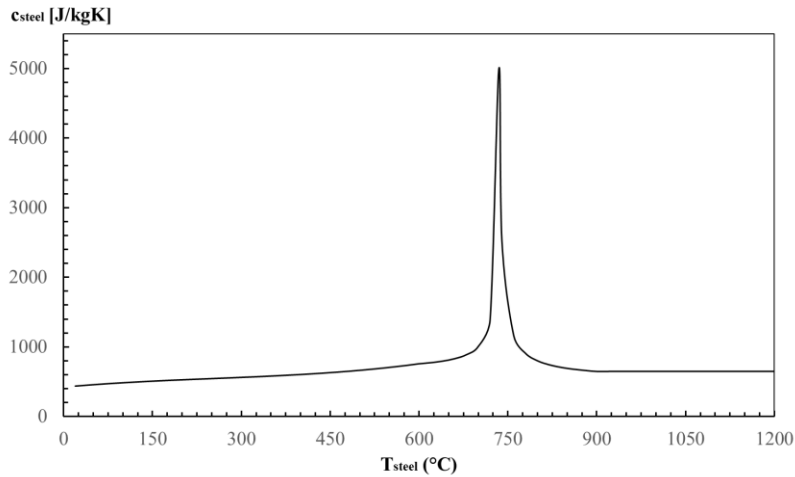


Figura 7 Calor específico do aço

O Eurocódigo 3 – Part 1-2[24] estabelece que a condutividade térmica do aço (λ_a) [W/mK] é obtida a partir de duas fases, descritas nas seguintes Equações.

$$\lambda_a = 54 - 3.33 \times 10^{-2} \cdot \theta_a \quad \text{para } 20^0 \leq \theta_a \leq 800^0 C \quad (26)$$

$$\lambda_a = 27.3 \quad \text{para } 800^0 \leq \theta_a \leq 1200^0 C \quad (27)$$

Com as Equações anteriores, a representação da variação da condutividade térmica do aço (λ_a) em função temperatura do aço (θ_a) é ilustrada na seguinte Figura.

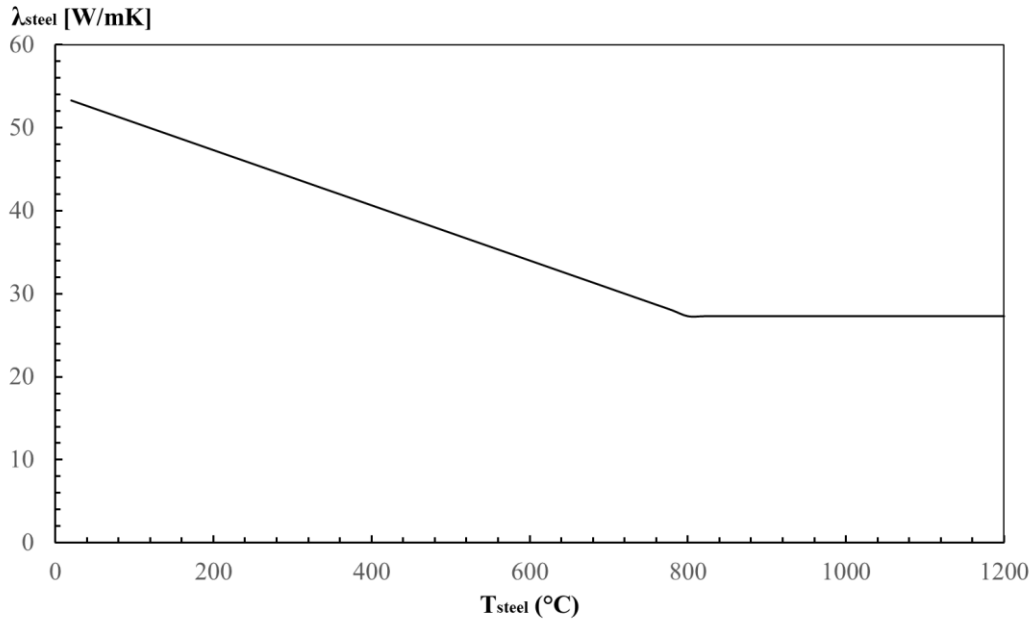


Figura 8 Condutividade do aço

Por fim, o Eurocódigo 3 – Part 1-2[24] estabelece que a densidade ou massa unitária do aço (ρ_a) é considerada constante, independente da variação da temperatura do aço (θ_a), com um valor unitário de $\rho_a = 7850 \text{ kg/m}^3$, ilustrado no seguinte gráfico.

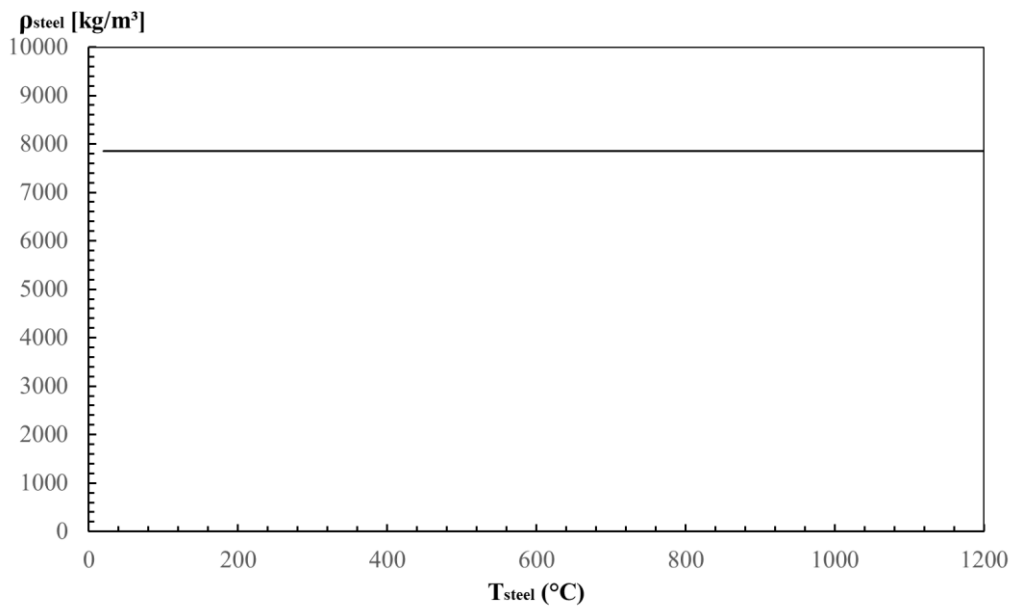


Figura 9 Densidade do aço

5.3AR

As propriedades térmicas do ar são utilizadas quando consideramos que existe uma fina camada entre a estrutura de aço e concreto, ou seja, desconsiderando uma ligação perfeita entre os materiais e a existência de uma separação durante o processo de aquecimento do elemento misto. As propriedades térmicas do ar dependem da temperatura do ar θ_{air} e da pressão atmosférica. Neste trabalho utilizou-se a pressão atmosférica de 1 atm [17].

Devido as propriedades do ar não serem definidas por normas, foi utilizado o estudo de Çengel[17] que utiliza ensaios experimentais para fornecer dados importantes do comportamento térmico do ar. A Tabela a seguir expressa os valores obtidos para os ensaios experimentais obtidos no estudo de Çengel, onde determina o calor específico (c_{air}), condutividade térmica (λ_{air}) e densidade (ρ_{air}) do ar em função da temperatura do mesmo.

$\theta_{air}(^{\circ}C)$	$c_{air}(J/kg K)$	$\lambda_{air} (W/mK)$	$\rho_{air} (kg/m^3)$
20	1007	0.02514	1.2040
30	1007	0.02588	1.1640
60	1007	0.02808	1.0590
100	1009	0.03095	0.9458
200	1023	0.03779	0.7459
300	1044	0.04418	0.6158
400	1069	0.05015	0.5243
500	1093	0.05572	0.4565
600	1115	0.06093	0.4042
700	1135	0.06581	0.3627
800	1153	0.07037	0.3289
900	1169	0.07465	0.3008
1000	1184	0.07868	0.2772
1500	1234	0.09599	0.1990

A Figura seguinte representa a variação das propriedades com a temperatura.

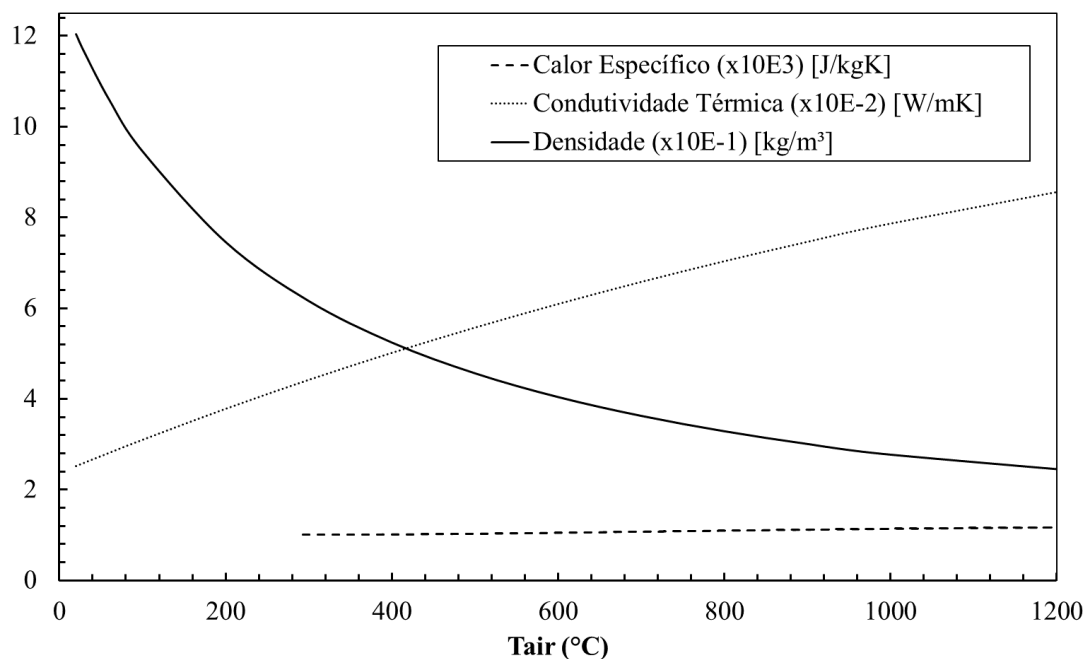


Figura 10 Propriedades térmicas do ar

6. MÉTODO SIMPLIFICADO DE CÁLCULO

Montar uma estrutura mista de aço e concreto e realizar os testes experimentais de resistência ao fogo requer tempo e tem custos elevados. Para simplificarmos todo esse processo, desenvolvem-se normas e modelos de cálculos que nos permitam caracterizar o comportamento das lajes mistas computacionalmente, obtendo os parâmetros importantes sobre a resistência das lajes mistas em situação de incêndio.

A norma técnica EN 1994-1-2 [22] prevê regras destinadas ao cálculo simplificado de lajes mistas para verificação em casos de incêndios padrão, presentes no ANEXO D, que serão discutidos nas subseções abaixo.

Em 1998, Both [7] realizou um estudo sobre a resistência de lajes mistas em situação de incêndio, que foi a base para as normas criadas pelo Eurocódigo EN 1994-1-2[22], desde então, recebeu algumas atualizações, mas os cálculos destinados às lajes mistas permaneceram os mesmos.

Segundo o estudo de Both [7], o critério para verificação da resistência ao fogo é definido por três vertentes, a capacidade de carga (R), o isolamento (I) e a integridade (E). A norma EN 1363-1[27] estabelece normas para o cálculo desses critérios, que serão discutidos a seguir.

6.1 ISOLAMENTO TÉRMICO (I)

O critério de segurança de isolamento térmico (I), definido pela norma EN 1363-1[27], define o valor da temperatura média ou da temperatura máxima na parte superior na laje, não exposta ao fogo. O elemento atingirá o limite de resistência ao isolamento quando as temperatura média alcançarem $140^{\circ}C$ ou as temperaturas máximas $180^{\circ}C$, acima da temperatura média inicial, para lajes mistas submetidas a um incêndio padrão. Baseando-se nos dados obtidos no critério de isolamento para lajes mistas de diferentes alturas, o Eurocódigo EN 1994-1-2[22] fornece a altura efetiva que a laje deve possuir, para suportar tal critério, que será expressa a seguir.

$$t_i = a_o + a_1 \cdot h_1 + a_2 \cdot \Phi_{sup} + a_3 \cdot \frac{A}{L_r} + a_4 \cdot \frac{1}{l_3} + a_5 \cdot \frac{A}{L_r} \cdot \frac{1}{l_3} \quad (28)$$

Na Equação acima, Φ_{sup} é o fator de vista do flange superior, h_1 é a espessura do concreto (mm), A/L_r é o fator de geometria da nervura, l_3 é o comprimento da secção da flange superior do deck e os coeficientes $a_o, a_1, a_2, a_3, a_4, a_5$ são fornecidos de acordo com o tipo de concreto, ilustrado na seguinte Tabela 4.

Tabela 4 Coeficientes a_i para determinação da resistência ao fogo segundo critério de isolamento (I)

Concreto	a_o [min]	a_1 [min/mm]	a_2 [min]	a_3 [min/mm]	a_4 [mm min]	a_5 [min]
Peso convencional	-28,8	1,55	-12,6	0,33	-735	48,0
Peso leve	-79,2	2,18	-2,44	0,56	-542	52,3

O fator de geometria da nervura (A/L_r) é definido pela relação entre o volume de concreto por unidade de comprimento por nervura da laje (A) [mm^3/m] e a área da nervura exposta por unidade de comprimento (L_r) [mm^2/m]. Este fator é calculado usando parâmetros geométricos da laje expressos na Equação 29.

$$\frac{A}{L_r} = h_2 \cdot ((l_1 + l_2)/2) / (l_2 + 2\sqrt{h_2^2 + ((l_1 \cdot l_2)/2)^2}) \quad (29)$$

Segundo o Eurocódigo EN 1994-1-2 [22], a espessura efetiva da laje mista h_{eff} pode ser calculada de acordo com as Equações 30 e 31.

$$h_{eff} = h_1 + 0,5 \cdot h_2 \cdot \left(\frac{l_1 + l_2}{l_1 + l_3}\right) \quad \text{para } h_2/h_1 \leq 1,5 \text{ e } h_1 > 40\text{mm} \quad (30)$$

$$h_{eff} = h_1 \left[1 + 0,75 \cdot \left(\frac{l_1 + l_2}{l_1 + l_3}\right)\right] \quad \text{para } h_2/h_1 > 1,5 \text{ e } h_1 > 40\text{mm} \quad (31)$$

6.2 CAPACIDADE DE CARGA (R)

Segundo as normas gerais de ensaio ao fogo, EN 1363-1 [27], a análise de resistência ao fogo seguindo o critério da capacidade de carga da laje mista é estabelecida por valores de medidas para o deslocamento vertical máximo (D) e a taxa máxima de deslocamento vertical (dD/dt) em que lajes simplesmente apoiadas podem admitir quando submetidas ao incêndio padrão. Esses deslocamentos que são obtidos pelo comprimento do vão livre da laje (l), em mm, e a espessura total da laje, também em mm.

$$D_{limit} = \frac{l^2}{400 \cdot d} \quad (32)$$

$$\frac{dD}{dt_{max}} = \frac{l^2}{9000 \cdot d} \text{ [mm/min]} \quad (33)$$

$$D_{measured} \geq 1.5 D_{limit}$$

∨

$$D = D_{limit} \wedge \frac{dD}{dt} = \left(\frac{dD}{dt}\right)_{limit} \quad (34)$$

No Eurocódigo EN 1994-1-2 [22] a capacidade de carga (R), pelo método simplificado, é calculado em função da classe de resistência ao fogo da estrutura que é

requerida. Para determinação da capacidade portante será necessário determinar a temperatura das componentes que constituem a laje mista θ_a (°C). A temperatura do elemento de chapa de aço θ_a (°C) é calculada de acordo com a Equação 34.

$$\theta_a = b_0 + b_1 \cdot \frac{1}{l_3} + b_2 \cdot \frac{A}{L_r} + b_3 \cdot \Phi + b_4 \cdot \Phi^2 \quad (35)$$

Onde Φ representa o fator de vista correspondente à flange superior e os coeficientes parciais b_i dependem do tipo de concreto da laje em questão, da sua classe de resistência ao fogo e da localização do deck de aço. A Tabela 5 descreve os valores de b_i de acordo com a posição do deck de aço, resistência ao fogo e peso do concreto.

Tabela 5 Coeficientes b_i para determinação das temperaturas das chapas de aço (R)

Concreto	Resistencia ao fogo [min]	Localização do deck de aço	b_0 [°C]	b_1 [°C].mm	b_2 [°C].mm	b_3 [°C]	b_4 [°C]
NWC	60	Flange inferior	951	-1197	-2,23	86,4	-
		Alma	661	-833	-2,96	537,7	150,7
		Flange superior	340	-3269	-2,62	1148,4	-
	90	Flange inferior	1018	-839	-1,55	65,1	-
		Alma	816	-959	-2,21	464,9	108,1
		Flange superior	618	-2786	-1,79	767,9	-
	120	Flange inferior	1063	-679	-1,13	46,7	-
		Alma	816	-949	-1,82	344,2	267,4
		Flange superior	770	-2460	-1,67	592,6	-
LWC	30	Flange inferior	800	-1326	-2,65	114,5	-
		Alma	483	-286	-2,26	439,6	181,2
		Flange superior	331	-2284	-1,54	488,8	-
	60	Flange inferior	955	-622	-1,32	47,7	-
		Alma	761	-558	-1,67	426,5	303,0
		Flange superior	607	-2261	-1,02	664,5	-
	90	Flange inferior	1019	-478	-0,91	32,7	410,0
							-60,8

		Alma	906	-654	-1,36	287,8	-
		Flange superior	789	-1847	-0,99	469,5	230,3
							-
							313,0
	120	Flange inferior	1062	-399	-0,65	19,8	-43,7
		Alma	989	-629	-1,07	186,1	-
		Flange superior	903	-1561	-0,92	305,2	152,6
							-
							197,2

A temperatura Reforços dos reforços longitudinais de aço presentes em algumas lajes mistas, Reforços θ_s é determinada pela Equação 36:

$$\theta_s = c_0 + \left(c_1 \cdot \frac{u_3}{h_2}\right) + (c_2 \cdot z) + \left(c_3 \cdot \frac{A}{L_r}\right) + (c_4 \cdot \alpha) + \left(c_5 + \frac{1}{l_3}\right) \quad (36)$$

Onde u_3 representa a distância vertical do vergalhão de aço até a flange inferior (mm), α corresponde ao ângulo da alma da chama com relação à horizontal e o fator z corresponde à posição da barra em relação à chapa metálica, descrito na Equação 37:

$$\frac{1}{z} = \frac{1}{\sqrt{u_1}} + \frac{1}{\sqrt{u_2}} + \frac{1}{\sqrt{u_3}} \quad (37)$$

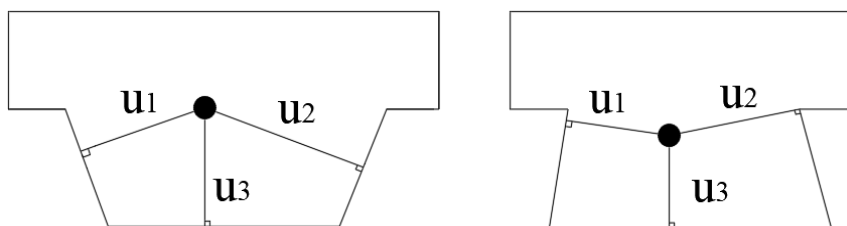


Figura 11 Distâncias u_1 para o cálculo da temperatura das Reforços

Na Equação 36, os elementos c_i são determinados em função do peso do concreto utilizado a sua classe de resistência ao fogo, onde são pré-estabelecidos pelo Eurocódigo 1994-1-2 [22] na Tabela 6.

Tabela 6 Fatores c_i para cálculo da temperatura em Reforços

Concreto	Resistenci a ao fogo [min]	c_0 [°C]	c_1 [°C]	c_2 [°C]. $mm^{0.5}$	c_3 [°C]. mm	c_4 [°C]/ 0	c_5 [°C]. mm
NWC	60	119 1	- 250	-240	-5,01	1,04	-925
	90	134 2	- 256	-235	-5,30	1,39	-1267
	120	138 7	- 238	-227	-4,79	1,68	-1326
LWC	30	809	- 135	-243	-0,70	0,48	-315
	60	133 6	- 242	-292	-6,11	1,63	-900
	90	138 1	- 240	-269	-5,46	2,24	-918
	120	139 7	- 230	-253	-4,44	2,47	-906

6.3 NORMA BRASILEIRA NBR 14323

De acordo com a norma brasileira NBR 12323 [34], para o critério de isolamento de lajes mistas estabelece-se um valor mínimo da espessura efetiva h_{eff} que a laje deve possuir para resistir a um determinado tempo estipulado. Na Tabela 7 são apresentados os valores mínimo da espessura efetiva da laje (mm) em função da resistência ao fogo (min) pretendida.

Tabela 7 Tempo de resistência TRRF em função da espessura efetiva mínima NBR14323

TRRF (min)	Espessura efetiva mínima h_{eff} (mm)
30	60
60	80
90	100
120	120
180	150

As Equações para se determinar a espessura efetiva da laje na norma NBR14323 [34] são as mesmas presentes na norma EN 1994-1-2 [22], ver a Equação 30-31. A

determinação das temperaturas na chapa de aço θ_a e nos reforços longitudinais θ_s também seguem a mesma regra proposta pelo Eurocódigo EN 1994 1-2.

7. CURVAS DE INCÊNDIO

O desenvolvimento de um incêndio depende de uma fonte de calor, o combustível e oxigênio em simultâneo. Caso não haja um desses fatores ou eles se esgotem no processo, o incêndio não se desenvolve ou atinge valores insignificantes. Apesar de ser um evento complexo em que envolve diversos fatores que podem variar o resultado, a literatura apresenta equações e meios baseados em ensaios experimentais que permite estipular uma curva da temperatura-tempo de um compartimento em situação de incêndio.

Normas regulamentadoras como o Eurocódigo nos permitem calcular dois possíveis métodos de curvas de incêndios para estipular as temperaturas máximas atingidas e testar a resistência dos elementos da estrutura, sendo eles o incêndio ISO834 e incêndio paramétrico. Será discutido nos tópicos seguintes as diferenças entre estes métodos de cálculo da curva de incêndio.

7.1 CURVA DE INCÊNDIO PADRÃO

As curvas de incêndio padrão foram criadas com o intuito de padronizar os ensaios experimentais com fogo em diferentes elementos de estruturas e comparar os resultados das temperaturas, deslocamentos e outros parâmetros previsto para controlo dos ensaios. As curvas nominais apresentam unicamente uma fase de aquecimento, independente da dimensão do compartimento e dos materiais presentes no mesmo. O Eurocódigo 1991-1-2[18] estabelece equações para a obtenções de três curvas de incêndio padrão. São essas as curvas ISO834, curva de incêndio para elementos exteriores e curva de incêndio de hidrocarbonetos.

Em 1975, a organização internacional para a normalização (ISO) introduz a primeira edição da ISO834, designada de ISO 834:1975, com o intuito de determinar a resistência ao fogo de vários elementos estruturais quando submetidos a condições padrões de exposição ao fogo [26]. Posteriormente, em 1999, foi cancelada e substituída pela ISO834-1 com intuito de obter uma maior precisão e eficácia nos seus testes.

A curva da temperatura dos gases de combustão ISO834 é obtida através da equação que utiliza uma relação logarítmica entre tempo (t) e temperatura (T), ou seja, dependendo unicamente do tempo. Normas como EN1363-1 [27] utiliza a curva padrão ISO834 por ser facilmente implementada em ensaios experimentais em comparação à curva paramétrica. A curva ISO834 é definida pela seguinte equação, sendo t [min] e T_g [°C].

$$T_g = 20 + 345 \cdot \log_{10}(8t + 1) \quad (38)$$

O Eurocódigo 1991-1-2 [18] estabelece que a temperatura de incêndio para elementos exteriores e a curva de incêndio de hidrocarbonetos são obtidas utilizando uma correlação exponencial do tempo de incêndio somando com a temperatura ambiente adotada de 20°C, expressa nas seguintes Equações.

Curva de incêndio para elementos exteriores:

$$T_g = 660(1 - 0,687 \cdot e^{-0,32t} - 0,313 \cdot e^{-3,8t}) + 20 \quad (39)$$

Curva de incêndio de hidrocarbonetos:

$$T_g = 1080(1 - 0,325 \cdot e^{-0,167t} - 0,675 \cdot e^{-2,5t}) + 20 \quad (40)$$

No gráfico a seguir é apresentada a comparação das temperaturas da curva de incêndio padrão, utilizando as equações fornecidas pelo Eurocódigo 1991-1-2[18].

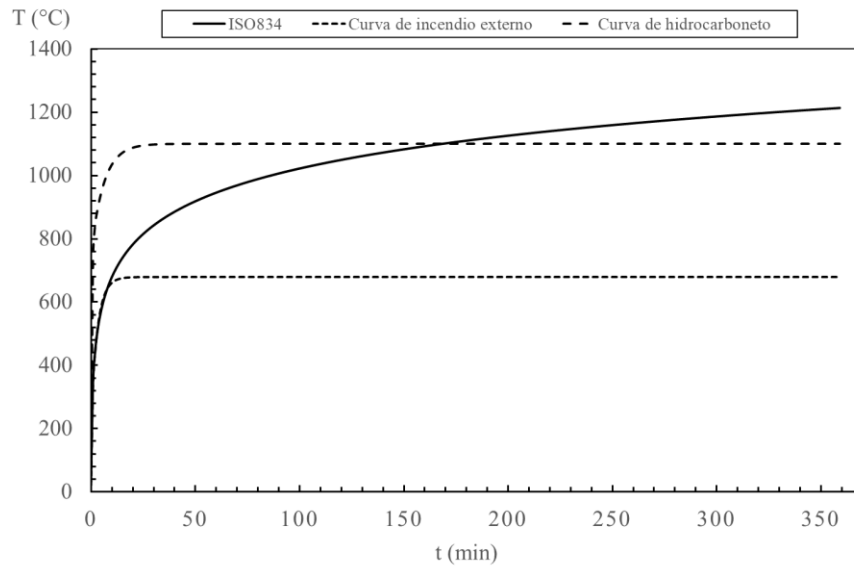


Figura 12 Curvas de incêndio padrão Eurocódigo 1991-1-2

Observando a Figura 12 apresentada, a curva ISO834 possui apenas a fase de crescimento da temperatura do incêndio, desconsiderando a fase de resfriamento. O teste é feito com intuito de classificar o elemento estrutural com base na sua duração e desempenho sobre os critérios específicos de temperatura [26].

7.2 CURVA DE INCENDIO NATURAL

Ao contrário da curva de incêndio padrão ISO834, as curvas de incêndio natural são caracterizadas por três fases: a fase de crescimento, desenvolvimento e decaimento. É necessário considerar a resistência do elemento durante a fase de aquecimento e durante a fase de resfriamento [13]. A curva de incêndio natural é influenciada pelo fator de abertura e a carga de incêndio do cômodo incendiado.

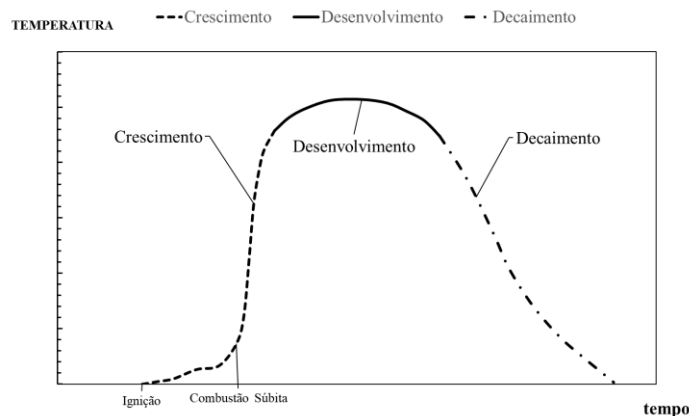


Figura 13 Estágio do desenvolvimento de uma curva de incêndio natural [42]

A fase de crescimento é o estágio que se inicia após a ignição do incêndio, quando os materiais combustíveis recebem calor ou energia suficiente para iniciar uma chama e possui meios de manter e suprir as necessidades dessa chama. Ainda nesta fase, a chama tende a se espalhar entre as superfícies dos materiais combustíveis presentes no compartimento, e logo em seguida, com vários meios de alimentar a chama, ela entra em combustão súbita ou “Flash over”. Este período é caracterizado por um rápido aumento da temperatura e caracteriza-se por atingir um fluxo de calor de 20 Kw/m^2 ao nível do solo ou por atingir $600 \text{ }^\circ\text{C}$ ao nível do teto [42]. Posteriormente tem-se a fase de desenvolvimento da chama, que é quando a chama já tomou de todos os meios combustíveis e atinge sua temperatura máxima de incêndio. A última fase denominada decaimento acontece quando os materiais combustíveis dos sistemas já estão se esgotando ou a equipe de bombeiros faz uma intervenção ativa, reduzindo a sua temperatura gradativamente até o término do incêndio [25].

Baseado em testes experimentais em escala real, o Eurocódigo 1991-1-2 [18] fornece os parâmetros que mais influenciam uma curva de incêndio natural e nos dão equações que permitem estipular a temperatura do gás em função do tempo de incêndio. A norma permite estipular a temperatura do gás a compartimentos de até 500m^2 com uma altura máxima de 4 metros e admite-se que a carga de incêndio do compartimento é totalmente consumida pelo fogo.

Diferentemente das curvas ISO834, que dependem somente do tempo de incêndio, as curvas de incêndio paramétrico dependem de vários parâmetros como as propriedades

térmicas dos materiais, fator de enclausuramento, carga de incêndio, área enclausurada fator de abertura e outros. Para se encontrar a temperatura do gás (T_g) durante a fase de aquecimento, utiliza-se a equação.

$$T_g = 20 + 1325. (1 - 0.324 e^{-0,2t^*} - 0.204 e^{-1,7t^*} - 0.472 e^{-19t^*}) \quad (41)$$

A temperatura do gás (T_g) é determinada em graus Celsius (°C); t^* é determinado a partir do tempo (h) e do fator de conversão do tempo (Γ) em função do fator de abertura (O) e da absortividade térmica b , expresso na seguinte equação.

$$t^* = t. \Gamma \quad (42)$$

O fator de conversão do tempo (Γ) é obtido pela Equação

$$\Gamma = [O/b]^2 / (0,04/1160^2) [-] \quad (43)$$

O valor da absortividade térmica (b) é encontrado pela equação seguinte

$$b = \sqrt{(\rho c \lambda)} \quad (44)$$

Na equação (43), ρ representa a massa volumétrica da envolvente do compartimento [kg/m^3], c é o calor específico da envolvente do compartimento [J/kgK] e λ é a condutibilidade térmica da envolvente do compartimento [W/mK]. Para ambientes com diferentes fatores (b) nas paredes, teto ou pavimento, a equação para o calor da absortividade térmica é calculada através da equação seguinte.

$$b = (\sum(b_j \cdot A_j)) / (A_t - A_v) \quad (45)$$

Onde b_j é a propriedade térmica da superfície envolvente “j” e A_j é a área da superfície envolvente “j”.

O fator de abertura (O) é obtido em função da área total de abertura vertical em todas as paredes (A_v) [m²], média ponderada das alturas das aberturas em todas as paredes (h_{eq}) [m] e área total da superfície envolvente (paredes, teto e pavimento, incluindo aberturas) (A_t) [m²]. Deve-se obedecer aos limites estabelecidos para o fator de abertura de $0,02 \leq O \leq 0,20$, encontrado através da equação:

$$O = A_v \sqrt{h_{eq}} / A_t \quad (46)$$

A temperatura máxima do gás (T_{max}) durante a fase de aquecimento ocorre quando o $t^* = t_{max}^*$ [h], para isso, estabelecem-se as seguintes equações:

$$t_{max}^* = t_{max} \cdot \Gamma \quad (47)$$

$$t_{max} = \max \left[\left(0,2 \cdot 10^{-3} \cdot \frac{q_{t,d}}{O} \right); t_{lim} \right] \quad (48)$$

Na equação (47) apresentada sobre t_{max} , $q_{t,d}$ [MJ/m²] é encontrado através do cálculo da densidade de carga de incêndio $q_{f,d}$ em relação às áreas envolventes da superfície, respeitando o seguinte limite de $50 \leq q_{t,d} \leq 1000$. Representado na seguinte equação:

$$q_{t,d} = q_{f,d} \cdot A_f / A_t \quad (49)$$

O valor de cálculo da densidade de cargas de incêndio $q_{f,d}$ é encontrado através do ANEXO E presente no Eurocódigo 1991-1-2 [18], onde se faz a multiplicação do valor característico da densidade de carga de incêndio de determinado compartimento no pavimento e fatores que influenciam a carga de incêndio. Dentre esses fatores temos a influência das dimensões do compartimento no risco de ativação do incêndio (δ_{q1}), influência do tipo de ocupação no risco de ativação de incêndio (δ_{q2}), diferentes medidas ativas de combates a incêndios (δ_n) e o fator de combustão (m).

$$q_{f,d} = q_{f,k} \cdot m \cdot \delta_{q1} \cdot \delta_{q2} \cdot \delta_n \quad (50)$$

Tabela 8 Fatores do compartimento para cálculo do $q_{f,d}$

Área do pavimento do compartimento A_f [m ²]	Perigo de ativação de incêndio δ_{q1}	Perigo de ativação de incêndio δ_{q2}	Exemplos de tipo de ocupação
25	1.10	0.78	Galeria de arte, museu, piscina
250	1.50	1.00	Escritório, residência, hotel, indústria do papel
2500	1.90	1.22	Fábrica de máquinas e motores
5000	2.00	1.44	Laboratório químico, oficina de pintura
10000	2.13	1.66	Fábrica de pirotecnia ou tintas

Tabela 9 Fatores de ocupação para o cálculo do $q_{f,d}$

Ocupação	Média	Quantilho de 80%
Habitação	780	948
Hospital (quarto)	230	280
Hotel (quarto)	310	377
Biblioteca	1500	1824
Escritório	420	511
Sala de aulas de uma escola	285	347
Centro comercial	600	730
Teatro (cinema)	300	365

Transporte (espaço público)	100	122
NOTA: Admite-se uma distribuição de Gumbel para o quantilho de 80%		

Tabela 10 Fatores de combate contra o incêndio para cálculo do $q_{f,d}$

δ_{ni} Função de medidas ativas de combate a incêndio									
Extinção automática de incêndio		Detecção automática de incêndio			Extinção manual de incêndio				
Sistema automático de extinção com água	Redes independentes de fornecimento de água	Detecção e alarme automáticos de incêndios		Transmissão automática de alarme aos bombeiros	Bombeiros no local	Bombas fora do local	Vias de acesso seguras	Dispositivos de combate a incêndios	Sistema de exaustão de fumos
		Pelocal δ_{n3}	Pelofumo δ_{n4}						
0.61	0 / 1 / 2 δ_{n2}	0.87 ou 0.73		0.87	0.61 ou 0.78		0.9 ou 1 ou 1.5	1.0 ou 1.5	1.0 ou 1.5

Na equação relacionada ao t_{max} , o t_{lim} é identificado segundo a taxa de crescimento de incêndio, onde no caso da taxa de crescimento ser lenta $t_{lim} = 25 \text{ min}$, no caso de ser média $t_{lim} = 20 \text{ min}$ e para taxas de crescimento rápidas $t_{lim} = 15 \text{ min}$. Para obter a taxa de crescimento, utiliza-se o quadro presente no ANEXO E do Eurocódigo 1991-1-2 [18].

Tabela 11 Taxa máxima de liberação de calor por unidade de área RHR_f

Ocupação	Taxa de crescimento de incêndio	t_a [s]	RHR_f [Kw/m ²]
Habitação	Média	300	250
Hospital (quarto)	Média	300	250
Hotel (quarto)	Média	300	250
Biblioteca	Rápida	150	500
Escritório	Média	300	250
Sala de aulas de escola	Média	300	250
Centro comercial	Rápida	150	250
Teatro (cinema)	Rápida	150	500

Transporte (público)	Lenta	600	250
-------------------------	-------	-----	-----

Para a fase de arrefecimento, a temperatura do gás (T_g) segue outras equações, essas que são influenciadas pelo valor do t_{max}^* , que foi apresentado na equação anteriormente. A fase de decréscimo da temperatura, em função do tempo, é encontrada pelas equações (51-53):

$$T_g = T_{max} - 625 \cdot (t^* - t_{max}^* \cdot x) \quad \text{para } t_{max}^* \leq 0,5 \quad (51)$$

$$T_g = T_{max} - 250 \cdot (3 - t_{max}^*) \cdot (t^* - t_{max}^* \cdot x) \quad \text{para } 0,5 < t_{max}^* < 2 \quad (52)$$

$$T_g = T_{max} - 250 \cdot (t^* - t_{max}^* \cdot x) \quad \text{para } t_{max}^* \geq 2 \quad (53)$$

Onde t_{max}^* e x podem ser obtidos pelas Equações (53-55):

$$t_{max}^* = (0,2 \cdot 10^{-3} \cdot q_{t,d} / O) \cdot \Gamma \quad (54)$$

$$x = 1 \quad \text{se } t_{max} > t_{lim} \quad (55)$$

$$x = t_{lim} \cdot \frac{\Gamma}{t_{max}^*} \quad \text{e } t_{max} = t_{lim} \quad (56)$$

A seguir, serão apresentadas ilustrações de testes numéricos utilizando as equações da temperatura para incêndio paramétrico definidas pelo Eurocódigo 1991-1-2 e para a curva de incêndio padrão ISO834. Dentre as curvas naturais, serão utilizados diferentes valores de carga de incêndio ($q_{t,d}$) e fatores de aberturas (O) para de observar a influência de cada um destes parâmetros. O valor do parâmetro b que representa a absorvidade térmica do compartimento foi mantido constante, quando se variaram as cargas de incêndio $b = 1445,2$. Considerou-se nas análises uma dimensão para os compartimentos de 8 metros de comprimento por 8 metros de largura e com pé direito de 3 metros. A altura média equivalente das aberturas foi considerada com 1,5 metros.

Na Figura 14.1 estão representadas as curvas geradas para o mesmo fator de abertura (θ) de 0.05, variando apenas a carga de incêndio ($q_{t,d}$).

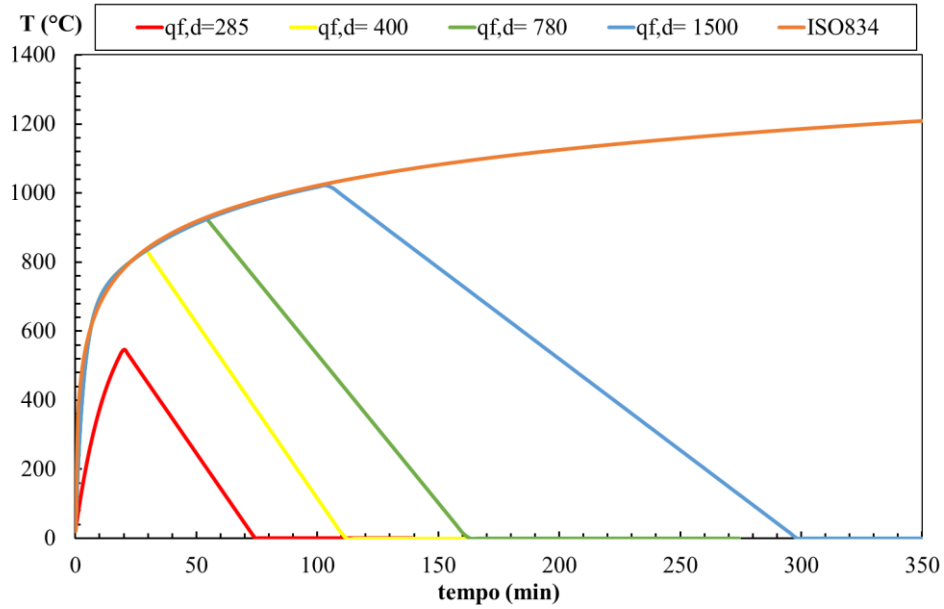


Figura 14.1 Curvas de incêndio paramétrica Eurocódigo

Na Figura 14.2 estão representadas as curvas de incêndio paramétrica que foram geradas utilizando a mesma carga de incêndio ($q_{t,d}$), com o valor de 285 MJ/m², e valores variados do fator de abertura (θ).

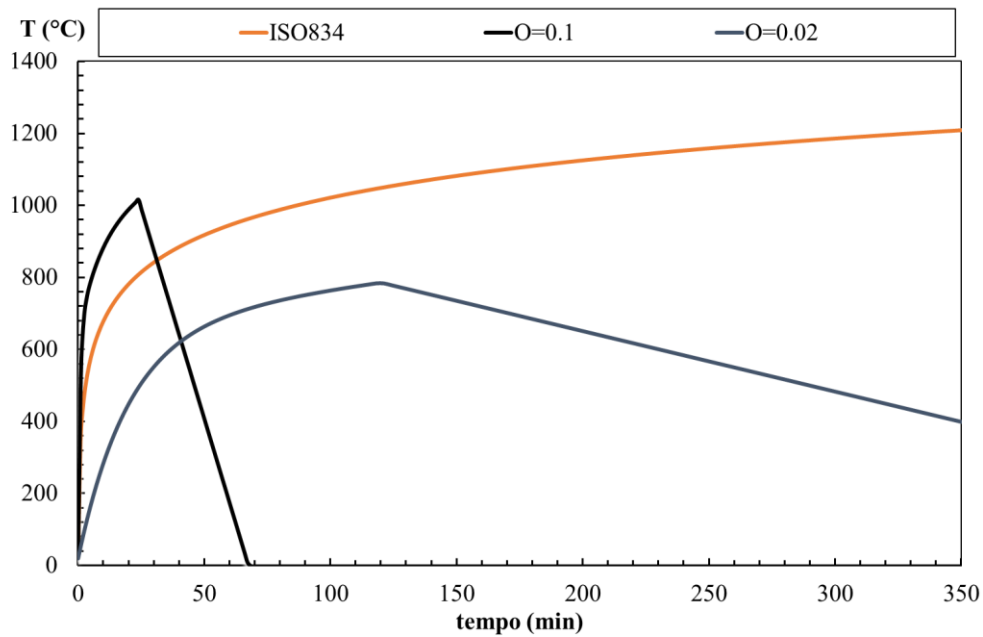


Figura 14.2 Curvas de incêndio paramétrica Eurocódigo

Com os dados obtidos podemos observar que a variação da carga de incêndio ($q_{t,d}$) ou do fator de abertura (O) geram alterações na curva de incêndio tanto na temperatura máxima atingida como no tempo de incêndio. Observa-se ainda que o aumento do fator de abertura (O) reduz consideravelmente o tempo do incêndio, aumentando a velocidade de arrefecimento. O aumento da carga de incêndio ($q_{t,d}$) gerou aumento na temperatura máxima atingida e para um mesmo fator de abertura, o compartimento tendeu a demorar mais tempo para o seu arrefecimento.

8. MÉTODO AVANÇADO DE CÁLCULO

O modelo de cálculo avançado aqui apresentado foi desenvolvido pelo método de elementos finitos (MEF) para modelar tridimensionalmente uma laje mista com chapa de aço colaborante submetida a cenários de incêndio paramétrico. O modelo de cálculo avançado, diferentemente do modelo de cálculo simplificado, permite realizar análises mais rigorosas, com solução das equações diferenciais, nos dando uma estimativa mais aproximada dos ensaios experimentais.

Para utilizar esse modelo, é necessário conhecer as propriedades térmicas dos materiais presentes e a alteração da temperatura do compartimento de incêndio com o

tempo. Normas como o Eurocódigo 1994-1-2 [24] descrevem as funcionalidades de métodos avançados de cálculo, que serão esclarecidos a seguir.

Segundo o Eurocódigo 1994-1-2 [24], a análise numérica de elementos de estruturas de edifícios submetidos a incêndios, devem fornecer soluções realistas e devem ser devidamente validadas experimentalmente. Eles fundamentam-se nos comportamentos físicos essenciais de modo a estruturar uma aproximação confiável do comportamento real, de um membro individual ou uma estrutura completa. É possível utilizá-los para qualquer tipo de seção transversal, podem-se observar modelos de reposta térmica e resposta dinâmica. Podem ser associados a qualquer curva de aquecimento e de arrefecimento, desde que as propriedades do material sejam conhecidas pela faixa de temperatura relevante.

Para validação do modelo avançado de cálculo, é estabelecido pelo Eurocódigo 1994-1-2 [24] que o modelo deve seguir dois critérios: A verificação dos resultados do cálculo deve ser feita baseada em ensaios reais de grande relevância e os parâmetros críticos devem ser verificados por uma análise sensível, garantindo que este está em conformidade com os princípios da engenharia.

8.1 MODELO DE ELEMENTO FINITOS

O modelo de elementos finitos consiste em um método numérico para solucionar problemas presentes na engenharia, física e matemática. Dentre as áreas de estudo que são tipicamente utilizadas por esse método, sobressaem as análises de engenharia estrutural, transferência de calor, fluxo de um fluido, transporte de massa e potencial eletromagnético. Problemas que requerem soluções analíticas normalmente são complicados, pois exigem soluções de equações diferenciais ordinárias ou parciais, onde devido às geometrias, cargas e propriedades dos materiais, geralmente não possuem solução fácil. Para tal, recorre-se ao método de elementos finitos, que produz soluções aceitáveis, baseadas na resolução de problemas com equações algébricas simultâneas [29].

O processo realizado no método de elementos finitos consiste em modelar um corpo, dividindo-o em um sistema para pequenas regiões (elementos finitos) interligados por um ou mais pontos nodais de outros elementos. Sendo assim, em vez de solucionar o

problema como um todo, desenvolve-se equações para cada um dos elementos finitos e os relacionam para obter uma solução de todo o corpo [29].

8.2 ANSYS

O programa ANSYS utiliza o método dos elementos finitos para efetuar simulações na área da engenharia. Foi lançado na década de 1970 e atualmente ainda é uma ferramenta amplamente utilizada para simular problemas envolvendo análises térmicas em estruturas.

Para a modelação dos elementos finitos deste trabalho, utilizou-se o ANSYS para criar modelos tridimensionais da laje mista, utilizando para isso três tipos de elementos finitos disponíveis no programa, sendo eles: SOLID70, SHELL131 e LINK33.

O SHELL131 foi responsável pela modelação do deck metálico, por se tratar de um elemento com duas das suas dimensões consideradas significativas (x e y) em comparação com a sua espessura (z). Devido ao concreto ser um material sólido e tridimensional, possuindo tamanhos consideráveis em todas as suas dimensões, foi utilizado um elemento sólido SOLID70. Para as barras de aço de reforço, que são aplicadas na região superior ou inferior da laje mista, foi utilizado o elemento finito de barra (*Link Element*) LINK33.

Nas próximas secções serão apresentadas as propriedades e as vantagens dos elementos finitos utilizados no programa ANSYS para o modelo numérico avançado.

8.2.1 SHELL131

O elemento finito SHELL131, que representa o deck metálico, é constituído por quatro nós (I, J, K e L) em formato quadrilátero, onde cada um destes possui até 32 graus de liberdade, variando em função do número de camadas. É um elemento de revestimento tridimensional com capacidade de condução térmica no plano e através da sua espessura. O elemento SHELL131 fornece temperaturas que podem ser passadas aos elementos estruturais da casca para modelar a flexão térmica. Este elemento possibilita a criação de camadas (*Layers*) que podem ser de espessuras e propriedades de materiais distintos, que será demonstrado na Figura 15, a seguir.

O elemento possui funções de interpolação lineares e utiliza integração completa de Gauss (2x2) no plano da casca e 3/5 pontos de integração na espessura.

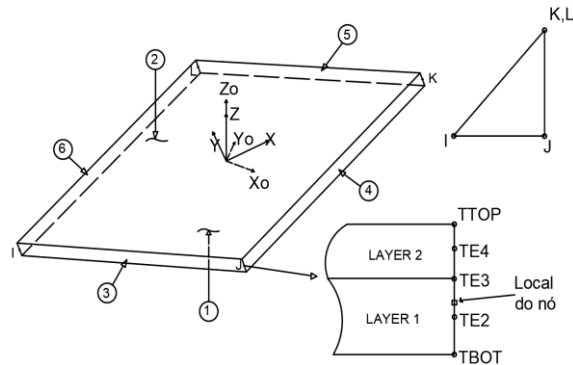


Figura 15 Elementos finitos SHELL131

Para validação do modelo numérico foram realizadas simulações em que se baseavam no contato direto entre a chapa de aço e o concreto ($airgap = 0$), foi considerado o elemento SHELL131 apenas com uma espessura (*Layer*). Para os modelos que possuíam uma mínima espessura de ar entre o deck de aço e o concreto, foi adicionado no elemento SHELL131 uma camada (*Layer*) com as propriedades térmicas e espessura próprias do ar.

8.2.2 SOLID70

O SOLID70 é um elemento tridimensional, com formato octaédrico com a capacidade de condução térmica nas três direções do espaço. Possui oito nós (I, J, K, L, M, N, O, P) com um único grau de liberdade em cada nó (temperatura). Foi escolhido por ser um elemento utilizado em análises térmicas tridimensionais de estado estacionário ou transitório. O elemento é definido pelas propriedades do material isotrópico (concreto), ver Figura 16, onde a sua geometria é representada com a localização dos nós e sistemas coordenadas.

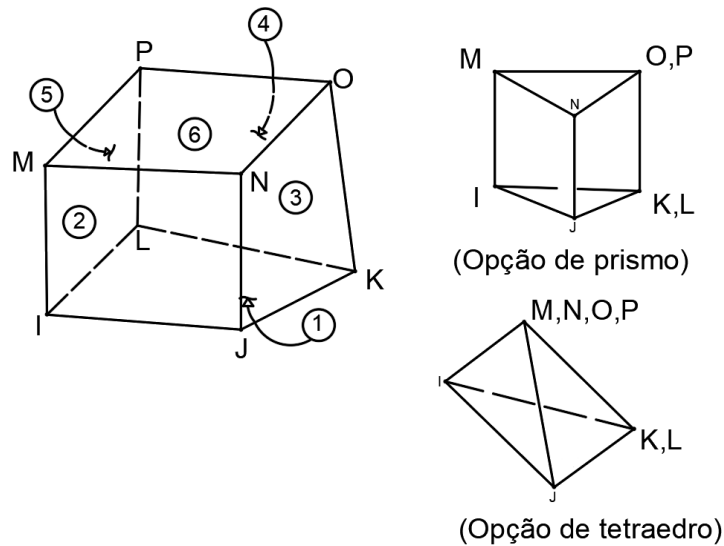


Figura 16 Elemento Finito SOLID70

Este elemento possui funções de interpolação lineares e utiliza integração completa de Gauss nas três direções (2x2x2).

8.2.3 LINK33

O elemento LINK33 é uniaxial, com a propriedade de conduzir calor entre seus nós, possuindo apenas um grau de liberdade por nó (temperatura). Possui o formato de uma barra, sendo condutora e utilizada para realizar análise térmicas em estado estacionário ou transiente. Para esta análise foi considerado que o elemento possuía dois nós, um no nó inicial (I) e outro nó final (J), como ilustrado na seguinte Figura 17.

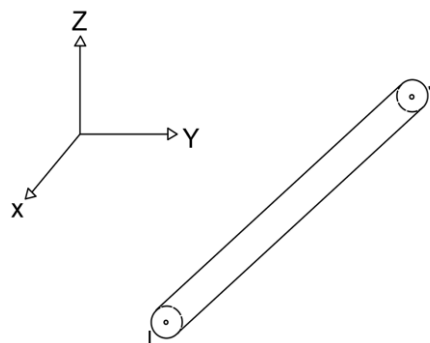


Figura 17 : Elemento finito LINK33

Este elemento possui funções de interpolação lineares e integração exata (analítica).

8.3 MATLAB

O MATLAB (Matrix Laboratory) é um programa de programação de elevado desempenho, desenvolvido principalmente para o cálculo numérico. Esse programa, criado pela MathWorks na década de 1970, abrange uma grande possibilidades de programação, sendo uma delas a construção de gráficos de ambientes. O MATLAB é composto por um sistema iterativo, que permite a solução de problemas numéricos não lineares muito rapidamente.

Foi utilizado o MATLAB PDE TollboxTM [31] para o desenvolvimento de um complemento de programação científica, com o objetivo de realizar uma análise térmica transitória não linear de lajes mistas submetidas a uma curva de incêndio paramétrico.

Para se realizar este cálculo, é necessário a criação da malha da laje mista com a respetiva geometrias, propriedades térmicas de todos os elementos presentes, número de elementos finitos da malha e a curva da variação da temperatura de incêndio em função do tempo. O algoritmo utilizado pelo software utiliza princípios do método de elementos finitos.

8.3.1 GERANDO A GEOMETRIA DA LAJE MISTA

Para se criar a geometria da laje mista no MATLAB é necessário criar um modelo de elemento térmico transitório com o comando “thermalModel”. O próximo passo é gerar uma simples malha para criar a geometria da laje e para isso foi utilizado a função “makeMesh” que será demonstrada a seguir:

```
“[nodes,elements,ElementIDToRegionID]=makeMesh(l1,l2,l3,h1,h2,ts,ta,w,nbC  
ell,AandB,a,b)”
```

Onde $l1$, $l2$, $l3$, $h1$, $h2$ são as dimensões de larguras e alturas da laje, ilustradas na Figura 18.

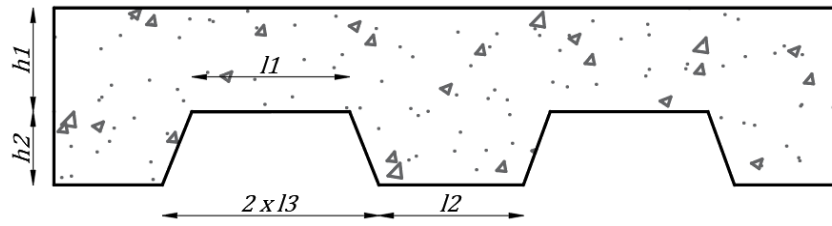


Figura 18 Parâmetros para dimensionamento da largura da laje mista MATLAB

No caso de se incluir a camada de ar na interface entre o betão e a chapa de aço colaborante, t_s e t_a representam, respectivamente, a espessura do deck de aço da laje e a espessura da camada de ar entre o deck de aço e o concreto. Este último parâmetro pode tomar valor zero, quando se pretende considerar contato perfeito ($\text{airgap} = 0$) entre a chapa de aço e a superfície inferior do concreto, ver Figura 19.

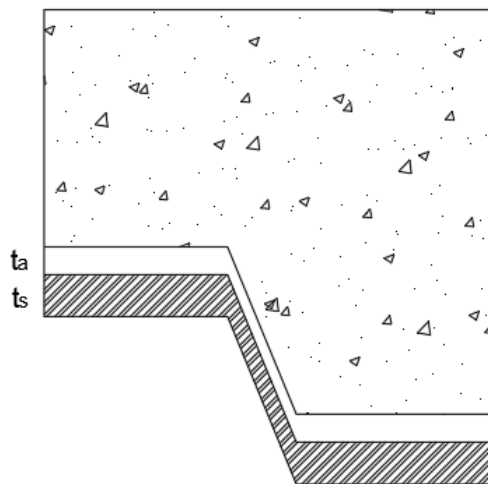


Figura 19 Parâmetros para dimensionamento da espessura da chapa de aço e camada de ar MATLAB

A dimensão w representa a largura do elemento da estrutura, $nbCell$ é o número de vezes que o padrão de base será repetido, ilustrados nas Figuras 20 e 21.

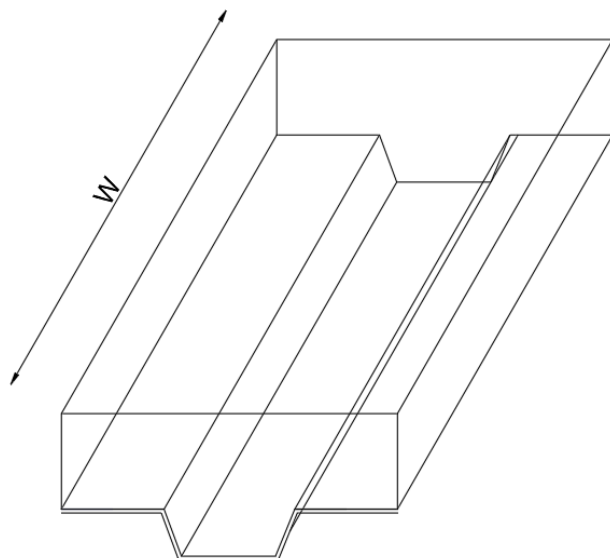


Figura 20 Parâmetros para dimensionamento do comprimento da nervura laje mista MATLAB

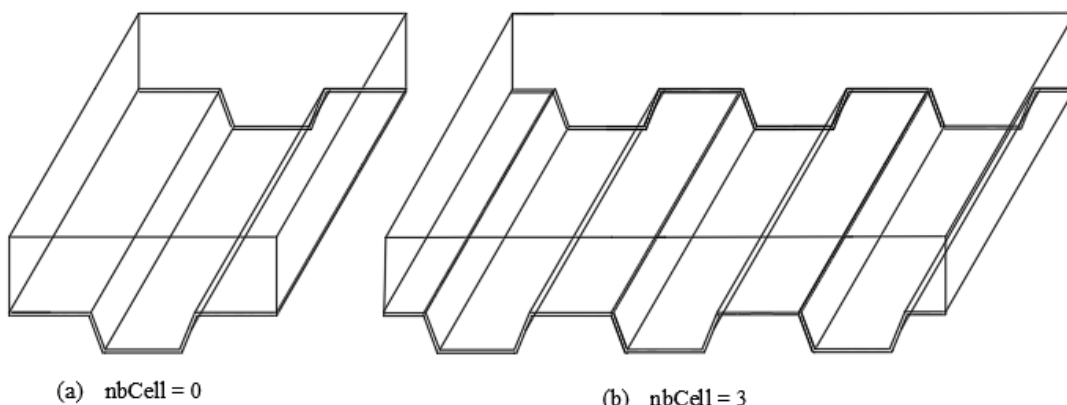


Figura 21 Parâmetros para dimensionamento das nervuras da laje mista MATLAB

A and B é um parâmetro que varia de 0 a 1, onde para 0 as extremidades da estrutura terminam com a laje de altura h_1 e para o valor 1 a estrutura possui extremidades com alturas h_1+h_2 , onde a e b são o comprimento de cada uma das extremidades.

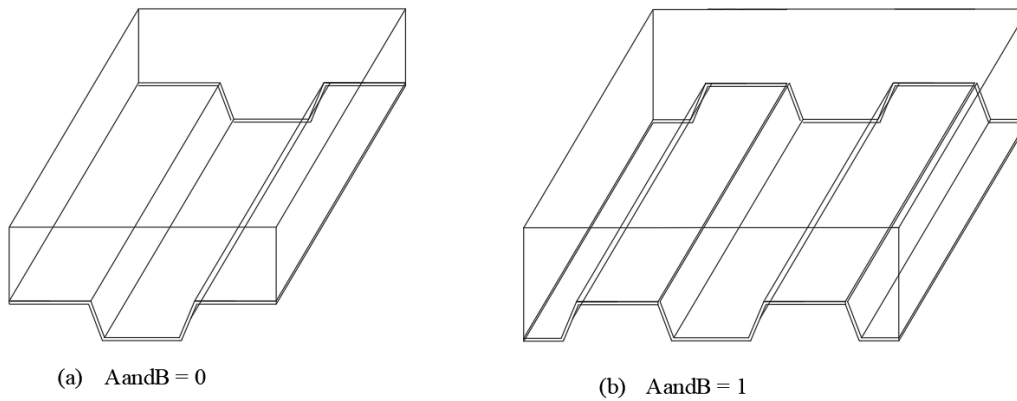


Figura 22 Parâmetros para dimensionamento das nervuras da laje mista MATLAB

Utilizando a função “*geometryFromMesh(thermalModel;nodes;elements;ElementIDToRegionID)*” a geometria é gerada. Posteriormente a geometria é definida, utilizando a função “*generateMesh(thermalModel;0 GeometricOrder0;0 linear0)*” para criar a malha final, ilustrada a seguir.

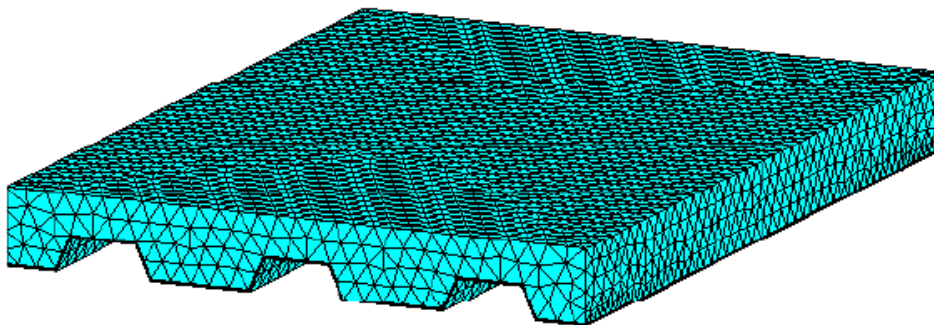


Figura 23 Exemplo da malha de elementos finitos MATLAB

8.3.2 PROPRIEDADES TÉRMICAS

Para as propriedades térmicas dos materiais foram utilizadas as equações para cada tipo de material, apresentadas na Seção 5. Como essas propriedades variam com a temperatura, foram criadas funções auxiliares para recalcular as equações quando ultrapassarem certa fronteira de temperatura estabelecida. Foi utilizando o comando *thermalProperties*, adicionado ao subdomínio “cell” para encontrar as propriedades de condutividade, densidade e calor específico de cada material. Para contatos perfeito entre o deck de aço e o concreto ($t_a=0$), as propriedades térmicas do ar foram desconsideradas.

O fluxo de calor depende da curva de temperatura do incêndio, condições de transferência de calor e das condições geométricas do elemento da estrutura, uma vez que o fluxo de calor depende do fator de vista. Para a temperatura do gás foi utilizado o comando T_{nat} para ler o ficheiro em Excel e estabelecer a curva da temperatura em função do tempo, obtido a partir de um ensaio experimental ou de uma curva paramétrica.

Os fatores de visualização das faces expostas do deck de aço são obtidos automaticamente utilizando as equações dos fatores de vista, exemplificados na seção (3.4).

9. MODELO DE VALIDAÇÃO

Para analisar os métodos de cálculo e comprovar a confiabilidade dos modelos numéricos, foram utilizados ensaios experimentais de incêndio paramétrico em lajes mistas em grandes escalas, disponíveis na literatura. Esses ensaios experimentais servem para compararmos os resultados obtidos com elementos semelhantes e condições similares de incêndio com os modelos de cálculo numérico.

Na secção seguinte serão apresentados ensaios experimentais que foram utilizados para validação da modelagem dos modelos numéricos. Estes ensaios foram escolhidos por terem a informação mínima necessária para os requisitos da realização do modelo numérico.

9.1 S.GUO. & BAILEY, C. G. (2010)

Em 2010 na Universidade de Manchester foram realizados ensaios para estudo do comportamento de lajes mistas durante a fase de aquecimento e resfriamento [10].

A investigação experimental e numérica sobre o comportamento do fogo de elementos de estruturas de edifícios é predominante no desempenho durante a fase de aquecimento, como no caso do incêndio padrão ISO834. Neste trabalho, foi realizado uma análise da estrutura durante a fase de aquecimento e do resfriamento, onde serão apresentadas a seguir, todas as características do modelo real em que foi testado.

9.1.1 CONFIGURAÇÃO DO EXPERIMENTO

O teste foi realizado em sete tipos de lajes mistas semelhantes, com geometria do deck de aço trapezoidal CF60/1.2, conforme representado na Figura 24. O aço possui elasticidade limite de 378MPa, o concreto foi caracterizado por C30/40 de peso normal. A laje era composta por 1,2m de largura e 6,45m de comprimento e possuía um vão médio de 4m. Para o teste de incêndio, a laje foi aquecida ao longo de 3 metros do seu comprimento, representativo do tamanho do forno utilizando para o ensaio.

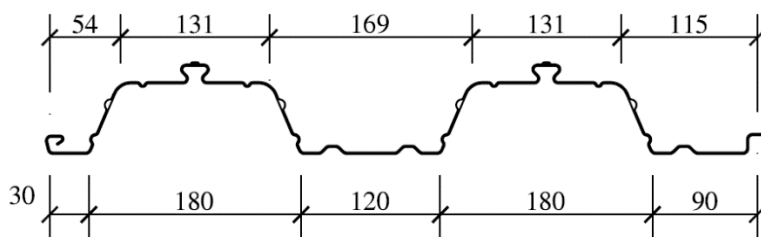


Figura 24 Perfil da laje mista de S.Guo [10]

Para compreender o efeito do comportamento estrutural sobre diferentes regimes de incêndio foi realizado três cenários de curvas de incêndio natural, designados por Fogo 2, Fogo 5, e Fogo 7. A fase de aquecimento e resfriamento para todos os cenários foi controlada respectivamente por aquecedores e ventiladores presentes dentro do forno do laboratório. Estes cenários possuíam tempos de aquecimentos e resfriamento distintos demonstrados na seguinte Figura 25.

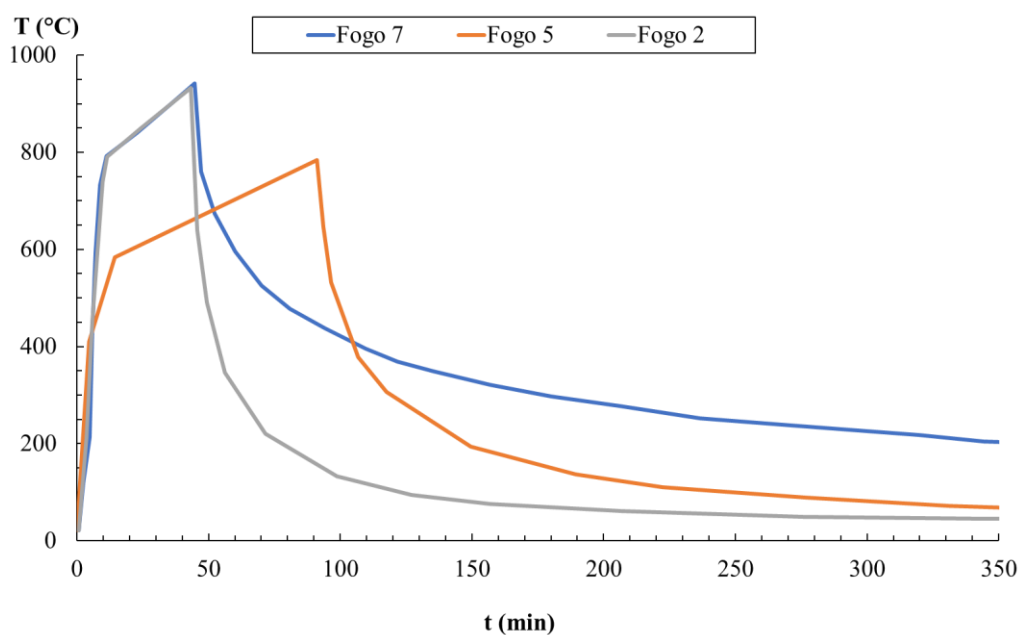


Figura 25 Curvas de incêndio por S.Guo

O cenário do Fogo 2 e 7 foram obtidos aquecendo o forno durante 40 minutos, até uma temperatura máxima de 950°C , sendo diferenciados pela fase de aquecimento, onde o Fogo 7 possui um resfriamento lento e o Fogo 2 um resfriamento mais rápido devido à ativação dos ventiladores de arrefecimento. O cenário de fogo 5 foi encontrado a partir do aquecimento do forno por um período de 90 minutos, até atingir a temperatura máxima de 800°C e seguida pela fase de resfriamento com os ventiladores também ligados.

Dentre as lajes em que foi realizado os ensaios, as apresentaram todos os resultados e propriedades necessárias para a modelagem numérica da temperatura foram as nomeadas pelo autor de laje F7, F5 e F2, onde cada uma delas foi submetida respectivamente ao aquecimento Fogo 7, Fogo 5 e Fogo 2. Estas lajes que também possuíam valores de resistência e umidade distintas, expressas ilustrado na Tabela 12, a seguir.

Tabela 12 Lajes mistas de S.Guo

Laje No	Cenário incêndio	de	Resistencia concreto (MPa)	do	Umidade (%)
Laje F2	Fogo 2		36,4		1,5

Laje F5	Fogo 5	37,8	2
Laje F7	Fogo 7	21,1	1,86

As temperaturas das lajes foram medidas ao longo de um intervalo de 360 minutos, partindo de uma temperatura inicial de 20⁰C. Foram utilizados, em certos pontos das lajes, termopares para medição das variações de temperaturas e transdutores de deslocamento e células de carga para a medição de deslocamento e cargas mecânicas. Os pontos dos termopares identificados por T22, T21, T20, T19, T16 e T15 foram os escolhidos para a modelagem deste trabalho e serão ilustrados na seguinte Figura 26, justamente com a geometria da laje.

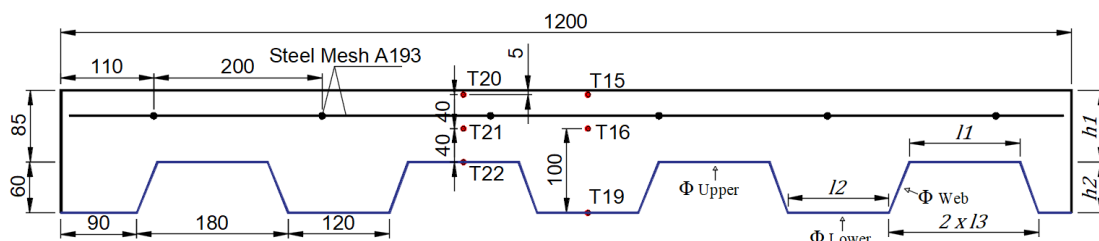


Figura 26 Laje mista para validação do modelo numérico. (dimensões em milímetros)

9.1.2 MODELO NUMÉRICO

Com o intuito de realizar as simulações numéricas térmicas da maneira mais fiel possível do ensaio experimental fornecido pelo autor, utilizaram-se os programas MATLAB e ANSYS. Foram ainda utilizadas as metodologias de cálculos fornecidas pelo Eurocódigo EN 1991-1-2 [22] para os valores dos coeficientes de convecção da parte superior e inferior das faces da laje, demonstrada na Figura a seguir.

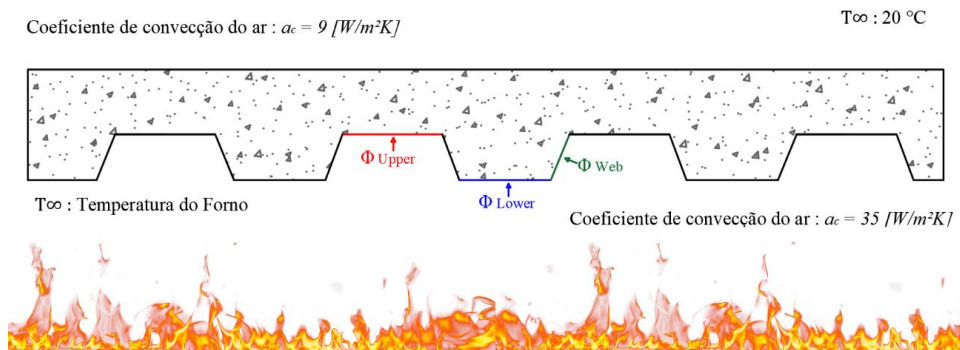


Figura 27 Coeficientes de convecção para curva de incêndio paramétrico

Os fatores de vistas para a alma (Φ_{alma}) e para a flange superior (Φ_{sup}) da chapa de aço foram calculadas baseadas nas Equações (5) e (6), apresentadas anteriormente.

Os ensaios numéricos foram realizados para o mesmo tempo de simulação do teste de incêndio do S.Guo & Bailey, totalizando, desde a fase de aquecimento até o fim do resfriamento, um total de 6 horas (21600 segundos).

Os parâmetros de convergência compreendiam incrementos de tempo de 120 segundos. A tolerância de convergência da solução no programa MATLAB foi baseada no fluxo de calor, utilizando uma tolerância de 10^{-1} e um valor relativo de tolerância de 10^{-2} . No programa MATLAB a malha foi constituída por elementos finitos sólidos (tetraédricos), com funções de interpolação lineares e com dimensão inferior a duas vezes e meia a altura h_1 .

O Eurocódigo 2 – Part 1-2 [23] fornece para a condutividade térmica do concreto o limite superior e o limite inferior, onde recomenda-se pelo mesmo utilizar o limite inferior nos ensaios numéricos. Todavia, S.Guo & Bailey relatam que é mais complicado que isso, pois a água dos poros do concreto deverá provocar um aumento da condutividade do mesmo, mas quando atingir $100^{\circ}C$ a evaporação da água absorverá quantidades significativas de calor, reduzindo a taxa de transferência de calor para o material circundante. Além disto, o aumento da temperatura de uma face causa migração de umidade em direção à face fria, o que induzirá mudanças dinâmicas nas propriedades térmicas do concreto (transferência de massa de água não é incluída nos modelos numéricos). Desse modo, S. Guo & Bailey, baseando-se em uma pesquisa realizada sobre

o efeito da umidade sobre a condutividade térmica do concreto [33] determinaram equações para a condutividade térmica, que se apresentam em seguida.

- Aquecimento:

$$\lambda_c = 2,2 \quad T_c \leq 150^{\circ}C \quad (57)$$

$$\lambda_c = 2,2 - 1,29 \frac{T_c - 150}{250} \quad 150^{\circ}C < T_c \leq 400^{\circ}C \quad (58)$$

$$\lambda_c = 1,36 - 0,136(T_c/100) + 0,0057(T_c/100)^2 \quad \geq 400^{\circ}C \quad (59)$$

- Resfriamento:

$$\lambda_c = 1,36 - 0,136(T_c/100) + 0,0057(T_c/100)^2 \quad (60)$$

Para a modelagem foram utilizadas duas abordagens, o contato direto entre o concreto e a chapa de aço e um modelo que possuía uma fina camada de ar entre o concreto e a chapa de aço proveniente da separação física de ambos os materiais. Foram utilizados 4 tipos de espessuras da camada de ar para os modelos buscando identificar os valores que mais se aproximavam com os ensaios experimentais.

9.1.3 RESULTADOS

A seguir serão apresentados os resultados obtidos com as simulações numéricas juntamente com os resultados provenientes do ensaio experimental. Para todos os modelos, foram testados os pontos escolhidos pelo S.Guo & Bailey para o experimento e foi calculada a temperatura média de 20 nós na superfície não exposta da laje mista, para realizar o teste de isolamento do elemento da estrutura (I).

Para os primeiros modelos térmicos realizados, foram utilizadas as equações de condutividade térmica do concreto fornecida pelo Eurocódigo EN 1992-1.2 [23]. Foram ainda realizadas as simulações numéricas com os valores da condutividade térmica do concreto fornecida por S.Guo & Bailey. Estes modelos são apresentados no ANEXO I.

As Figuras 28 e 29, a seguir, representam os resultados do modelo numérico referente ao teste na laje F2, quando foi utilizada a condutividade térmica do concreto do Eurocódigo (Modelo G1.0 Matlab) e os resultados do modelo numérico quando foi utilizada a condutividade térmica sugerida por S.Guo & Bailey (modelo G1.1 Matlab). Em ambas as simulações foi assumido o contato direto entre a superfície inferior do concreto e a chapa de aço. São comparados os resultados fornecidos pelo ensaio experimental nomeadamente T19, T16, T15, T22, T21, T20 e seus respectivos resultados obtidos pelo MATLAB (T19 MAT, T16 MAT, T15 MAT, T22 MAT, T221 MAT, T20 MAT).

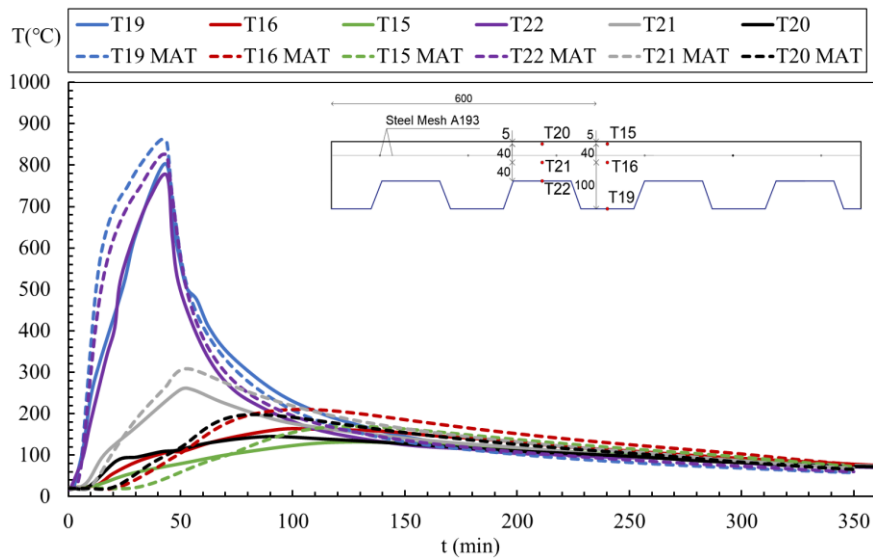


Figura 28 Temperaturas na secção do Modelo#G1.0 Matlab a = 0 mm

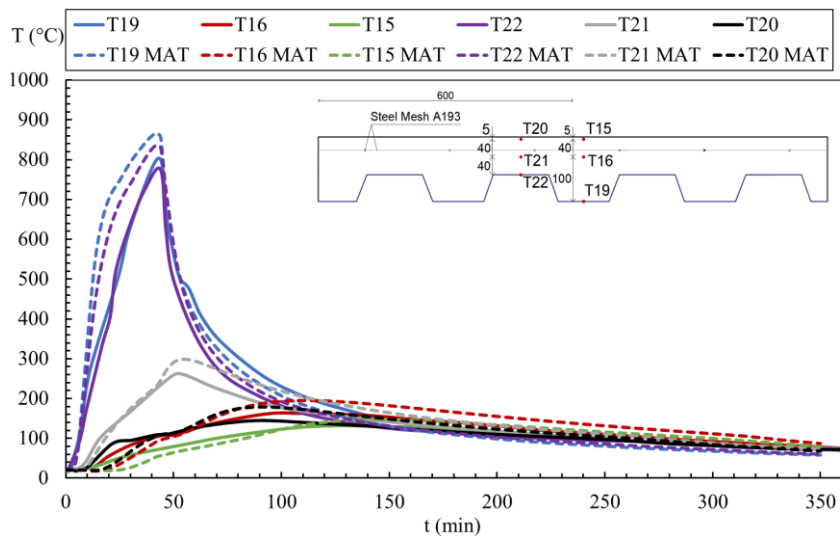


Figura 29 Temperaturas na secção do Modelo#G1.1 Matlab a = 0 mm

Pelos gráficos apresentados, observa-se que as temperaturas nos pontos localizados próximos da chapa de aço , nos primeiros 50 minutos de aquecimento, no ensaio experimental obtiveram-se temperaturas superiores ao ensaio numérico. Este efeito é decorrente do aquecimento da água presente nas partículas de concreto, que à medida que aquecem, migram para suas partes superiores e elevam a temperatura do concreto nestes pontos. Efeito este que não foi considerado no modelo numérico.

A seguir é apresentada a comparação, mas para o ensaio experimental F5. Este elemento apresenta uma umidade diferente, tendo sido feita a respetiva correção na variação do calor específico. O modelo (Modelo#G1.0 Matlab) a seguir, representa a condutividade térmica estabelecida pelo Eurocódigo e o modelo (Modelo#G2.0 Matlab) representa a condutividade térmica estabelecida por S.Guo & Bailey, ambas supondo contato perfeito .

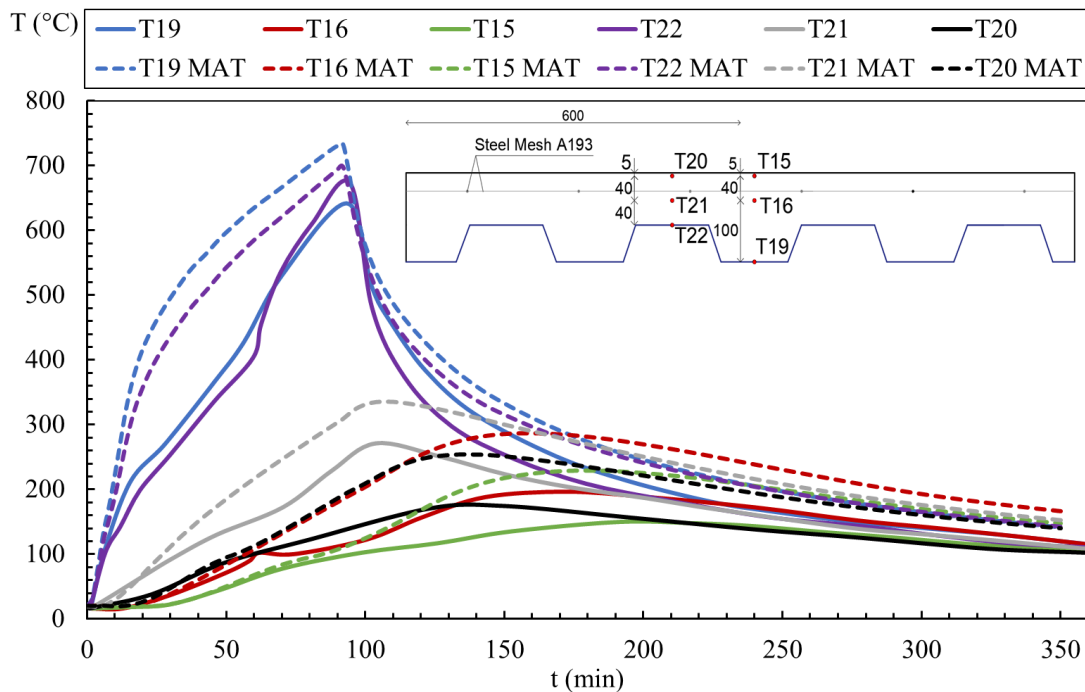


Figura 30 Temperaturas na secção do Modelo#G2.0 Matlab a = 0 mm

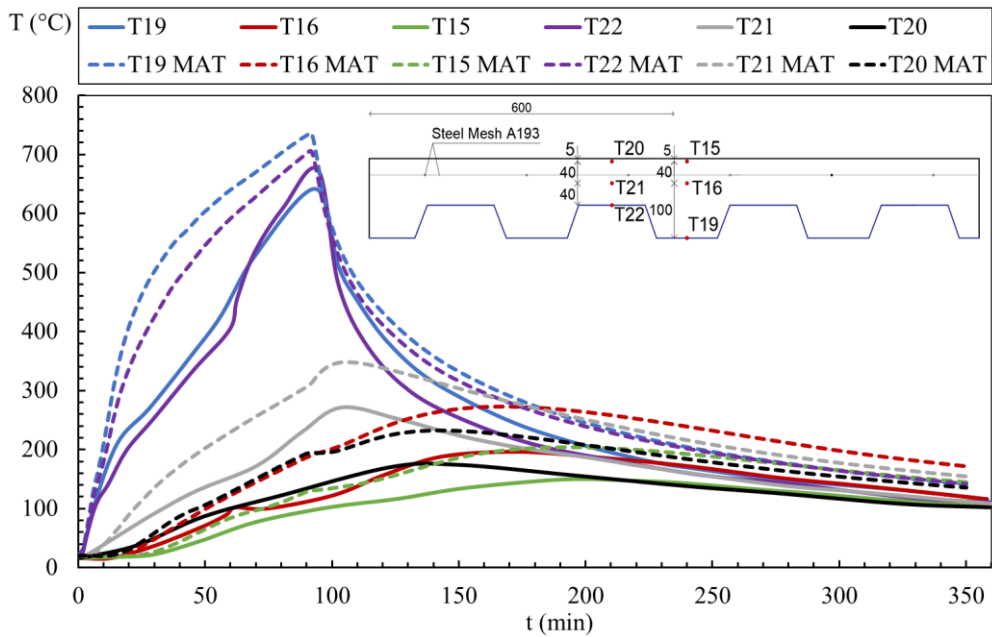


Figura 31 Temperaturas na secção do Modelo#G2.1 Matlab a = 0 mm

É possível observar uma diferença entre os resultados experimentais e numéricos, mais significativa para os pontos de controle T19 e T22, as quais poderão estar relacionadas com os valores medidos experimentalmente e com a eventual separação física dos materiais devido ao aquecimento.

Nos gráficos das figuras seguintes, será feita a mesma comparação, mas para o incêndio experimental da laje F7. O calor específico também foi ajustado para considerar o valor da umidade do concreto. O modelo (Modelo#G3.0 Matlab) representa a condutividade térmica estabelecida pelo Eurocódigo e o modelo (Modelo#G3.1 Matlab) representa a condutividade térmica estabelecida por S.Guo & Bailey, ambas supondo contato perfeito entre os materiais.

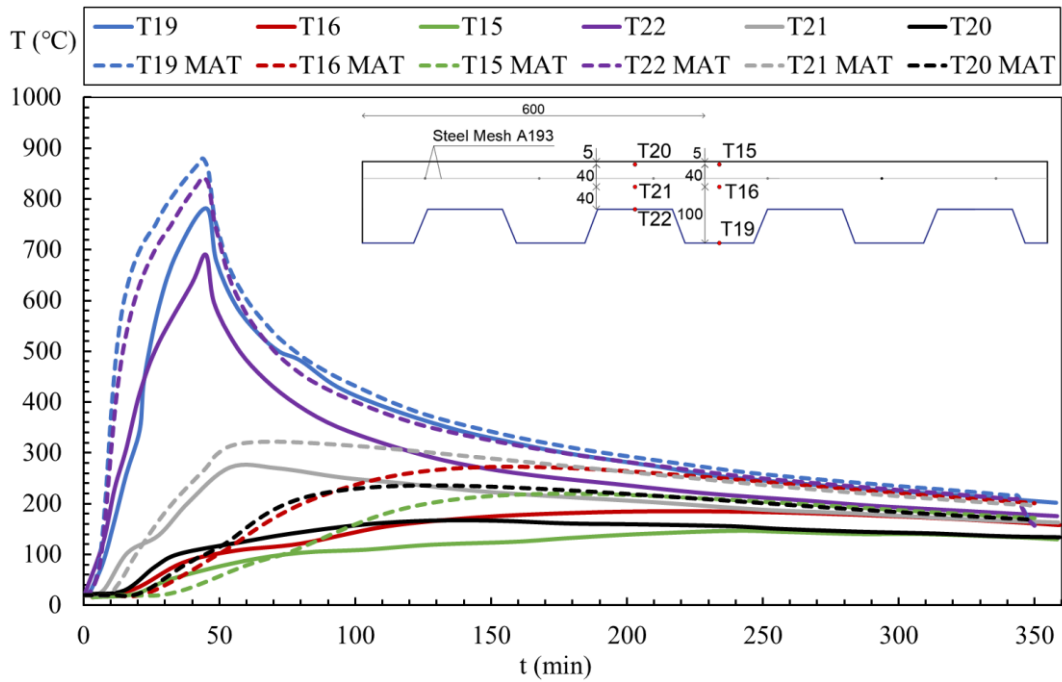


Figura 32 Temperaturas da secção do Modelo#G3.0 Matlab a = 0mm

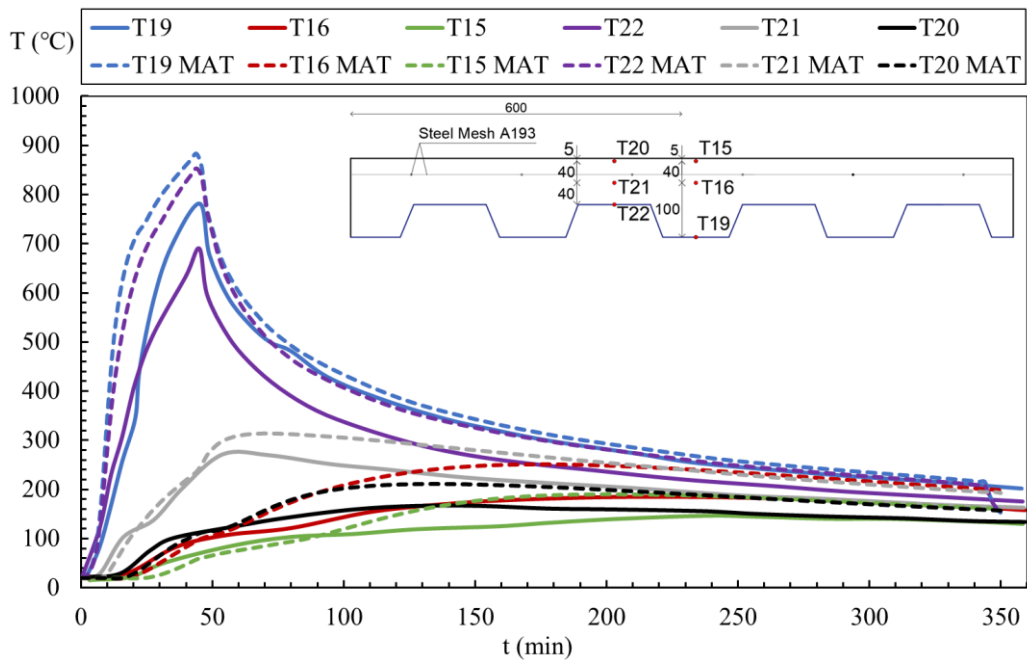


Figura 33 Temperaturas da secção do Modelo#G1.0 Matlab a = 0 mm

Comparando os gráficos verifica-se que os resultados para as partes expostas ao fogo são semelhantes, porém, à medida que o fluxo de calor passa pelo concreto, notou-se um maior afastamento da curva tanto na fase de aquecimento quanto de arrefecimento,

mostrando que a condutividade térmica fornecida por S.Guo & Bailey tiveram uma melhor aproximação em relação aos resultados do ensaio experimental.

A seguir será apresentada a comparação com os modelos que possuem uma camada fina de ar entre a superfície inferior do concreto e o deck de aço utilizando a condutividade térmica do eurocódigo. A Figura 34 apresenta a comparação dos resultados experimentais com o modelo (Modelo#G1.0 Matlab), que corresponde ao resultado dos ensaios para uma camada de 0.5mm de ar entre o topo do deck de aço e a superfície inferior do concreto na laje F2.

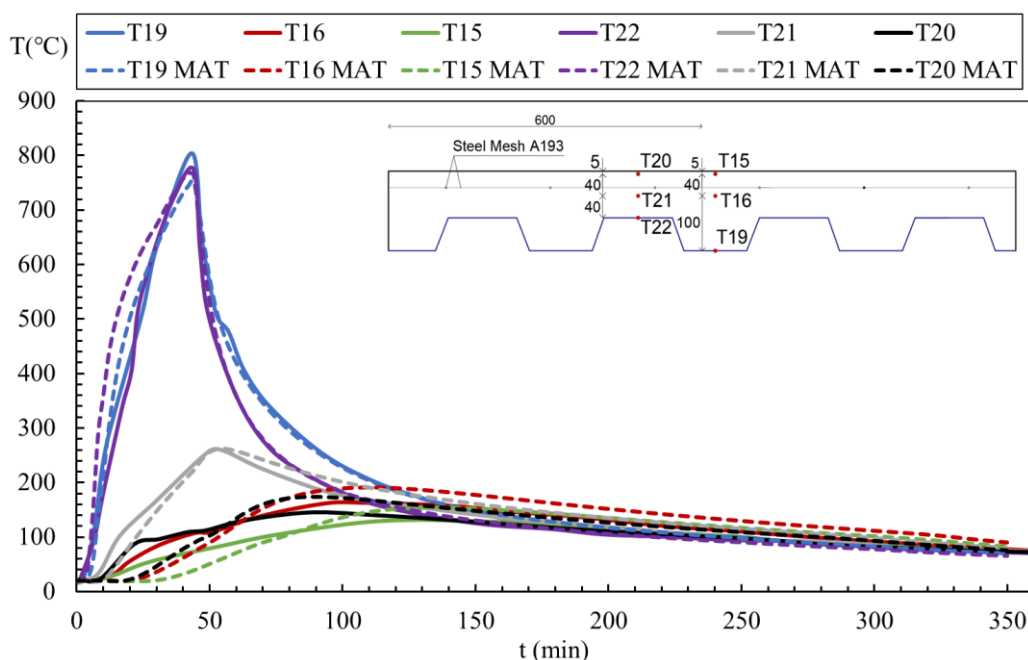


Figura 34 Temperaturas da secção do Modelo#G1.0 Matlab a = 0.5 mm

Nestas simulações foi verificada uma redução das temperaturas máximas em comparação com os resultados obtidos para os modelos de contato perfeito. Apresentou uma fase de arrefecimento bem próxima nos pontos não diretamente expostos ao fogo.

A seguir é apresentado um estudo paramétrico do efeito da espessura da camada de ar, ver as Figuras 35-37, respectivamente, a uma camada de ar entre a chapa de aço e o concreto de 1.0mm, 1.5mm e 2.0mm (valores escolhidos aleatoriamente para teste).

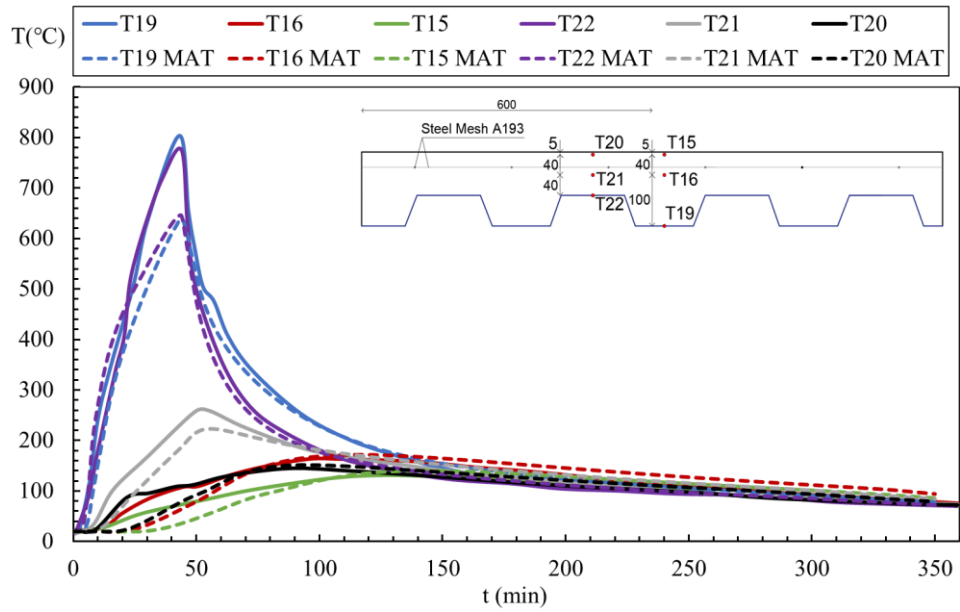


Figura 35 Temperaturas da secção do Modelo#G1.0 Matlab a = 1 mm

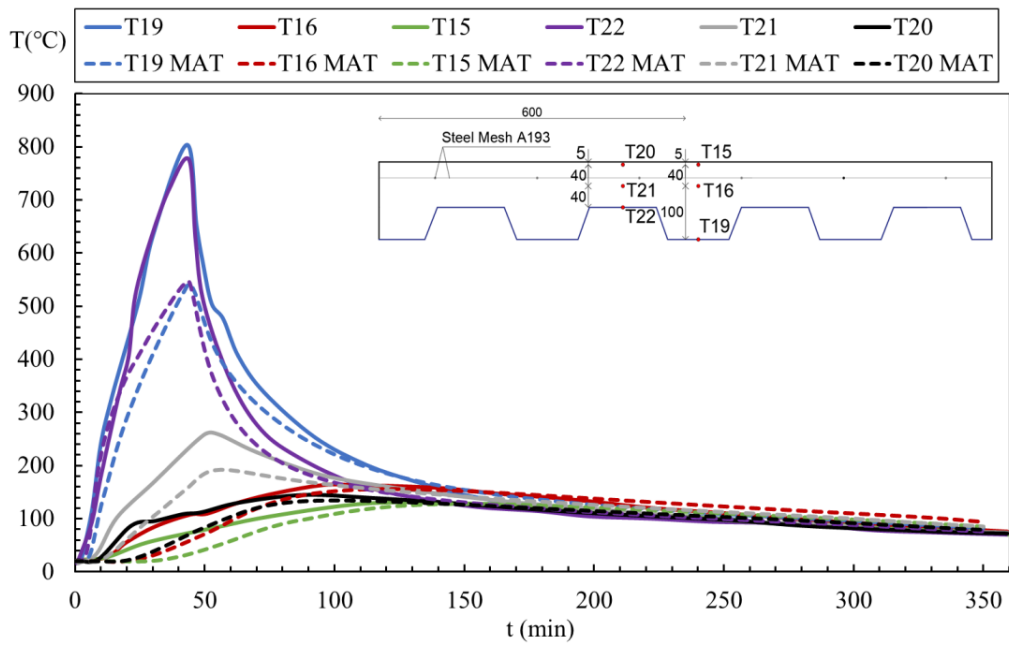


Figura 36 Temperaturas da secção do Modelo#G1.0 Matlab a = 1.5 mm

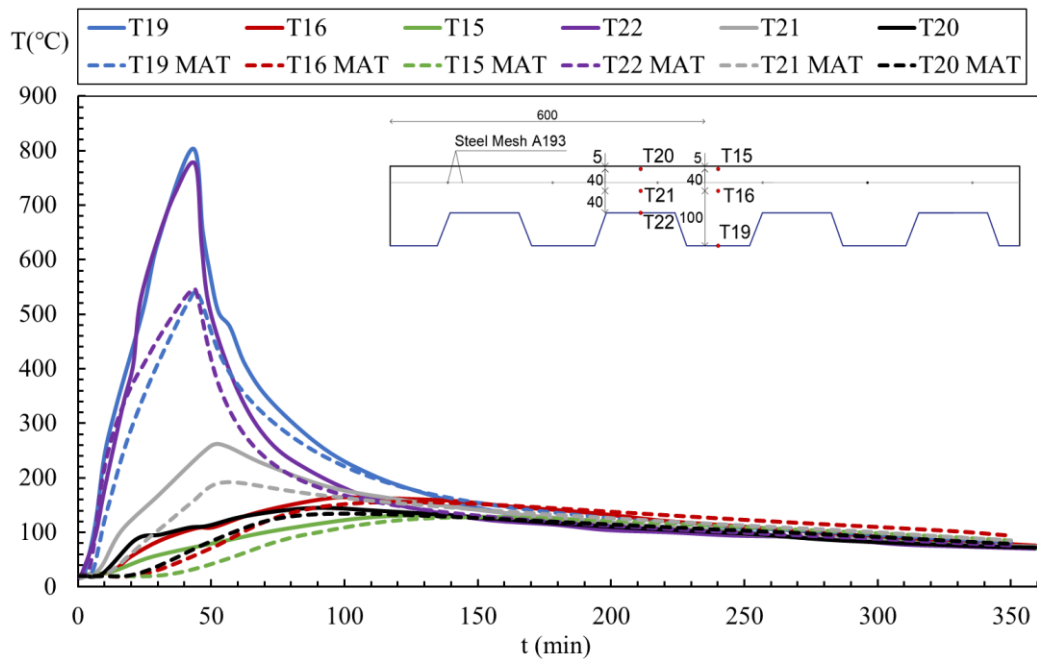


Figura 37 Temperaturas da secção do Modelo#G1.0 Matlab a = 2.0 mm

Com a sequência de resultados, fica evidente que com o acréscimo da espessura da camada de ar, entre o deck da chapa de aço e o concreto, e para valores superiores a 0.5mm, as temperaturas sofrem grandes reduções, afastando qualitativamente os resultados numéricos dos resultados obtidos experimentalmente. No ANEXO I são apresentados todos os resultados para as variações da espessura do ar para as lajes F2, F5 e F7.

O programa ANSYS não possui suporte para criar uma função para diferentes curvas de condutividade térmica do concreto, uma para fase de aquecimento e outra para fase de arrefecimento, como é o caso da variação sugerida por S.Guo e BAILEY [3]. Sendo assim, foi utilizado a condutividade térmica proposta pelo Eurocódigo para o limite inferior.

O modelo (Modelo#G1.0 Ansys) a seguir representa os resultados das temperaturas nos pontos T19, T16, T15, T22, T21 e T20 medidos no ensaio experimental em comparação com os resultados determinado com o programa Ansys. Neste modelo, foi utilizado a camada de ar com espessura de 0.5mm, por ser o modelo numérico com resultados mais próximo dos ensaios reais.

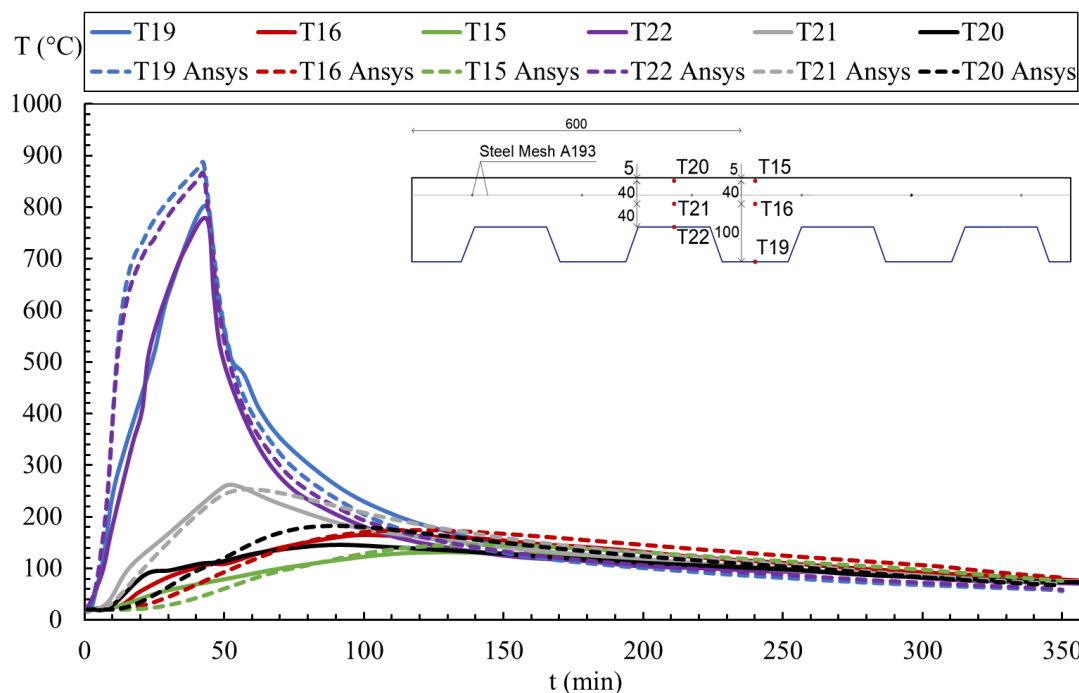


Figura 38 Temperaturas da secção do Modelo#G1.0 Ansys

Os resultados são qualitativamente, muito semelhantes, aos resultados determinados com o programa MATLAB (Figura 34).

Os resultados dos modelos Ansys, a seguir, representam a comparação com o ensaio experimental das lajes F2 e F5. Estes resultados apresentaram uma melhor convergência com os resultados do ensaio experimental. As temperaturas nos pontos T19 e T22 apresentaram uma temperatura máxima superior as encontradas no experimental e no MATLAB. Isso acontece pelo facto do nó em que foi selecionado para medir a temperatura ser o nó em que se utilizou para criar o elemento finito de aço, ar e concreto.

No gráfico da figura seguinte é feita a comparação dos resultados para os modelos Modelo#G1.0 Matlab e Modelo#G1.1 Ansys da laje F2.

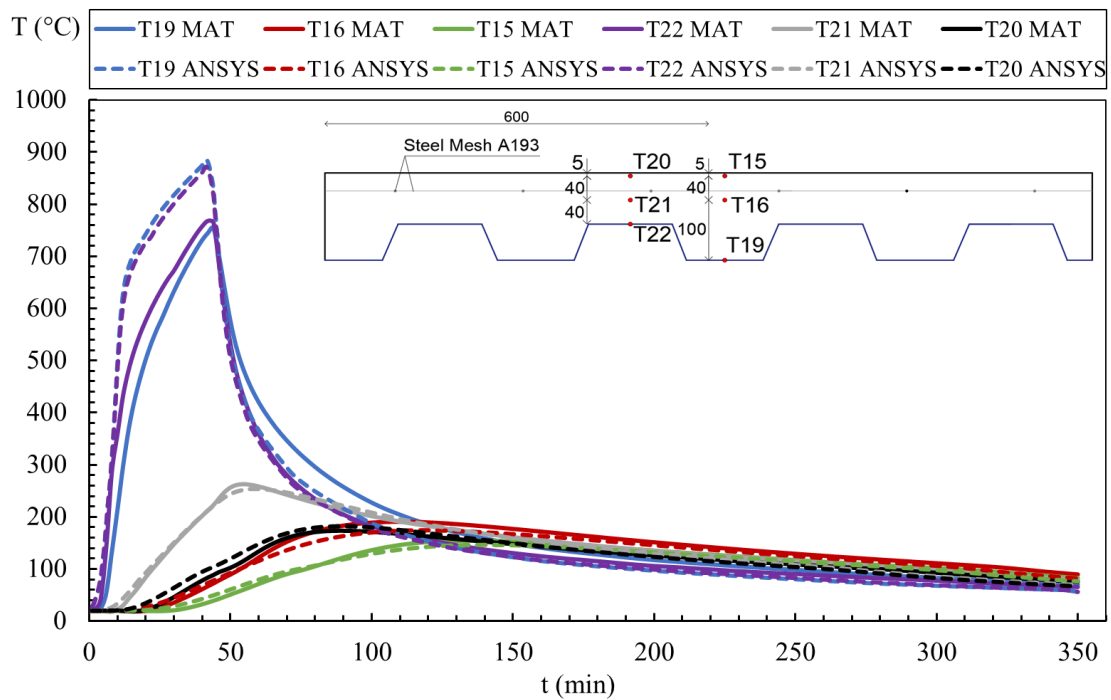


Figura 39 Comparação das temperaturas da secção do Modelo#G1.0 Matlab e Modelo#G1.1 Ansys

Na figura seguinte são apresentados os resultados do modelo Modelo#G2.0 Matlab e Modelo#G1.2 Ansys, sendo feita a comparação das simulações numéricas utilizando os programas MATLAB e ANSYS para a laje F5.

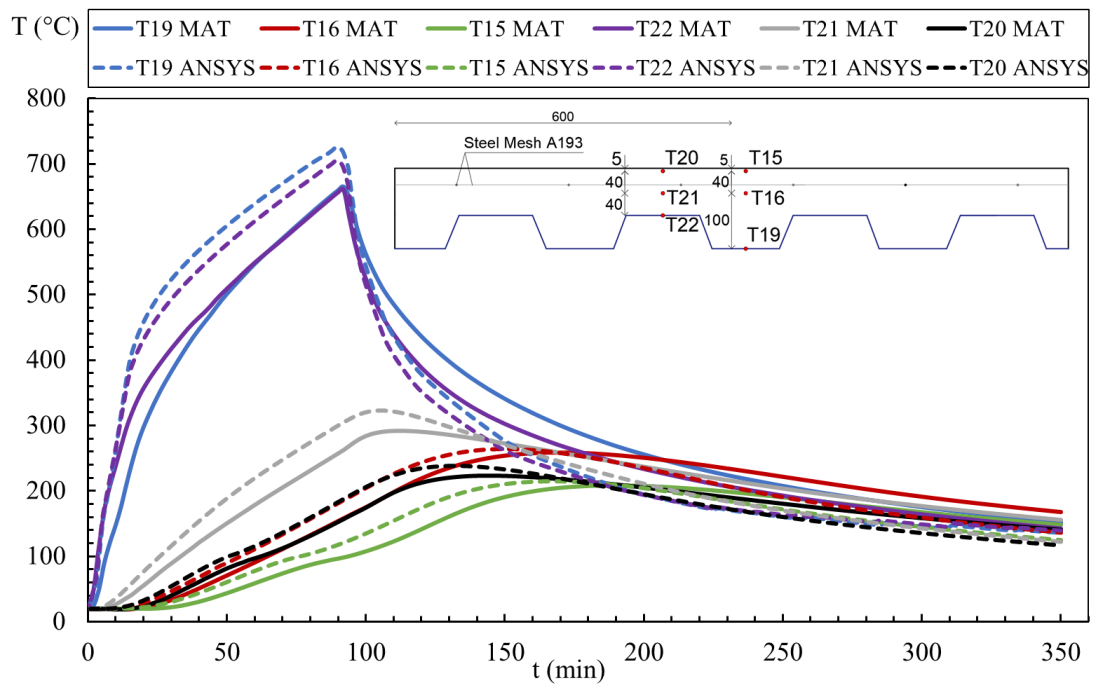


Figura 40 Comparação das temperaturas da secção do Modelo#G2.0 Matlab e Modelo#G1.2 Ansys

Apesar de dos modelos possuírem as mesmas propriedades de materiais, verifica-se a existência de algumas diferenças nos resultados. Isso ocorre por várias razões, sendo as mais importantes: o tamanho da malha, o tipo de elementos finitos, o critério de convergência da solução iterativa e incremental. No MATLAB a geometria da malha possui elementos finitos tetraédricos que possuem quatro nós para elementos lineares ou dez nós para elementos quadrático. No ANSYS, foram utilizados três tipos de elementos finitos diferentes, discutidos anteriormente.

10. ESTUDO PARAMÉTRICO

A validação do modelo numérico foi essencial para se ajustarem os diversos fatores em que envolvem o processo de transferência de calor e os critérios de convergência necessário para cada programa utilizado. Com esses valores ajustados, é possível prosseguir para o real objetivo deste estudo.

10.1 MODELO NUMÉRICO

Nesta etapa do trabalho, foram desenvolvidos modelos de diferentes geometrias de lajes mistas, ambas com área de projeção horizontal de 1 x 3 m², com espessuras de camada de aço próprias, definidas pelo fabricante de cada modelo e com 4 diferentes alturas (h1) acima do banzo superior da chapa. Entre as geometrias escolhidas, serão apresentadas duas com formato trapezoidal e duas com formato reentrante.

A laje mista com chapa de aço Polideck 59S, é produzida no Brasil pela ArcelorMittal. Esta empresa é uma das maiores empresas siderúrgicas do ramo. Essa geometria trapezoidal foi selecionada na sua versão com 1.25mm de espessura da camada de aço de qualidade S275. A Figura 41 demonstra as dimensões geométricas e na Tabela 13 temos os fatores de vistas para cada face exposta da chapa de aço.

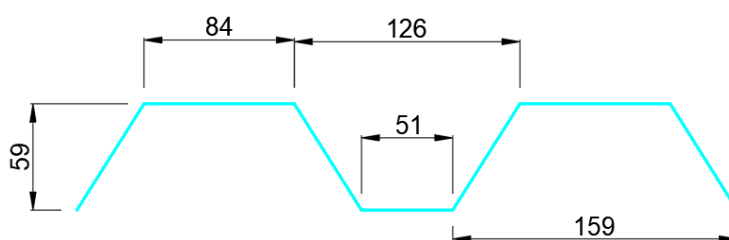


Figura 41 Dimensões Polideck 59S

Tabela 13 Fatores de vista Polideck 59S

Face	Fator de vista (Φ)
Inferior	1
Superior	0.78
alma	0.67

Foi ainda considerada uma segunda chapa de perfil trapezoidal, nomeadamente Confraplus 60. Esta também é produzida pela ArcelorMittal, mas noutro país (Polónia). Nessa versão possui uma chapa de aço S350 com espessura de 1.25mm. As suas características geométricas são apresentadas na Figura 42 e seus fatores de vista na Tabela14

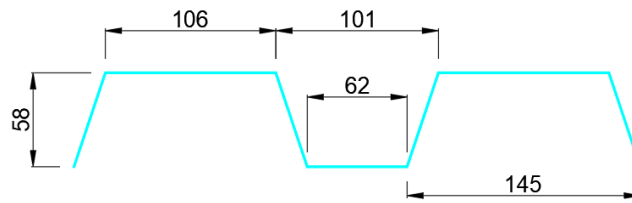


Figura 42 Dimensões Confraplus 60

Tabela 14 Fatores de vista Confraplus 60

Face	Fator de vista (Φ)
Inferior	1
Superior	0.73
alma	0.56

A seguir é apresentada uma geometria de perfil reentrante, denominada por Multideck 50. Esta chapa de aço possui um material de qualidade S450 e uma espessura de 1.0mm. A empresa fabricante é a Kingspan, situada no Reino Unido. As dimensões de chapa metálica são apresentadas na Figura 43 e seus fatores de vistas na Tabela 15.

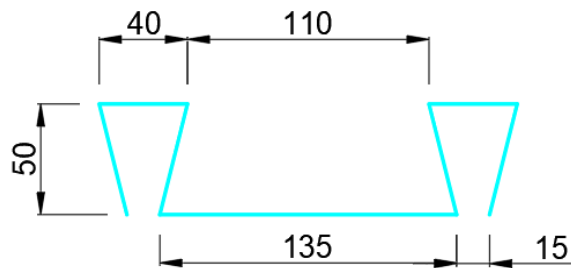


Figura 43 Dimensões Multideck 50

Tabela 15 Fatores de vista Multideck 50

Face	Fator de vista (Φ)
Inferior	1
Superior	0.14
alma	0.09

A última chapa de aço com perfil reentrante é apresentada na figura seguinte. Trata-se do modelo Bondeck, com sua fabricação situada na Austrália. Este modelo foi escolhido na sua versão com chapa de aço de qualidade S350 de com 1.00 mm de espessura. Na Figura 44 são apresentadas as propriedades referentes a esta geometria da chapa e na Tabela 16 os valores dos fatores de vistas em suas faces.

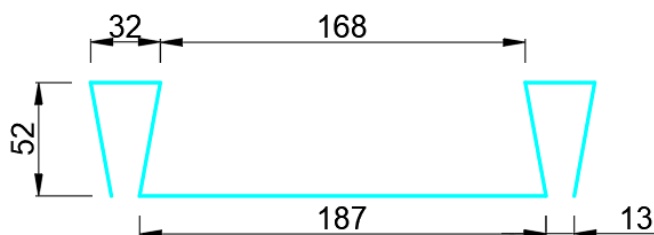


Figura 44 Dimensões Bondeck

Tabela 16 Fatores de vista Bondeck

Face	Fator de vista (Φ)
Inferior	1
Superior	0.12
alma	0.09

As condições iniciais da temperatura ambiente, condições de fronteira e os critérios de convergência utilizados nesse estudo foram os mesmos do modelo de validação. A umidade do concreto adotada foi a de 1.5%, coincidente com a umidade utilizada na laje F2 da validação.

Os 4 modelos de lajes mistas foram testados com 4 alturas diferentes, para estudar a influência da altura no critério de isolamento da estrutura. No total 6 tipos de curvas de incêndio paramétrico foram escolhidos para este estudo paramétrico, ambas geradas de acordo com as normas do Eurocódigo [18] como apresentadas na seção 7.2. Para esse estudo foram realizadas 96 simulações pelo programa MATLAB e 96 simulações pelo ANSYS.

O diagrama da Tabela 17 a seguir demonstra um esquema montado das 96 simulações que foram realizadas.

Tabela 17 Modelos térmicos elaborados para estudo paramétrico

Geometria	Altura de cobrimento (h1) (cm)	Curva de incêndio natural
Polideck 59s	50 , 70 , 90 , 100	qf,d= 285,400,780,1500 (O = 0.05) O= 0.02 , 0.1 (qf,d = 420)
Confraplus 60	50 , 70 , 90 , 100	qf,d= 285,400,780,1500 (O = 0.05) O= 0.02 , 0.1 (qf,d = 420)
Multdeck 50	50 , 70 , 90 , 100	qf,d= 285,400,780,1500 (O = 0.05) O= 0.02 , 0.1 (qf,d = 420)
Bondeck	50 , 70 , 90 , 100	qf,d= 285,400,780,1500 (O = 0.05) O= 0.02 , 0.1 (qf,d = 420)

Para controlar a evolução da temperatura na superfície não exposta ao fogo, é utilizado vinte nós nessa região, buscando encontrar a temperatura máxima e média para determinar o tempo de resistência ao fogo por isolamento. Cinco outros nós foram utilizados, sendo 3 deles localizados no meio do vão e 2 na flange superior à esquerda do centro.

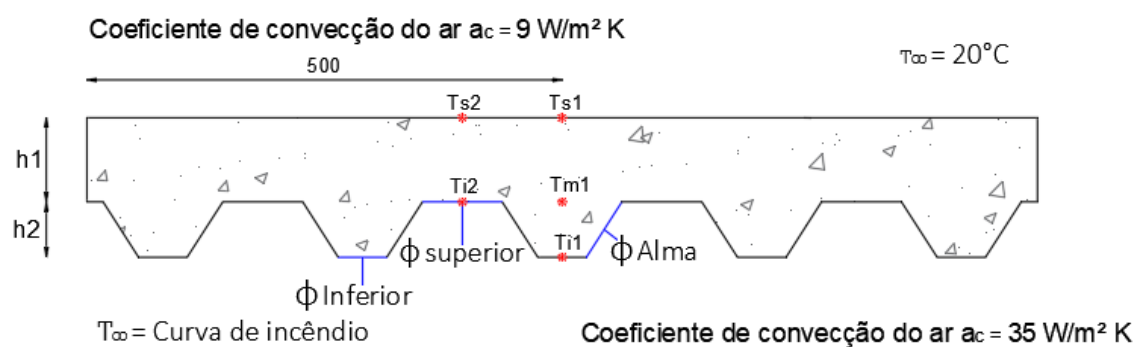


Figura 45 Laje mista Polideck 59S, para estudo paramétrico

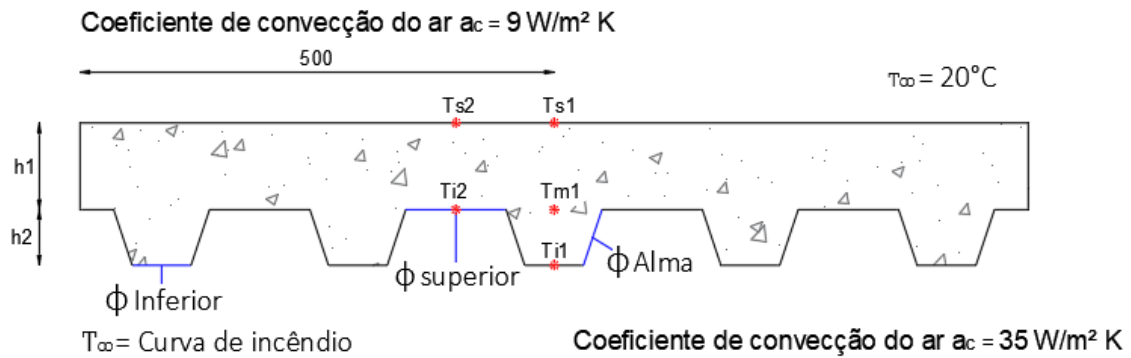


Figura 46 Laje mista Confraplus 60, para estudo paramétrico

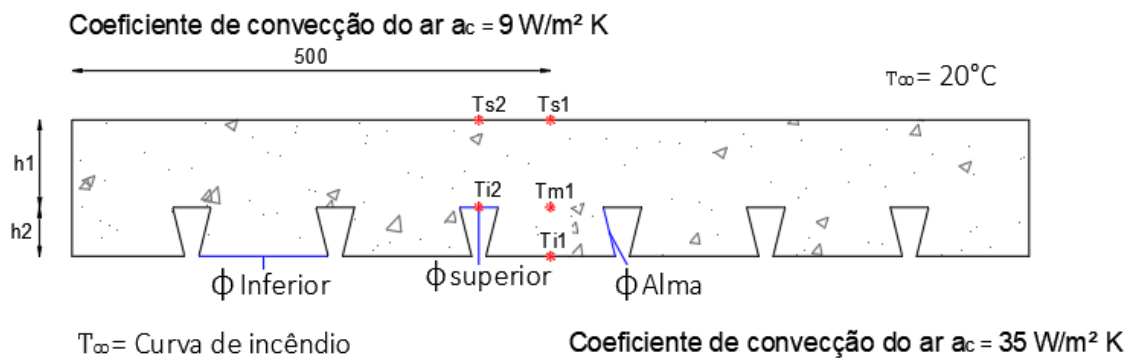


Figura 47 Laje mista Multideck 50, para estudo paramétrico

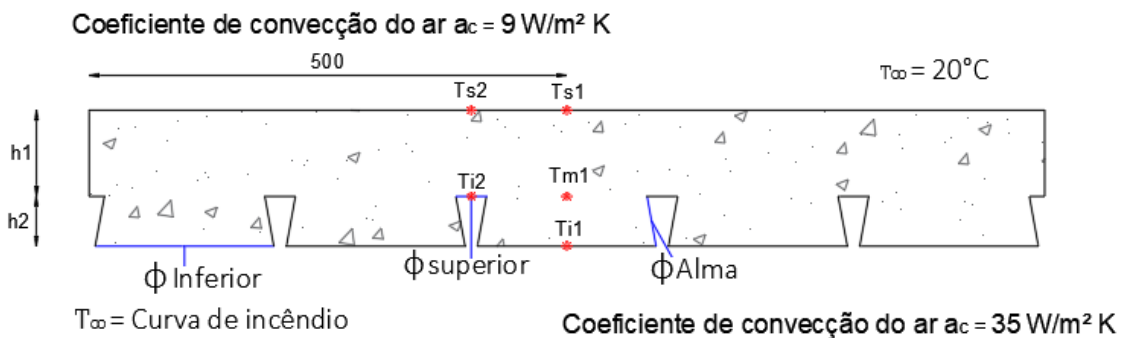


Figura 48 Laje mista Bondeck, para estudo paramétrico

10.2 RESISTÊNCIA AO CRITÉRIO DE ISOLAMENTO (I)

A seguir será apresentado gráficos para a evolução das temperaturas médias e máximas na face não exposta das lajes. Pretende-se determinar a resistência ao fogo, segundo o critério de isolamento (I), seguindo os critérios da norma EN 1363-1[27].

Na Figura 49, a seguir, é apresentada a comparação dos resultados das temperaturas médias e máximas para a laje Multideck 50, na face não exposta ao fogo, quando utilizados os programas ANSYS e MATLAB. Este modelo possui a chapa de aço

Multideck 50 para a altura h_1 igual a 50mm, sendo testado pelo incêndio paramétrico correspondente a uma densidade de carga de incêndio de $q_{f,d} = 1500 \text{ [MJ/m}^2\text{]}$.

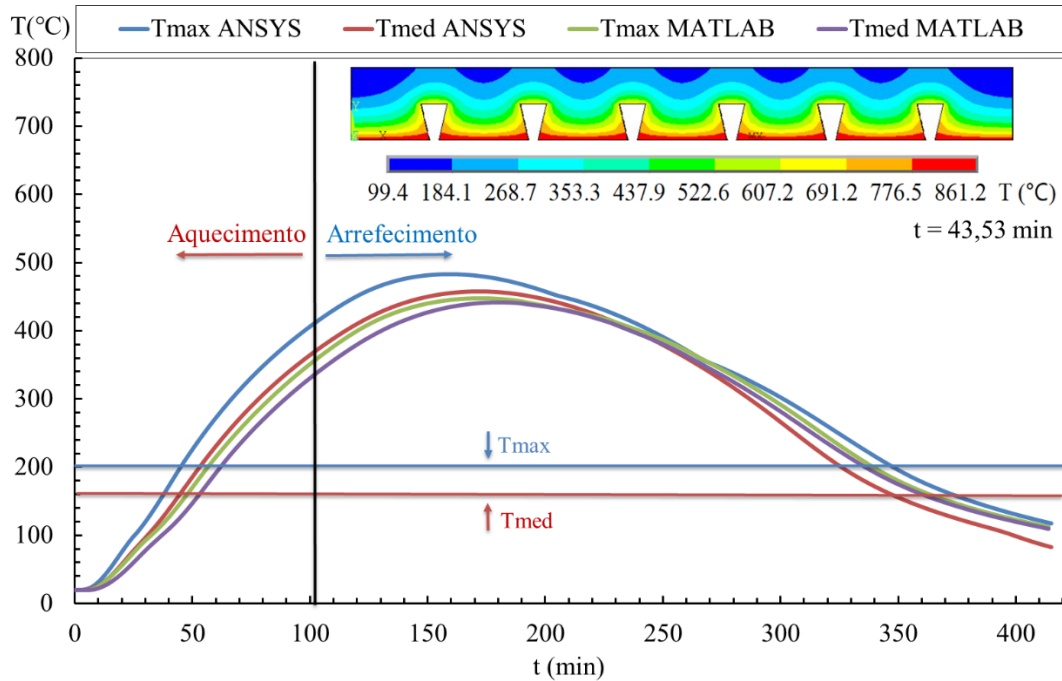


Figura 49 Curvas de resistência ao fogo segundo critério (I) Multideck 50 $h_1=50\text{mm}$
 $q_{f,d}= 1500 \text{ [MJ/m}^2\text{]}$

Neste modelo, os resultados obtidos pelo programa ANSYS registraram temperaturas máximas e médias superiores em comparação com os resultados obtidos com o programa MATLAB. Para a investigação do tempo de resistência ao fogo sobre o critério de isolamento t_i , foi escolhido o menor tempo entre os modelos temperatura máxima (Tmax) ou a temperatura média (Tmed). A imagem da laje demonstra as temperaturas no seu interior, quando um dos limites de resistência ao isolamento é atingido.

As linhas horizontais de cores azul e vermelha presentes, representadas na Figura 50 mostram as temperaturas para o limite do critério de isolamento da temperatura máxima e da temperatura média respectivamente. O ponto exato em que a curva da temperatura atinge a linha Tmax ou Tmed, representa o tempo " t_i " da resistência ao isolamento.

A linha vertical representa o tempo exato em que a temperatura do gás desta modelagem atingiu o seu valor máximo, servindo de divisória para o período de aquecimento (período antes de atingir a temperatura máxima) e arrefecimento (período após atingir a temperatura máxima). Neste caso, o compartimento possui uma densidade de carga de incêndio de $q_{f,d} = 1500 \text{ [MJ/m}^2\text{]}$, possui ainda um fator de abertura $o = 0.05 \text{ [m}^2\text{]}$, registrando a temperatura máxima do gás no instante de tempo de 103 minutos, após a ignição.

Nas Figuras 50-52 são apresentados os resultados obtidos nos programas Matlab e Ansys para chapa de aço Multideck 50, para as alturas h_1 iguais a 70mm, 90mm e 110mm, todas submetidos ao incêndio paramétrico, considerando uma densidade de carga de incêndio de $q_{f,d} = 1500 \text{ [MJ/m}^2\text{]}$.

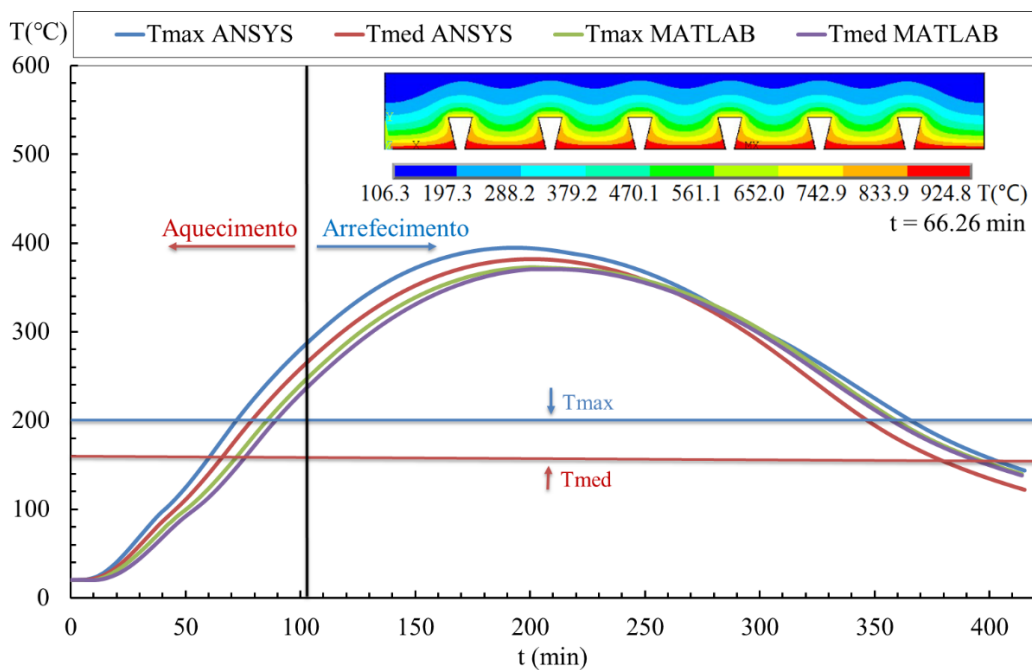


Figura 50 Curvas de resistência ao fogo segundo critério (I) Multideck 50 $h_1=70\text{mm}$
 $q_{f,d}= 1500 \text{ [MJ/m}^2\text{]}$

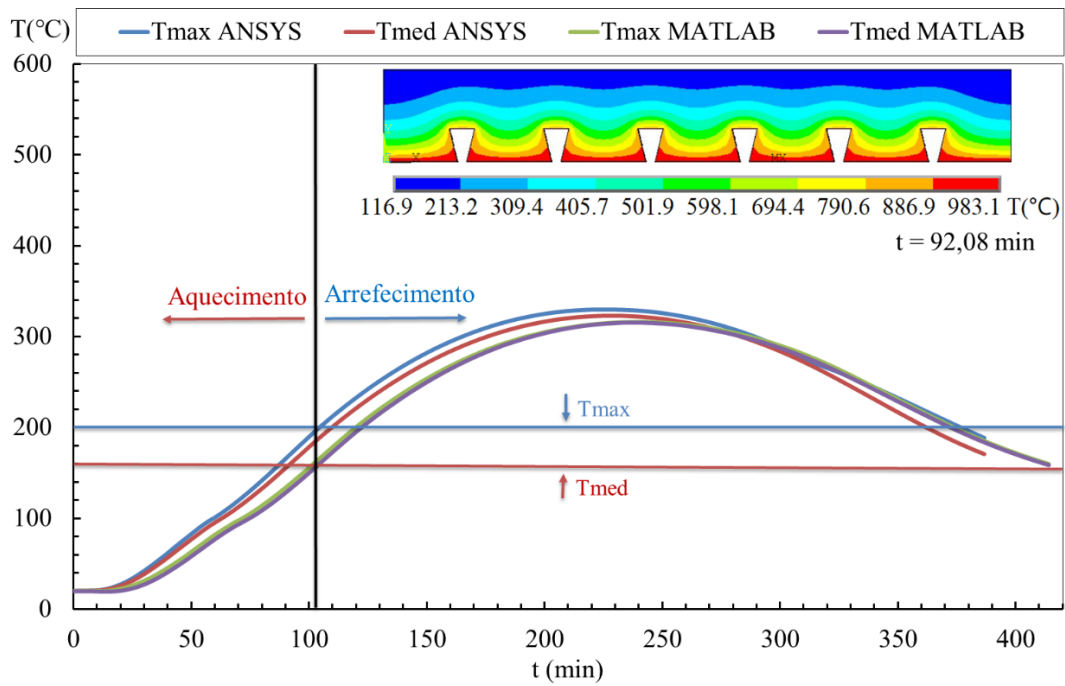


Figura 51 Curvas de resistência ao fogo segundo critério (I) Multideck 50 h1=90mm
 $q_{f,d} = 1500$ [MJ/m²]

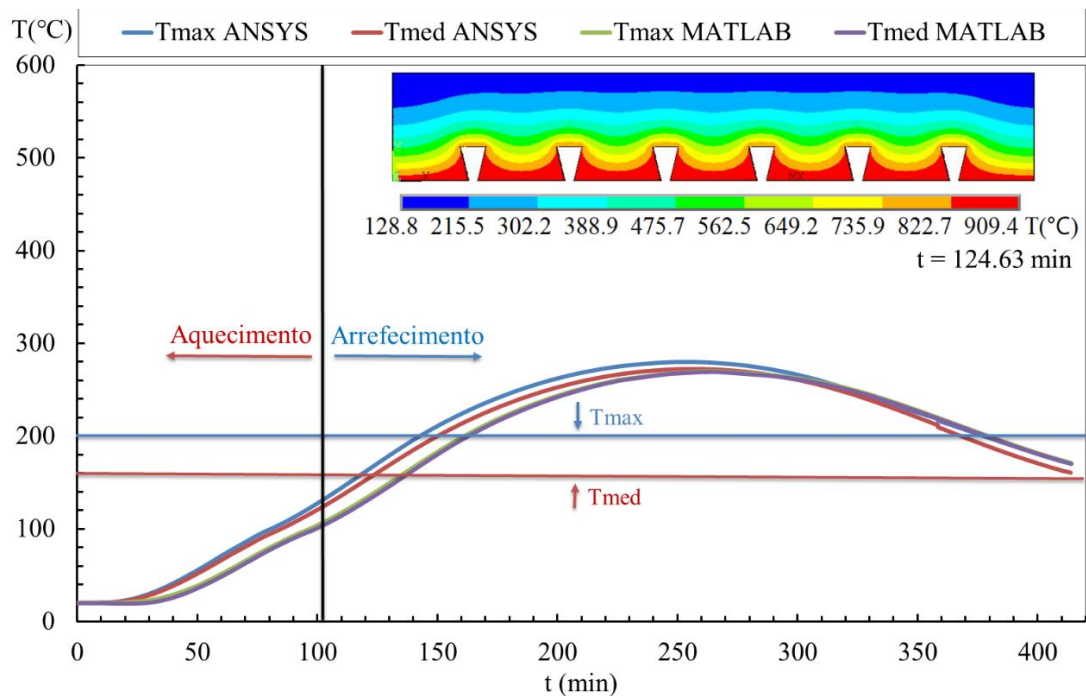


Figura 52 Curvas de resistência ao fogo segundo critério (I) Multideck 50 h1=110mm
 $q_{f,d} = 1500$ [MJ/m²]

Comparando as Figuras apresentadas, é possível ver os ganhos do tempo de resistência t_i e a redução das temperaturas quando se aumenta a espessura do concreto h_1 . A Tabela 18 a seguir mostra o tempo exato em que cada um destes modelos atingiu sua resistência limite ao isolamento (I).

Tabela 18 Tempo de resistência ao fogo (I) para laje mista Multideck 50, $q_{f,d} = 1500$ [MJ/m²]

Matlab (min)					Ansys(min)			
Altura (h1) (mm)	50	70	90	110	50	70	90	110
Tmax	56.38	85.31	119.75	160.05	44.95	72.07	104.36	142.61
Tmed	52.83	76.19	104.25	137.96	44.53	66.26	92.08	124.63

Para este modelo, o aumento da espessura h_1 em 20 mm resultou em um aumento médio do tempo de resistência ao fogo, segundo o critério de isolamento, em 39,7%. Comparando o aumento da espessura do concreto h_1 de 50mm para 110mm obteve um ganho total de 80 minutos, totalizando em um acréscimo na resistência de 171,23%.

O modelo do Multideck 50 que dispõe de uma altura h_1 de 110mm atingiu seu critério depois do instante de tempo correspondente à temperatura máxima dos gases (108 min), durante a fase de arrefecimento do compartimento de incêndio. Apesar da temperatura do gás estar reduzindo desde os 108 min, as temperaturas no interior da laje ainda permanecem em crescimento, por efeito da inércia térmica.

Nas Figuras 54-57, é apresentada a comparação dos resultados obtidos para a temperatura média e para a temperatura máxima na face não exposta ao fogo. Estes resultados são apresentados para a laje trapezoidal Confraplus 60. Neste exemplo, a laje foi aquecida com uma densidade de carga de incêndio de $q_{f,d} = 780$ [MJ/m²]. A temperatura máxima dessa curva de incêndio ocorre no instante de tempo de $t = 54$ min.

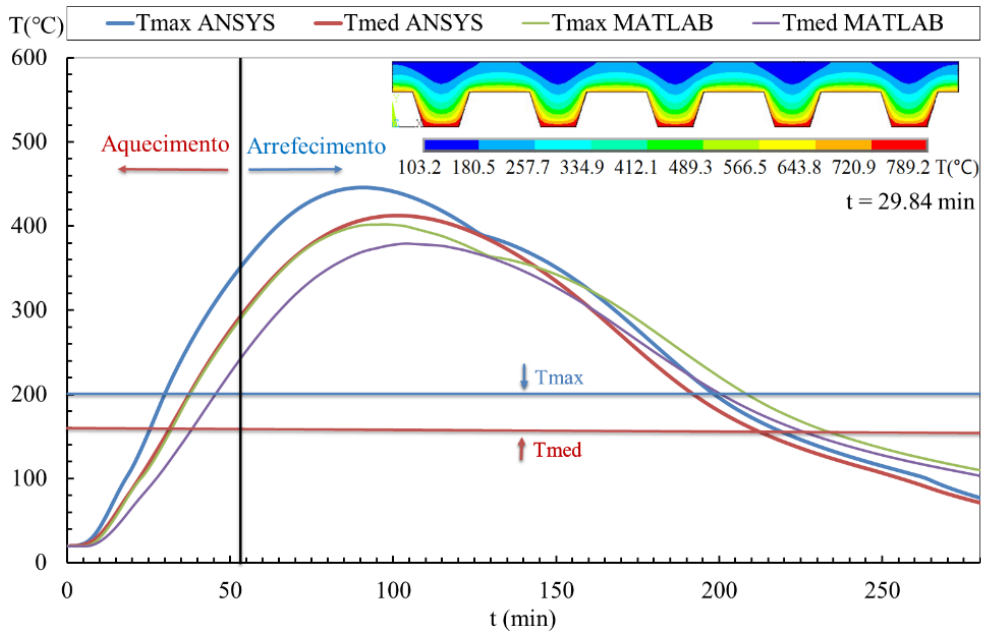


Figura 53 Curvas de resistência ao fogo segundo critério (I) Confraplus 60 h1=50mm
 $q_{f,d} = 780 \text{ [MJ/m}^2\text{]}$

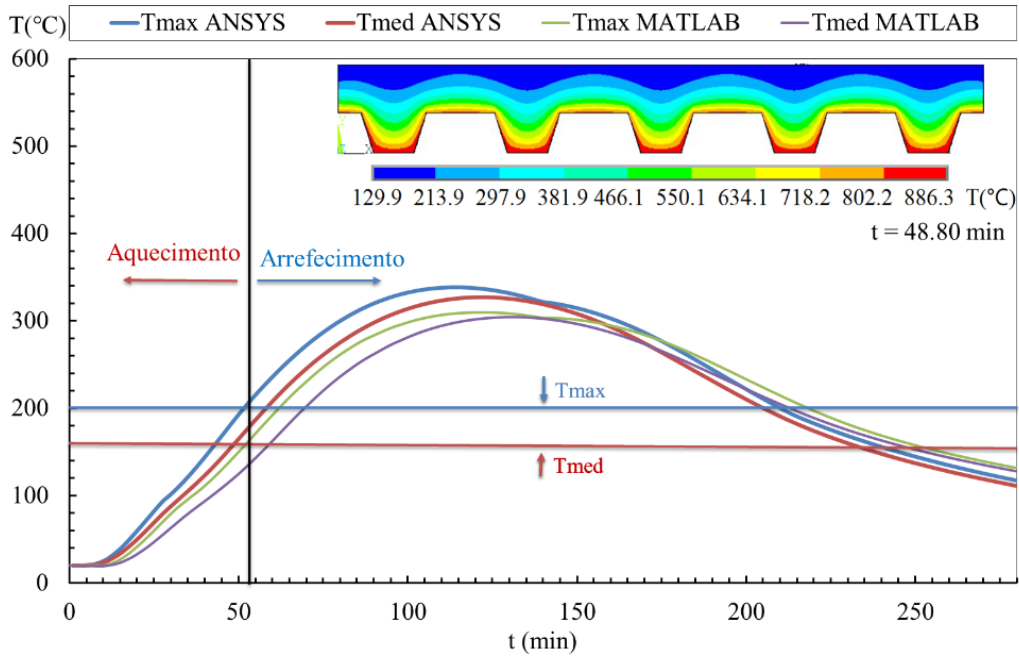


Figura 54 Curvas de resistência ao fogo segundo critério (I) Confraplus 60 h1=70mm
 $q_{f,d} = 780 \text{ [MJ/m}^2\text{]}$

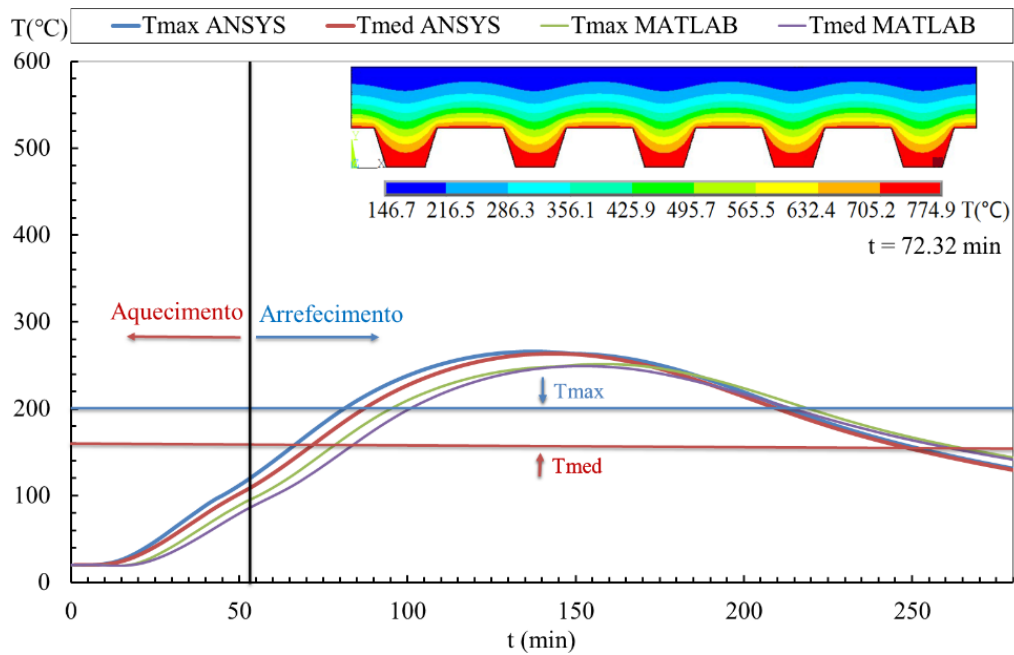


Figura 55 Curvas de resistência ao fogo segundo critério (I) Confraplus 60 $h_1=90\text{mm}$
 $q_{f,d}=780\text{ [Mj/m}^2\text{]}$

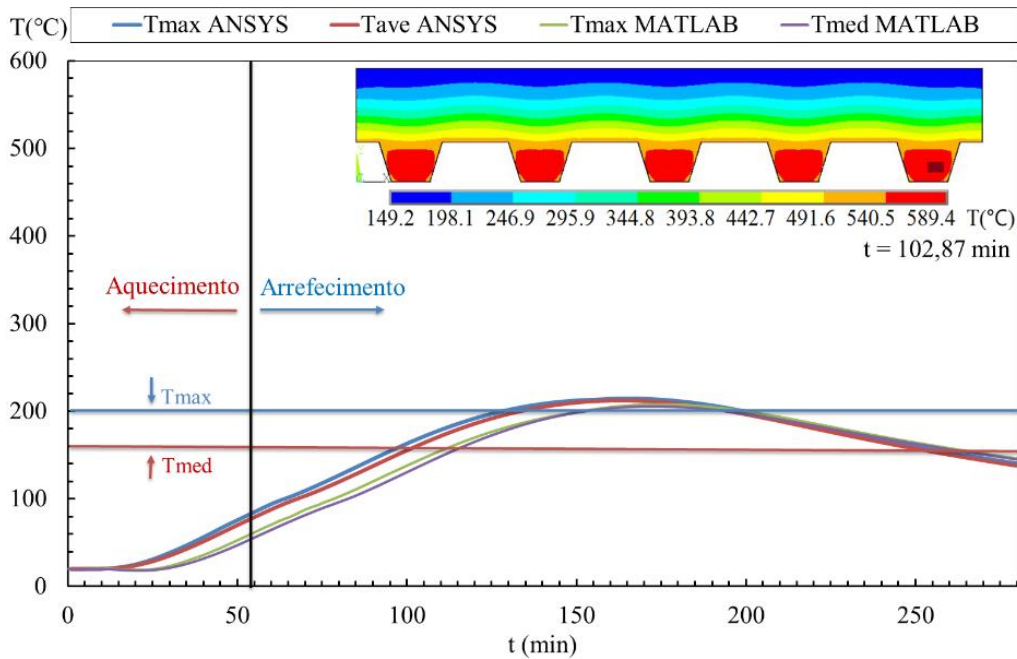


Figura 56 Curvas de resistência ao fogo segundo critério (I) Confraplus 60
 $h_1=110\text{mm}$ $q_{f,d}=780\text{ [Mj/m}^2\text{]}$

Tabela 19 Tempo de resistência ao fogo (I) para laje mista Confraplus 60,

$$q_{f,d} = 1500 \text{ [MJ/m}^2\text{]}$$

Matlab(min)	Ansys(min)								
	Altura (h1) (mm)	50	70	90	110	50	70	90	110
Tmax		37.84	62.03	95.04	151.11	29.84	51.51	81.08	128.15
Tmed		38.53	59.42	84.48	116.71	31.47	48.80	72.35	102.86

O perfil Confraplus 60 apresentou, para esta modelação, um ganho de médio de 51.32% no tempo de resistência ao critério de isolamento, isso quando aumentou a altura h1 em 20mm. Comparando o modelo h1 de 50mm com 110mm, há um ganho de 71,39 minutos, totalizando em 244,70% de acréscimo de resistência e sua temperatura máxima sofreu reduções de 482,71 °C para 280,075 °C. Mesmo com o fim do aquecimento aos 54 min, os modelos com 70mm e 110mm atingiram seu critério no tempo 72,35 e 102,86 min respectivamente.

Todos os resultados se apresentam resumidos no ANEXO I, com as especificações de cada modelo devidamente preenchida.

A seguir são realizadas comparações com o tempo de resistência ao fogo, demonstrando os casos em que o critério foi atingido na fase de aquecimento e os casos em que o critério foi atingido durante a fase de arrefecimento (por inércia) para os diferentes incêndios.

Estes resultados numéricos, vão permitir apresentar novos coeficientes para o método simplificado de cálculo, do tempo de resistência ao fogo por isolamento (t_i) para o caso de utilização de incêndios naturais.

A metodologia de cálculo simplificado é baseada na mesma equação apresentada no ANEXO D presente na norma EN 1994-1-2 [22], porém possui uma equação para os pontos que alcançaram o critério na fase de aquecimento e outra equação para os pontos que atingiram o critério na fase de arrefecimento.

Através da ferramenta solver presente no Excel, foram elaborado condições para que as únicas variáveis (os coeficientes $a_0, a_1, a_2, a_3, a_4, a_5$) encontrassem valores que introduzidos na equação (28), fosse possível determinar o tempo de resistência ao fogo t_i (min). O método de solução utilizado no solver (EXCEL) foi o Gradiente Reduzido

Generalizado (GRG) para problemas não lineares. A iteração é feita realizando primeiramente o cálculo utilizando os coeficientes para o aquecimento. Se o resultado obtido para esta iteração for um determinado tempo antes da temperatura máxima do incêndio, utiliza-se este resultado. Caso obtenha-se um tempo maior que o do pico de incêndio, refaz-se o cálculo, porém utilizando os coeficientes para a fase de arrefecimento.

A Figura 57 a seguir compara os resultados obtido pelos programas ANSYS ou MATLAB (M/A) para o menor tempo possível e os resultados obtidos pela nova proposta de cálculo simplificado (PROP) para uma densidade de carga de incêndio de $q_{f,d} = 1500$ [MJ/m²].

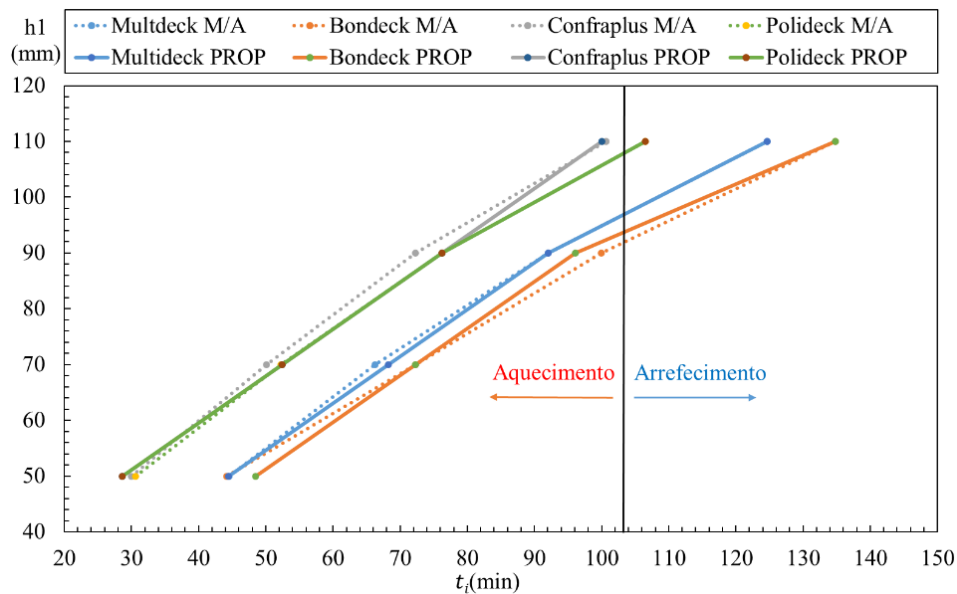


Figura 57 Tempo de resistência (t_i) $q_{f,d} = 1500$

Na Tabela 20 temos os novos coeficientes propostos, que foram utilizados para obter os pontos da Figura 57.

Tabela 20 Coeficientes propostos a_i para determinar a resistência ao fogo nesse cenário de incêndio paramétrico. ($q_{f,d} = 1500$; $O = 0.05$)

$$q_{f,d} = 1500, O = 0.05$$

	a_0	a_1	a_2	a_3	a_4	a_5
Aquecimento	-36,56	1,19	-28,19	1,04	265,54	-12,35
Arrefecimento	-21,04	1,156	-18,18	0,26	-103,81	26,17

Dentre os modelos que foram aquecidos para o incêndio de $q_{f,d} = 1500$, somente o Confraplus 60 não atingiu o limite de tempo exigido pela norma EN 1994-1-2[22] de 30 minutos, tendo sido obtido um tempo de resistência de 29.94 min. O aumento da espessura em 20mm resultou em um ganho médio de 26,44 min dentre os modelos. A laje mista Bondeck apresentou melhor resultados de resistência ao isolamento com um tempo de 134 min para a espessura de h_1 de 110mm.

A Figura a seguir compara os resultados obtido pelos programas ANSYS ou MATLAB (A/M) e os resultados obtidos pela nova proposta de cálculo simplificado (PROP) para o fogo $q_{f,d} = 780$.

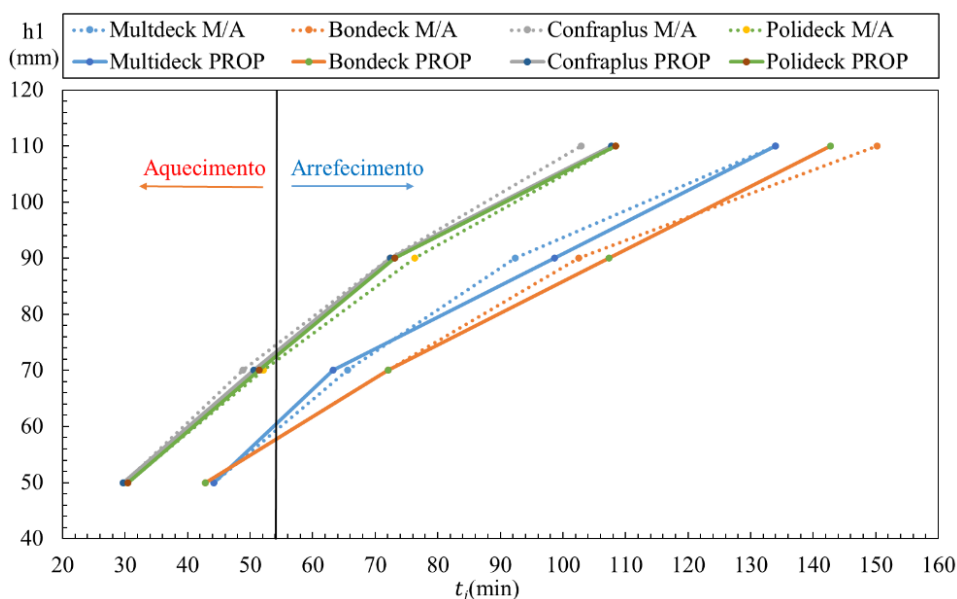


Figura 58 Tempo de resistência (t_i) $q_{f,d} = 780$

Na Tabela 21 a seguir temos os novos coeficientes propostos, que foram utilizados para obter os pontos da Figura 58.

Tabela 21 Coeficientes propostos a_i para determinar a resistência ao fogo nesse cenário de incêndio paramétrico ($q_{f,d} = 780$; $O = 0.05$)

$q_{f,d} = 780, O = 0.05$						
	a_0	a_1	a_2	a_3	a_4	a_5
Aquecimento	-8,04	1,04	4,14	-1,09	1355,35	-10,01
Arrefecimento	-72,67	1,77	-28,39	0,03	15,98	23,04

Neste caso de incêndio paramétrico, o tempo correspondente ao valor da temperatura máxima dos gases ocorre em $t = 54$ min. Após isso, A laje ainda permanece em aquecimento, porém, com elevações da temperatura menos acentuada, mas o suficiente para lajes atingirem o critério de resistência ao isolamento. O perfil Bondeck 50 para h1 110mm atingiu o critério de resistência t_i em $t = 150,2$ min. O aumento da espessura de h1 em 20mm resultou, para esta curva de incêndio, um ganho médio de 29 minutos entre os modelos. A laje mista Confraplus 60 com h1 de 50mm atingiu sua resistência em $t = 29,84$ min, sendo inferior ao mínimo exigido pelo Euro-código. A laje Bondeck obteve os melhores resultados dentre os modelos.

A Figura 59, a seguir, compara os resultados obtido pelos programas ANSYS ou MATLAB (A/M) e os resultados obtidos pela nova proposta de cálculo simplificado (PROP) para o cenário com uma densidade de carga de incêndio de $q_{f,d} = 400$ [MJ/m²].

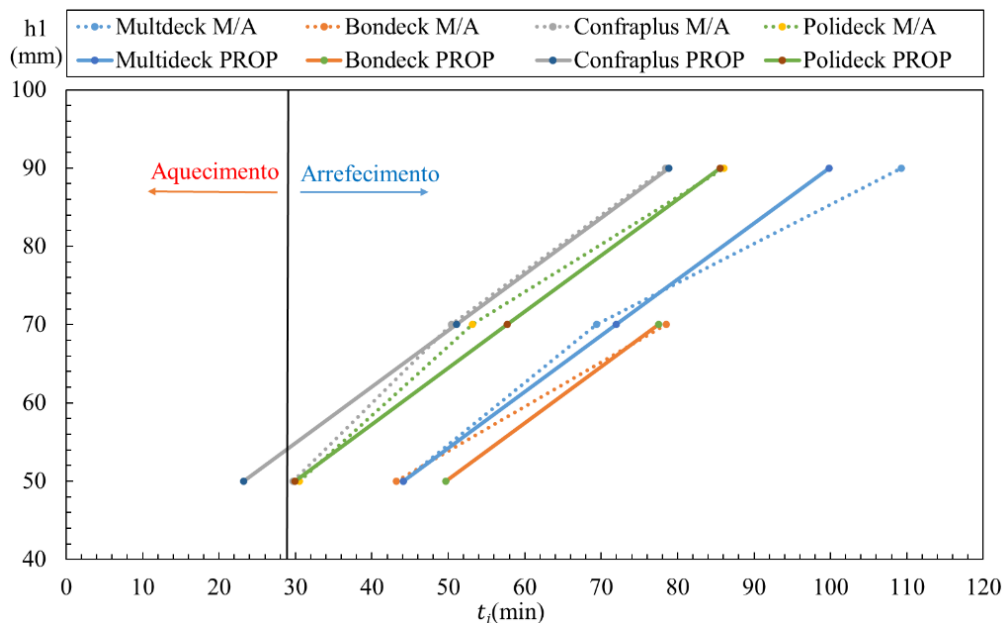


Figura 59 Tempo de resistência (t_i) $q_{f,d} = 400$

Na Tabela 22 a seguir temos os novos coeficientes propostos, que foram utilizados para obter os pontos da Figura 59.

Tabela 22 Coeficientes propostos a_i para determinar a resistência ao fogo nesse cenário de incêndio paramétrico ($q_{f,d} = 400; O = 0.05$)

$q_{f,d} = 400, O = 0.05$						
	a_0	a_1	a_2	a_3	a_4	a_5
Aquecimento	0	0	0	0	0	0
Arrefecimento	-95,70	1,39	29,77	0,17	3934,79	-56,83

Neste caso, todos os perfis que utilizaram h_1 de 110mm não atingiram o critério de isolamento. Para as lajes com altura h_1 de 90mm, somente o perfil Bondeck sucedeu sem atingir o limite de resistência. Todos os pontos obtidos nos programas Matlab ou Ansys atingiram esse critério na fase de arrefecimento.

A Figura a seguir compara os resultados obtido pelos programas ANSYS ou MATLAB (A/M) e os resultados obtidos pela nova proposta de cálculo simplificado (PROP) para um cenário de incêndio com um fator de abertura de $O = 0.1$ e uma densidade de carga de incêndio de $q_{f,d} = 420$.

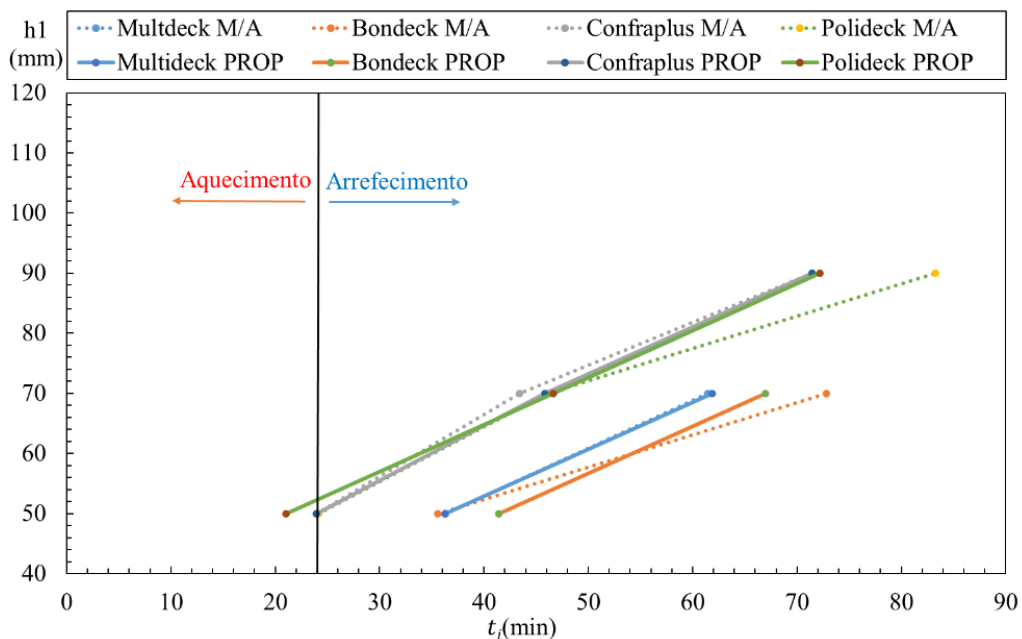


Figura 60 Tempo de resistência (t_i) $O = 0.1$

Na Tabela 23 a seguir temos os novos coeficientes propostos, que foram utilizados para obter os pontos da Figura 60.

Tabela 23 Coeficientes propostos a_i para determinar a resistência ao fogo nesse cenário de incêndio paramétrico ($O = 0.1$ $q_{f,d} = 420$)

$O = 0.1, q_{f,d} = 420$						
	a_0	a_1	a_2	a_3	a_4	a_5
Aquecimento	-57,03	1,28	0,54	0,26	849,80	6,45
Arrefecimento	-38,60	1,28	-13,88	0,008	267,53	9,16

O cenário de incêndio com um fator de abertura $O = 0.1$ possui menor duração, mas possui a maior taxa de aquecimento nos primeiros minutos, atingindo sua temperatura máxima de 1016 °C aos 24 min.

As lajes mistas Polideck 59s e Confraplus 60 para as alturas h_1 de 50mm atingiram o limite de resistência aos 24,14 min e 23,91 min respectivamente, tempo inferior ao mínimo requerido pelo Eurocódigo. O aumento da espessura de h_1 em 20mm resultou em um ganho médio de 28,16 minutos.

A Figura a seguir compara os resultados obtido pelos programas ANSYS ou MATLAB (A/M) e os resultados obtidos pela nova proposta de cálculo simplificado (PROP) para o cenário de incêndio com um fator de abertura de $O = 0.2$ e uma densidade de carga de incêndio de $q_{f,d} = 420$.

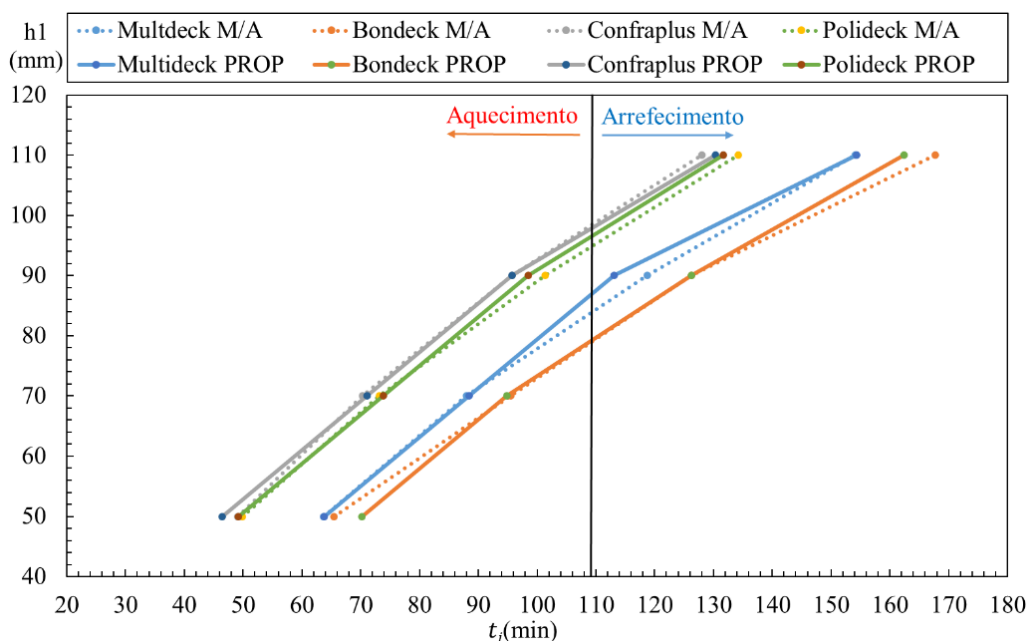


Figura 61 Tempo de resistência (t_i) $O = 0.02$

Na Tabela 24 a seguir temos os novos coeficientes propostos, que foram utilizados para obter os pontos da Figura 61.

Tabela 24 Coeficientes propostos a_i para determinar a resistência ao fogo nesse cenário de incêndio paramétrico ($O = 0.02$ $q_{f,d} = 420$)

$O = 0.02, q_{f,d} = 420$						
	a_0	a_1	a_2	a_3	a_4	a_5
Aquecimento	-30,07	1,23	-1,58	0,23	1271,23	-8,51
Arrefecimento	-61,48	1,81	-20,03	0,0086	386,54	15,21

Neste caso, todos os modelos de lajes mistas resistiram o tempo mínimo para o critério de isolamento exigido pelo Eurocódigo. O aumento da espessura de h_1 em 20mm resultou em um ganho médio de t_i em 29,65 min. Dentre as lajes, o Bondeck apresentou melhores resistência ao isolamento que as demais.

Apesar da curva de incêndio $q_{f,d} = 285$ possuir um maior tempo de duração em comparação a curva de incêndio $O = 0.1$, devido à sua temperatura máxima atingida não ser tão elevada, os critérios de isolamento não foram atingidos em nenhum dos modelos testados. Para mais detalhes ver os resultados de $q_{f,d} = 285$ presente no ANEXO I.

10.3 TEMPERATURA NOS COMPONENTES DE AÇO PELO MÉTODO DA CAPACIDADE RESISTENTE (C)

A seguir serão apresentados os resultados das temperaturas dos componentes de aços das lajes estudadas, obtidos por simulações, utilizando o programa ANSYS.

Seguindo a metodologia proposta pelo Eurocódigo EN1994-1.2 [22], para determinar a temperatura nas flanges (θ_a) e nos reforços longitudinais (θ_s) foram determinadas as temperaturas médias desses componentes, para os tempos de resistência ao fogo de 60 min, 90 min e 120min. Também serão apresentadas as temperaturas durante o fim da fase de aquecimento (instante correspondente ao tempo em que é atingida a temperatura máxima do gás do compartimento de incêndio).

Para encontrar a temperatura das flanges inferiores, foi calculado a média entre os 7 nós presentes no flange inferior localizado no centro da laje, como demonstram os pontos vermelhos na Figura 62.

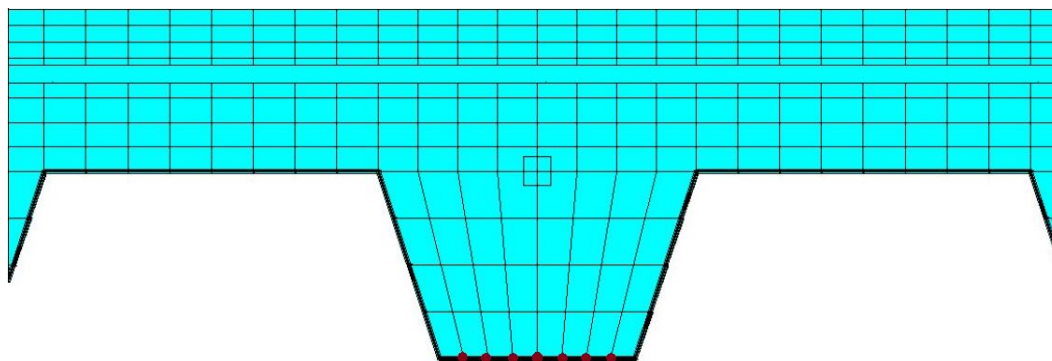


Figura 62 Nós flange inferior Confraplus60

Para encontrar a temperatura na alma da chapa, foi calculado a média entre os 3 nós presentes nesta componente, como mostram os pontos vermelhos na Figura 63.

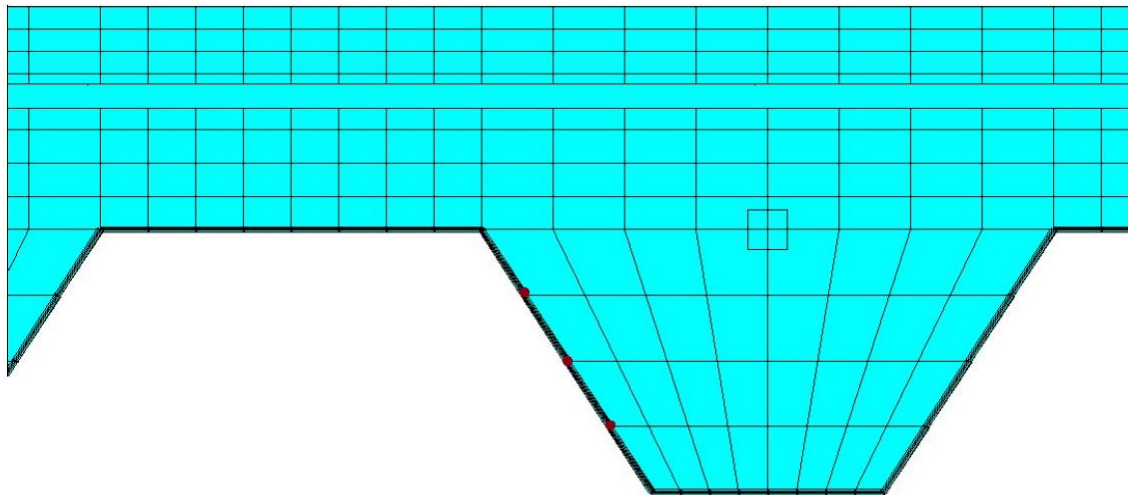


Figura 63 Nós flange lateral Polideck59s

Para encontrar a temperatura média das flanges superiores, foi calculada a média entre os 7 nós presentes no flange superior, como mostra os pontos vermelhos na Figura 64.

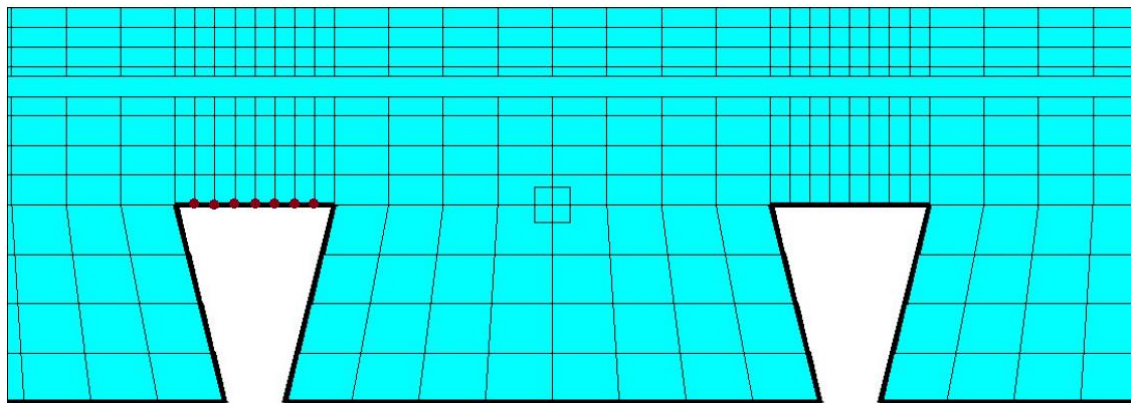


Figura 64 Nós flange lateral Multideck50

Para determinar a temperatura do reforço longitudinal de aço, foi retirada a temperatura do nó localizado no centro deste elemento, como mostra o ponto vermelho na Figura 65.

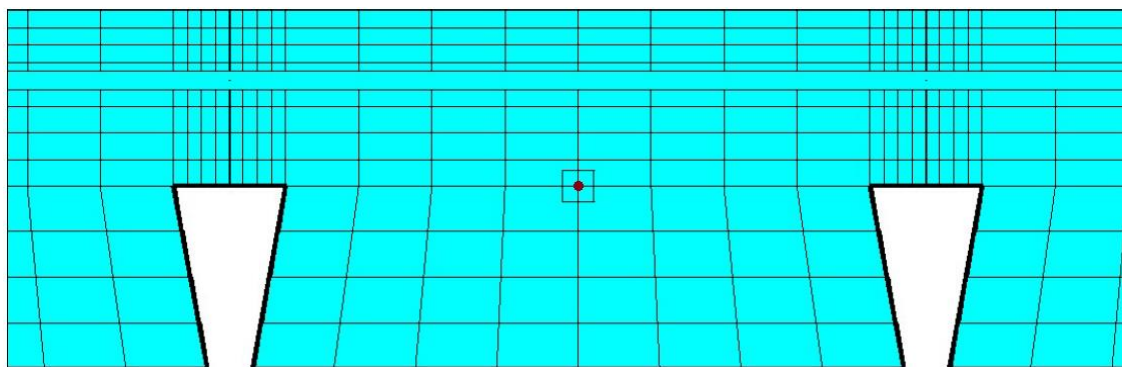


Figura 65 Nó vergalhão longitudinal Bondeck

Foi utilizada a equação (34) fornecida pelo Eurocódigo para encontrar a temperatura de cada componente θ_a . Devido aos coeficientes b_0 , b_1 , b_2 , b_3 e b_4 estarem vinculado a uma curva de incêndio padrão, foi utilizado o comando solver presente no Excel para determinar os novos coeficientes propostos para o cálculo numérico.

A criação de cada coeficiente levava em consideração o somatório da diferença entre todos os 4 perfis de laje mista. Foi criado coeficientes para cada altura h1, para os tempos 60, 90 e 120 min e considerados ainda o instante correspondente ao período de aquecimento de cada curva.

A seguir será apresentado os coeficientes para 60 minutos do decorrer do incêndio $q_{f,d} = 1500$.

Tabela 25 Coeficientes propostos b_i para curva de incêndio paramétrico

$q_{f,d} = 1500$ em $t = 60$ min

Resistência ao fogo (min)	Região da chapa de aço	h1	b_0 [°C]	b_1 [°C].mm	b_2 [°C].mm	b_3 [°C]	b_4 [°C]
60	Flange inferior	50	305,07	-449,79	0,09	306,25	306,25
		70	305,13	-457,25	0,07	306,33	306,33
		90	309,38	-461,55	0,08	301,91	306,28
		110	304,98	-469,17	0,08	306,21	306,21
	Alma	50	801,35	-31,32	-1,70	381,34	-269,56
		70	797,35	-31,64	-1,76	387,43	-271,28
90		797,59	-31,90	-1,88	391,83	-272,64	

	Flange superior	110	797,79	-32,11	-1,97	395,57	-273,49
		50	1431,42	61,01	-24,51	-628,49	1010,13
		70	1275,98	27,19	-19,86	-393,74	745,39
		90	1168,30	29,38	-16,59	-226,19	557,16
		110	1094,70	20,41	-14,35	-111,40	429,44

Utilizando o mesmo conceito para a componente do reforço θ_s , são propostos novos coeficientes para c_0, c_1, c_2, c_3, c_4 e c_5 . Na Tabela 26 serão demonstrados os coeficientes para determinar a temperatura do reforço longitudinal, para o instante de 60 min, no caso de um cenário de incêndio $q_{f,d} = 1500$ [MJ/m²].

Tabela 26 Coeficientes propostos c_i para curva de incêndio paramétrico $q_{f,d} = 1500$ em $t = 60$ min

Resistência ao fogo (min)	Região da chapa de aço	h1	c_0 [°C]	c_1 [°C]	c_2 [°C].mm ^{0.5}	c_3 [°C].mm	c_4 [°C]/ ⁰	c_5 [°C].mm
60	Vergalhão Long.	50	- 1634,40	359,66	3076,23	-205,46	-3,93	- 5575,21
		70	- 1607,69	340,63	2998,93	-199,77	-3,77	- 5446,77
		90	- 1767,07	318,36	3181,01	-209,44	-3,84	- 5827,69
		110	- 1659,64	338,63	3069,04	-204,16	-3,83	- 5586,08

As Figuras 66-69 mostram os resultados das temperaturas na flange superior, alma, flange inferior e reforços, obtidos pelo programa Ansys (Ans) e utilizando os novos coeficientes propostos (Prop) da Tabela 26.

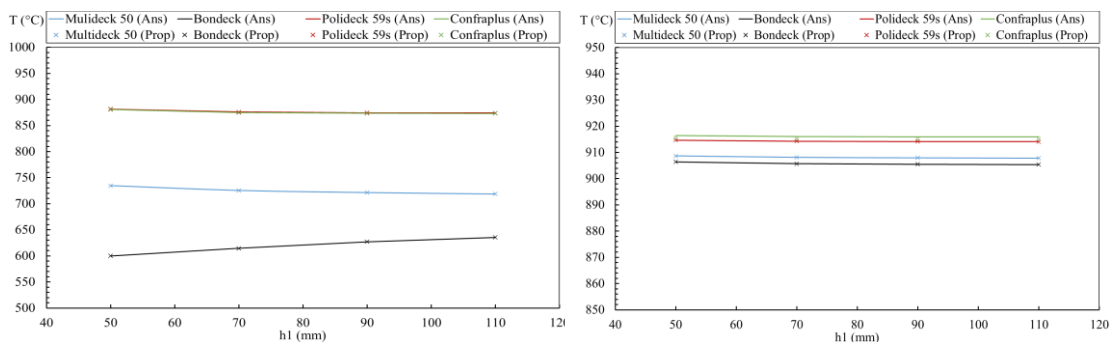


Figura 66 Temperatura Flange superior aos 60min $q_{f,d} = 1500$

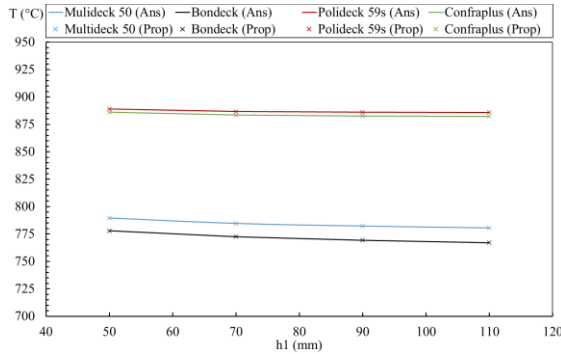


Figura 67 Temperatura Flange inferior aos 60min $q_{f,d} = 1500$

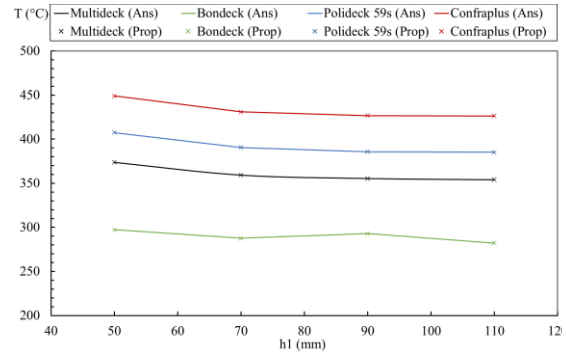


Figura 68 Temperatura da Alma aos 60min $q_{f,d} = 1500$

Figura 69 Temperatura do reforço aos 60min $q_{f,d} = 1500$

As temperaturas determinadas para cada uma das componentes, utilizando os coeficientes propostos pelo cálculo simplificado, obtiveram resultados muito próximos aos resultados do programa Ansys. Para a flange superior, alma e reforços, os coeficientes propostos apresentaram o tempo exato ao obtido pelo programa Ansys. Na flange inferior ocorre um erro máximo de 0,83 °C somente para a laje Confraplus60.

A seguir serão apresentados os coeficientes necessários para uma resistência ao fogo de isolamento de 120 minutos do decorrer do incêndio $q_{f,d} = 1500$.

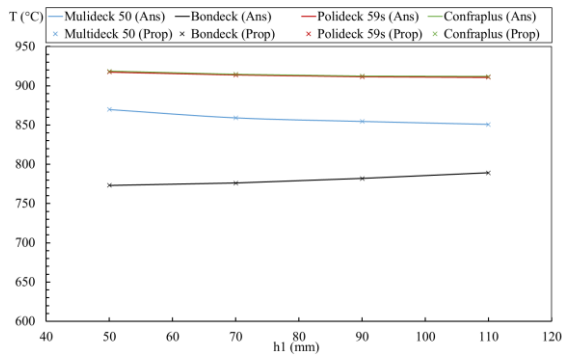


Figura 70 Temperatura Flange superior aos 120min $q_{f,d} = 1500$

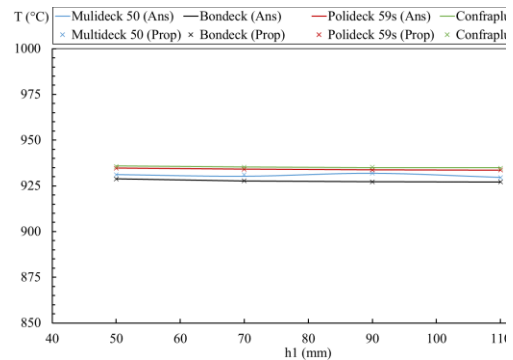


Figura 71 Temperatura Flange inferior aos 120min $q_{f,d} = 1500$

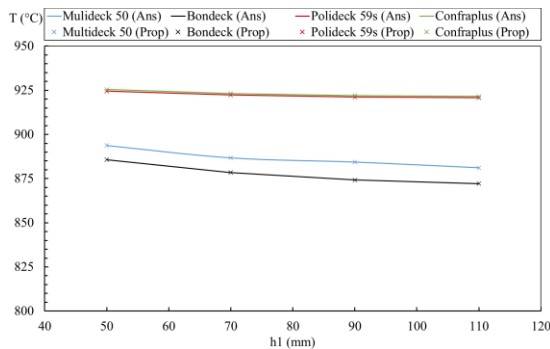


Figura 72 Temperatura da Alma aos 120min
 $q_{f,d} = 1500$

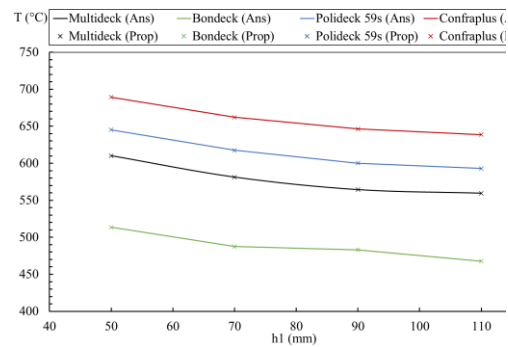


Figura 73 Temperatura reforço aos 120min
 $q_{f,d} = 1500$

Em todos os resultados sobre as variáveis lajes mistas, os coeficientes propostos apresentaram um excelente resultado. Para a temperatura da alma, da flange superior e reforços longitudinais, os resultados seguiram com uma assertividade de 100% para todos os modelos. Nos flanges inferiores, houve um erro máximo de $-0,92\text{ }^{\circ}\text{C}$.

A seguir será apresentado as tabelas contendo todos os coeficientes propostos para as curvas de incêndio paramétrico identificadas por $q_{f,d} = 1500, 780, 400$ e $O = 0.02$. No ANEXO II serão apresentados os resultados obtidos no Ansys e com o cálculo simplificado utilizando os coeficientes propostos para cada um dos componentes de aço. Os coeficientes propostos são somente para o concreto convencional, não podendo ser utilizados para os concretos leves.

Resistência ao fogo (min)	Região da chapa de aço	h_1	b_0 [°C]	b_1 [°C].mm	b_2 [°C].mm	b_3 [°C]	b_4 [°C]
60	Flange inferior	50	305,07	-449,79	0,09	306,25	306,25
		70	305,13	-457,25	0,07	306,33	306,33
		90	309,38	-461,55	0,08	301,91	306,28
		110	304,98	-469,17	0,08	306,21	306,21
	Alma	50	801,35	-31,32	-1,70	381,34	-269,56
		70	797,35	-31,64	-1,76	387,43	-271,28
		90	797,59	-31,90	-1,88	391,83	-272,64
		110	797,79	-32,11	-1,97	395,57	-273,49
	Flange superior	50	1431,42	61,01	-24,51	-628,49	1010,13
		70	1275,98	27,19	-19,86	-393,74	745,39
		90	1168,30	29,38	-16,59	-226,19	557,16
		110	1094,70	20,41	-14,35	-111,40	429,44
90		50	328,31	-353,50	0,02	329,23	329,23

	Flange inferior	70	328,05	-376,50	0,04	329,03	329,03
		90	327,94	-344,85	0,01	328,83	328,83
		110	327,76	-387,64	0,06	328,77	328,77
	Alma	50	916,45	-24,66	-1,88	279,98	-194,04
		70	902,20	-26,59	-1,76	307,15	-215,73
		90	897,14	-27,24	-1,74	316,90	-222,29
		110	896,62	-27,50	-1,81	321,28	-224,19
	Flange superior	50	1580,81	71,90	-24,76	-792,94	1113,99
		70	1424,98	52,71	-20,35	-544,93	845,18
		90	1311,51	39,00	-16,98	-369,51	650,32
		110	1234,54	29,70	-14,64	-250,72	517,53
	103	Flange inferior	50	337,54	-367,68	0,0012	338,48
70			336,45	-318,75	0,08	337,26	337,26
90			337,30	-349,37	-0,03	338,20	338,20
110			336,67	-367,72	0,04	337,63	337,63
Alma		50	950,39	-23,40	-1,76	259,14	-179,91
		70	937,20	-25,21	-1,66	284,66	-200,41
		90	932,56	-26,65	-1,71	303,38	-218,06
		110	931,71	-26,64	-1,76	304,03	-216,98
Flange superior		50	1610,51	72,58	-24,29	-806,99	1111,16
		70	1463,11	54,37	-20,11	-571,71	855,87
		90	1349,67	39,33	-16,84	-378,31	642,03
		110	1272,96	30,56	-14,49	-267,09	516,20
120	Flange inferior	50	313,07	-281,69	-0,10	313,79	313,79
		70	302,09	-262,39	-0,31	321,83	321,83
		90	316,88	-213,18	-0,56	317,42	317,42
		110	312,70	-318,92	-0,08	313,52	313,52
	Alma	50	915,54	-14,57	-1,27	131,93	-99,03
		70	907,74	-15,87	-1,30	151,41	-113,46
		90	913,19	-15,79	-1,61	151,44	-109,74
		110	903,47	-16,93	-1,41	166,87	-124,38
	Flange superior	50	1408,87	57,44	-18,15	-648,79	844,08
		70	1308,52	44,90	-15,40	-485,89	669,46
		90	1238,60	36,47	-13,34	-378,09	549,58
		110	1165,50	27,45	-11,16	-262,27	421,97

Tabela 27 Coeficientes propostos b_i para curva de incêndio paramétrico

$$q_{fd} = 780$$

Resistência ao fogo (min)	Região da chapa de aço	h1	b_0 [°C]	b_1 [°C].mm	b_2 [°C].mm	b_3 [°C]	b_4 [°C]
54 (temperatura máxima do gás)	Flange inferior	50	241,85	-528,69	0,15	329,29	329,29
		70	205,55	-663,72	0,50	357,68	329,25
		90	205,62	-313,07	-0,39	375,03	329,44
		110	205,28	-540,93	0,03	367,82	328,56
	Alma	50	764,94	-34,27	-1,40	419,97	-309,88

		70	751,84	-36,09	-1,21	443,61	-333,69
		90	753,14	-33,59	-1,24	417,12	-295,10
		110	769,93	-32,87	-1,90	409,74	-281,03
	Flange superior	50	1184,23	30,90	-17,73	-243,77	581,58
		70	1038,65	12,51	-13,55	-7,94	320,09
		90	970,97	8,50	-11,27	41,42	264,25
		110	939,24	4,42	-10,36	94,42	207,14
60	Flange inferior	50	288,67	-517,57	0,08	289,98	289,98
		70	288,58	-527,78	0,14	288,34	289,83
		90	273,89	-532,15	0,13	294,76	298,27
		110	288,53	-704,07	0,29	288,30	290,27
	Alma	50	774,76	-26,49	-1,28	308,59	-232,40
		70	761,77	-27,84	-1,08	327,24	-248,75
		90	761,09	-27,97	-1,14	330,03	-248,62
		110	769,34	-25,77	-1,43	308,53	-210,81
	Flange superior	50	1173,53	35,39	-16,52	-327,23	606,09
		70	1041,20	19,21	-12,74	-119,18	377,63
		90	966,82	10,39	-10,47	-6,22	252,62
		110	944,24	12,43	-9,54	-31,68	288,01
90	Flange inferior	50	215,68	-557,25	-0,2208	217,16	217,16
		70	214,54	-577,57	-0,15	216,08	216,08
		90	20,75	-550,49	-0,16	409,08	215,92
		110	20,75	-581,49	-0,13	409,10	215,91
	Alma	50	634,10	-11,12	-0,96	94,90	-96,73
		70	626,09	-11,92	-1,03	107,34	-104,47
		90	620,43	-12,09	-0,93	110,18	-106,26
		110	618,90	-12,17	-0,89	111,20	-107,47
	Flange superior	50	773,92	12,76	-6,69	-110,78	185,02
		70	729,95	7,87	-5,86	-45,64	120,48
		90	694,56	4,34	-4,89	-0,81	70,42
		110	673,25	2,05	-4,20	27,87	37,09
120	Flange inferior	50	146,37	-392,89	-0,45	147,42	147,42
		70	144,70	-427,53	-0,37	145,84	145,84
		90	143,67	-432,77	-0,32	144,82	144,82
		110	143,48	-422,22	-0,33	144,61	144,61
	Alma	50	466,66	-5,11	-1,26	23,33	-41,14
		70	455,43	-5,81	-1,20	34,19	-49,83
		90	447,55	-6,06	-1,09	38,14	-53,66
		110	445,00	-5,94	-1,04	36,66	-52,51
	Flange superior	50	484,81	1,53	-1,87	-4,80	-14,95
		70	480,12	1,63	-2,25	-3,33	-7,92
		90	470,00	1,42	-2,21	-0,57	-9,43
		110	463,89	1,56	-2,06	-3,35	-8,32

Tabela 28 Coeficientes propostos bi para curva de incêndio paramétrico

qfd = 400

Resistência ao fogo (min)	Região da chapa de aço	h1	b_0 [°C]	b_1 [°C].mm	b_2 [°C].mm	b_3 [°C]	b_4 [°C]
28 (temperatura máxima do gás)	Flange inferior	50	255,52	-564,82	0,24	257,01	257,01
		70	257,44	-583,99	0,08	258,98	258,98
		90	259,00	-560,45	-0,12	260,48	260,48
		110	252,81	-696,56	0,61	254,66	254,66
	Alma	50	586,19	-32,45	-1,06	427,27	-273,60
		70	582,86	-34,47	-1,09	451,12	-301,58
		90	586,51	-97,31	-1,19	435,39	-278,05
		110	568,46	-35,03	-0,83	462,69	-304,30
	Flange superior	50	865,27	15,72	-14,36	-27,68	429,10
		70	743,76	-1,41	-10,81	192,13	183,66
		90	680,53	-8,20	-8,91	279,35	88,66
		110	626,23	-15,25	-7,50	366,39	0,34
60	Flange inferior	50	184,71	-723,40	-0,17	186,64	186,64
		70	200,85	-717,15	-0,11	167,93	186,32
		90	183,67	-722,85	-0,11	185,59	185,59
		110	200,85	-717,15	-0,11	167,93	186,32
	Alma	50	519,46	-13,72	-0,91	137,84	-132,87
		70	508,97	-13,88	-0,73	141,00	-135,13
		90	507,93	-13,88	-0,74	141,38	-134,75
		110	496,20	-15,15	-0,39	157,21	-152,61
	Flange superior	50	630,88	6,33	-6,41	-20,11	120,00
		70	575,25	1,10	-4,98	45,32	44,82
		90	546,89	-1,74	-4,12	80,87	3,53
		110	516,12	-5,94	-3,23	134,87	-53,27
90	Flange inferior	50	111,16	-607,66	-0,3243	112,78	112,78
		70	110,06	-593,70	-0,2101	107,58	111,65
		90	107,93	-569,59	-0,19	109,45	109,45
		110	106,80	-589,11	-0,07	108,38	108,38
	Alma	50	347,73	-7,72	-1,18	67,12	-80,88
		70	334,01	-7,85	-0,99	69,61	-83,64
		90	328,18	-7,60	-0,87	66,49	-81,40
		110	320,68	-8,08	-0,66	72,57	-88,69
	Flange superior	50	351,57	-4,07	-1,46	67,32	-78,70
		70	340,58	-3,42	-1,58	59,32	-68,01
		90	332,36	-2,56	-1,44	46,97	-58,16
		110	321,43	-3,21	-1,12	54,08	-66,67
120	Flange inferior	50	45,06	-550,66	0,65	46,54	46,54
		70	42,77	-543,95	0,70	44,23	44,23
		90	41,30	-480,43	0,71	42,59	42,59
		110	39,06	-466,67	0,84	40,11	42,41
	Alma	50	173,28	-3,39	-0,86	36,60	-21,47
		70	162,54	-4,01	-0,75	44,08	-31,26

		90	154,43	-3,81	-0,61	41,10	-30,88
		110	146,69	-3,67	-0,39	39,51	-30,46
	Flange superior	50	157,04	-4,77	0,63	60,20	-85,72
		70	162,44	-4,16	0,02	55,31	-73,81
		90	160,38	-2,68	-0,13	36,21	-54,74
		110	154,33	-1,46	0,04	19,87	-39,59

Tabela 29 Coeficientes propostos b_i para curva de incêndio paramétrico

$$O = 0.02$$

Resistência ao fogo (min)	Região da chapa de aço	h1	b_0 [°C]	b_1 [°C].mm	b_2 [°C].mm	b_3 [°C]	b_4 [°C]
60	Flange inferior	50	221,34	-600,60	-0,08	222,93	222,93
		70	220,49	-607,38	-0,01	222,10	222,10
		90	224,38	-688,55	-0,65	236,58	222,01
		110	219,31	-688,42	0,08	224,03	220,59
	Alma	50	560,14	-21,45	-1,27	263,19	-179,78
		70	549,97	-22,52	-1,10	276,86	-194,35
		90	575,26	-20,86	-2,10	258,89	-165,14
		110	410,67	41,26	3,23	228,26	-22,32
	Flange superior	50	752,49	12,30	-10,63	-41,01	292,08
		70	658,27	0,56	-7,98	108,52	123,72
		90	650,48	0,19	-7,84	113,88	119,91
		110	578,47	-9,18	-5,67	231,16	-11,66
90	Flange inferior	50	241,49	-506,03	-0,08	242,82	242,82
		70	240,39	-522,79	0,01	241,77	241,77
		90	240,18	-526,13	0,02	241,57	241,57
		110	240,16	-529,42	0,02	241,55	241,55
	Alma	50	654,29	-19,76	-1,51	229,94	-160,80
		70	638,67	-21,04	-1,27	247,99	-176,18
		90	636,27	-21,04	-1,29	249,19	-174,94
		110	637,14	-21,07	-1,38	250,15	-174,19
	Flange superior	50	889,92	19,70	-11,31	-149,17	363,79
		70	795,11	8,39	-8,84	-2,46	206,62
		90	744,36	2,85	-7,39	68,18	127,96
		110	713,51	-0,87	-6,50	115,85	75,48
118 (temperatura máxima do gás)	Flange inferior	50	256,77	-432,17	-0,0900	257,90	257,90
		70	256,35	-454,91	0,0278	254,48	257,49
		90	255,69	-440,46	-0,04	256,85	256,85
		110	254,98	-451,32	0,03	256,16	256,16
	Alma	50	712,74	-17,71	-1,43	197,73	-135,19
		70	704,12	-19,34	-1,47	219,58	-154,65
		90	699,20	-19,76	-1,46	226,13	-158,61
		110	695,47	-20,10	-1,42	231,33	-162,04

	Flange superior	50	964,66	24,06	-11,21	-214,07	404,67
		70	887,66	14,06	-9,34	-82,55	268,22
		90	833,19	7,68	-7,89	0,25	179,66
		110	796,36	0,86	-6,85	55,60	119,78
120	Flange inferior	50	237,06	-401,66	-0,19	269,15	269,15
		70	220,19	-450,68	0,01	280,23	268,85
		90	249,20	-447,74	-0,01	233,41	286,48
		110	255,44	-455,39	0,03	235,61	276,86
	Alma	50	714,85	-17,71	-1,40	196,35	-136,64
		70	706,42	-19,12	-1,44	215,87	-152,73
		90	701,33	-19,55	-1,43	222,73	-157,03
		110	698,22	-19,89	-1,41	227,76	-160,39
	Flange superior	50	970,34	24,52	-11,24	-221,43	408,55
		70	890,32	14,32	-9,29	-87,21	269,48
		90	836,41	8,02	-7,85	-5,39	182,37
		110	800,51	3,79	-6,85	49,36	123,29

Tabela 30 Coeficientes propostos c_i para curva de incêndio paramétrico

$$q_{fd} = 1500$$

Resistência ao fogo (min)	Região da chapa de aço	h1	c_0 [°C]	c_1 [°C]	c_2 [°C]. $mm^{0.5}$	c_3 [°C]. mm	c_4 [°C]/ 0	c_5 [°C]. mm
60	Reforços	50	-1634,4	359,66	3076,23	-205,46	-3,93	- 5575,21
		70	-1607,7	340,63	2998,93	-199,77	-3,77	- 5446,77
		90	-1767,1	318,36	3181,01	-209,44	-3,84	- 5827,69
		110	-1659,6	338,63	3069,04	-204,16	-3,83	- 5586,08
90	Reforços	50	-1603,8	452,28	3223,10	-217,35	-4,24	- 5752,84
		70	-1651,3	431,41	3248,10	-218,09	-4,22	- 5826,69
		90	-1814,6	400,25	3417,46	-226,53	-4,23	- 6193,35
		110	-1686,5	420,12	3275,20	-219,46	-4,17	- 5891,70
103 temperatura máxima do gás	Reforços	50	-1536,6	478,68	3181,36	-215,37	-4,23	- 5640,83
		70	-1617,3	459,34	3256,97	-219,40	-4,27	- 5811,09
		90	-1796,3	426,54	3445,45	-228,97	-4,30	- 6216,79

		110	-1662,2	445,12	3292,00	-221,17	-4,22	- 5895,31
120	Reforços	50	-1394,8	503,38	3029,51	-206,34	-4,10	- 5316,15
		70	-1499,5	486,43	3144,28	-212,95	-4,20	- 5559,31
		90	-1793,3	452,11	3493,77	-232,42	-4,39	- 6279,79
		110	-1554,6	470,20	3189,66	-215,38	-4,15	- 5666,37

Tabela 31 Coeficientes propostos c_i para curva de incêndio paramétrico

qfd = 780

Resistência ao fogo (min)	Região da chapa de aço	h1	c_0 [°C]	c_1 [°C]	c_2 [°C]. $mm^{0.5}$	c_3 [°C]. mm	c_4 [°C]/ 0	c_5 [°C]. mm
54 (temperatura máxima do gás)	Reforços	50	-1603,3	335,94	2982,94	-198,90	-3,78	- 5420,85
		70	-1589,67	319,40	2929,47	-194,78	-3,65	- 5336,29
		90	-1603,58	318,44	2947,40	-195,97	-3,65	- 5372,05
		110	-1645,83	319,31	3009,57	-199,93	-3,71	- 5492,38
60	Reforços	50	-1623,28	362,29	3065,73	-204,95	-3,93	- 5551,99
		70	-1623,26	342,36	3024,73	-201,44	-3,80	- 5495,16
		90	-1630,18	340,58	3030,98	-201,88	-3,79	- 5509,09
		110	-1671,67	341,34	3091,82	-205,76	-3,84	- 5627,05
90	Reforços	50	-1153,17	413,09	2498,27	-170,45	-3,48	- 4386,92
		70	-1209,34	391,11	2533,38	-171,77	-3,45	- 4480,25
		90	-1191,63	380,44	2486,15	-168,47	-3,34	- 4400,31
		110	-1178,76	379,65	2466,10	-167,28	-3,31	- 4362,50
120	Reforços	50	-291,88	341,49	1119,97	-80,03	-1,90	- 1782,66
		70	-401,38	327,00	1246,64	-87,51	-2,01	- 2046,99
		90	-415,80	314,59	1241,74	-86,82	-1,95	- 2051,85

		11 0	-380,60	308,91	1179,74	-82,81	-1,86	- 1937,75
--	--	---------	---------	--------	---------	--------	-------	--------------

Tabela 32 Coeficientes propostos c_i para curva de incêndio paramétrico

$q_{fd} = 400$

Resistência ao fogo (min)	Região da chapa de aço	h1	c_0 [°C]	c_1 [°C]	c_2 [°C].mm ^{0.5}	c_3 [°C].mm	c_4 [°C]/ ⁰	c_5 [°C].mm
28 (temperatura máxima do gás)	Reforços	50	- 1149,36	176,63	2006,35	-132,06	-2,38	- 3703,76
		70	- 1321,50	158,35	2214,83	-143,66	-2,49	- 4132,20
		90	- 1272,68	166,29	2161,39	-141,12	-2,46	- 4018,20
		110	- 1191,81	167,96	2049,20	-134,50	-2,31	- 3797,61
60	Reforços	50	- 1181,42	320,78	2348,75	-158,44	-3,17	- 4202,67
		70	- 1263,27	284,92	2392,03	-158,89	-3,04	- 4329,03
		90	- 1145,10	297,69	2249,33	-151,27	-2,95	- 4035,90
		110	- 1126,24	300,34	2227,83	-150,23	-2,92	- 3990,72
90	Reforços	50	-402,03	273,87	1138,23	-79,53	-1,84	- 1897,70
		70	-489,18	247,55	1208,68	-82,61	-1,82	- 2065,96
		90	-407,94	242,74	1082,65	-74,89	-1,66	- 1825,83
		110	-364,96	241,62	1018,88	-71,00	-1,58	- 1702,94
120	Reforços	50	191,16	146,08	34,36	-4,18	-0,43	104,52
		70	109,20	144,75	141,88	-11,17	-0,55	-106,70
		90	75,40	129,29	158,41	-11,50	-0,49	-157,00
		110	125,36	122,71	73,87	-6,03	-0,37	0,09

Tabela 33 Coeficientes propostos c_i para curva de incêndio paramétrico

$O=0.02$

Resistência ao fogo (min)	Região da chapa de aço	h1	c_0 [°C]	c_1 [°C]	c_2 [°C].mm ^{0.5}	c_3 [°C].mm	c_4 [°C]/ ⁰	c_5 [°C].mm
---------------------------	------------------------	----	------------	------------	------------------------------	---------------	--------------------------	---------------

60	Reforços	50	- 1083,54	239,37	2041,32	-136,39	-2,56	- 3699,00
		70	- 1062,25	231,85	1995,42	-133,25	-2,49	- 3618,35
		90	-971,89	243,26	1889,64	-127,77	-2,43	- 3399,22
		110	880,68	295,53	-1386,55	87,48	3,12	- 5456,86
90	Reforços	50	- 1141,15	330,13	2310,44	-155,79	-3,09	- 4117,37
		70	- 1168,99	310,67	2310,22	-154,92	-3,02	- 4139,43
		90	- 1148,22	304,89	2268,62	-152,18	-2,94	- 4065,67
		110	- 1173,44	304,20	2303,24	-154,37	-2,97	- 4133,91
118 (temperatura máxima do gás)	Reforços	50	- 1065,59	370,87	2286,31	-154,79	-3,14	- 4022,32
		70	- 1131,66	356,36	2350,93	-158,41	-3,17	- 4165,01
		90	- 1135,19	345,57	2333,76	-156,96	-3,10	- 4144,52
		110	- 1146,53	342,67	2344,00	-157,55	-3,09	- 4167,93
120	Reforços	50	- 1056,32	373,07	2277,60	-154,27	-3,13	- 4002,75
		70	- 1126,42	358,94	2348,74	-158,31	-3,17	- 4157,86
		90	- 1133,63	348,07	2336,68	-157,19	-3,11	- 4147,30
		110	- 1143,46	344,99	2344,37	-157,61	-3,09	- 4166,10

11. CONCLUSÕES

O objetivo deste trabalho foi investigar a influência da espessura do concreto na resistência de lajes mistas de aço e concreto com chapa de aço colaborante, quando sujeitas a um cenário incêndio natural. As lajes foram modeladas pelo método de elementos finitos, utilizando o auxílio dos programas ANSYS e MATLAB.

Para realizar o estudo paramétrico foi desenvolvido um modelo numérico, baseando-se no resultado de 3 testes experimentais reais, com curvas de aquecimento distintas. As modelagens foram feitas considerando o contato perfeito entre o concreto e

a chapa de aço colaborante e considerando a existência de pequenas espessuras de ar entre esses elementos (contato imperfeito) de 0.5mm, 1mm, 1.5mm e 2.0mm.

Em geral, os modelos numéricos realizados com o contato perfeito entre a chapa de aço e o concreto previram resultados satisfatório, porém com temperaturas normalmente superiores ao ensaio experimental. A consideração da camada de ar entre estes elementos gerou um papel de isolamento fundamental para a redução da temperatura e uma maior aproximação do modelo numérico com o resultado experimental. Os modelos feito com a espessura da camada de ar 0.5mm apresentaram, em geral, os melhores resultados dentre os modelos.

O estudo paramétrico realizado contou com um total de 196 simulações. Destas, existiam 4 tipos diferentes de geometrias (2 reentrante e 2 trapezoidais). Os modelos também possuíam 4 tipos de altura h_1 (50mm, 70mm, 90mm e 110mm) e foram testados para 6 cenários diferentes de curvas de incêndio.

Foram realizadas análises sobre o critério ao isolamento (I) para a temperatura máxima e média da superfície não exposta das diferentes espessuras de concreto, encontrando o tempo de resistência ao fogo (t_i) para cada modelo do estudo paramétrico. A resistência ao fogo (t_i) em geral foi governada em grande parte dos cenários pela temperatura média. Para cada um dos cenários de curva de incêndio foi proposto coeficientes a_i para o cálculo simplificado do tempo de resistência ao fogo (t_i).

A resistência ao fogo (t_i) em grande parte dos cenários foi atingida durante a fase de aquecimento da estrutura. Mesmo com a temperatura do gás em decaimento, o fluxo de calor no interior da laje permitiu acréscimos das temperaturas na superfície não exposta ao incêndio.

Utilizando os valores de temperatura obtidos no programa Ansys, foi manuseado a metodologia para encontrar a temperatura nos componentes de aço das lajes mistas presente no critério de carga (R). Em seguida foram apresentadas propostas para o cálculo simplificado dos parâmetros b_i e c_i para cada cenário e tipo de geometria.

BIBLIOGRAFIA:

[1] Wright, H. D. (1998). Composite slabs. *Progress in Structural Engineering and Materials*, 1(2), 178–184. <https://doi.org/10.1002/pse.2260010210>

[2] Li, G., & Wang, P. (2013). Fire-Resistance of Composite Concrete Slabs. *Advanced Topics in Science and Technology in China*, 33(94), 245–280. https://doi.org/10.1007/978-3-642-34393-3_9

[3] Guo, S. (2012). Experimental and numerical study on restrained composite slab during heating and cooling. *Journal of Constructional Steel Research*, 69(1), 95–105. <https://doi.org/10.1016/j.jcsr.2011.08.009>

[4] Bailey, C. G., White, D. S., & Moore, D. B. (2000). The tensile membrane action of unrestrained composite slabs simulated under fire conditions. *Engineering Structures*, 22(12), 1583–1595. [https://doi.org/10.1016/S0141-0296\(99\)00110-8](https://doi.org/10.1016/S0141-0296(99)00110-8)

[5] Chen, S., & Shi, X. (2011). Shear bond mechanism of composite slabs - A universal FE approach. *Journal of Constructional Steel Research*, 67(10), 1475–1484. <https://doi.org/10.1016/j.jcsr.2011.03.021>

[6] Herrmann, H., & Bucksch, H. (2014). Eurocode 4 - Design of composite steel and concrete structures. *Dictionary Geotechnical Engineering/Wörterbuch GeoTechnik*, (February 2008), 486–486. https://doi.org/10.1007/978-3-642-41714-6_51757

[7] Both, C., & Stark, J. W. B. (2000). Fire exposed composite steel-concrete slabs. *Proceedings of the Conference: Composite Construction in Steel and Concrete IV*, 756–767. [https://doi.org/10.1061/40616\(281\)66](https://doi.org/10.1061/40616(281)66)

[8] Both, C. (1998). *The fire resistance of composite steel-concrete slabs* (p. 191). p. 191. Retrieved from <https://www.narcis.nl/publication/RecordID/oai:tudelft.nl:uuid:946124ca-cd5d-4b61-a9f2-d1f4e3799bab>

[9] Jaeger, J. C. (1950). Conduction of heat in composite slabs. *Quarterly of Applied Mathematics*, 8(2), 187–198. <https://doi.org/10.1090/qam/36417>

[10] UoE. (2000). PIT Project: Behaviour of steel framed structures under fire conditions MAIN REPORT (Cardington). (June).

[11] Brown, M. (2004). Client Report : Prepared for : Prepared on behalf of BRE by Approved on behalf of BRE by. *Building*, (219683).

[12] Lennon, T., & Moore, D. (2003). The natural fire safety concept - Full-scale tests at Cardington. *Fire Safety Journal*, 38(7), 623–643.

[13] Wald, F., Simões da Silva, L., Moore, D. B., Lennon, T., Chladná, M., Santiago, A., ... Borges, L. (2006). Experimental behaviour of a steel structure under natural fire. *Fire Safety Journal*, 41(7), 509–522.
<https://doi.org/10.1016/j.firesaf.2006.05.006>

[14] Huang, Z., Burgess, I. W., & Plank, R. J. (2000). Effective stiffness modelling of composite concrete slabs in fire. *Engineering Structures*, 22(9), 1133–1144.
[https://doi.org/10.1016/S0141-0296\(99\)00062-0](https://doi.org/10.1016/S0141-0296(99)00062-0)

[15] Lienhard IV, J. H., & Lienhard V, J. H. (2017). A HEAT TRANSFER TEXTBOOK, fourth edition. *Phlogiston Press*, 766. <https://doi.org/978-04864793161>

[16] J. Fourier, *Analytical Theory of Heat* (1878), Cambridge: Cambridge University Press.

[17] Y. A. Çengel and A. J. Ghajar (2015), *Heat and mass transfer: fundamentals & applications*, Fifth edit. New York: McGraw-Hill Education.

[18] CEN - European Committee for Standardization (2002), EN 1991-1-2: Actions on structures - Part 1-2: General actions - Actions on structures exposed to fire. Brussels.

[19] Stanley, C. (1982) – Highlights in the History of Concrete, C&CA.

[20] Fernando Freire Ribeiro (2019), Numerical simulation of composite slabs with steel deck under fire conditions. *School of Technology and Management (ESTiG) Polytechnic Institute of Bragança*.

[21] CEN - European Committee for Standardization, EN 1994-1-1 (2011), Projeto de estruturas mistas de aço e concreto - Parte 1-1: Regras gerais para edifícios, CEN – European Committee for Standardization.

[22] CEN - European Committee for Standardization, EN 1994-1-2 (2005), Projeto de estruturas mistas de aço e concreto Parte 1-2: Regras gerais verificação da resistência ao fogo, CEN – European Committee for Standardization

[23] CEN - European Committee for Standardization, EN 1992-1-2 (2004): Design of concrete structures - Part 1-2: General rules - Structural fire design. Brussels.

[24] CEN - European Committee for Standardization, EN 1993-1-2 (2005): Design of steel structures - Part 1-2: General rules - Structural fire design. Brussels.

[25] Abu, A. K. (2008). Behaviour of Composite Floor Systems in Fire. (October), 204.

[26] International Organization of Standardization, ISO 834: Fire Resistance Tests - Elements of Building Construction, Genova: ISO, 1999.

[27] CEN, EN 1363-1 (2020): Fire Resistance Tests - General Requirements, Brussels: European Committee of Standardization.

[28] Gernay, T., & Franssen, J. M. (2015). A performance indicator for structures under natural fire. *Engineering Structures*, 100, 94–103. <https://doi.org/10.1016/j.engstruct.2015.06.005>

[29] D. L. Logan (2007), *A first course in the Finite Element Method*, 4th ed. Platteville: Thomson.

[30] ANSYS, “Mechanical APDL 18.2 - Academic version.” 2018.

[31] MathWorks, “Partial Differential Equation Toolbox™ User’s Guide R2019a,” Natick, MA, 2019.

[32] Guo, S., & Bailey, C. G. (2011). Experimental behaviour of composite slabs during the heating and cooling fire stages. *Engineering Structures*, 33(2), 563–571. <https://doi.org/10.1016/j.engstruct.2010.11.014>

[33] Dos Santos WN (2000). Experimental investigation of the effect of moisture on thermal conductivity and specific heat of porous ceramic materials. *J Mater Sci* ;35 (16):3977–82.

[34] ABNT NBR 14323 (2013): Structural fire design of steel and composite steel and concrete structures for buildings [in portuguese]. Brazil: ABNT/CB-002, p. 66.

[35] P. Piloto, C. Balsa, F. Ribeiro, L. Santos, R. Rigobello e É. Kimura (2019), “Three-Dimensional Numerical Modelling of Fire Exposed Composite Slab With Steel Deck,” MATTER: International Journal of Science and Technology, vol. 5, nº 2, pp. 48-67.

[36] P. Piloto, C. Balsa, F. Ribeiro, R. Rigobello, L. Santos e É. Kimura (2019), “Validation Models on the Fire Resistance of Composite Slab With Steel Deck,” Congress on Numerical Methods in Engineering, pp. 625-642.

[37] P. Piloto, C. Balsa, L. Santos e É. Kimura (2019), “Effect of the Load Level in the Resistance of Composite Slabs With Steel Decking Under Fire Conditions,” Journal of Fire Sciences.

[38] C. Balsa, L. Santos, P. Piloto e É. Kimura (2019), “Effect of the Load Level in the Fire Resistance of Composite Slab with Steel Decking,” Congresso Ibero-Latino-Americano em Segurança contra Incêndio.

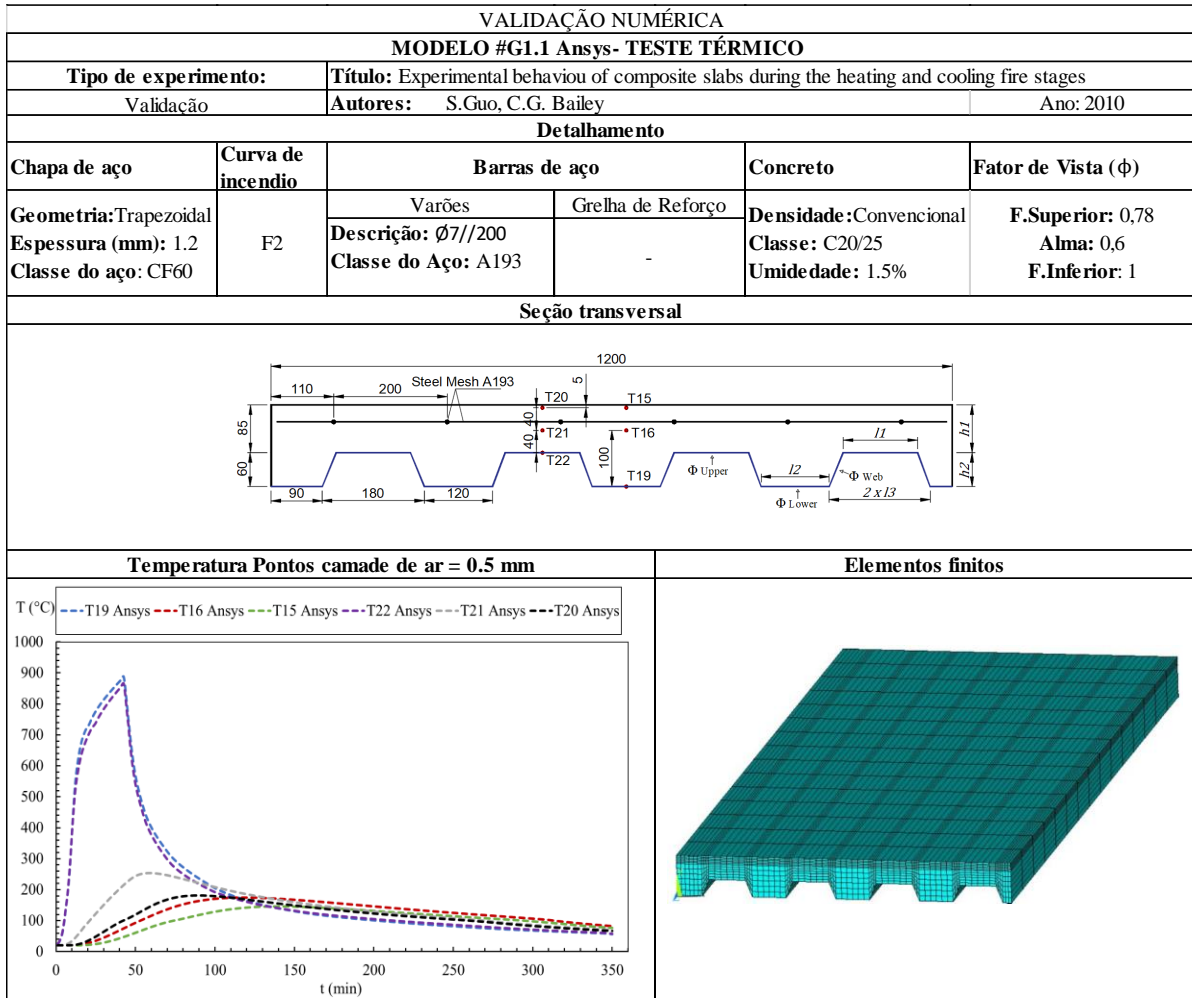
[39] Sharma, S., Vaddamani, V. T., & Agarwal, A. (2019). Insulation effect of the concrete slab-steel deck interface in fire conditions and its influence on the structural fire behavior of composite floor systems. *Fire Safety Journal*, 105(December 2018), 79–91. <https://doi.org/10.1016/j.firesaf.2019.02.006>.

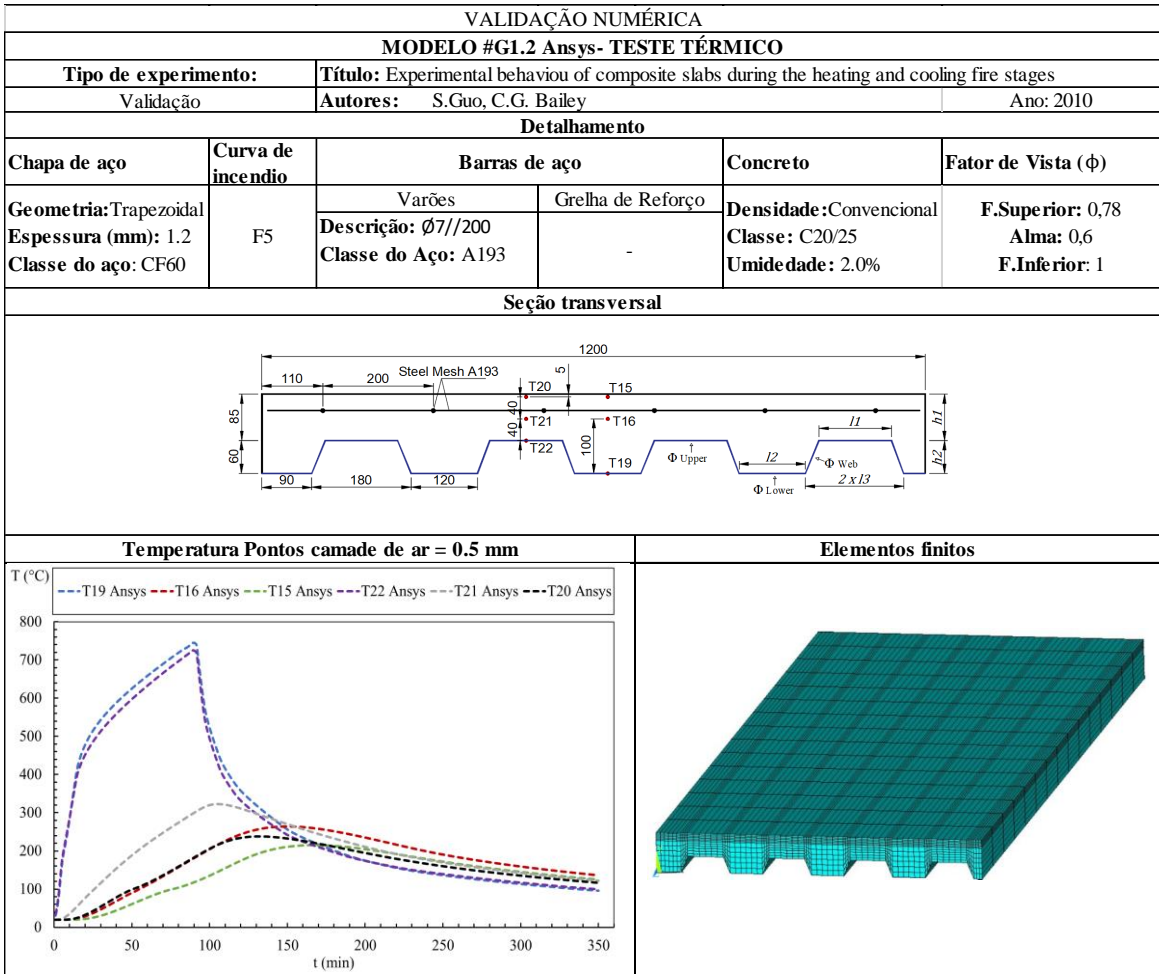
[40] S. Lamont, A. S. Usmani e D. D. Drysdale (2001), “Heat Transfer Analysis of the Composite Slab in the Cardington Frame Fire Tests,” *Fire Safety Journal*, vol. 36, nº 1, pp. 815-839.

[41] J. Jiang, J. A. Main, J. M. Weigand e F. H. Sadek (2018), Thermal Performance of Composite Slabs with Profiled Steel Decking Exposed to Fire Effects,” *Fire Safety Journal*, vol. 95, nº 1, pp. 25-41.

[42] Richard D. Peacock!, Paul A. Reneke, Richard W. Bukowski, Vytenis Babrauskas (1998) “Defining flashover for fire hazard calculations” *Fire Safety Journal* 32 (1999) 331—345

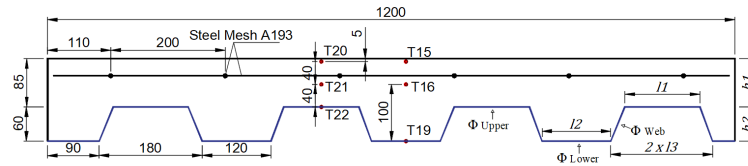
ANEXOS



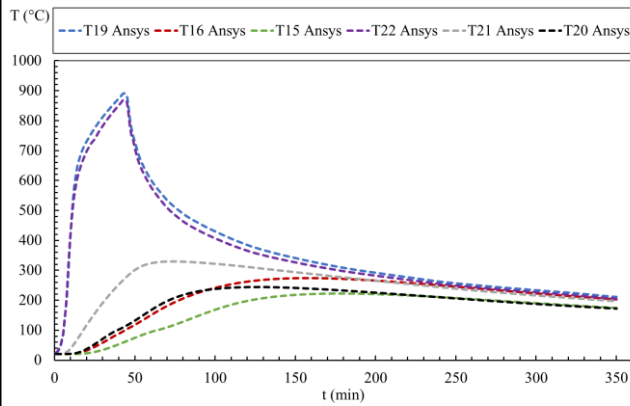


VALIDAÇÃO NUMÉRICA					
MODELO #G1.3 Ansys- TESTE TÉRMICO					
Tipo de experimento:	Título: Experimental behaviour of composite slabs during the heating and cooling fire stages				
Validação	Autores: S.Guo, C.G. Bailey		Ano: 2010		
Detalhamento					
Chapa de aço	Curva de incêndio	Barras de aço		Concreto	Fator de Vista (ϕ)
Geometria: Trapezoidal Espessura (mm): 1.2 Classe do aço: CF60	F7	Varões Descrição: $\phi 7//200$ Classe do Aço: A193	Grelha de Reforço -	Densidade: Convencional Classe: C20/25 Umidade: 1.86%	F.Superior: 0,78 Alma: 0,6 F.Inferior: 1

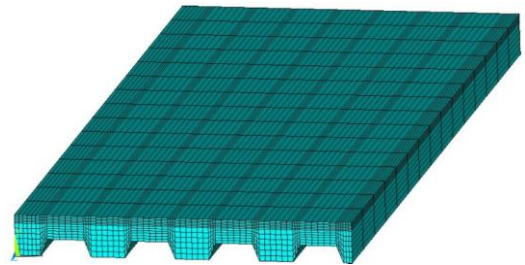
Seção transversal

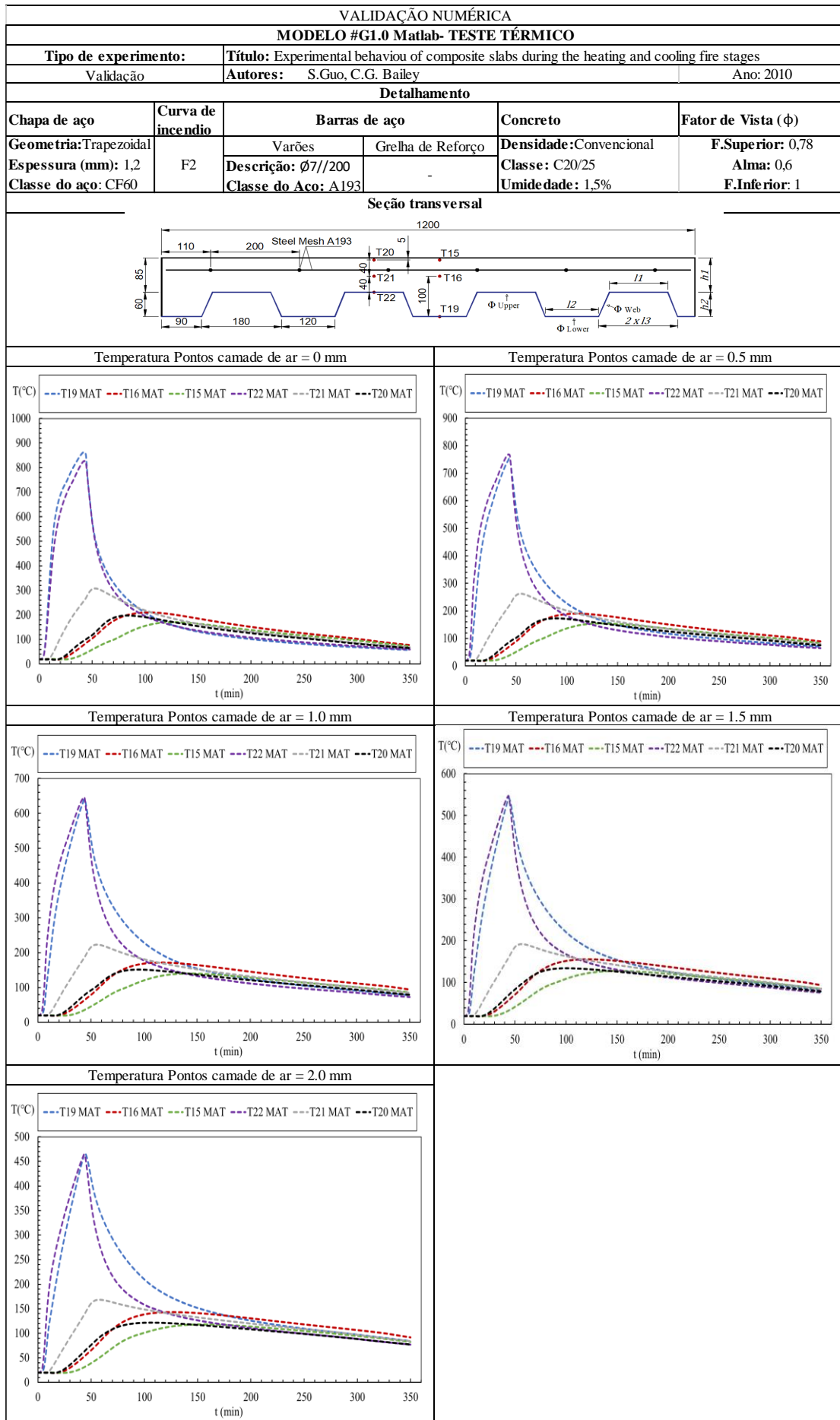


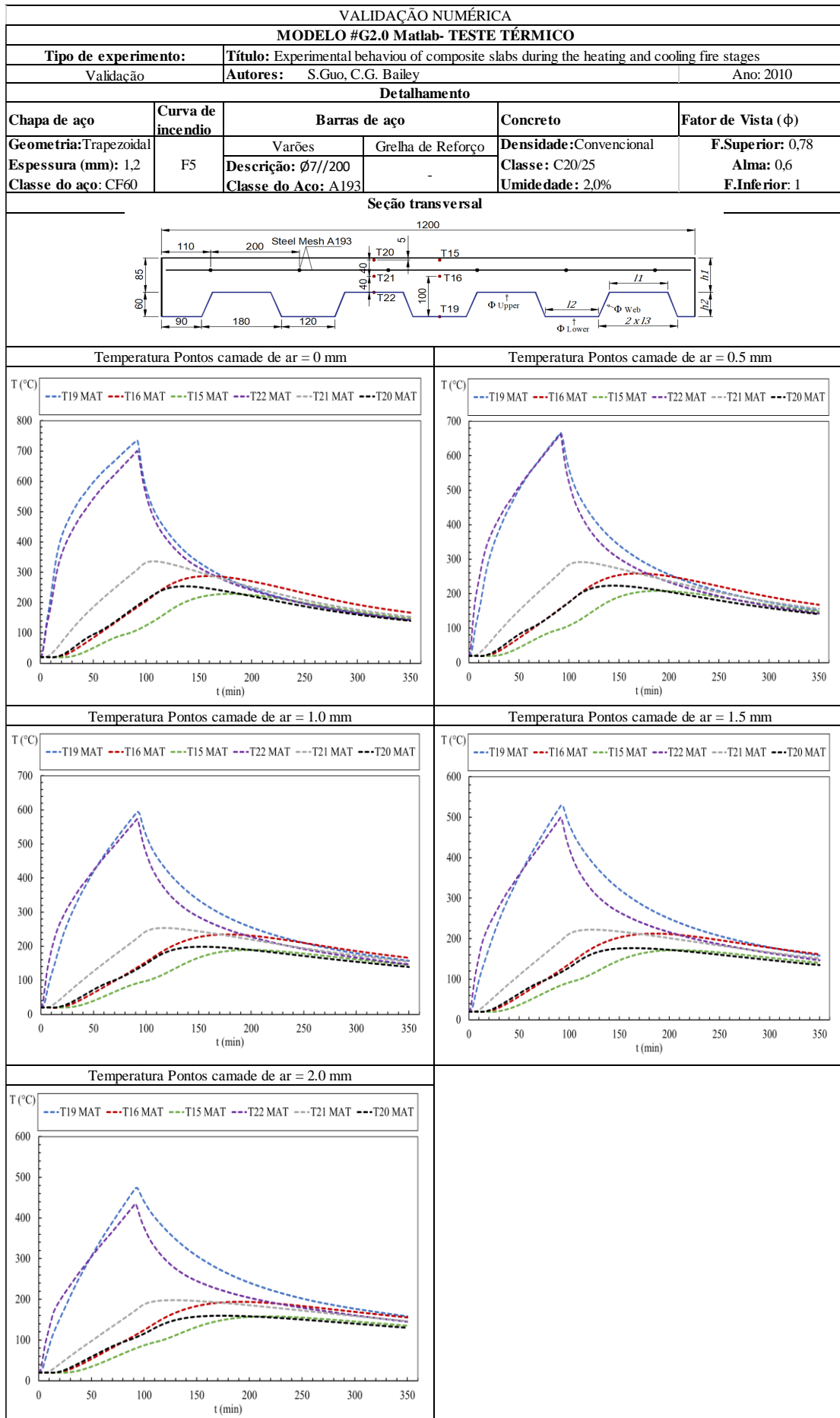
Temperatura Pontos camada de ar = 0.5 mm

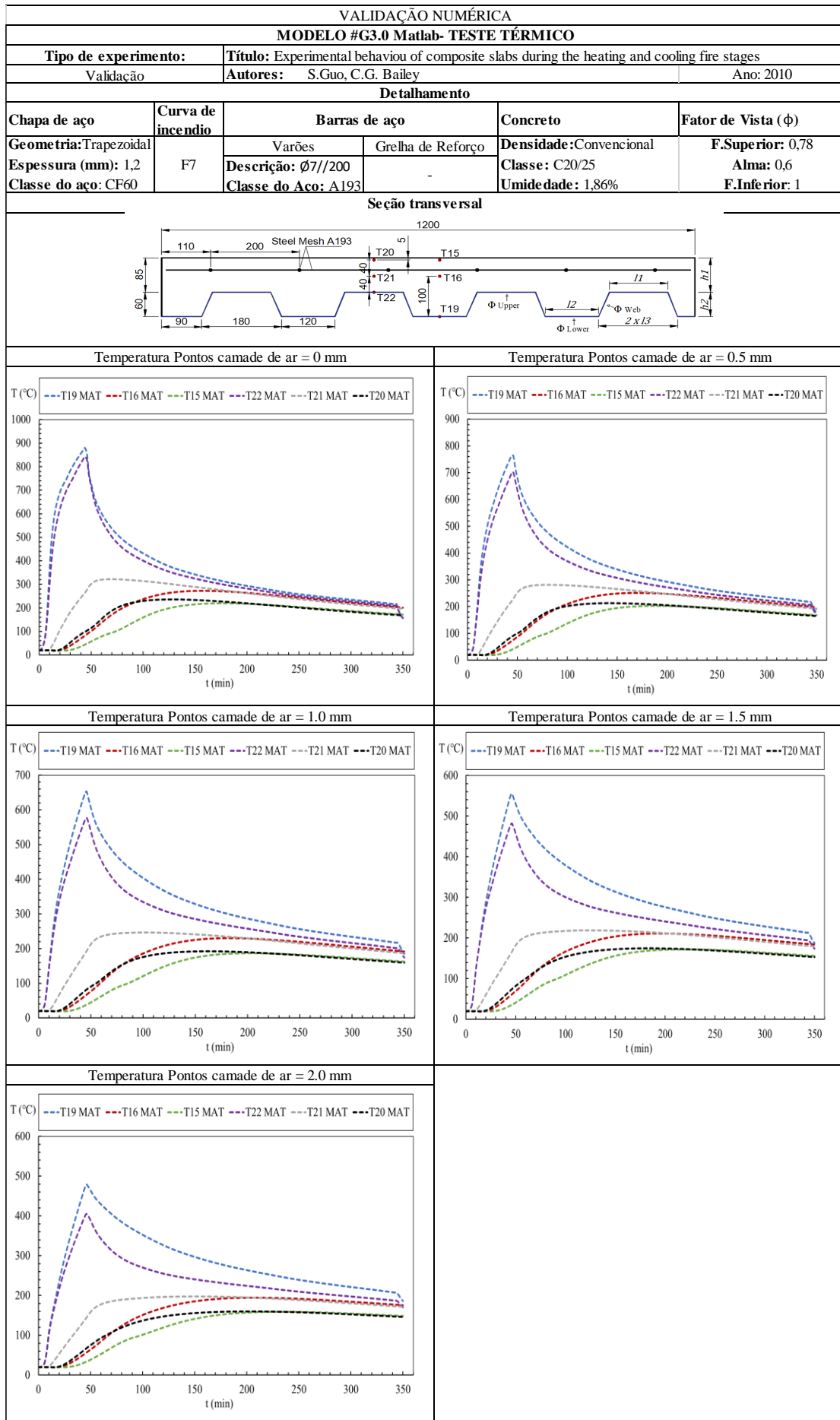


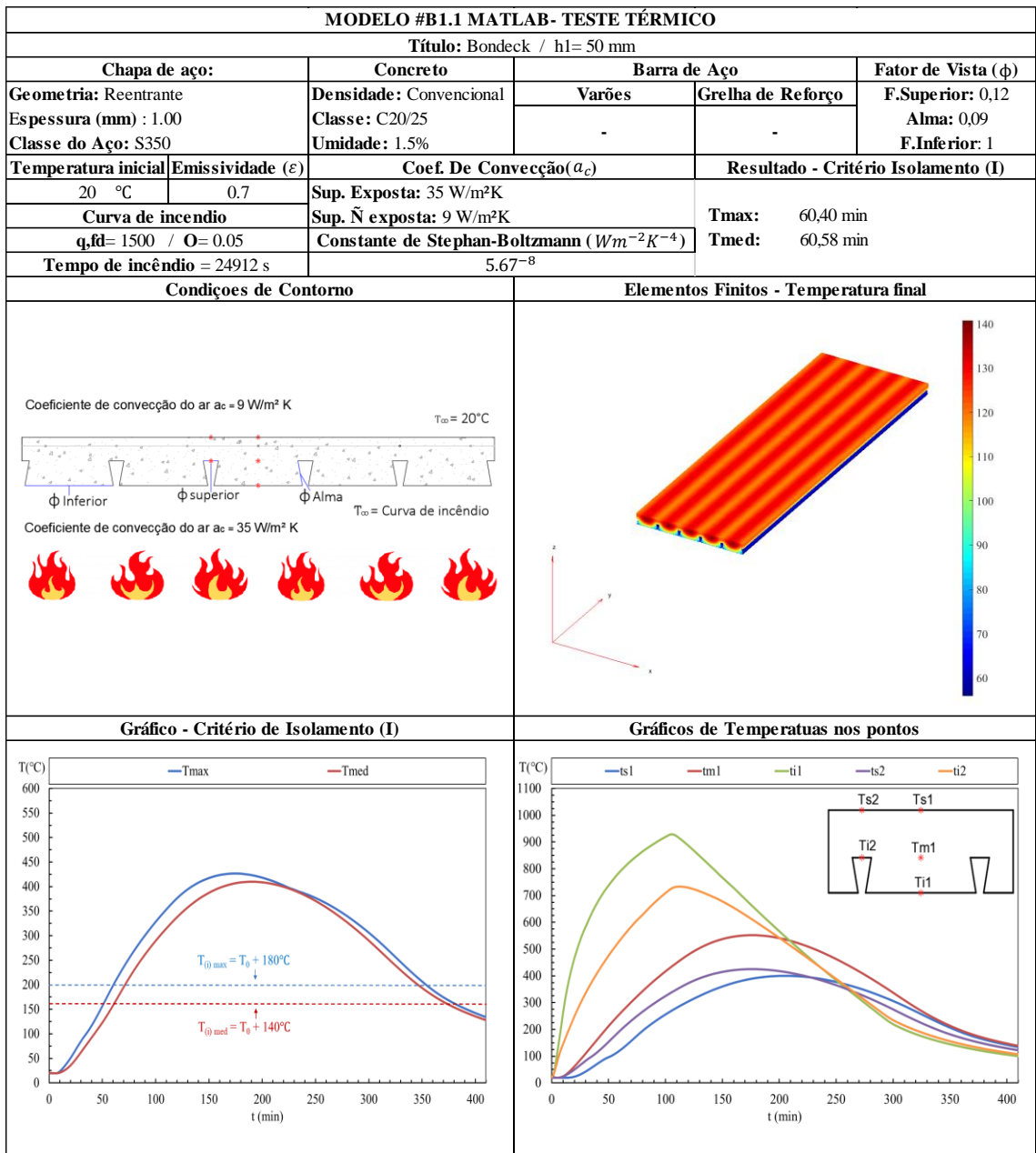
Elementos finitos

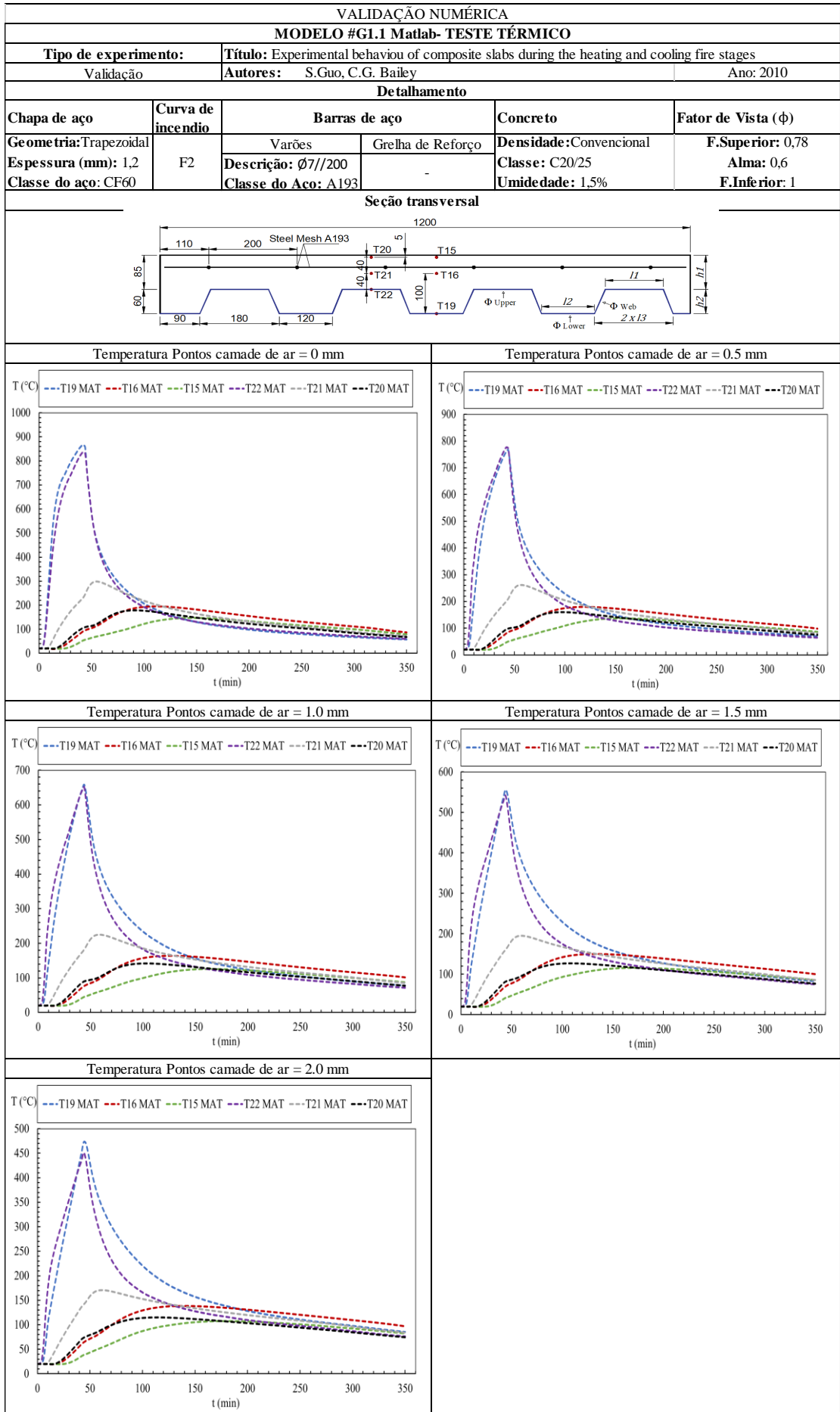


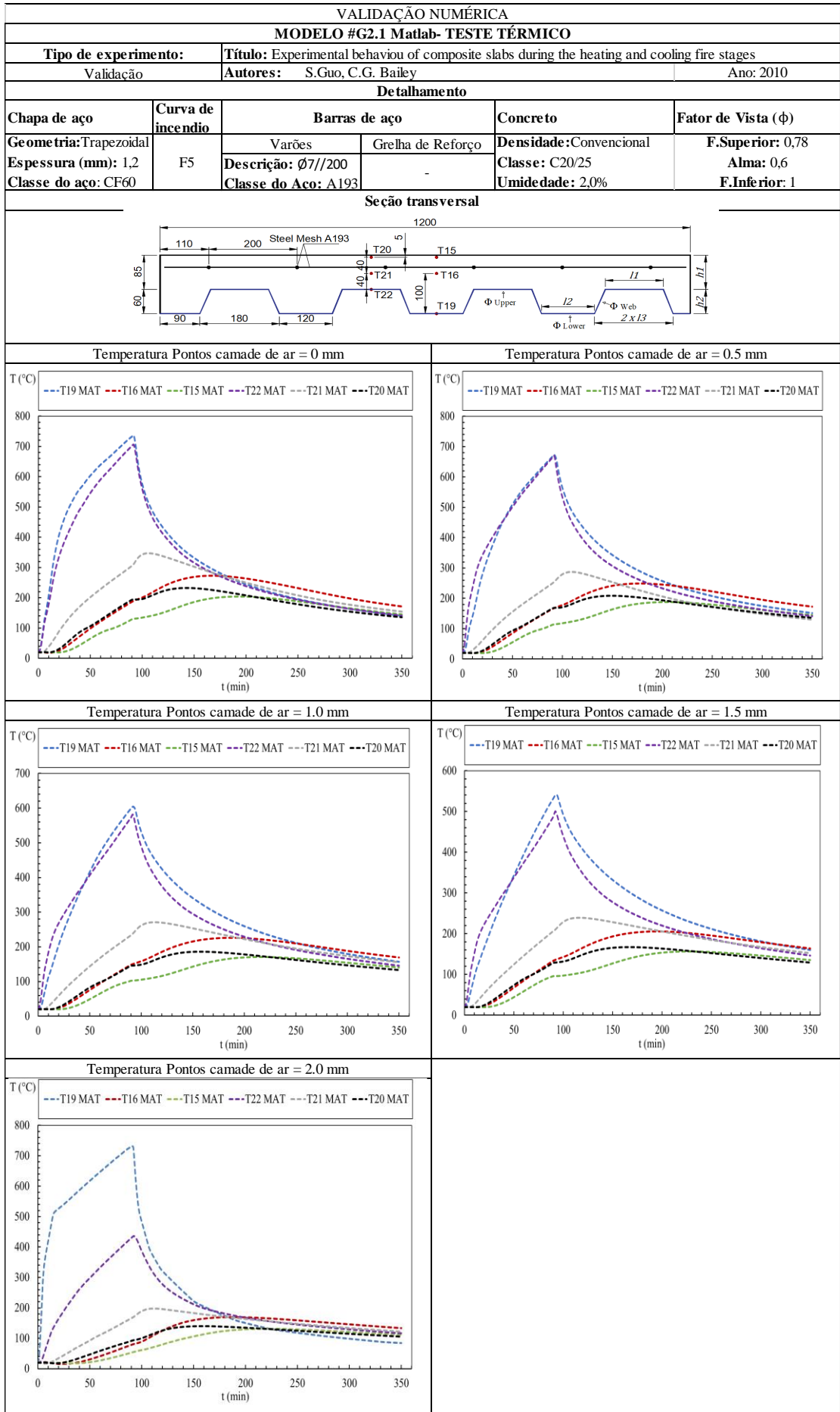


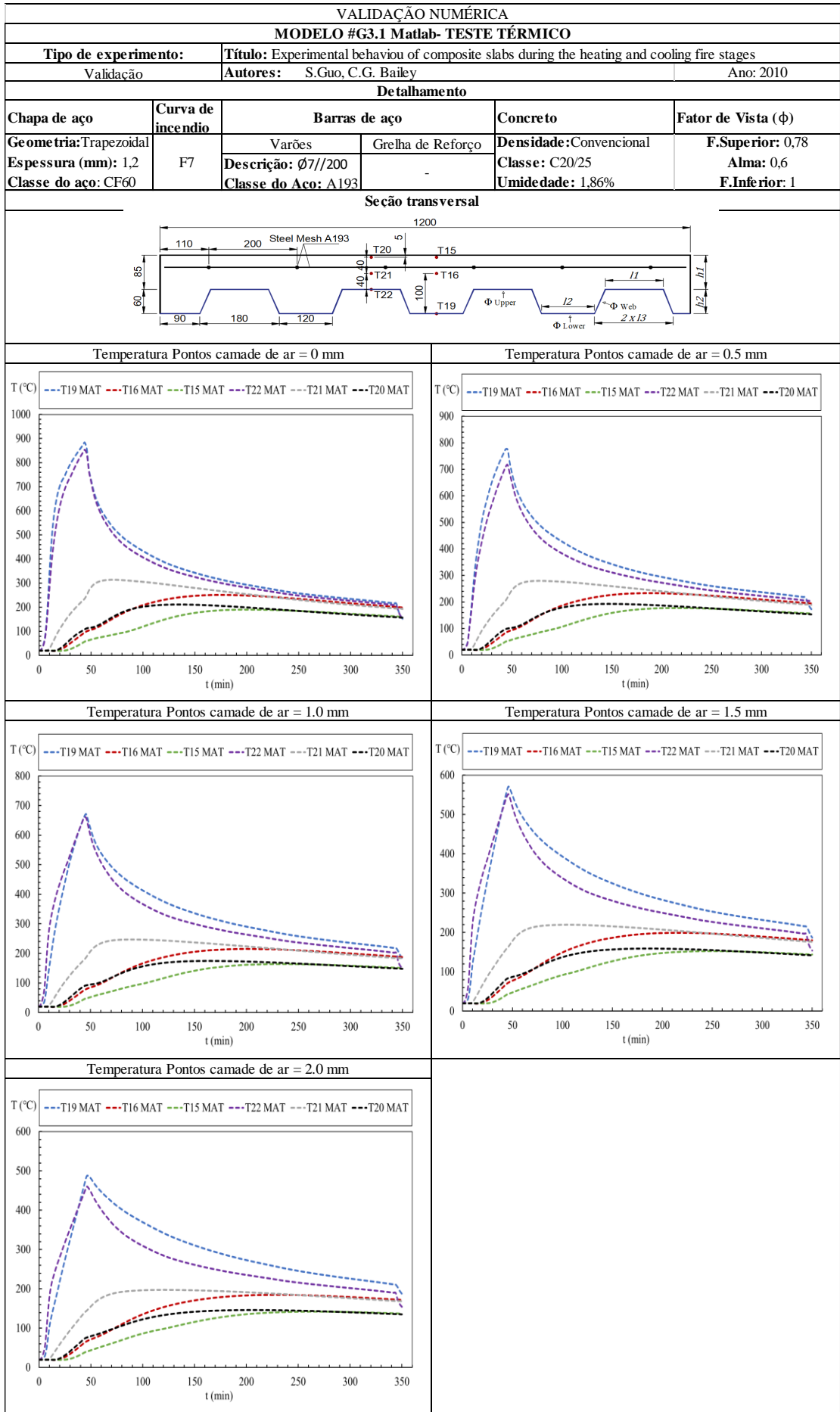


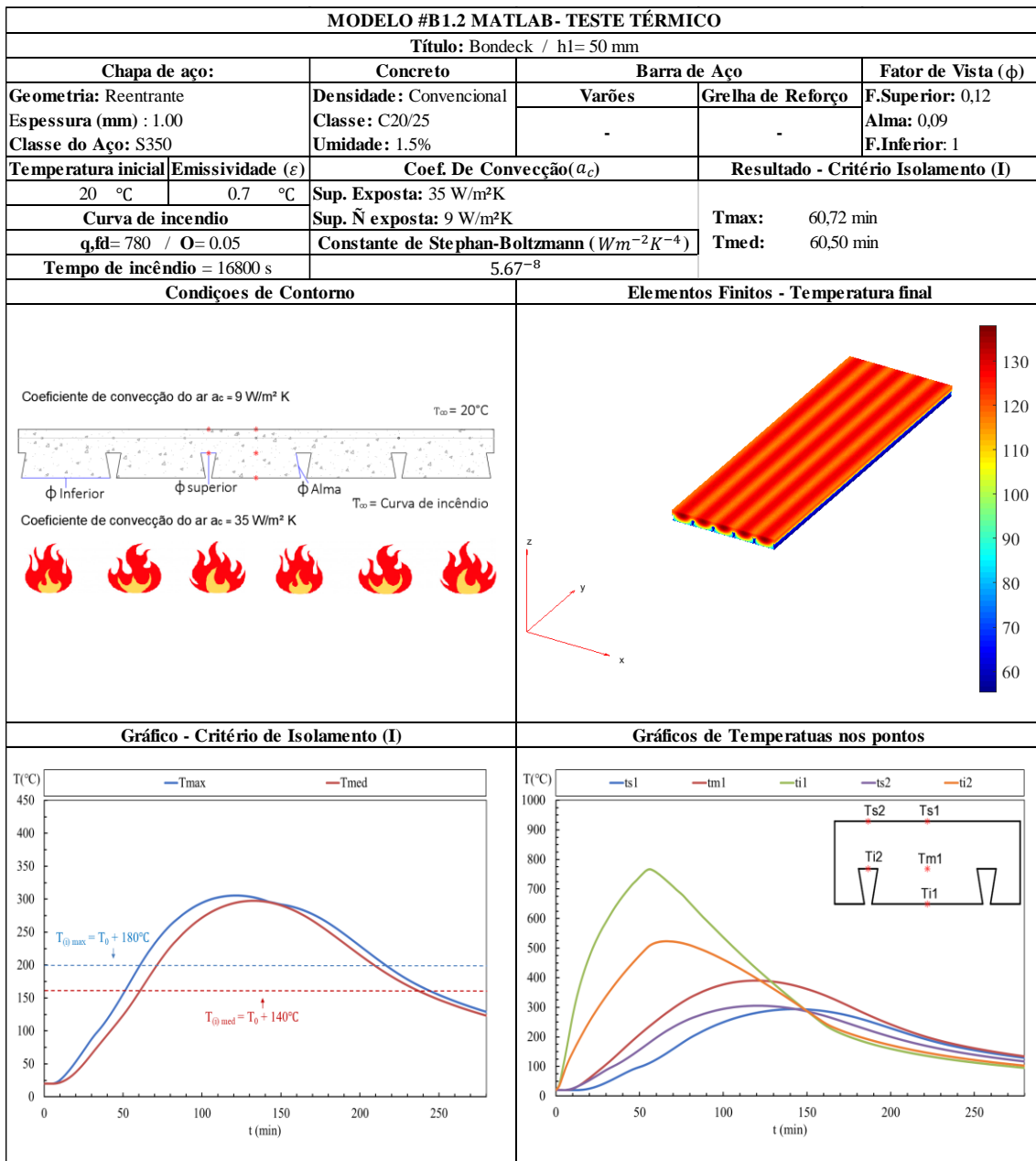


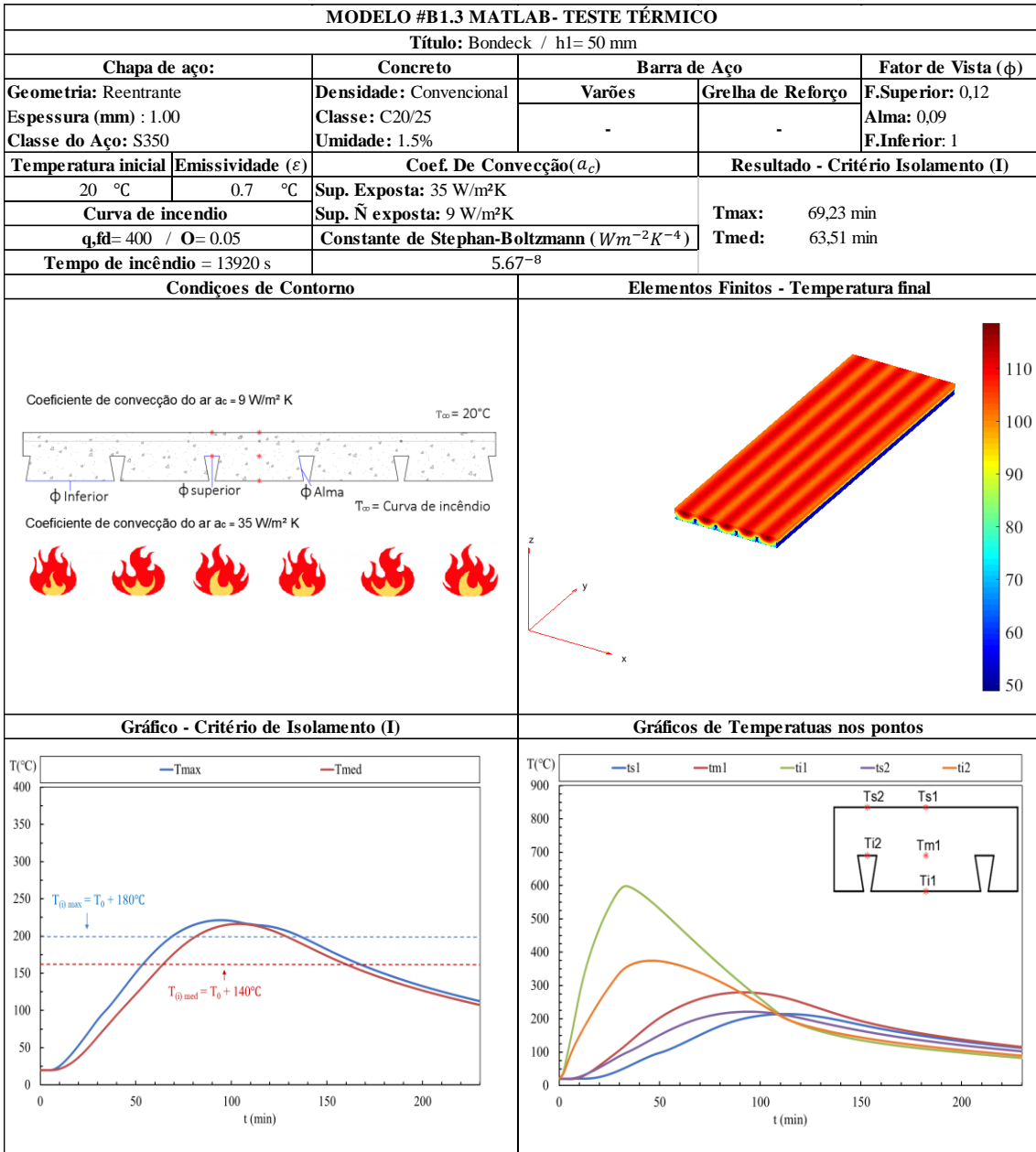


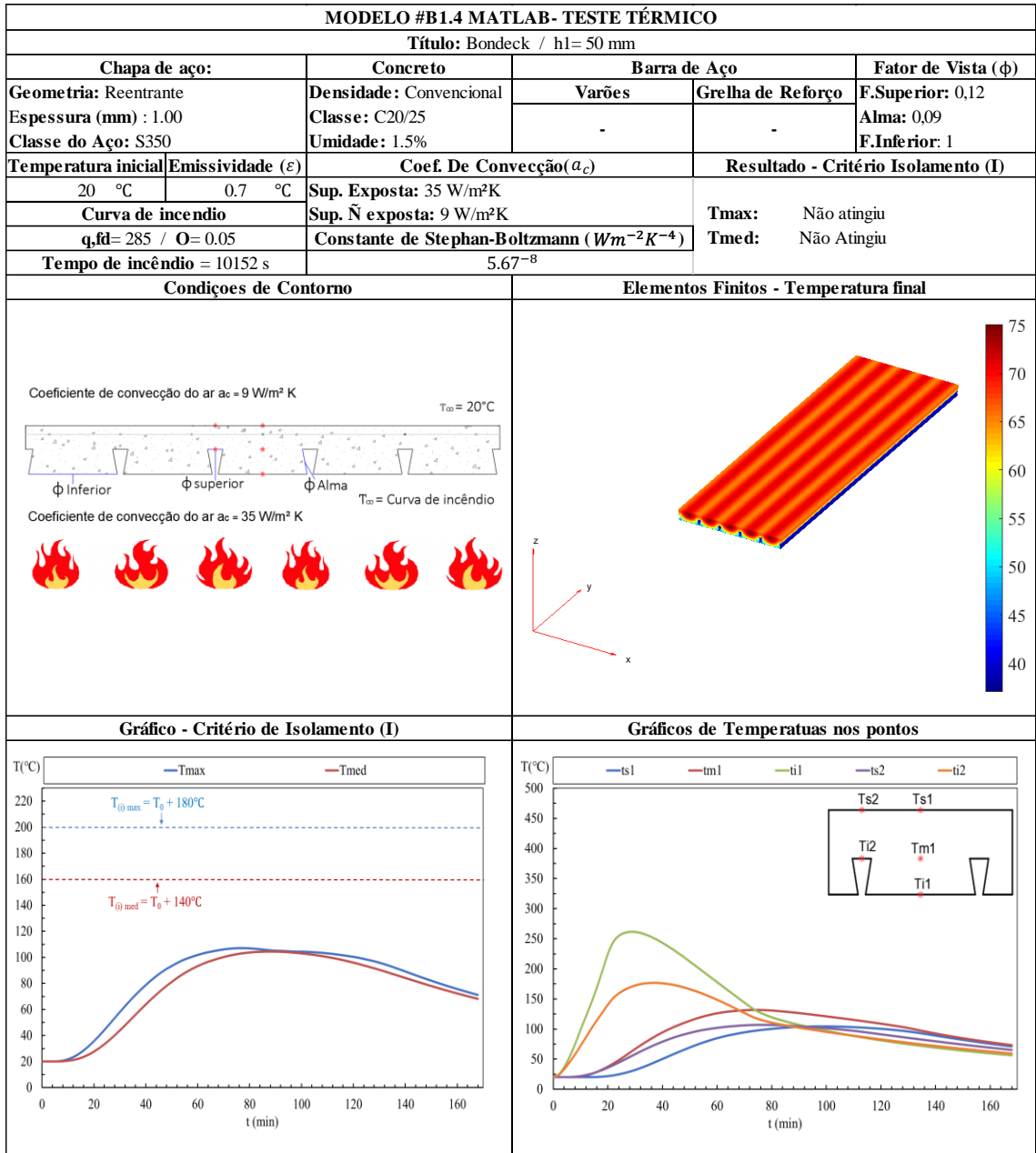


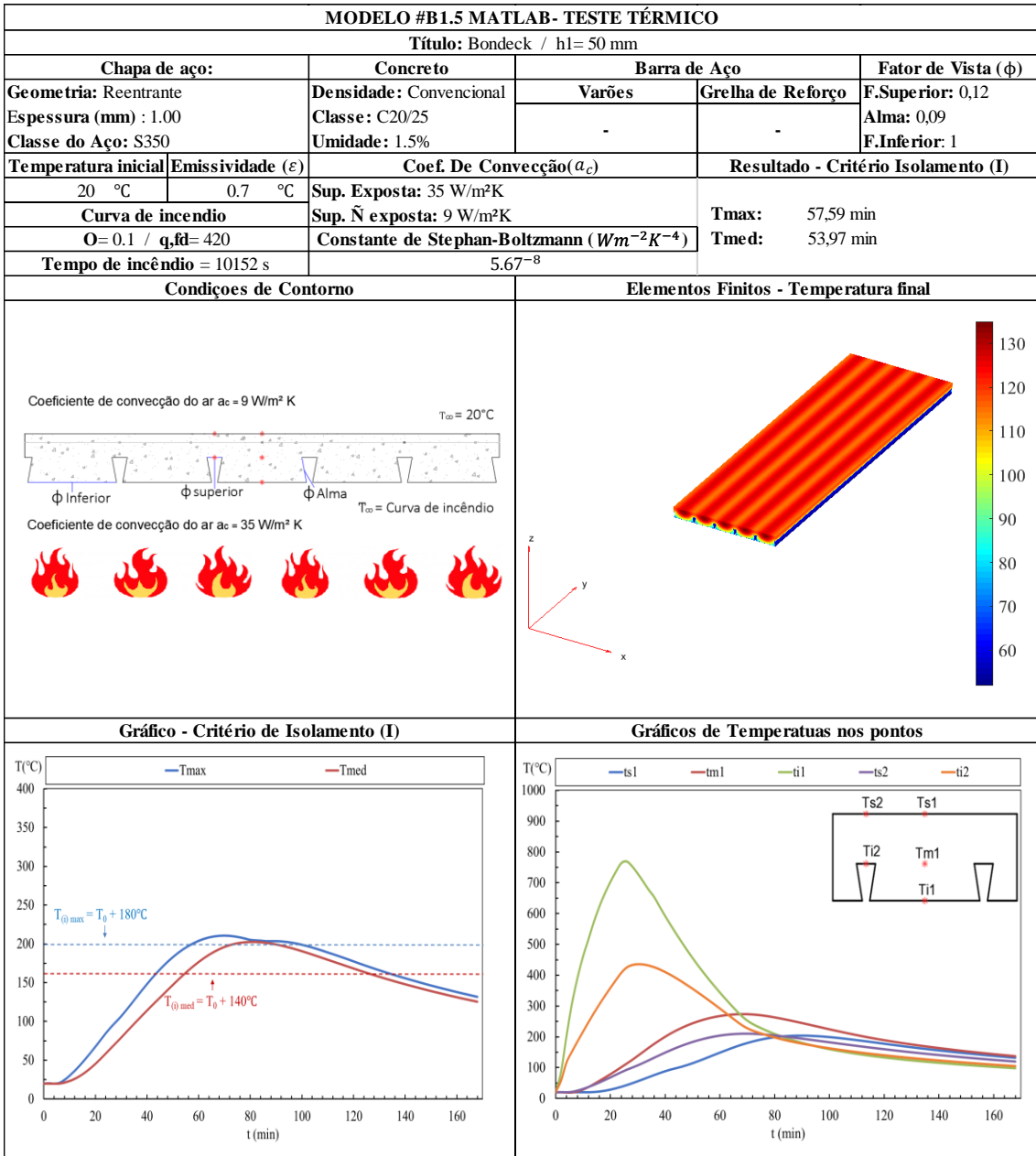


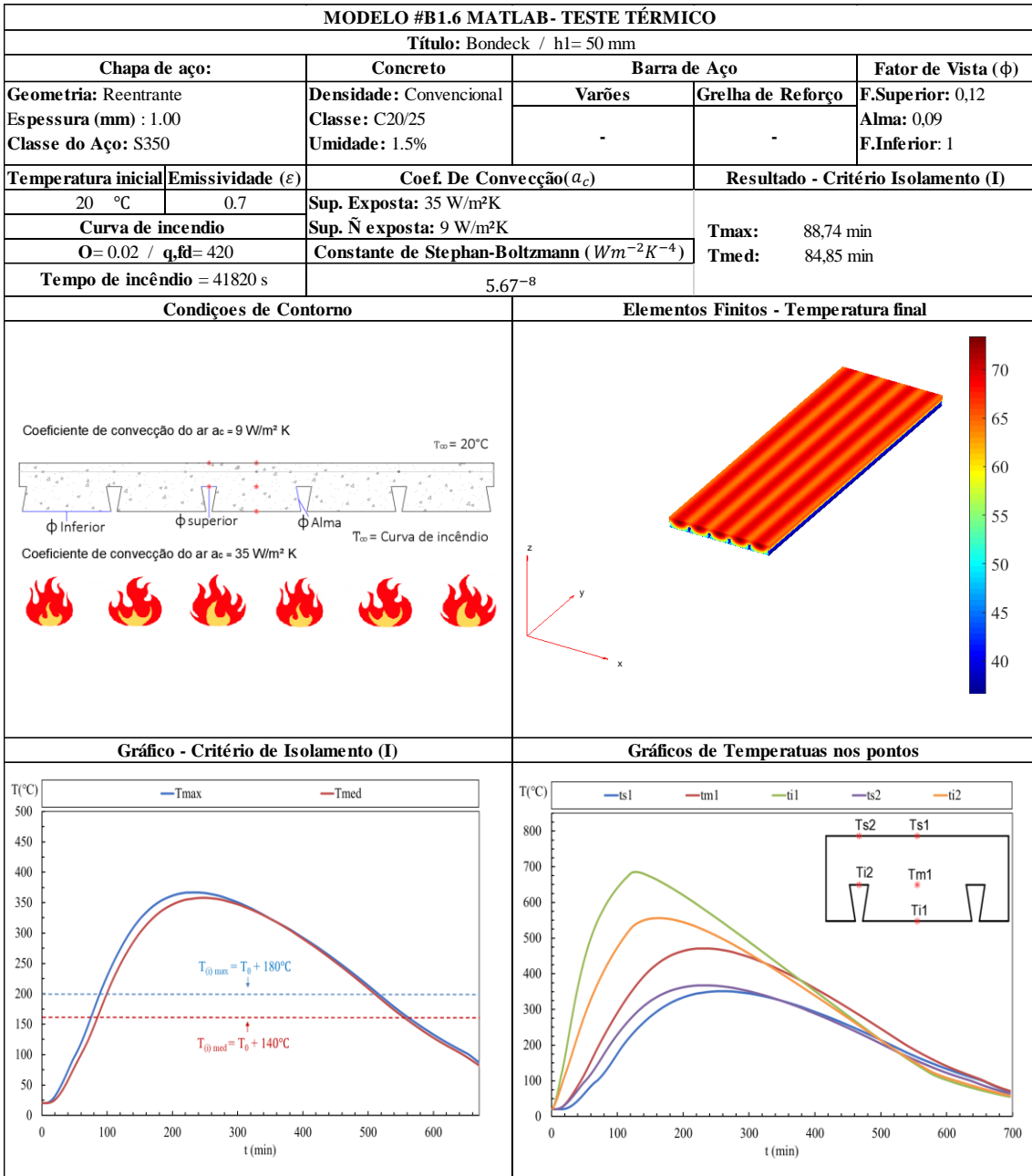


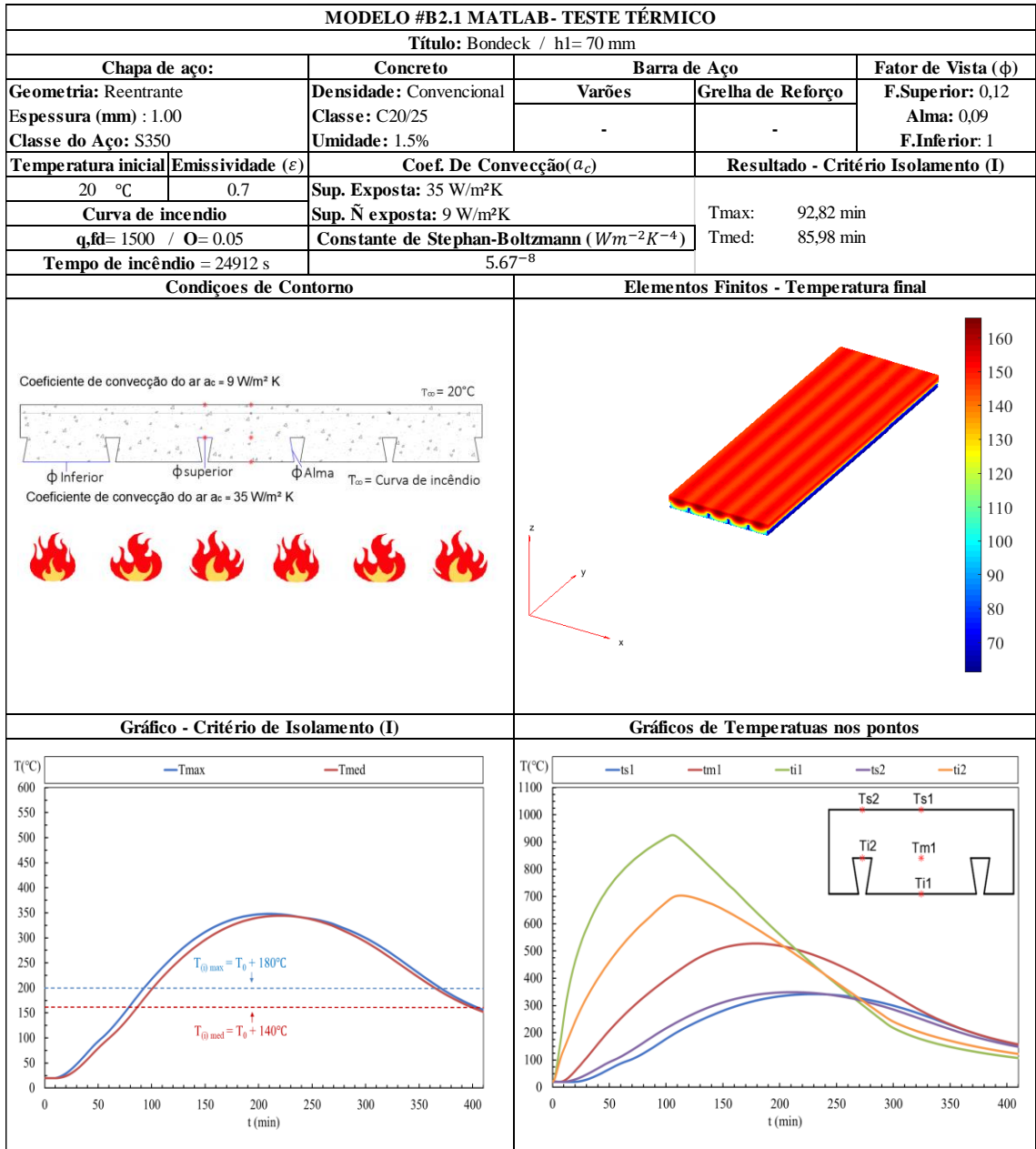


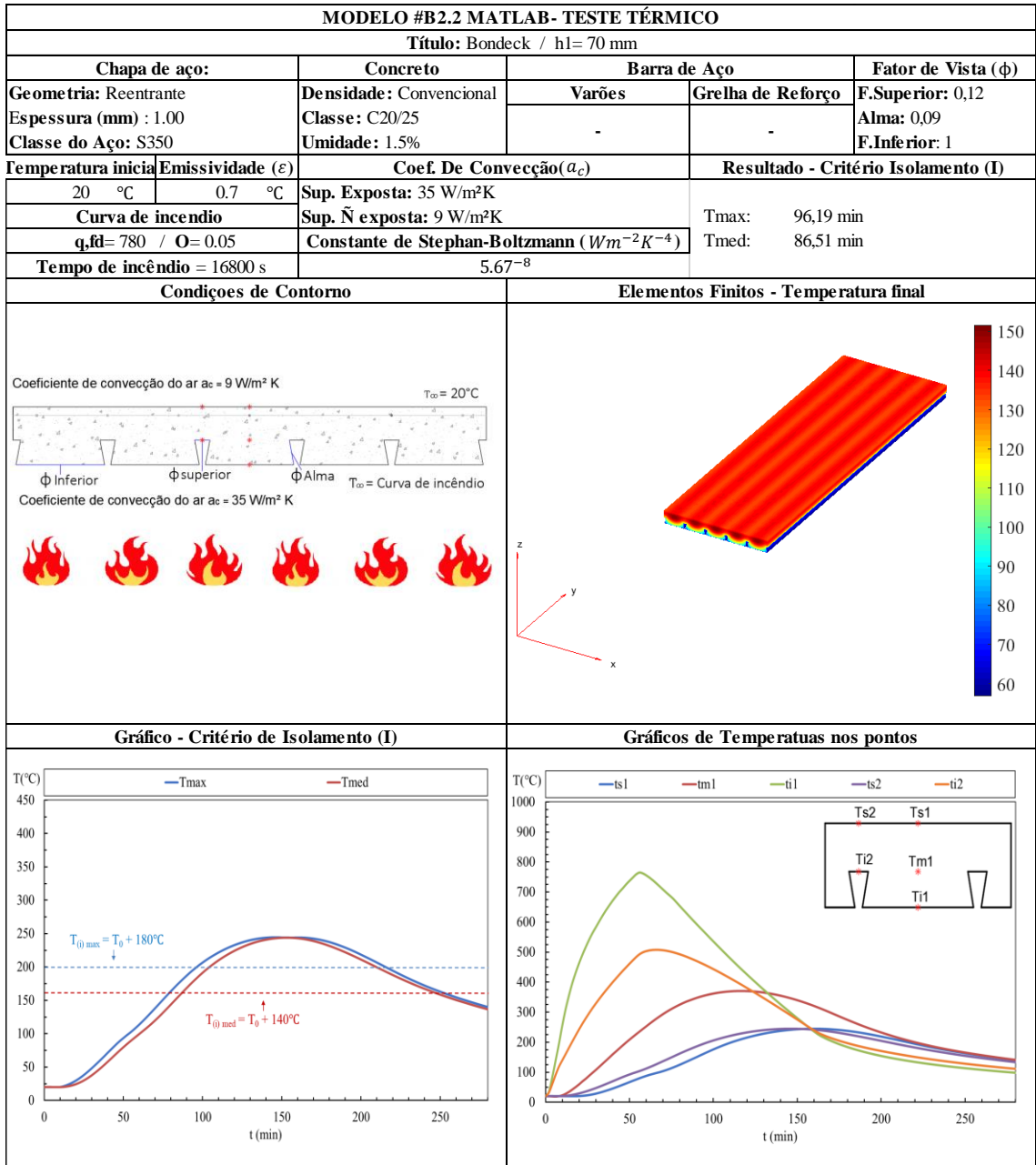


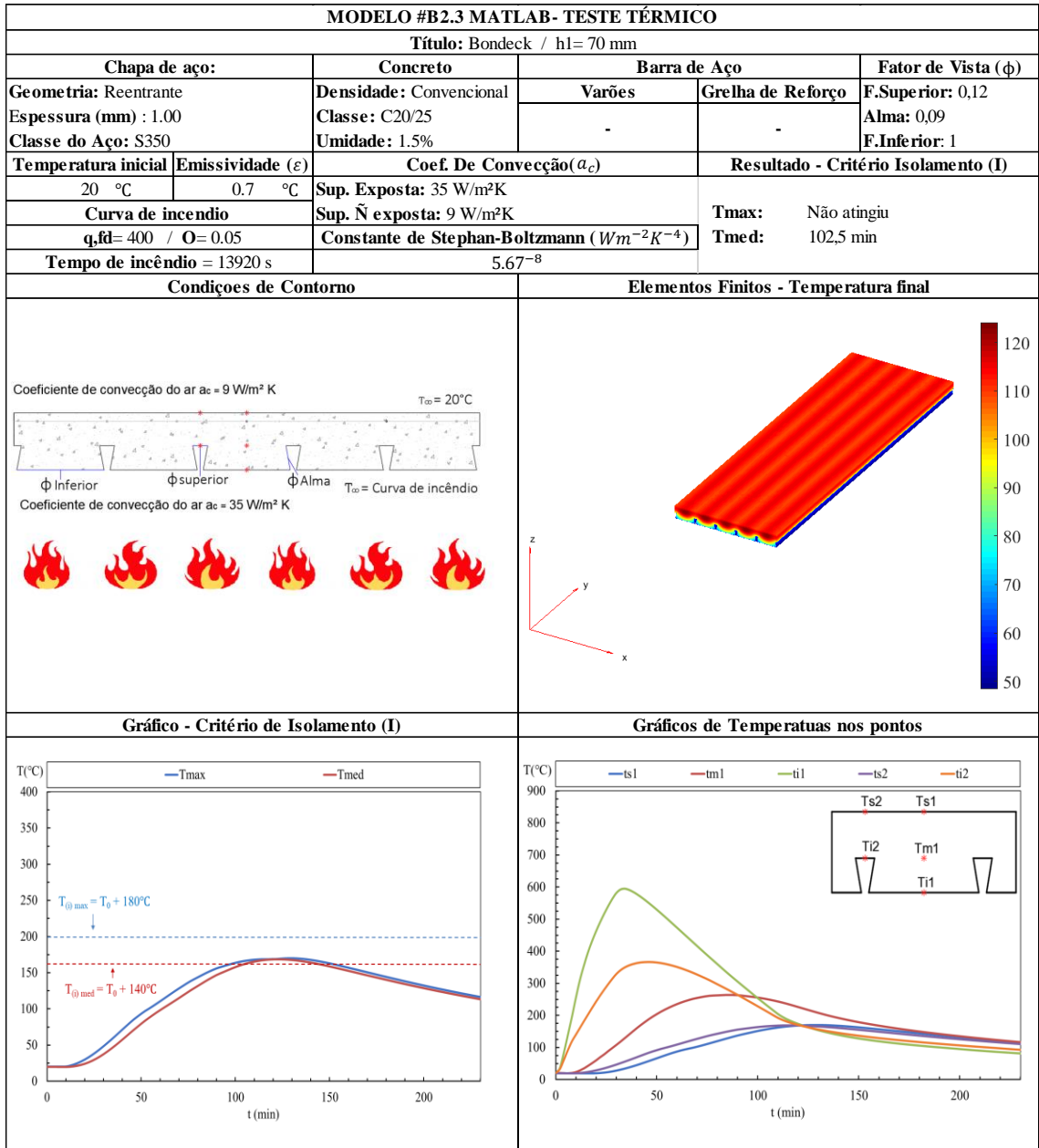


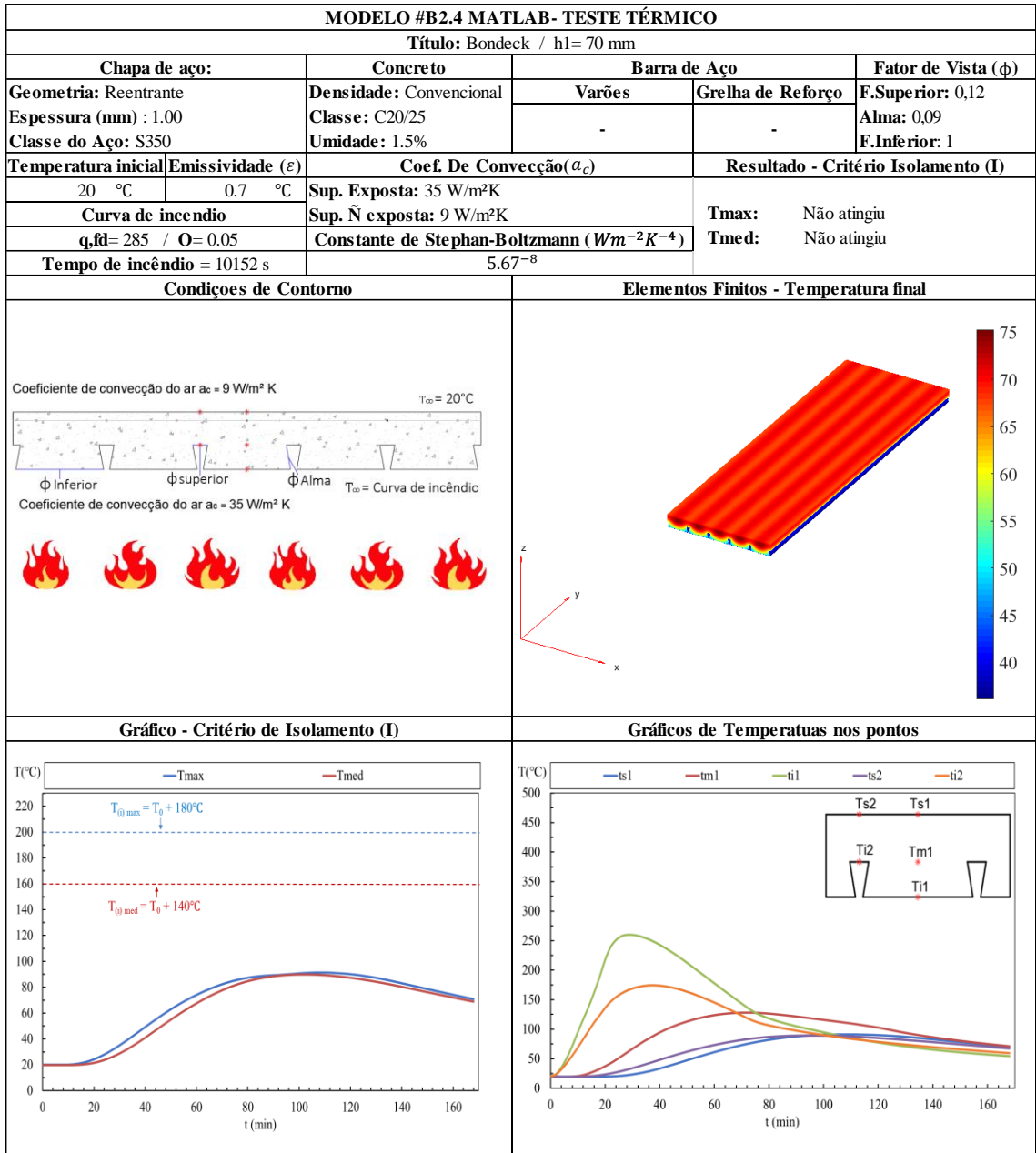


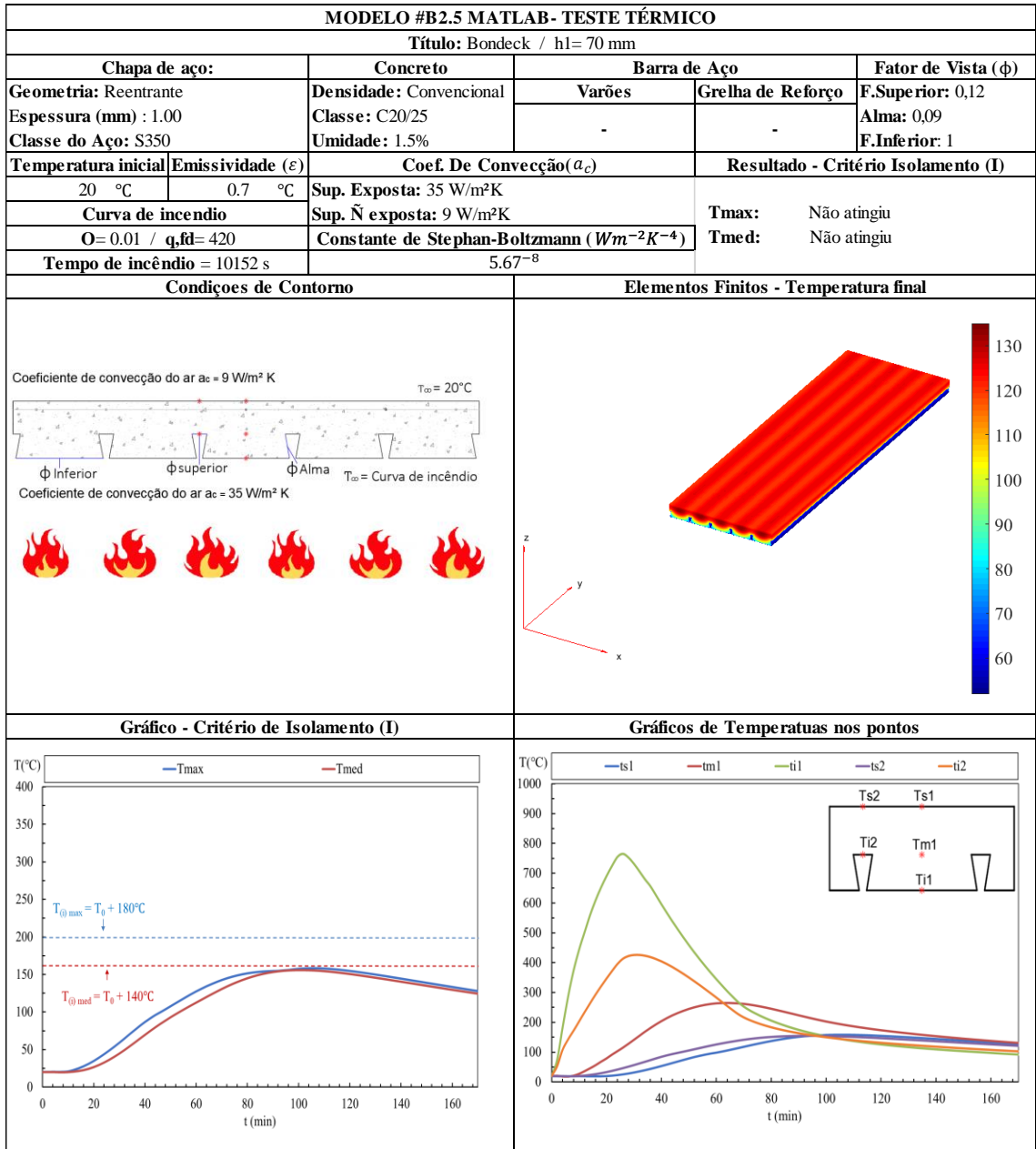


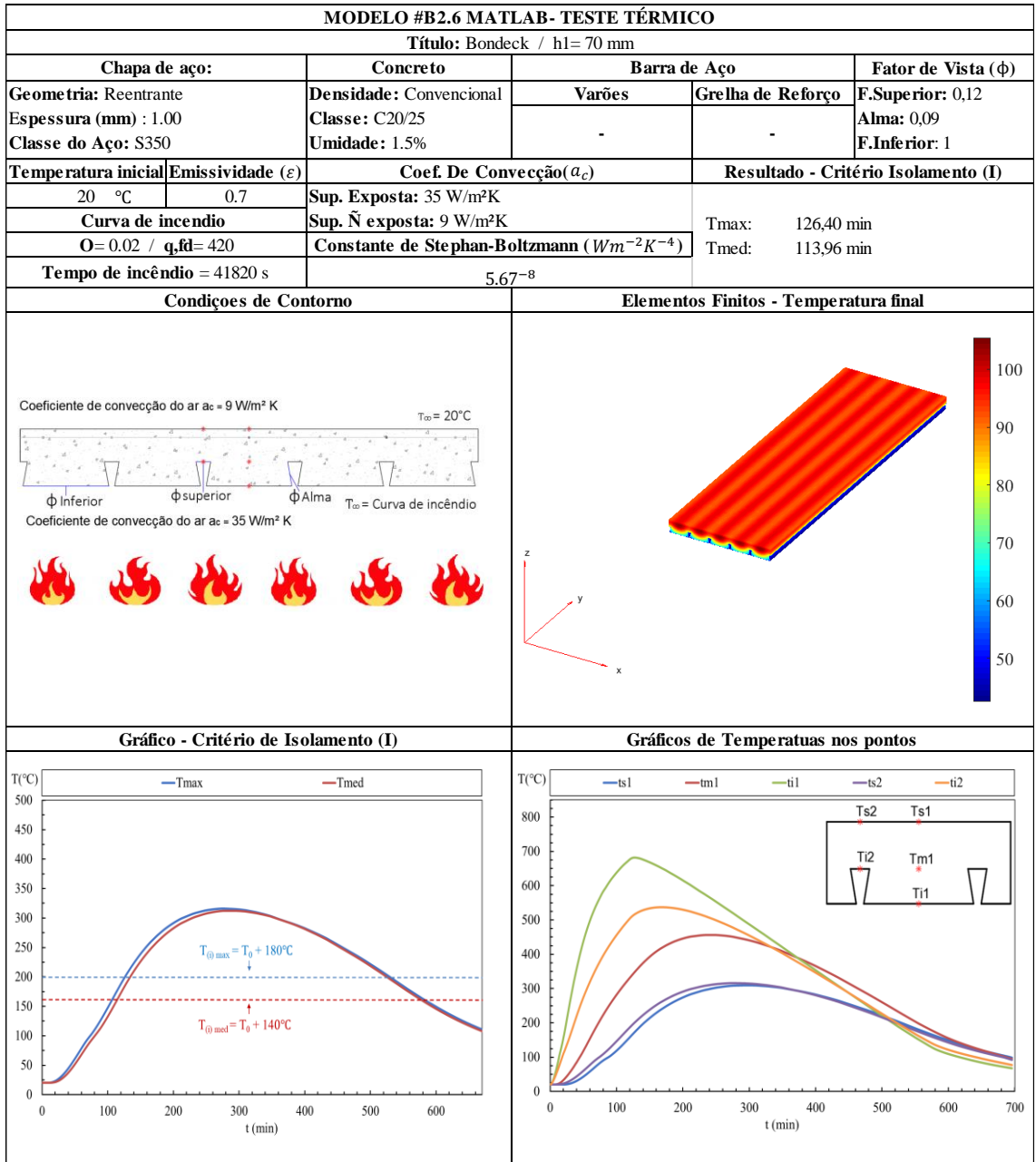


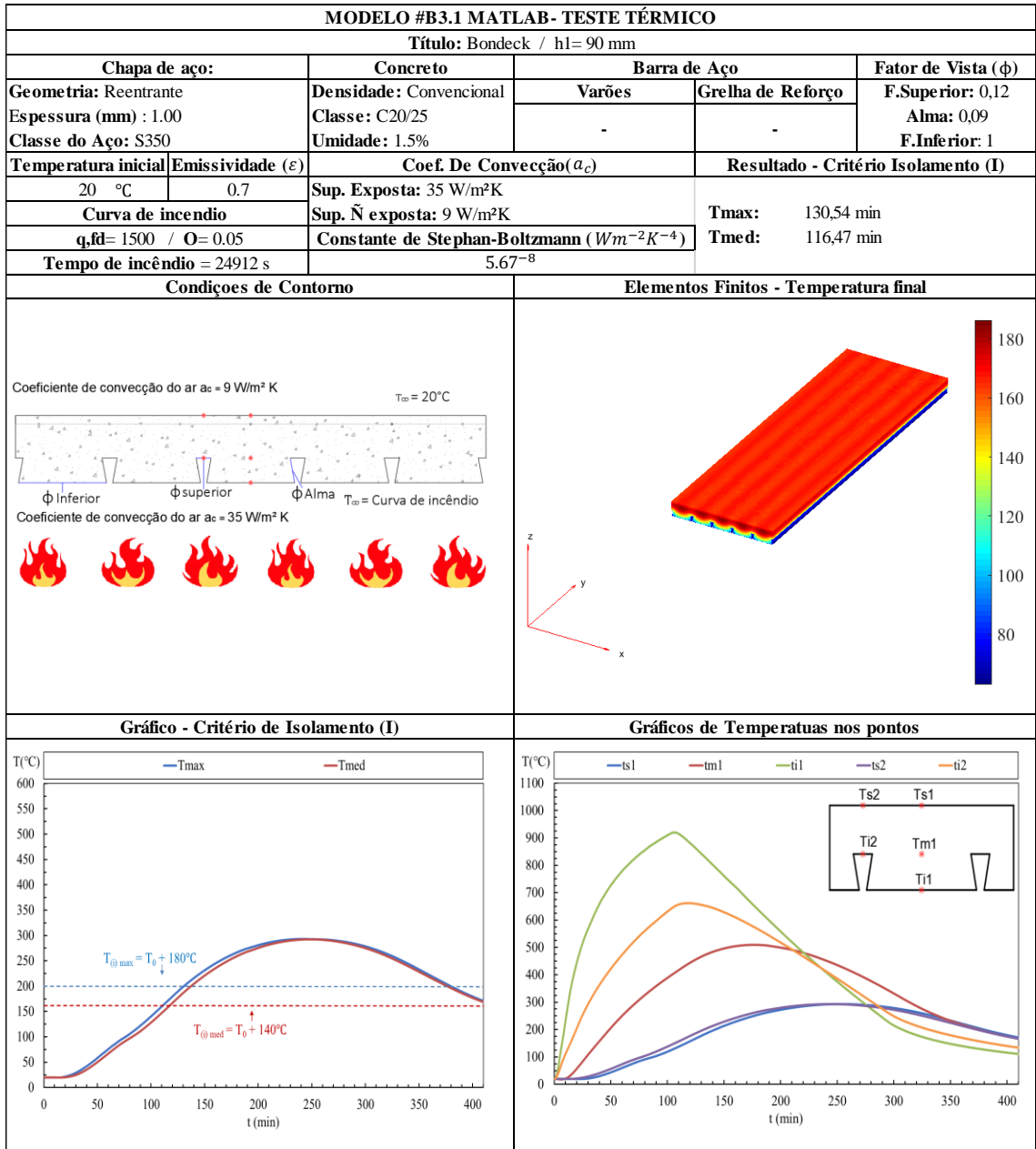








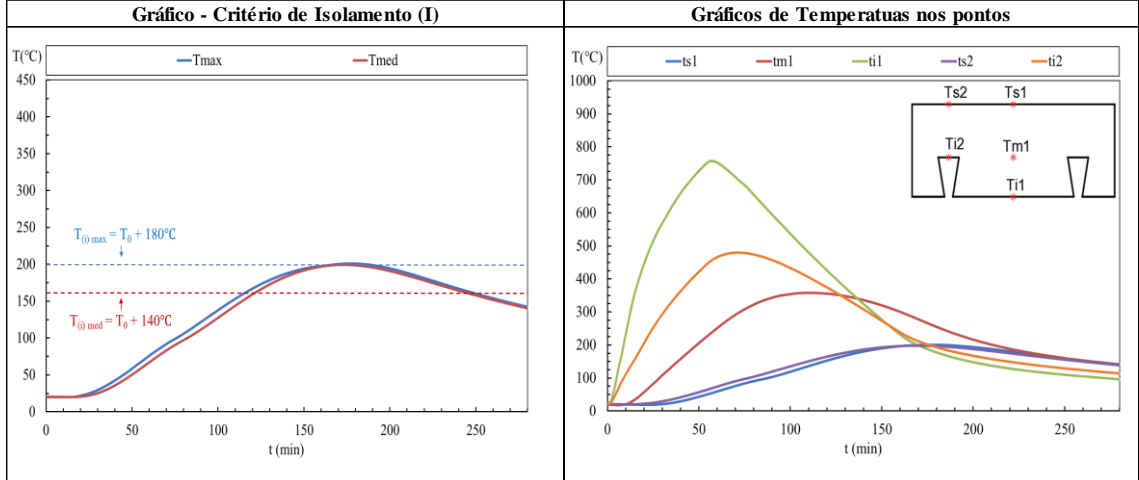
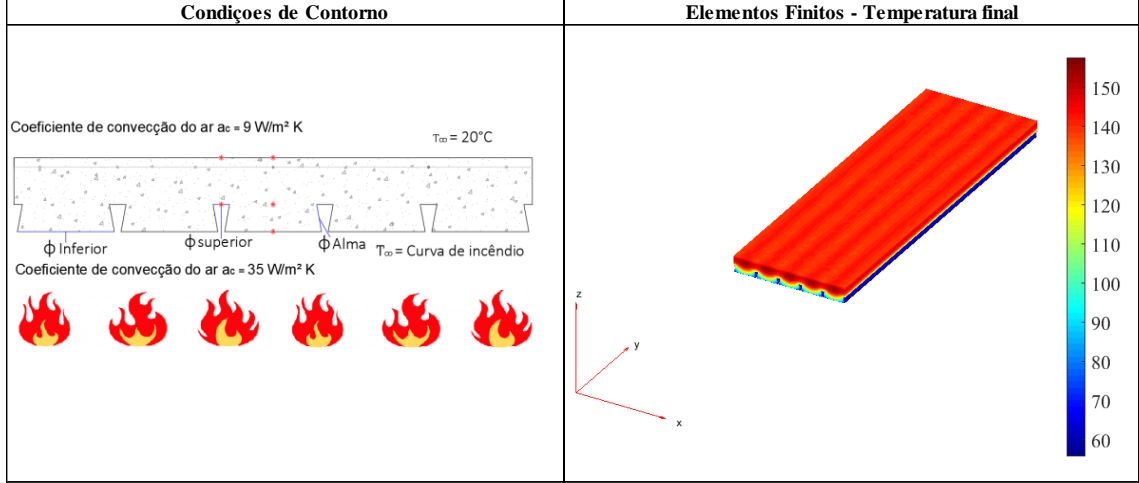


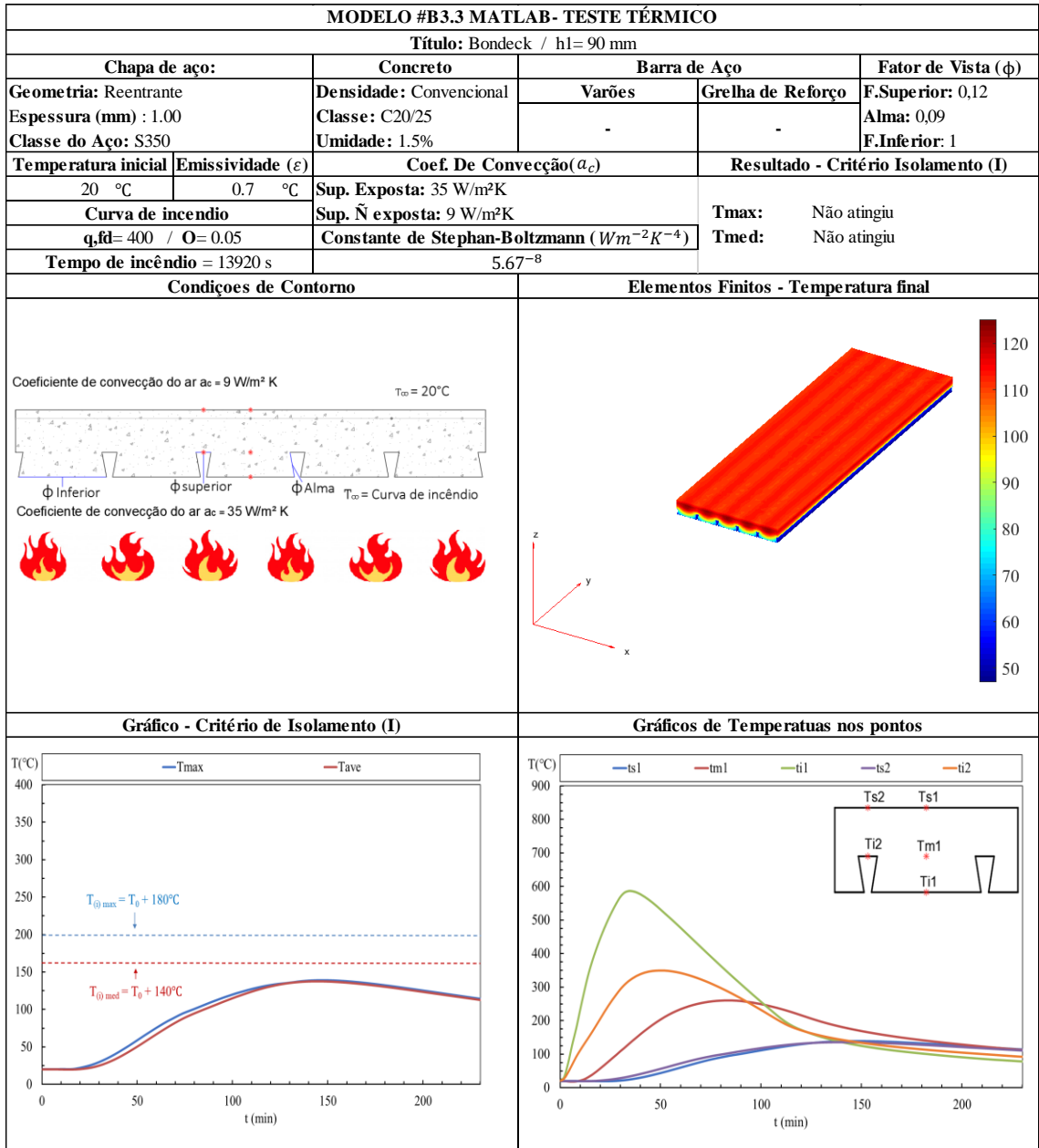


MODELO #B3.2 MATLAB- TESTE TÉRMICO

Título: Bondeck / h1= 90 mm

Chapa de aço:		Concreto	Barra de Aço		Fator de Vista (ϕ)
Geometria: Reentrante		Densidade: Convencional	Varões	Grelha de Reforço	F.Superior: 0,12
Espessura (mm) : 1.00		Classe: C20/25	-	-	Alma: 0,09
Classe do Aço: S350		Umidade: 1.5%			F.Inferior: 1
Temperatura inicial	Emissividade (ϵ)	Coef. De Convecção(a_c)		Resultado - Critério Isolamento (I)	
20 °C	0.7 °C	Sup. Exposta: 35 W/m ² K		Tmax: 169,31 min	
Curva de incêndio		Sup. Ñ exposta: 9 W/m ² K		Tmed: 120,69 min	
q,fd= 780 / O= 0.05		Constante de Stephan-Boltzmann (Wm ⁻² K ⁻⁴)			
Tempo de incêndio = 16800 s		5,67 ⁻⁸			

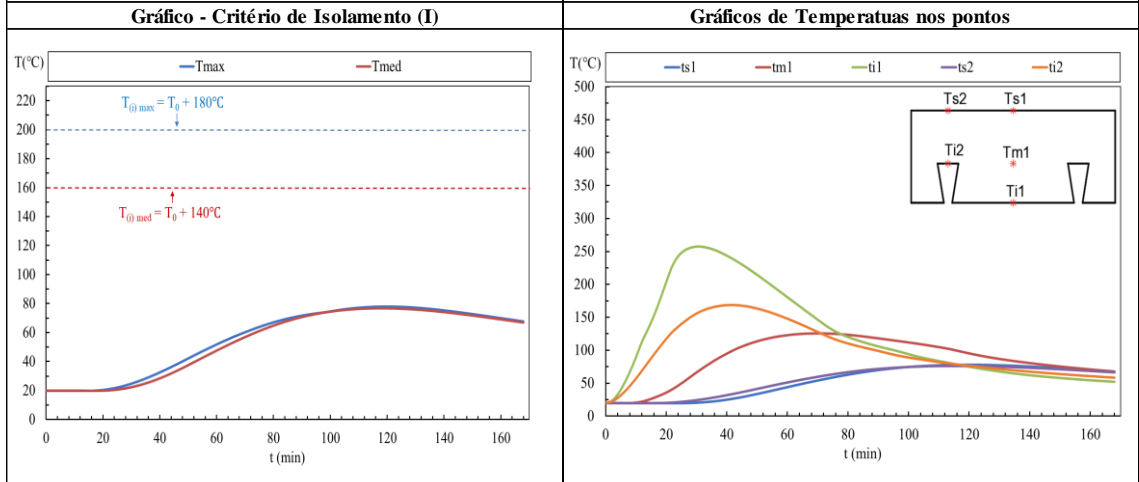
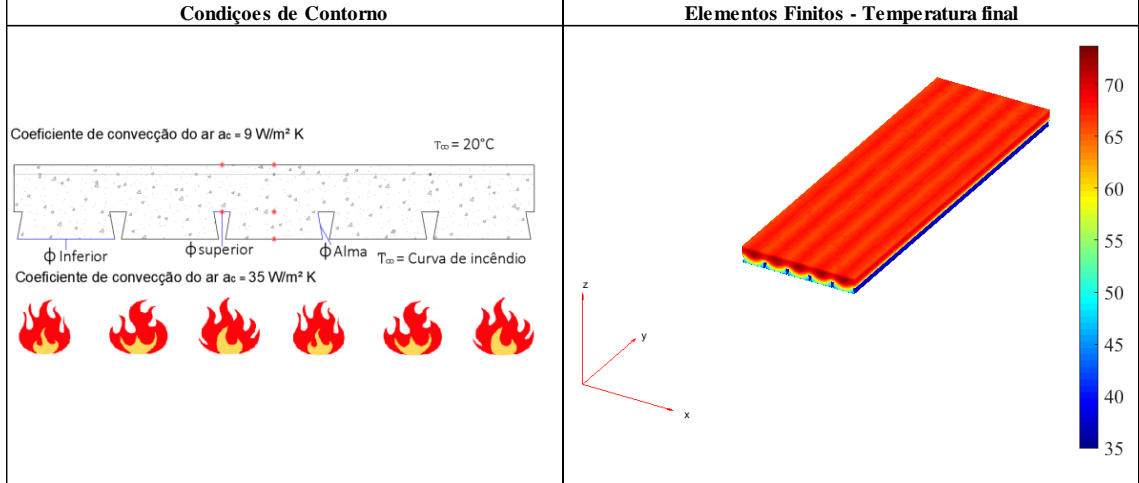


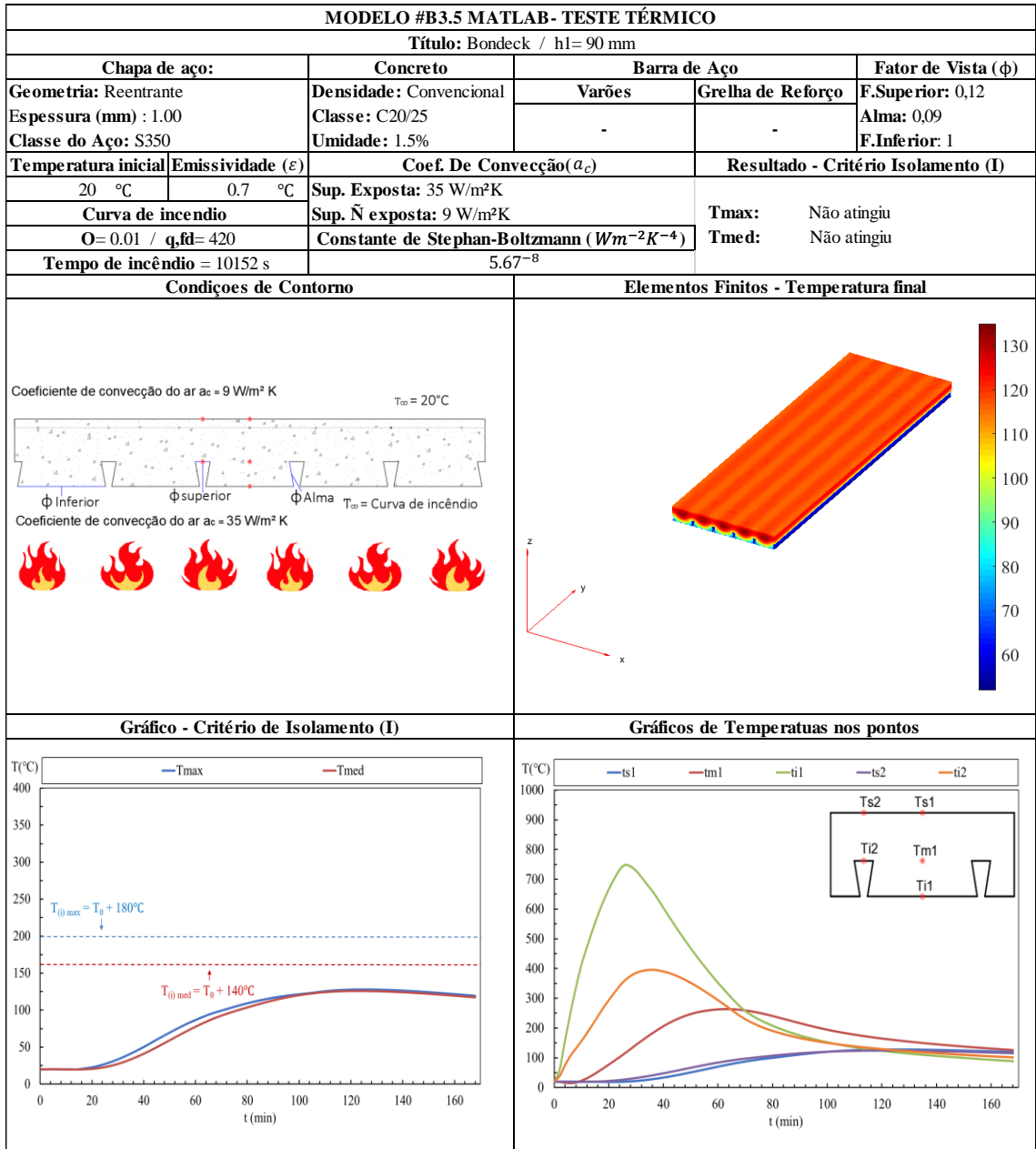


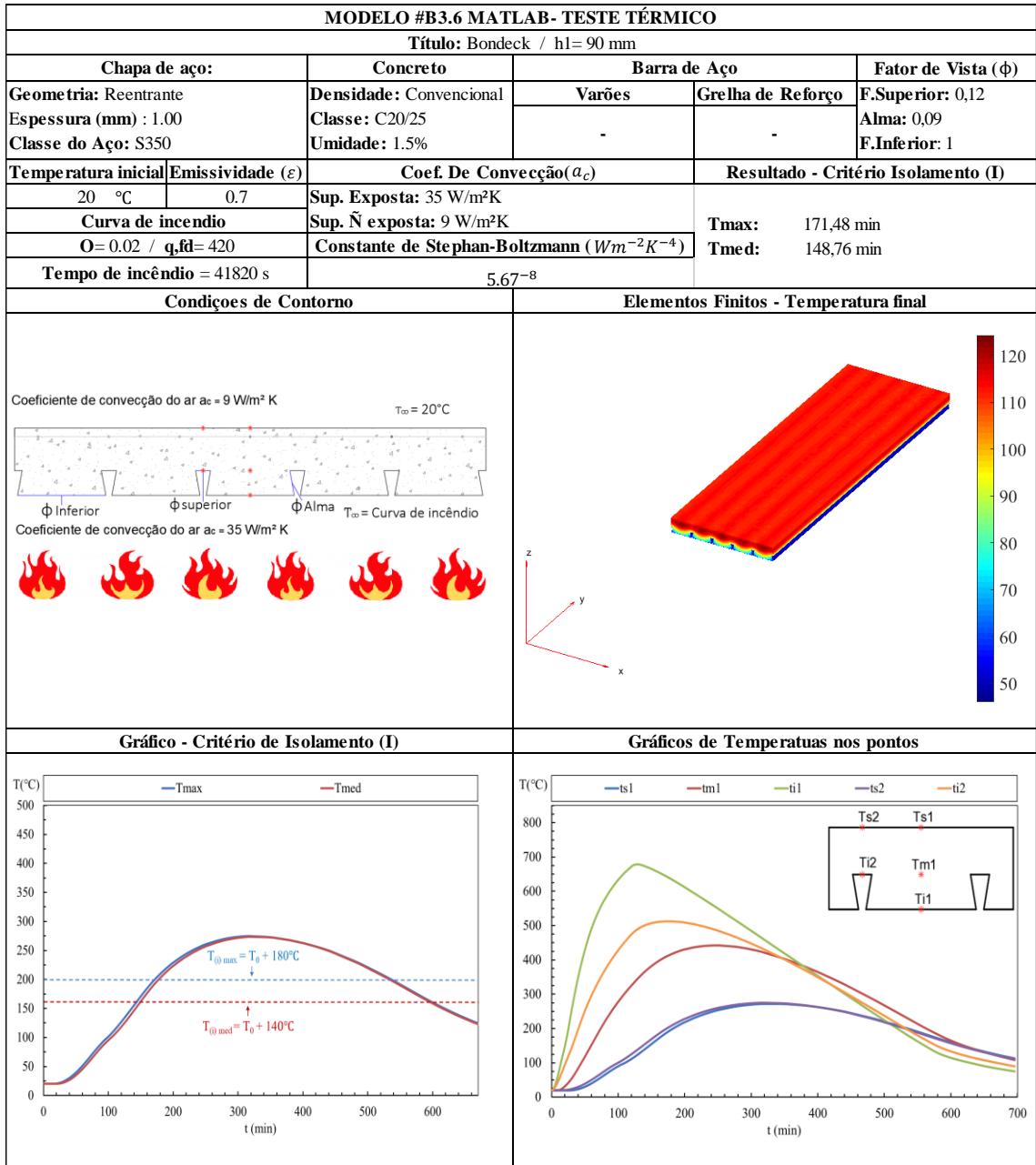
MODELO #B3.4 MATLAB- TESTE TÉRMICO

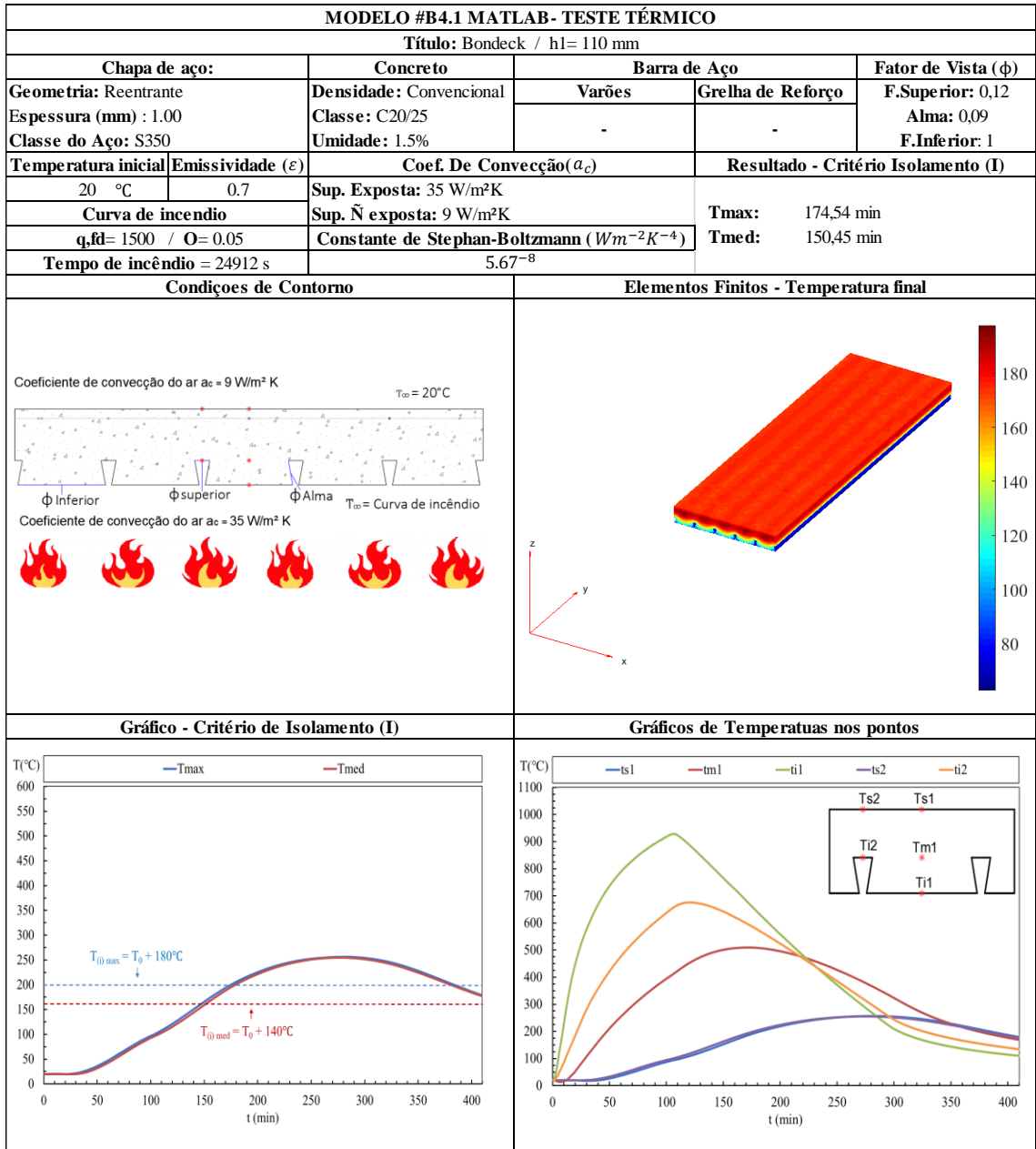
Título: Bondeck / h1= 90 mm

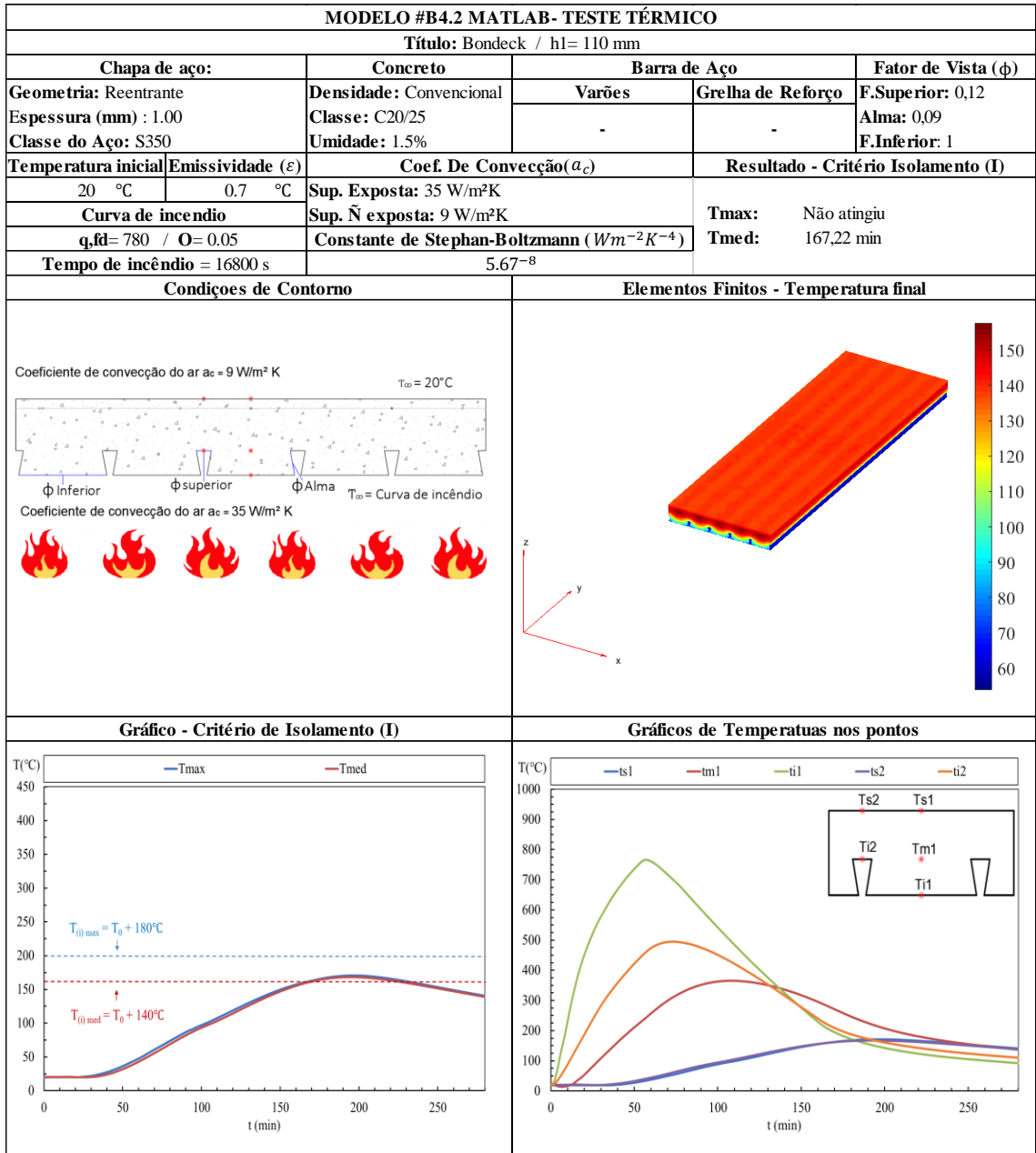
Chapa de aço:		Concreto		Barra de Aço		Fator de Vista (ϕ)	
Geometria: Reentrante	Densidade: Convencional	Varões	Grelha de Reforço	F.Superior: 0,12			
Espessura (mm) : 1.00	Classe: C20/25			Alma: 0,09			
Classe do Aço: S350	Umidade: 1.5%			F.Inferior: 1			
Temperatura inicial	Emissividade (ϵ)	Coef. De Convecção (a_c)		Resultado - Critério Isolamento (I)			
20 °C	0.7 °C	Sup. Exposta: 35 W/m ² K		Tmax: Não atingiu			
Curva de incêndio		Sup. Ñ exposta: 9 W/m ² K		Tmed: Não atingiu			
q,fd= 285 / O= 0.05		Constante de Stephan-Boltzmann ($Wm^{-2}K^{-4}$)					
Tempo de incêndio = 10152 s		5,67 ⁻⁸					

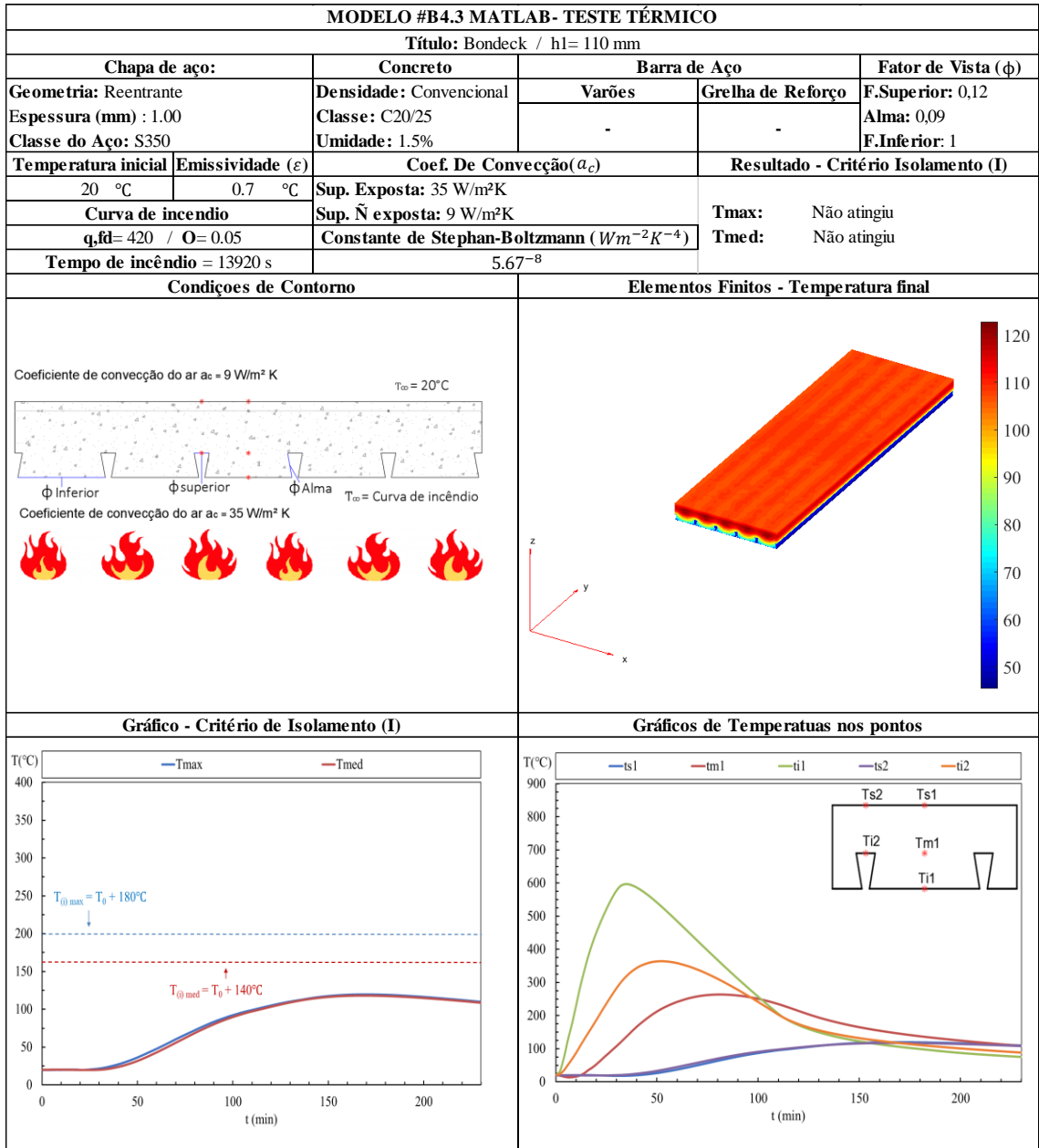


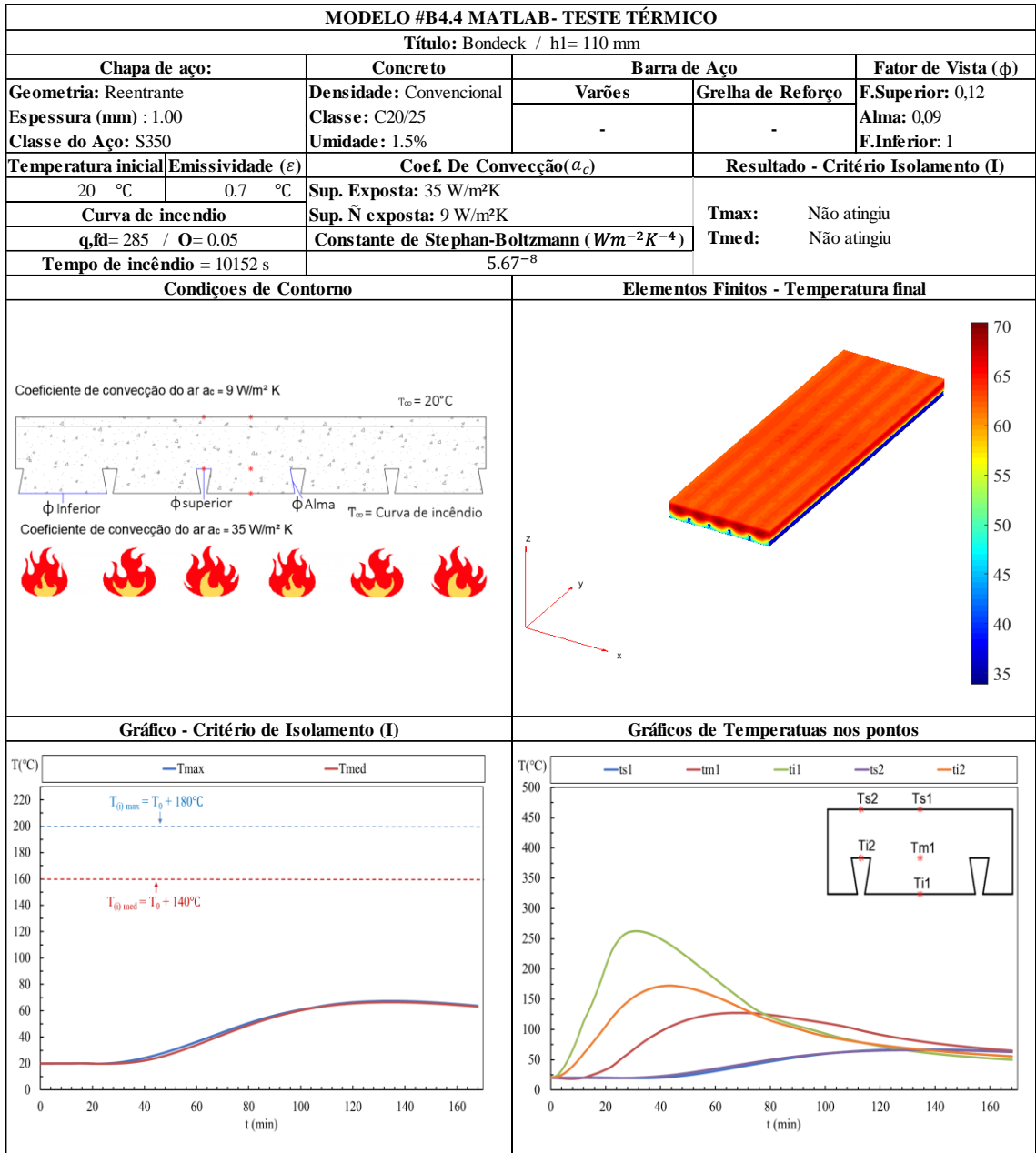


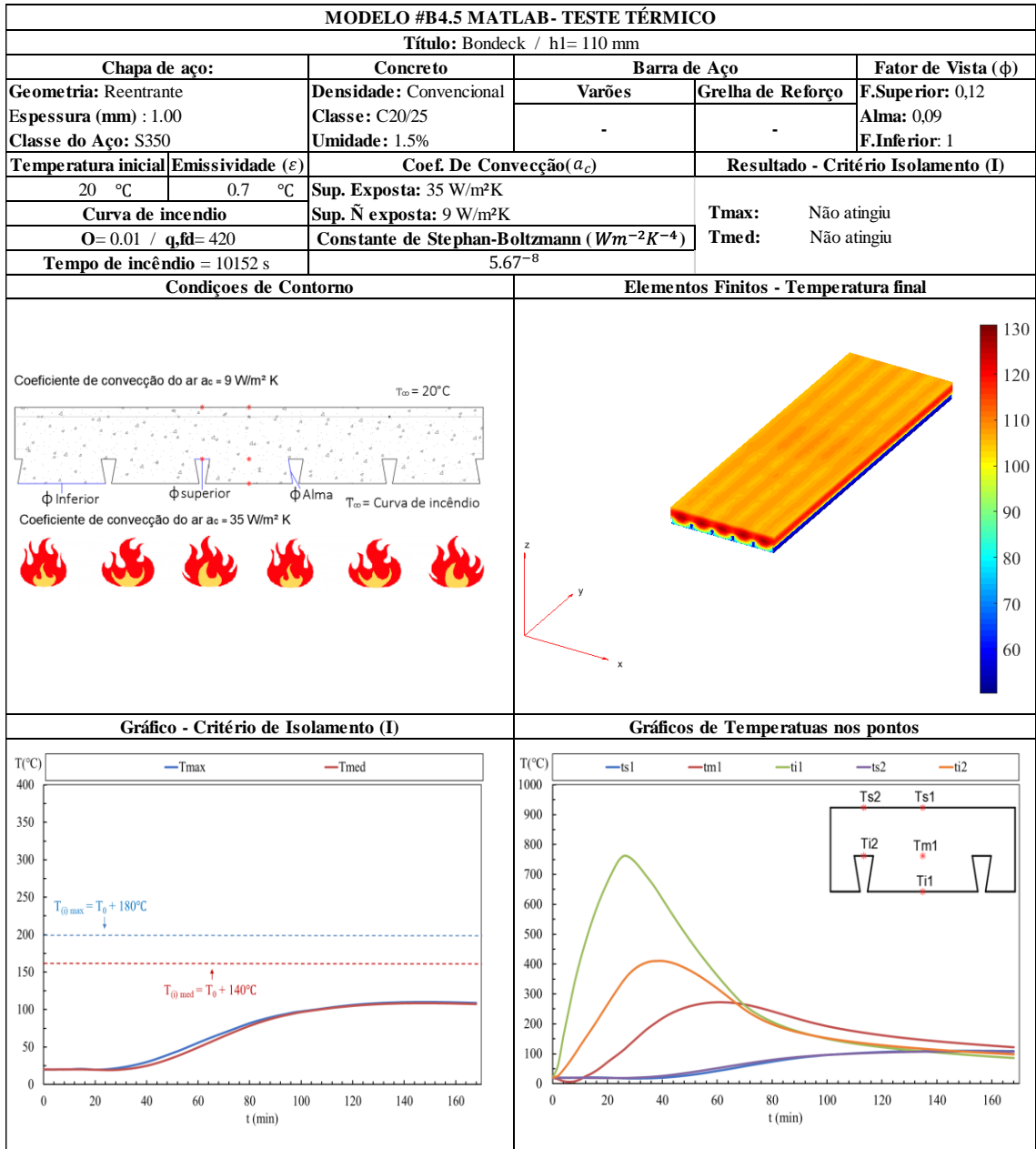


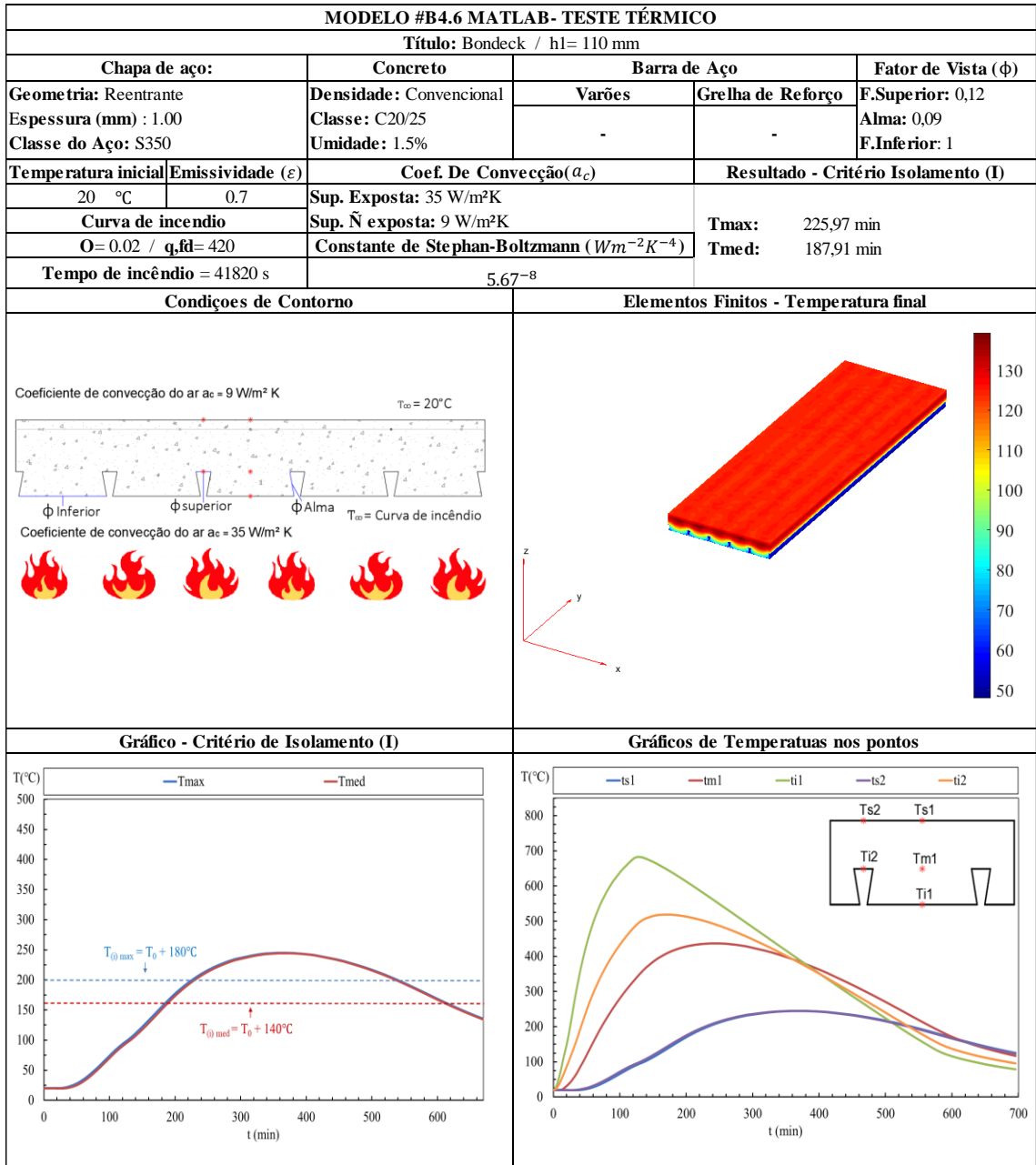


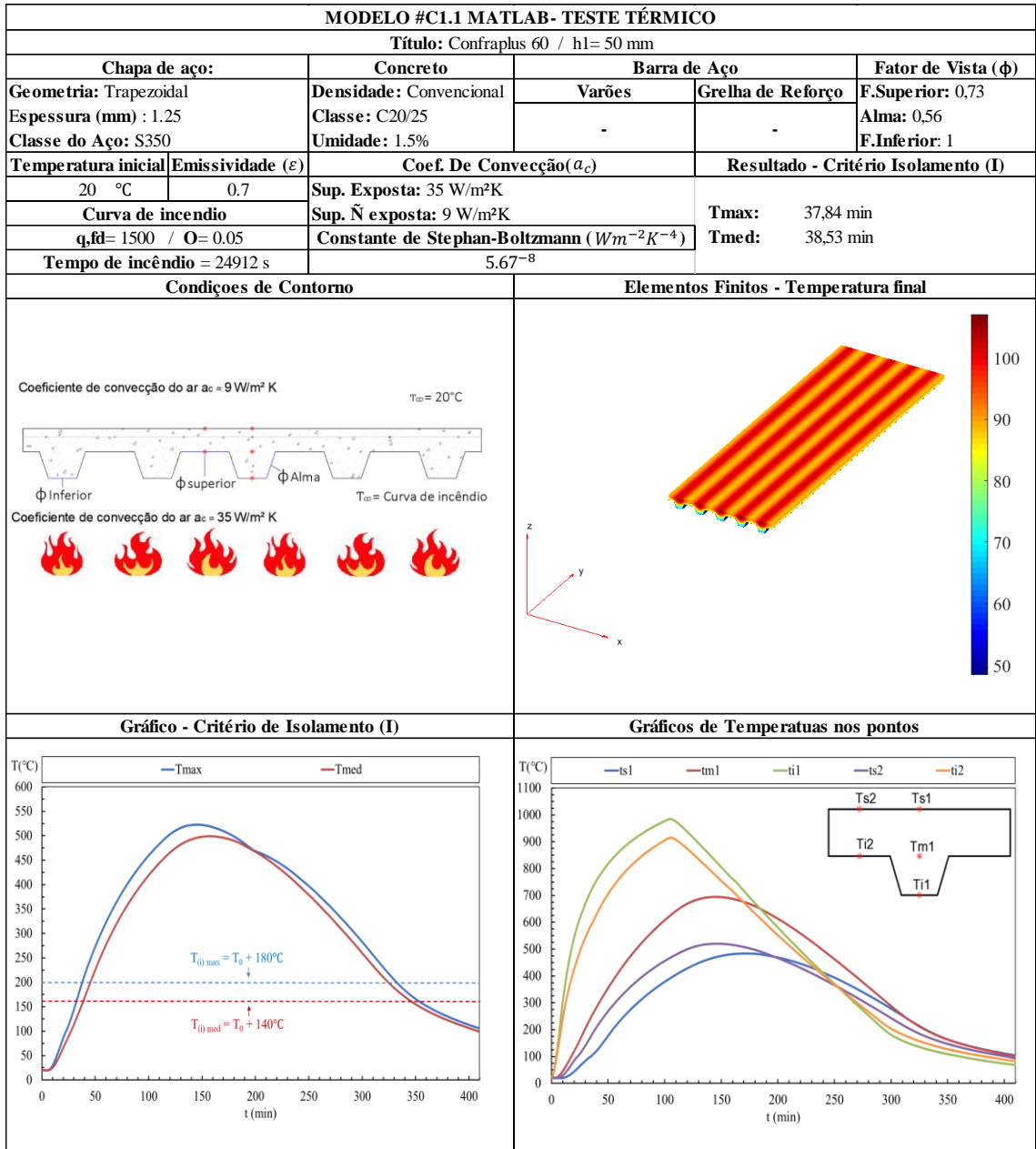


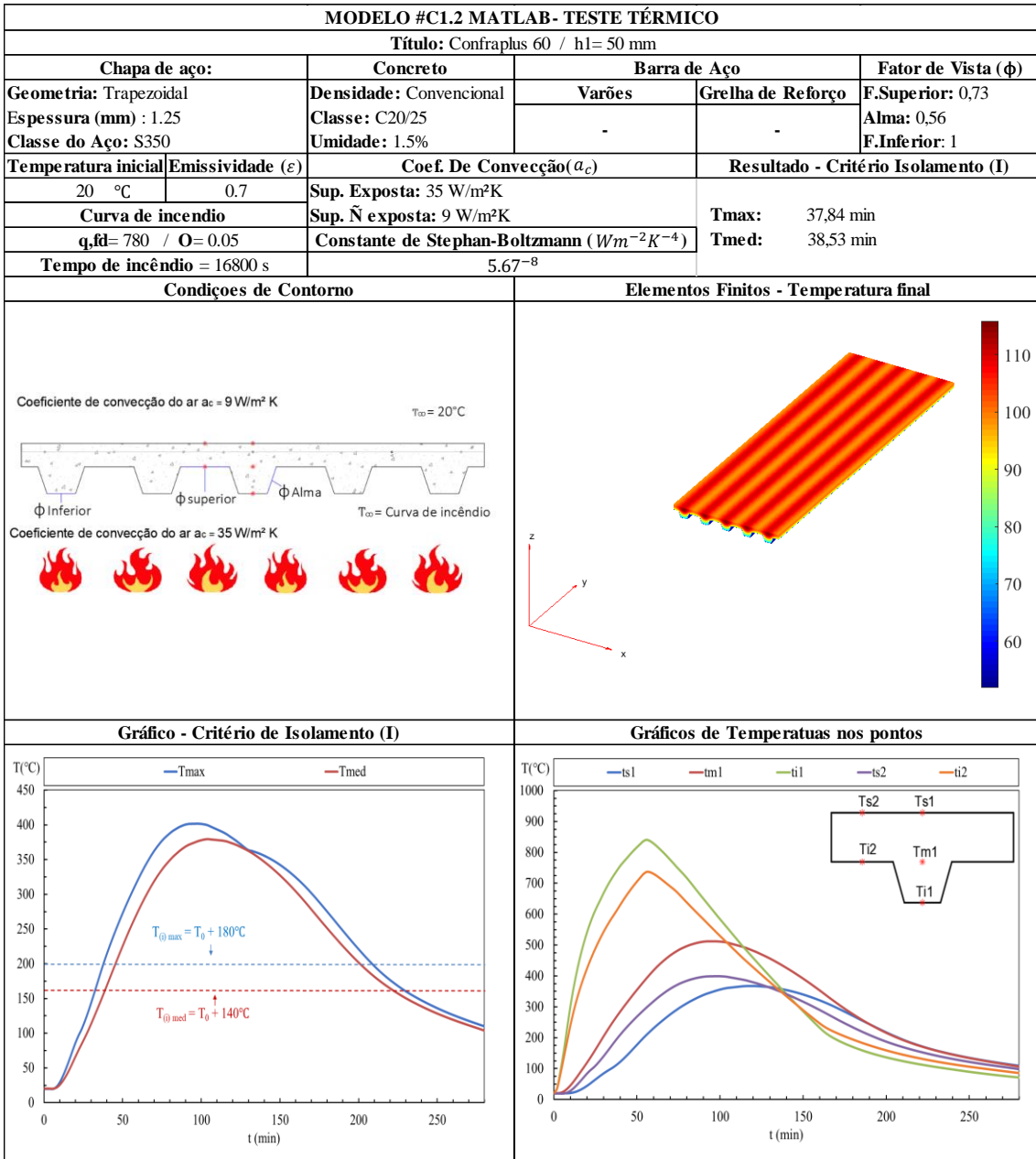


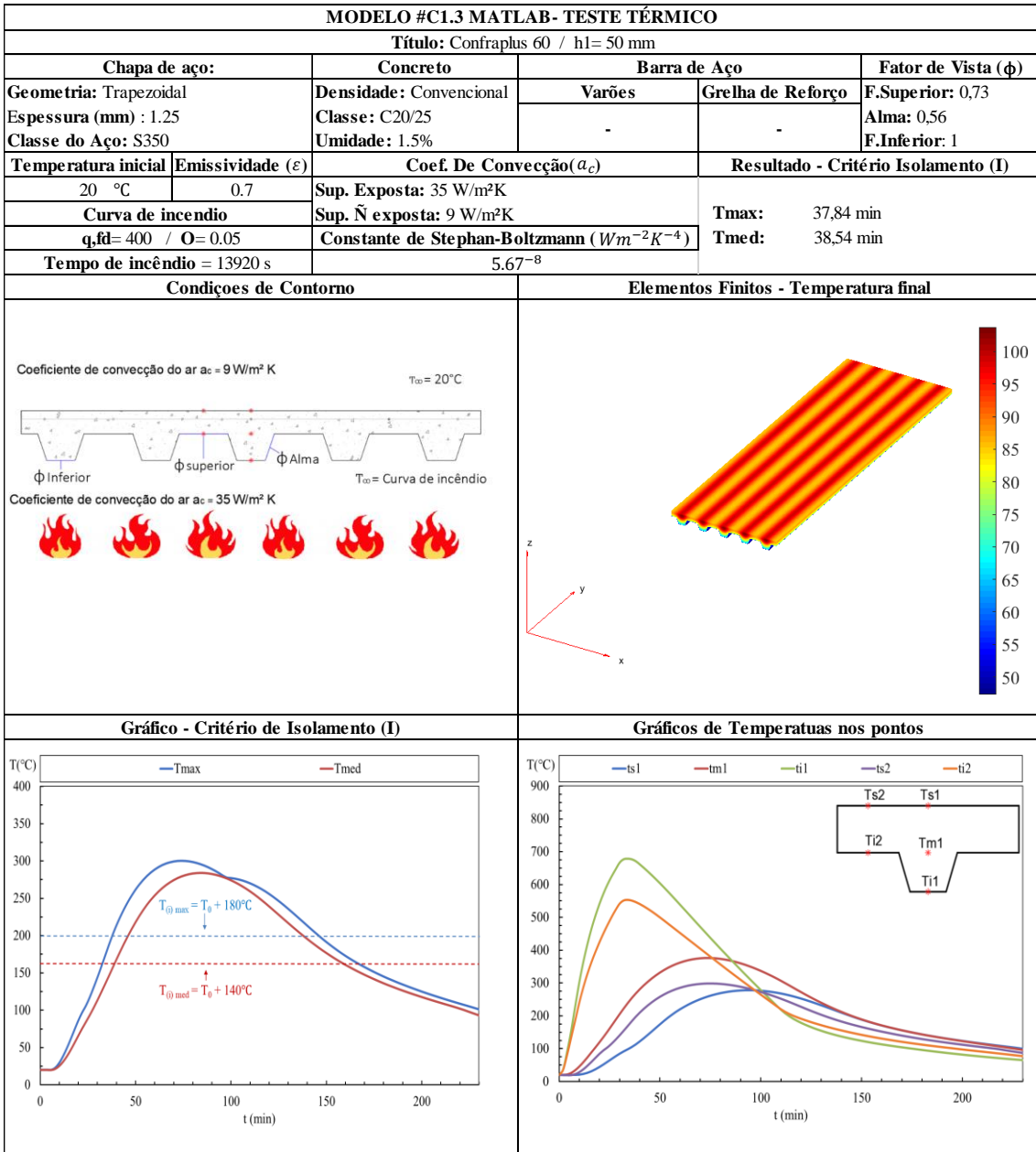


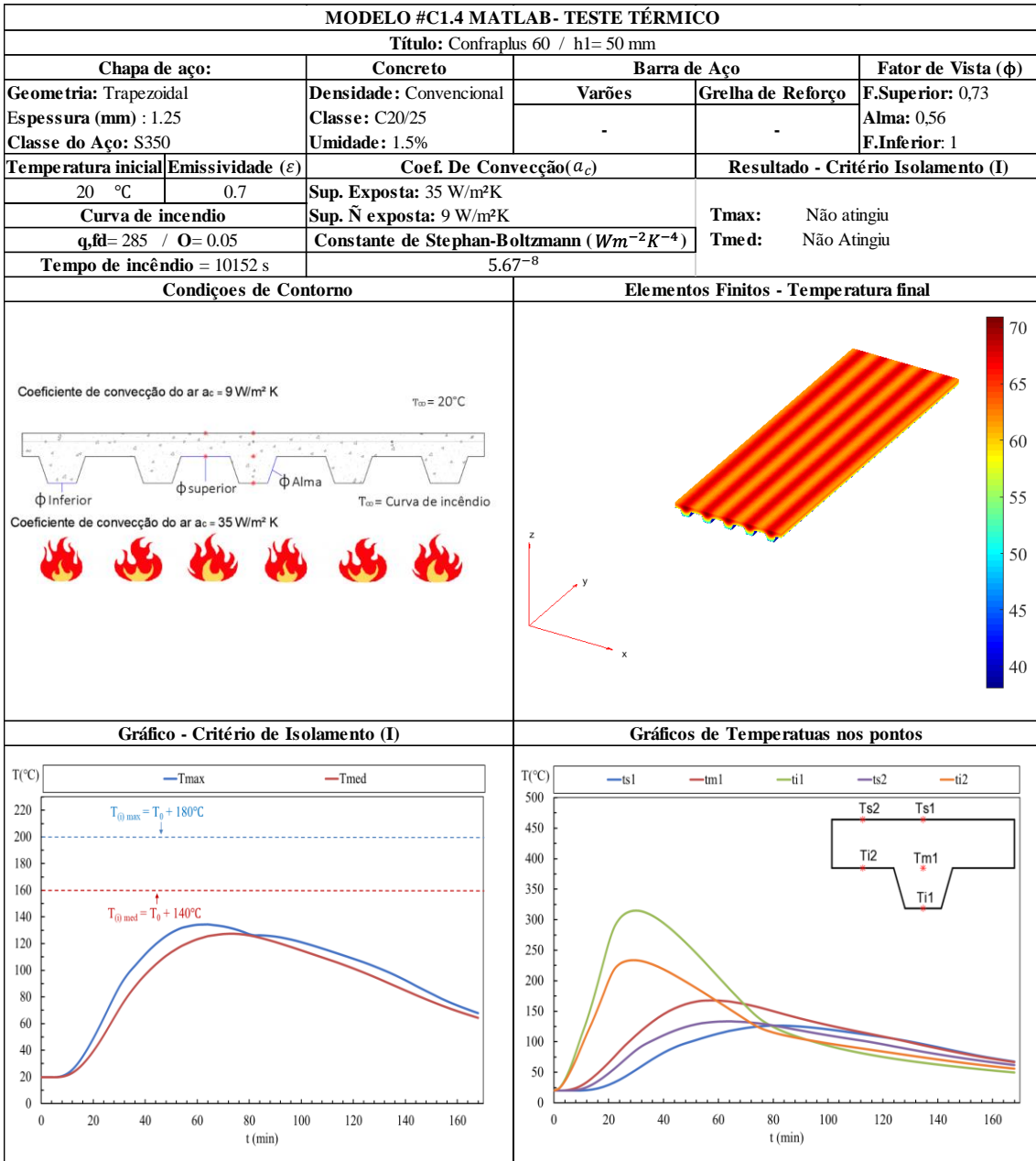


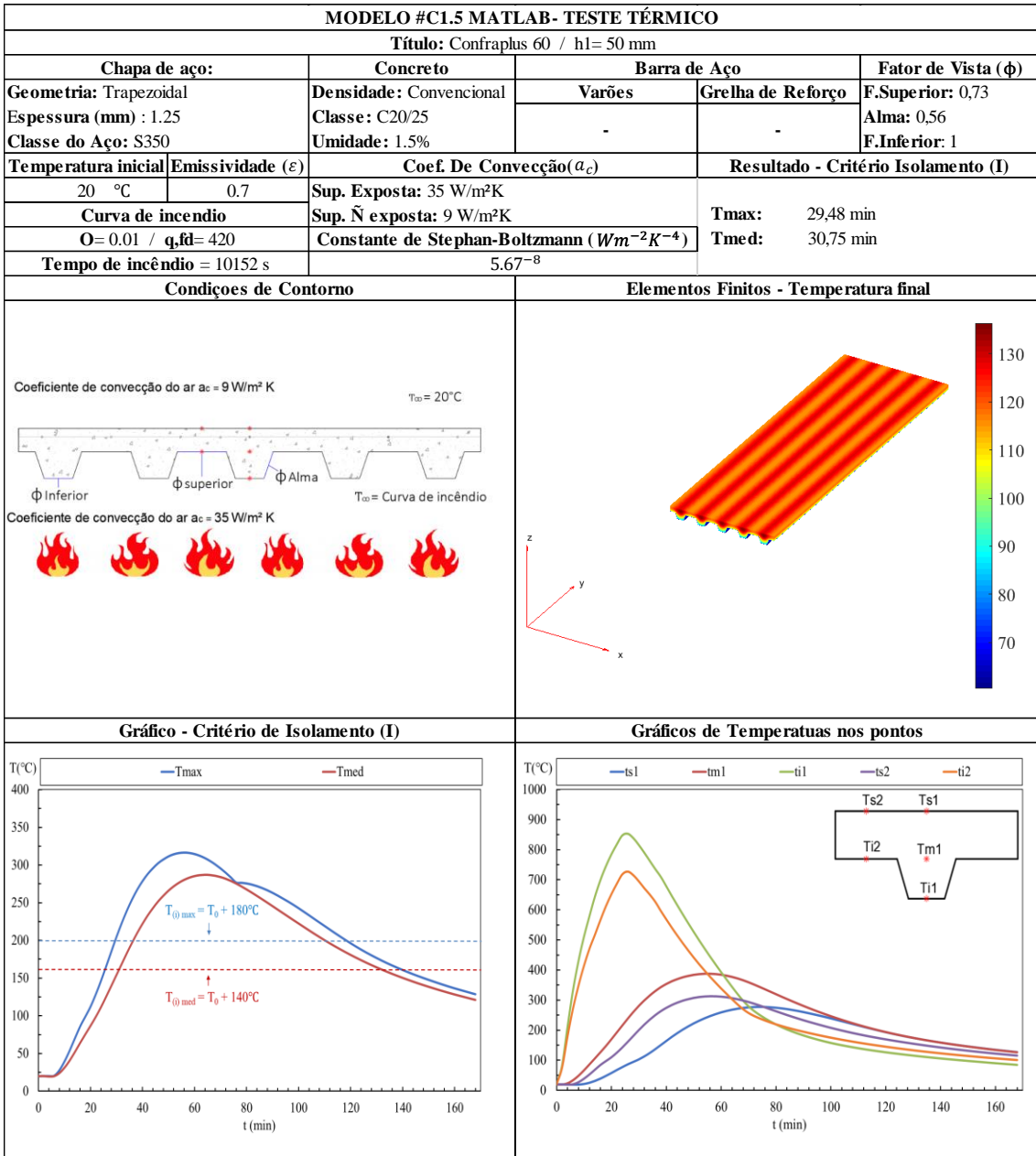


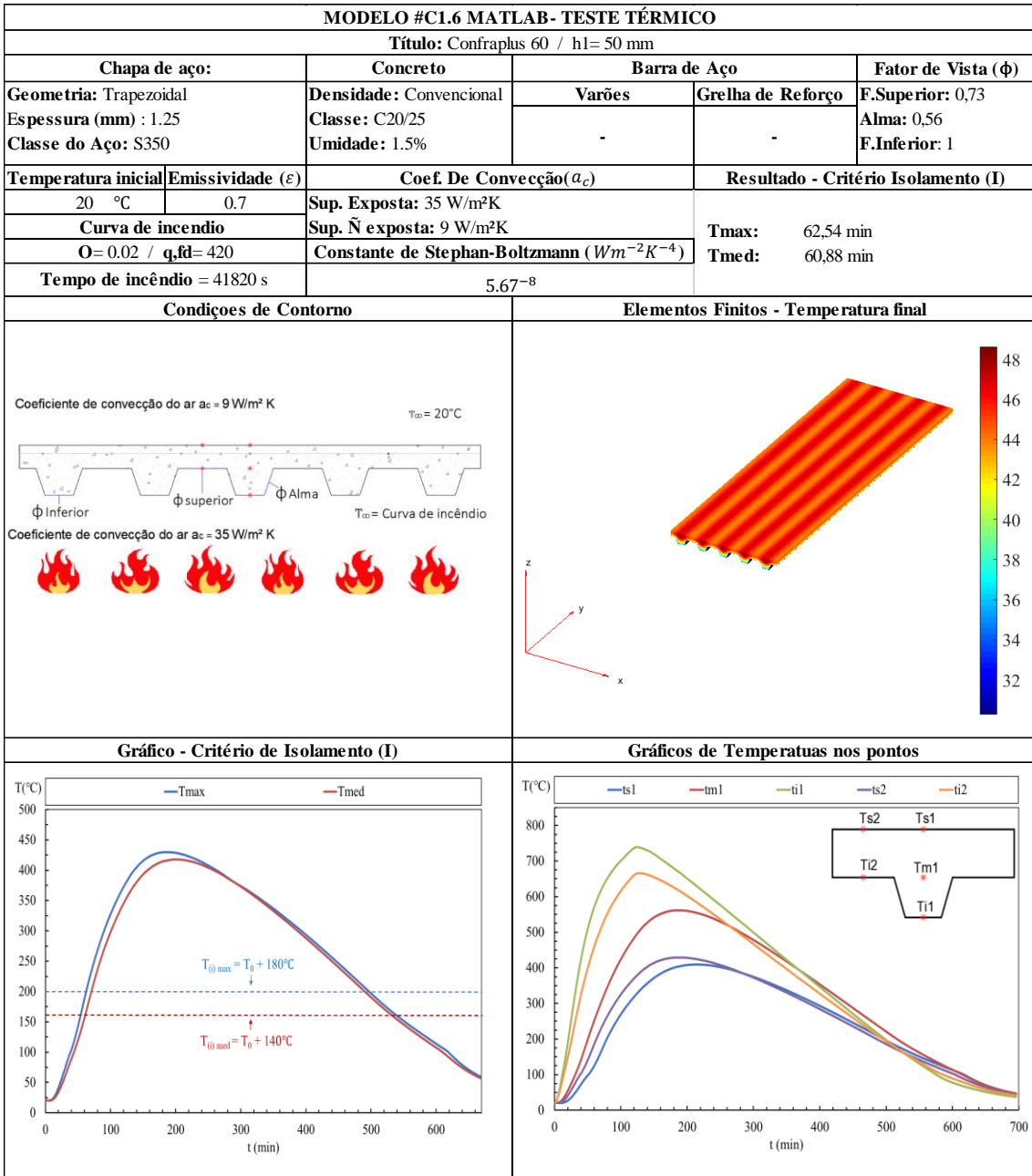


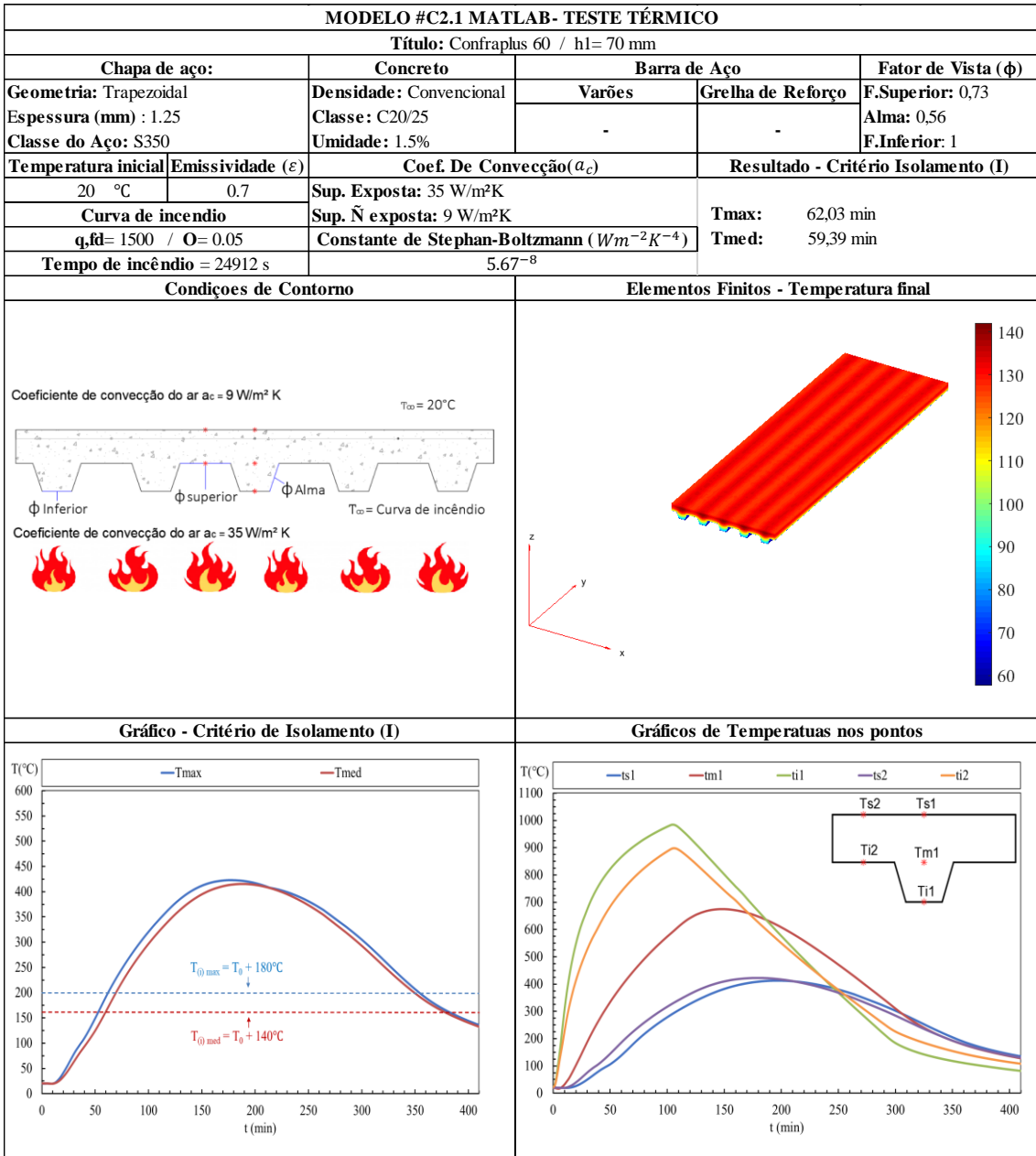


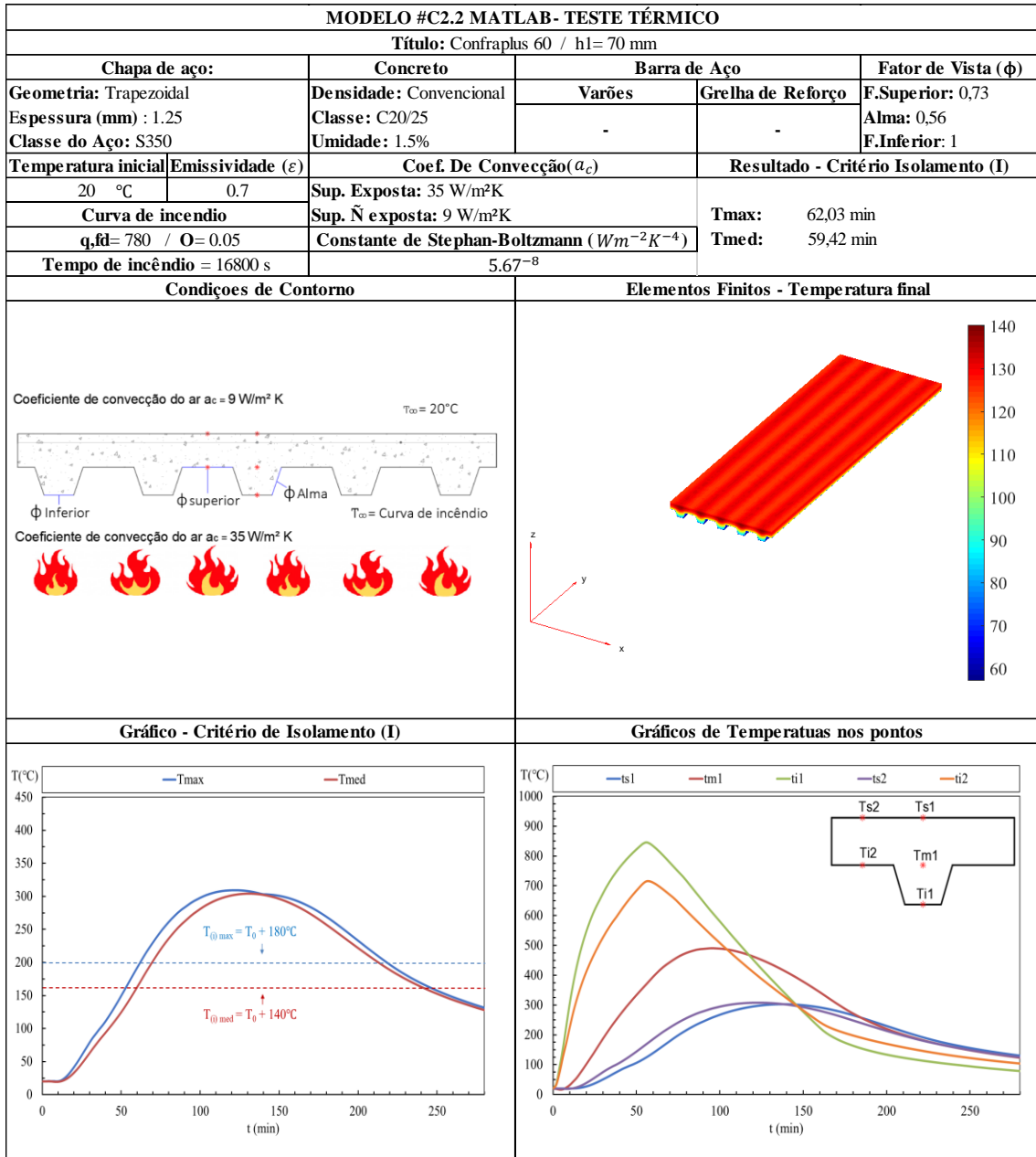


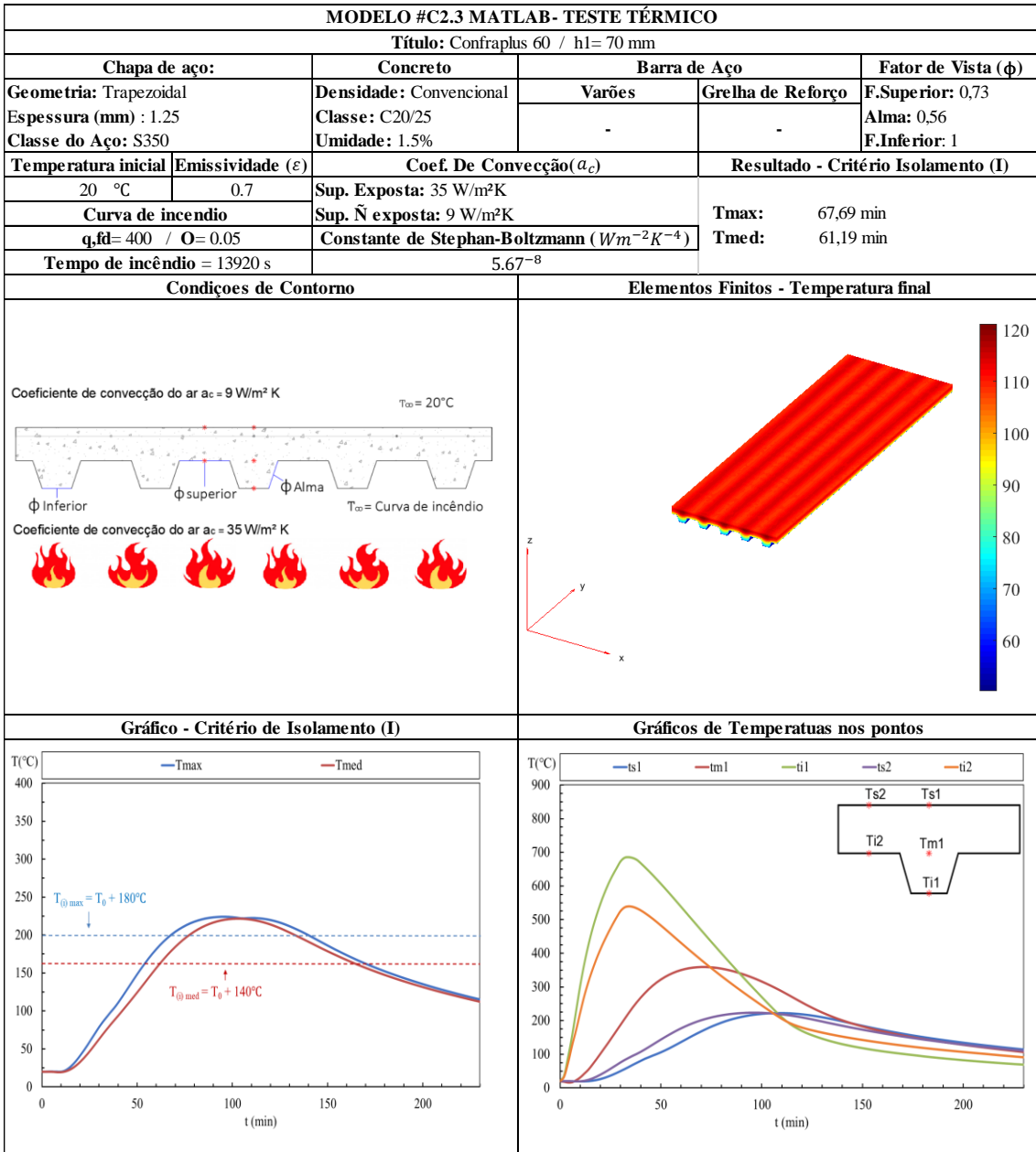


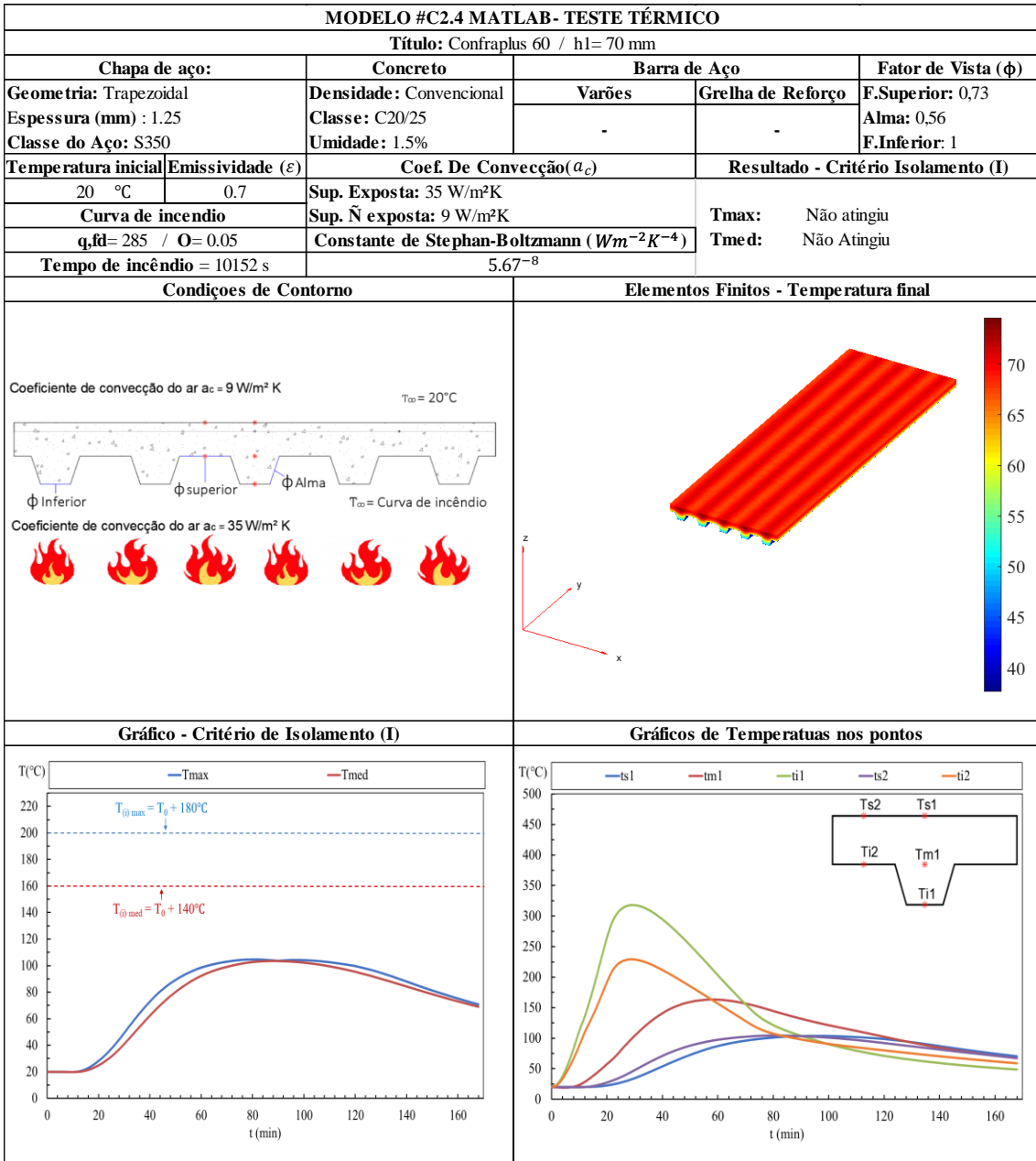


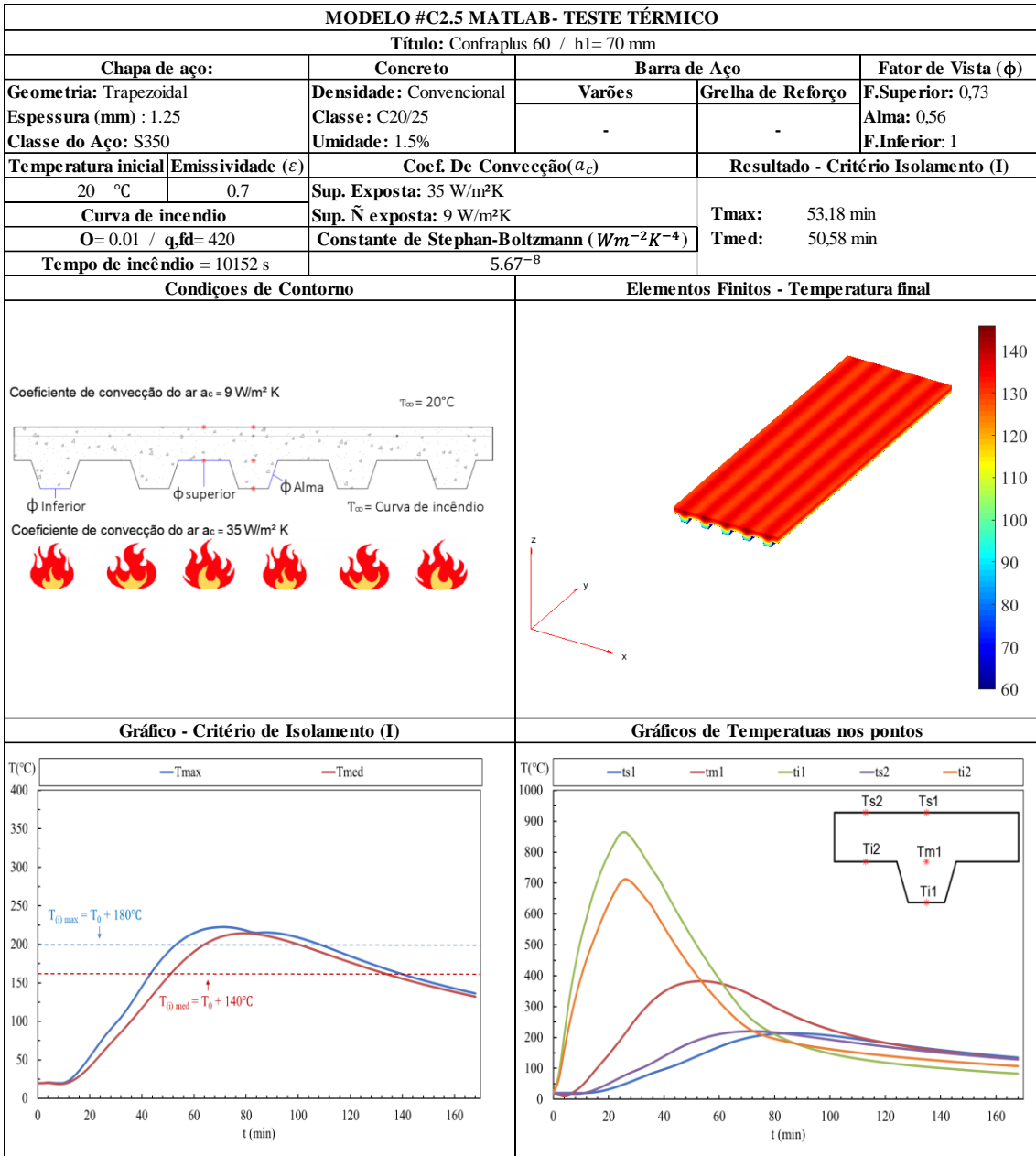


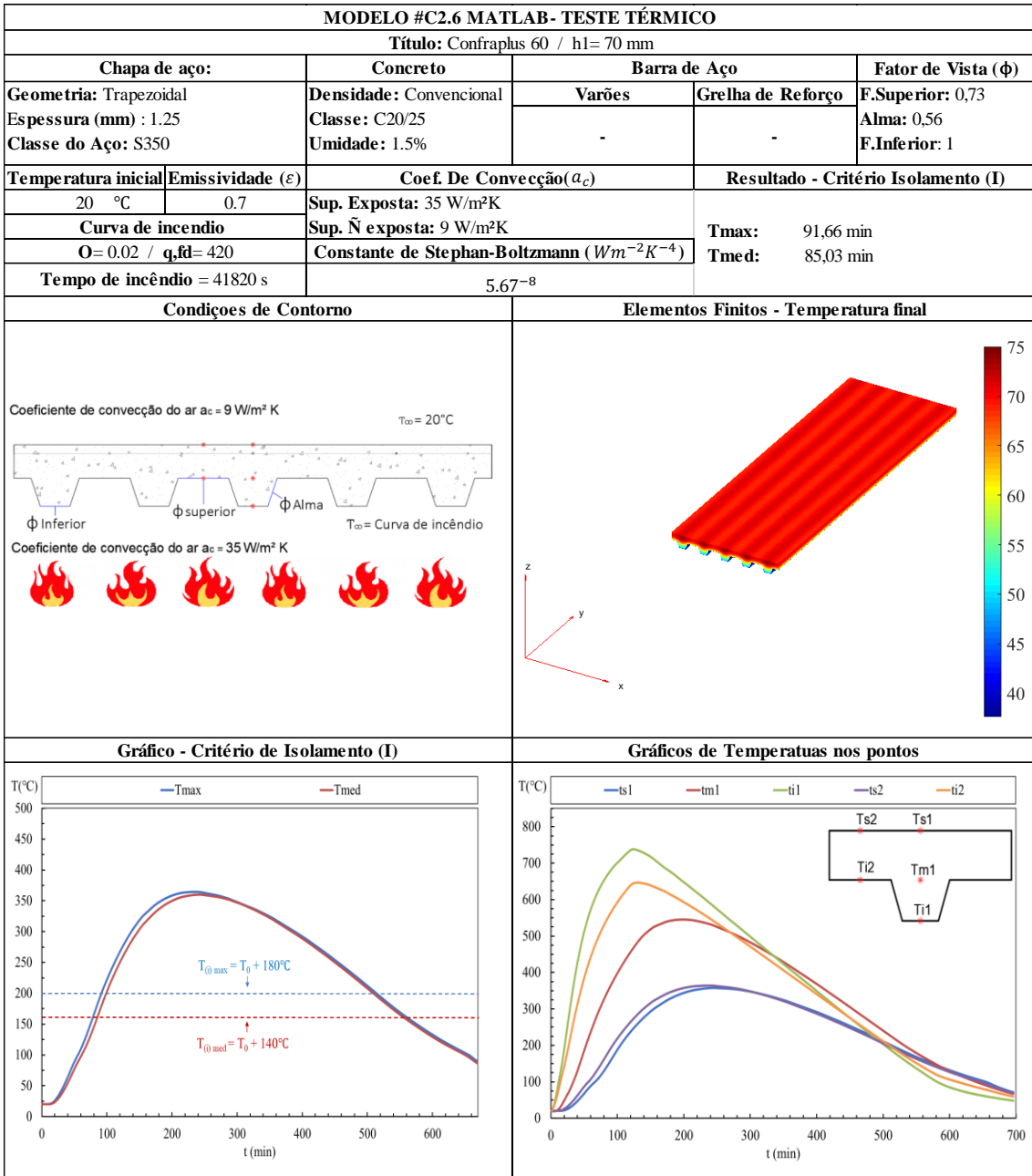


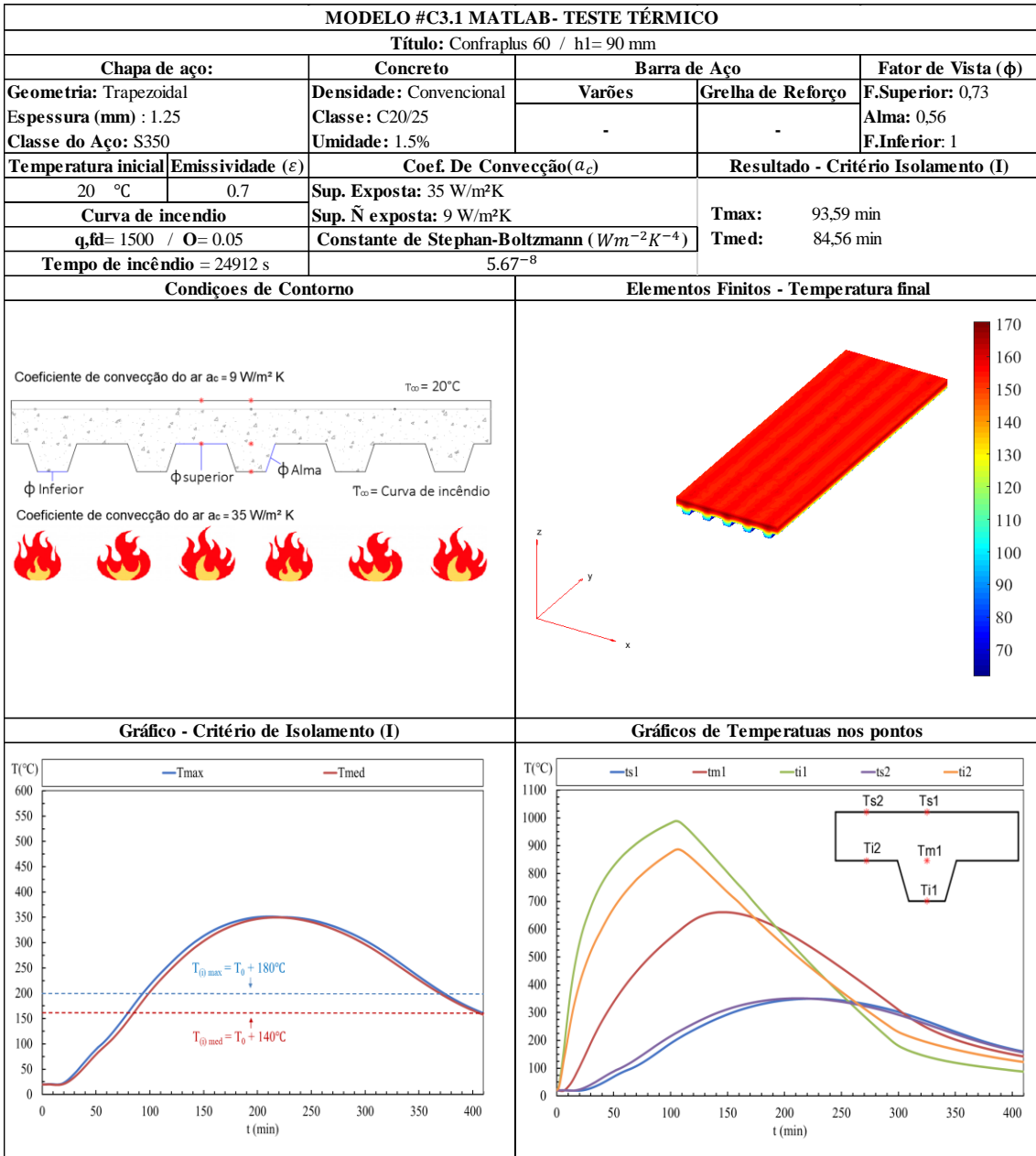


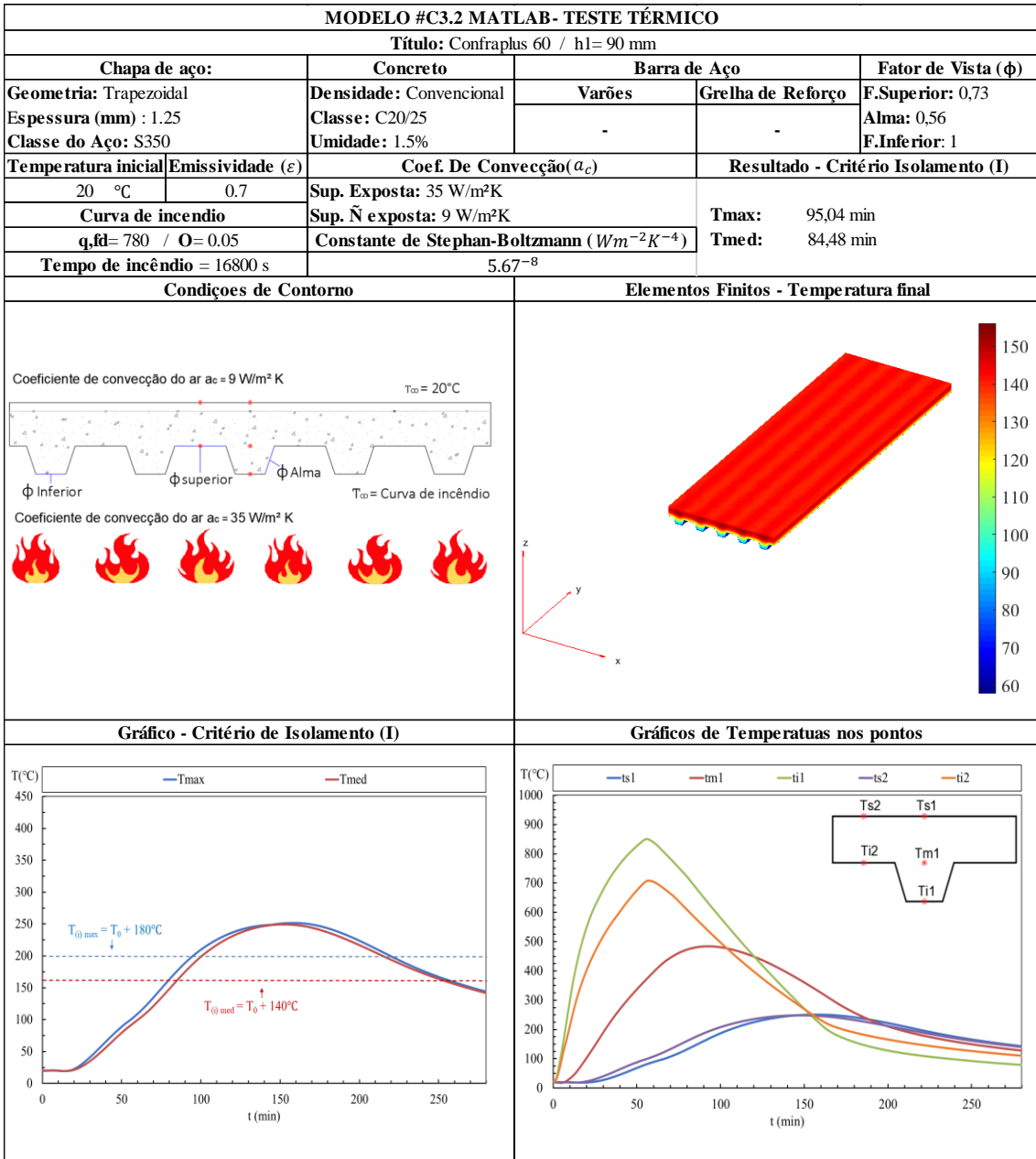


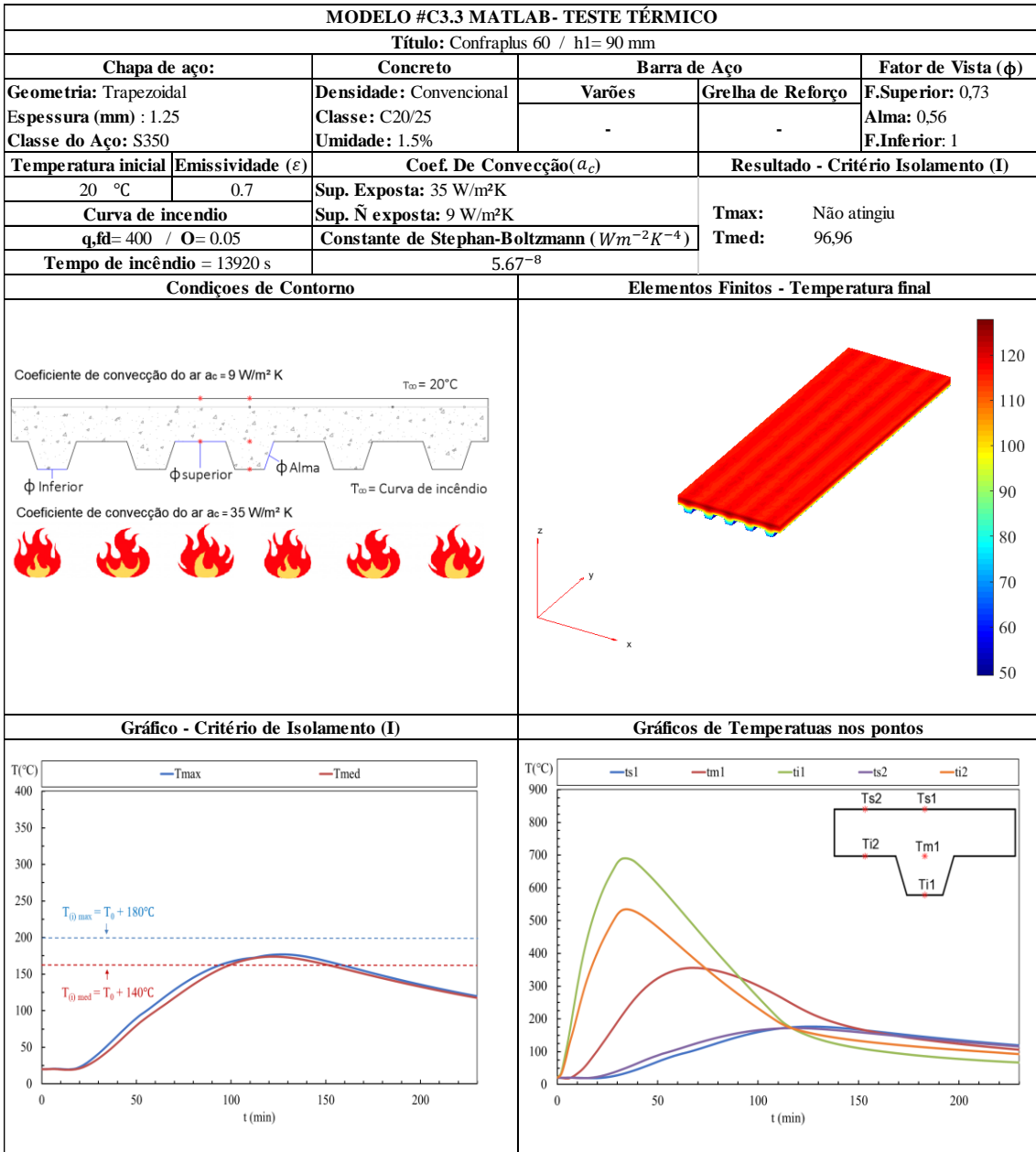


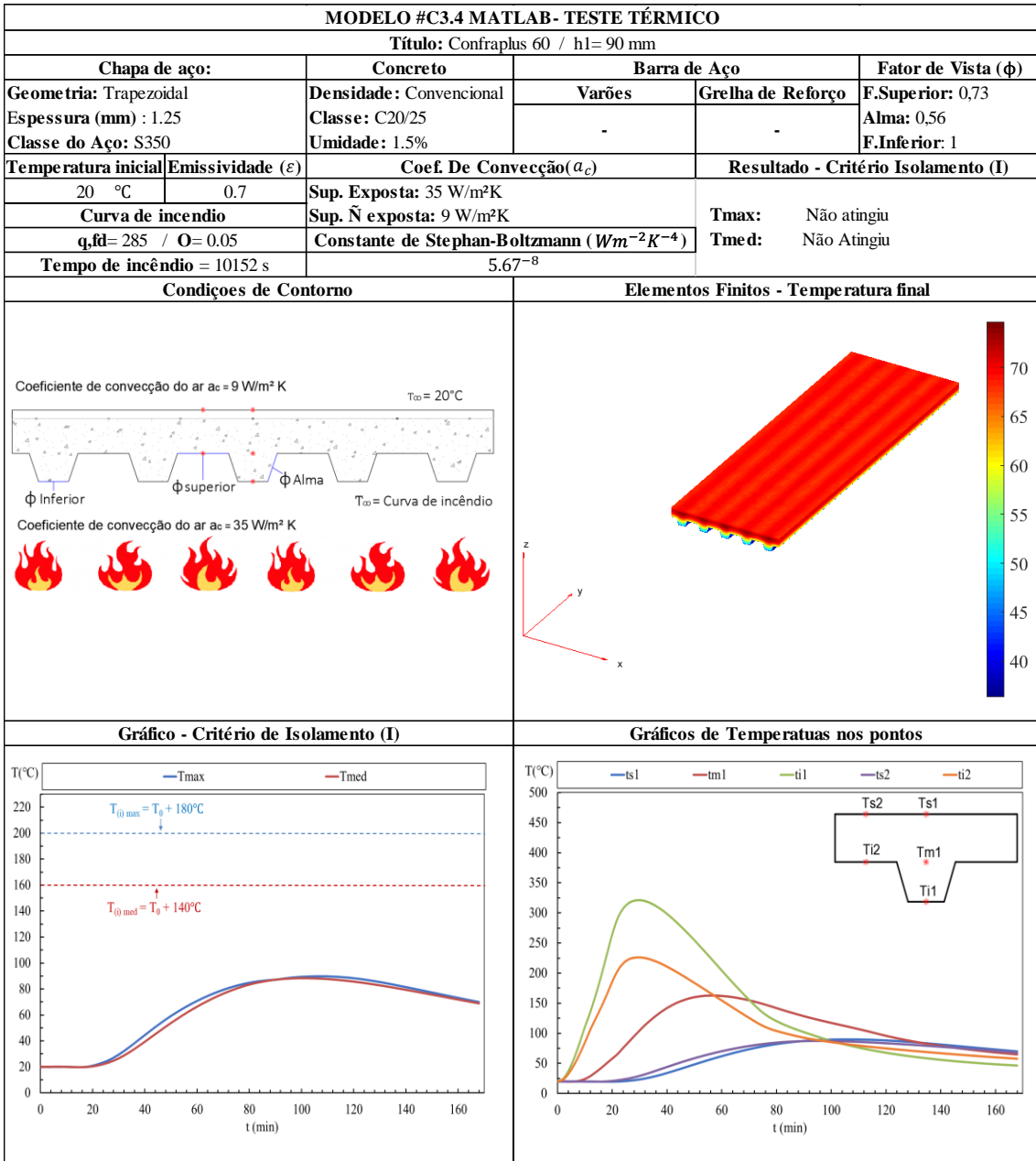


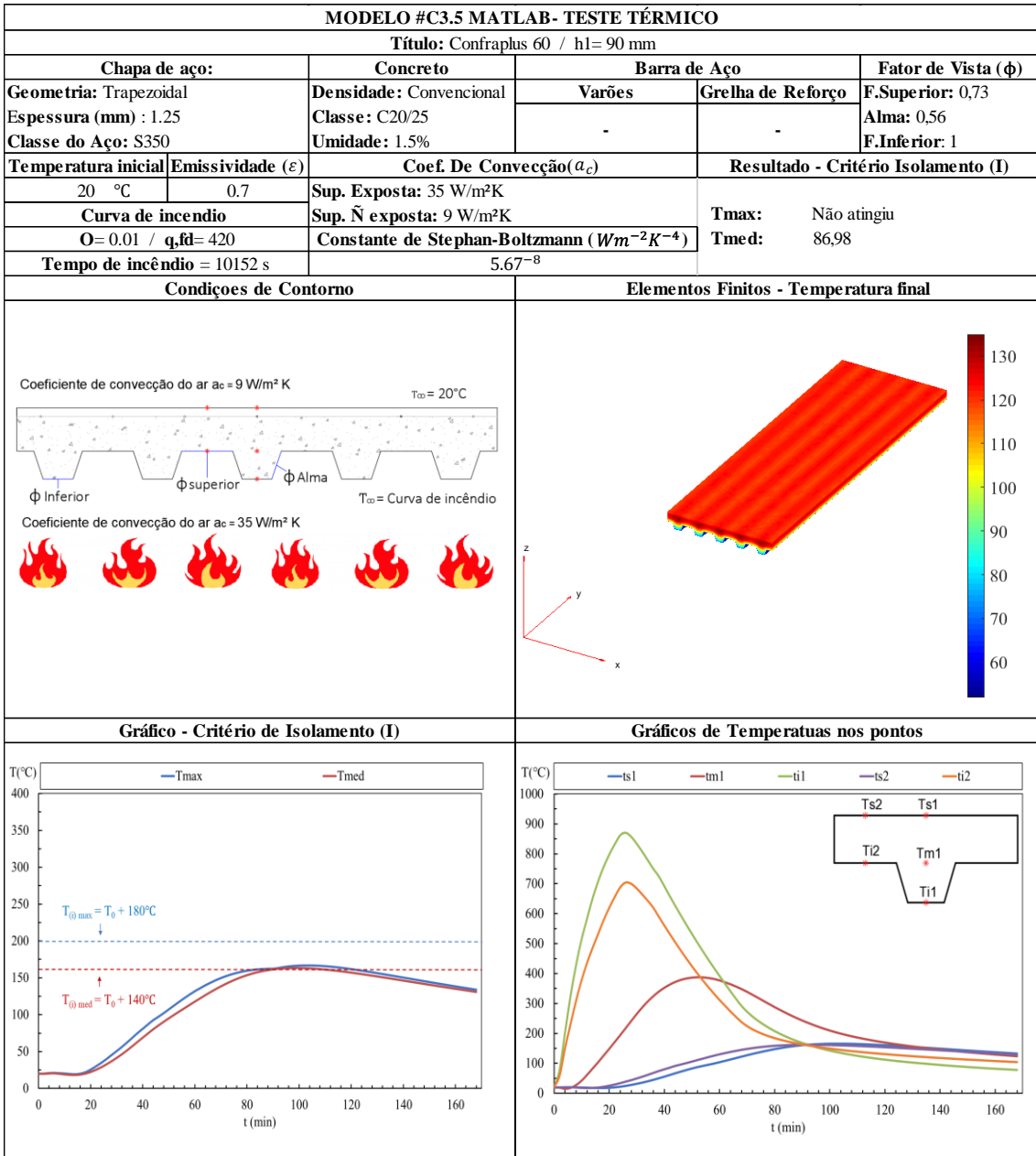


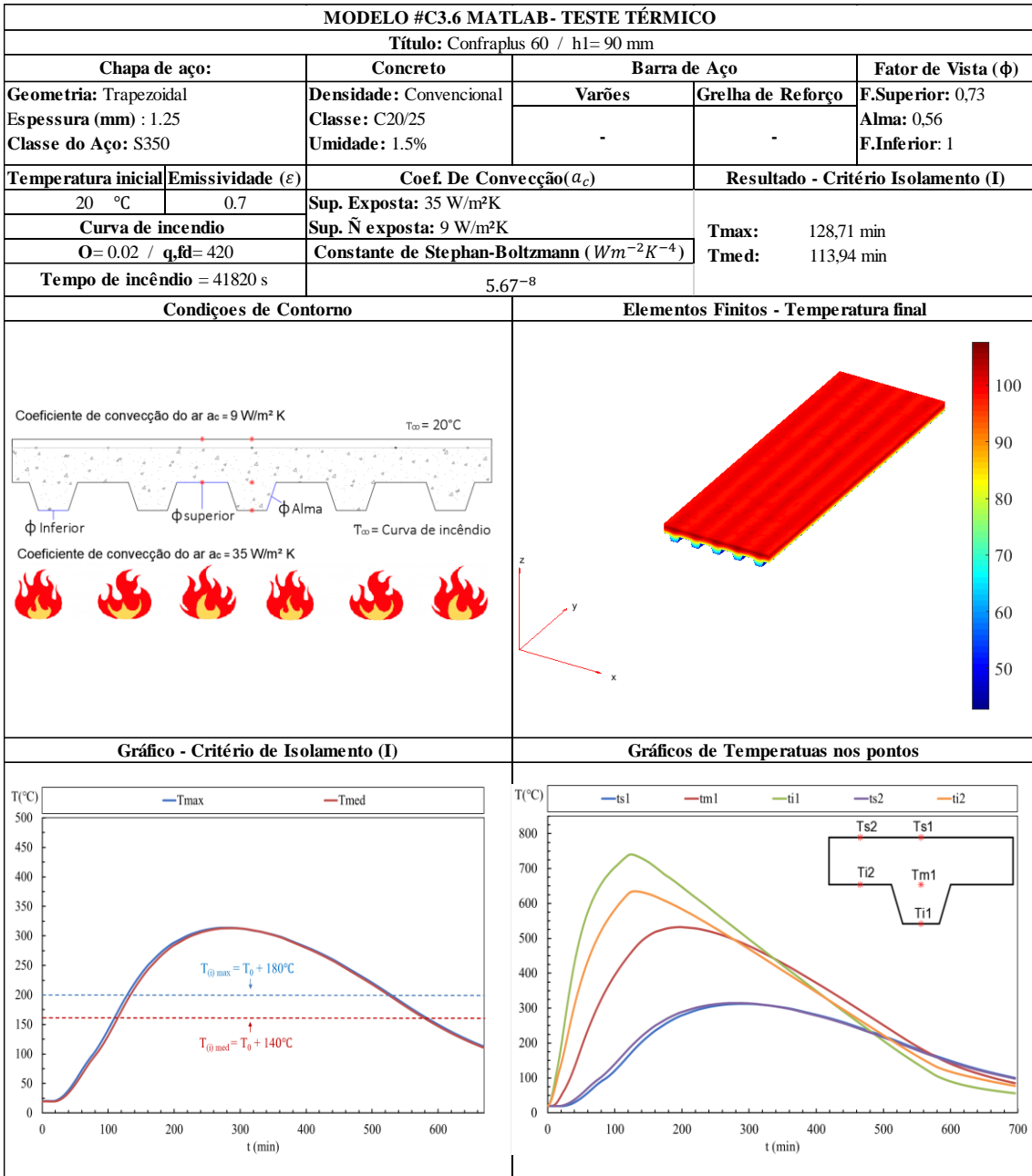


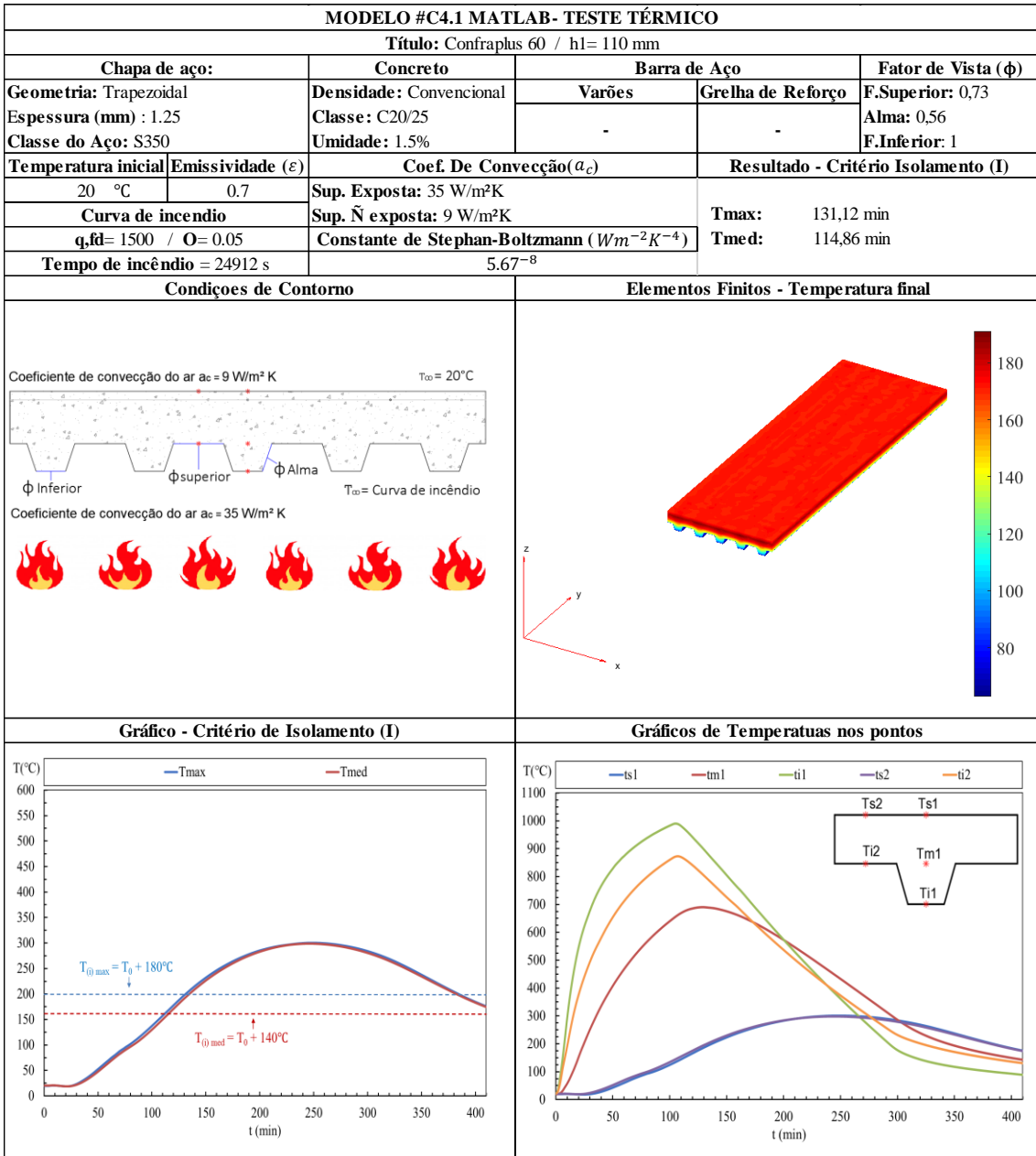


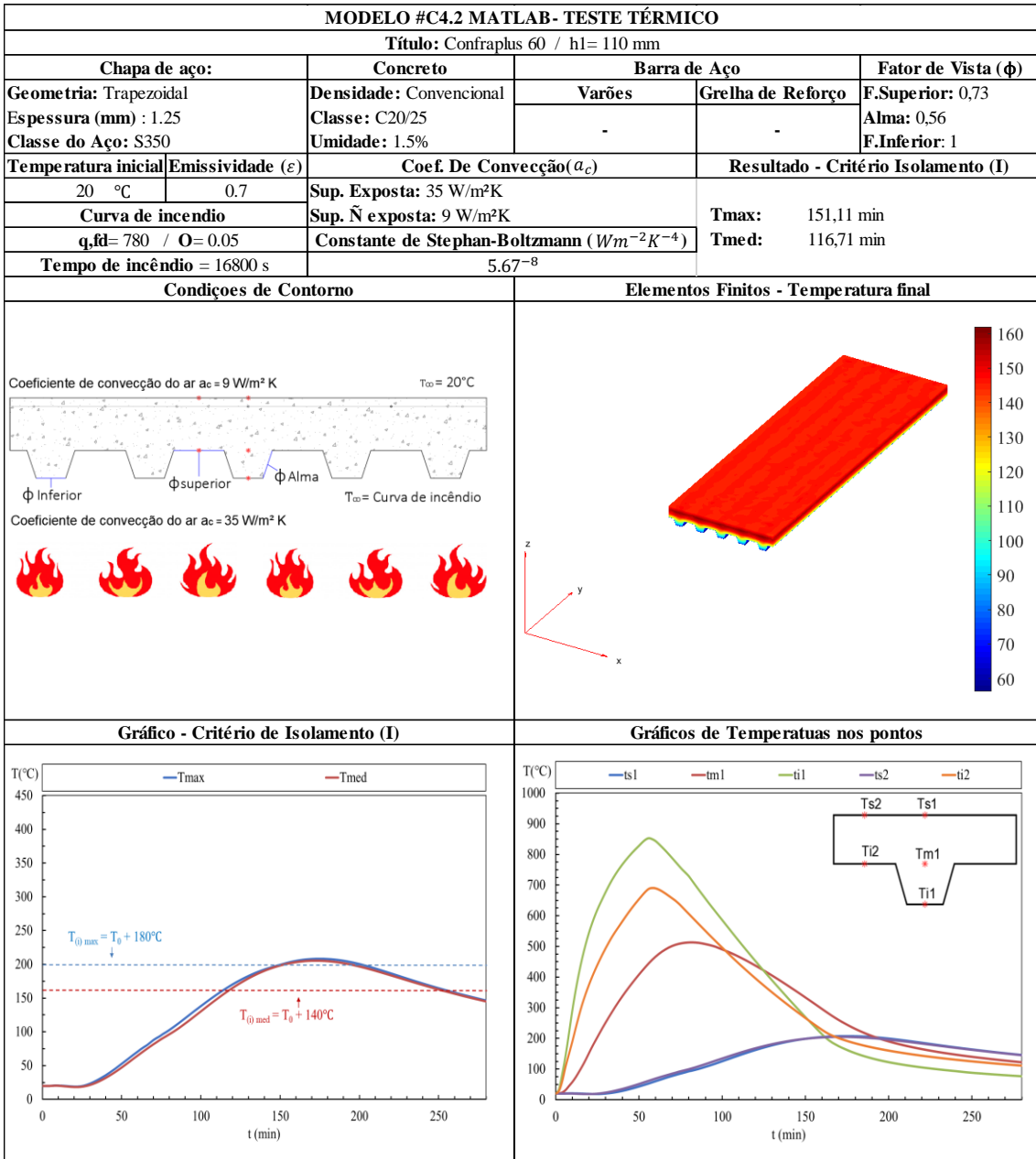


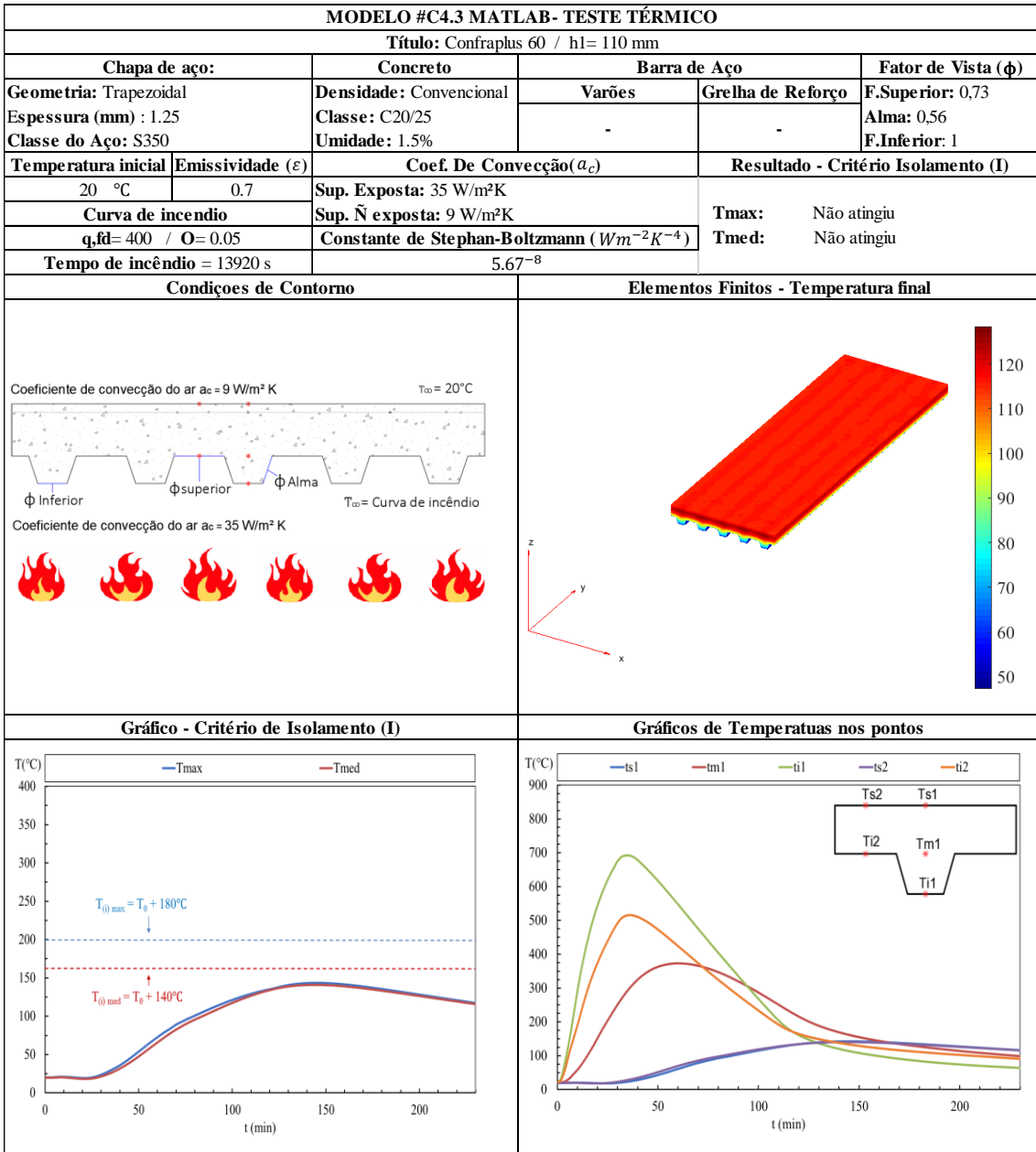


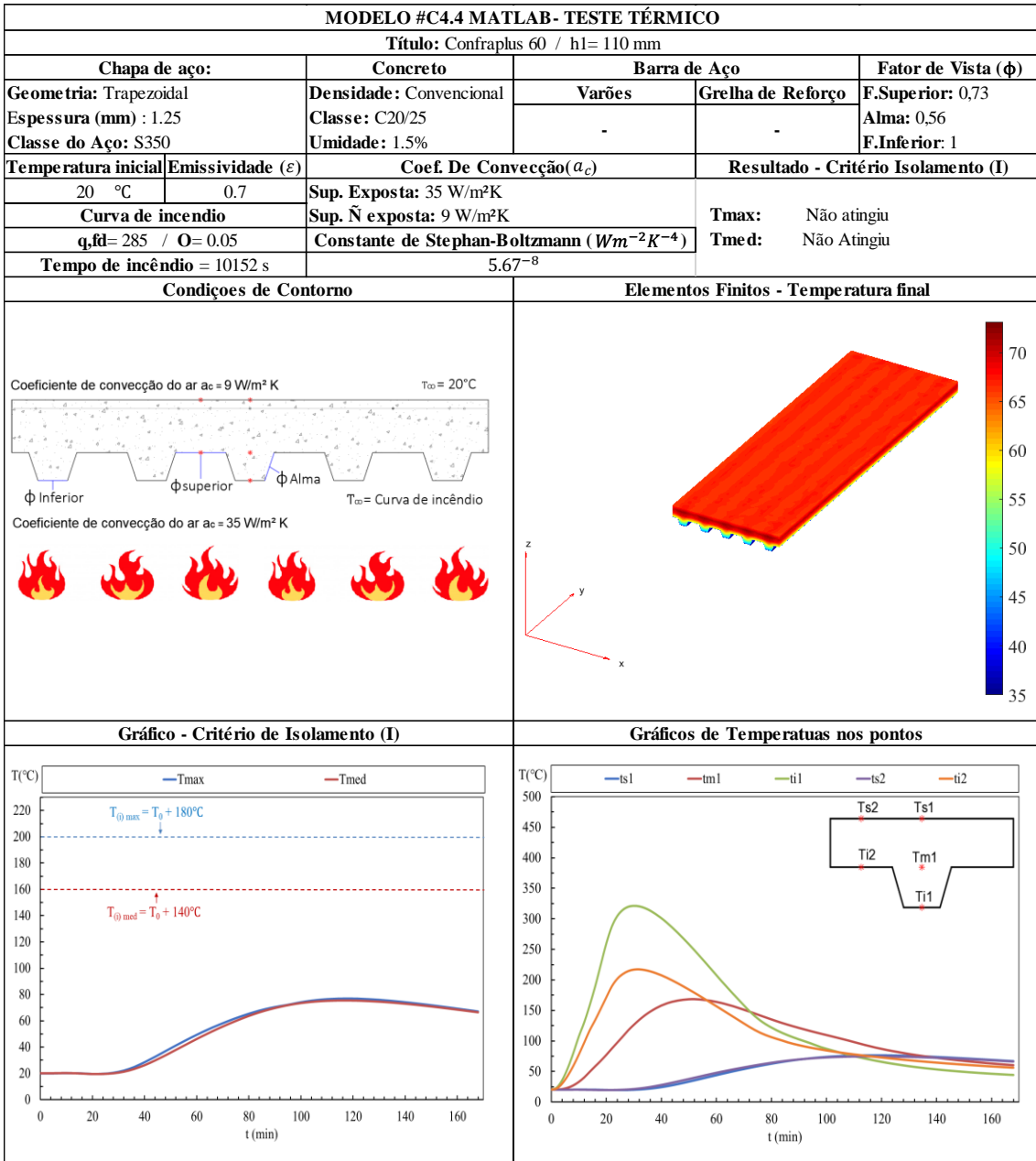


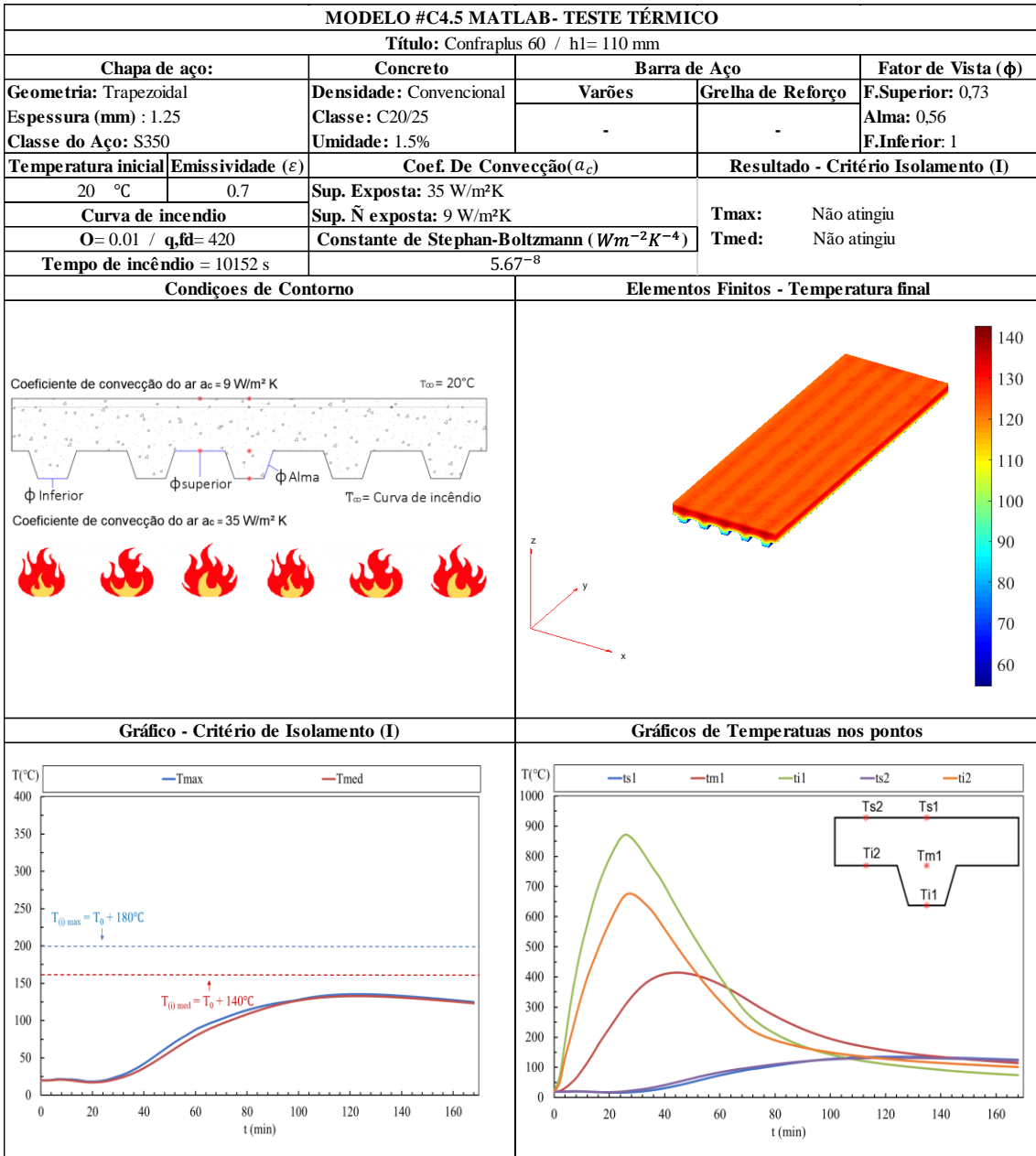


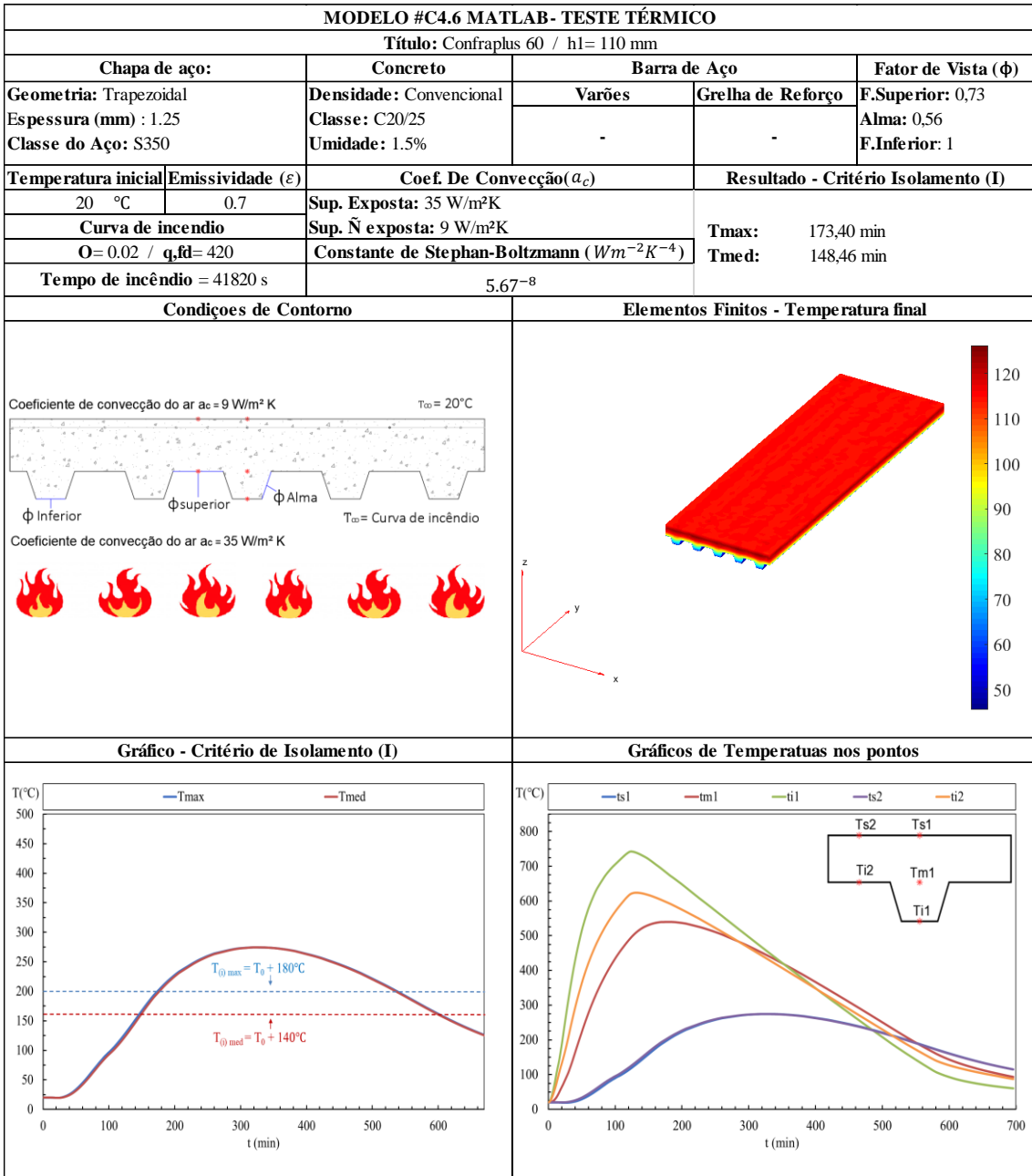


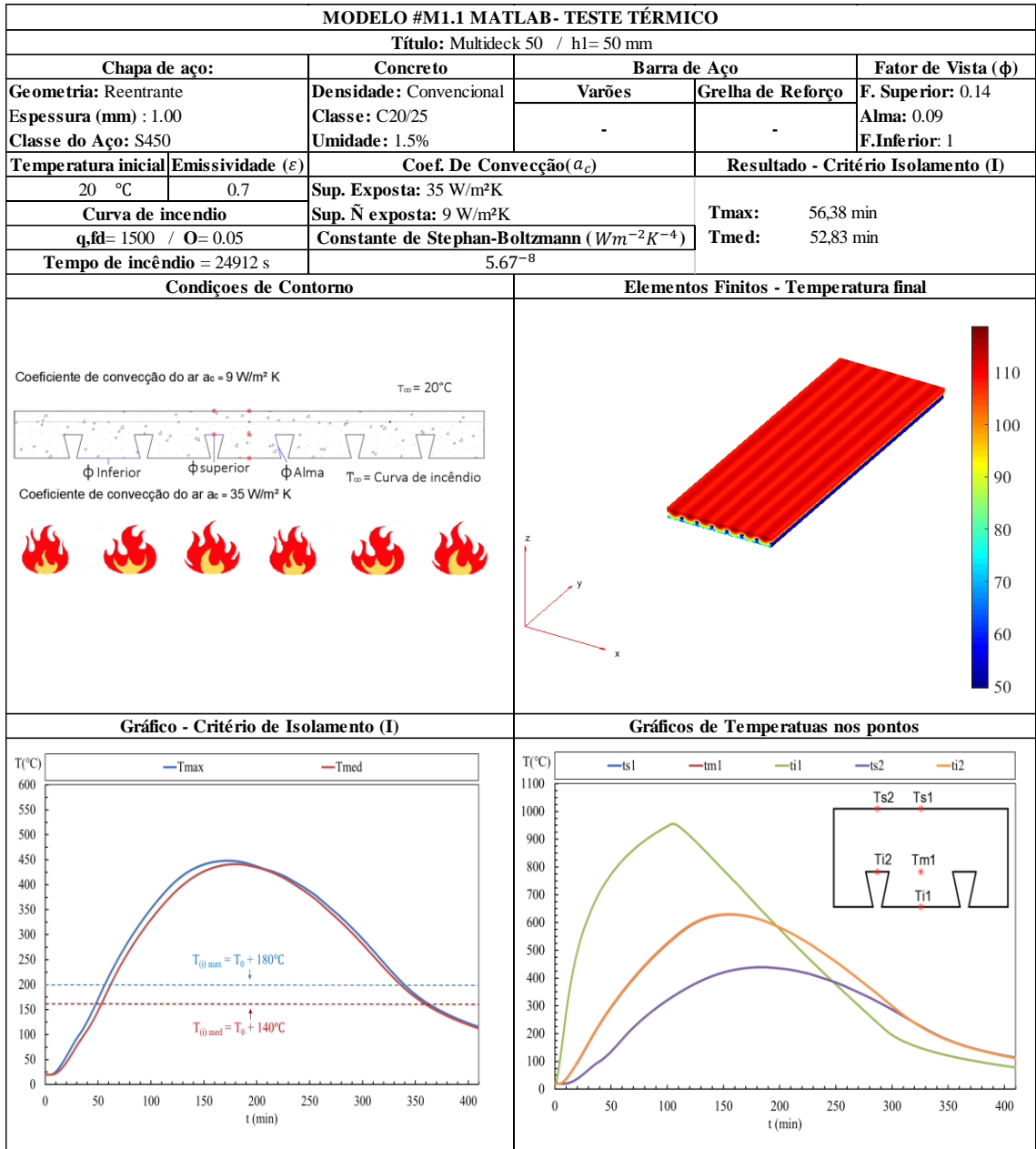


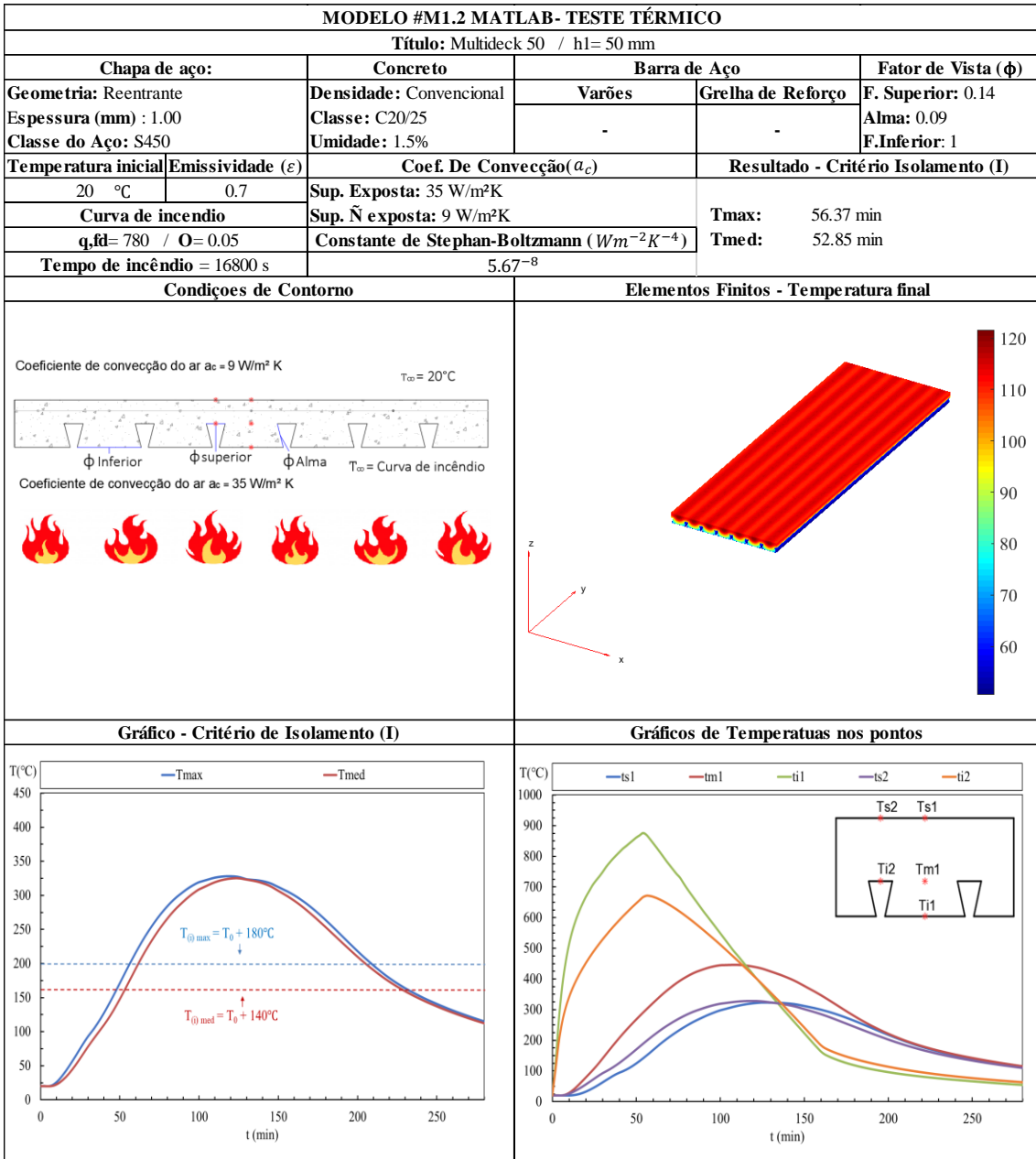


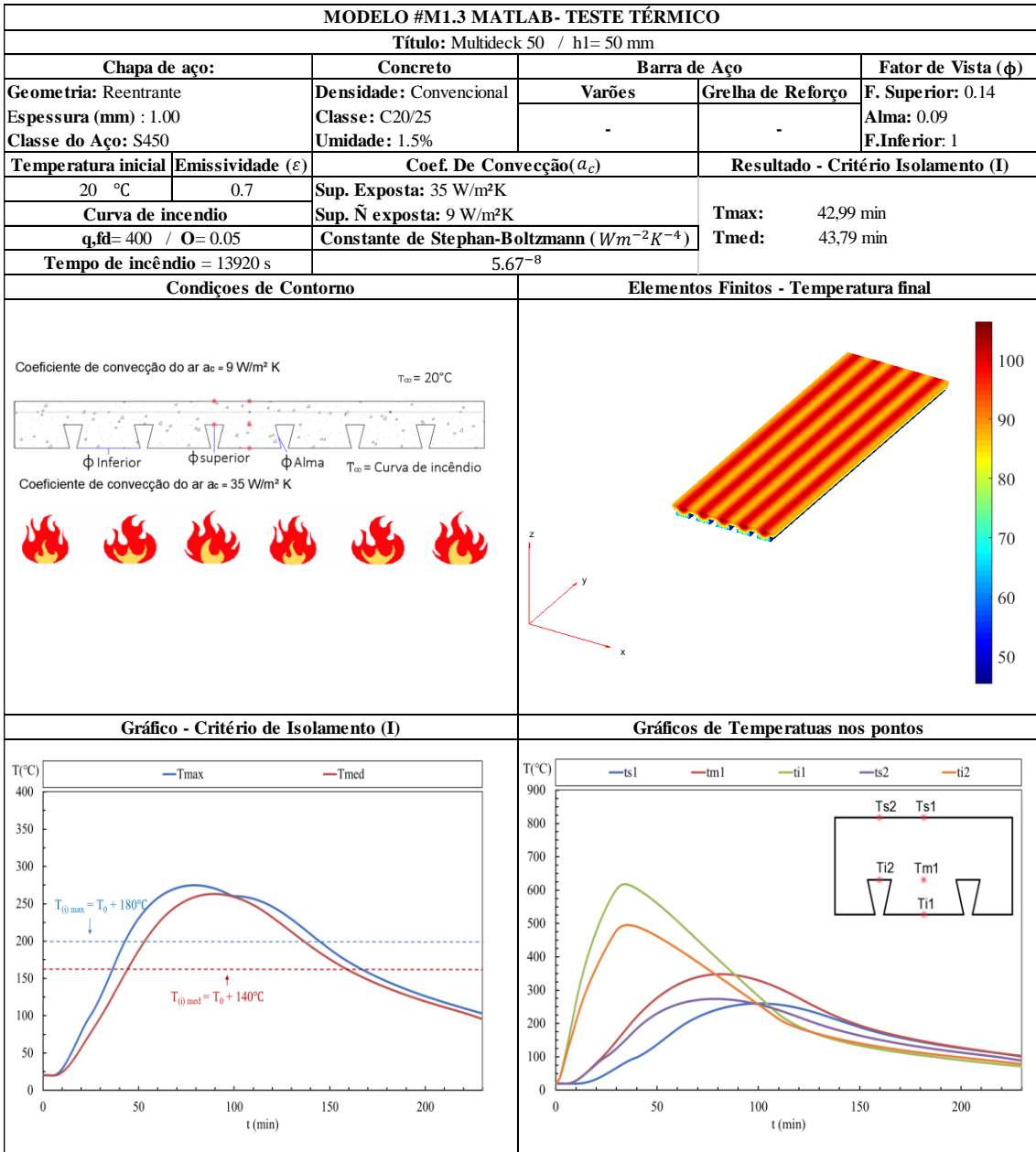


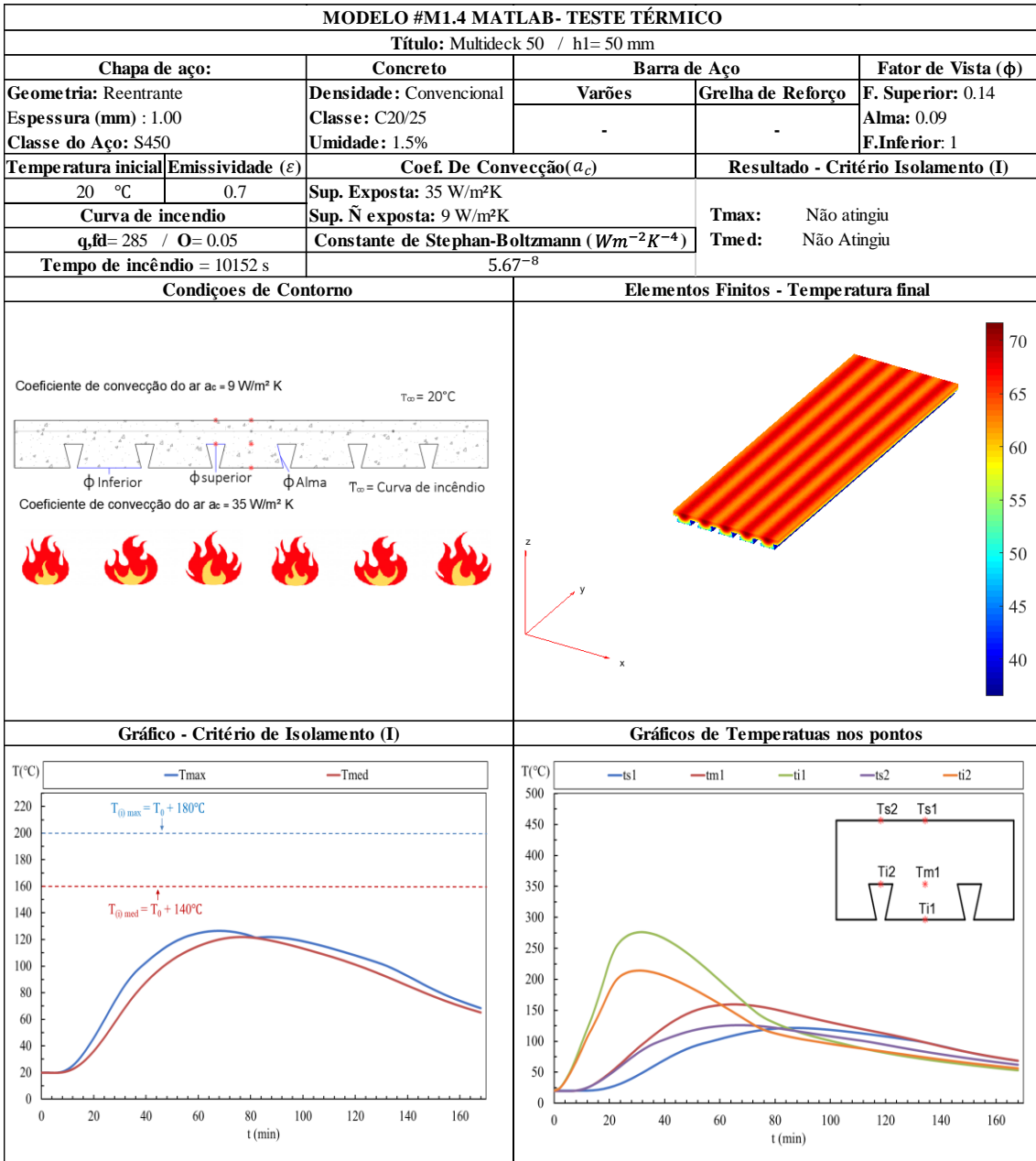


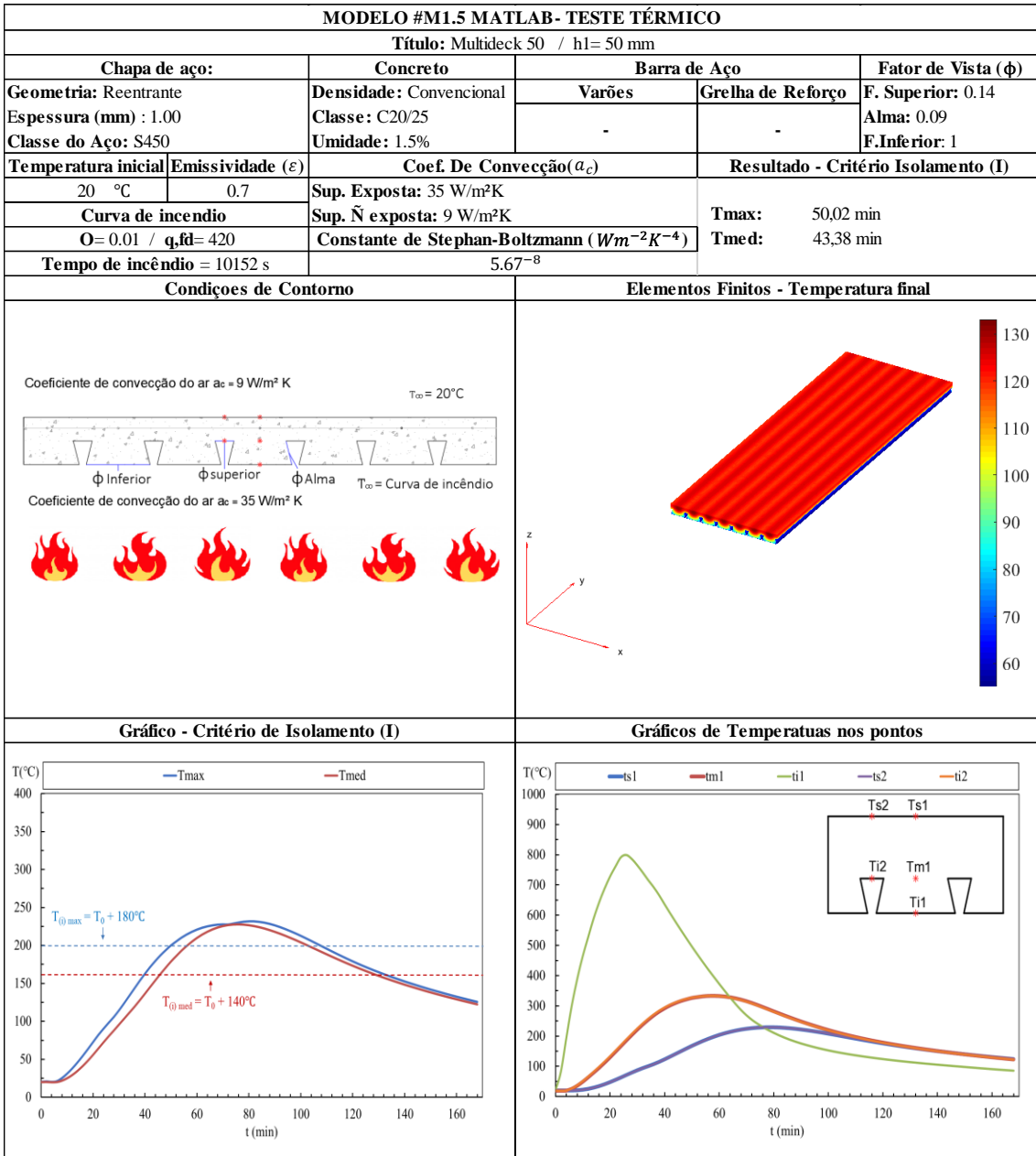


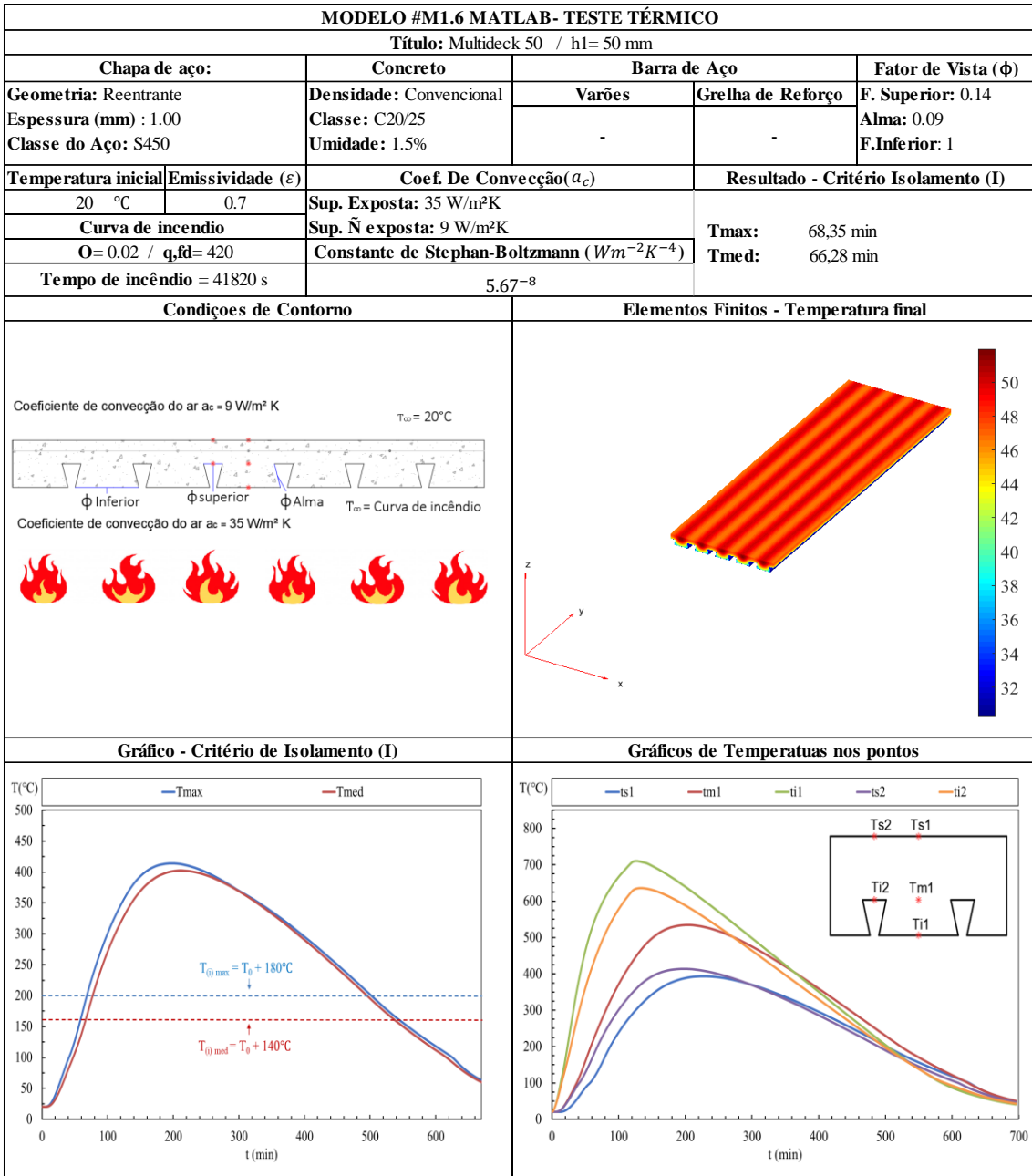


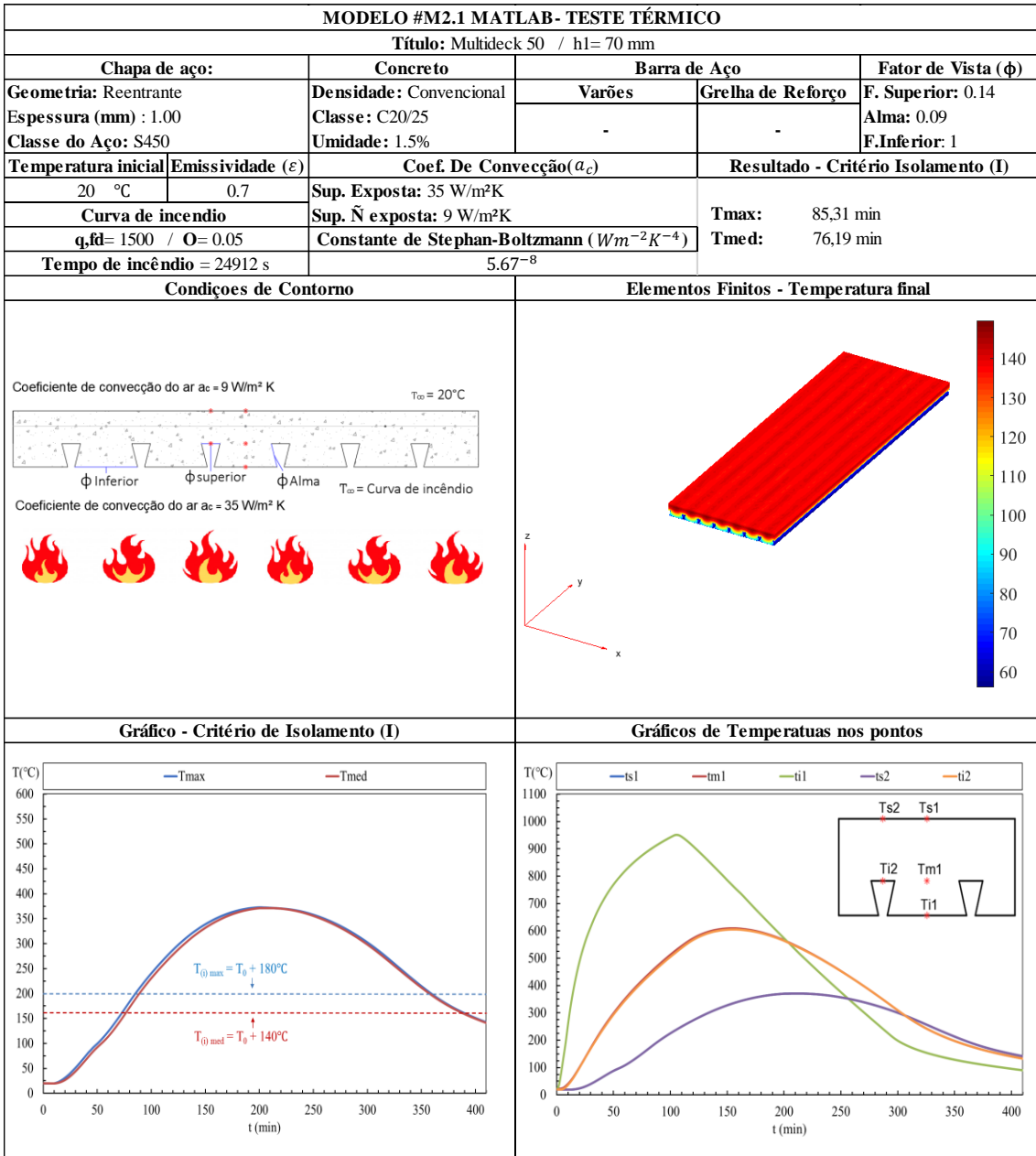


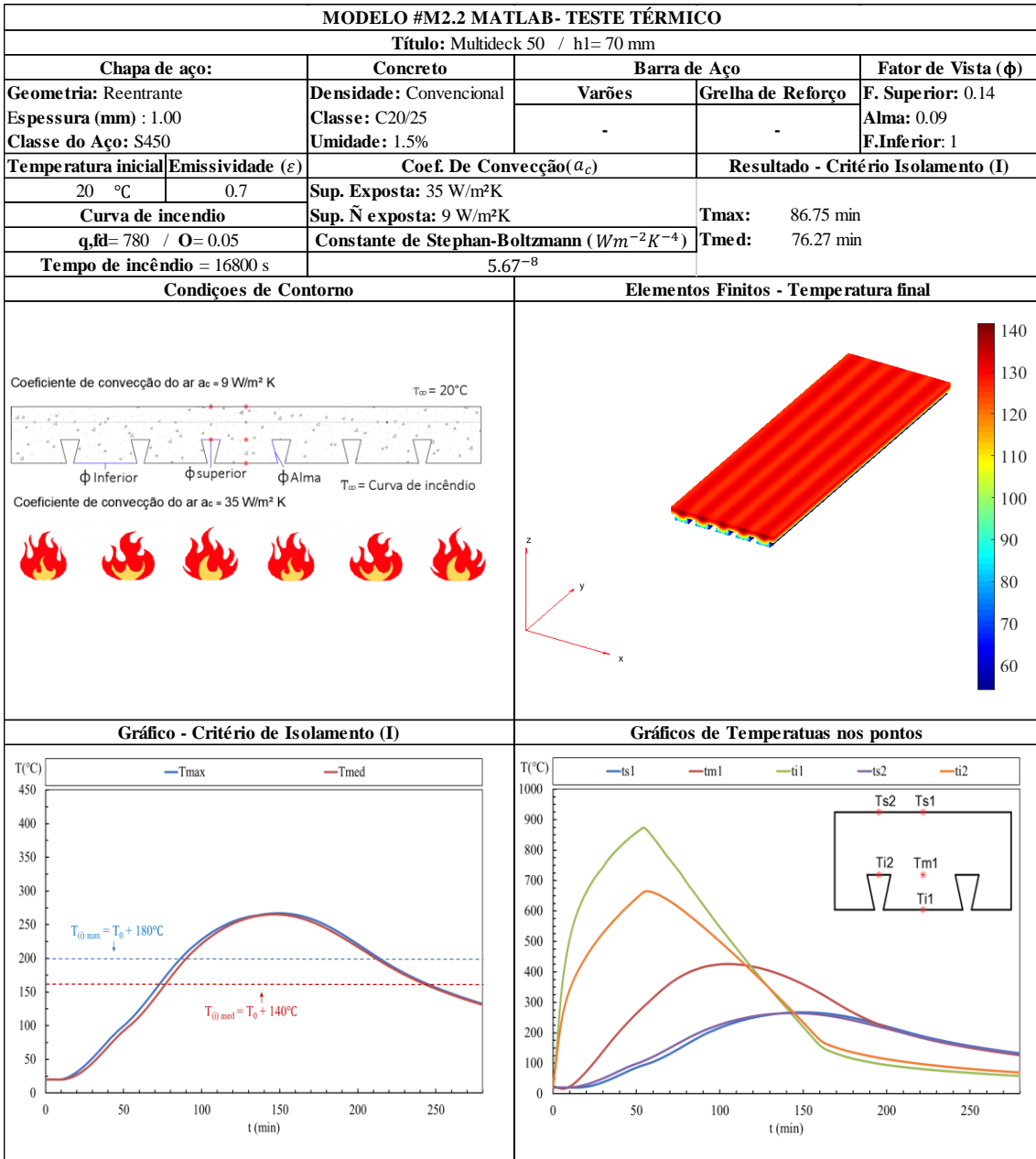


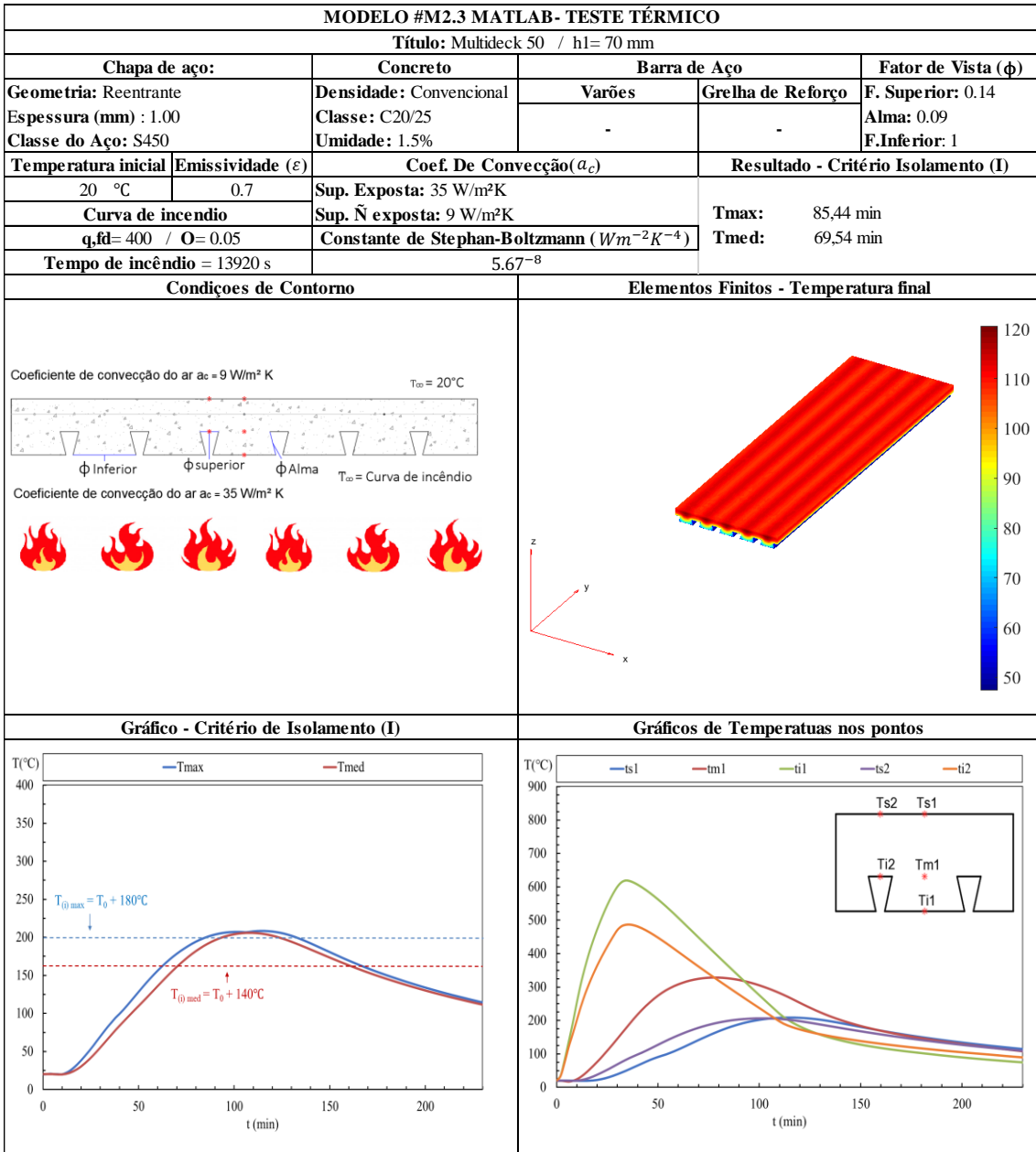


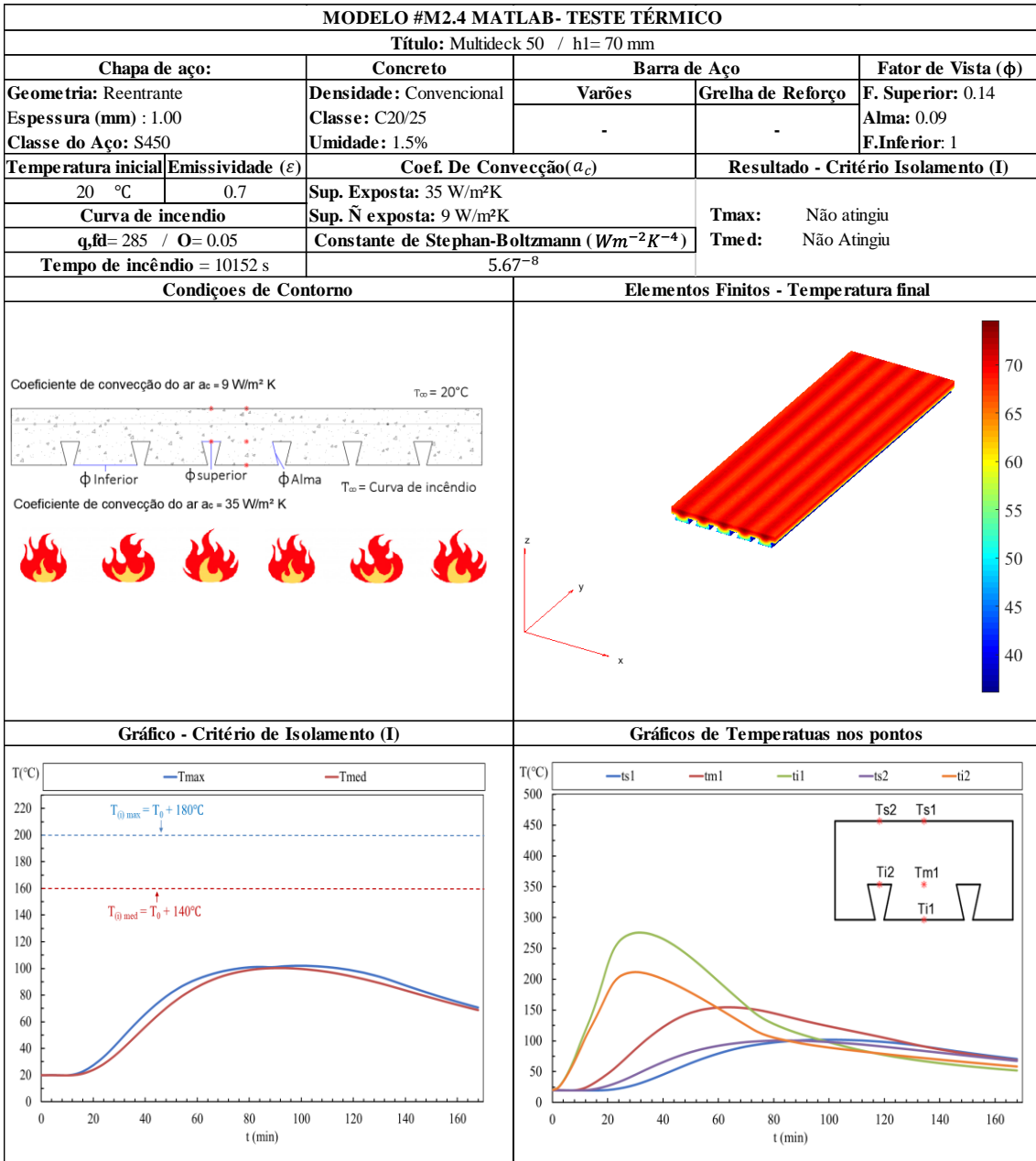


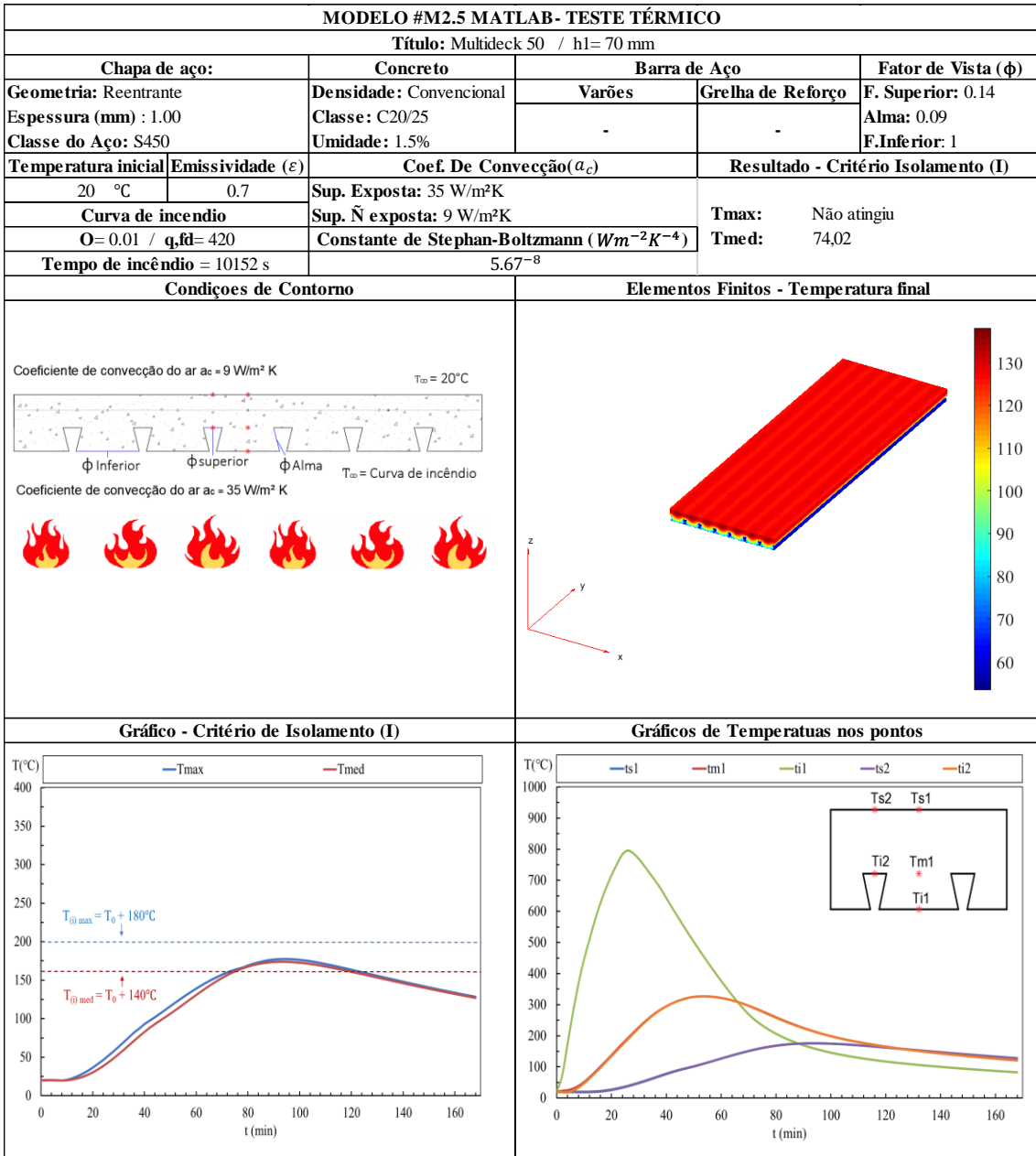


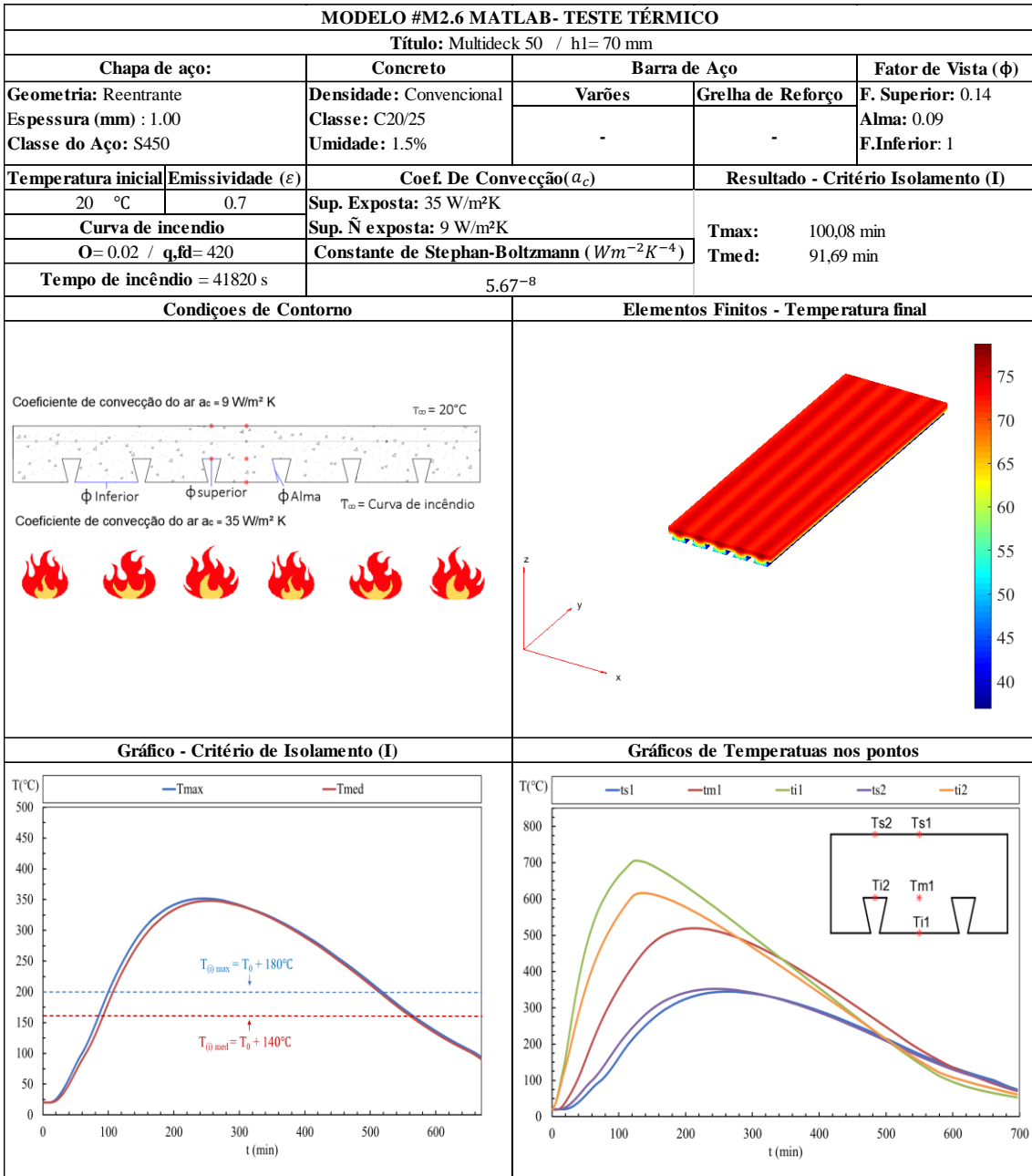


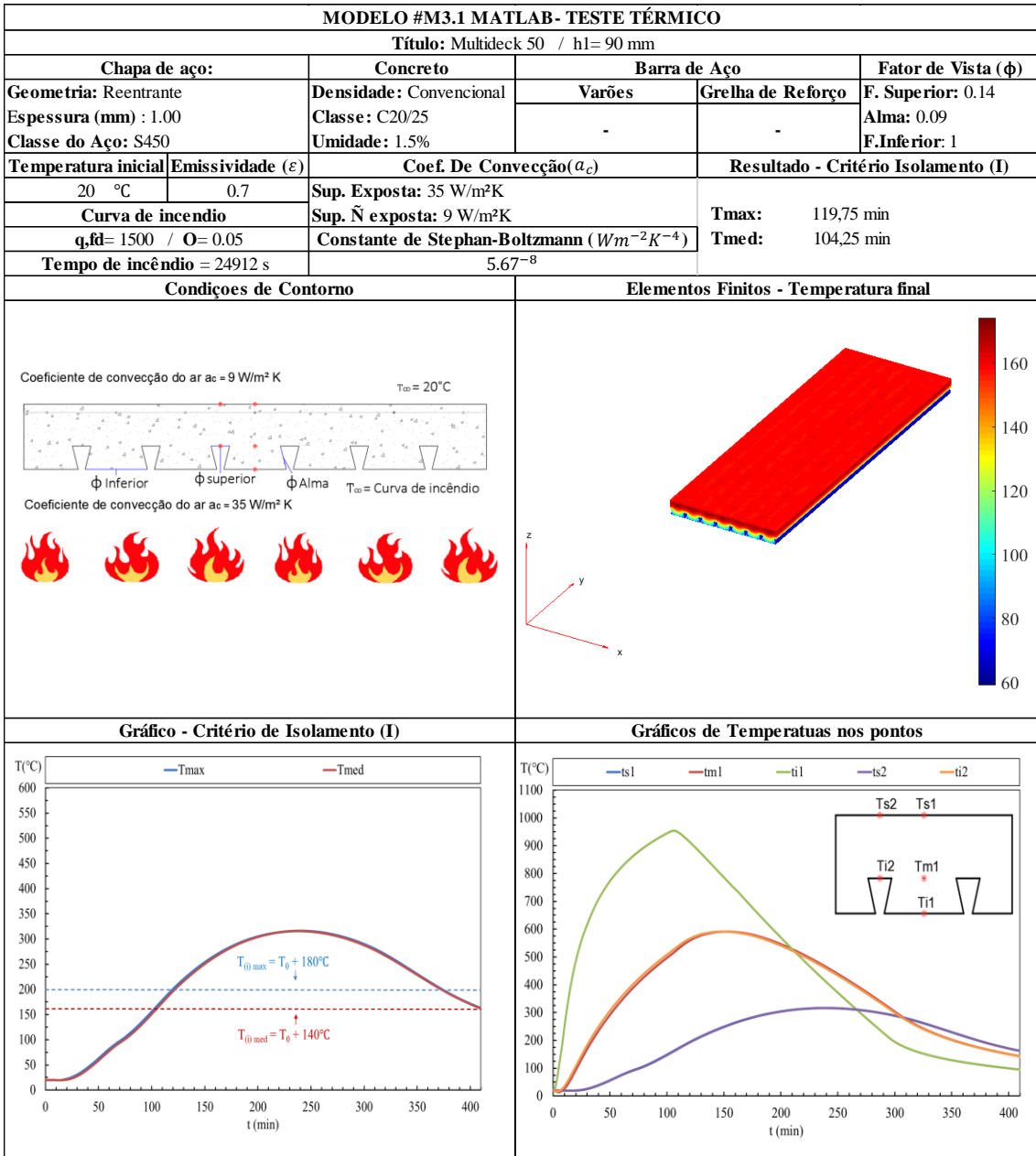


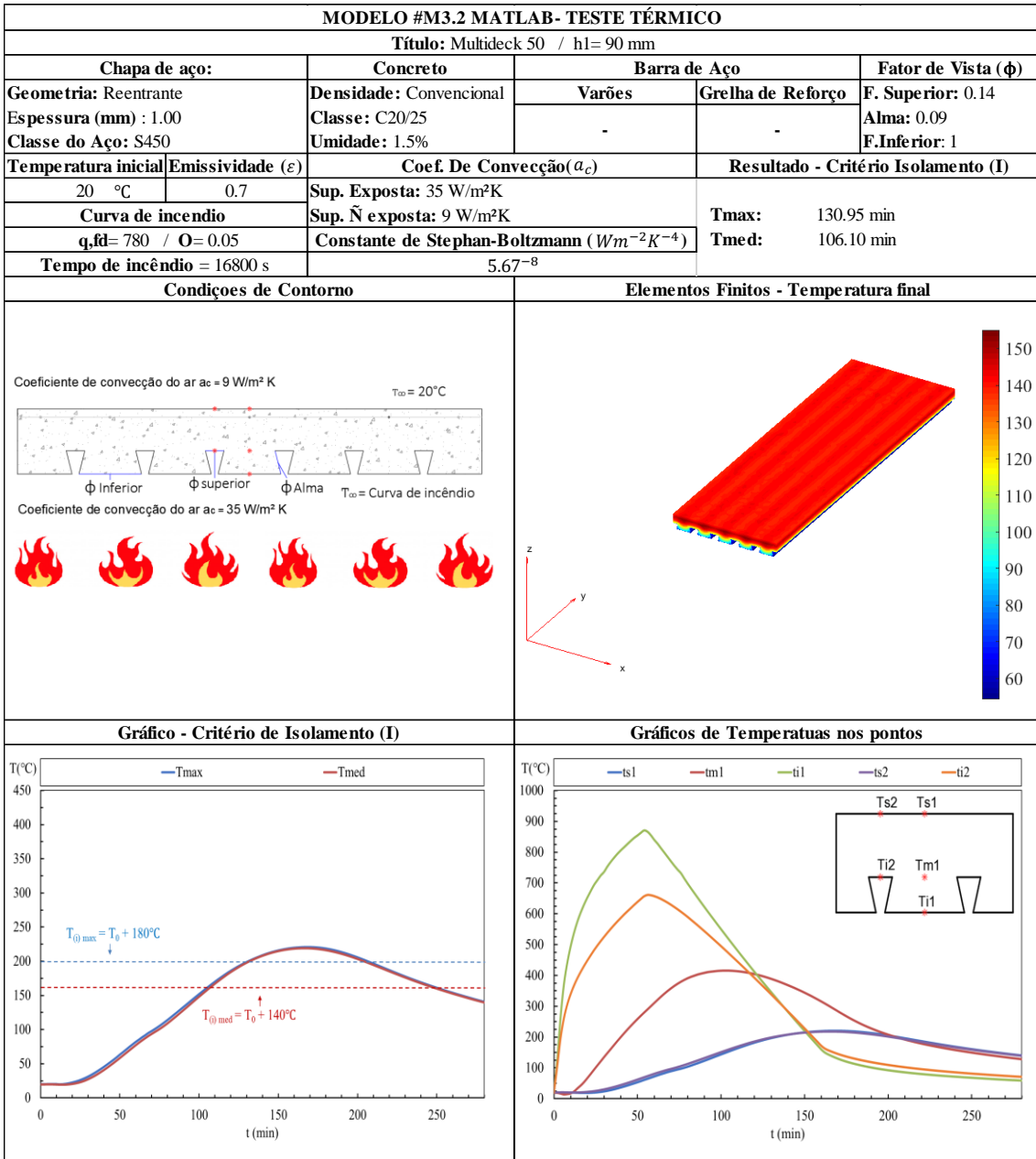


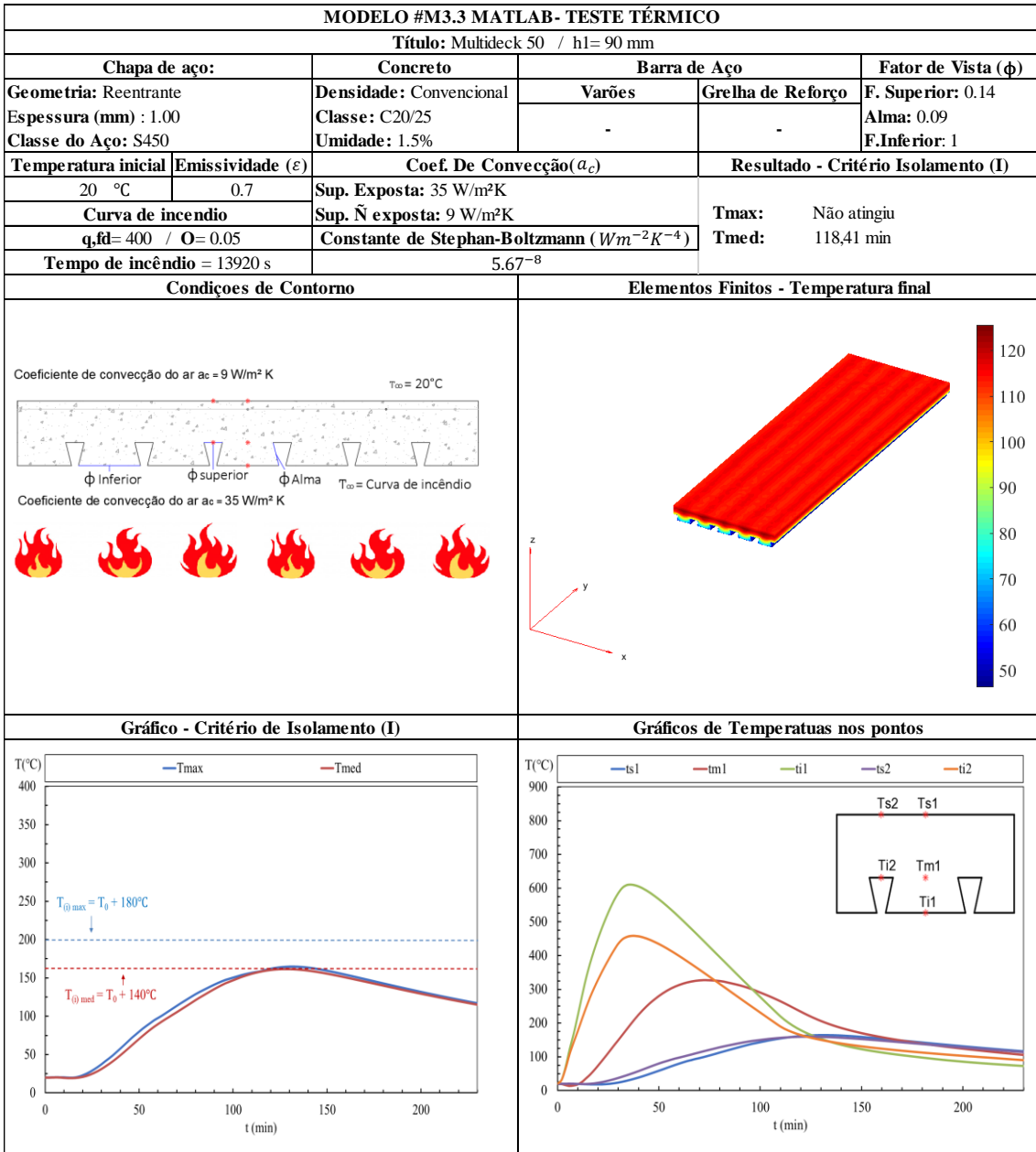


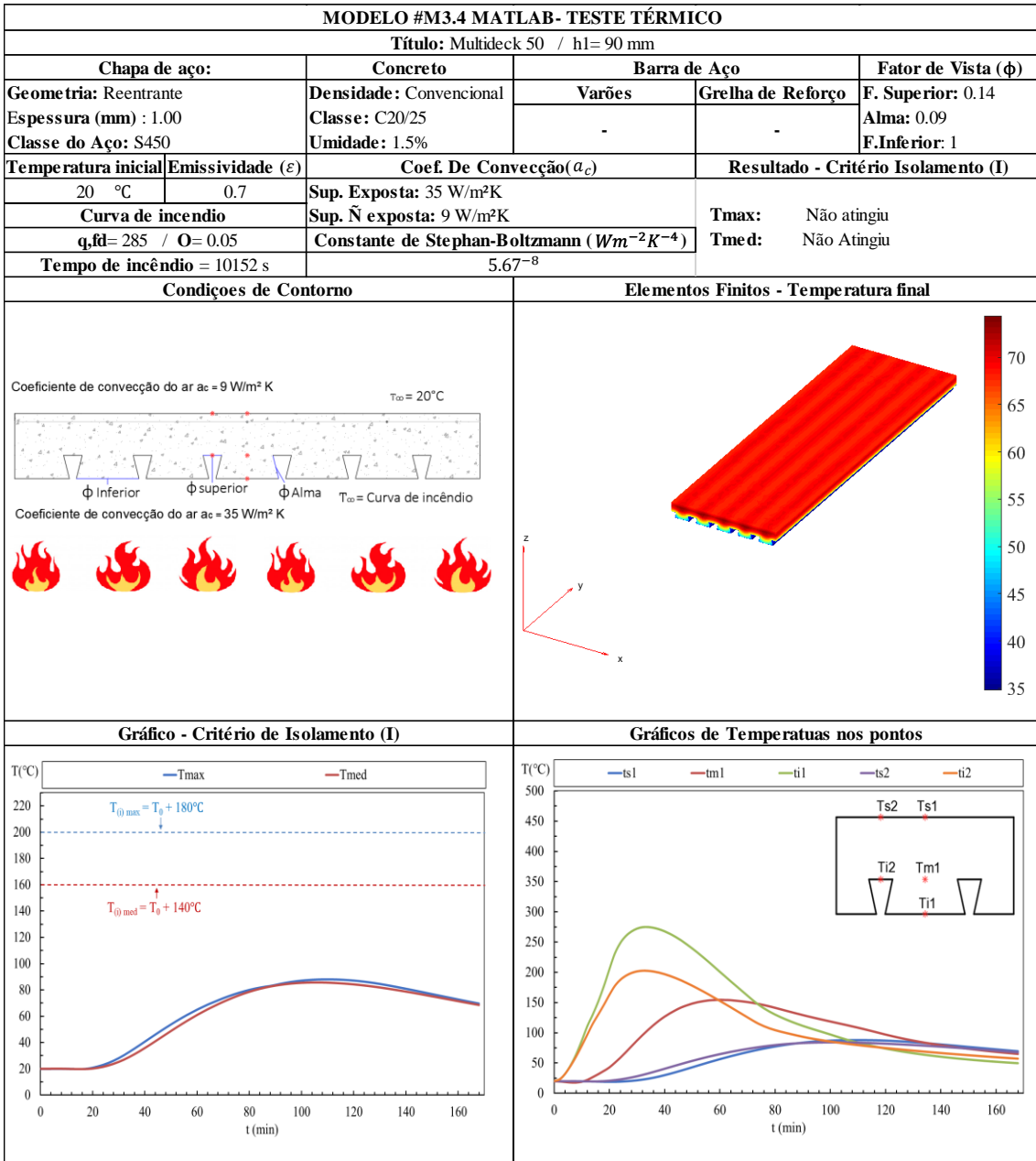


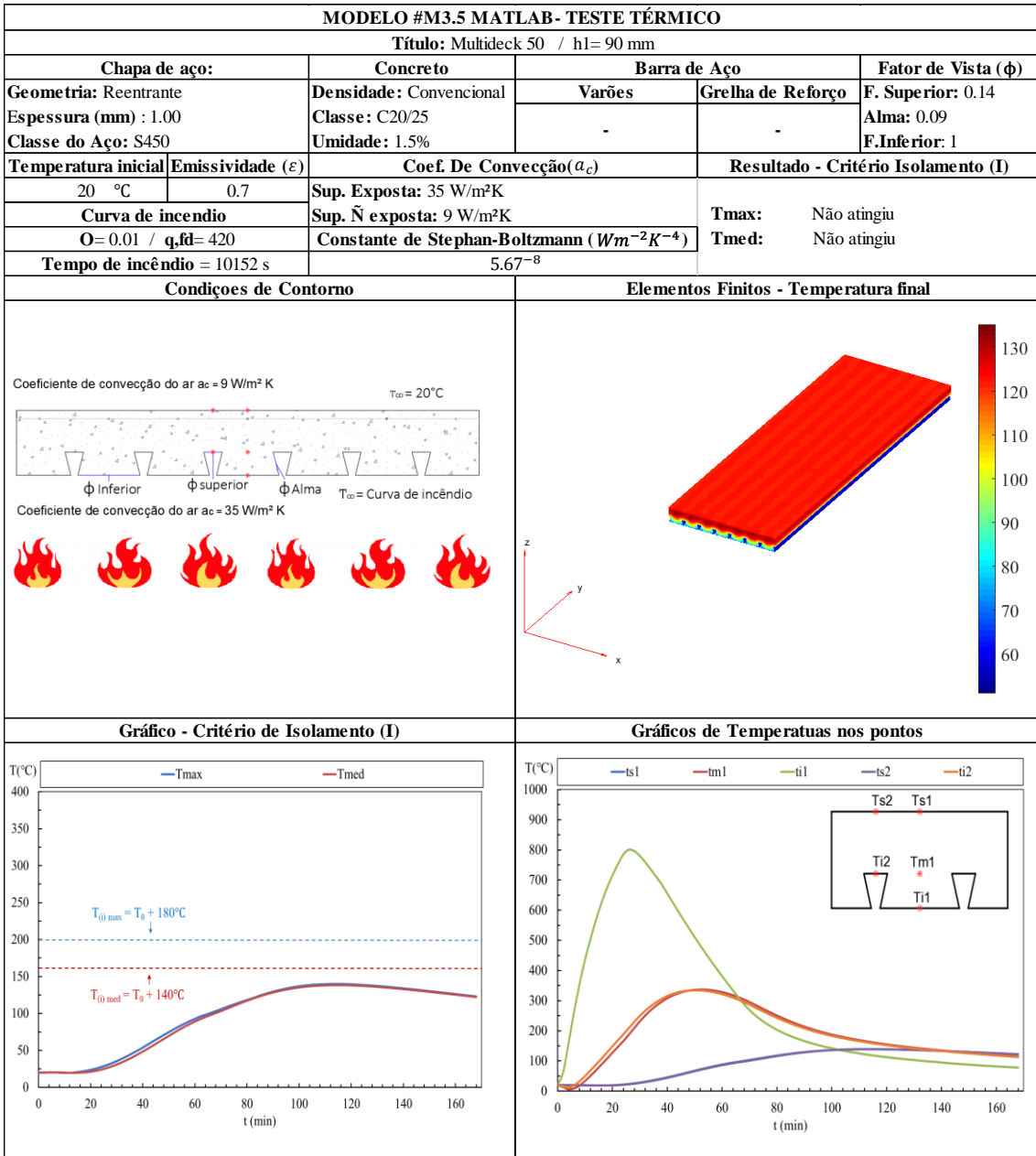


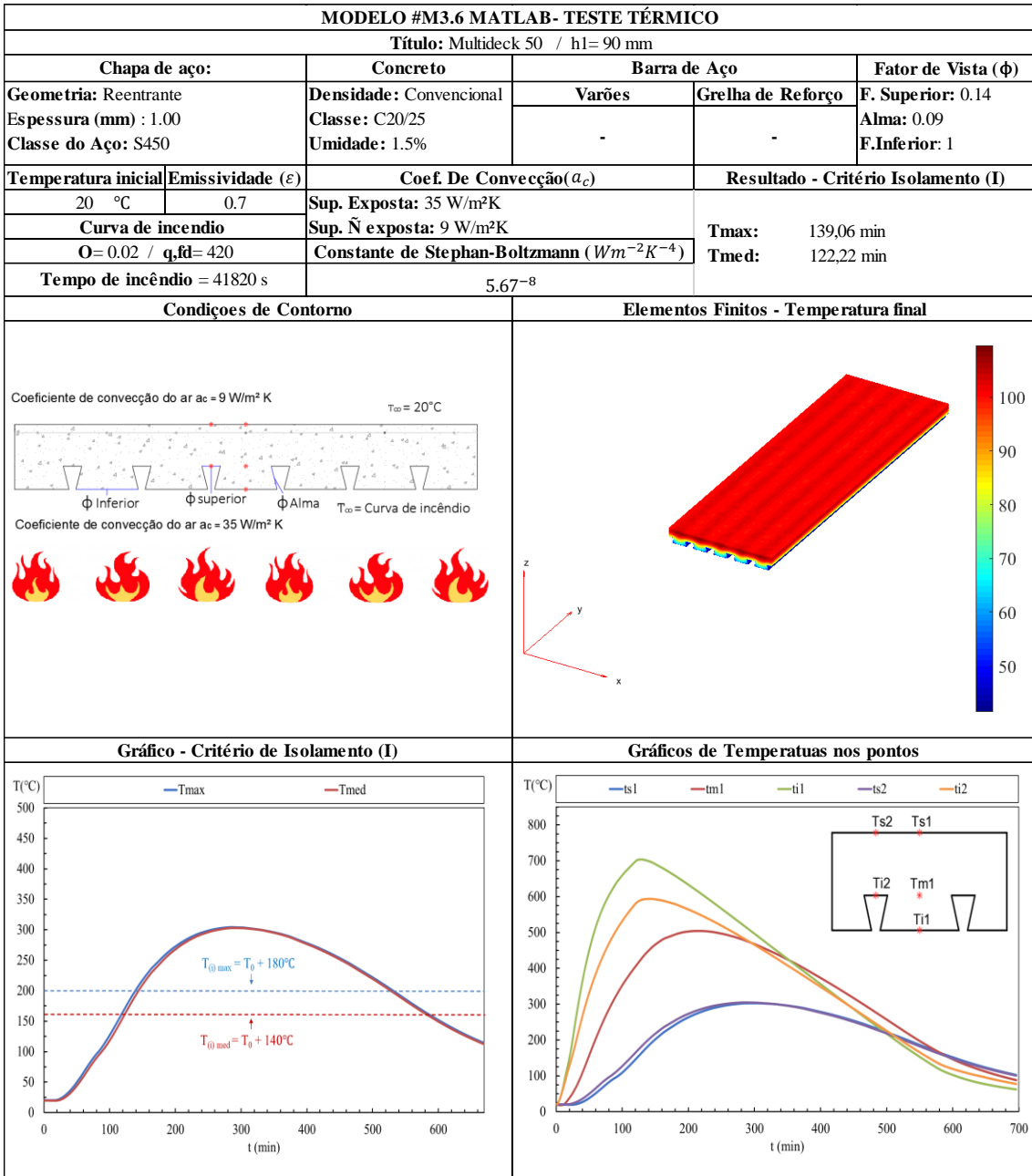


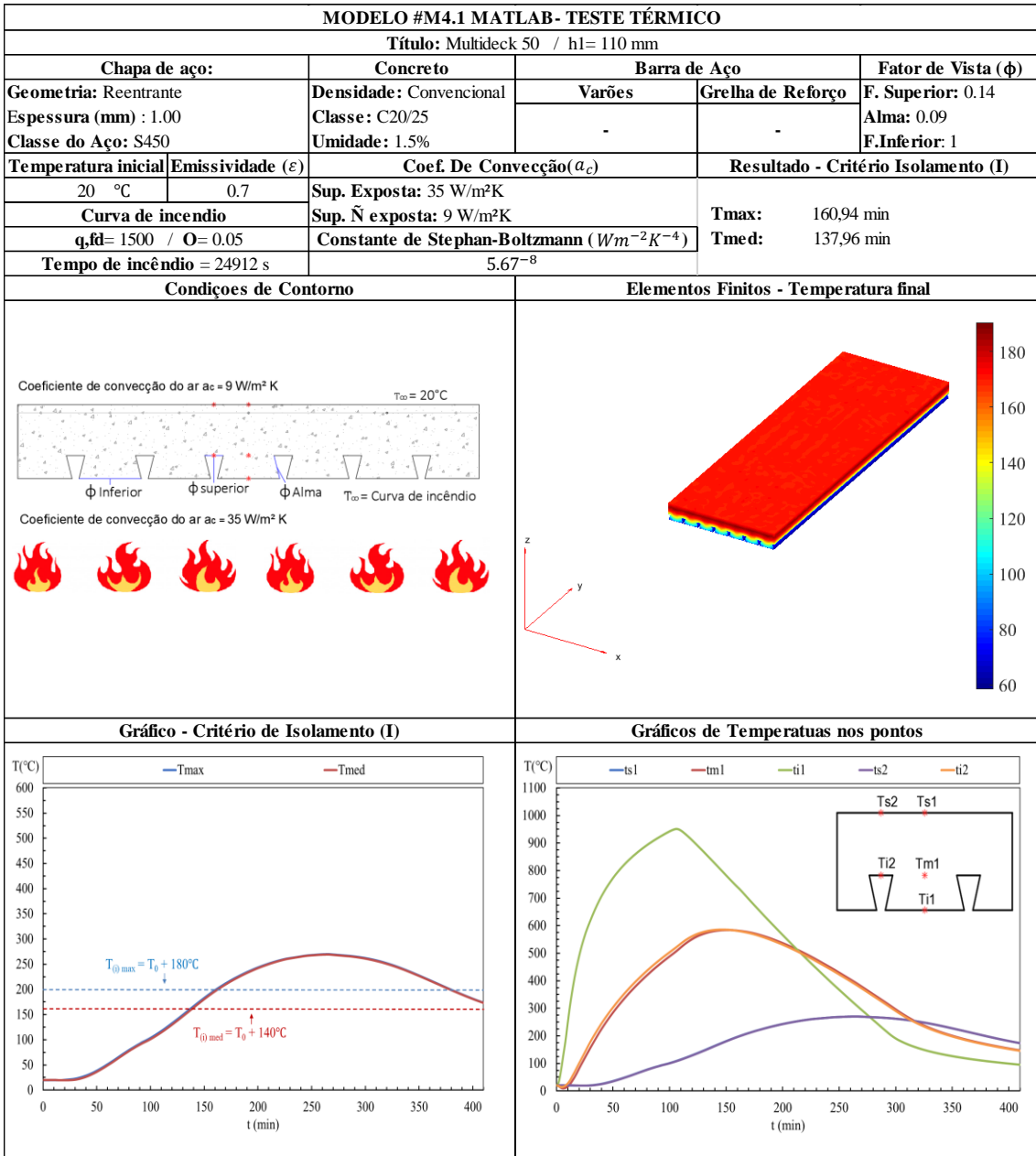


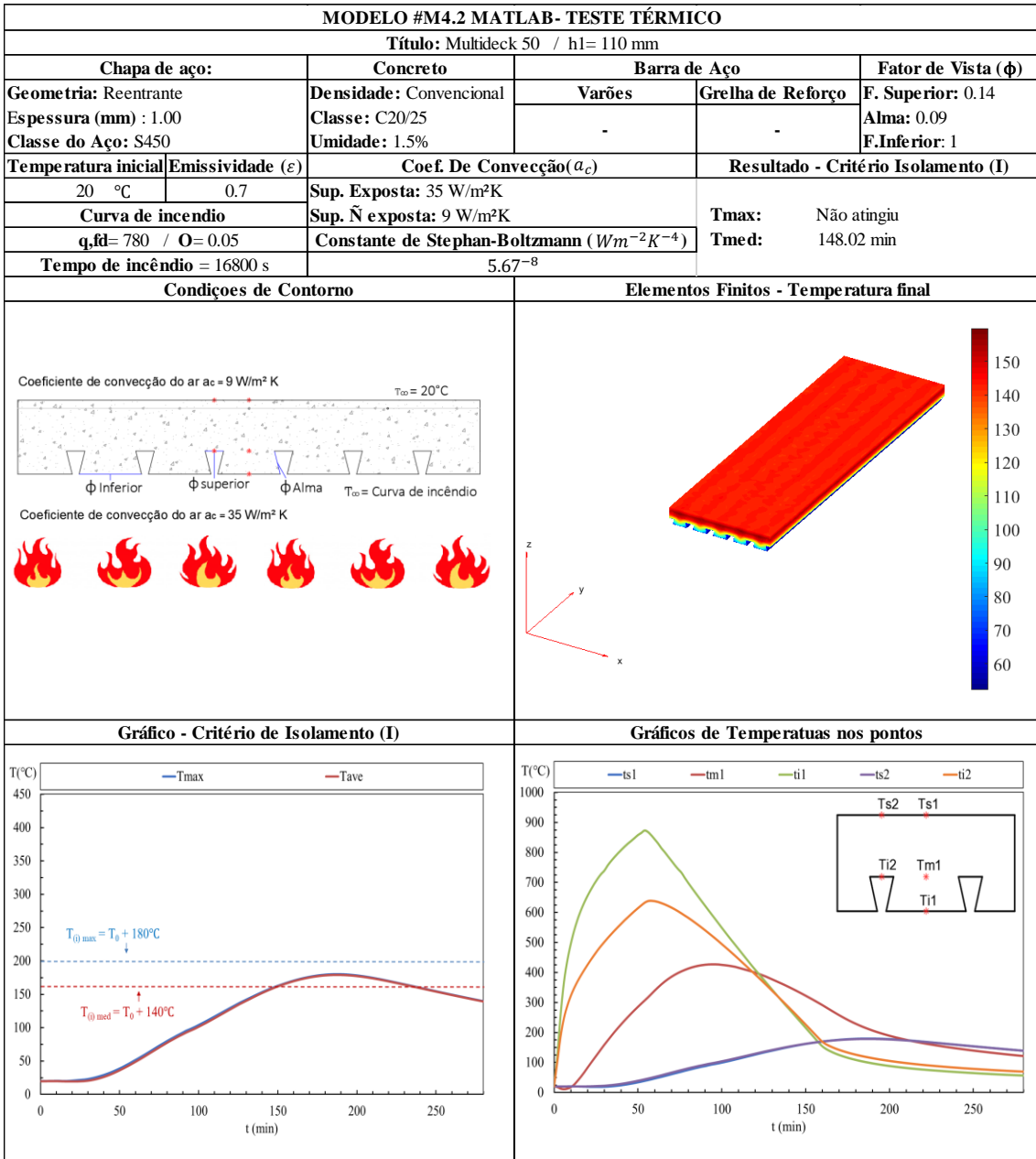


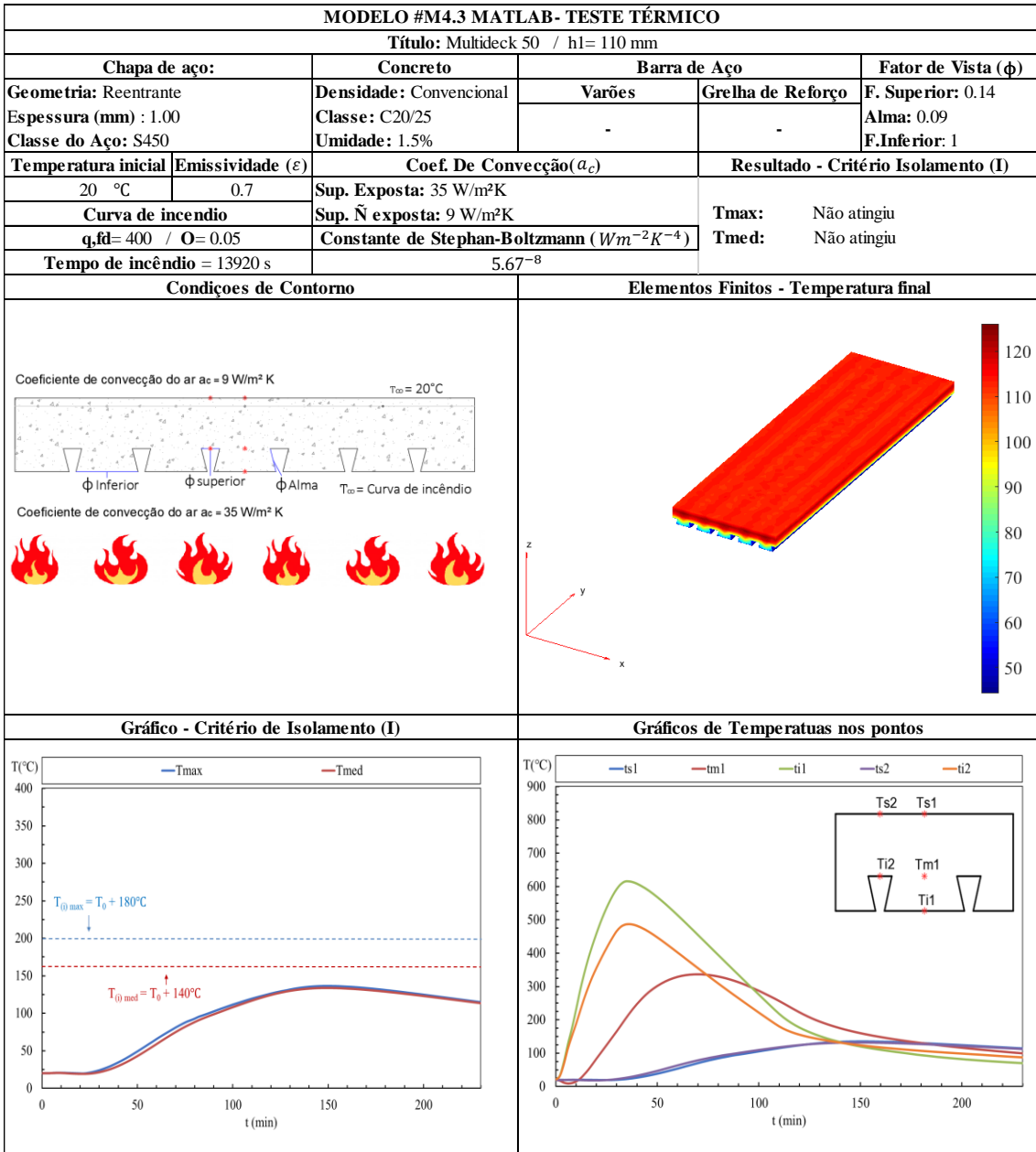


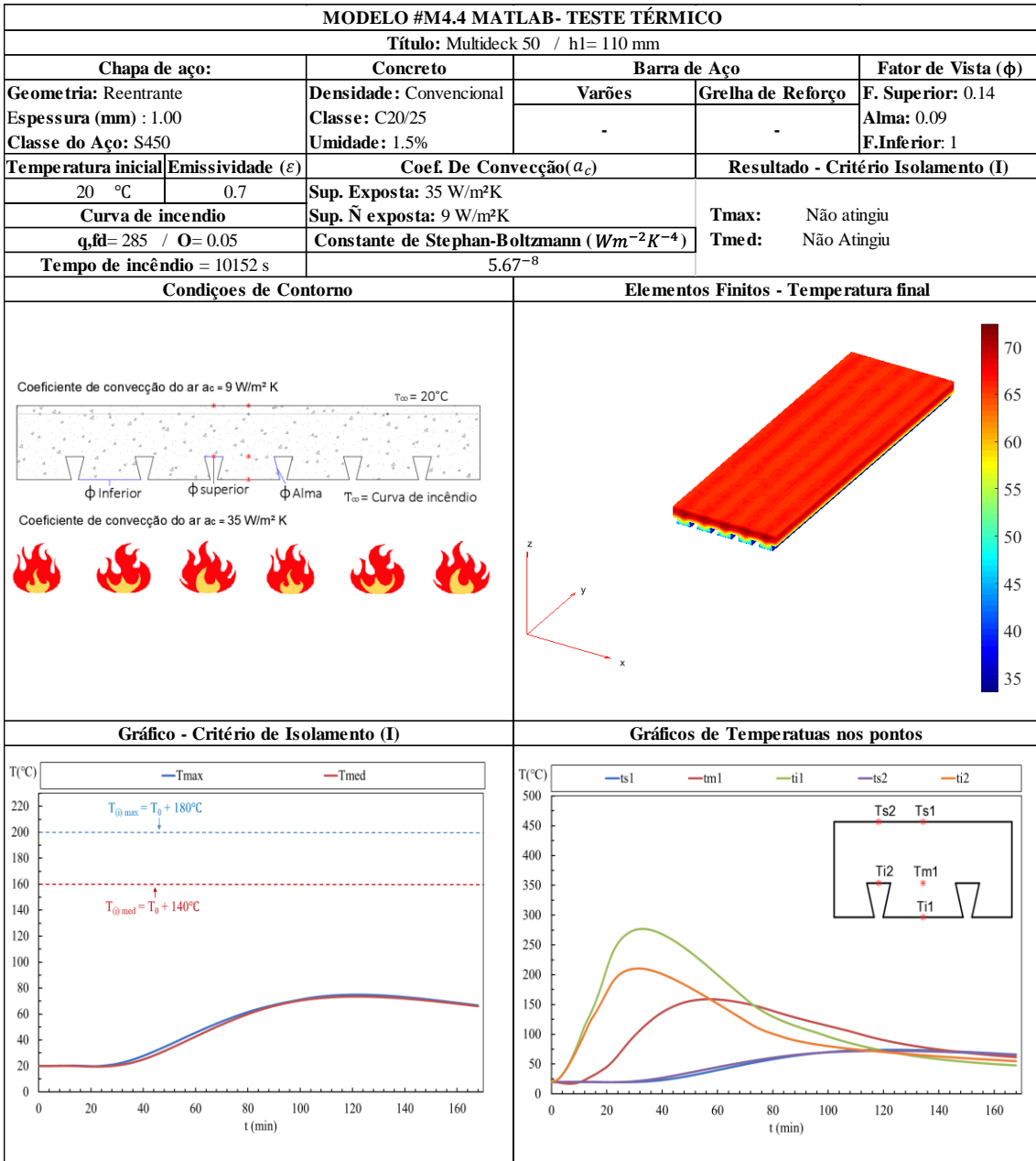


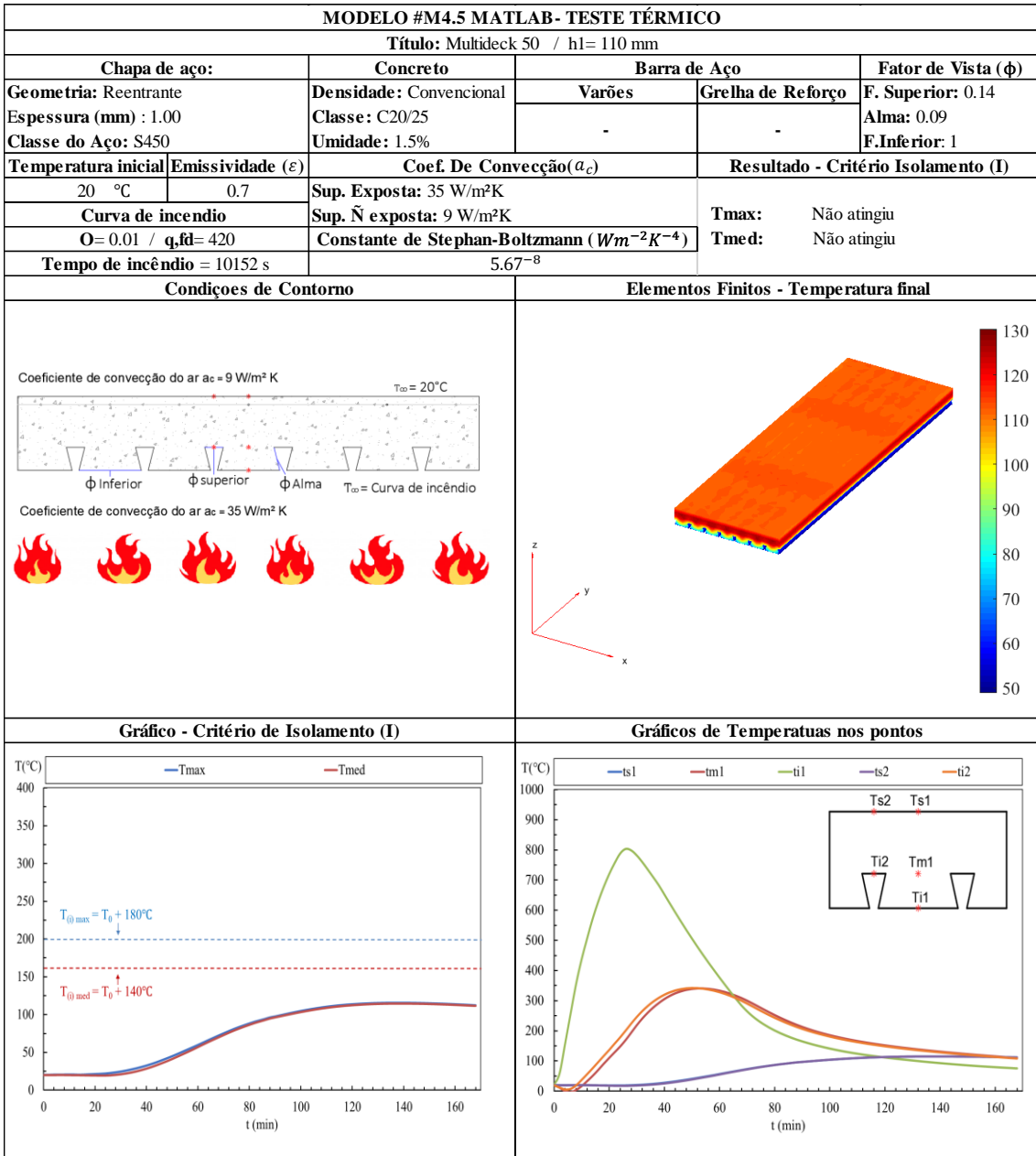


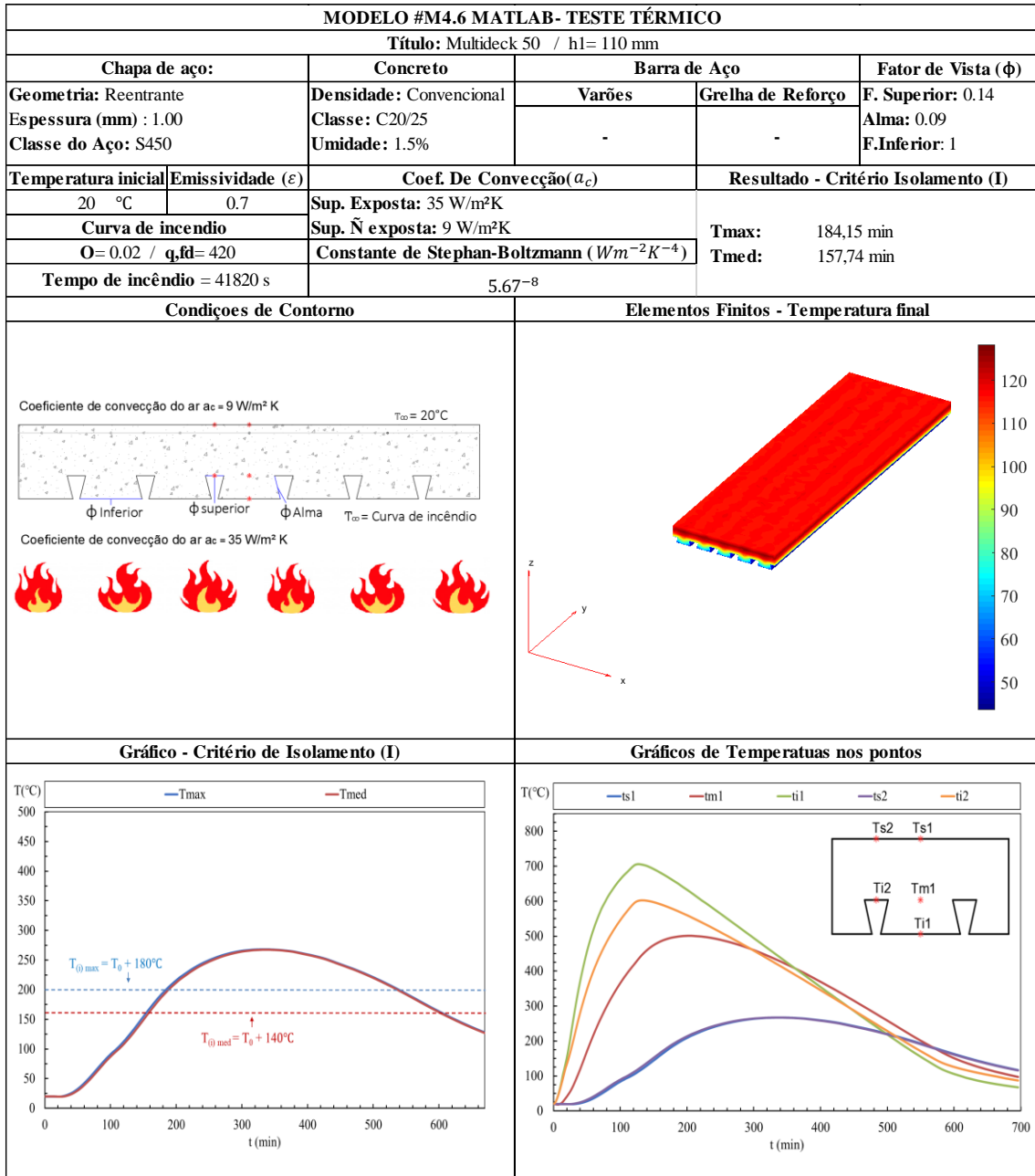


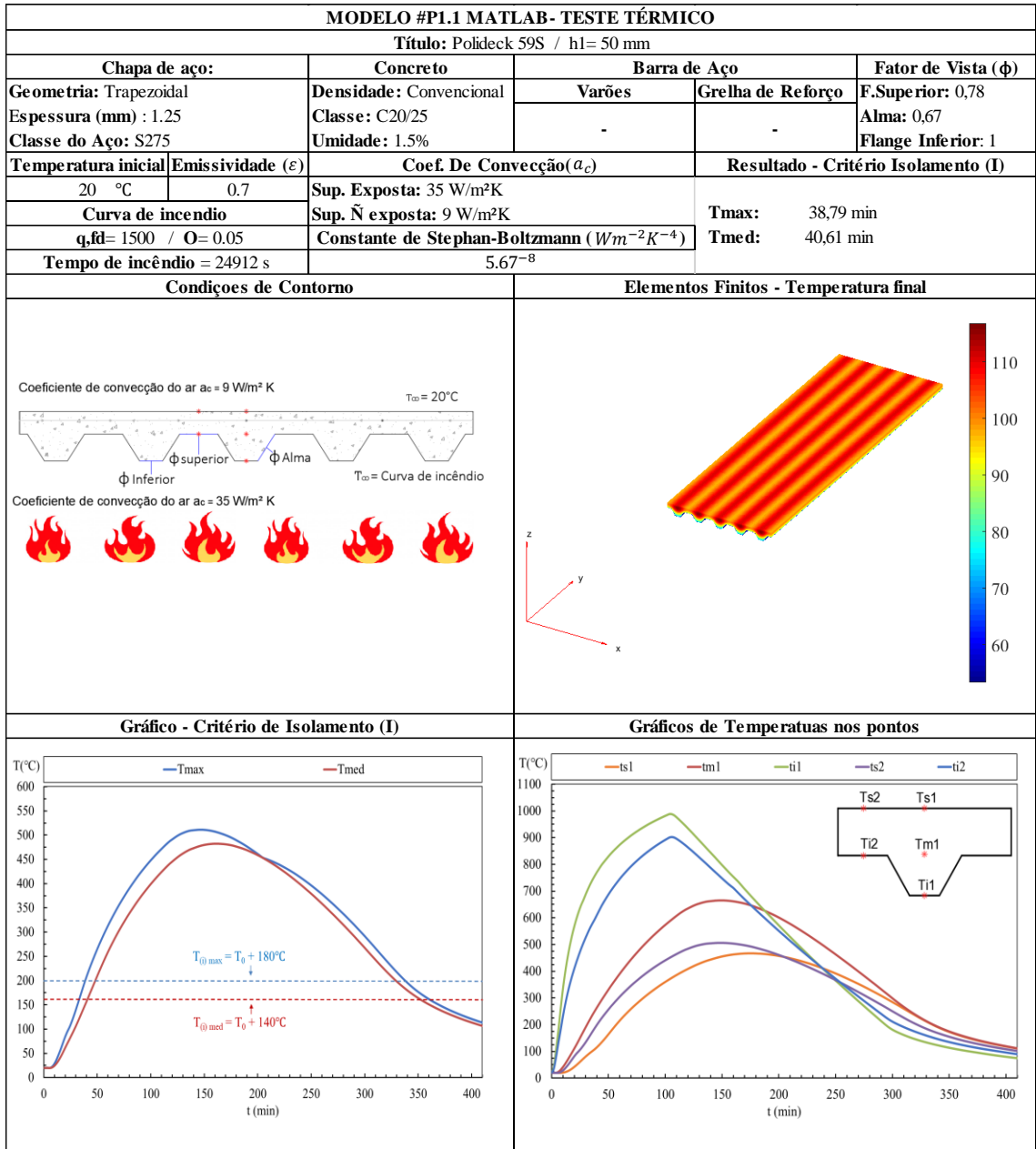


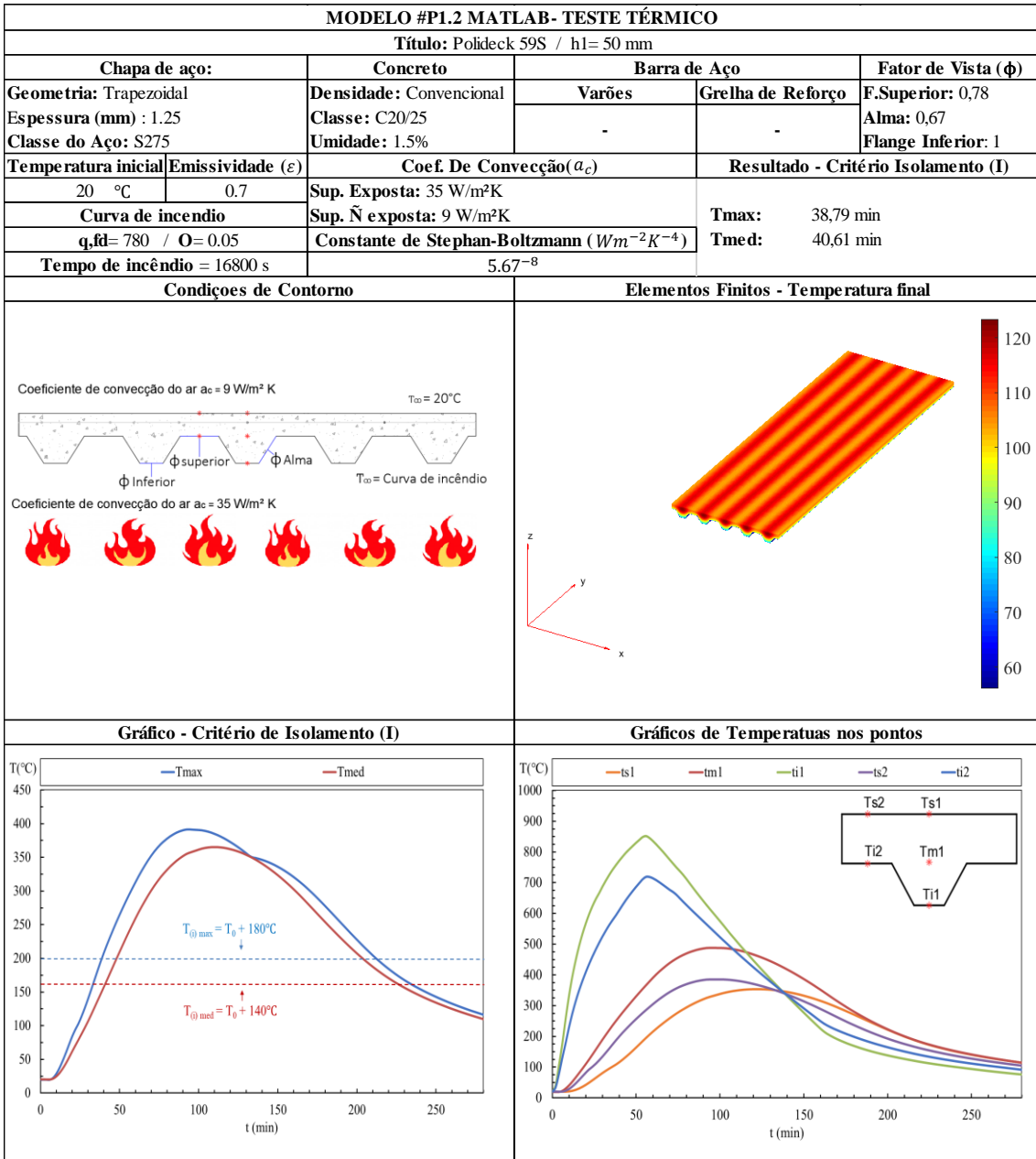


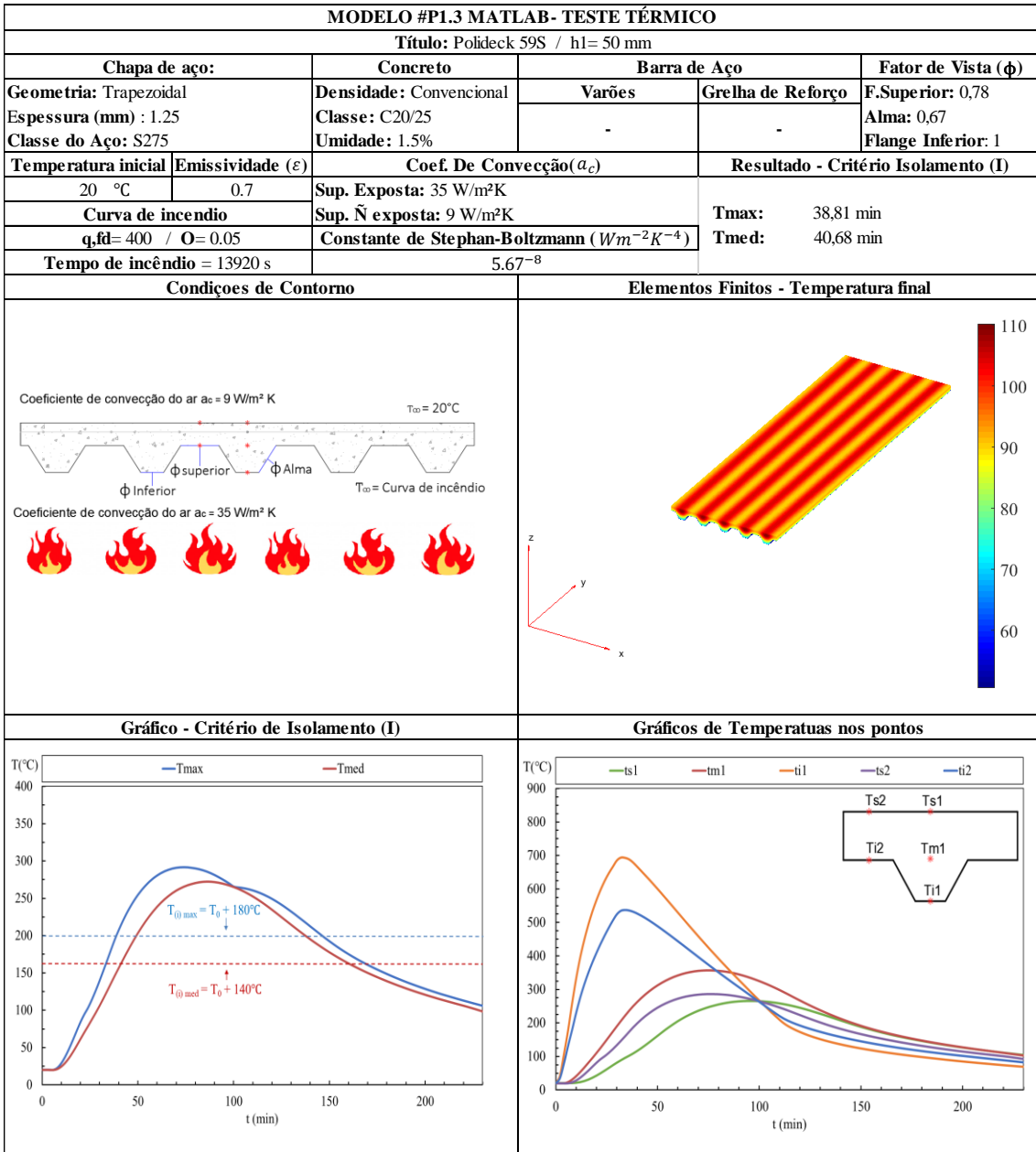


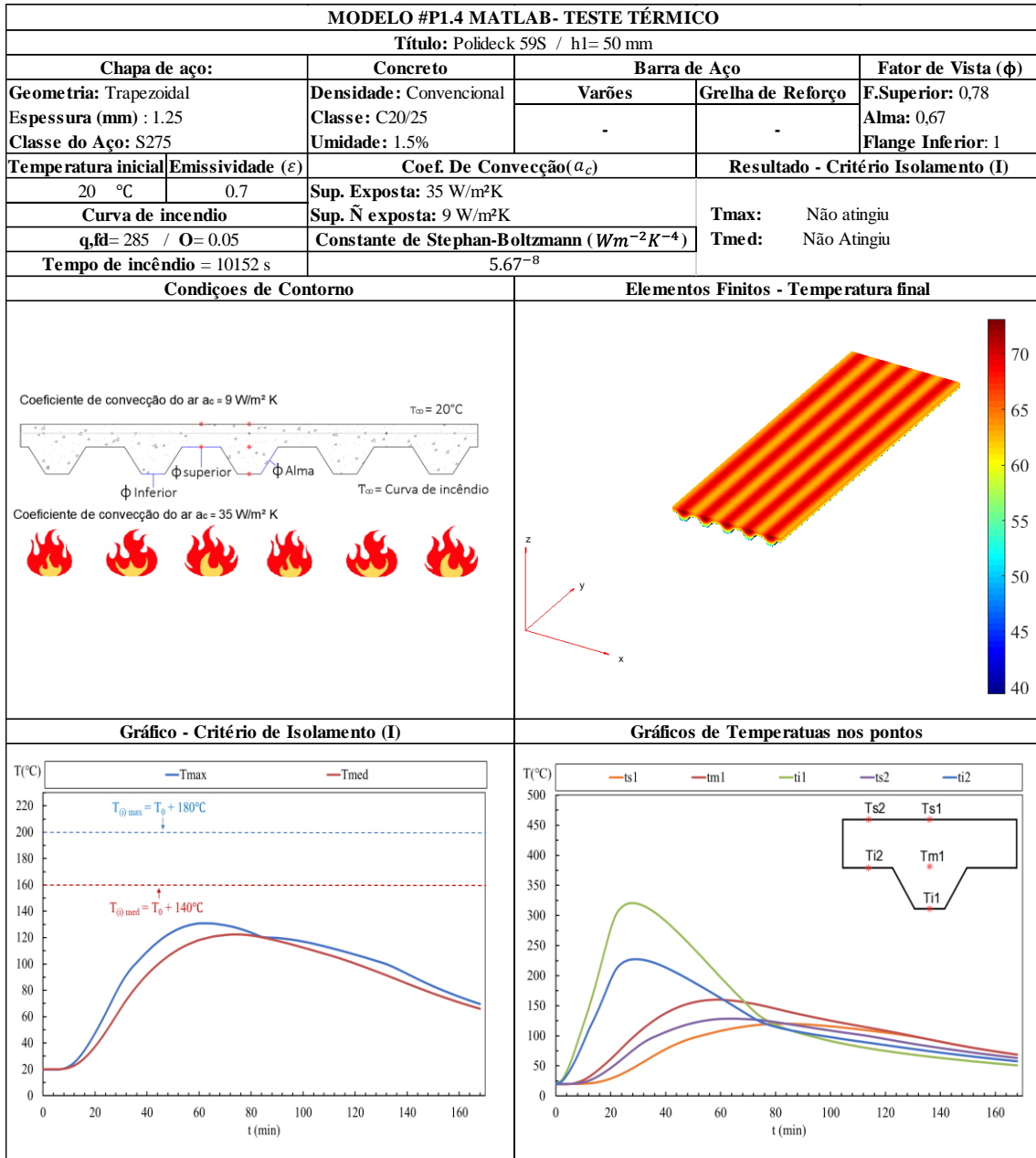


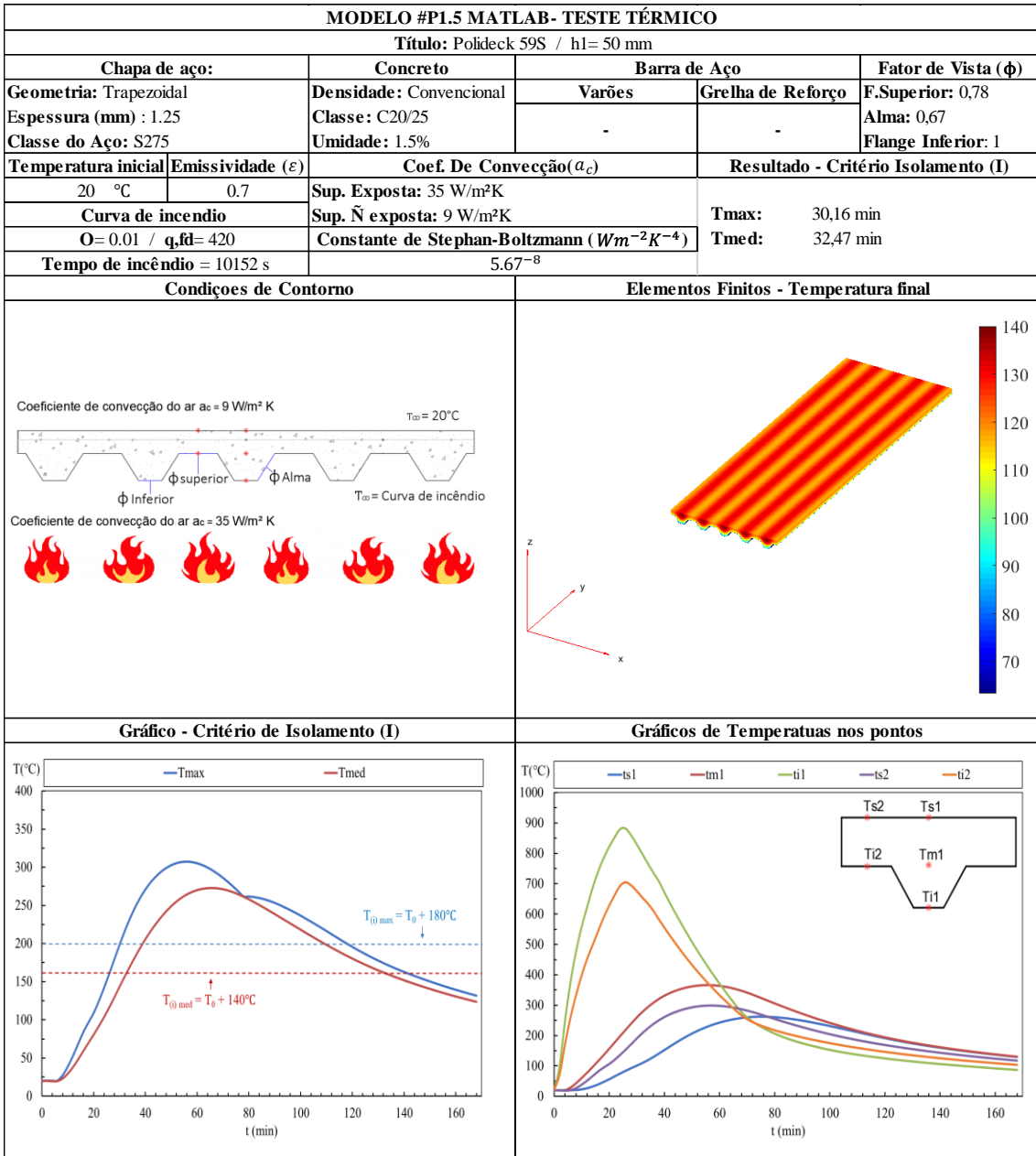


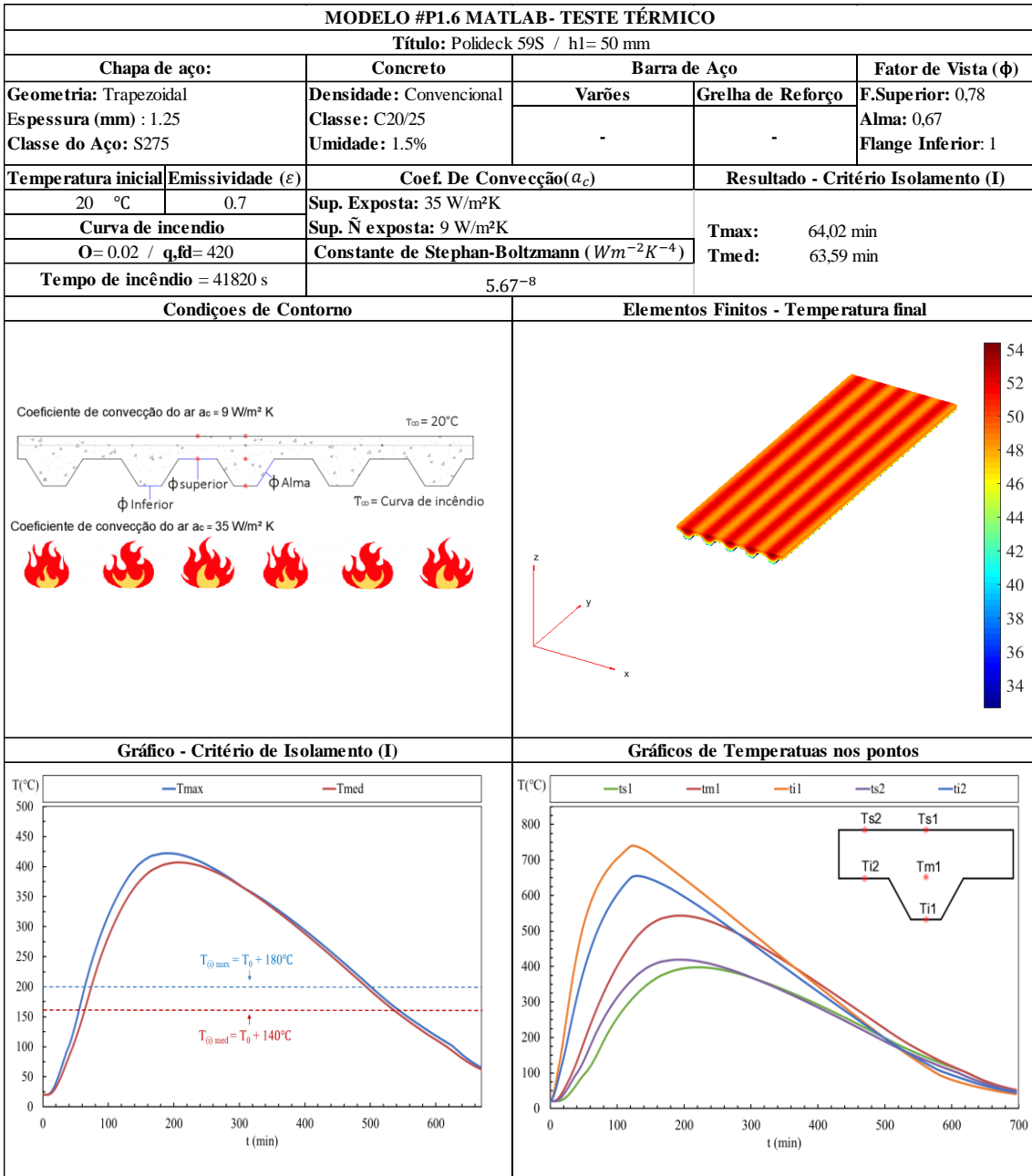


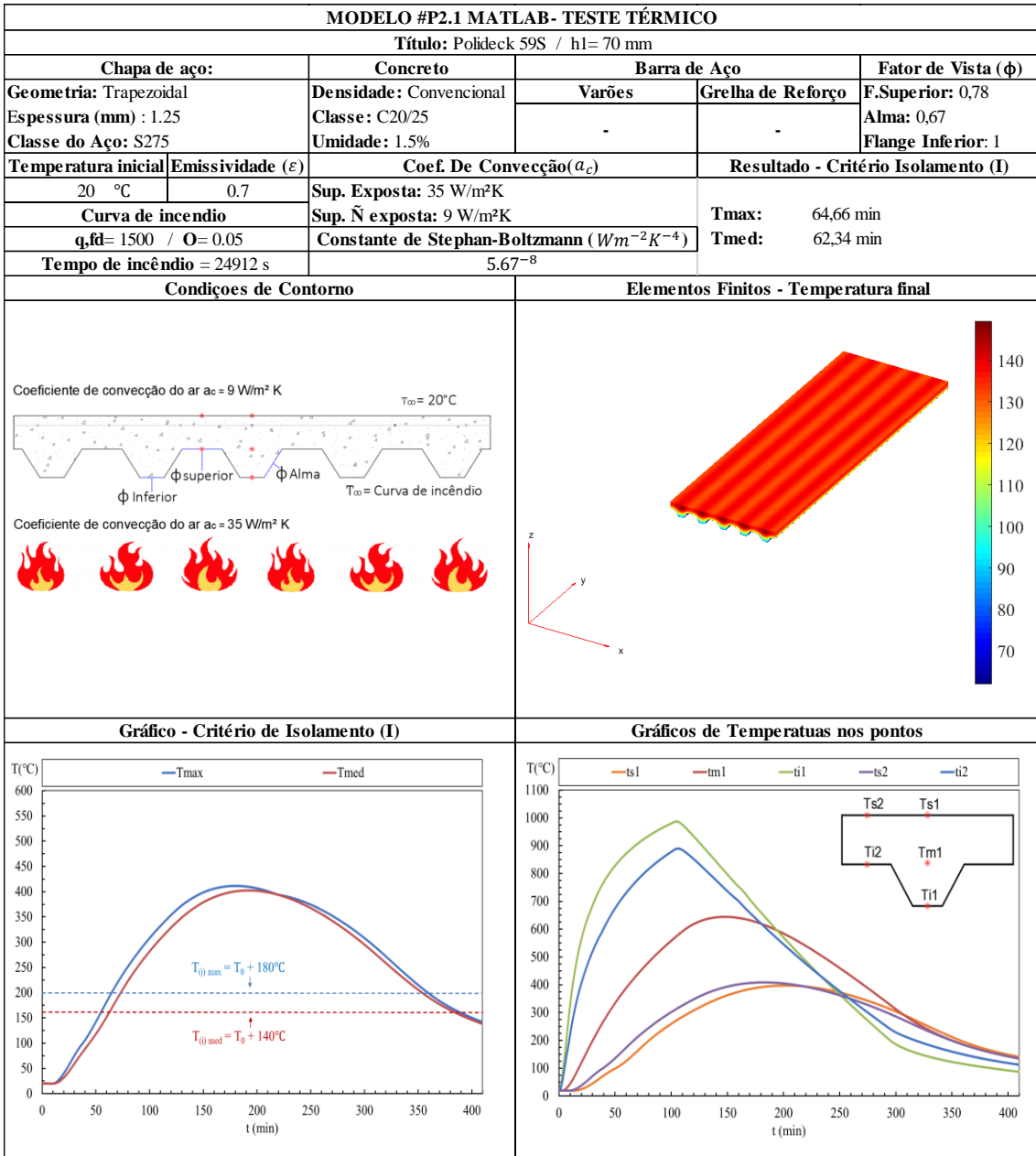


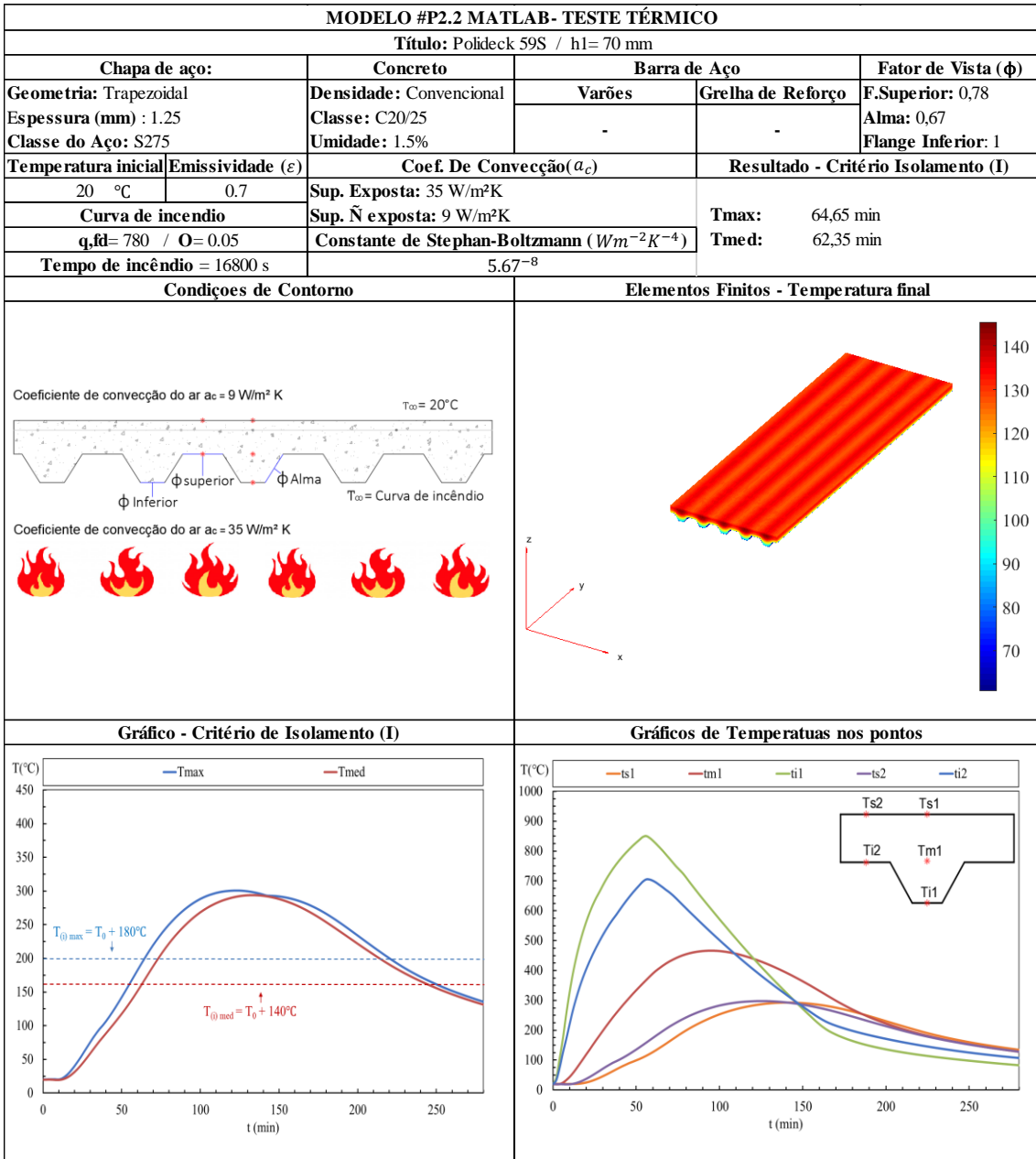


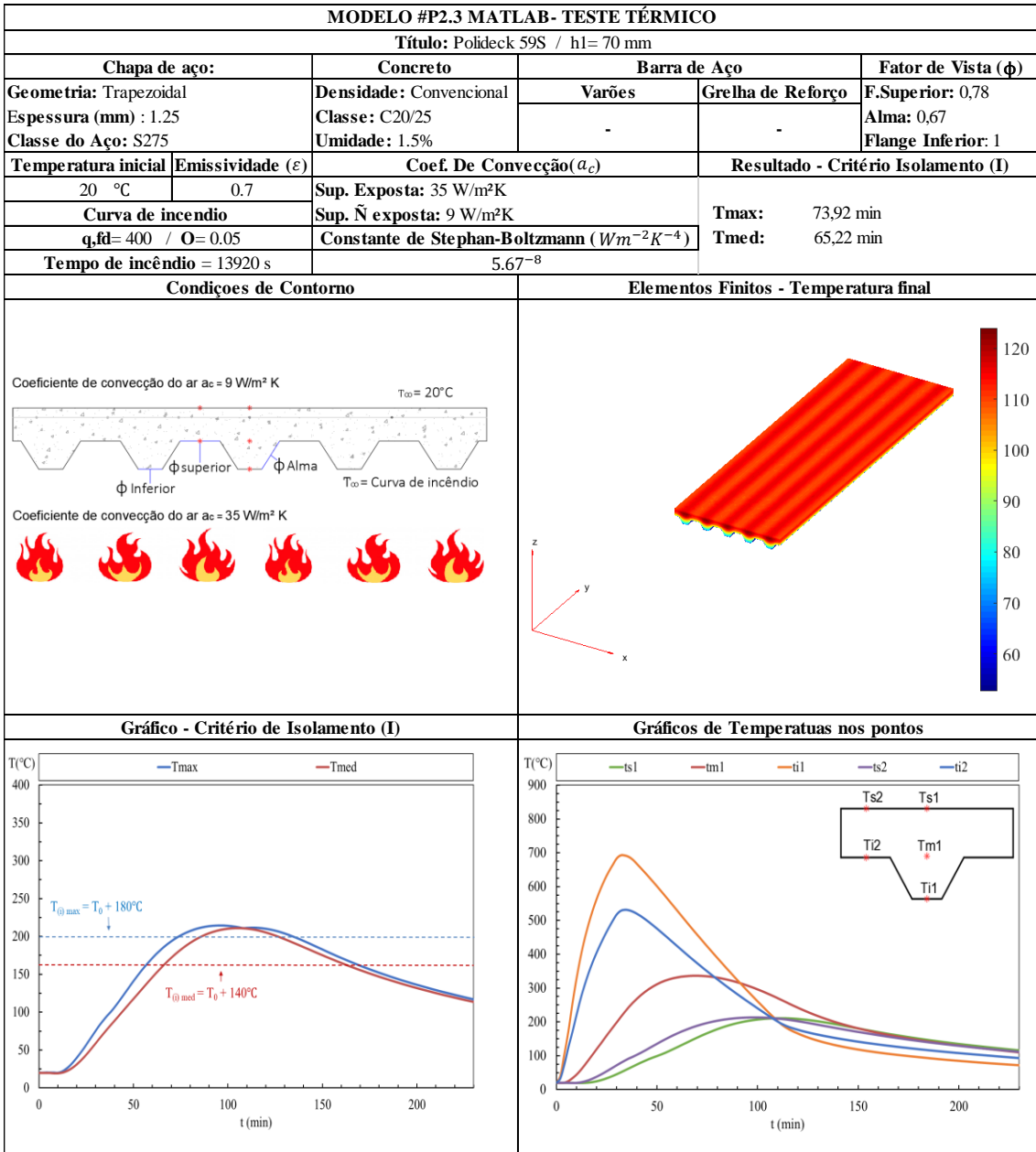


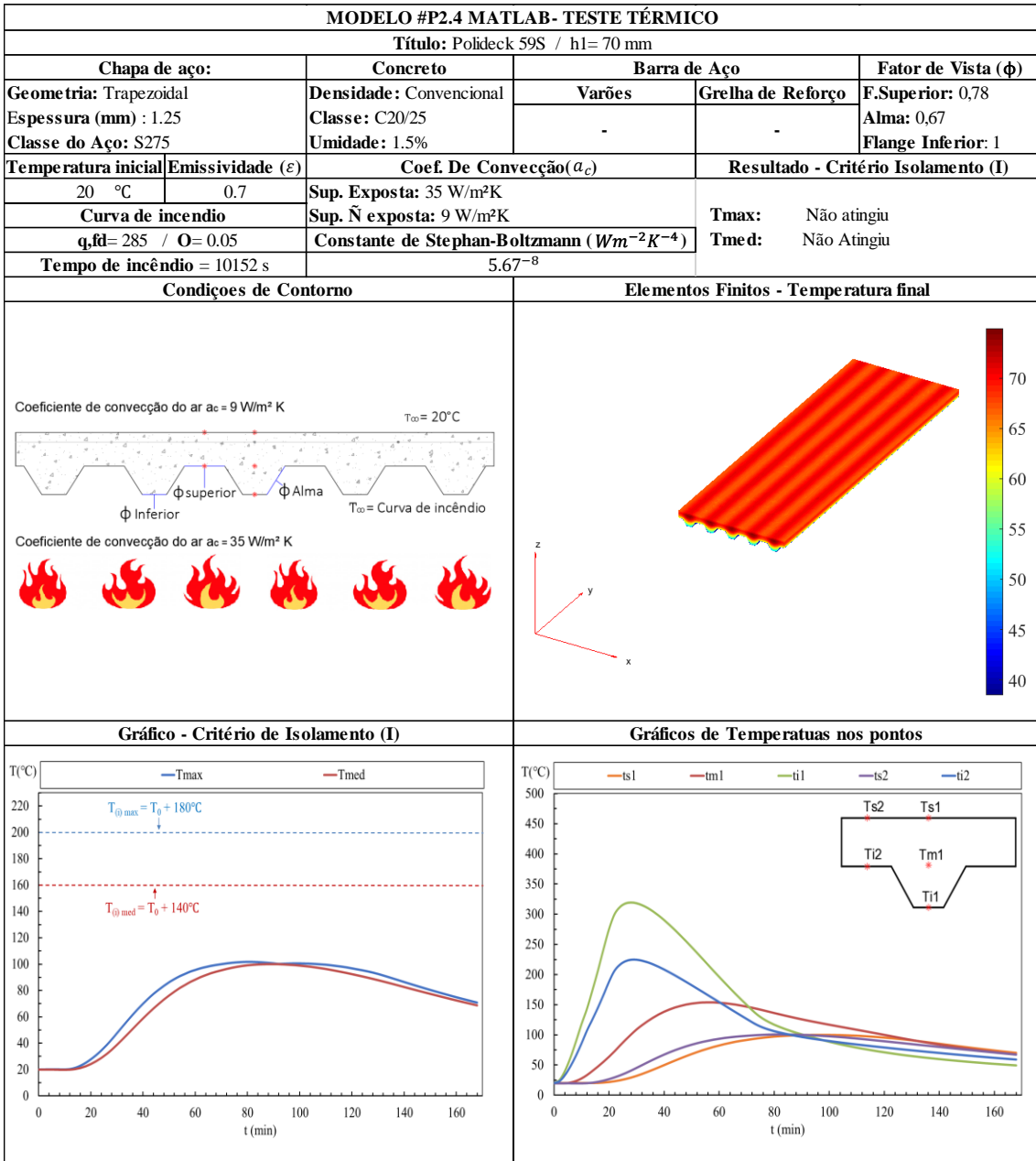


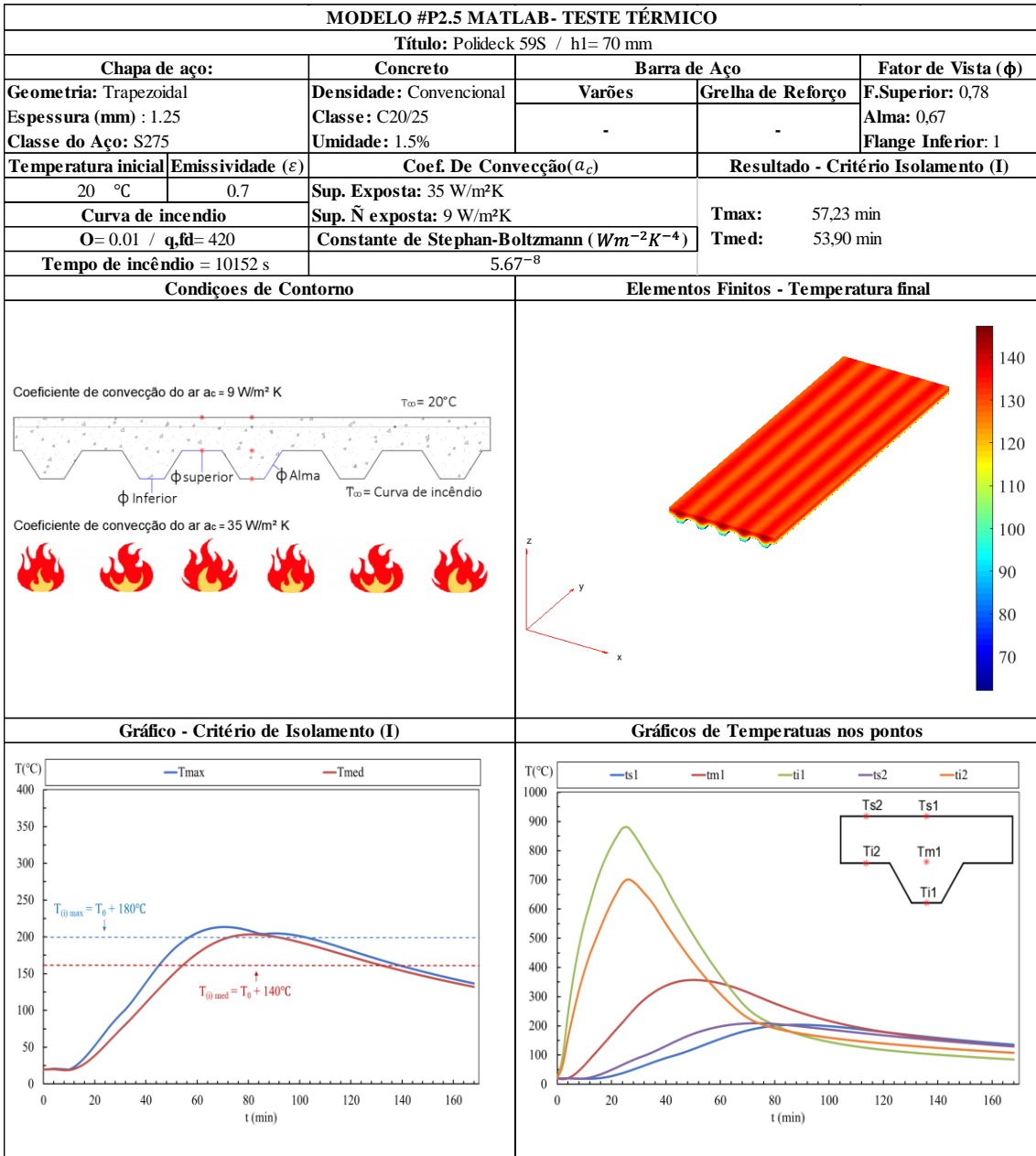


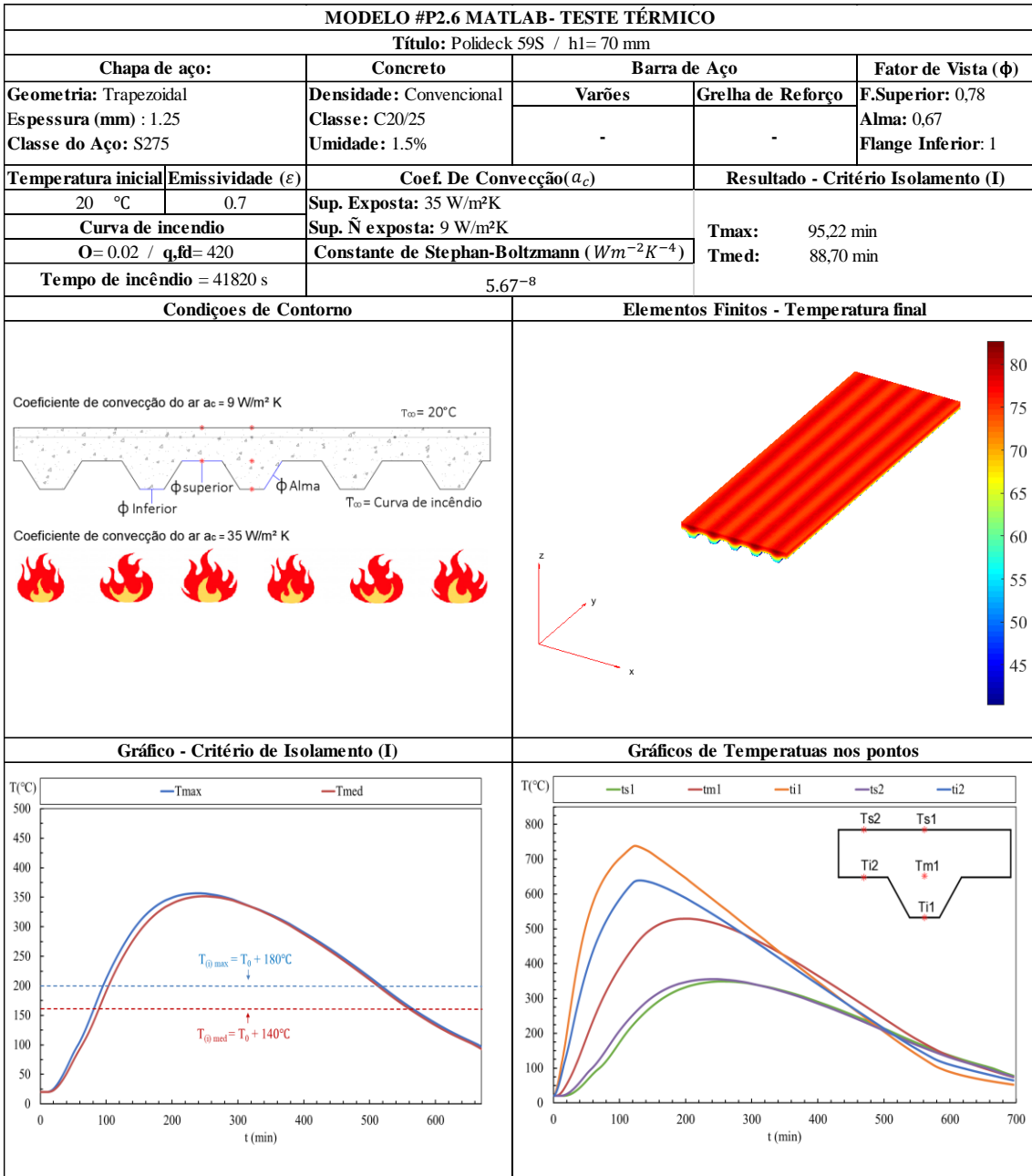


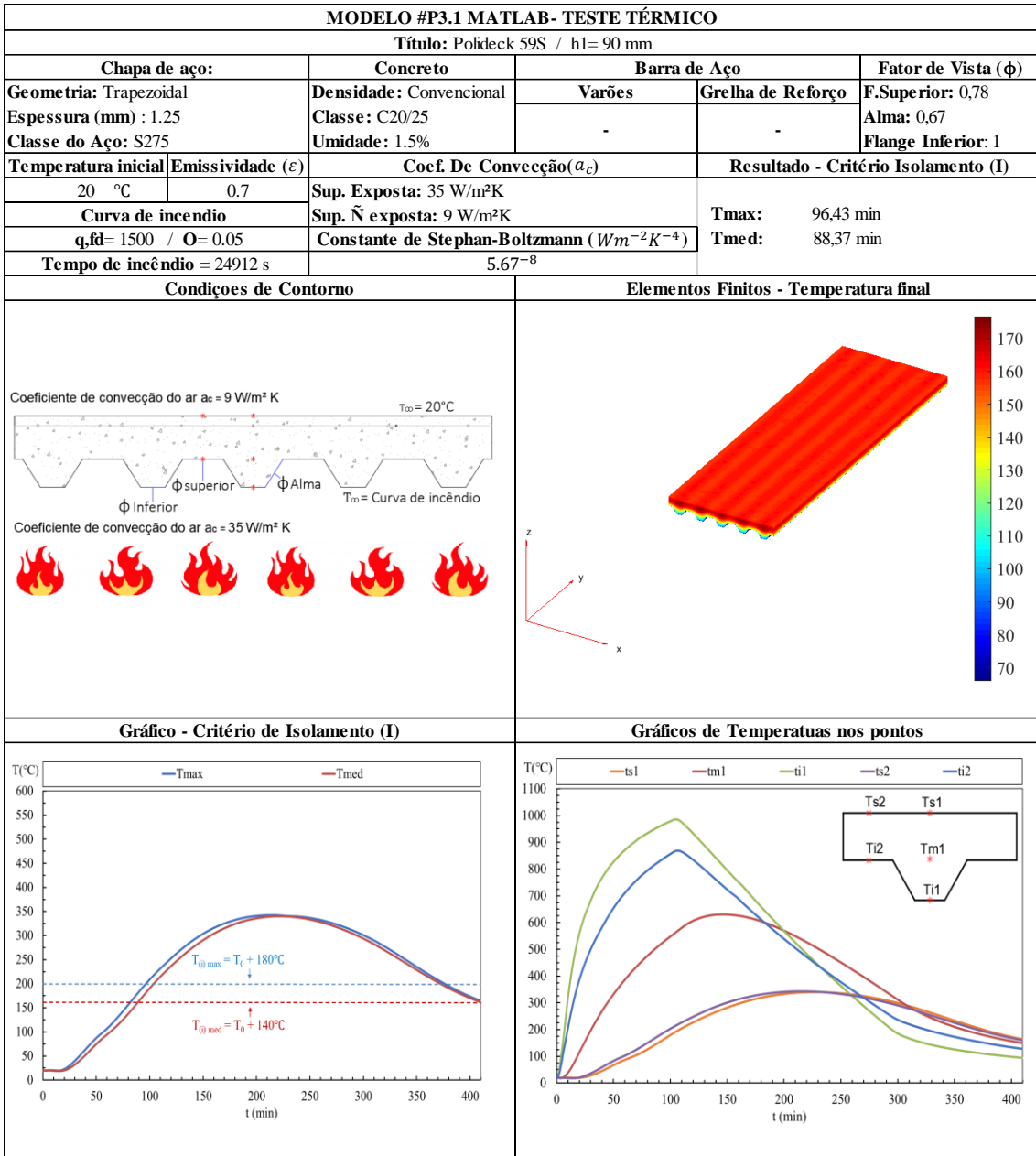


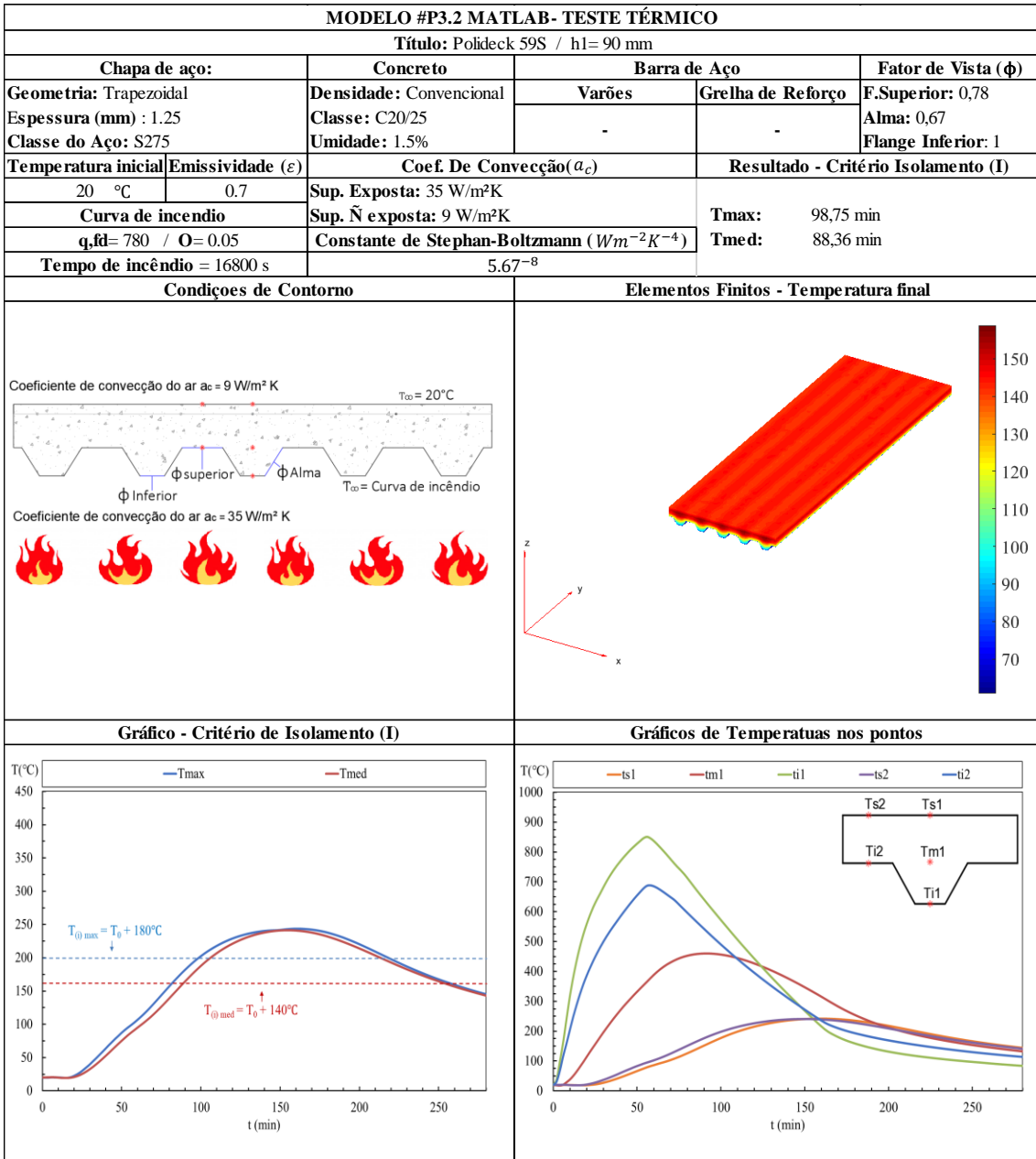


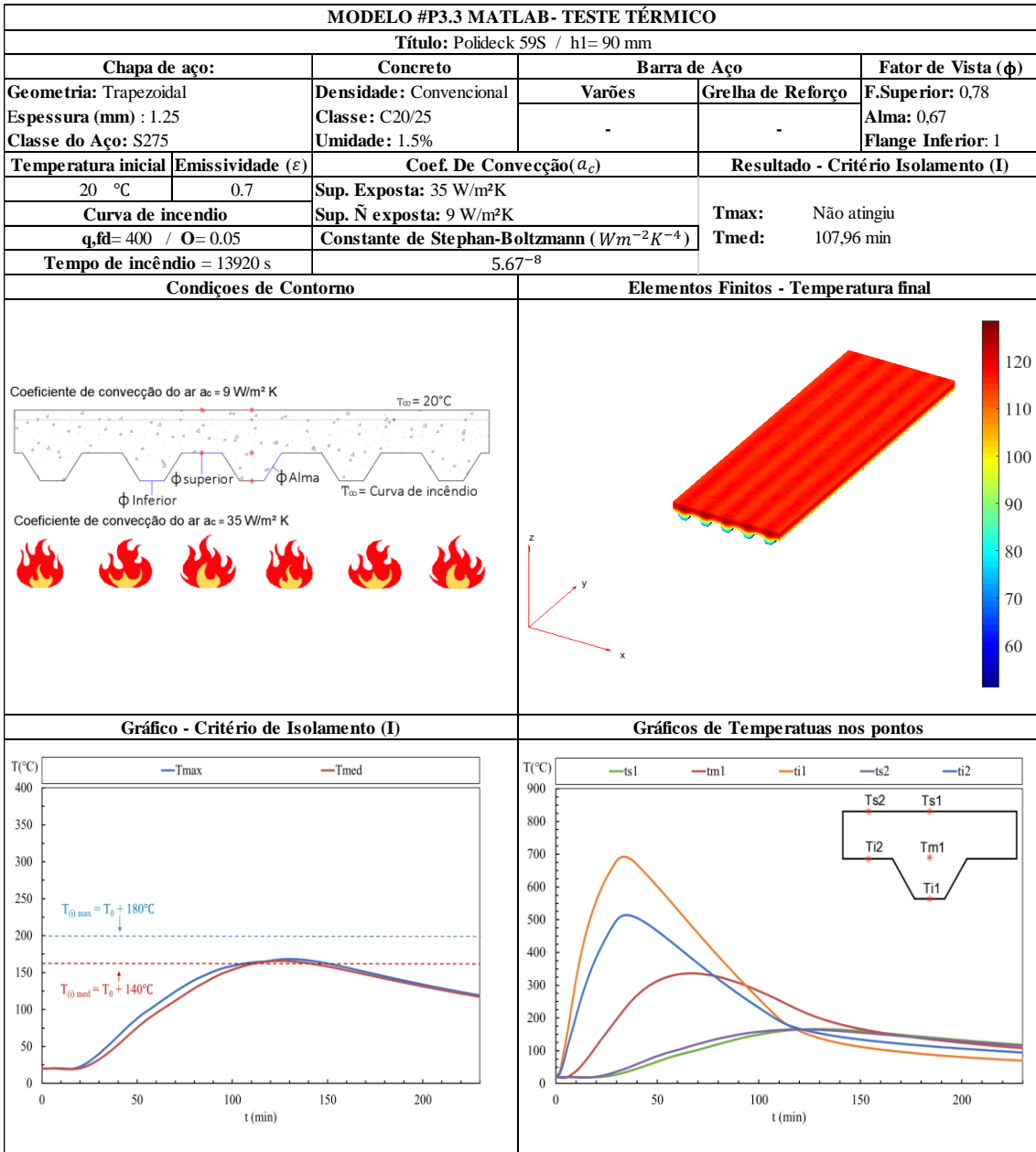


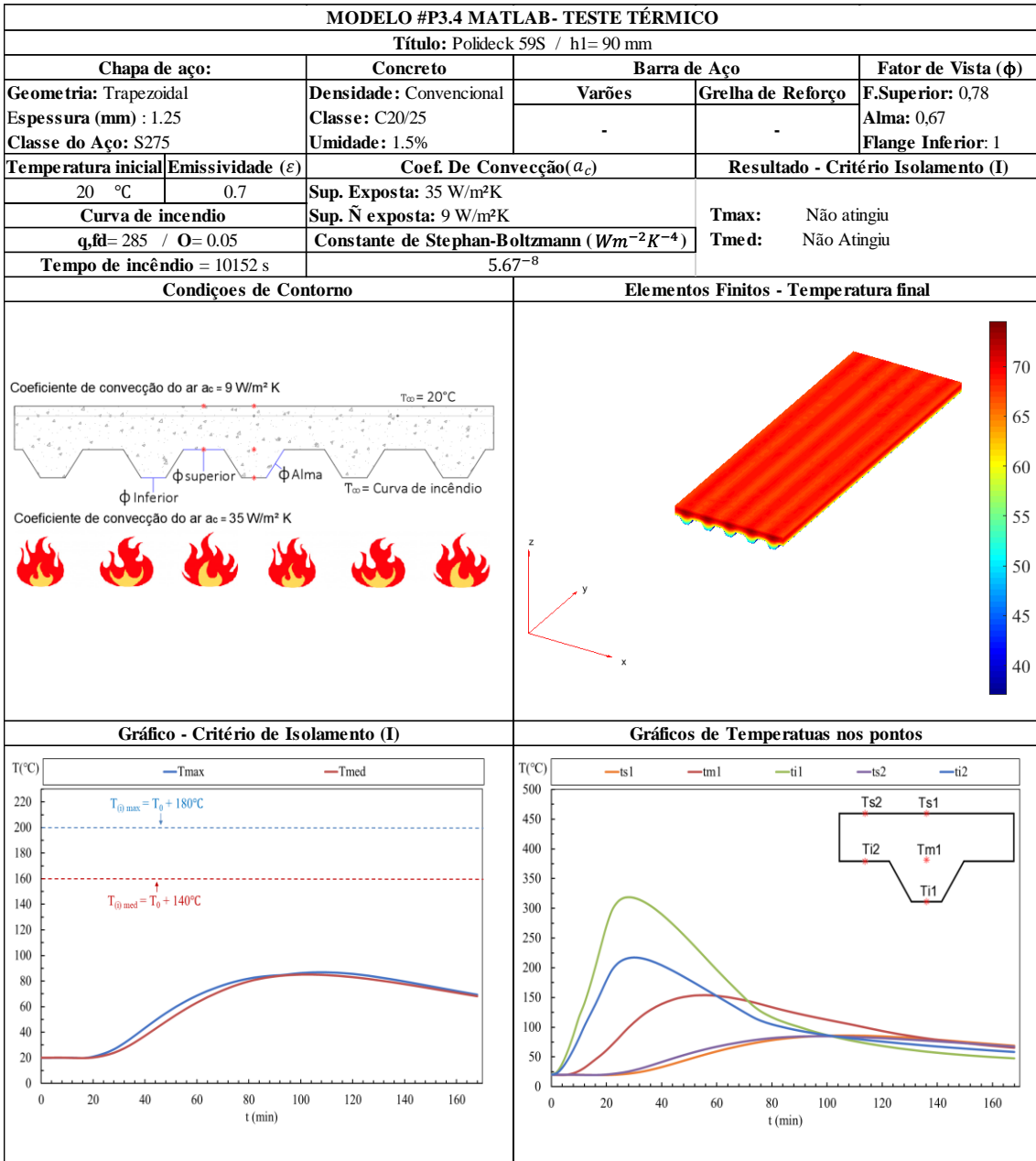


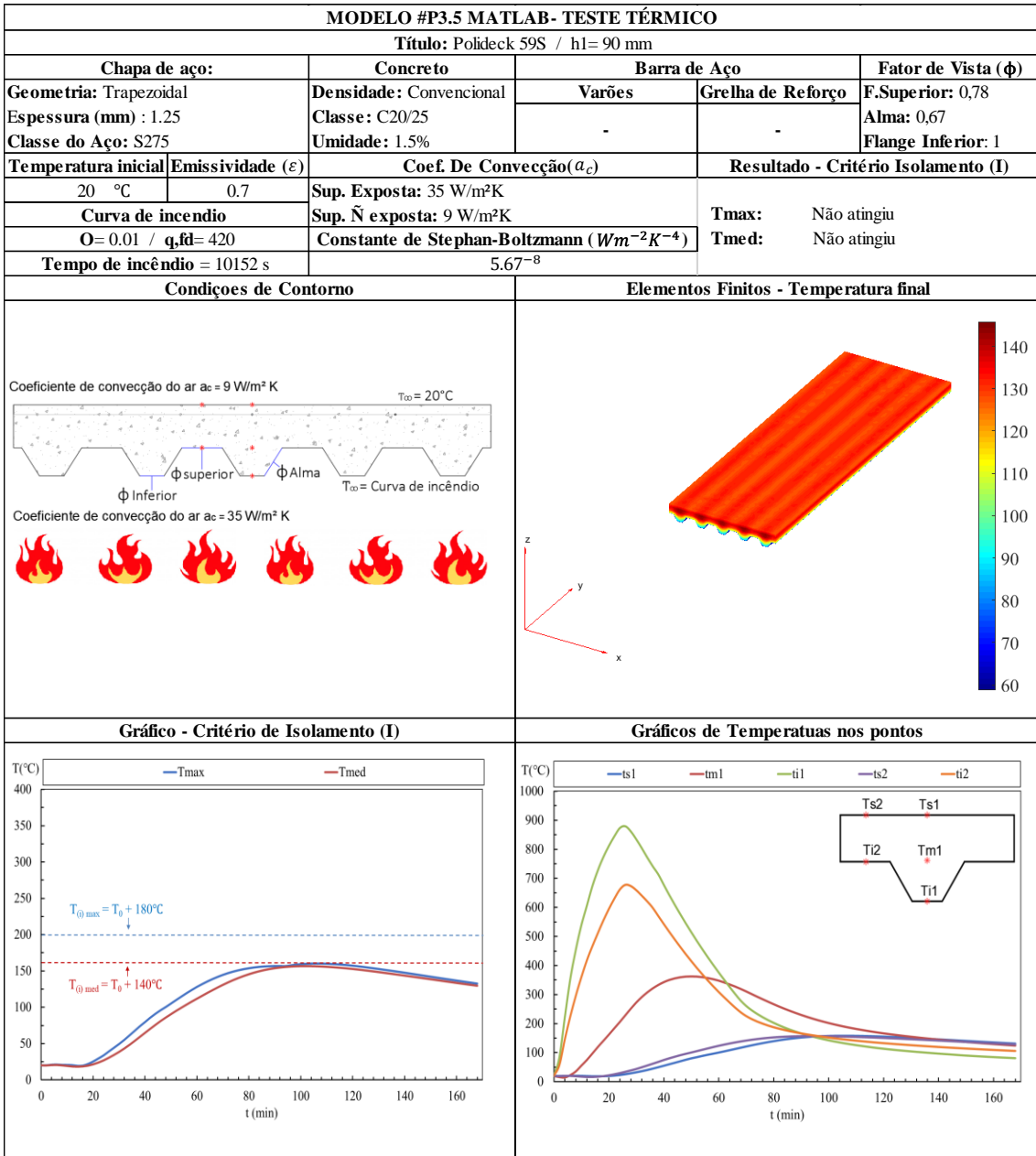


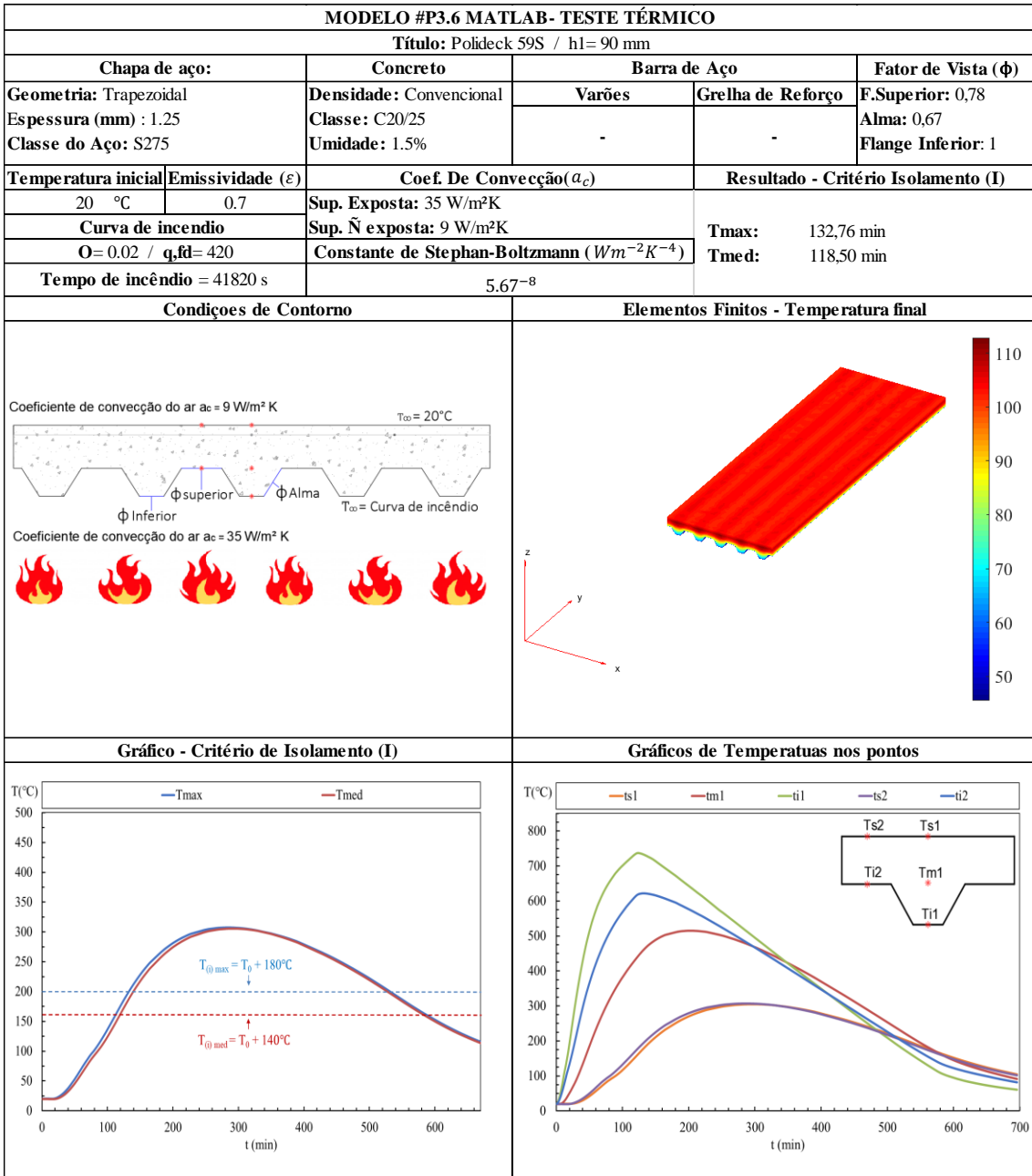


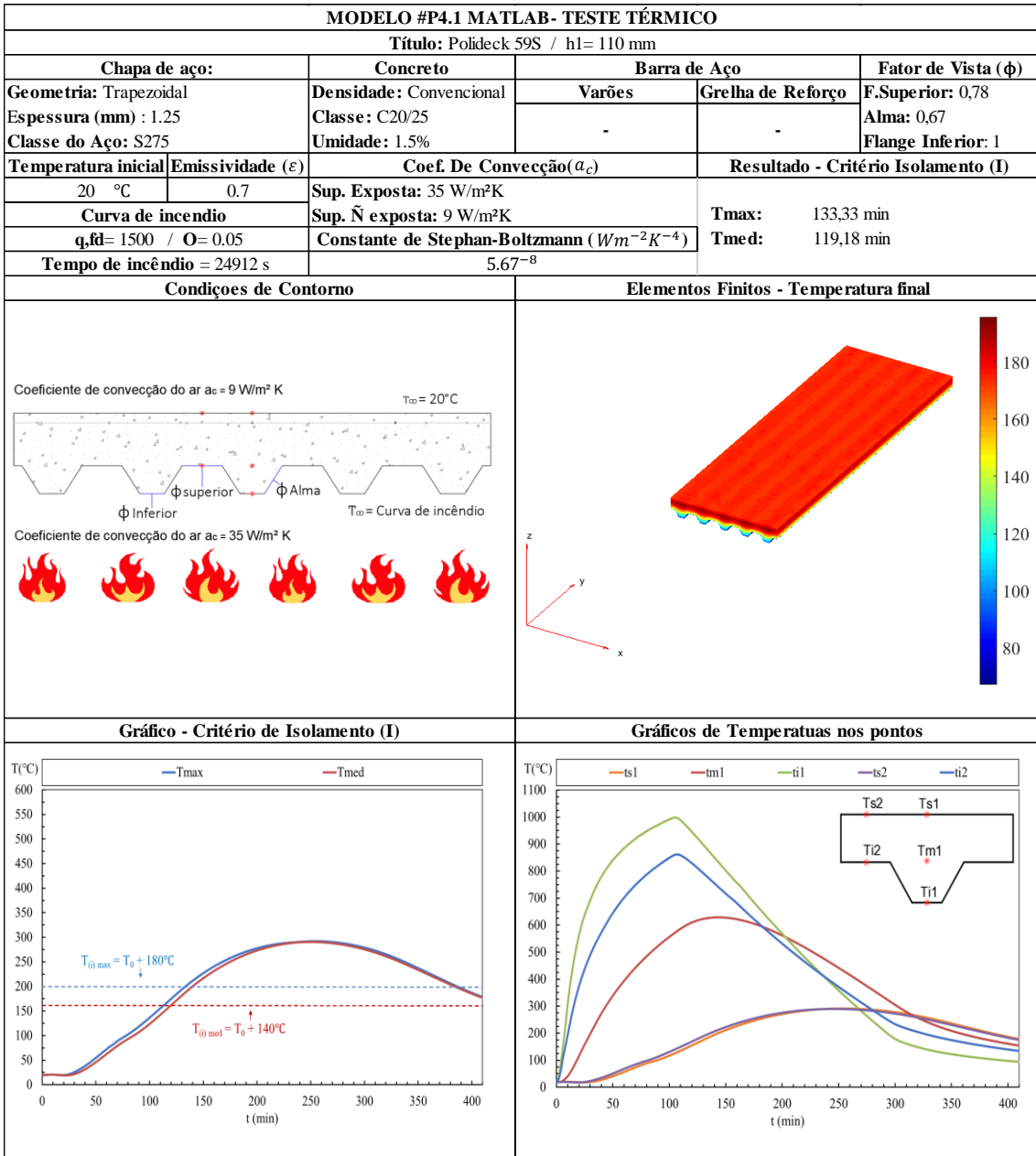


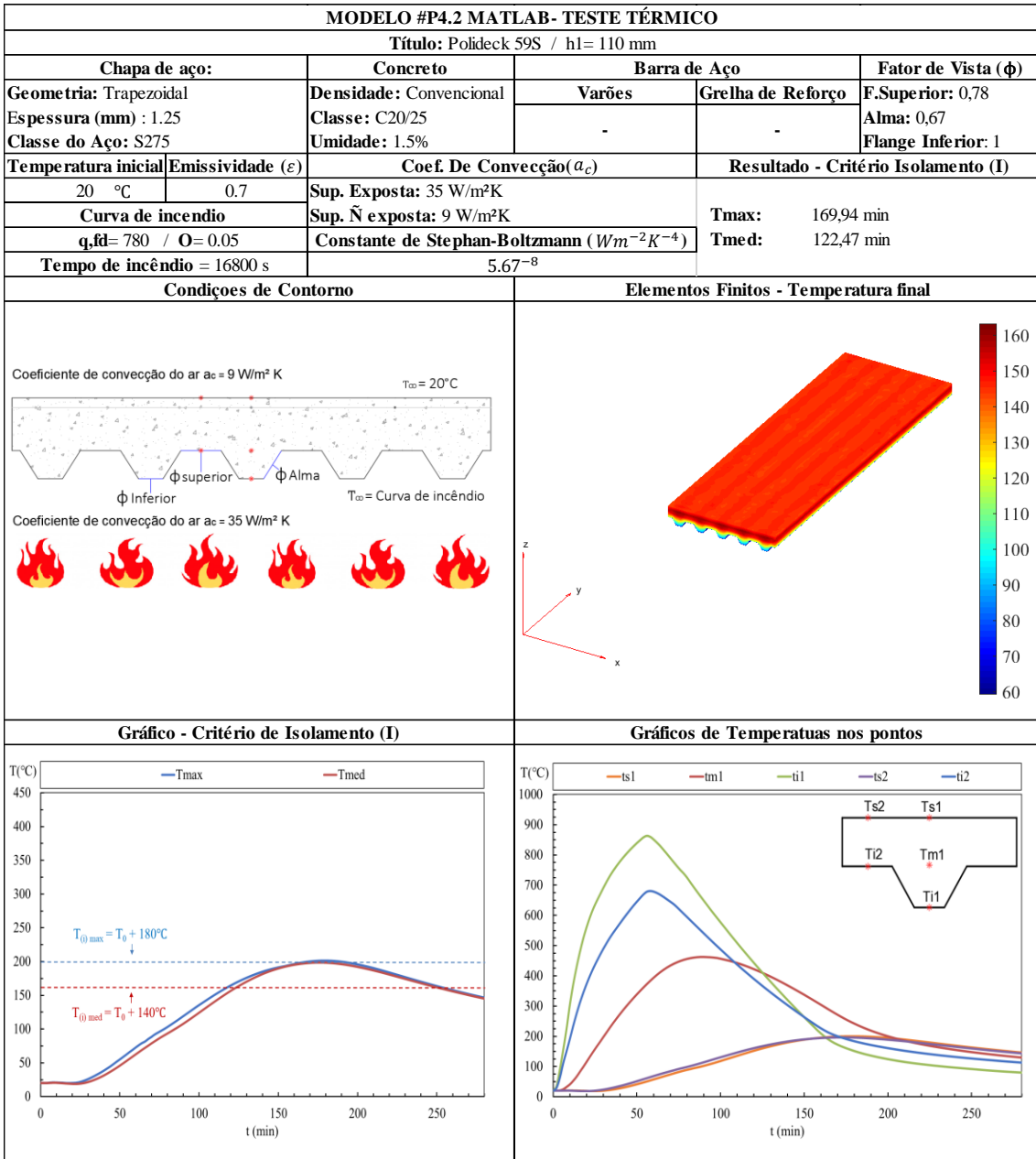


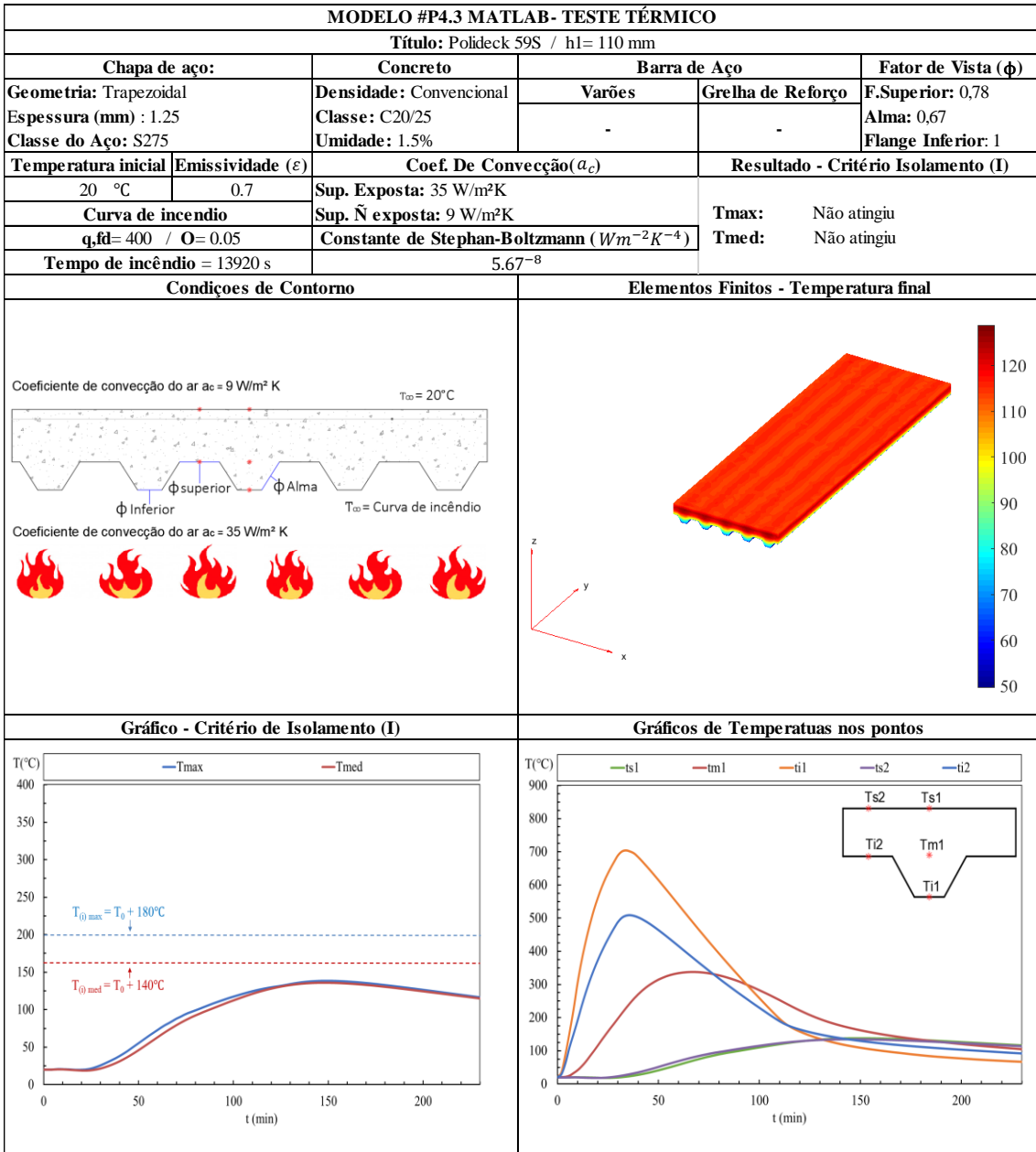


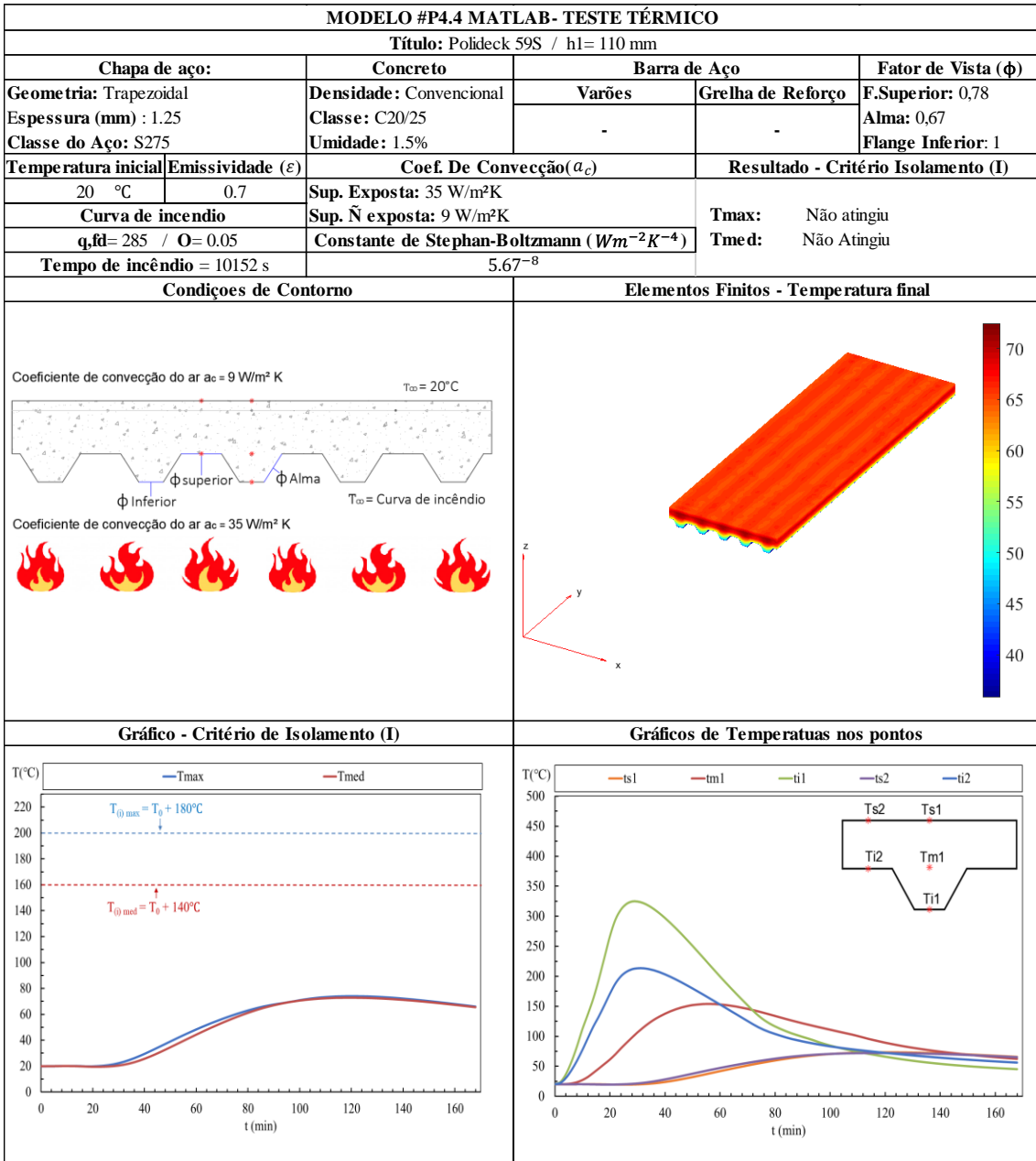


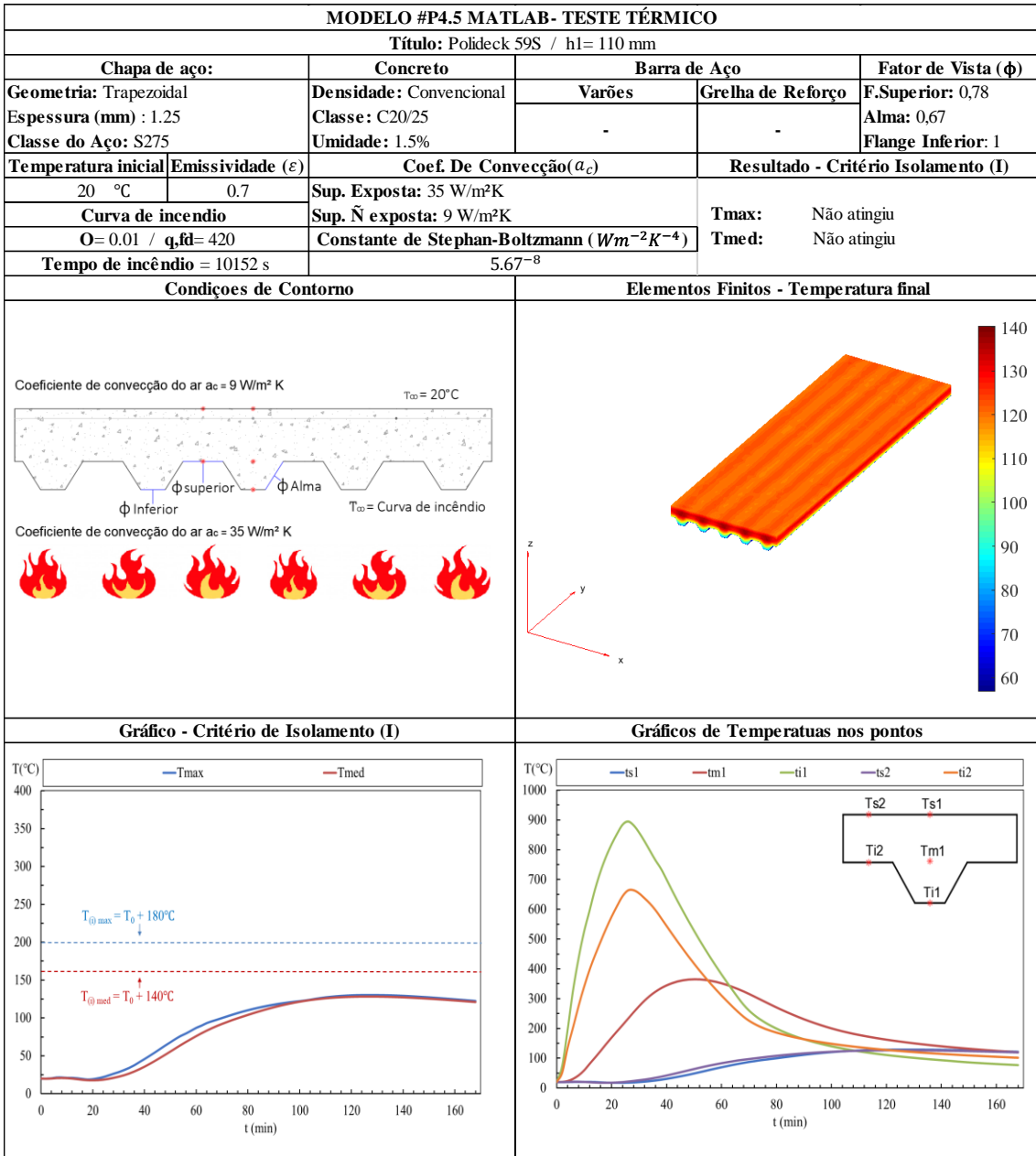


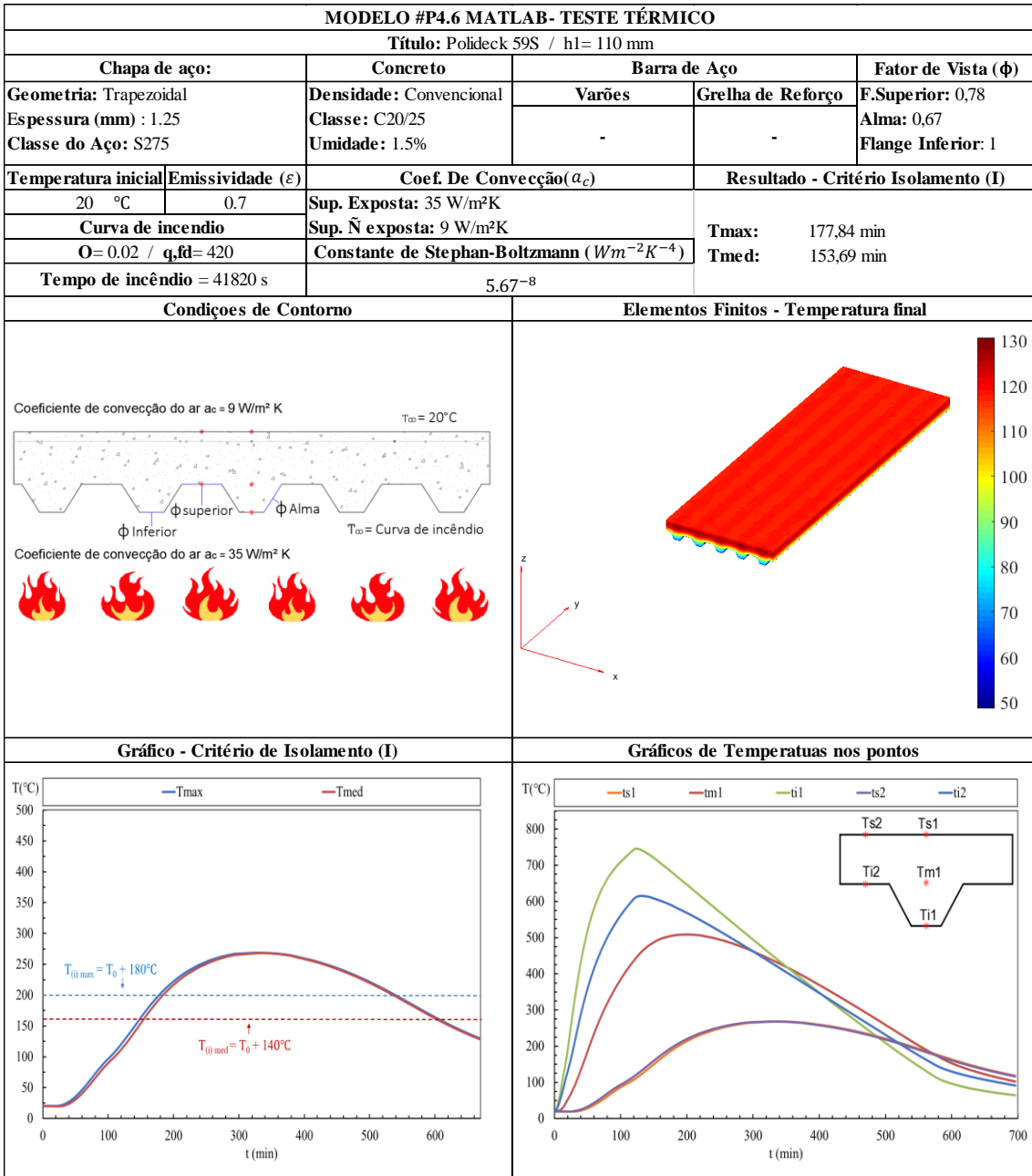


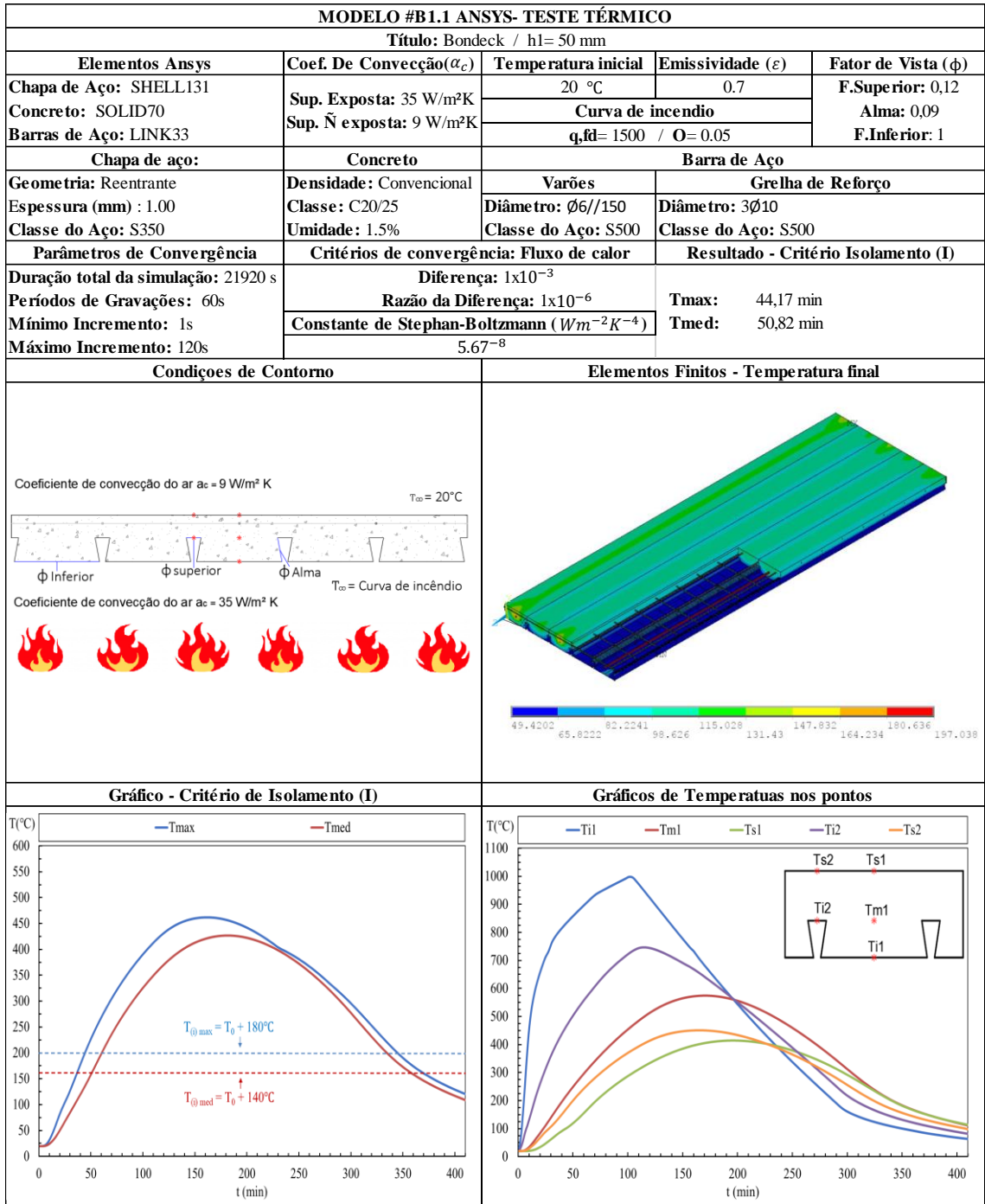


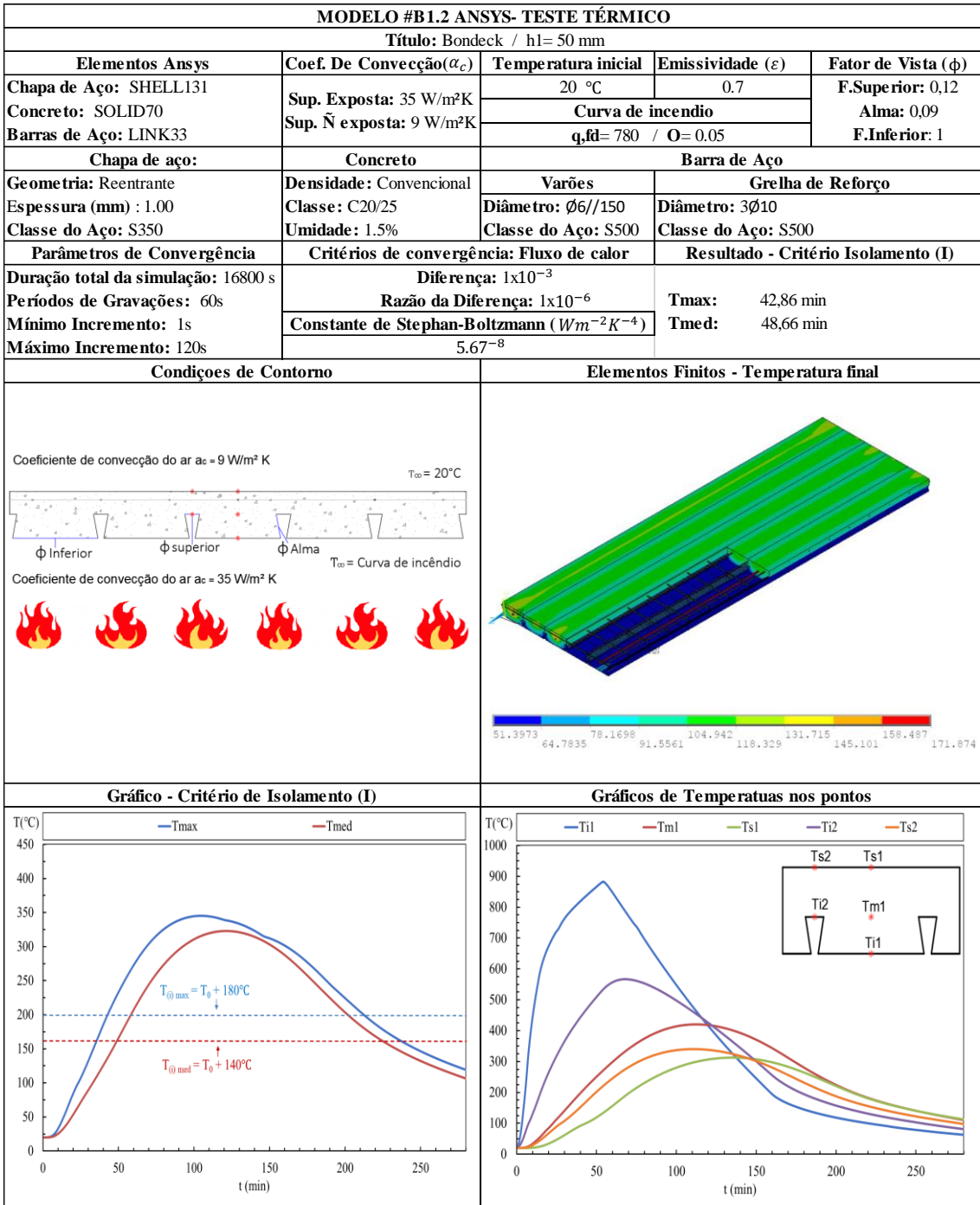


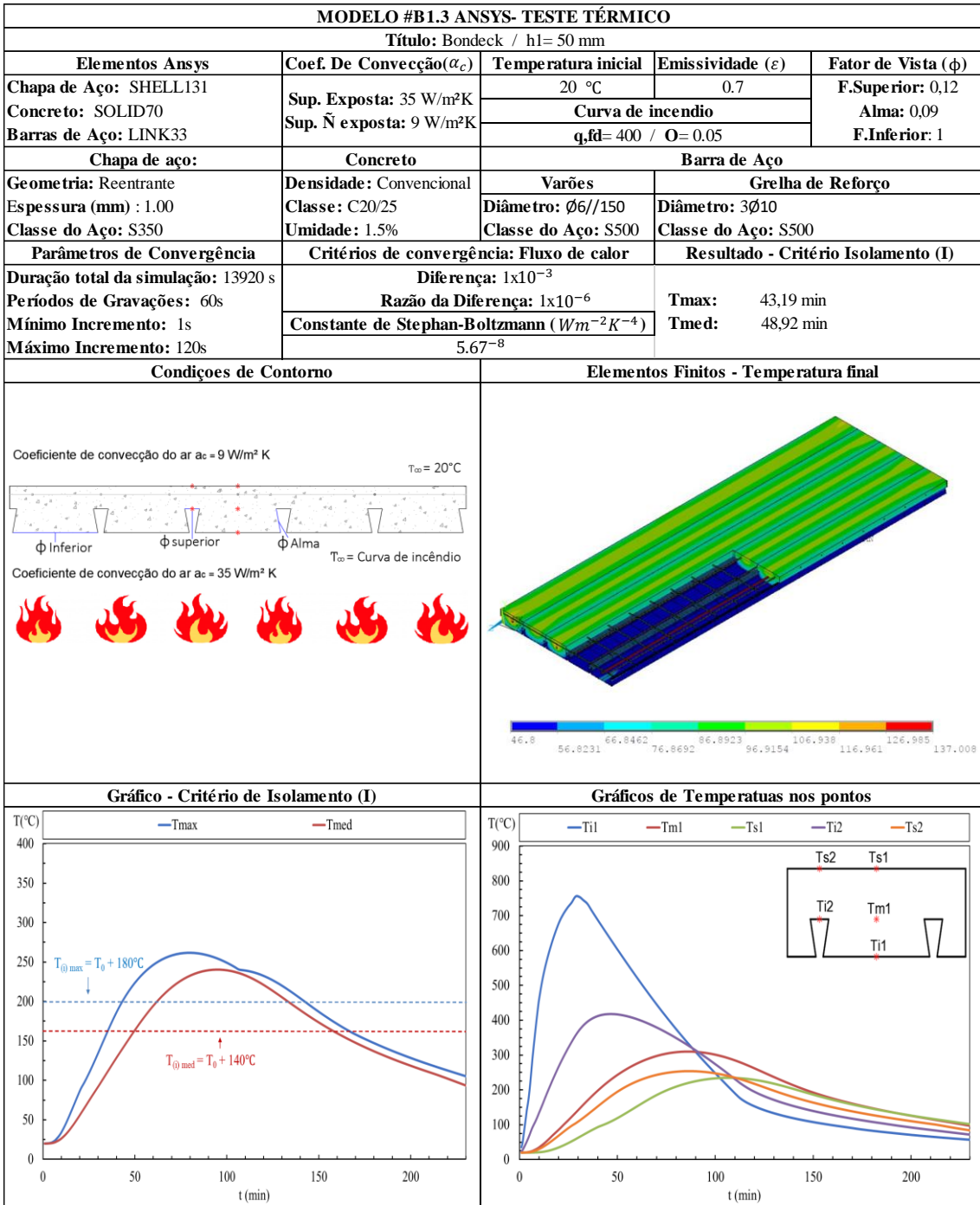


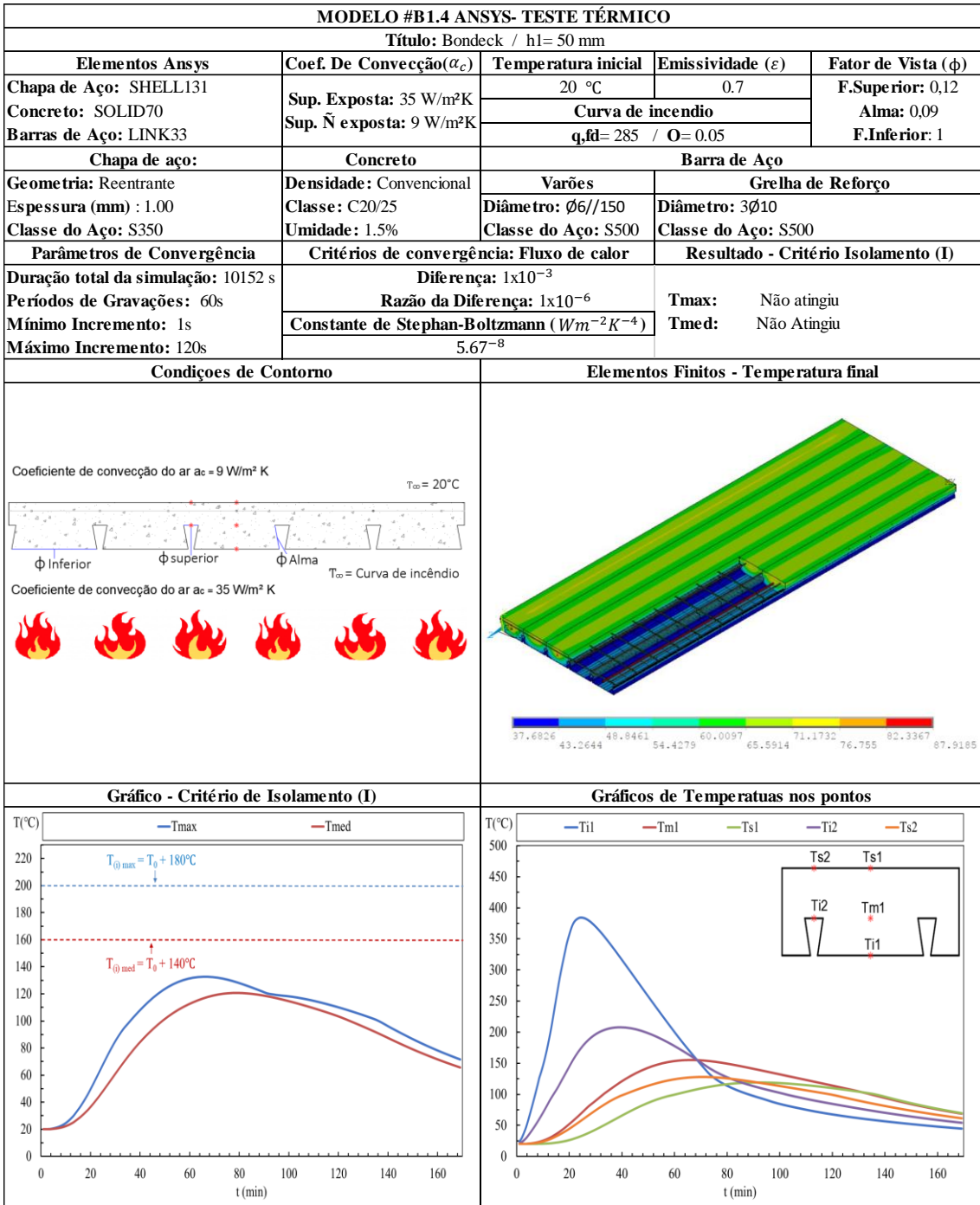


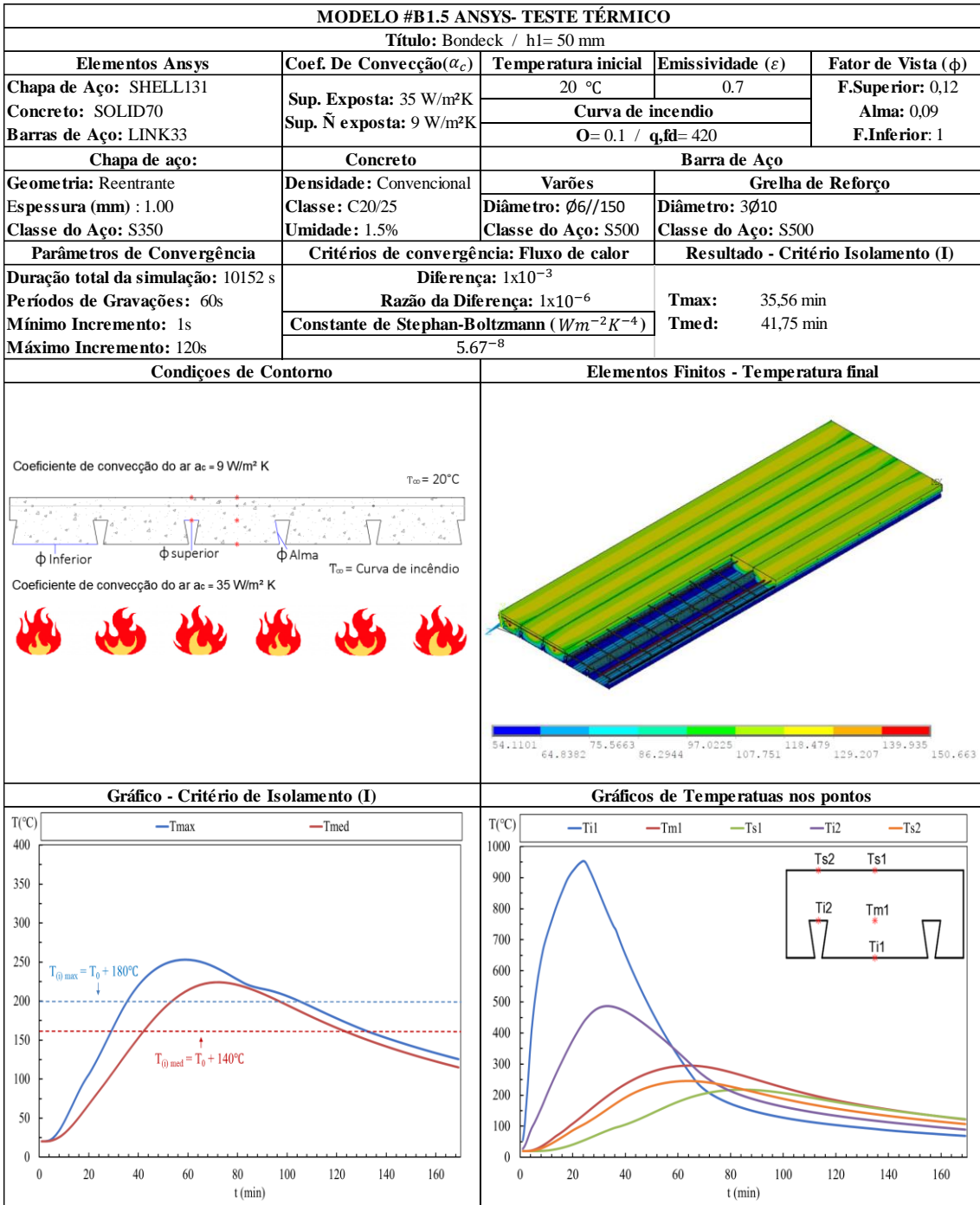


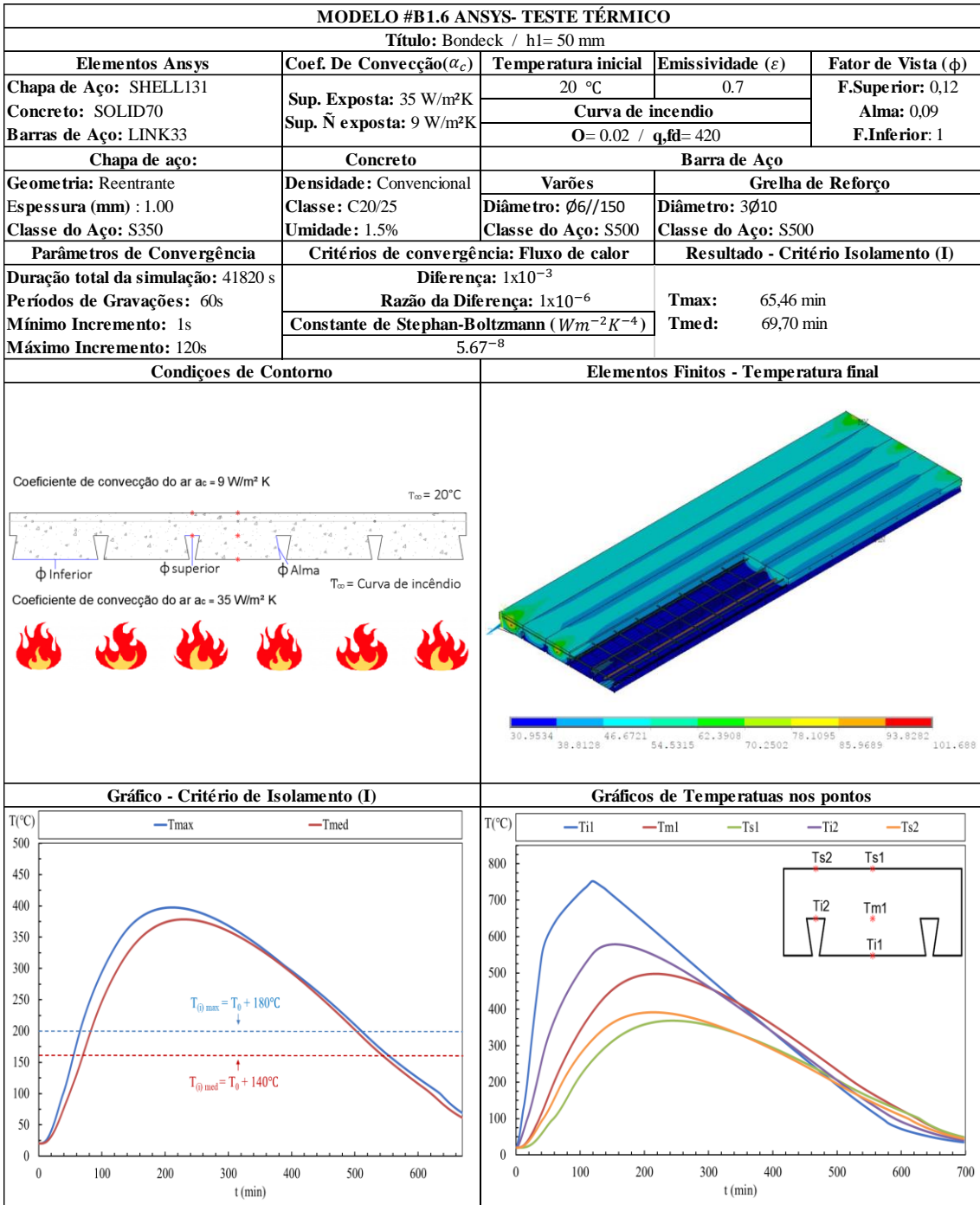


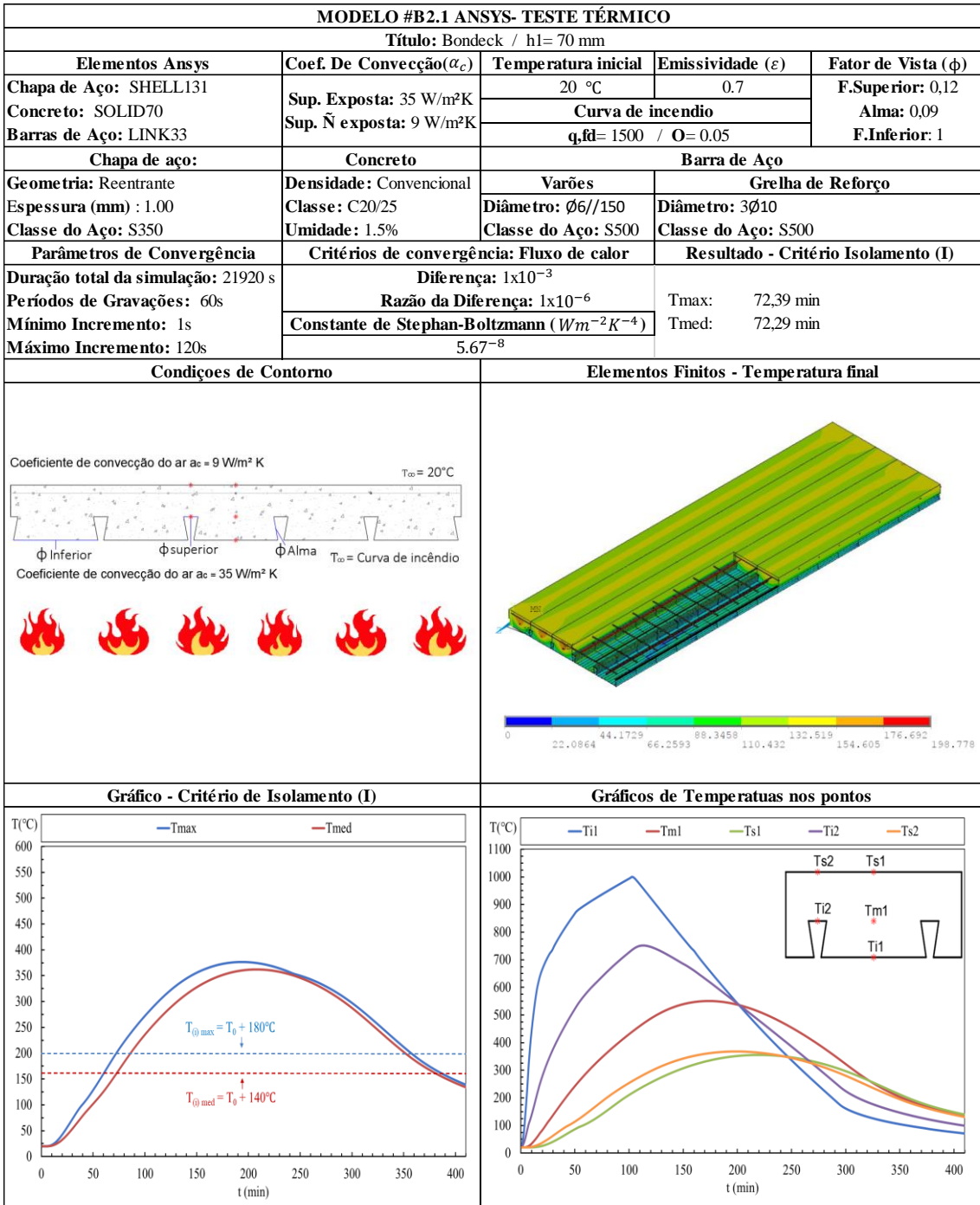


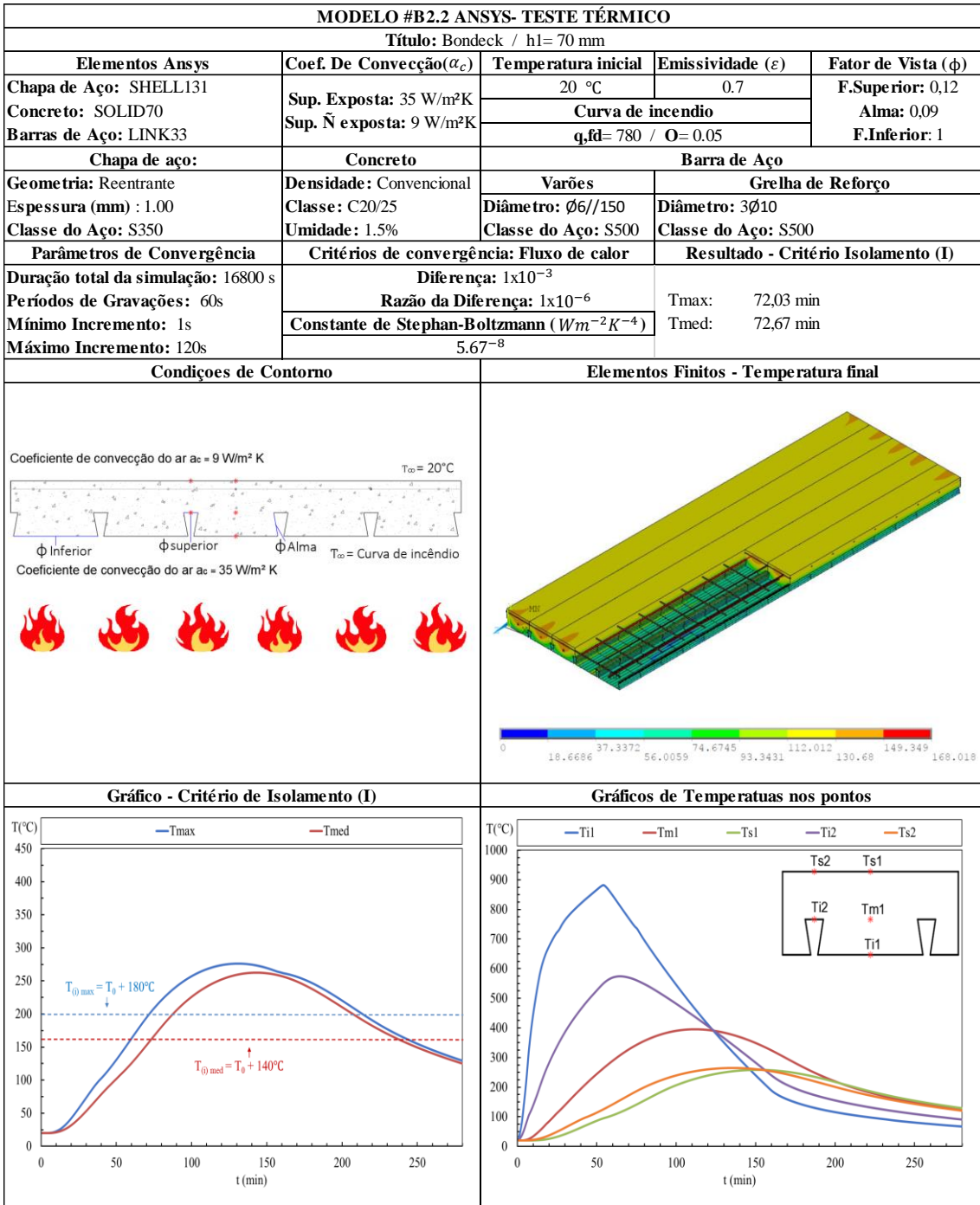


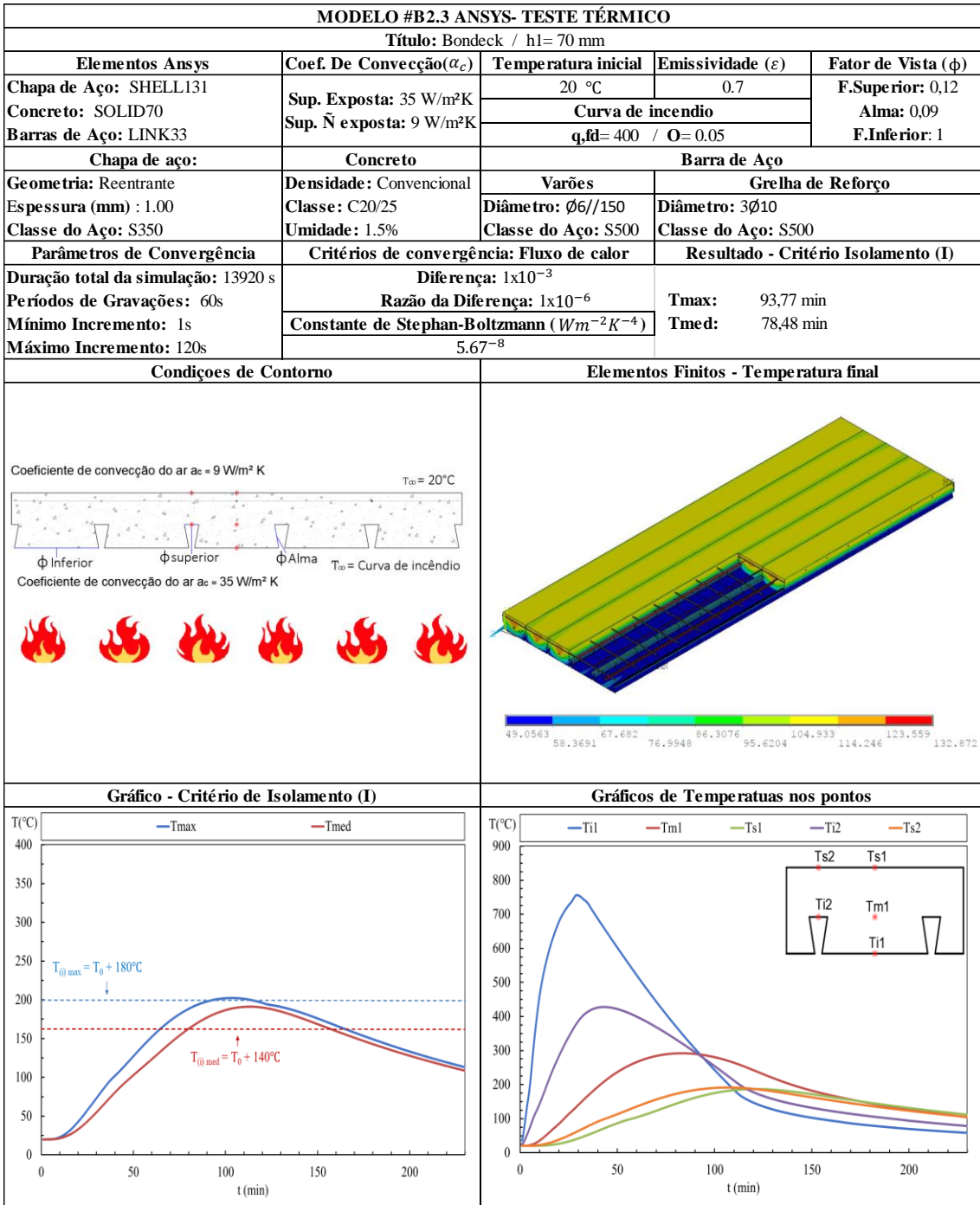


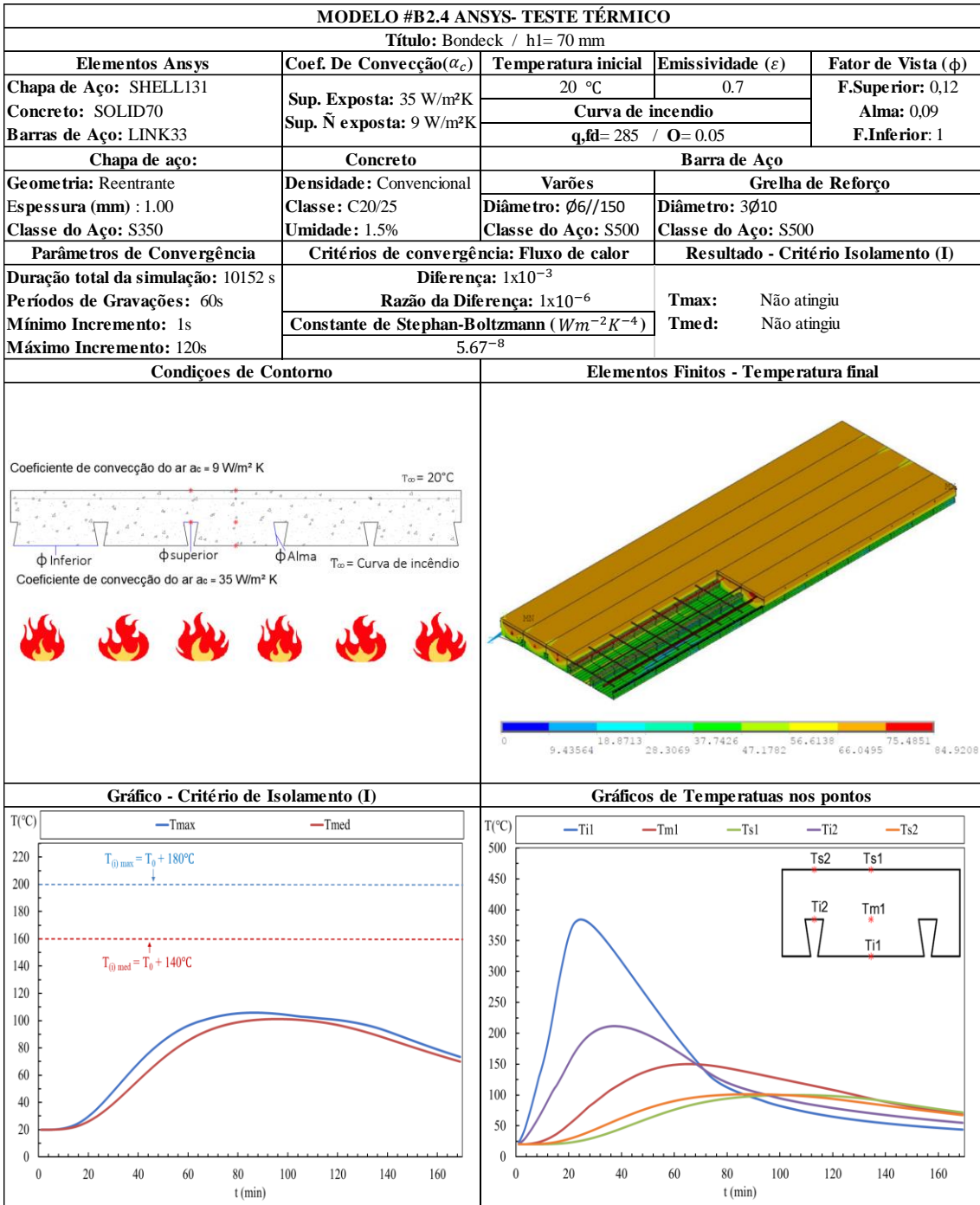


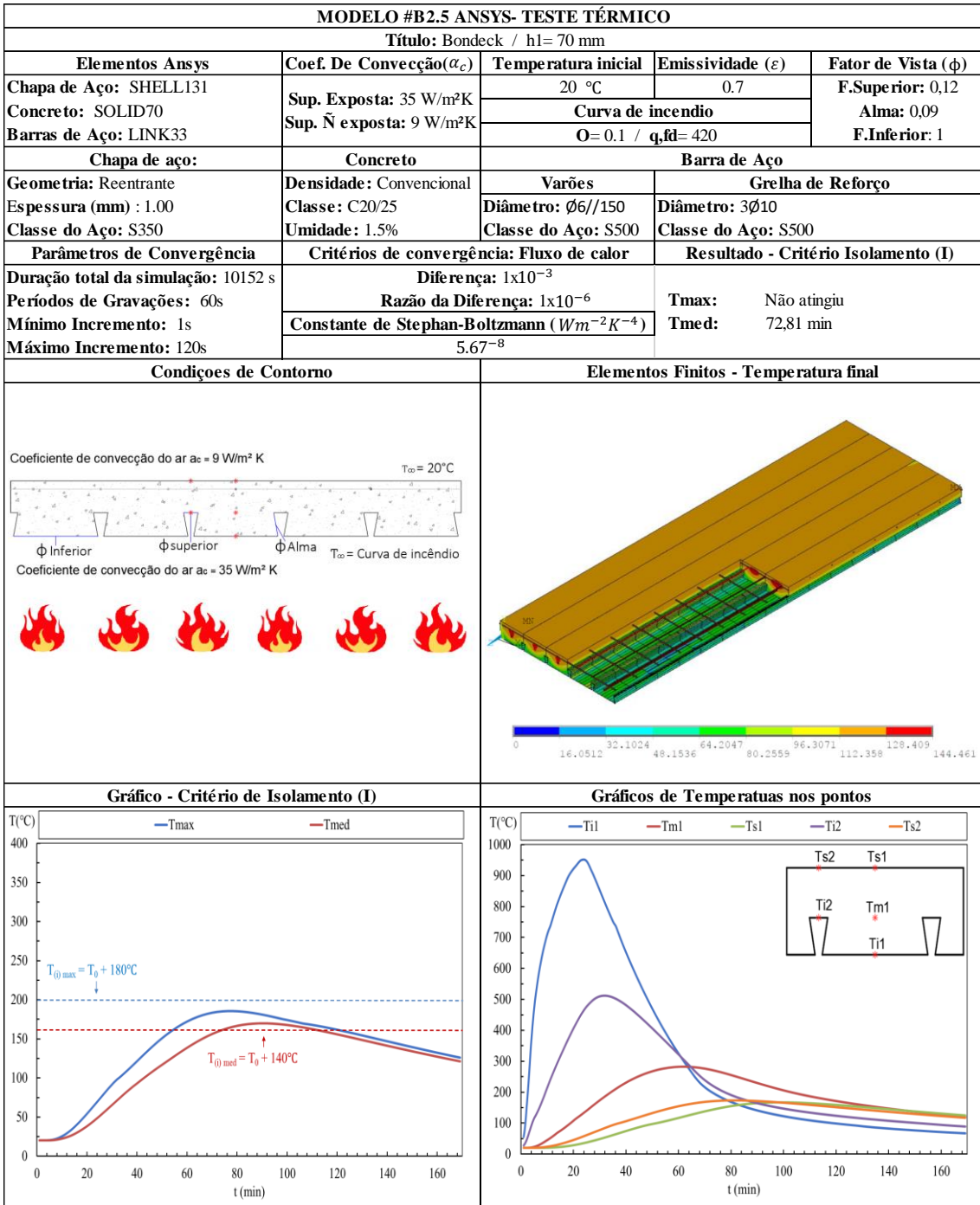


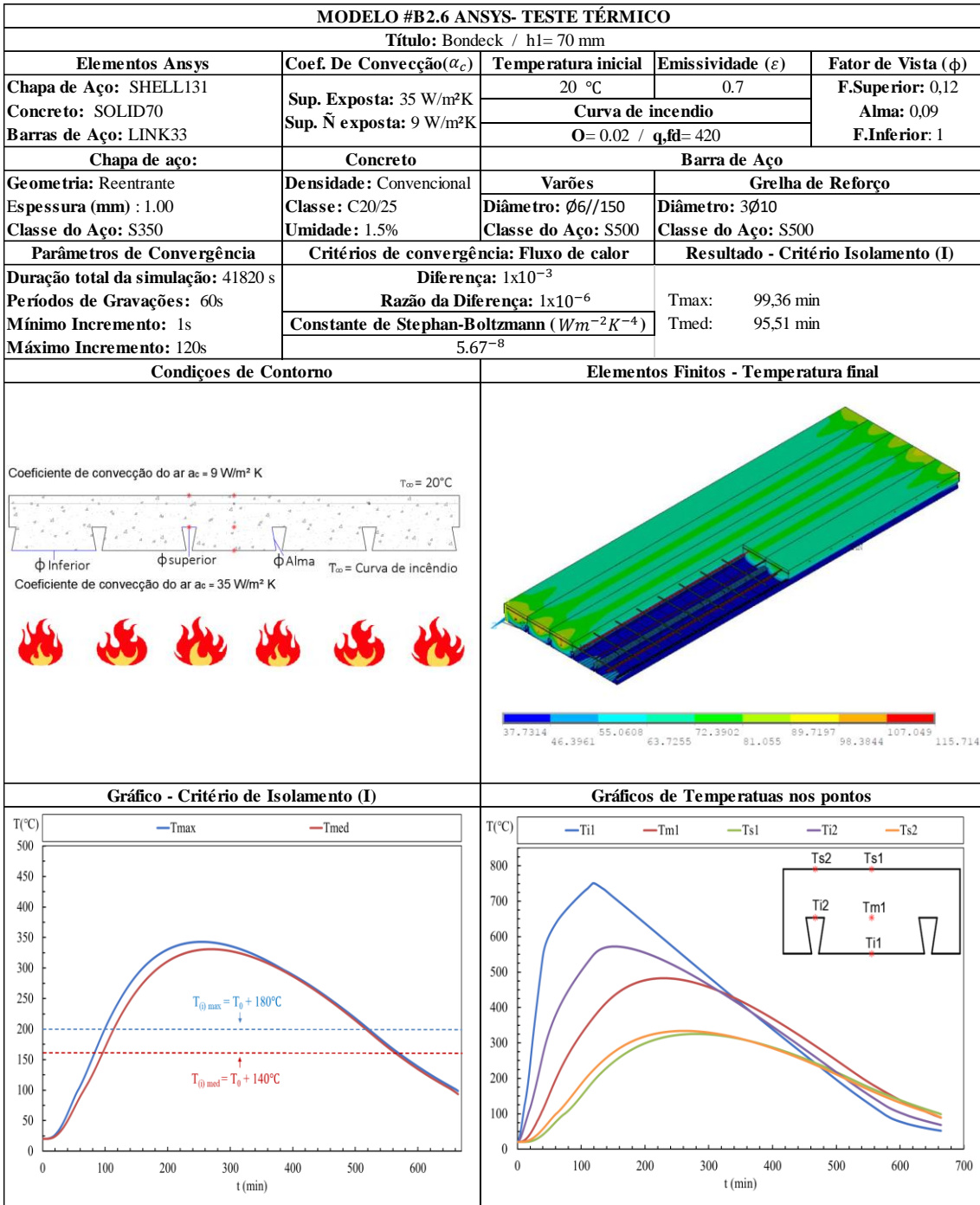


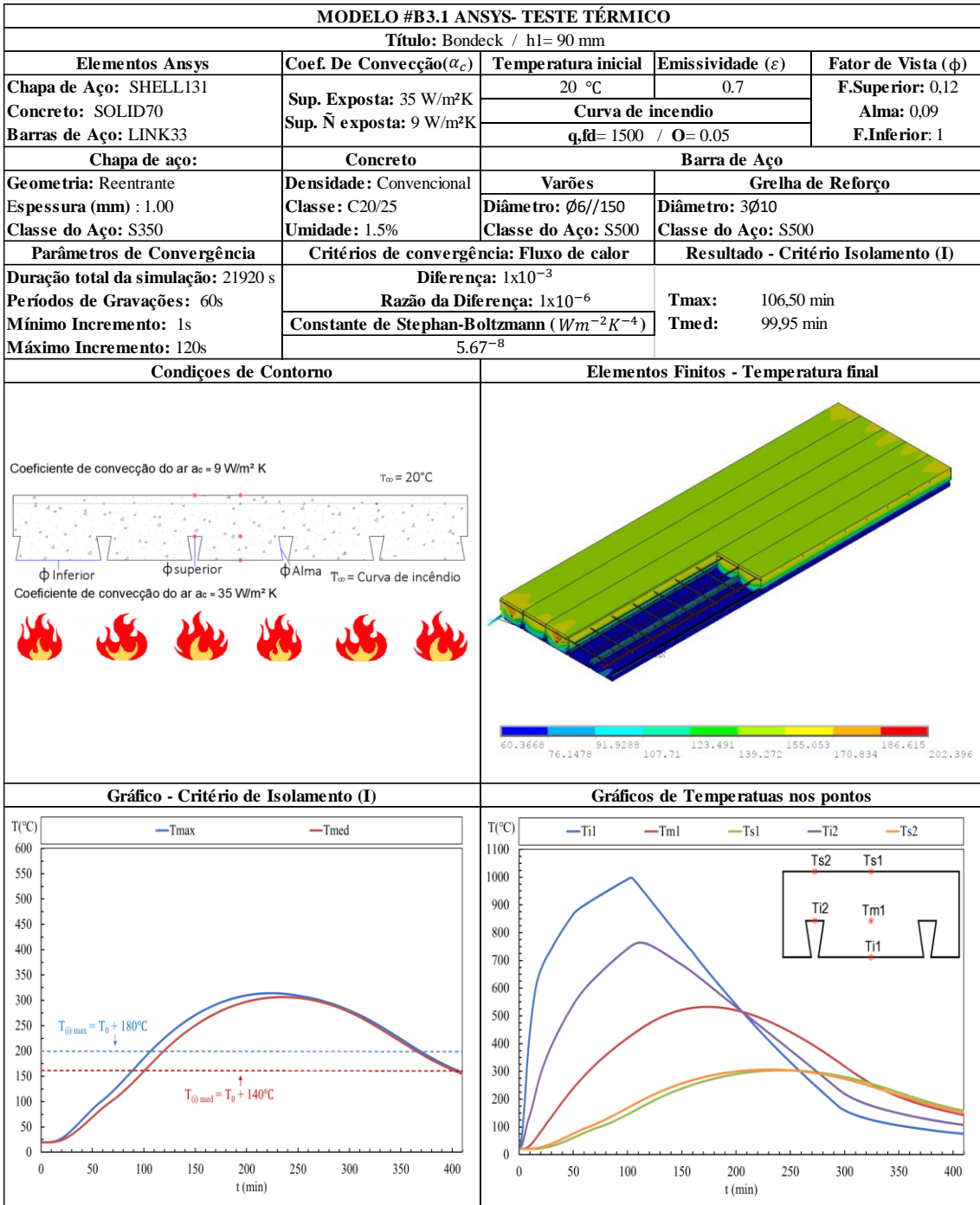


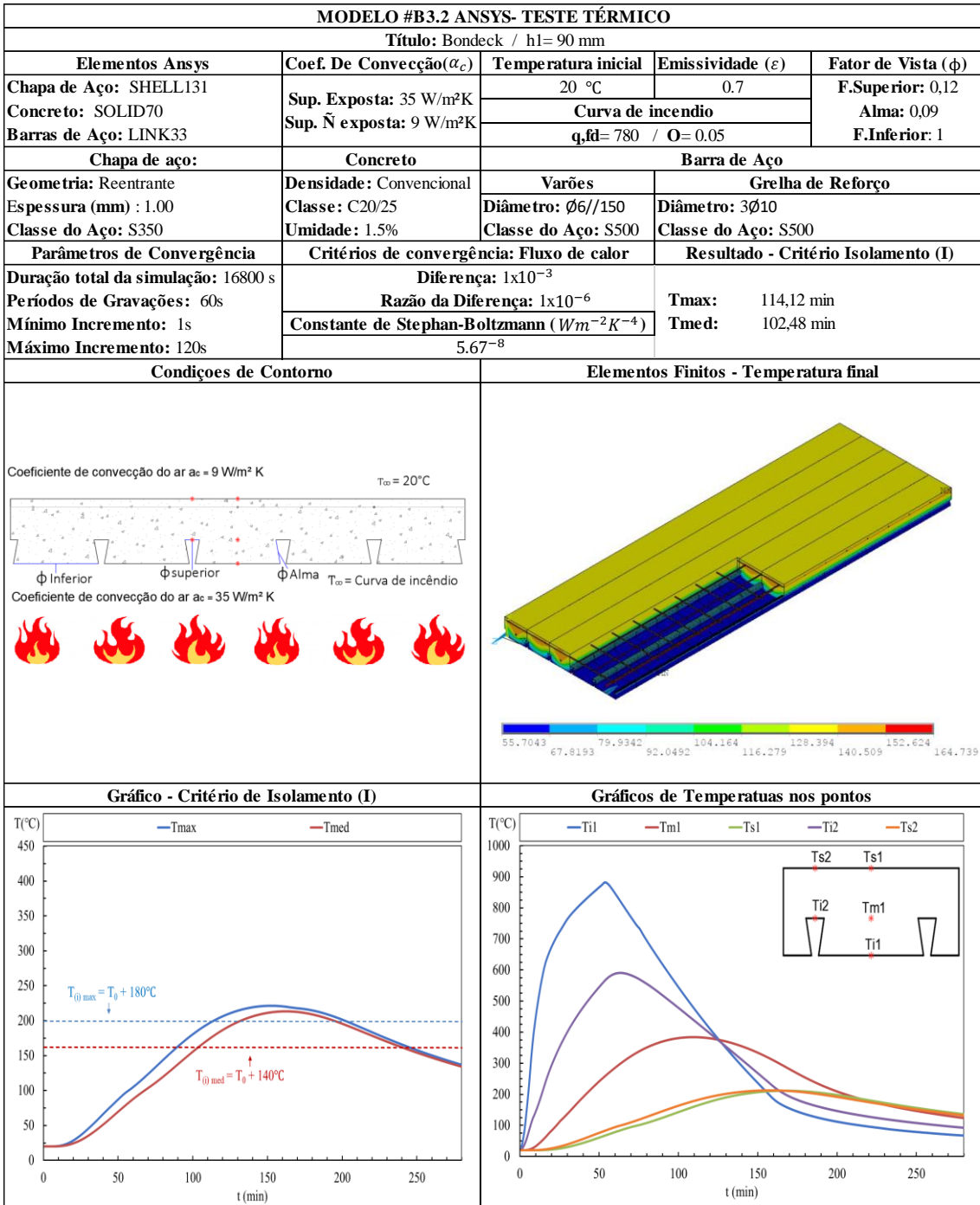


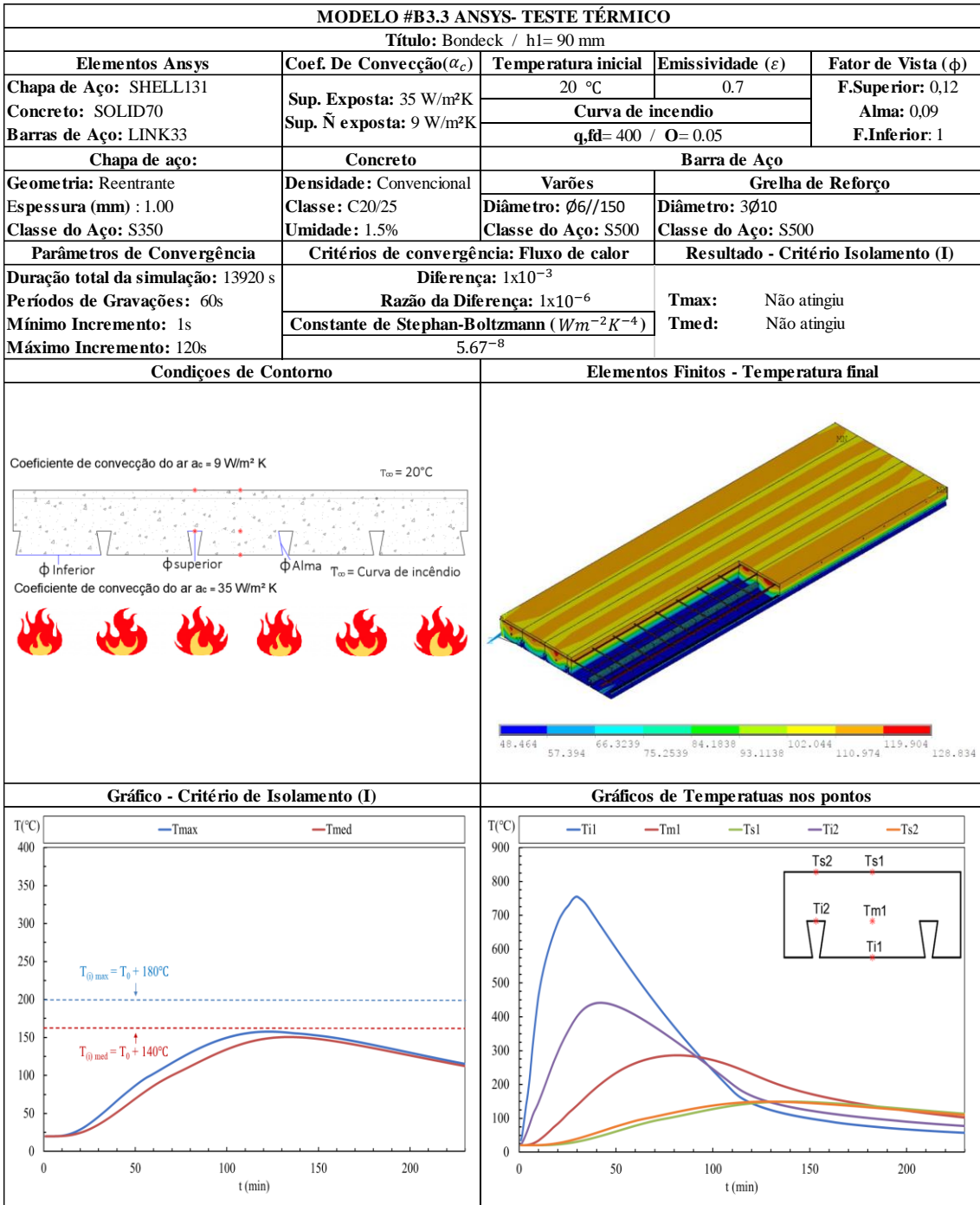


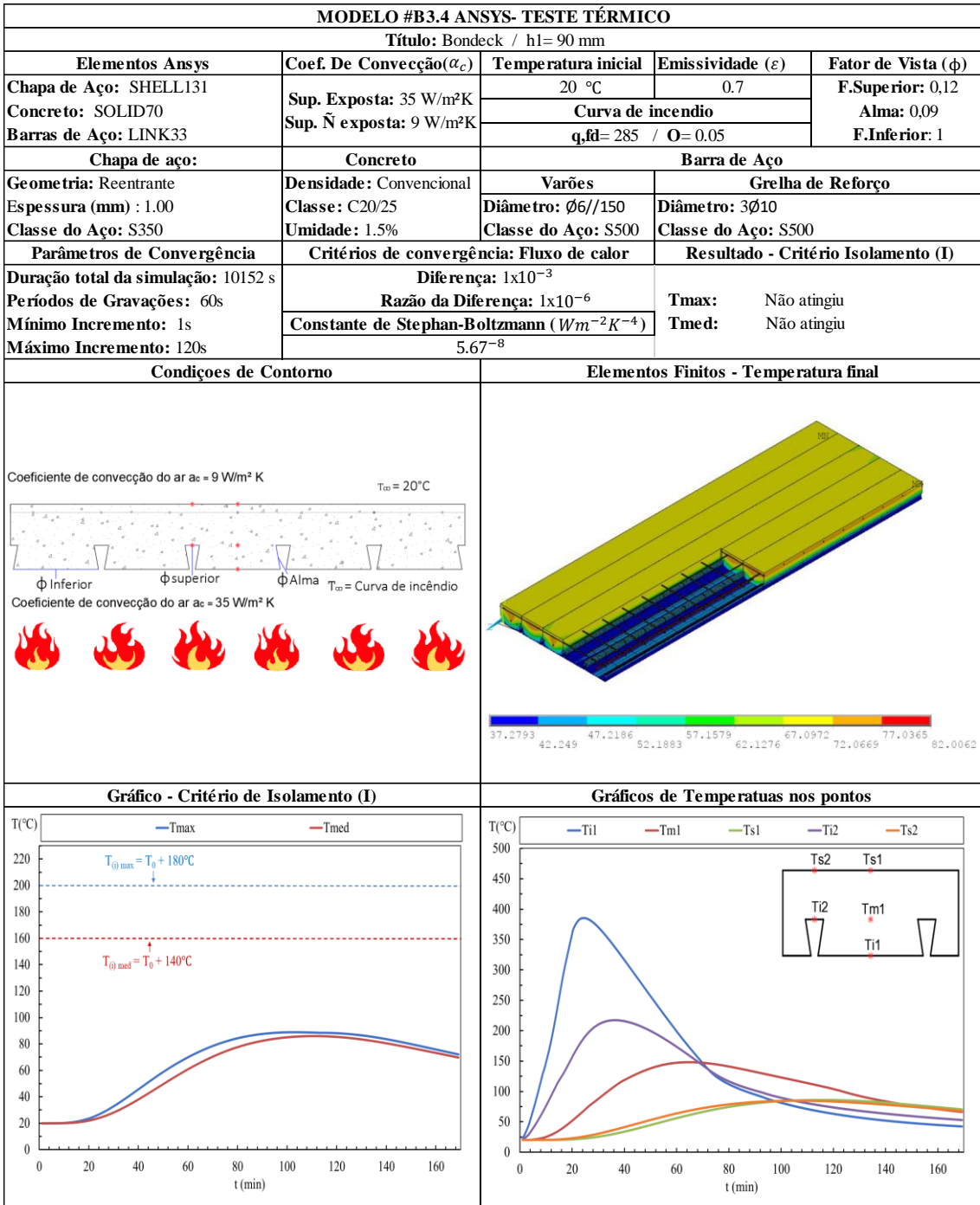


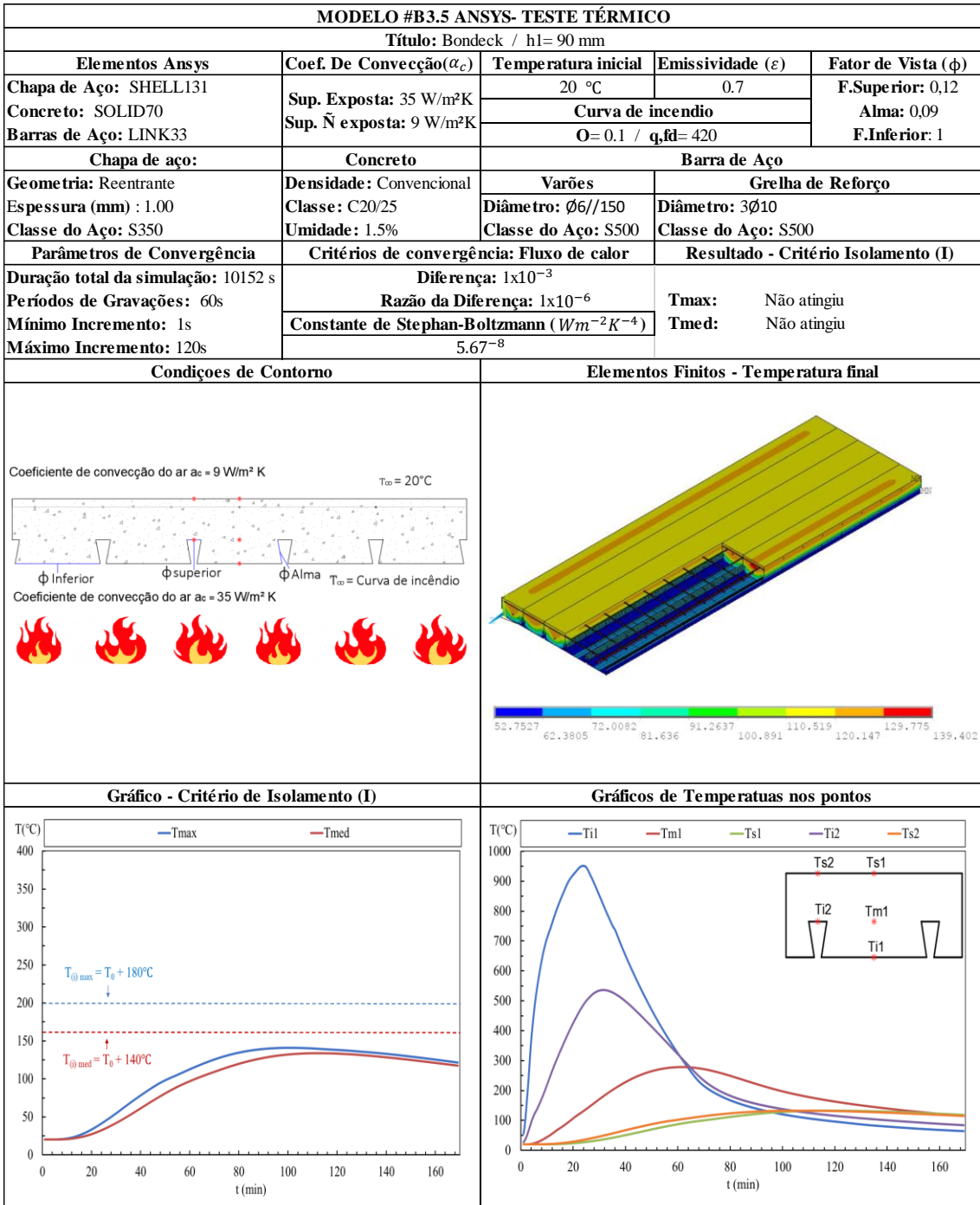


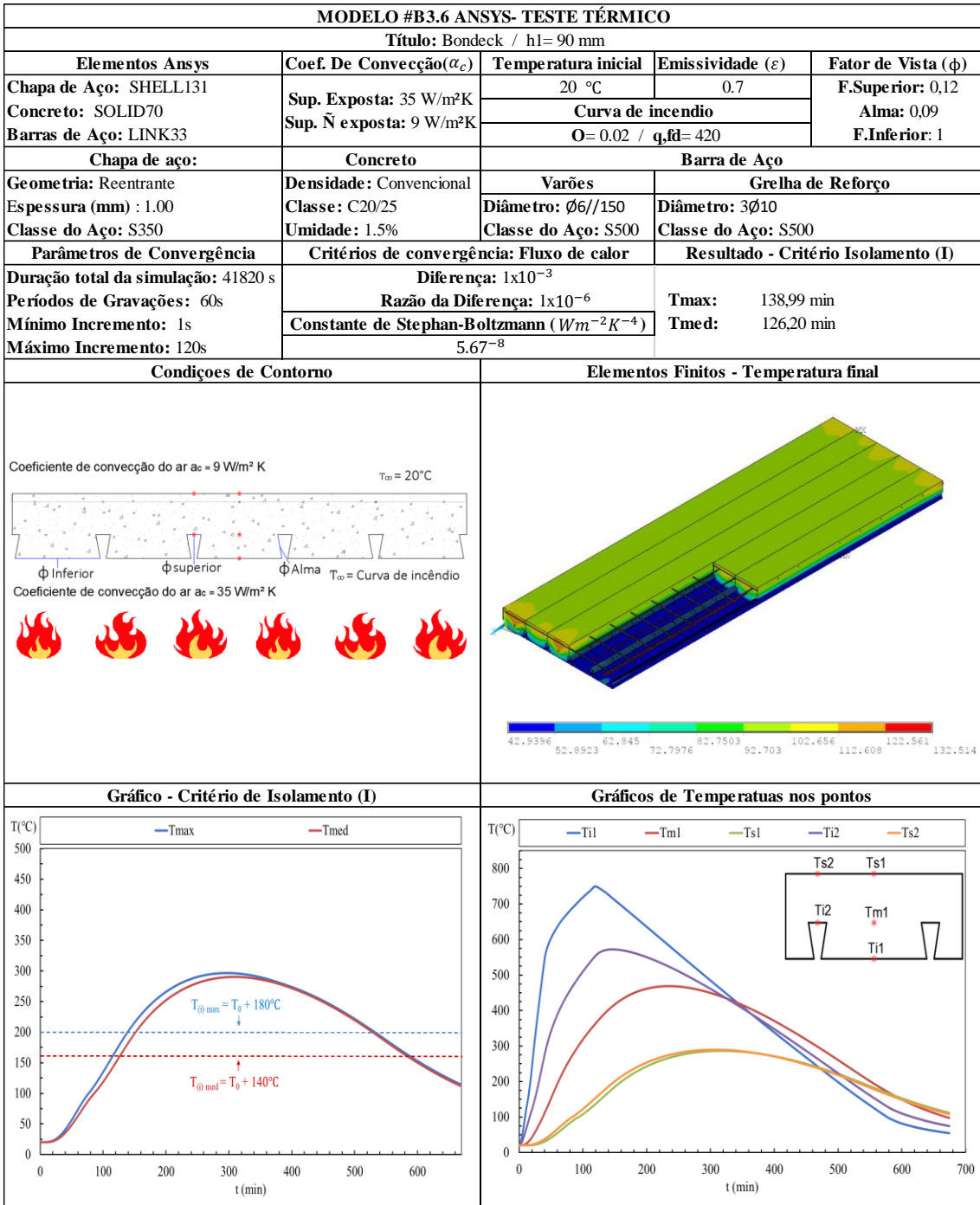


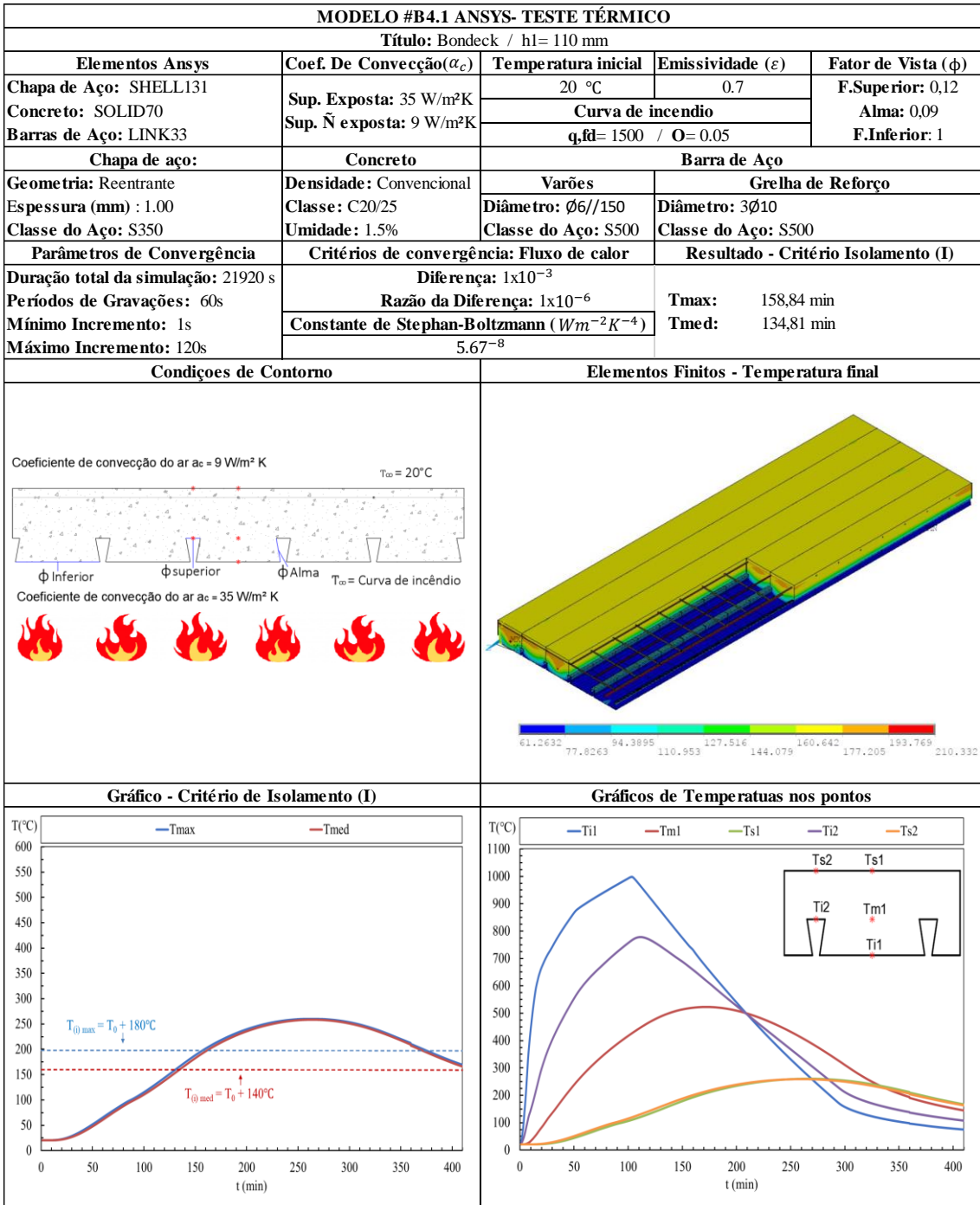


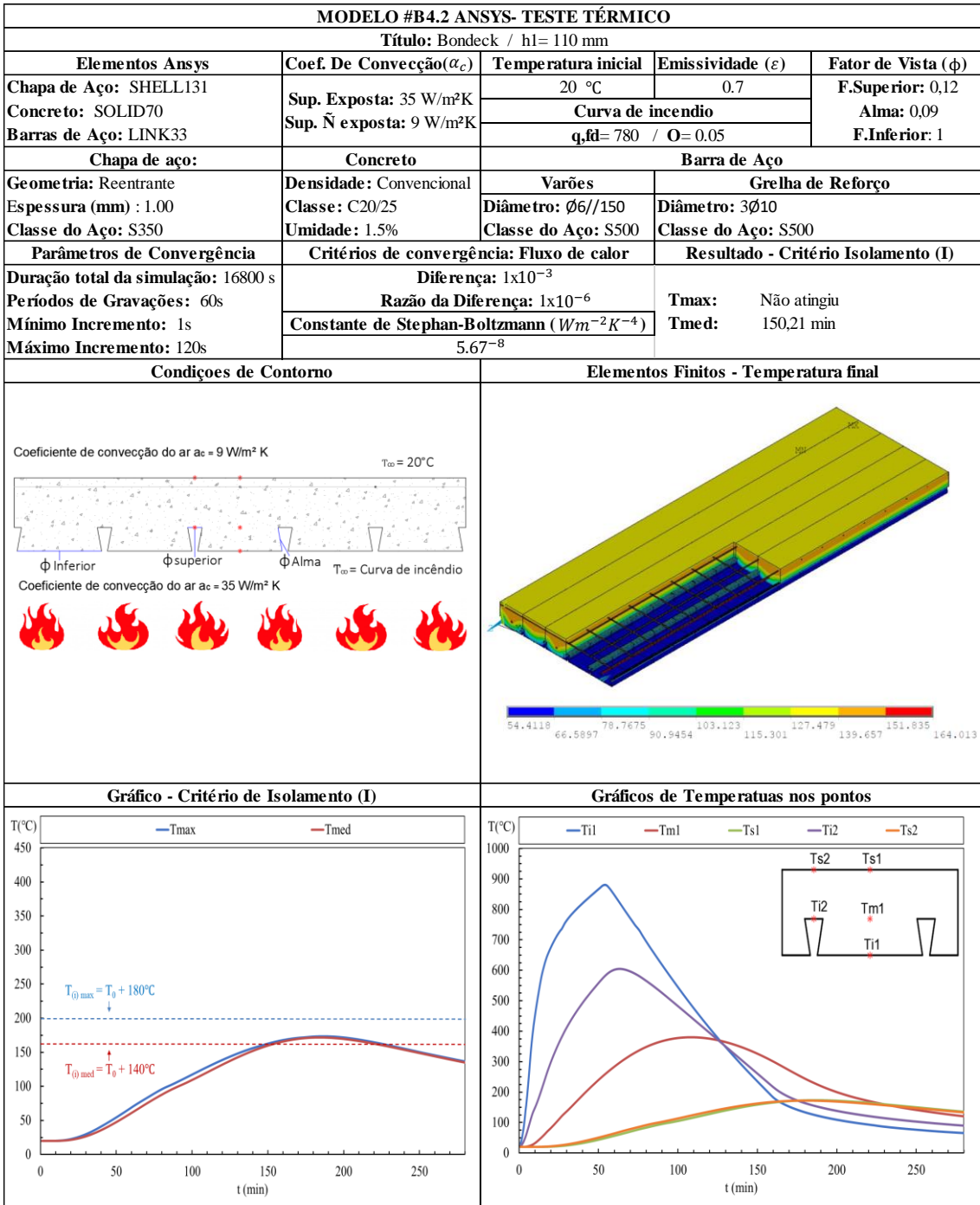


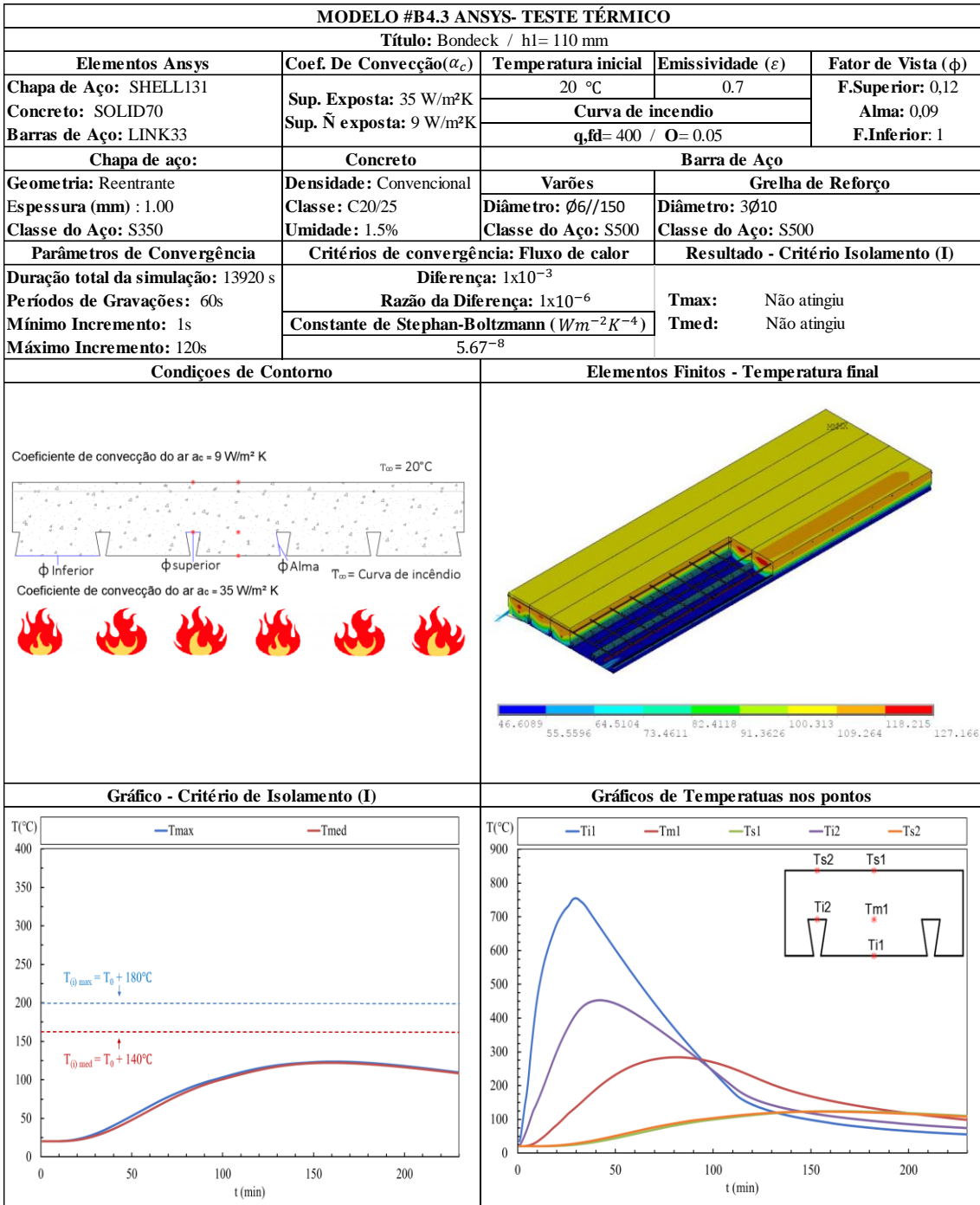


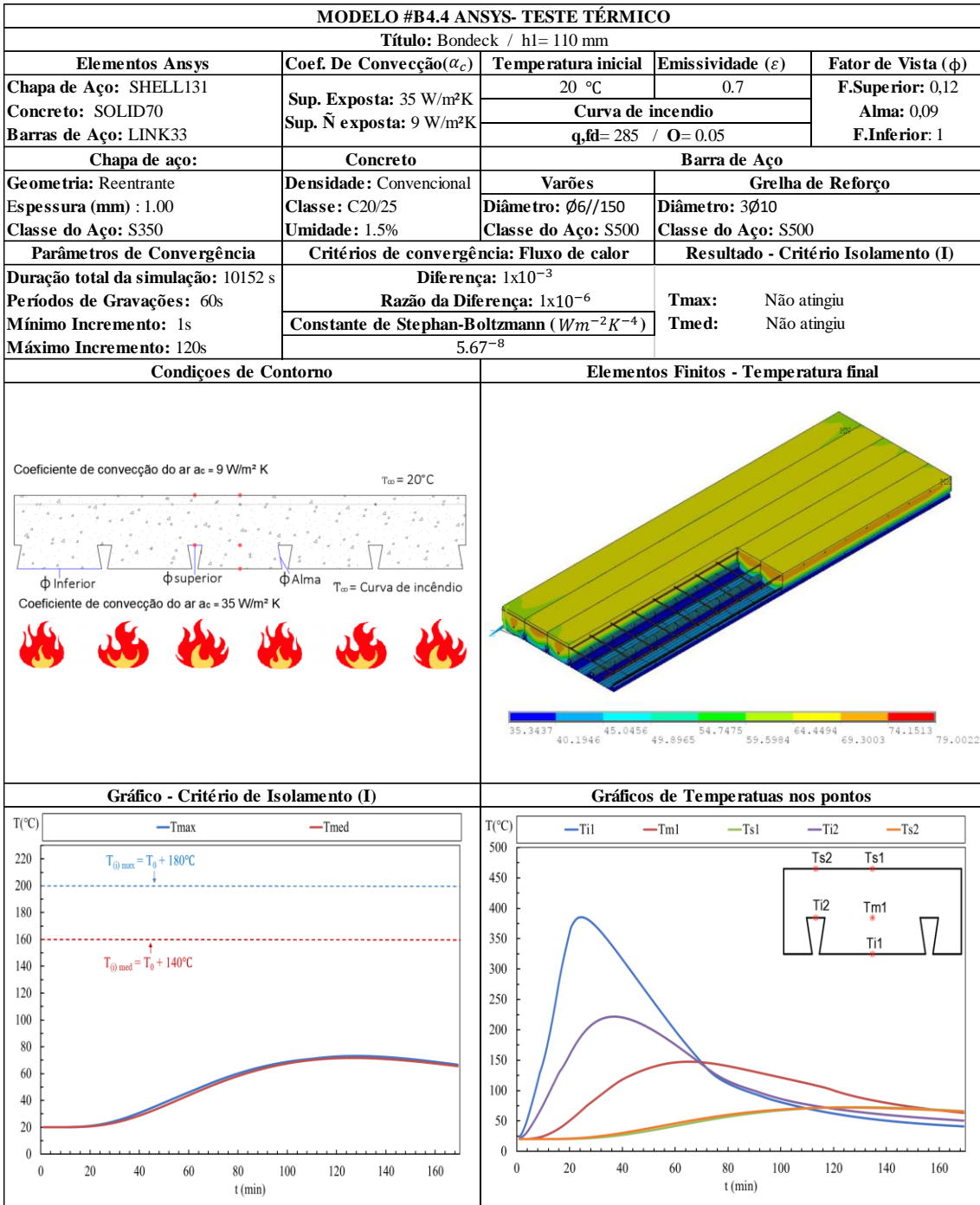


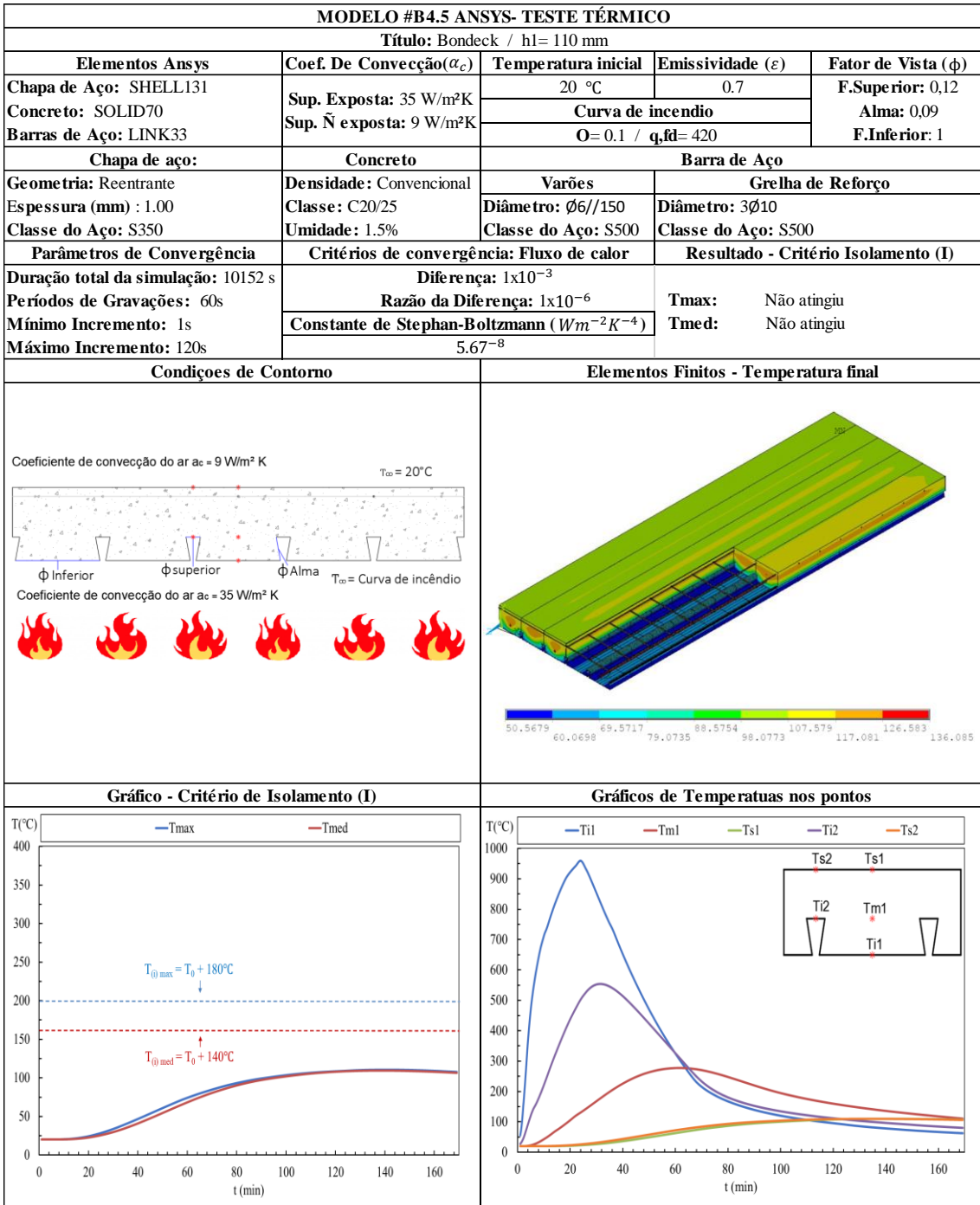


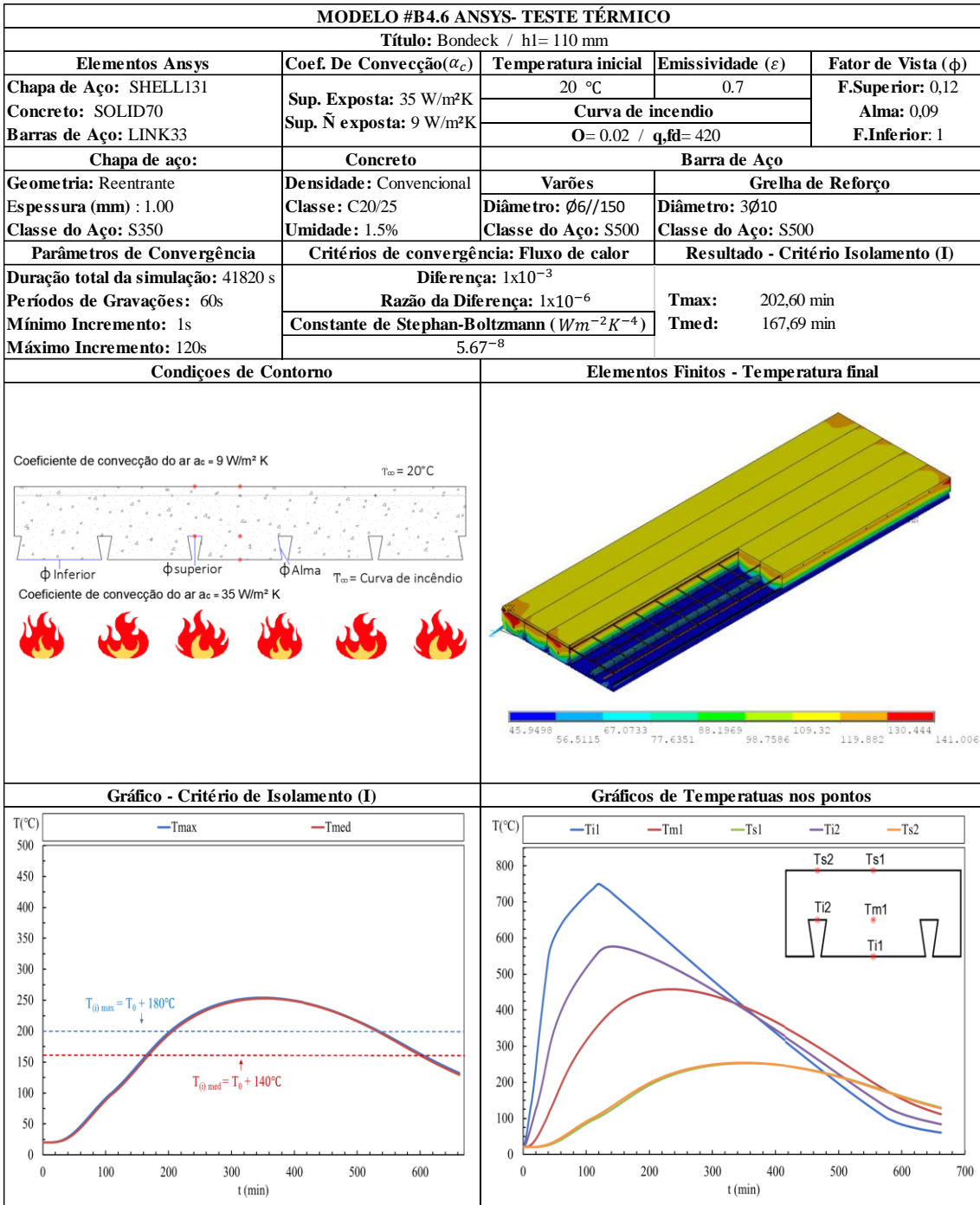


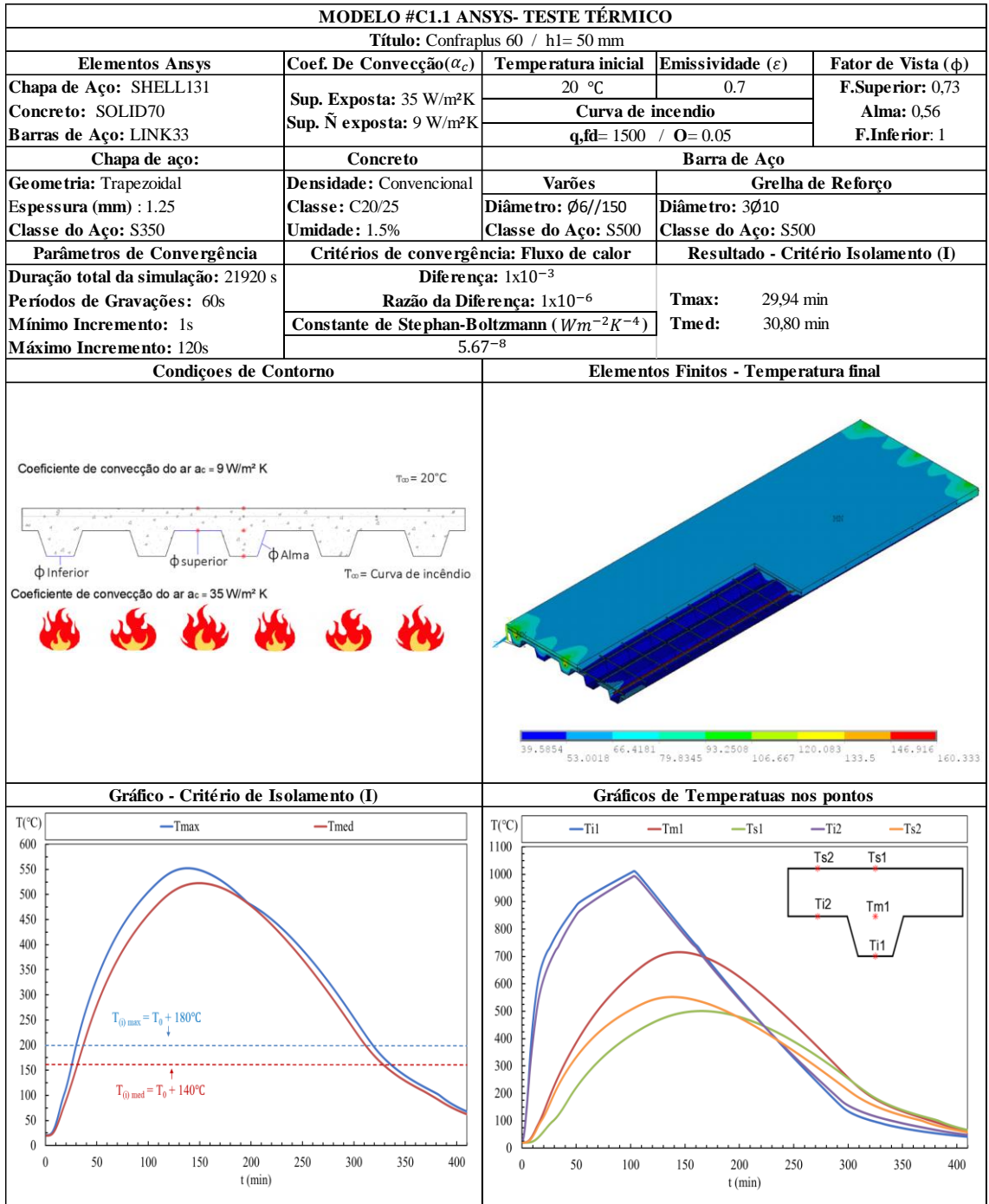


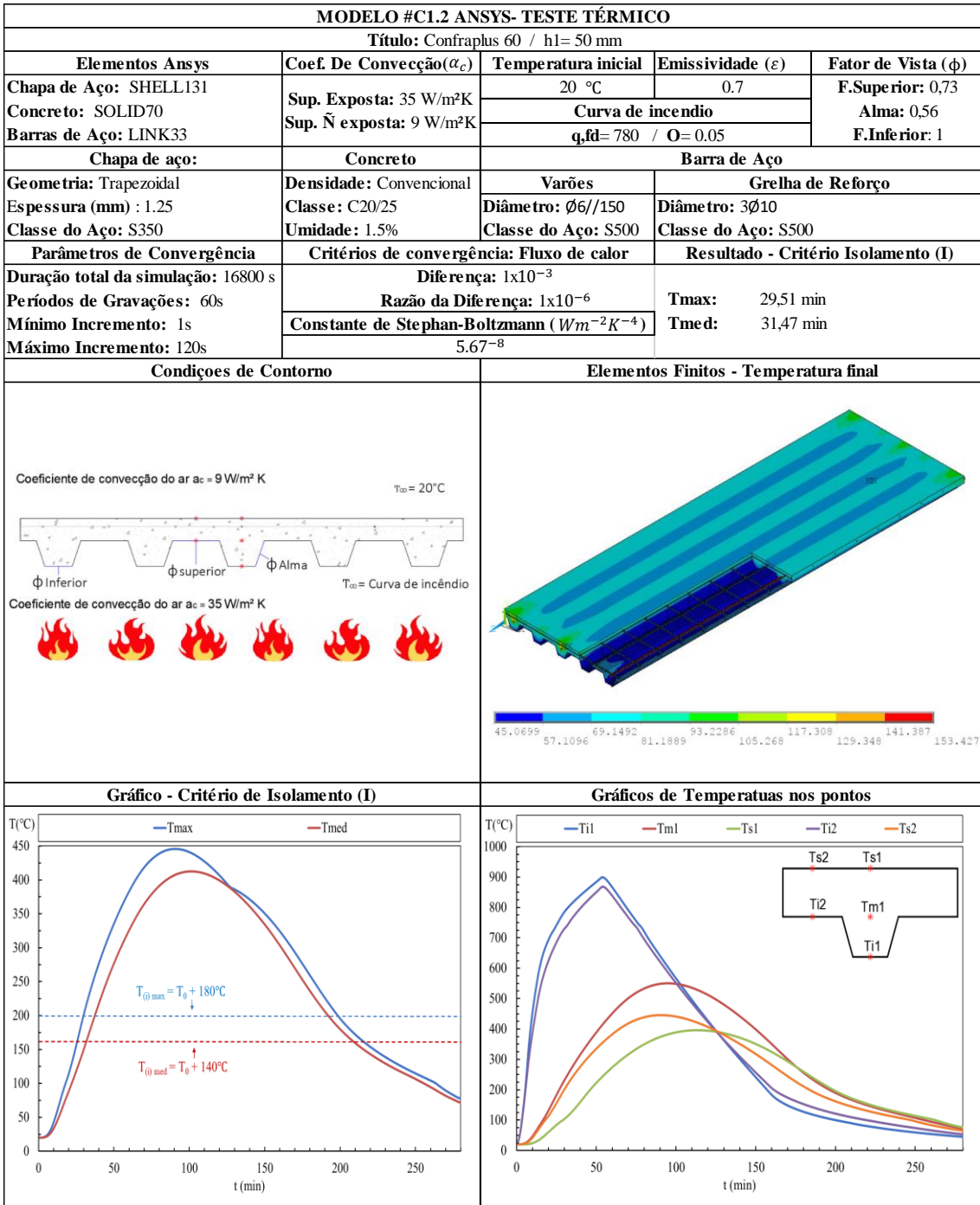


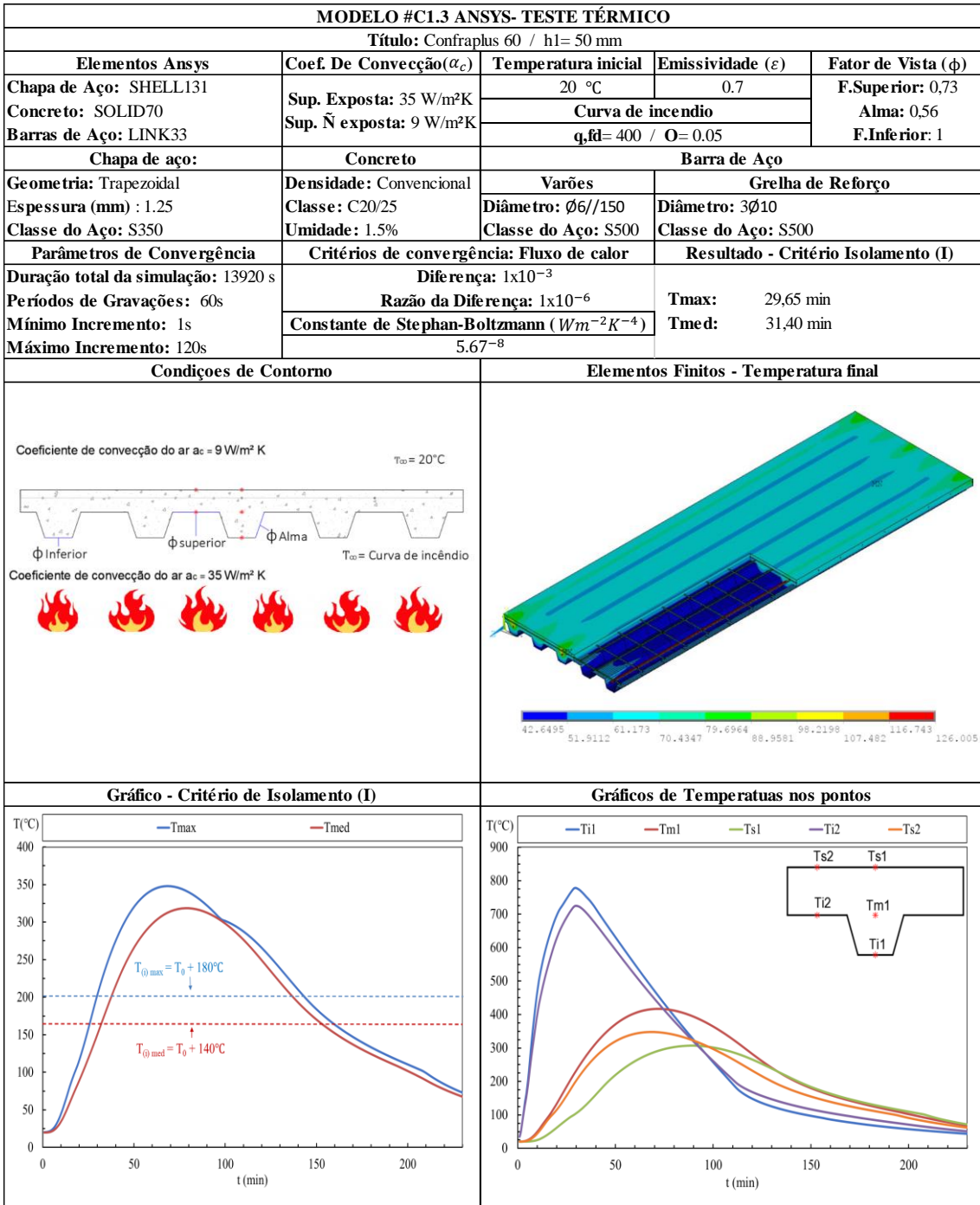


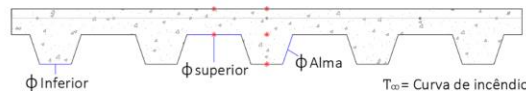

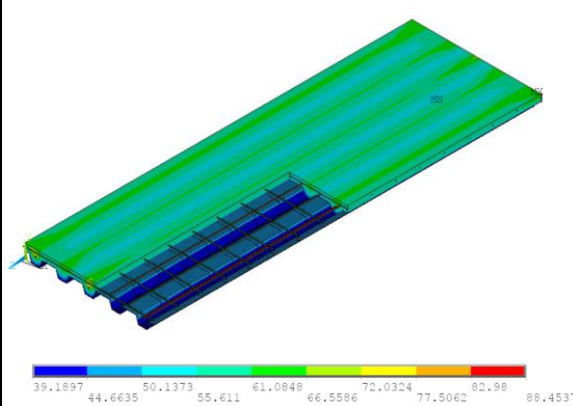
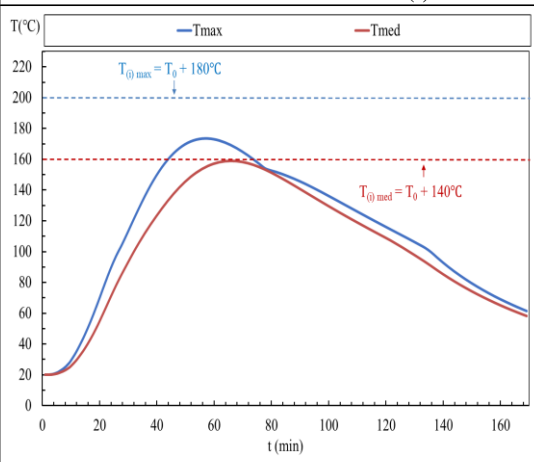










MODELO #C1.4 ANSYS- TESTE TÉRMICO				
Título: Confraplus 60 / h1= 50 mm				
Elementos Ansys	Coef. De Convecção (α_c)	Temperatura inicial	Emissividade (ϵ)	Fator de Vista (ϕ)
Chapa de Aço: SHELL131	Sup. Exposta: 35 W/m ² K Sup. Ñ exposta: 9 W/m ² K	20 °C	0.7	F.Superior: 0,73
Concreto: SOLID70		Curva de incendio		Alma: 0,56
Barras de Aço: LINK33		$q_{fd}= 285 / O= 0.05$		F.Inferior: 1
Chapa de aço:	Concreto	Barra de Aço		
Geometria: Trapezoidal	Densidade: Convencional	Varões	Grelha de Reforço	
Espessura (mm) : 1.25	Classe: C20/25	Diâmetro: $\phi 6//150$	Diâmetro: 3 $\phi 10$	
Classe do Aço: S350	Umidade: 1.5%	Classe do Aço: S500	Classe do Aço: S500	
Parâmetros de Convergência	Crîtérios de convergência: Fluxo de calor	Resultado - Crîtério Isolamento (I)		
Duração total da simulação: 10152 s	Diferença: 1×10^{-3}		Tmax:	Não atingiu
Períodos de Gravações: 60s	Razão da Diferença: 1×10^{-6}		Tmed:	Não atingiu
Mínimo Incremento: 1s	Constante de Stephan-Boltzmann ($Wm^{-2}K^{-4}$)			
Máximo Incremento: 120s	5,67 ⁻⁸			
Condições de Contorno		Elementos Finitos - Temperatura final		
<p>Coeficiente de convecção do ar $a_c = 9 W/m^2 K$ $T_{\infty} = 20^{\circ}C$</p>  <p>Coeficiente de convecção do ar $a_c = 35 W/m^2 K$</p> 				
Gráfico - Crîtério de Isolamento (I)		Gráficos de Temperatuas nos pontos		
 <p>$T_{(t) \max} = T_0 + 180^{\circ}C$</p> <p>$T_{(t) \text{med}} = T_0 + 140^{\circ}C$</p>		