



INSTITUTO POLITÉCNICO DE BRAGANÇA Escola Superior de Tecnologia e de Gestão

EFEITO DO NÍVEL DE CARGA NO COMPORTAMENTO AO FOGO DE LAJES MISTAS COM CHAPA DE AÇO COLABORANTE

Lucas Manoel Cunha dos Santos

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

Setembro - 2019

EFEITO DO NÍVEL DE CARGA NO COMPORTAMENTO AO FOGO DE LAJES MISTAS COM CHAPA DE AÇO COLABORANTE

Lucas Manoel Cunha dos Santos

Dissertação apresentada à
Escola Superior de Tecnologia e de Gestão
Instituto Politécnico de Bragança
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)

Coorientadora:

Prof. Dr^a Érica Fernanda Aiko Kimura (UTFPR-CT)

Setembro - 2019

*De todas as surpresas que esta jornada me proporcionou,
a maior delas foi Portugal*

AGRADECIMENTOS

Após esta curta jornada que foi o programa de dupla diplomação e mestrado em Portugal, resta apenas deixar neste espaço minha eterna gratidão às pessoas e instituições que tornaram este sonho, que era obter o grau de Mestre, uma realidade.

Irei iniciar pelas instituições, me referindo diretamente à Universidade Tecnológica Federal do Paraná e ao Instituto Politécnico de Bragança, as quais agradeço por representarem muito mais que locais de aprendizado, mas também locais de convivência, onde o pensamento crítico e profissional é formado não somente nas salas de aula mas também nos corredores, nas cantinas e durante as atividades extracurriculares, junto aos professores, colegas e demais funcionários da instituição.

Sou grato aos meus pais, Ivonete da Cunha Santos e Silvio Cezar dos Santos, por todo o aprendizado e educação que me foram fornecidos desde a infância, e que possibilitaram que minha curiosidade, criatividade e pensamento crítico pudessem ser desenvolvidos sem medo. Agradeço ao meu irmão, Gustavo Henrique Cunha dos Santos, por fazer parte da minha infância e por ter grande influência no meu amadurecimento.

Agradeço também à toda a minha família, que sempre apostou em mim, independentemente da situação na qual se encontrassem, sendo assim o fomento da minha autoestima, nas palavras gentis, quando aplicáveis, e rígidas, quando necessárias, advindas dos meus tios, tias, avôs, avós, primos e primas. Dedico também um agradecimento caloroso para toda a família Kociolek e Novacki, que durante toda esta jornada me acolheu como parte de si, e nos momentos mais difíceis tornou possível superar situações complicadas. Serei eternamente grato por tudo o que fizeram por mim.

A todos os colegas, professores e funcionários da UTFPR e do IPB, eu serei eternamente grato por cada palavra de motivação e conhecimento compartilhado.

Por último mas não menos importante, dedico esta dissertação aos meus orientadores. Ao professor Carlos Jorge da Rocha Balsa, que com sua maestria no Matlab tornou este trabalho singular. Ao professor Paulo Alexandre Gonçalves Piloto, que com sua constante presença e cobrança, além do pleno domínio do software ANSYS, possibilitou que eu buscasse constantemente aprimorar meus conhecimentos e meu trabalho. E à professora Érica Fernanda Aiko Kimura, que demonstrou estar sempre disposta a dar o melhor de si para me ajudar e me orientar com sucesso.

RESUMO

Lajes mistas de concreto com chapas de aço colaborantes consistem em estruturas de concreto moldadas em fôrmas de aço que devem permanecer unidas à estrutura, agindo de forma permanente como parte da armadura para as lajes. Esta tecnologia construtiva está presente na construção civil desde os anos 80, sendo utilizada principalmente em grandes edifícios por ser uma alternativa altamente econômica quando aplicada em larga escala.

As chapas de aço desempenham um importante papel na resistência mecânica destas estruturas e quando submetidas a situações de incêndio acabam por exigir uma maior atenção pois a alta sensibilidade das propriedades térmicas e mecânicas do aço quando exposto a altas temperaturas coloca em risco estas estruturas.

A norma europeia EN 1994-1-2 é responsável por padronizar os métodos de projeto e de cálculo para verificação da segurança destas estruturas quando submetidas a situações de incêndio, e dela provém métodos simplificados de cálculo para projetistas. Entretanto, estes métodos simplificados não são submetidos a revisão à mais de uma década.

Este trabalho apresenta o estudo do efeito do nível de carregamento sobre a resistência ao fogo das lajes mistas de concreto com chapa de aço colaborante a partir de modelos numéricos elaborados com o software ANSYS Mechanical APDL e validados com base em trabalhos experimentais já realizados por outros autores.

Ao todo, 158 simulações foram realizadas e os resultados indicam correlações da resistência ao fogo destas estruturas com base no nível de carregamento e na espessura efetiva das lajes. Junto a isso, é proposto um novo modelo de cálculo para a resistência ao fogo, de lajes mistas com chapa de aço colaborante, segundo o critério de capacidade de carga (R), tendo como variáveis o nível de carregamento e a espessura efetiva das lajes.

Palavras-Chave: Lajes mistas; Nível de carregamento; Resistência ao fogo; Modelos numéricos.

ABSTRACT

Composite slabs with steel decking consist of concrete structures, slabs to be more specific, using its formwork as permanent, turning it part of the structure reinforcement. This technology has been widely used since 1980, and mainly applied on buildings because of its competitive prices and fast application on large scale constructions.

The steel frames have an important acting on the mechanical resistance of these structures and when exposed to fire situations it turns into an important component that has to be analysed with more attention thus to its thermal and mechanical properties sensibility on temperature increasing.

The European standard EN 1994-1-2 is responsible by the normalization of design and calculation of this kind of structure under fire situations and provide simplified and advanced calculation methods to guarantee the safety of these structures. However, it has not being reviewed for more than one decade.

This thesis provide data concerning the effect of the load level on composite slabs with steel decking under fire conditions using numerical models elaborated on software ANSYS Mechanical APDL. The techniques used on modelling are submitted to validation using experimental data obtained on bibliography.

The total number of 158 simulations were developed and the results show correlations between the fire resistance of composite slabs and the variables: load level and effective thickness. Yet, a new calculation model is proposed to the fire resistance of composite slabs with steel decking, analysed with the load-bearing criteria (R), taking as variables the load-level and the effective thickness of the slab.

Keywords: Composite slabs; Load level; Fire resistance; Numerical models.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 - Fatores de vista.....	14
Figura 2 - Fatores geométricos de lajes mistas com chapas de aço de perfil trapezoidal e reentrante	14
Figura 3 - Massa volúmica do aço	16
Figura 4 - Elongação térmica do aço.....	17
Figura 5 - Calor específico do aço	18
Figura 6 - Condutividade do aço	19
Figura 7 - Elongação térmica do concreto	20
Figura 8 - Calor específico do concreto convencional a diversos teores de umidade.....	21
Figura 9 - Massa volúmica do concreto convencional	23
Figura 10 - Condutividade do concreto.....	24
Figura 11 – Calor específico do ar	25
Figura 12 - Condutividade do ar	26
Figura 13 - Massa volúmica do ar.....	26
Figura 14 - Gráfico tensão x deformação do dos elementos de aço.....	27
Figura 15 – Curvas tensão x deformação das barras de aço S500 com relação a temperatura	29
Figura 16 - Curva tensão x deformação para o concreto convencional	30
Figura 17 - Curvas tensão x deformação do concreto convencional C20/25 com relação a temperatura.....	31
Figura 18 - Distribuição de tensões na secção da laje para situação de ELU para instante t_0	34
Figura 19 - Distribuição de tensões na secção da laje para situação de ELU para instante $t_1 > t_0$...	34
Figura 20 - Distâncias u_i para o cálculo da temperatura das barras de reforço.....	37
Figura 21 - Curva de incêndio padrão ISO 834	39
Figura 22 - Coeficientes de convecção para curvas de incêndio padrão ISO 834	40
Figura 23 - Gráfico para valores de Emissividade da chapa de aço galvanizado	41
Figura 24 - Condições de apoio dos modelos numéricos de lajes mistas	42
Figura 25 - Disposição de nós e camadas do elemento SHELL131	45
Figura 26 – Modelo de chapa metálica composta por elementos SHELL131	46
Figura 27 - Geometria referencial do plano para SHELL131	47
Figura 28 - Geometria referencial da espessura para SHELL131	47

Figura 29 – Disposição de nós do elemento SOLID70.....	48
Figura 30 – Modelo de concreto utilizando elementos SOLID70	48
Figura 31 - Disposição de nós para o elemento LINK33.....	48
Figura 32 - Elementos finitos LINK33	49
Figura 33 - Configuração de nós do elemento SHELL181	50
Figura 34 - Elementos finitos SHELL181.....	50
Figura 35 - Configuração de nós do elemento SOLID185.....	50
Figura 36 - Elementos finitos SOLID185	50
Figura 37 - Configuração de nós do elemento LINK180.....	51
Figura 38 - Elementos finitos LINK180	51
Figura 39 - Disposição de cargas no teste mecânico de Hamerlinck, 1991	52
Figura 40 - Secção transversal da laje Hamerlinck, 1991 - Experimental	53
Figura 41 - Secção longitudinal da laje Hamerlinck, 1991 - Experimental	54
Figura 42 - Condições de fronteira do modelo térmico Hamerlinck, 1991.....	55
Figura 43 – Modelo térmico de elementos finitos Hamerlinck, 1991.....	56
Figura 44 – Comparação entre modelo com e sem camada de ar Hamerlinck, 1991	57
Figura 45 - Sistema de apoios do modelo numérico Hamerlinck, 1991	57
Figura 46 - Modelo mecânico de elementos finitos Hamerlinck, 1991	59
Figura 47 - Temperaturas na secção do Modelo #1-A.....	60
Figura 48 - Temperaturas da secção do Modelo #2-A	61
Figura 49 - Temperaturas na secção do Modelo #2-B	61
Figura 50 - Critério de isolamento (I) para o Modelo #1-A.....	63
Figura 51 - Critério de isolamento (I) para o Modelo #2-A.....	64
Figura 52 - Critério de isolamento (I) para o Modelo #2-B.....	64
Figura 53 - Gráfico de deslocamentos do Modelo #1-A.....	66
Figura 54 - Gráfico de deslocamentos do modelo #2-A	67
Figura 55 - Gráfico de deslocamentos do modelo #2-B.....	68
Figura 56 - Esquema de posicionamento das armaduras para o estudo paramétrico	69
Figura 57 - Dimensões Polideck 59S	70
Figura 58 - Dimensões Confraplus 60.....	70
Figura 59 - Dimensões Multideck 50.....	71

Figura 60 - Dimensões Bondeck	71
Figura 61 - Diagrama de modelos térmicos elaborados	72
Figura 62 - Diagrama de modelos mecânicos elaborados	74
Figura 63 - Perfil de temperaturas em lajes mistas	76
Figura 64 - Curvas de resistência ao fogo segundo o critério I em razão da altura efetiva h_{ef} para laje trapezoidal Polideck 59S	77
Figura 65 - Curvas de resistência ao fogo segundo o critério I em razão da altura efetiva h_{ef} para laje trapezoidal Confraplus 60.....	78
Figura 66 - Curvas de resistência ao fogo segundo o critério I em razão da altura efetiva h_{ef} para laje reentrante Multideck 50.....	79
Figura 67 - Curvas de resistência ao fogo segundo o critério I em razão da altura efetiva h_{ef} para laje reentrante Bondeck.....	80
Figura 68 - Resistência ao fogo (t_{Rd}) de lajes trapezoidais Polideck 59S em função do nível de carga (η)	83
Figura 69 - Resistência ao fogo (t_{Rd}) de lajes trapezoidais Confraplus 60 em função do nível de carga (η)	84
Figura 70 - Resistência ao fogo (t_{Rd}) de lajes reentrantes Multideck 50 em função do nível de carga (η)	85
Figura 71 - Resistência ao fogo (t_{Rd}) de lajes reentrantes Bondeck em função do nível de carga (η)	86
Figura 72 - Curvas de capacidade de carga das lajes com geometria trapezoidal Polideck 59S ...	87
Figura 73 - Curvas de capacidade de carga das lajes com geometria trapezoidal Confraplus 60..	88
Figura 74 - Posição da linha neutra para as lajes trapezoidais T1 e T2 ao longo da exposição ao incêndio padrão ISO 834.....	89
Figura 75 - Taxa de deslocamento da linha neutra para as lajes trapezoidais T1 e T2 ao longo da exposição ao incêndio padrão ISO 834.....	89
Figura 76 - Curvas de capacidade de carga das lajes com geometria reentrante Multideck 50.....	90
Figura 77 - Curvas de capacidade de carga das lajes com geometria reentrante Bondeck	91
Figura 78 - Posição da linha neutra para as lajes reentrantes R1 e R2 ao longo da exposição ao incêndio padrão ISO 834.....	91

Figura 79 - Taxa de deslocamento da linha neutra para as lajes reentrantes R1 e R2 ao longo da exposição ao incêndio padrão ISO 834	92
Figura 80 - Superfície de aproximação para a resistência ao fogo (t_{Rd}) das lajes trapezoidais Polideck 59S.....	93
Figura 81 - Superfície de aproximação para a resistência ao fogo (t_{Rd}) das lajes trapezoidais Confraplus 60	94
Figura 82 - Superfície de aproximação para a resistência ao fogo (t_{Rd}) das lajes reentrantes Multideck 50	95
Figura 83 - Superfície de aproximação para a resistência ao fogo (t_{Rd}) das lajes reentrantes Bondeck	96

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Relação entre teor de umidade e máximo calor específico do concreto	22
Tabela 2 – Resultados obtidos por Çengel para as propriedades térmicas do ar	25
Tabela 3 - Equações dos limites de deformação para o aço	28
Tabela 4 - Fatores de redução para a resistência do aço	29
Tabela 5 - Equações dos limites de deformações do concreto	30
Tabela 6 - Fatores de redução para a resistência do concreto	31
Tabela 7 - Coeficientes a_i para determinação da resistência ao fogo segundo o critério de isolamento (I).....	33
Tabela 8 - Coeficientes parciais para determinação das temperaturas das chapas de aço	36
Tabela 9 - Fatores c_i para cálculo da temperatura em barras de reforço	37
Tabela 10 - Fatores de vista Hamerlinck, 1991	55
Tabela 11 – Resumo de resultados das simulações térmicas Hamerlinck, 1991	65
Tabela 12 – Resumo de resultados das simulações mecânicas Hamerlinck, 1991	68
Tabela 13 - Fatores de vista Polideck 59S	70
Tabela 14 - Fatores de vista Confraplus 60.....	70
Tabela 15 - Fatores de vista Multideck 50	71
Tabela 16 - Fatores de vista Bondeck	72

LISTA DE SÍMBOLOS

LETRAS LATINAS

A – Área [m^2]

T – Temperatura [$^{\circ}C$ ou $^{\circ}K$]

\dot{h}_{cd} – Fluxo de calor por condução [W/m^2]

$\dot{h}_{net,c}$ – Fluxo de calor por convecção [W/m^2]

$\dot{h}_{net,r}$ – Fluxo de calor por radiação [W/m^2]

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 barras de reforço

$k_{c,\theta}$ – Coeficiente de redução da resistência mecânica do concreto

A/L_r – Fator geométrico das lajes mistas [m²/m]

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 – Massa volúmica do aço [kg/m³]

ρ_c – Massa volúmica do concreto [kg/m³]

ρ_{ar} – Massa volúmica do ar [kg/m³]

θ_a – Temperatura do aço [°C]

θ_c – Temperatura do concreto [°C]

$\varepsilon_{p,\theta}$ – Limite de elasticidade do aço

$\varepsilon_{y,\theta}$ – Limite de plasticidade do aço

$\varepsilon_{c1,\theta}$ – Limite de deformação do concreto

η – Nível de carregamento [%]

ÍNDICE

1. INTRODUÇÃO	1
1.1. ESTADO DA ARTE	2
1.2. ORGANIZAÇÃO DA DISSERTAÇÃO.....	9
2. TRANSFERÊNCIA DE CALOR	11
2.1. CONDUÇÃO.....	11
2.2. CONVECÇÃO.....	12
2.3. RADIAÇÃO	12
3. PROPRIEDADES DOS MATERIAIS SEGUNDO O EUROCÓDIGO.....	15
3.1. PROPRIEDADES TÉRMICAS.....	16
3.1.1. AÇO.....	16
3.1.2. CONCRETO.....	19
3.1.3. AR.....	24
3.2. PROPRIEDADES MECÂNICAS	26
3.2.1. AÇO.....	27
3.2.2. CONCRETO.....	29
4. MÉTODOS SIMPLIFICADOS DE CÁLCULO	32
4.1. NORMA EUROPÉIA.....	32
4.1.1. ISOLAMENTO TÉRMICO (I).....	32
4.1.2. CAPACIDADE DE CARGA (R)	33
5. MÉTODOS AVANÇADOS DE CÁLCULO	38
5.1. CONDIÇÕES DE FRONTEIRA.....	38
5.2. PROGRAMA DE ELEMENTOS FINITOS	42
5.2.1. PARÂMETROS DE SIMULAÇÃO.....	43
5.2.2. ELEMENTOS FINITOS.....	43

5.2.2.1.	SHELL131	44
5.2.2.2.	SOLID70.....	47
5.2.2.3.	LINK33	48
5.2.2.4.	SHELL181	49
5.2.2.5.	SOLID185.....	50
5.2.2.6.	LINK180.....	51
6.	MODELOS DE VALIDAÇÃO	51
6.1.	HAMERLINCK, 1991 (PRINS PSV73)	52
6.1.1.	CONFIGURAÇÃO DO EXPERIMENTO	52
6.1.2.	MODELO NUMÉRICO	54
6.1.2.1.	MODELO TÉRMICO	54
6.1.2.2.	MODELO MECÂNICO	57
6.1.3.	RESULTADOS.....	59
6.1.3.1.	SIMULAÇÃO TÉRMICA.....	59
6.1.3.2.	SIMULAÇÃO MECÂNICA	65
7.	ESTUDO PARAMÉTRICO	68
7.1.	MODELOS NUMÉRICOS.....	69
7.2.	RESULTADOS.....	74
7.2.1.	ALTURA EFETIVA (h_{eff}).....	75
7.2.2.	NÍVEL DE CARGA (η).....	81
7.3.	NOVA PROPOSTA DE CÁLCULO PARA A RESISTÊNCIA AO FOGO (t_{Rd}).....	92
8.	CONCLUSÕES.....	97
8.1.	RECOMENDAÇÕES PARA TRABALHOS FUTUROS	98
9.	BIBLIOGRAFIA.....	99
	ANEXO A: FICHAS TÉCNICAS	105

1. INTRODUÇÃO

A busca por alternativas seguras e econômicas de construção é, se não o principal, um dos objetivos primários da Engenharia Civil. Como solução para a construção de lajes, desde a década de 1980 utilizam-se combinações estruturais com o concreto e chapas de aço, tradicionalmente conhecidas como lajes mistas. Esta alternativa possibilita a implementação de dois dos principais fatores que definem uma boa logística da construção: o fator temporal e o econômico.

Segundo Cooke et al [1] esta técnica desenvolveu-se inicialmente na América do Norte e somente nos anos de 1970 teve sua utilização em larga escala iniciada no Reino Unido e em toda a Europa.

O primeiro registro de utilização de lajes mistas desse tipo na Europa é a construção da torre do National Westminster Bank, concluída em 1978, que contava com 150.000,00 m² de laje, tomando por base esta solução [1].

Trata-se de uma estrutura, a princípio, típica onde as chapas de aço, compreendidas em diversas geometrias, são utilizadas como fôrma para a modelagem do concreto, porém após a cura, esta não é retirada e sua permanência possibilita que realize a função regularmente atribuída às armaduras de momento positivo do concreto armado tradicional [2].

Segundo o *National Institute of Standards and Technology* (NIST) [3], as chapas de aço utilizadas são tradicionalmente providas de reentrâncias localizadas na lâmina de aço para que possa haver maior aderência entre o concreto e o perfil metálico, evitando a ocorrência de descolamento entre as faces dos mesmos. Além disso, é usual a complementação da estrutura com a instalação de grelhas de aço na região superior da secção transversal, tornando esta estrutura capaz de resistir a tensões responsáveis por fissurar a superfície.

Apesar de funcional, esta solução traz algumas problemáticas consigo ao deslocar a área de aço que antes se encontrava coberto pelo concreto para a exposição completa na face inferior da laje.

O primeiro problema se trata da capacidade deste aço de resistir ao intemperismo e à corrosão ao estar totalmente exposto, visto que em modelos tradicionais de concreto armado o cobrimento de concreto funciona como uma barreira à exposição da armadura e troca de gases com a atmosfera. Isto é resolvido com a adição de uma fina camada de Zinco à face que se destina a exposição, como explica S. Guo [4]. O Zinco age como cátodo na reação de corrosão do metal, preservando a estrutura responsável pela ação resistiva à tração.

O segundo ponto que requer a atenção dos projetistas e que engloba o foco deste trabalho é a resistência ao fogo destas estruturas. Já que uma maior exposição dos materiais que agem como armadura permanente coloca em risco toda a estrutura, visto que o aço é um material extremamente afetado pelo aumento de temperatura, ocasionando não somente o aumento de seu volume mas também a redução de sua capacidade resistente a cargas mecânicas a níveis muitas vezes críticos, que podem tornar-se a causa de um colapso da estrutura [5].

Portanto, compreender o comportamento de lajes compostas de concreto com chapa de aço colaborante que se encontram em situação de incêndio é de extrema importância, já que se trata de uma estrutura que, apesar de econômica e capaz de facilitar a logística do processo construtivo, possui controvérsias para a segurança do usuário.

Este trabalho irá abordar dois dos principais parâmetros que mais apresentam variações no processo construtivo e de utilização, que é a espessura efetiva (h_{ef}) e o nível de carregamento das lajes (η). Cada um apresenta um modo particular de afetar a resistência ao fogo das lajes mistas com chapa de aço colaborante e a caracterização destes modos de influência será objeto de estudo.

1.1. ESTADO DA ARTE

A partir da publicação de Fourier, 1822, transcrito para o inglês somente em 1857 pela universidade de Cambridge [6], da Inglaterra, a ciência que estuda o comportamento mecânico dos materiais pôde passar a observar e estudar problemas cotidianos com uma nova dimensão e perspectiva. Tendo consciência de parâmetros que antes eram subestimados, desenvolvendo assim o ramo da termodinâmica, com base em suas três leis fundamentais. Desde então, a aplicação e evolução dos conhecimentos inicialmente enunciados no trabalho de Fourier tornaram-se constantes em diversas áreas das ciências exatas, de engenharias e até da saúde.

Na engenharia construtiva estes conhecimentos aplicam-se de duas formas principais, sendo a ação da variação da temperatura ambiente sobre estruturas a mais usual e simples delas, pois considera em seu escopo de estudos, principalmente, a variação volumétrica e conceitos de isolamento térmico que não têm interferência sobre as características mecânicas dos materiais construtivos.

A segunda principal aplicação se dá na engenharia de segurança contra incêndios, que se torna mais complexa pois considera variações de temperatura em escalas muito acima do que é considerado

confortável ao usuário e conseqüentemente influência na alteração das propriedades físicas e mecânicas dos materiais.

No caso de projetos de lajes mistas, compostas por aço e concreto, o estudo da performance térmica destes componentes ao serem aplicados em edifícios era realizado de modo totalmente empírico quando a resistência ao fogo exigida era superior a 30 minutos, requerendo testes laboratoriais que são altamente custosos. Com base nisto, foi elaborada em 1983 a primeira nota técnica destinada à normatização de projetos de lajes mistas de concreto com chapa colaborante de aço [7] desenvolvida pelo ECCS, visando dispor métodos de cálculo que garantissem a segurança do usuário, de acordo com a classe de resistência ao fogo exigida, que por sua vez é estabelecida pela norma ISO 834 [8].

Em 1987 a *British Steel Corporation* publicou relatórios experimentais da execução e registro de testes térmicos com aplicação de incêndio padrão ISO 834 em lajes mistas [9]. Os testes apresentam a exposição de dois diferentes modelos de chapa de aço (PMF CF46 e Super Holorib) sobre os quais foi aplicada uma camada de 120 mm de concreto normal e concreto leve. O intuito destes testes era fornecer dados para a caracterização do comportamento térmico destas lajes em situação de incêndio, sendo que os dados foram sumarizados em anexo, possibilitando uma análise completa por parte da comunidade científica.

Em 1988, Cooke et al. [1] procurou provar por meio de testes experimentais que era possível atingir uma resistência ao fogo de 90 minutos para lajes mistas, cumprindo com os requisitos estabelecidos pela ISO 834 de capacidade de carga (R), integridade (E) e isolamento térmico (I), sem que houvesse a inclusão de isolamento adicional na face da laje exposta ao incêndio e aplicando somente reforço em grelha de aço para a parte superior das lajes. Os autores inicialmente propuseram revisões de estudos experimentais realizados até 1982, onde pouquíssimo material foi encontrado, devido ao processo de insurgência desta técnica, tanto no Reino Unido quanto na Europa, de um modo geral, ainda estar em andamento. Posteriormente foram realizados os estudos de testes desenvolvidos pelo *Construction Industry Research & Information Association* (CIRIA) entre 1983 e 1985 e entre 1984 e 1986 pela *British Steel Corporation* (BSC). Com tais experimentos provou-se ser possível atingir níveis de resistência ao incêndio até 90 minutos para lajes mistas de concreto com chapa de aço portante, com a inclusão de reforços somente na parte superior da laje, para ação de momentos negativos.

Em 1990 Hamerlink et al [10] desenvolvem um modelo numérico para análise térmica e mecânica de lajes mistas de perfil trapezoidal sob ação da curva de incêndio padrão ISO 834. Tal modelo é validado através de experimentos desenvolvidos no instituto TNO, situado na Holanda. A finalidade deste trabalho era, além de evidenciar como as normas estabelecidas pela *European Convention for Constructional Steelwork* (ECCS) [7] eram conservadoras, propor novos métodos de definição da resistência térmica destas lajes. Detalhes mais complexos dos experimentos e dos modelos numéricos são apresentados posteriormente por Hamerlink, A. F., em 1991 [11].

Em 1993 foram estabelecidas novas normas que definem os procedimentos de realização de projetos de estruturas de concreto e aço sob ação de incêndios, através do Eurocódigo 1994-1-2 [12]. Esta norma sofreu atualizações posteriores, sendo a primeira em 1994.

Hamerlink e Twilt publicaram em 1995 [13] uma revisão dos novos critérios definidos pela EN 1994-1-2 [12] que, apesar de serem renovados, baseavam-se nos já enunciados pela nota técnica da ECCS [7], levando novamente a resultados conservadores, que propiciam a divergência do critério econômico na elaboração dos projetos destas estruturas. Portanto, para colocar à prova a norma, foram realizadas comparações entre experimentos já realizados por Hamerlink et al [10] e resultados dos cálculos simplificados fornecidos pelo Eurocódigo. Concluiu-se que ainda havia desvios que tornavam a norma imprecisa.

Kees Both, em 1996 [14], realiza o estudo de 21 testes experimentais realizados na Holanda, incluindo testes com e sem carregamento, de lajes mistas. Este trabalho intendia validar os parâmetros de modelagem numérica dos experimentos, propostos por Both e também realizar um estudo paramétrico para fornecer modelos de cálculo da classe de resistência térmica simplificados que pudessem ser incorporados a atualizações posteriores das normas.

Em 1997 Both et al [15] desenvolveu, também no instituto TNO, uma pesquisa visando validar modelos térmicos e mecânicos de laje mista com o auxílio do software DIANA. Notou-se, entretanto, que devido à separação das faces do concreto e da chapa de aço durante os testes mecânicos, que resulta em uma descontinuidade dos materiais, cria-se uma fina camada de ar entre estas faces. Nesta camada, o calor transmite-se majoritariamente por radiação devido à baixíssima condutibilidade do ar. Segundo os autores, tal fator pode ocasionar uma diferença de até 100°C entre as faces do aço e do concreto separados.

Em 1998, C. Both [16] realiza testes térmicos e mecânicos utilizando 3 diferentes geometrias de perfil metálico, fornecendo assim material de base não somente para pesquisadores desenvolverem análises de comportamento térmico e estrutural, mas também para validações de modelos numéricos. As geometrias de chapa de aço utilizadas foram a trapezoidal (PMF CF60), reentrante (Confrastra 40) e mista (Confrastra 70).

Já em 1999, C. G. Bailey et al [17] descrevem resultados experimentais conduzidos entre os anos 1995 e 1996 de uma edificação em escala real, simulando uma situação de incêndio natural ocorrido em um prédio comercial com carregamento típico. O edifício, que contava com 7 pavimentos e carregamento simulado por sacos de areia igualmente distribuídos ao longo dos pavimentos, foi submetido a testes que permitiram a observação de consideráveis diferenças entre o comportamento estrutural previsto por norma segundo a aplicação de incêndio padrão e o comportamento experimental quando submetido à ação de um incêndio natural. Baseando-se em tais resultados experimentais, em 2000 C. G. Bailey e D. B. Moore [18] propuseram novas regras de cálculo da resistência térmica de lajes mistas.

Em 2001 S. Lamont et al [19] desenvolvem também modelos numéricos procurando validação da metodologia através da simulação de incêndio de Cardington [20], desta vez utilizando o software HADAPT. Neste trabalho desenvolveu-se somente validação de modelos térmicos 2D adaptados. Os parâmetros utilizados, juntamente ao software mostraram-se eficazes para simular a evolução da temperatura nos elementos de concreto, porém percebe-se a existência de um desvio considerável entre os dados experimentais e os valores calculados, quando os pontos de medição alcançavam a temperatura de 100°C, sendo que os dados experimentais apresentam uma breve estabilização da temperatura, ou seja, a taxa de aumento da temperatura reduzia drasticamente, enquanto o modelo numérico apresentava maior estabilidade na taxa de acréscimo da temperatura. Os autores defendem que tal diferença decorre da diferença entre a umidade relativa real do concreto e a definida para os modelos computacionais.

Em 2002 L. Lim e C. Wade [21], em uma parceria entre a Universidade de Canterbury e a empresa BRANZ Ltda, realizam uma investigação sobre lajes simplesmente apoiadas em suas 4 laterais submetidas à ação do incêndio padrão ISO 834 [8]. Além de investigar a influência da quantidade de reforço sobre a resistência ao critério de integridade (E) sobre lajes simples de concreto armado, Lim e Wade realizaram experimentos com lajes mistas, incluso um modelo de laje mista com chapa

colaborante de perfil metálico trapezoidal, sob ação de carga mecânica distribuída. Os resultados dos testes, que puderam avaliar o desempenho da estrutura sob os critérios térmicos e mecânicos, revelaram que esta foi capaz de suportar o teste durante 3 horas (180 minutos) sem colapsar. Os detalhes do experimento em termos de materiais, configuração e resultados foram fornecidos em sua completude.

Em 2004, L. Lim et al [22] desenvolveram um trabalho de validação de modelo computacional de laje mista elaborado com o auxílio do software SAFIR, tomando por base os experimentos anteriormente desenvolvidos por Lim e Wade [21]. Com resultados capazes de prever de modo satisfatório o comportamento térmico e mecânico de lajes em situação de incêndio, propuseram-se algumas observações quanto ao estágio inicial do teste que, assim como para Lamont et al [19], apresentou uma taxa de aumento da temperatura muito abaixo da prevista pelo modelo computacional. Foi estimado pelos autores que tal fenômeno se devia à separação das faces do concreto e da chapa de metal, com o surgimento de uma camada de ar neste espaço, situação que reduz a transferência de calor da superfície superior da chapa de aço para a superfície inferior da espessura de concreto, retardando temporariamente o processo de aquecimento.

Em 2006 Aaron J. Wang [23], apresenta resultados de ensaios termomecânicos de três lajes simplesmente apoiadas com geometria reentrante apresentando diferentes especificações de projeto para área de aço de reforço e espessura total das lajes, identificadas como CS1, CS2 e CS3. Os ensaios foram realizados sob a curva de incêndio padrão ISO 834 [8] e tiveram uma duração total de 3 horas. Os autores avaliaram a resistência ao fogo das lajes somente sob o critério capacidade de carga (R), avaliando o máximo deslocamento e a máxima taxa de deslocamento das lajes. Para cada um dos três espécimes foram obtidos os tempos de resistência de 100 minutos (CS1), 140 minutos (CS2) e 193 minutos (CS3).

Modelos numéricos de elementos finitos também foram desenvolvidos por Wang [23] com o auxílio do software ABAQUS, que puderam prever, com moderada precisão, as temperaturas na secção da laje ao longo dos experimentos. O diferencial desta abordagem numérica encontra-se justificado na definição da emissividade da face inferior da laje, ou seja, da face exposta ao incêndio padrão. Definiu-se que esta era variável de acordo com a temperatura do forno, podendo variar desde 0.04 para o estágio inicial do incêndio até 0.45 para a temperatura de 1200 °C.

Procurando desenvolver o conhecimento da comunidade científica acerca do tema e aproximar cada vez mais os métodos de cálculo propostos pelas normas à precisão exigida para que as estruturas projetadas alcançassem maiores níveis de eficiência, em 2011 C. G. Bailey e S. Guo [24] realizaram testes termomecânicos em lajes mistas de concreto com chapa de aço colaborante, apresentando a aplicação de uma curva de incêndio natural ao forno, incluindo um processo de resfriamento da estrutura. Durante todo o ensaio foram realizadas medições de temperatura em vários pontos da secção da laje, assim como o máximo deslocamento ao centro do vão e os valores da reação nos apoios. Ao todo, duas curvas de incêndio natural foram aplicadas nos ensaios, incluindo ainda a análise dos efeitos de carga e deslocamento das estruturas durante o processo de arrefecimento destas. Os resultados obtidos mostraram que existe grande influência da temperatura máxima alcançada durante o incêndio sobre a máxima deflexão alcançada, e do processo de arrefecimento sobre a deflexão final e residual na laje. Em 2012, S. Guo [4] realiza a validação de um modelo numérico de elementos finitos reduzido, contemplando somente parte da estrutura, através dos testes experimentais antes realizados por si, onde os resultados de temperatura e deflexão alcançados atingiram valores muito próximos dos experimentais, tanto na fase de aquecimento quanto na fase de arrefecimento. Para este estudo numérico, foram utilizados como coeficientes de convecção $25 \text{ W/m}^2\text{K}$ para a face exposta ao incêndio, assim como indica a norma EN 1991-1-2 [25] e $10 \text{ W/m}^2\text{K}$ para a face não exposta, além de considerar 0.7 para a emissividade da face inferior da laje.

Várias propostas de modelos numéricos de elementos finitos capazes de prever com boa precisão o comportamento térmico e mecânico foram desenvolvidos desde então, levando em consideração as mais diversas configurações estruturais e softwares utilizados. Por exemplo no trabalho desenvolvido em 2014 por J. Jiang et al [26], onde foi utilizado o software OpenSees e no trabalho desenvolvido por Shou-Chao Jiang et al [27] foi utilizado base o software ABAQUS para modelagem, que contava com estruturas mais complexas ao considerar a ação conjunta das vigas de suporte sob a laje.

Em 2018, Guo-Qiang Li et al [28] desenvolvem experimentos com 4 espécimes de laje mista com chapa de aço colaborante de geometria trapezoidal. Nestes testes foi aplicada a curva de incêndio padrão ISO 834 [8] ao forno e sobre a laje foi aplicada carga distribuída em pontos igualmente espaçados, equivalente a 60% da capacidade de carga das lajes. Para cada um dos espécimes foram

variadas características da configuração estrutural quanto à presença ou não de viga secundária sob a chapa de aço, a direção dos varões de aço e a posição dos reforços de aço para momentos negativos. Quanto ao critério de isolamento térmico da laje, notou-se que a temperatura na face não exposta das lajes não atingiu 100 °C até o minuto 100, divergindo do estimado pelo Eurocódigo EN 1994-1-2 [12] que propunha uma resistência próxima a 90 minutos. Para as lajes que não apresentavam viga secundária a fissuração da estrutura ocorreu inicialmente próximo às bordas onde a laje era fixada, diferentemente das lajes com suporte de viga secundária, que apresentavam fissuração inicialmente próximo ao eixo central, onde posicionava-se a viga devido à ocorrência de momentos negativos concentrados nessa região. Observou-se também em todos os espécimes a separação das faces do concreto e da chapa de aço.

Ainda em 2018, J. Jiang et al [29] apresentam um extenso estudo sobre a influência de diversos parâmetros, até então considerados como parâmetros chave, sobre a resistência do fogo de lajes mistas com chapa de aço colaborante, sendo exclusivamente direcionado para o critério de isolamento (I) como apresentado pela norma [30]. Neste trabalho, foram estudo de caso, as condições de contorno usualmente implementadas em modelos numéricos térmicos, a configuração geométrica da chapa de aço colaborante e o nível de umidade do concreto que compõe as lajes. Para a modelagem de elementos finitos foi utilizado o software LS-DYNA, aplicando elementos do tipo sólido para a representação do concreto e elementos de casca para representar as chapas de aço empregadas nas lajes mistas. Como resultados, foi constatado que a temperatura máxima na superfície não exposta governou o critério de isolamento (I) das lajes assim como a emissividade da superfície exposta ao incêndio tem grande influência sobre as temperaturas que ocorrem na secção da estrutura no decorrer do tempo, ou seja, uma menor emissividade tem como consequência a diminuição das temperaturas alcançadas nos modelos numéricos, principalmente na face exposta ao fogo. Com isto os autores propõem uma nova função que descreve o nível de emissividade da superfície exposta tendo unicamente como dependência a temperatura.

Em 2019, Piloto et al desenvolvem uma série de trabalhos destinados a modelagem numérica de lajes mistas de aço e concreto com chapa de aço colaborante sob situação de incêndio com carga mecânica aplicada (ver [31], [32], [33]), focando principalmente no processo de validação dos modelos numéricos. Em seus estudos, os autores produzem diversos modelos térmicos e mecânicos baseados no trabalho de Hamerlinck [11], destinados a estudos paramétricos da influência da altura

efetiva da laje sobre a sua resistência ao fogo observado segundo o critério de isolamento (I) e a influência do nível de carregamento da laje sobre sua resistência ao fogo analisada sob o critério de capacidade de carga (R). Foi também proposta uma nova técnica de modelagem que leva em consideração a existência de uma fina camada de ar (*air-gap*) entre o concreto e a chapa de aço, devido ao descolamento destes elementos, como é reportado por Hamerlinck [10]. Portanto, para simular este *air-gap* foram utilizados elementos sólidos, atribuindo-lhes propriedades específicas do ar à pressão de 1 atm. Os resultados obtidos demonstraram uma considerável melhora na aproximação das curvas de temperatura, e o erro relativo do tempo de resistência segundo o critério de isolamento (I) melhorou de 14.3% do modelo de perfeito contato entre a chapa de aço e o concreto, para aproximadamente 6.00% do modelo com uma camada de ar de 1.00 mm.

Ainda em 2019, Balsa et al [34] realizam aprimoramentos nos modelos numéricos térmicos e mecânicos de validação, com o auxílio do software ANSYS, onde a técnica de se utilizar elementos sólidos para simular a camada de ar entre a chapa de aço e o concreto foi substituída pela utilização de elementos de casca. Esta nova proposta permitiu a redução do tempo de processamento do modelo térmico devido à redução do número de nós criados no modelo, foram alcançados resultados ainda mais precisos para a previsão da resistência ao fogo segundo o critério de isolamento (I), sendo a diferença somente de 3.88% para a aplicação de uma camada de ar com 0.50 mm de espessura.

1.2. ORGANIZAÇÃO DA DISSERTAÇÃO

Este trabalho será dividido em 8 capítulos, além de uma seção dedicada às referências e das fichas técnicas em anexo.

Neste primeiro capítulo é apresentada uma breve introdução ao contexto histórico da aplicação e evolução de tecnologias referentes a lajes mistas de aço e concreto com chapa de aço colaborante. Apresenta-se ainda todo o histórico de pesquisas estudadas que foram utilizadas de base da formação e fixação de conceitos e técnicas desenvolvidas neste trabalho.

O Capítulo 2 refere-se ao fenômeno de transferência de calor, apresentando quais os modos de transferência, e como ocorrem, tomando por base as formulações físicas que permitem estimar os

fatores que têm interferência sobre este fenômeno e a intensidade com que atuam cada um dos modos de transferência.

O Capítulo 3 apresenta os materiais que serão considerados nos estudos e elaboração dos modelos numéricos a partir das suas propriedades térmicas e mecânicas que serão essenciais no processo de modelagem, e terão interferência sobre todas as simulações desenvolvidas, tanto térmicas quanto mecânicas.

No Capítulo 4 encontrar-se-ão os métodos simplificados, propostos pelas normas europeias, para a estimação de valores para a resistência ao fogo das lajes mistas com chapa de aço colaborantes e de verificação quanto à segurança da estrutura quanto ao nível de carregamento de acordo com a classe de resistência ao fogo que é exigida das estruturas de modo individual

No Capítulo 5 é apresentada a metodologia aplicada no cálculo avançado com o auxílio do software ANSYS para a estimação da resistência ao fogo das lajes mistas, segundo os critérios de isolamento (I) e capacidade de carga (R). Neste capítulo encontram-se todos os parâmetros aplicados ao software e as características dos modelos de elementos finitos utilizados tanto nas simulações térmicas quanto nas simulações mecânicas.

No capítulo 6 são apresentados os modelos utilizados para a validação e calibração das técnicas e parâmetros de simulação, utilizados posteriormente nas simulações destinadas aos estudos paramétricos.

O Capítulo 7 descreve desde a apresentação dos modelos criados até os resultados obtidos dos estudos paramétricos, ou seja, de um modo geral, todo o processo de estudo paramétrico da influência dos fatores espessura efetiva (h_{eff}) e nível de carregamento (η), de lajes mistas com chapa de aço colaborante, na resistência ao fogo destas estruturas, analisadas sob os critérios de isolamento (I) e capacidade de carga (R). Ainda, é proposto um novo modelo de cálculo da resistência ao fogo (t_{Rd}) de lajes mistas com chapa de aço colaborante, tendo como variáveis o nível de carregamento e a espessura efetiva da laje.

O Capítulo 8 foi destinado às conclusões obtidas através do desenvolvimento deste trabalho, além de recomendações para trabalhos futuros que possam usufruir do que foi desenvolvido nesta dissertação.

Nos anexos encontram -se as fichas técnicas de todas as 158 simulações deste trabalho, incluindo modelos de validação e de estudos paramétricos.

2. TRANSFERÊNCIA DE CALOR

Todo o processo de análise do comportamento das lajes mistas ao incremento da carga mecânica aplicada em situação de incêndio tem dependência direta das propriedades mecânicas e, conseqüentemente, das propriedades térmicas do material, dado que o primeiro é influenciado pelo segundo.

Portanto, faz-se muito importante a compreensão de como ocorre a transferência de calor entre todos os elementos, tendo definidas as condições de fronteira que atuam sobre a estrutura. Isto posto, pode-se descrever as três naturezas de transferência de energia térmica compreendidas pela ciência. Sendo elas: transferência por condução, transferência por convecção e transferência por radiação [35].

2.1. CONDUÇÃO

A condução de calor entre partículas é um fenômeno amplamente estudado, inicialmente estudado por Newton mas com sólida base definida na publicação de Fourier em 1812 [6], podendo ser observado quando um corpo aquecido entra em contato com um corpo de menor temperatura. Neste exemplo, a temperatura do corpo mais quente tende a abaixar e a temperatura do corpo mais frio tende a aumentar devido a interação e diferença de temperatura entre as partículas presentes nas faces em contato, o fluxo de calor \dot{h}_{cd} [W/m²] entre os elementos descritos é calculado segundo a Equação (1).

$$\dot{h}_{cd} = -\lambda \frac{dT}{dx} \quad (1)$$

Onde dx [m] é a distância na qual o fluxo de calor através da área de contato A [m²] é avaliado para um material com condutividade λ [W/m^{°K}] e que apresente uma diferença de temperatura dT [°K] entre os pontos avaliados.

A Equação (1) pode ser complementada, tornando-a mais precisa, como apresentado na Equação (2) que expande a avaliação do fluxo de calor decompondo-o em vetores com a aplicação do operador gradiente (∇) à temperatura (T) [36].

$$\vec{h}_{cd} = -\lambda \cdot \vec{\nabla} T \quad (2)$$

2.2. CONVECÇÃO

Quando ocorre o movimento de um fluido com temperatura T_∞ sobre a superfície de um corpo, com temperatura $T \neq T_\infty$, a transferência de calor entre estes dois ocorre devido à dinâmica de movimento e atrito entre partículas, fenômeno este conhecido como convecção [37].

A convecção pode ainda ser classificada de acordo com a natureza com que ocorre, sendo *forçada* quando o movimento do líquido ou do gás sobre a superfície do corpo é ocasionado com o auxílio de máquinas de ventilação e/ou exaustão como turbinas e ventiladores, e *natural* ou *livre* quando o movimento do fluido ocorre devido à diferença de massa volúmica ocasionada pelo gradiente de temperatura próximo ao corpo [38].

A equação (3) é proposta com base nos estudos de Fourier [6], que indicam que o fluxo de calor do ar proveniente da transferência por convecção é diretamente proporcional à diferença de temperatura entre a superfície do corpo (T) e o meio gasoso (T_∞) e a um coeficiente α_c denominado por Coeficiente de Convecção [$\text{W/m}^2\text{°C}$] [39].

$$\dot{h}_{net,c} = \alpha_c (T_s - T_\infty) \quad (3)$$

2.3. RADIAÇÃO

A terceira forma de transferência de calor a ser considerada é a radiação, caracterizada pela propagação de ondas eletromagnéticas entre corpos, que são geradas pela liberação de fótons do corpo emissor com direção para o corpo receptor. Por se tratar de uma onda, esse tipo de energia pode ser liberado em diferentes comprimentos de onda entre 10^{-1} e 10^2 μm .

A intensidade de emissão de radiação em forma de energia térmica dos materiais pode variar de acordo com a amplitude de emissão de comprimentos de onda e da direção em relação à superfície.

Deste modo, um corpo capaz de emitir ondas de comprimento entre 10^{-1} e 10^2 μm e com intensidade constante em todas as direções é classificado como um corpo negro de superfície difusa. Estes conceitos são aplicáveis tanto para o corpo emissor quanto para o receptor.

O parâmetro que possibilita quantificar a capacidade de um corpo emitir ou absorver a energia térmica em todos os seus comprimentos de onda é a *emissividade* (ε). Devido ao fato deste ser um parâmetro adimensional, ele calcula a relação entre a amplitude de comprimentos de onda que o material é capaz de emitir e absorver com um corpo negro [40].

Assim como enunciado por Lienhard [41], entende-se que corpos negros são materiais com capacidade de transferir a energia térmica em energia radiante e da mesma forma são capazes de absorver e converter para a forma de energia térmica 100% da energia radiante que incide sobre si. Sendo assim, ocorre que para corpos negros $\varepsilon = 1.00$. Da mesma forma, partindo da premissa que toda a energia térmica é transmitida para a forma de energia radiativa, para o fogo é considerado $\varepsilon_f = 1.00$.

Para fins de engenharia, uma superfície emissora de radiação, como as chamas no interior de um forno, é considerada sempre como sendo difusa, ou seja, a intensidade da energia emitida em forma de calor é independente da direção. Já a superfície receptora das ondas de radiação é influenciada pelas suas dimensões e disposição geométrica. O parâmetro que determina a fração da energia emitida que é absorvida pelo material é o *fator de vista* ou *fator de forma* (Φ), que pode assumir valores entre 0 e 1.

O cálculo do fator de vista é complexo devido à sua alta variabilidade, porém a literatura fornece simplificações para casos específicos, como ocorre para os elementos de superfície exposta de lajes mistas com chapa de aço colaborante de geometria trapezoidal [3]. A Figura 1 permite visualizar a divisão das regiões que exigem cálculo individual dos fatores de vista, assim como apresenta que para a flange inferior das chapas metálicas o fator de vista é sempre considerado com o valor unitário, por ser uma superfície perpendicular e diretamente exposta ao incêndio.

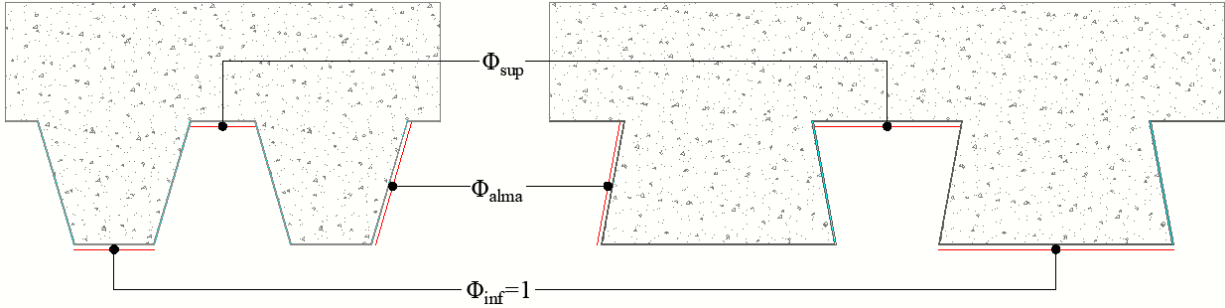


Figura 1 - Fatores de vista

As equações (4) e (5) devem ser utilizadas o cálculo dos fatores de vista da flange superior (Φ_{sup}) e da alma (Φ_{alma}), para lajes trapezoidais, ver a Figura 2, onde são apresentadas as informações necessárias com relação à geometria das lajes para a realização dos cálculos.

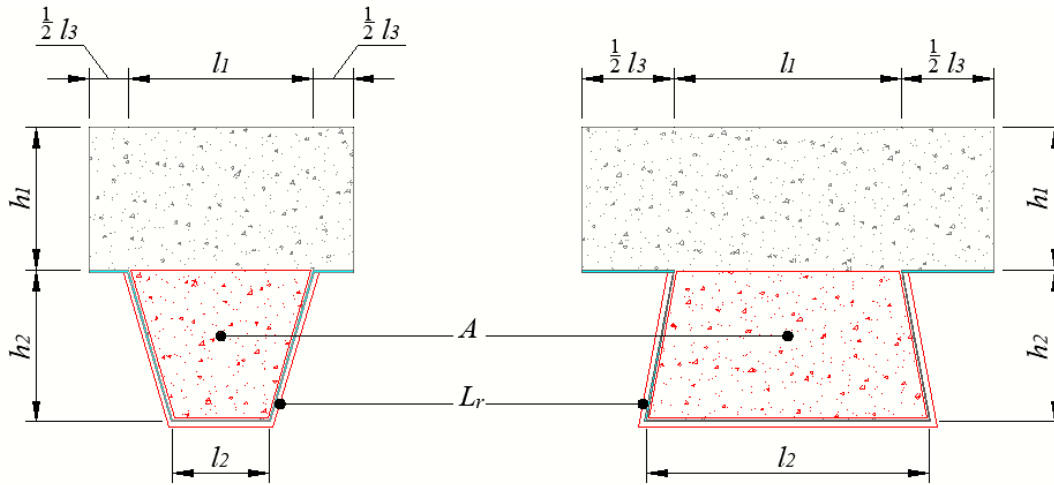


Figura 2 - Fatores geométricos de lajes mistas com chapas de aço de perfil trapezoidal e reentrante

$$\Phi_{sup} = \frac{\sqrt{h_2^2 + \left(l_3 + \frac{l_1 - l_2}{2}\right)^2} - \sqrt{h_2^2 + \left(\frac{l_1 - l_2}{2}\right)^2}}{l_3} \quad (4)$$

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

Para as lajes de geometria reentrante, as equações dos fatores de vista podem ser facilmente adaptadas, resultando nas equações (6) e (7).

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

$$\Phi_{alma} = \frac{\sqrt{h_2^2 + \left(\frac{l_1-l_2}{2}\right)^2} + (l_3 + l_1 - l_2) - \sqrt{h_2^2 + \left(l_3 + \frac{l_1-l_2}{2}\right)^2}}{2\sqrt{h_2^2 + \left(\frac{l_1-l_2}{2}\right)^2}} \quad (7)$$

Portanto, entende-se que o processo de transferência de calor por radiação depende tanto das características do corpo emissor quanto do corpo receptor, além das características geométricas destes materiais [35].

A equação do fluxo de calor por radiação na superfície exposta ao incêndio é definida segundo a equação (8).

$$\dot{h}_{net,r} = \Phi \cdot \varepsilon \cdot \sigma \cdot [(T_s + 273)^4 - (T_\infty - 273)^4] \quad (8)$$

Onde σ é a Constante de Stefan-Boltzmann, com valor $\sigma = 5.78 \times 10^{-8} \text{ W/m}^2\text{K}^4$.

A transferência de calor por radiação torna-se a principal forma de transferência energia térmica em situações de incêndio com chamas que apresentem comprimento superior a 0.2 m, aproximadamente [42]. Por este motivo, para este estudo ela se torna essencial no processo de simulação numérica.

3. PROPRIEDADES DOS MATERIAIS SEGUNDO O EUROCÓDIGO

Como já foi citado anteriormente, as propriedades térmicas e mecânicas dos materiais que integram este tipo de estrutura tem papel fundamental sobre o desempenho térmico e mecânico em situação de incêndio. No processo de modelagem numérica é importante conhecer o comportamento das propriedades de cada material e quais fatores influenciam no aumento ou diminuição do desempenho de cada componente da laje, além de determinar qual a influência indireta das propriedades térmicas sobre as propriedades mecânicas.

3.1. PROPRIEDADES TÉRMICAS

As propriedades térmicas de cada material seguem restritamente as indicações dos Eurocódigo EN 1994-1-2 [12] para o concreto e para o aço, por se tratar da norma regulamentadora de estruturas mistas de aço-concreto em situações de incêndio.

Já para o ar, não há normas definidas para as suas propriedades térmicas. Por este motivo foi utilizada como referência bibliografia específica [43].

3.1.1. AÇO

As propriedades térmicas do aço aqui apresentadas são válidas tanto para aços com função estrutural como para reforço, ou seja, aplica-se tanto para o aço das chapas de aço como para as barras de reforço. A normativa específica de estruturas de aço [44], além da normativa de estruturas mistas [12] definem os padrões de propriedades térmicas dos materiais.

Primeiramente, a massa volúmica do aço é considerada independente da variação da temperatura do elemento com o valor de 7800 kg/m^3 como apresentado no gráfico da Figura 3.

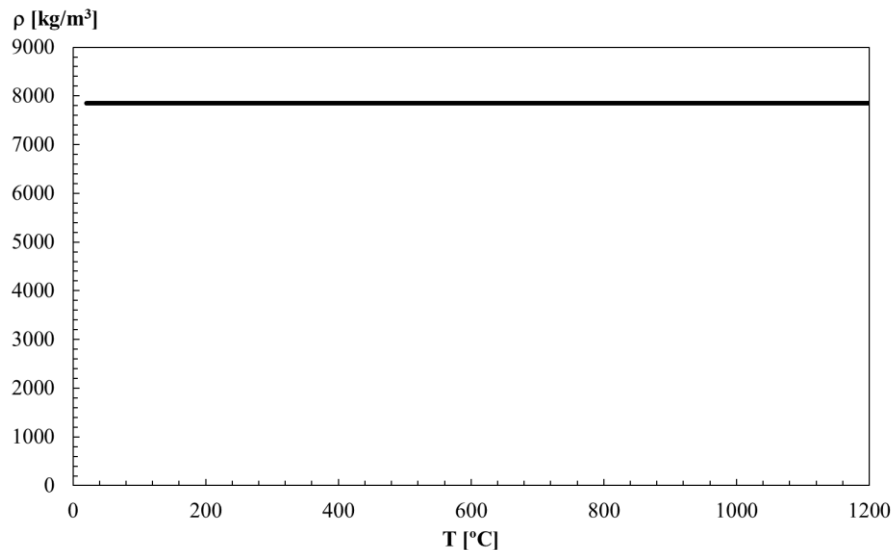


Figura 3 - Massa volúmica do aço

A expansão térmica do aço é definida segundo o Eurocódigo EN 1993-1-2 [44] é prescrita segundo limites de temperatura como descrito a seguir:

$$20^{\circ}\text{C} \leq \theta_a < 750^{\circ}\text{C} \quad \Delta l/l = 1.2 \times 10^{-5} \theta_a + 0.4 \times 10^{-8} \theta_a^2 - 2.416 \times 10^{-4} \quad (9)$$

$$750^{\circ}\text{C} \leq \theta_a \leq 860^{\circ}\text{C} \quad \Delta l/l = 1.1 \times 10^{-2} \quad (10)$$

$$860^{\circ}\text{C} < \theta_a \leq 1200^{\circ}\text{C} \quad \Delta l/l = 2 \times 10^{-5} \theta_a - 6.2 \times 10^{-3} \quad (11)$$

A Figura 4 permite visualizar com maior facilidade a evolução da elongação relativa do aço ($\Delta l/l$) com a variação da temperatura (θ_a) e assim perceber que é criado um patamar de estabilização do material entre as temperaturas de 750°C e 860°C .

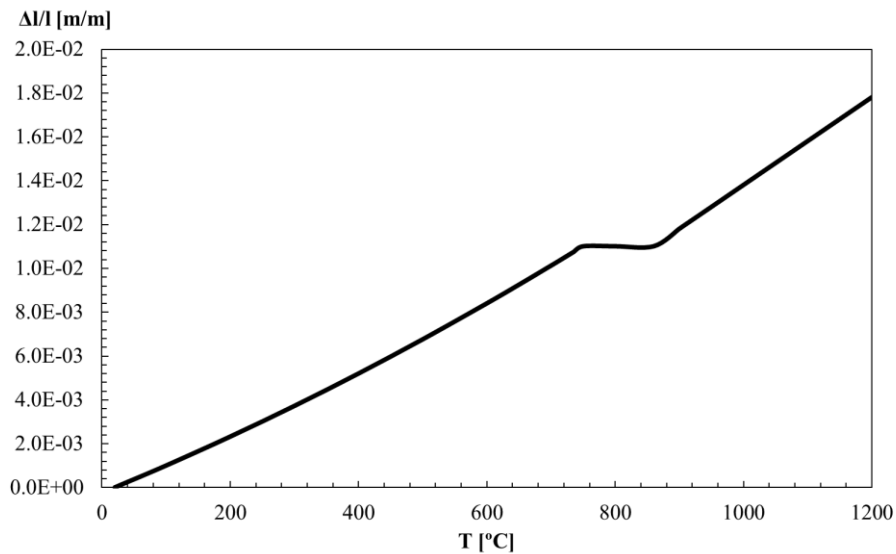


Figura 4 - Elongação térmica do aço

Assim como para a elongação, o calor específico do aço sofre um fenômeno comportamental entre o estágio de temperaturas de 600°C e 800°C , aproximadamente, que se deve à transição do estágio alotrópico. As equações (12), (13), (14) e (15) apresentam a descrição da curva do calor específico (c_a) para as diversas faixas de temperatura do aço (θ_a), que é ilustrada na Figura 5.

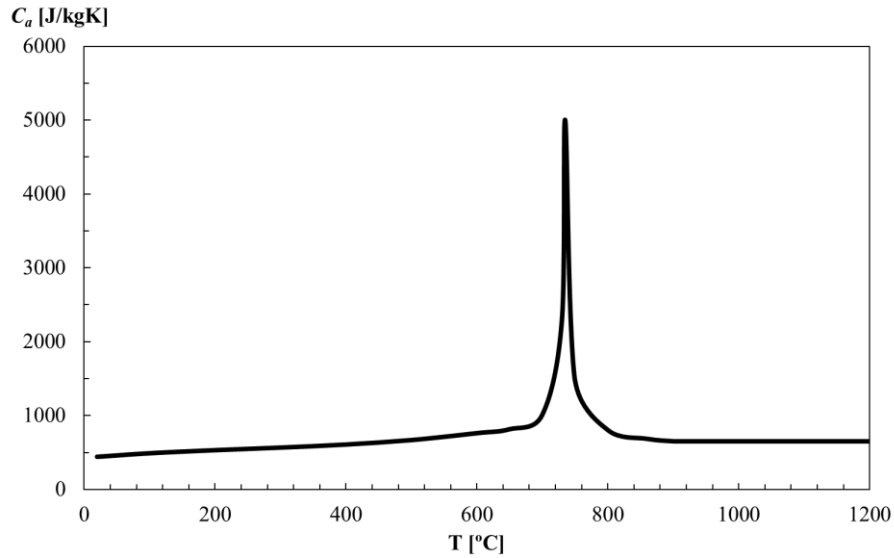


Figura 5 - Calor específico do aço

$$20^{\circ}\text{C} \leq \theta_a < 600^{\circ}\text{C} \quad c_a = 425 + 7.73 \times 10^{-1} \theta_a - 1.69 \times 10^{-3} \theta_a^2 + 2.22 \times 10^{-3} \quad (12)$$

$$600^{\circ}\text{C} \leq \theta_a < 735^{\circ}\text{C} \quad c_a = 666 + \frac{13002}{738 - \theta_a} \quad (13)$$

$$735^{\circ}\text{C} \leq \theta_a < 900^{\circ}\text{C} \quad c_a = 545 + \frac{17820}{\theta_a - 731} \quad (14)$$

$$900^{\circ}\text{C} \leq \theta_a \leq 1200^{\circ}\text{C} \quad c_a = 650 \quad (15)$$

Por fim, a condutividade térmica do aço (λ_a) é descrita segundo as equações (16), (17), em duas fases, atingindo a estabilização a partir dos 800°C.

$$20^{\circ}\text{C} \leq \theta_a < 800^{\circ}\text{C} \quad \lambda_a = 54 - 3.33 \times 10^{-2} \theta_a \quad (16)$$

$$800^{\circ}\text{C} \leq \theta_a \leq 1200^{\circ}\text{C} \quad \lambda_a = 27.3 \quad (17)$$

A Figura 6 apresenta o gráfico que ilustra a relação entre condutividade e a temperatura do aço (θ_a).

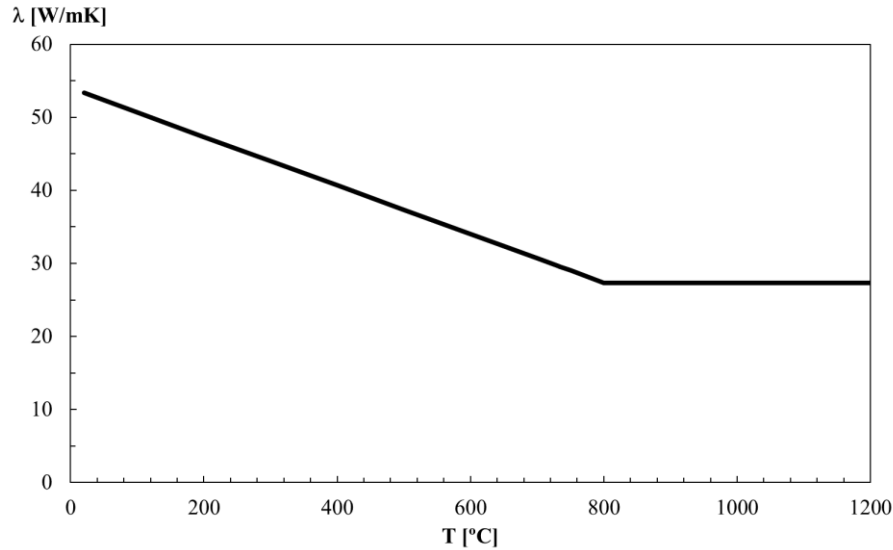


Figura 6 - Condutividade do aço

3.1.2. CONCRETO

As propriedades térmicas do concreto apresentadas nesta seção baseiam-se nas normas para estruturas de concreto sob situação de incêndio [45] e de estruturas mistas de aço-concreto em situação de incêndio [12] para concretos convencionais (*normal weight concrete*) que empregam o uso de agregados silícios.

A começar pela elongação térmica relativa do concreto ($\Delta l/l$) com l considerado à temperatura de 20°C, que descreve um aumento entre as temperaturas (θ_c) de 20°C e 700°C até que haja a estabilização do volume do concreto. Estas duas fases de evolução da elongação do concreto são descritas pelas equações (18) e (19), respectivamente, e a Figura 7 ilustra de modo gráfico a curva em questão.

$$20^{\circ}\text{C} \leq \theta_c < 700^{\circ}\text{C} \quad \Delta l/l = -1.8 \times 10^{-4} \theta_c + 9 \times 10^{-6} \theta_c^2 - 2.3 \times 10^{-11} \theta_c^3 \quad (18)$$

$$700^{\circ}\text{C} \leq \theta_c \leq 1200^{\circ}\text{C} \quad \Delta l/l = 14 \times 10^{-3} \quad (19)$$

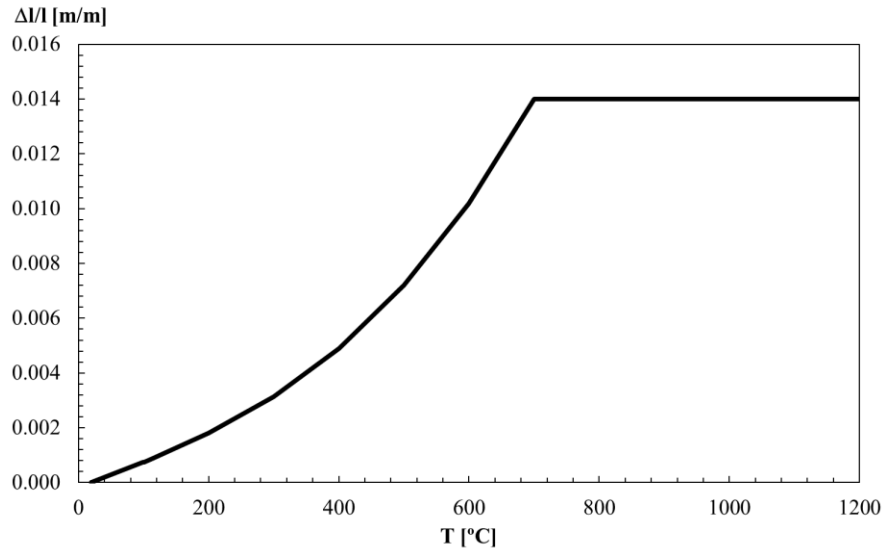


Figura 7 - Elongação térmica do concreto

O calor específico do concreto, diferentemente das demais propriedades térmicas, é dependente não somente da temperatura do material (θ_c) mas também do teor de umidade do concreto (u), que tem influência sobre um pico de elevação do calor específico entre 100°C e 115°C devido ao processo de evaporação das partículas de água. Esta variação do máximo valor atingido para o calor específico de acordo com o teor de umidade é apresentado para fácil entendimento na Figura 8.

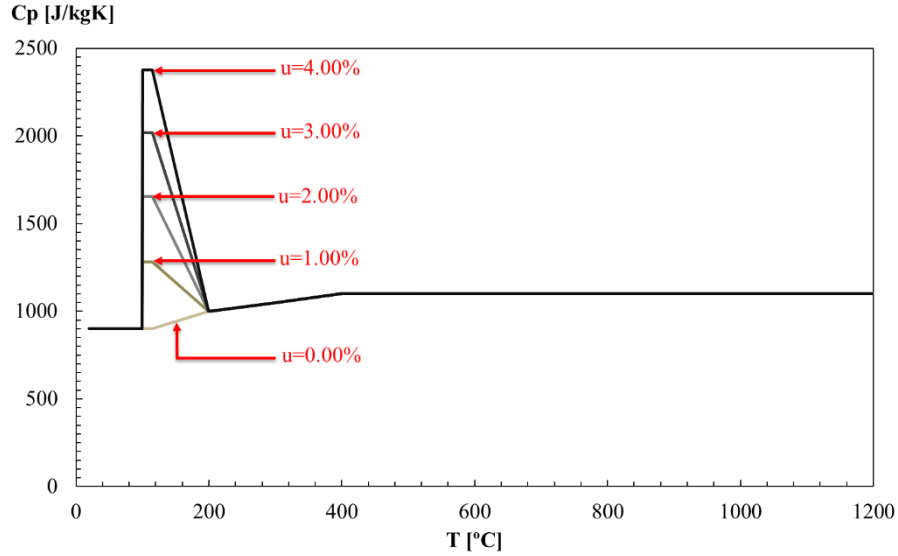


Figura 8 - Calor específico do concreto convencional a diversos teores de umidade

A norma [45] define valores de pico do calor específico do concreto para os valores de teor de umidade de 0.00%, 1.50% e 3.00% com decréscimo linear entre 115°C e 200°C, permitindo realizar interpolação e extrapolação entre estes valores para diferentes teores de umidade. A obtenção de novas curvas para diferentes valores de teores de umidade foi necessária para os modelos de validação, como é apresentado nos capítulos que se seguem.

As equações (20), (21), (22), (23) e (24) definem a curva do calor específico do concreto para as diversas fases da evolução da temperatura do concreto.

$$20^{\circ}\text{C} \leq \theta_c \leq 100^{\circ}\text{C} \quad c_p = 900 \quad (20)$$

$$100^{\circ}\text{C} < \theta_c \leq 115^{\circ}\text{C} \quad c_p = c_{p,máx} \quad (21)$$

$$115^{\circ}\text{C} < \theta_c \leq 200^{\circ}\text{C} \quad c_p = 1000 + (c_{p,máx} - 1000) \cdot \frac{200 - \theta_c}{200 - 115} \quad (22)$$

$$200^{\circ}\text{C} < \theta_c \leq 400^{\circ}\text{C} \quad c_p = 1000 + \frac{(\theta_c - 200)}{2} \quad (23)$$

$$400^{\circ}\text{C} < \theta_c \leq 1200^{\circ}\text{C} \quad c_p = 1100 \quad (24)$$

A Tabela 1 define os valores de base para o valor máximo atingido pelo calor específico do concreto de acordo com seu teor de umidade.

Teor de Umidade [%]	$C_{p, \text{máx}}$ [J/kg°K]
0.00	900
1.50	1470
3.00	2020

Tabela 1 - Relação entre teor de umidade e máximo calor específico do concreto

A massa volúmica do concreto descreve um decréscimo com o aumento da temperatura, e é descrita segundo as equações (25), (26), (27) e (28) que são dependentes da temperatura do concreto (θ_c) e da sua massa volúmica inicial ($\rho_{c,0}$) que para o concreto convencional é de 2350 kg/m³.

$$20^{\circ}\text{C} \leq \theta_c \leq 115^{\circ}\text{C} \quad \rho_{c,\theta} = \rho_{c,0} \quad (25)$$

$$115^{\circ}\text{C} < \theta_c \leq 200^{\circ}\text{C} \quad \rho_{c,\theta} = \rho_{c,0} \left(1 - 0.02 \frac{\theta_c - 115}{85} \right) \quad (26)$$

$$200^{\circ}\text{C} < \theta_c \leq 400^{\circ}\text{C} \quad \rho_{c,\theta} = \rho_{c,0} \left(0.98 - 0.03 \frac{\theta_c - 200}{200} \right) \quad (27)$$

$$400^{\circ}\text{C} < \theta_c \leq 1200^{\circ}\text{C} \quad \rho_{c,\theta} = \rho_{c,0} \left(0.95 - 0.07 \frac{\theta_c - 400}{800} \right) \quad (28)$$

A Figura 9 apresenta o gráfico da curva para a massa volúmica do concreto.

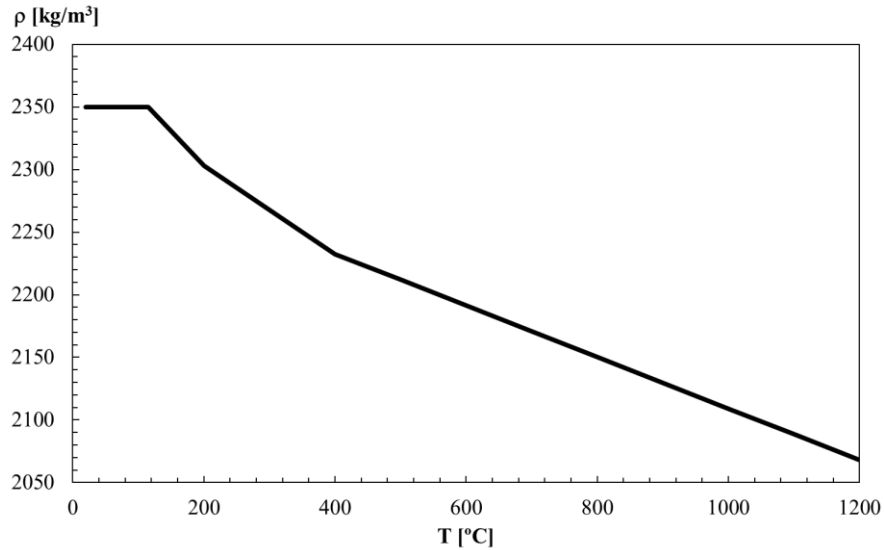


Figura 9 - Massa volúmica do concreto convencional

Por fim, a condutividade térmica do concreto estabelecida pelas normas [45] e [12] estabelece duas limites para esta propriedade, podendo o projetista considerar qualquer valor na faixa de possibilidades estabelecida. Porém, a norma EN 1994-1-2 também recomenda que, para efeitos de segurança, se deve utilizar o limite superior como curva padrão para projeto. As equações apresentadas a seguir e a Figura 10 permitem calcular e visualizar estas curvas.

$$\lambda_{c,superior} = 2 - 0.2451 \left(\frac{\theta_c}{100} \right) + 0.0107 \left(\frac{\theta_c}{100} \right)^2 \quad (29)$$

$$\lambda_{c,inferior} = 1.36 - 0.136 \left(\frac{\theta_c}{100} \right) + 0.0057 \left(\frac{\theta_c}{100} \right)^2 \quad (30)$$

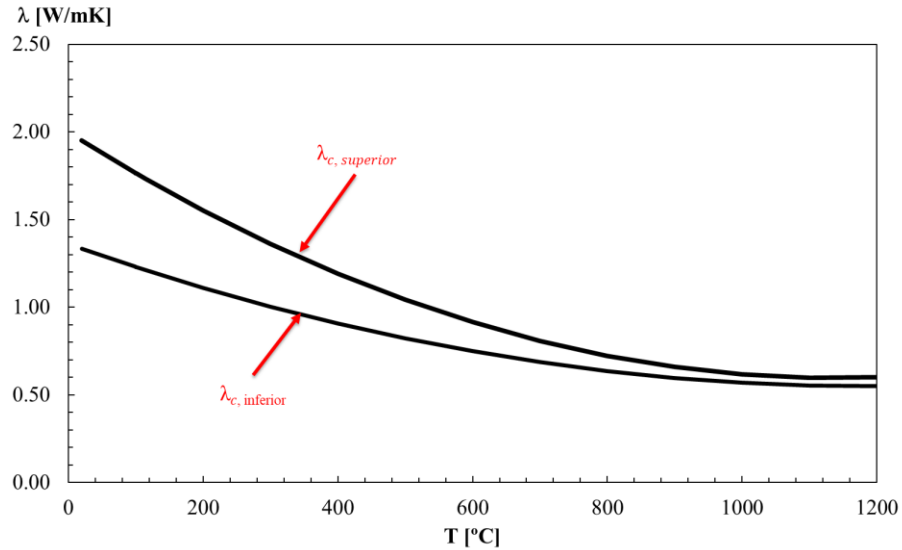


Figura 10 - Condutividade do concreto

3.1.3. AR

As propriedades térmicas do ar não são definidas por norma e por este motivo o apoio da bibliografia fez-se necessário para a definição das propriedades que seriam posteriormente implementadas nos modelos numéricos produzidos neste trabalho.

Os dados fornecidos por Çengel [43] baseiam-se em resultados experimentais e são apresentados na Tabela 2. Para melhor visualização é apresentado na Figura 11 o gráfico do calor específico (c_{ar}) do ar.

Temperatura [$^{\circ}\text{C}$]	Calor Específico c_{ar} [J/kgK]	Condutividade λ_{ar} [W/mK]	Massa volúmica ρ_{ar} [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

Temperatura [°C]	Calor Específico c_{ar} [J/kgK]	Condutividade λ_{ar} [W/mK]	Massa volúmica ρ_{ar} [kg/m ³]
800	1153	0.07037	0.3289
900	1169	0.07465	0.3008
1000	1184	0.07868	0.2772
15000	1234	0.09599	0.1990

Tabela 2 – Resultados obtidos por Çengel para as propriedades térmicas do ar

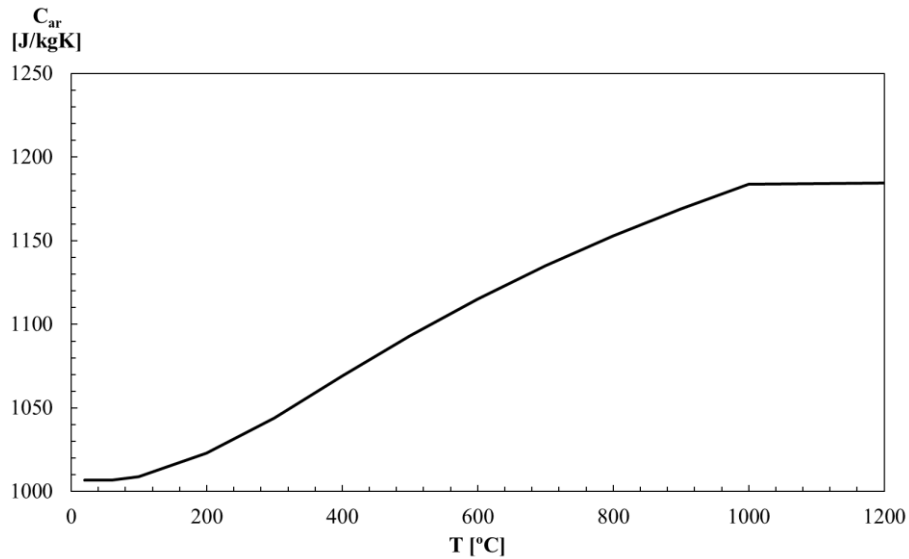


Figura 11 – Calor específico do ar

O gráfico da condutividade (λ_{ar}) do ar é expressado na Figura 12 e de sua massa volúmica (ρ_{ar}) na Figura 13.

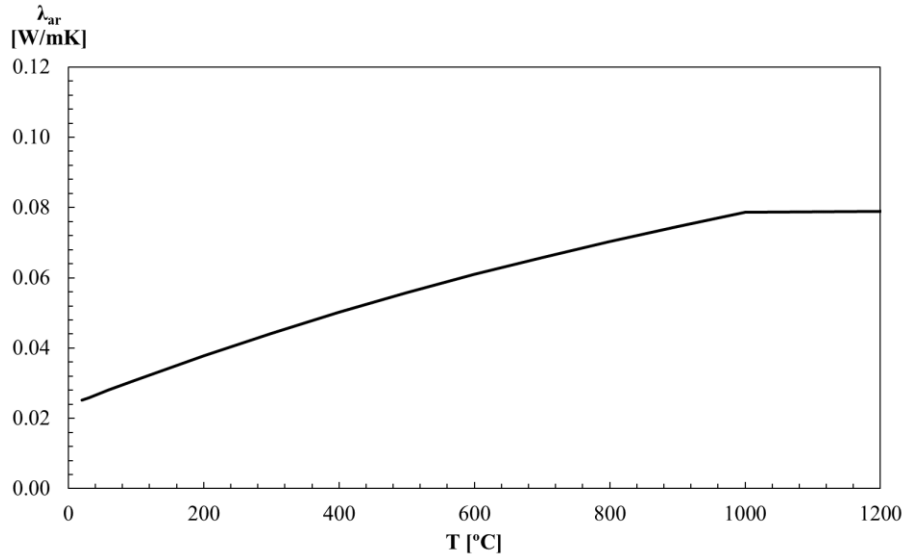


Figura 12 - Condutividade do ar

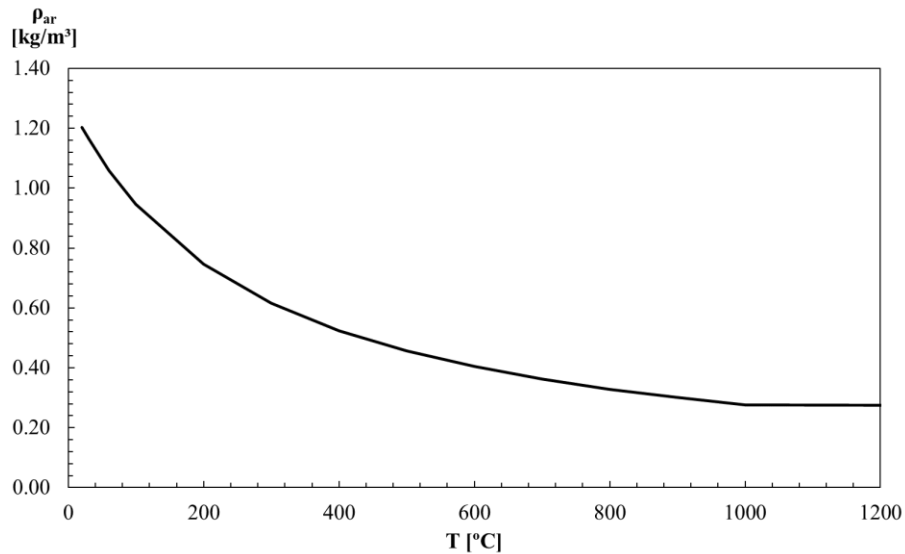


Figura 13 - Massa volúmica do ar

3.2. PROPRIEDADES MECÂNICAS

As propriedades mecânicas do aço e do concreto são descritas nesta seção, com base no que é indicado pelas normas europeias específicas de cada material para projetos com valores de cálculo considerando-os à temperatura de 20°C (ver [46] e [47]) e valores de cálculo para situações de

incêndio nas quais estas propriedades sofrem a influência do aumento da temperatura (ver [44] e [45]).

3.2.1. AÇO

Dentre os elementos que constituem função estrutural nas lajes mistas com chapas de perfil metálico, os elementos de aço caracterizam-se como os mais importantes nas situações que são estudadas neste trabalho pois eles desempenham o papel de resistir a esforços de tração que atuam na secção das lajes.

Compreender como se comportam as propriedades mecânicas do aço durante um incêndio permite não somente o desenvolvimento de modelos numéricos de alta precisão, mas também serve como fator de alerta para projetistas.

Para incêndios com taxas de aquecimento entre 2 e 50°C/min, como é o caso do incêndio padrão ISO 834 [8], o Eurocódigo EN 1993-1-2 [44] determina que elementos de aço carbono, como é o caso da chapa de aço e dos reforços aplicados nas lajes, devem ter sua relação tensão x deformação descrita pelo gráfico da Figura 14. Esta relação define 3 principais estágios do material durante seu aquecimento.

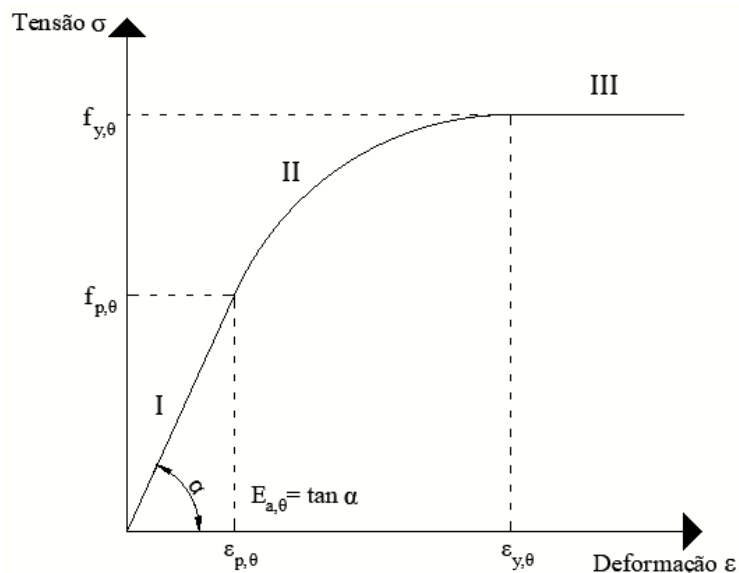


Figura 14 - Gráfico tensão x deformação do dos elementos de aço

Onde:

$f_{y,\theta}$: Resistência característica do aço;

$f_{p,\theta}$: Tensão do limite elástico;

$E_{a,\theta}$: Módulo de elasticidade do aço;

$\varepsilon_{p,\theta}$: Limite de elasticidade do aço;

$\varepsilon_{y,\theta}$: Limite de plasticidade do aço;

Cada um dos estágios I, II e III é descrito segundo os limites de deformação estabelecidos pela norma e que são apresentados na Tabela 3.

Limites de deformação	Tensão (σ)			Módulo de elasticidade
$\varepsilon \leq \varepsilon_{p,\theta}$ (I)	$\varepsilon E_{a,\theta}$			$E_{a,\theta}$
$\varepsilon_{p,\theta} \leq \varepsilon \leq \varepsilon_{y,\theta}$ (II)	$f_{p,\theta} \left[1 - \frac{\varepsilon - \varepsilon_{t,\theta}}{\varepsilon_{u,\theta} - \varepsilon_{t,\theta}} \right]$			$\frac{b(\varepsilon_{y,\theta} - \varepsilon)}{a \left[a^2 - (\varepsilon_{y,\theta} - \varepsilon)^2 \right]^{0,5}}$
$\varepsilon_{y,\theta} \leq \varepsilon \leq \varepsilon_{t,\theta}$ (III)	$f_{p,\theta}$			0
Parâmetros	$\varepsilon_{p,\theta} = \frac{f_{p,\theta}}{E_{a,\theta}}$	$\varepsilon_{y,\theta} = 0,02$	$\varepsilon_{t,\theta} = 0,15$	$\varepsilon_{u,\theta} = 0,20$
Funções	$a^2 = (\varepsilon_{y,\theta} - \varepsilon_{p,\theta}) \left(\varepsilon_{y,\theta} - \varepsilon_{p,\theta} + \frac{c}{E_{a,\theta}} \right)$			
	$b^2 = c(\varepsilon_{y,\theta} - \varepsilon_{p,\theta}) + E_{a,\theta} + c^2$			
	$c = \frac{(f_{y,\theta} - f_{p,\theta})^2}{(\varepsilon_{y,\theta} - \varepsilon_{p,\theta})E_{a,\theta} - 2(f_{y,\theta} - f_{p,\theta})}$			

Tabela 3 - Equações dos limites de deformação para o aço

Portanto, a Tabela 4 permite determinar os coeficientes de redução da resistência ($k_{y,\theta}$) para as chapas de aço e ($k_{sy,\theta}$) para as barras de reforço de acordo com a temperatura do material.

Temperatura do elemento de aço θ_a [°C]	Fator de redução de resistência $k_{y,\theta}=f_{y,\theta}/f_y$	Fator de redução de resistência $k_{sy,\theta}=f_{sy,\theta}/f_{sy}$
20	1.00	1.00
100	1.00	1.00
200	0.89	1.00
300	0.78	1.00
400	0.65	0.94
500	0.53	0.67
600	0.30	0.40
700	0.13	0.12
800	0.07	0.11
900	0.05	0.08
1000	0.03	0.05
1100	0.02	0.03
1200	0.00	0.00

Tabela 4 - Fatores de redução para a resistência do aço

Como exemplo da aplicação destes modelos, Figura 15 apresenta o gráfico de curvas tensão versus deformação, para diferentes temperaturas para barras de aço de classe S500.

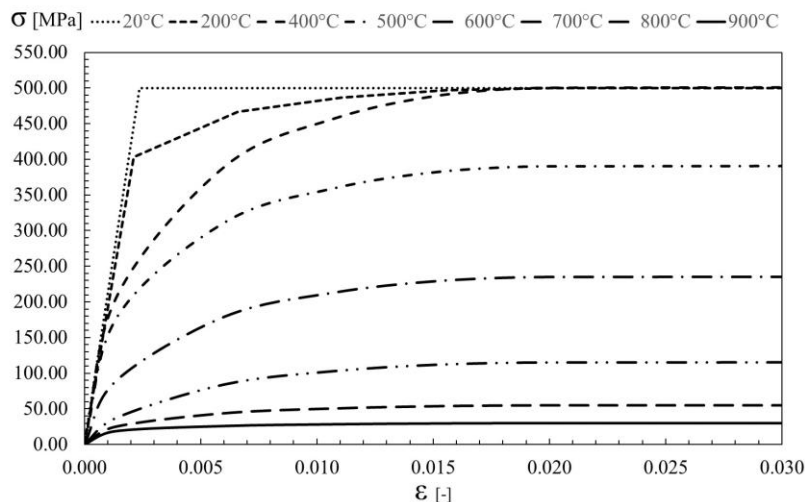


Figura 15 – Curvas tensão x deformação das barras de aço S500 com relação a temperatura

3.2.2. CONCRETO

Para incêndios com taxas de aquecimento entre 2 e 50°C/min, como é o caso do incêndio padrão ISO 834 [8], o Eurocódigo EN 1992-1-2 [45] define parâmetros específicos para o cálculo da

resistência mecânica do concreto sob esforços de compressão e como essa propriedade do material é afetada pelo seu aquecimento durante um incêndio.

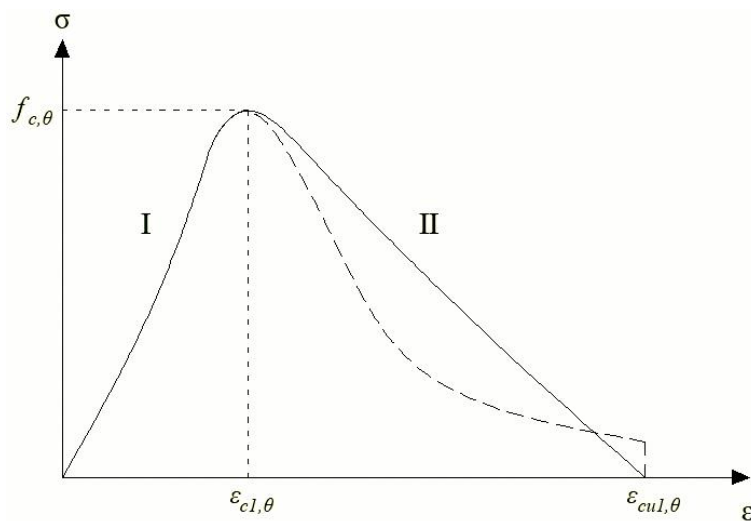


Figura 16 - Curva tensão x deformação para o concreto convencional

A curva tensão x deformação do concreto expressa no gráfico da Figura 16 representa a curva padrão definida pelo Eurocódigo 2, segundo as equações da Tabela 5.

Limites de deformação	Tensão (σ)
$\varepsilon \leq \varepsilon_{c1,\theta}$ (I)	$\frac{3\varepsilon f_{c,\theta}}{\varepsilon_{c1,\theta} \left(2 + \left(\frac{\varepsilon}{\varepsilon_{c1,\theta}} \right)^3 \right)}$
$\varepsilon_{c1,\theta} < \varepsilon \leq \varepsilon_{cu1,\theta}$ (II)	Para fins de cálculo uma curva descendente deve ser adotada. São permitidos tanto modelos lineares quanto não lineares.

Tabela 5 - Equações dos limites de deformações do concreto

No modelo numérico, assim como apresentado, foi considerada a condição de confinamento do concreto, pelo que a tensão resistente à compressão se mantém constante.

E para a definição da resistência $f_{c,\theta}$ do concreto, são utilizados fatores de minoração, dispostos pelo Eurocódigo EN 1992-1-2 [45], que devem ser aplicados de acordo com a temperatura do material (θ_c). Estes fatores, assim como os limites de deformação são apresentados na Tabela 6.

Temperatura do concreto T [°C]	$k_{c,\theta}=f_{c,\theta}/f_{ck}$	$\epsilon_{c1,\theta}$
20.00	1.00	0.00
100.00	1.00	0.00
200.00	0.95	0.01
300.00	0.85	0.01
400.00	0.75	0.01
500.00	0.60	0.02
600.00	0.45	0.03
700.00	0.30	0.03
800.00	0.15	0.03
900.00	0.08	0.03
1000.00	0.04	0.03
1100.00	0.01	0.03
1200.00	0.00	0.00

Tabela 6 - Fatores de redução para a resistência do concreto

Como exemplo, a Figura 17 apresenta o gráfico com as diversas curvas de tensão versus deformação de um concreto de classe C20/25, para diferentes temperaturas do material, assumindo o modelo parcialmente confinado.

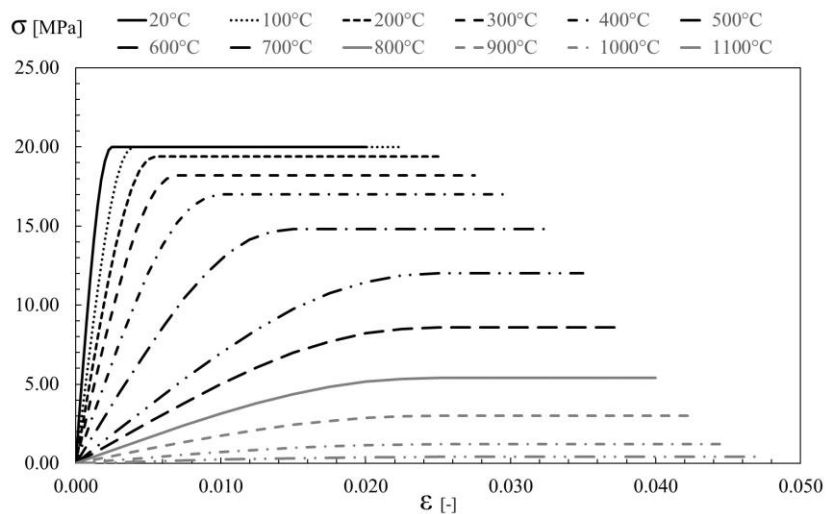


Figura 17 - Curvas tensão x deformação do concreto convencional C20/25 com relação a temperatura

4. MÉTODOS SIMPLIFICADOS DE CÁLCULO

Testes experimentais são extremamente custosos se destinados à definição da resistência ao fogo de estruturas mistas de aço e concreto e por este motivo estudos foram desenvolvidos desde a década de 1980 com a intenção de caracterizar o comportamento de lajes mistas com chapa de aço colaborante, como apresentado por Cooke et al [1]. Desde a publicação da primeira nota técnica destinada ao cálculo da resistência ao fogo destas estruturas [7], diversos avanços nesta área foram alcançados, incluso o desenvolvimento de novas propostas de cálculo, dado que a proposta inicial provava-se conservativa [10].

4.1. NORMA EUROPÉIA

Após a publicação da nota técnica de apoio ao cálculo de segurança contra incêndios a lajes mistas de aço e concreto por parte da ECCS [7], importantes estudos foram realizados por Thomson et al [9], Cooke et al [1], Hamerlinck et al [10] e Both [16], sendo este último trabalho o influenciador do Eurocódigo EN 1994-1-2 [12] que teve sua primeira versão divulgada em 1994 e desde então tem sido atualizado, porém sem alterações para os cálculos destinados para lajes mistas de concreto e chapa de aço colaborante.

A resistência ao fogo deste tipo de estrutura segue três critérios básicos, sendo eles o isolamento (I), a capacidade de carga (R) e a integridade (E). Em lajes com chapa de aço colaborante, que necessariamente se apresenta na face exposta ao fogo, o critério da integridade é alcançado somente após o rompimento da placa de aço, que age como uma membrana para a estrutura, impedindo a passagem de gases e chamas entre os meios separados pela laje, sendo assim o último dos critérios a ser alcançado.

A seguir serão apresentados os métodos simplificados de cálculo propostos pelo Eurocódigo 4 [12] para o critério de isolamento (I) e de capacidade de carga (R) sob a ação de um incêndio padrão ISO 834 [8].

4.1.1. ISOLAMENTO TÉRMICO (I)

O critério de isolamento térmico, como definido pela norma EN 1363-1 [30], requer a realização de testes experimentais para a determinação do incremento máximo (180°C) e médio (140°C) de

temperatura na face não exposta de lajes mistas com chapas de aço colaborante. Como alternativa, o Eurocódigo EN 1994-1-2 [12] oferece um método simplificado para o cálculo da resistência ao fogo (t_i) destas estruturas.

Este cálculo é realizado segundo a Equação (31), onde Φ e l_3 são, respectivamente, o fator de vista e o comprimento em secção da flange superior da chapa colaborante.

$$t_i = a_0 + a_1 \cdot h + a_2 \cdot \Phi + a_3 \cdot \frac{A}{L_r} + a_4 \cdot \frac{1}{l_3} + a_5 \cdot \frac{A}{L_r} \cdot \frac{1}{l_3} \quad (31)$$

O fator de geometria A/L_r compreende a relação entre o volume de concreto por unidade de comprimento por nervura da laje e a área por unidade de comprimento de chapa de aço exposta em cada nervura, ver Figura 2, e é calculado segundo a Equação (32).

$$\frac{A}{L_r} = \frac{h_2 \cdot \left(\frac{l_1+l_2}{2}\right)}{l_2 + 2\sqrt{h_2^2 + \left(\frac{l_1-l_2}{2}\right)^2}} \quad (32)$$

Ainda, os coeficientes a_i são determinados, segundo a norma EN 1994-1-2 [12] de acordo com o tipo de concreto e seus valores podem ser obtidos através da Tabela 7.

Tipo de Concreto	a0 [min]	a1 [min/mm]	a2 [min]	a3 [min/mm]	a4 [mm.min]	a5 [min]
Concreto Convencional	-28.80	1.55	-12.60	0.33	-735.00	48.00
Concreto Leve	-79.20	2.18	-2.44	0.56	-542.00	52.30

Tabela 7 - Coeficientes a_i para determinação da resistência ao fogo segundo o critério de isolamento (I)

4.1.2. CAPACIDADE DE CARGA (R)

O cálculo simplificado da capacidade de carga requer a avaliação, para cada uma das classes de resistência do fogo determinadas pela ISO 834 [8], em específico as classes R60, R90 e R120 minutos, do máximo momento fletor suportado pela laje.

A análise da resistência ao fogo segundo o critério de capacidade de carga (R) para estudos experimentais e numéricos segue os critérios estabelecidos pela norma europeia EN 1363-1 [30], para os valores de máximo deslocamento vertical (D) e máxima taxa de deslocamento vertical (dD/dt) em lajes simplesmente apoiadas, como é apresentado nas equações (33) e (34),

respectivamente, onde l é o comprimento do vão livre da laje, em mm, e d é a espessura total da laje, também em mm.

$$D_{max} = \frac{l^2}{400 \cdot d} \quad (33)$$

$$\frac{dD}{dt}_{max} = \frac{l^2}{9000 \cdot d} \quad (34)$$

Já para o cálculo simplificado proposto pelo Eurocódigo EN 1994-1-2 [12], é definida, no período estipulado segundo a classe de resistência ao fogo em estudo, a máxima temperatura em cada um dos elementos da laje responsáveis pelo suporte da estrutura.

Como pode ser observado na Figura 18 e na Figura 19, com o incremento do tempo, há um deslocamento ascendente da linha neutra, devido ao aquecimento dos elementos de aço, que conseqüentemente têm suas propriedades resistentes afetadas.

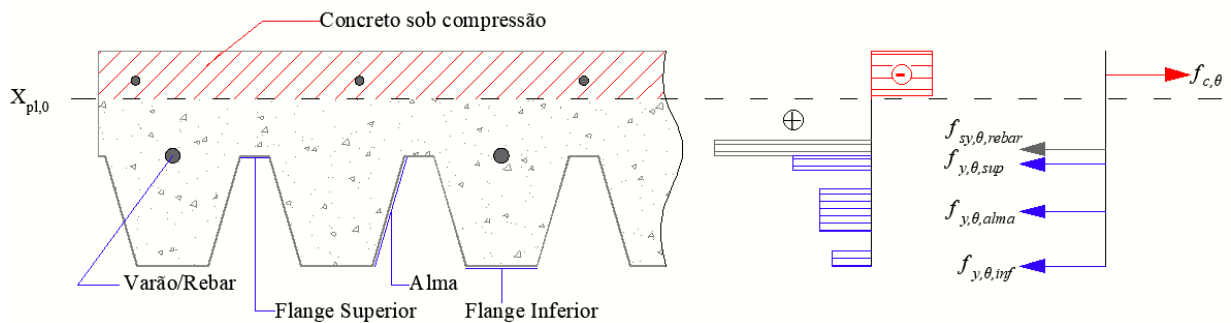


Figura 18 - Distribuição de tensões na seção da laje para situação de ELU para instante t_0

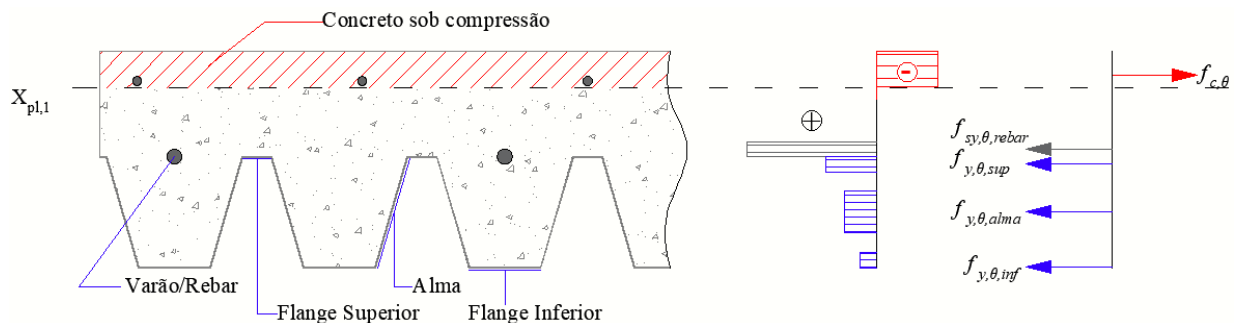


Figura 19 - Distribuição de tensões na seção da laje para situação de ELU para instante $t_1 > t_0$

Em lajes simplesmente apoiadas as forças atuantes (peso próprio da laje e carga aplicada) geram unicamente momentos positivos, portanto são considerados para o cálculo somente os elementos de aço que se encontram abaixo do eixo neutro (X_{pl}) da estrutura. São elementos que cumprem este requisito e que requerem avaliações independentes de temperatura: o varão de aço (rebar), a alma, o banzo superior e o banzo inferior da chapa de aço.

Para a chapa de aço, as temperaturas (θ_a) em graus Celsius de seus componentes podem ser definidas segundo a equação (35), apresentada no Anexo D da norma EN 1994-1-2 [12].

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

Onde Φ corresponde ao fator de vista da face em questão, e os coeficientes parciais b_i são coeficientes dependentes do tipo de concreto da laje, da classe de resistência ao fogo sob análise e do componente da chapa de aço, seja ele a flange superior, inferior ou a alma. Considera-se para toda situação que o fator de vista para a flange inferior do deck metálico é sempre $\Phi=1$.

Os demais fatores de vista, para a flange superior e para a alma, são definidos segundo as equações (4) e (5) para as lajes trapezoidais e equações (6) e (7) para as lajes reentrantes. e o fator de geometria A/L_r é expressado pela equação (32).

A Tabela 8, fornecida pelo Eurocódigo 4, é utilizada para a determinação dos coeficientes parciais b_i .

Tipo de Concreto	Resistência ao Fogo [min]	Parte da Chapa de Aço	b ₀ [°C]	b ₁ [°C.mm]	b ₂ [°C.mm]	b ₃ [°C]	b ₄ [°C]
Concreto Convencional	60	Flange Inferior	951	-1197	-2.32	86.4	-150.7
		Alma	661	-833	-2.96	537.7	-351.9
		Flange Superior	340	-3269	-2.62	1148.4	-679.8
	90	Flange Inferior	1018	-839	-1.55	65.1	-108.1
		Alma	816	-959	-2.21	464.9	-340.2
		Flange Superior	618	-2786	-1.79	767.9	-472.0
	120	Flange Inferior	1063	-679	-1.13	46.7	-82.8
		Alma	925	-949	-1.82	344.2	-267.4
		Flange Superior	770	-2460	-1.67	592.6	-379.0
Concreto Leve	30	Flange Inferior	800	-1326	-2.65	114.5	-181.2
		Alma	483	-286	-2.26	439.6	-244.0
		Flange Superior	331	-2284	-1.54	488.8	-131.7
	60	Flange Inferior	955	-622	-1.32	47.7	-81.1
		Alma	761	-558	-1.67	426.5	-303.0
		Flange Superior	607	-2261	-1.02	664.5	-410.0
	90	Flange Inferior	1019	-478	-0.91	32.7	-60.8
		Alma	906	-654	-1.36	287.8	-230.3
		Flange Superior	789	-1847	-0.99	469.5	-313.0
	120	Flange Inferior	1062	-399	-0.65	19.8	-43.7
		Alma	989	-629	-1.07	186.1	-152.6
		Flange Superior	903	-1561	-0.92	305.2	-197.2

Tabela 8 - Coeficientes parciais para determinação das temperaturas das chapas de aço

O Anexo D do Eurocódigo EN 1994-1-2 [12] ainda define que, para as barras de reforço, a temperatura (θ_s) é definida segundo a Equação (36).

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

Nesta equação u_3 representa a distância das barras de reforço até a flange inferior, α é o ângulo da alma da chapa com relação à horizontal, e o fator z indica a posição da barra em relação a chapa metálica, sendo descrito segundo a Equação (37). Além disso, u_1 e u_2 são as menores distâncias entre a barra de aço e as almas do deck. Para facilitar a visualização destes fatores geométricos, é apresentada a Figura 20.

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

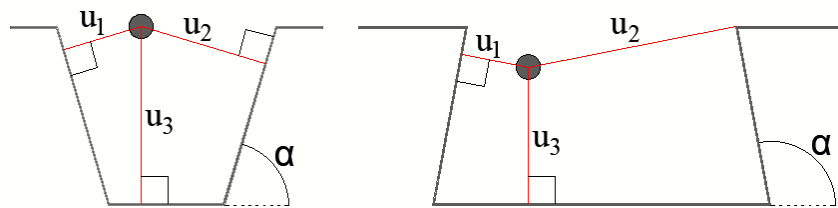


Figura 20 - Distâncias u_i para o cálculo da temperatura das barras de reforço

Ainda com relação a Equação (36), os fatores de cálculo c_i são definidos segundo o tipo de concreto utilizado e a classe de resistência ao fogo que se deseja analisar. Estes fatores são apresentados na Tabela 9, como apresentado no Anexo D do Eurocódigo EN 1994-1-2 [12].

Tipo de Concreto	Classe de Resistência	c_0 [°C]	c_1 [°C]	c_2 [C.mm ^{0.5}]	c_3 [°C.mm]	c_4 [°C/°]	c_5 [°C.mm]
Concreto Convencional	60	1191	-250	-240	-5.01	1.04	-925
	90	1342	-256	-235	-5.30	1.39	-1267
	120	1387	-238	-227	-4.79	1.68	-1326
Concreto Leve	30	809	-135	-243	-0.70	0.48	-315
	60	1336	-242	-292	-6.11	1.63	-900
	90	1381	-240	-269	-5.46	2.24	-918
	120	1397	-230	-253	-4.44	2.47	-906

Tabela 9 - Fatores c_i para cálculo da temperatura em barras de reforço

Após determinadas as temperaturas dos elementos estruturais, é determinada a posição vertical do eixo neutro (X_{pl}) na secção da laje, segundo a Equação (38).

$$\sum_{i=1}^n A_i k_{y,\theta,i} \left(\frac{f_{y,i}}{\gamma_{M,fi,a}} \right) + \alpha_{slab} \sum_{j=1}^m A_j k_{c,\theta,j} \left(\frac{f_{c,j}}{\gamma_{M,fi,c}} \right) = 0 \quad (38)$$

Nesta equação α_{slab} é o coeficiente definido por norma com valor definido de 0.85 que considera apenas parte da área (A_j) de concreto acima da linha neutra como significativo para o cálculo do equilíbrio de forças, agindo de modo resistivo às forças de compressão nesta área.

Os coeficientes $k_{y,\theta,i}$ e $k_{c,\theta,j}$ por sua vez, têm o papel de minorar a capacidade resistente dos elementos de aço e de concreto, respectivamente, de acordo com as temperaturas θ_a e θ_c nas quais se encontram. A Tabela 4 apresenta os valores para $k_{y,\theta}$ segundo o Eurocódigo EN 1994-1-2 [12], já para o concreto, segundo a mesma norma, para realização do cálculo simplificado, deve ser considerado sempre $k_{c,\theta,j} = 1$.

Com a posição do eixo neutro da estrutura definida, torna-se possível a realização do cálculo do momento resistente de cálculo ($M_{fi,t,Rd}$) da laje, de acordo com a equação (39).

$$M_{fi,t,Rd} = \sum_{i=1}^n A_i z_i k_{y,\theta,i} \left(\frac{f_{y,i}}{\gamma_{M,fi,a}} \right) + \alpha_{slab} \sum_{j=1}^m A_j z_j k_{c,\theta,j} \left(\frac{f_{c,j}}{\gamma_{M,fi,c}} \right) \quad (39)$$

Para o cálculo da capacidade de carga da laje à temperatura ambiente, utilizado no estudo paramétrico desenvolvido neste trabalho, foram utilizadas as equações (38) e (40) como disposto na norma europeia EN 1994-1-1 [48], porém, devido ao fato de todos os componentes da estrutura se encontrarem à temperatura de 20°C, os coeficientes $k_{y,\theta,i}$ e $k_{c,\theta,j}$ assumem valor unitário.

$$M_{f\ max} = \sum_{i=1}^n A_i z_i \left(\frac{f_{y,i}}{\gamma_{M,fi,a}} \right) + \sum_{j=1}^n A_j z_j \left(\frac{f_{s,j}}{\gamma_{M,fj,a}} \right) \quad (40)$$

Por fim, o nível de carregamento (η) aplicado na estrutura é a fração que a carga aplicada (M) representa da máxima carga suportada ($M_{f\ max}$).

$$\eta = \frac{M}{M_{f\ max}} \quad (41)$$

5. MÉTODOS AVANÇADOS DE CÁLCULO

Os modelos de cálculo avançado são divididos em dois: modelo térmico e modelo mecânico. Para cada um dos modelos devem ser definidas condições de fronteira que se assemelhem ao máximo da realidade nos modelos de validação e que sigam um padrão para os modelos utilizados no estudo paramétrico.

5.1. CONDIÇÕES DE FRONTEIRA

As condições de fronteira estabelecidas em análises numéricas de qualquer natureza têm o importante papel restringir a intensidade e locais de ocorrência de ações e reações promovidas por cargas térmicas e/ou mecânicas.

A abrangência deste trabalho intercepta condições de fronteira que influenciam o modo como ocorre a transferência de calor através de lajes mistas e a amplitude de deslocamento vertical medido no centro da laje quando submetido à ação de cargas mecânicas.

CURVA DE TEMPERATURA ISO 834

Com o intuito de realizar análises baseadas em um padrão específico de configuração de incêndio e assim possibilitar a análise qualitativa da estrutura segundo os critérios de resistência ao fogo estabelecidos na norma EN 1363-1 [30], decidiu-se utilizar a curva de incêndio padrão ISO 834 [8]. Pois além de ser indicada pelas normas vigentes, pode ser facilmente implementada em métodos computacionais, sendo definida pela Equação (42).

$$t = 345 \cdot \log_{10}(8t + 1) + 20 \quad (42)$$

A Figura 21 descreve em forma de gráfico a curva de incêndio padrão ISO 834, relacionando o tempo de duração com a temperatura alcançada.

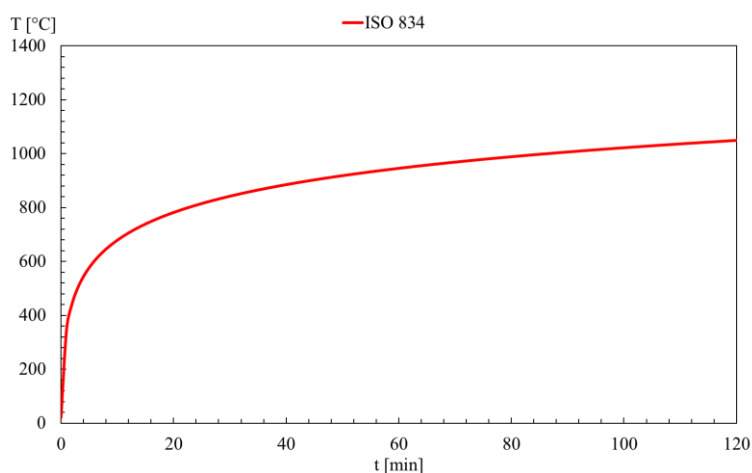


Figura 21 - Curva de incêndio padrão ISO 834

CONVECÇÃO

Para a elaboração dos modelos numéricos, utilizou-se como base os parâmetros de convecção destinados a este fim, como indicado no Eurocódigo EN 1991-1-2 [25]. Com isto foram utilizados diferentes coeficientes de convecção na face exposta ao incêndio e na face não exposta ao incêndio.

Para qualquer curva de incêndio, ou seja, independentemente de ser uma curva de incêndio natural ou de incêndio padrão ISO 834, o coeficiente de convecção aplicado na face não exposta ao fogo das lajes mistas é sempre de $\alpha_c=9$ [W/m²K] pois considera efeitos da radiação sobre esta superfície, como pode ser visto na Figura 22.

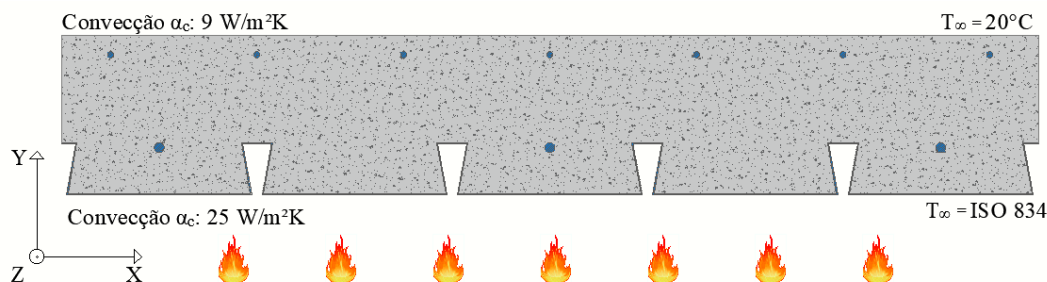


Figura 22 - Coeficientes de convecção para curvas de incêndio padrão ISO 834

Para a face exposta ao incêndio, as lajes submetidas a curva padrão de incêndio ISO 834 possuem coeficiente de convecção empregado de $\alpha_c=25$ [W/m²K]. A norma europeia EN 1991-1-2 [25] define que para as estruturas submetidas a curvas de incêndio natural, deve ser considerado o coeficiente de convecção $\alpha_c=35$ [W/m²K] e aquelas que forem submetidas a curvas de incêndio de hidrocarbonetos devem utilizar $\alpha_c=50$ [W/m²K].

EMISSIVIDADE

O processo de transferência de calor por radiação depende de vários fatores determinantes que interferem diretamente na proporção de calor absorvido e emitido por um corpo.

Tratando-se das propriedades intrínsecas de cada material, pode-se denotar a emissividade (ϵ), que corresponde à razão entre a quantidade de energia emitida e/ou absorvida por um material em forma de radiação em relação a um corpo negro.

Para o concreto e o aço, o Eurocódigo EN 1994-1-2 [12] indica a utilização do valor de 0.70 para a emissividade, já para o fogo, o valor da emissividade deve ser 1.00. Estes foram os valores aplicados aos modelos térmicos e mecânicos deste trabalho.

Apesar da indicação destes valores de emissividade pela norma europeia, alguns autores recomendam a utilização de valores diferentes deste parâmetro para a superfície inferior da chapa de metal que se encontra exposta ao incêndio.

Hamerlinck et al [10] afirma a dependência do valor da emissividade com relação à temperatura, na face exposta ao fogo da chapa de aço colaborante em uma laje mista, como resultado da presença da camada de Zinco que recobre o aço. Segundo os autores, esta camada de galvanização não somente reduz drasticamente o valor da emissividade para 0.10 para esta face em temperaturas abaixo de 400°C, como também a torna linearmente variável entre as temperaturas de 400°C a 800°C, atingindo um valor máximo de 0.40 e assim tornando-se constante novamente, devido ao derretimento desta camada.

Já o *National Institute of Standards and Technology* [3] propõe uma abordagem que amplifica a máxima emissividade da chapa de aço galvanizado ao fim do derretimento da camada de Zinco, que ocorre no patamar de 800°C, atingindo assim o valor de 0.70. A Figura 23 apresenta os valores de emissividade para cada uma das propostas citadas.

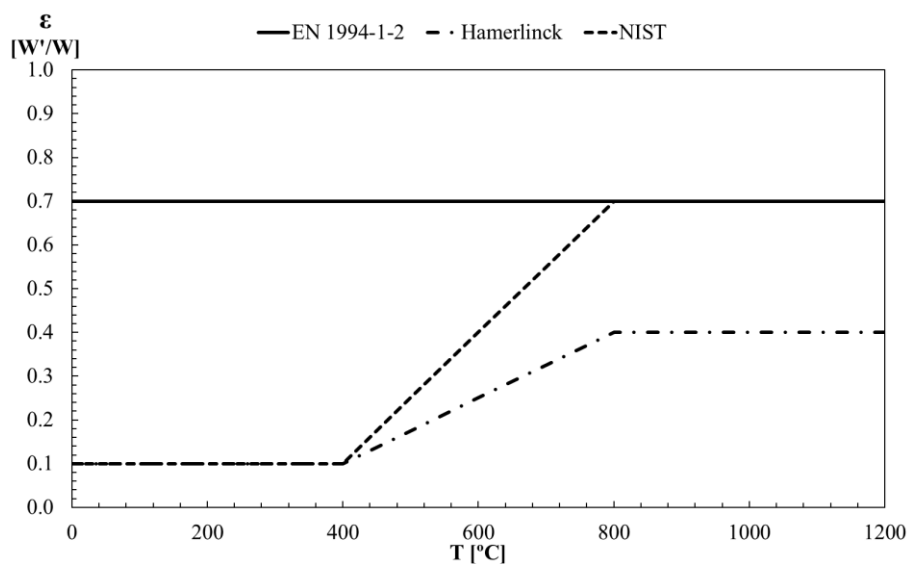


Figura 23 - Gráfico para valores de Emissividade da chapa de aço galvanizado

CONDIÇÕES DE APOIO

Neste trabalho, todos os modelos desenvolvidos foram elaborados com condições de apoio simples, como mostra a Figura 24. Em uma das arestas aplicou-se um apoio capaz de impedir deslocamentos nas três dimensões ($dX=dY=dZ=0$) enquanto no lado oposto o apoio aplicado na aresta da laje impedia somente os deslocamentos na direção transversal e na vertical, possibilitando livre deslocamento longitudinal ($dX=dY=0$).



Figura 24 - Condições de apoio dos modelos numéricos de lajes mistas

INÉRCIA

Também para os modelos mecânicos, aplicou-se a ação da gravidade sobre a estrutura com aceleração constante de $G_y=9.81 \text{ m/s}^2$. Deste modo, considera-se o peso próprio da estrutura como carga atuante durante as simulações

FATOR DE VISTA OU FATOR DE FORMA

Um importantíssimo passo na definição das condições de fronteira dos modelos numéricos é o cálculo dos fatores de vista dos elementos da face exposta ao incêndio. Sem este parâmetro definido o software de simulação não será capaz de reproduzir com fidelidade o perfil de evolução das temperaturas na laje.

Para o cálculo dos fatores de vista foram utilizadas as equações (4) e (5) para lajes trapezoidais e equações (6) e (7) para lajes com chapa metálica de perfil trapezoidal.

5.2. PROGRAMA DE ELEMENTOS FINITOS

Para realização das simulações foi utilizado o programa Mechanical APDL 18.2 do software ANSYS V18.2 Academic [49].

5.2.1. PARÂMETROS DE SIMULAÇÃO

Para a realização das simulações, este programa obriga a definição do tipo de análise, critérios de convergência, tamanho de passos incrementais de solução, entre outras características dos processos.

Foram utilizados diferentes parâmetros de simulação para a análise térmica e pra a análise mecânica da estrutura, com o intuito de otimizar o tempo de processamento, tamanho final dos arquivos de resultados e precisão dos dados resultantes.

Para a análise térmica foram realizadas análises transientes completas da laje com duração total da simulação de 7200 segundos, definindo um incremento de tempo de 60 segundos que deveria ser atingido com incrementos variáveis de tempo entre 1 s e 60s. Todos os instantes de tempo processados pelo programa foram gravados no arquivo resultante (.rth) responsável por reunir todo o histórico de temperaturas da laje.

Quanto aos critérios de convergência, foi estabelecido um controle para o fluxo de calor na estrutura, com tolerância de precisão de 10^{-3} e valor de referência de 10^{-6} .

Já para a análise mecânica realizaram-se análises estáticas com carregamento constante e campo de temperaturas variável no tempo, sendo estes dados oriundos das simulações térmicas, para um período de 7200 segundos e definidos como passos de carga de 60 em 60 segundos. Foi estabelecido um período de 60 segundos para os incrementos de tempo, contando com incrementos que poderiam variar entre 0.1 s e 60 s. Foram gravados os dados de saída da análise mecânica somente a cada 2 períodos incrementais, pois desta forma foi possibilitada a redução dos arquivos de resultados (.rst), responsáveis por armazenar as informações de deslocamento da estrutura, em aproximadamente 50%, sem perder a precisão dos resultados obtidos.

5.2.2. ELEMENTOS FINITOS

O desenvolvimento deste trabalho compreende duas fases de simulações: simulações térmicas e simulações termomecânicas.

Para cada uma das fases citadas foram utilizados elementos específicos disponíveis do programa, capazes de simular com precisão as propriedades dos materiais os quais representavam. Deste

modo foram escolhidos 3 tipos de elemento para as simulações térmicas e outros 3 para as simulações mecânicas, distinguindo a chapa colaborante de aço, o concreto e as barras de reforço tanto para momentos positivos quanto momentos negativos.

Para o deck metálico foram destinados elementos de casca (*Shell Elements*), que compreendem elementos tridimensionais com espessura variável para áreas delimitadas por linhas. Foram utilizados para as simulações térmicas o elemento SHELL131 e para as termomecânicas o elemento SHELL181.

Para o concreto optou-se por aplicar elementos sólidos tridimensionais (*Solid Elements*), sendo utilizado para a fase térmica o elemento SOLID70 e para a fase termomecânica o elemento SOLID185.

As barras metálicas que compreendiam os reforços pra momento positivo, aplicados na região inferior das lajes, e para o momento negativo, instaladas na parte superior das lajes, foram representadas por elementos unidimensionais de ligação (*Link Elements*). Definiu-se para as simulações térmicas o elemento LINK33 e para as simulações termomecânicas o elemento LINK180.

Ainda, para alguns modelos procurou-se simular uma fina camada de ar posicionada entre a face inferior do concreto e a face superior das chapas de aço que também utilizavam o elemento SHELL131.

A seguir serão descritas as propriedades específicas de cada um dos elementos aplicados nos modelos numéricos, assim como suas funções de aproximação.

5.2.2.1. SHELL131

O SHELL131 é um elemento tridimensional com capacidade de condução térmica em áreas e através de sua espessura. Sendo definido por 4 nós (A, B, C e D) quadriláteros, possui no máximo 32 graus de liberdade em cada um dos nós. A utilização deste elemento se deve à compatibilidade com simulações mecânicas, havendo a possibilidade de exportar temperaturas para outros elementos de casca, com a capacidade necessária para caracterizar a ocorrência de flexão térmica e mecânica.

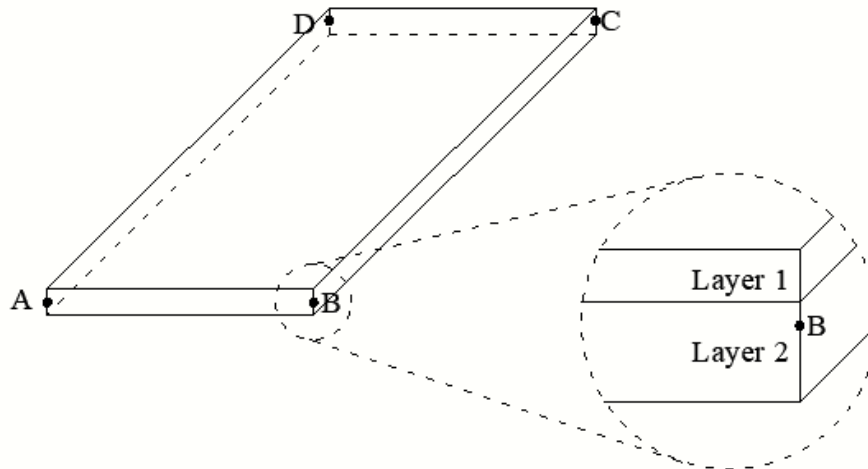


Figura 25 - Disposição de nós e camadas do elemento SHELL131

Este elemento possibilita a criação de várias camadas (*Layers*) com espessuras e propriedades de material independentes. Portanto para modelos que simulavam perfeito contato entre as chapas de aço e o concreto foi utilizada uma camada somente, com propriedades térmicas correspondentes às espessuras das chapas de aço.

Já para os modelos que contavam com a camada de ar proveniente do descolamento da chapa de aço na face inferior do concreto, foi adicionada uma nova camada ao elemento SHELL131, com espessura e propriedades térmicas própria, acima da camada utilizada para simular as chapas de metal.

Devido à baixa influência da espessura da chapa de aço na evolução do campo de temperaturas [50], e a alta condutividade térmica do aço, considerou-se uma variação linear da temperatura na direção normal à área superficial das chapas de aço. O elemento SHELL131, ver Figura 26, possibilita também a definição de uma evolução quadrática das temperaturas, porém escolher tal configuração poderia gerar um aumento no tempo de processamento do modelo completo que não seria justificado por pequenas divergências nas soluções térmicas.

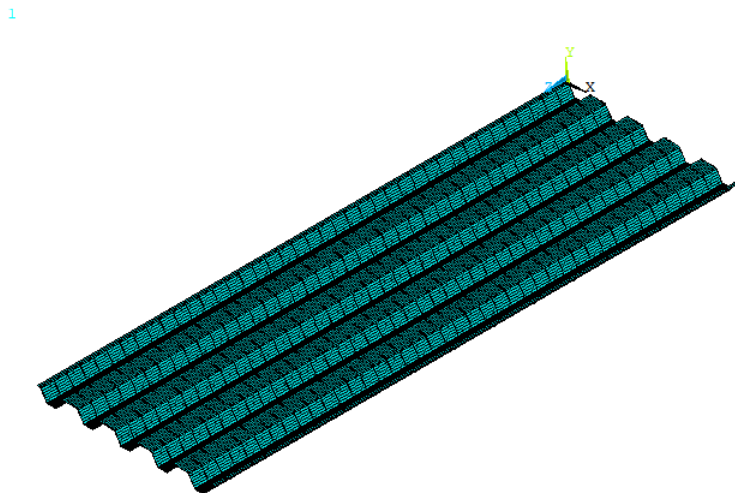


Figura 26 – Modelo de chapa metálica composta por elementos SHELL131

As temperaturas neste elemento são calculadas utilizando funções lineares no plano, como apresentado na equação (43), com método de integração foi completo (2X2) [49]:

$$T = \frac{1}{4} [T_A(1-s)(1-t) + T_B(1-s)(1-t) + T_C(1-s)(1-t) + T_D(1-s)(1-t)] \quad (43)$$

Ainda, ao longo da secção, ou seja, ao longo da espessura do elemento, a temperatura é descrita por funções lineares, ver equação (44), com método de integração completa na extensão (1 ponto de integração) [49].

$$T = \frac{1}{2} [T_{TOP}(1-r) + T_{BOT}(1-r)] \quad (44)$$

Os valores de s e t são as coordenadas naturais da posição na qual a temperatura é avaliada. A Figura 27 e a Figura 28 podem ser utilizadas para melhor entendimento dos valores referenciados.

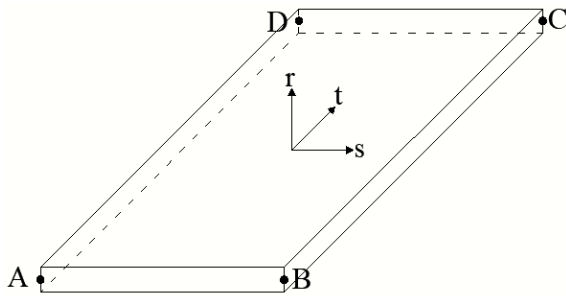


Figura 27 - Geometria referencial do plano para SHELL131

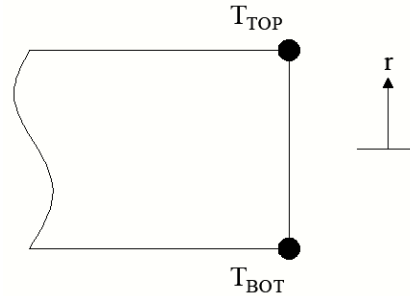


Figura 28 - Geometria referencial da espessura para SHELL131

Para garantir a compatibilidade com o elemento de concreto, deve ser habilitada a opção *Paint* para o elemento SHELL131. Esta opção possibilita a conexão entre os nós deste elemento com elementos sólidos.

5.2.2.2. SOLID70

O SOLID70 é um elemento sólido com capacidade de condução térmica em 3 dimensões, definido por 8 nós, compreendendo formas hexaédricas, como pode ser visto na Figura 29. Cada nó possui um único grau de liberdade referente à temperatura. Este elemento foi escolhido devido à compatibilidade com a transição dos resultados para posteriores elementos de análise estrutural (como ocorre para o SOLID185).

Apesar de suportar propriedades de materiais ortotrópicos, onde estas são variáveis ao longo da extensão do material, foram definidas propriedades de materiais isotrópicos para este elemento, utilizado para a representação do concreto no modelo térmico.

O elemento SOLID70 apresenta funções de forma lineares, com método de integração completo no plano (2X2X2).

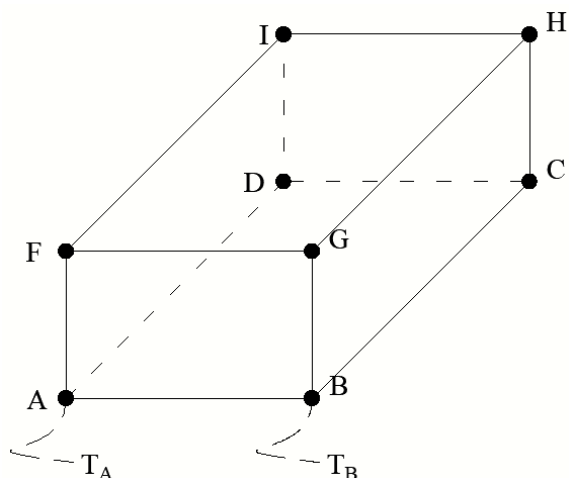


Figura 29 – Disposição de nós do elemento SOLID70

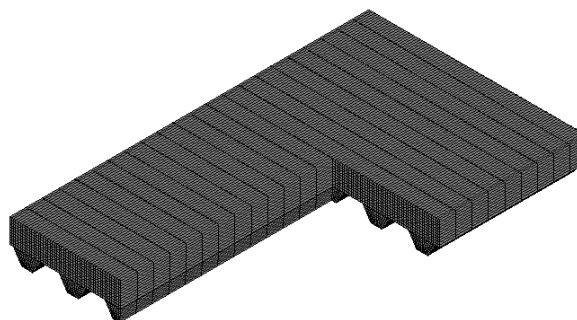


Figura 30 – Modelo de concreto utilizando elementos SOLID70

5.2.2.3. LINK33

O LINK33 é um elemento exclusivamente destinado para análises térmicas, que considera as ligações entre 2 nós que formam elementos uniaxiais. A cada nó é apresentado um único grau de liberdade, referente à temperatura. A função deste elemento é possibilitar a condução de calor entre nós, ver Figura 31, e nos modelos numéricos gerados neste trabalho aplicou-se à representação das barras de aço, ou seja, varões e malhas de reforço.

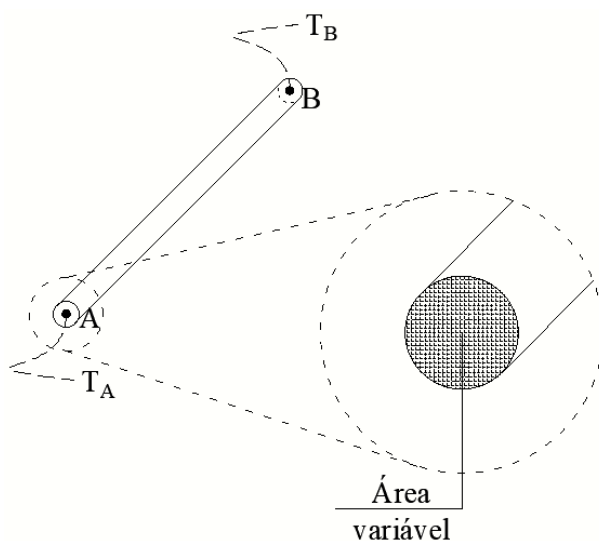


Figura 31 - Disposição de nós para o elemento LINK33

Como pode ser visto na Figura 31, o elemento LINK33 apresenta área de secção variável, podendo ser criadas diversas secções tipo, de acordo com o tipo de barra que se deseja criar. Assim são diferenciadas as barras de reforço (varões) e as barras da malha de aço, ver Figura 32.

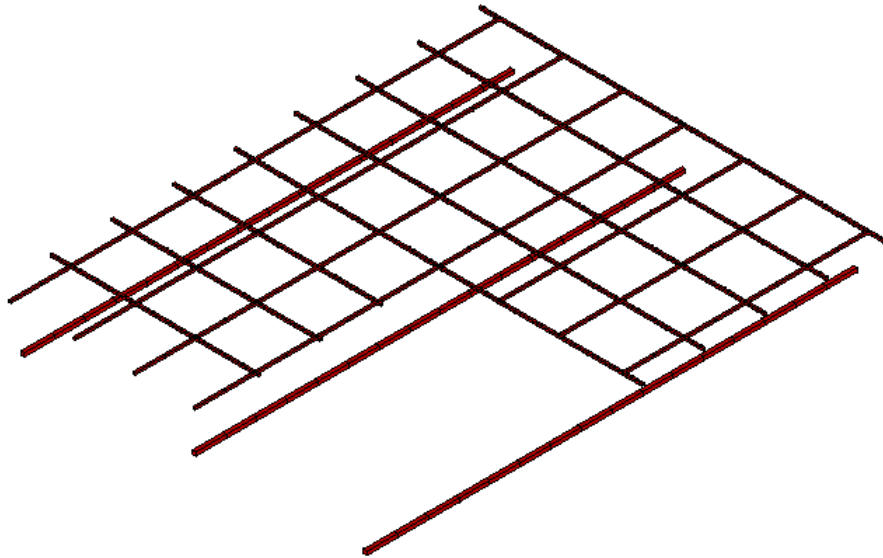


Figura 32 - Elementos finitos LINK33

5.2.2.4. SHELL181

O SHELL131 é um elemento em casca utilizado para análises mecânicas de componentes com espessura moderada. Apresenta em sua estrutura 4 nós com 6 graus de liberdade (DOF) cada nó, permitindo a análise de translação e rotação dos nós, com referência aos eixos X, Y e Z.

Utiliza-se integração completa no elemento, mesmo a integração reduzida sendo suportada, e apesar do elemento suportar a definição de múltiplas camadas com diferentes propriedades de materiais, nos modelos de validação, ao realizar a conversão dos elementos SHELL131 para SHELL181, foi preservada uma única camada, referente a chapa de aço, assim destituindo a camada antes criada para o ar.

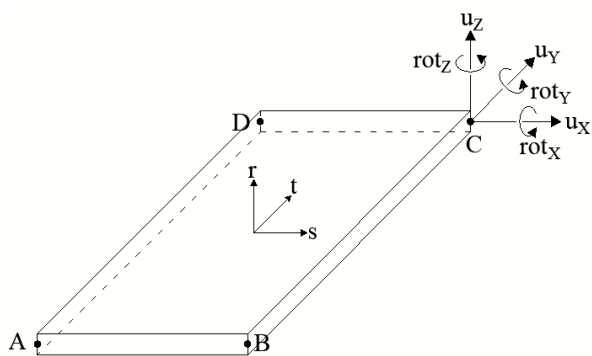


Figura 33 - Configuração de nós do elemento SHELL181

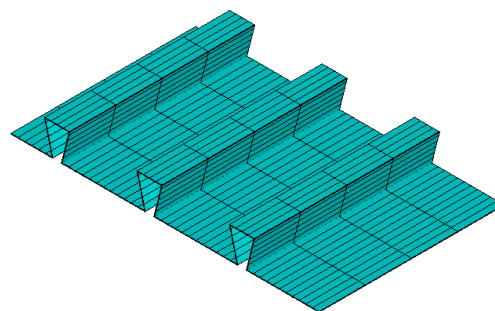


Figura 34 - Elementos finitos SHELL181

5.2.2.5. SOLID185

Assim como o SOLID 70, o elemento SOLID185 é um elemento tridimensional com 8 nós, porém apresenta 3 graus de liberdade em cada nó, referente aos valores de translação do elemento em relação aos eixos X, Y e Z e é destinado a análises de deformação.

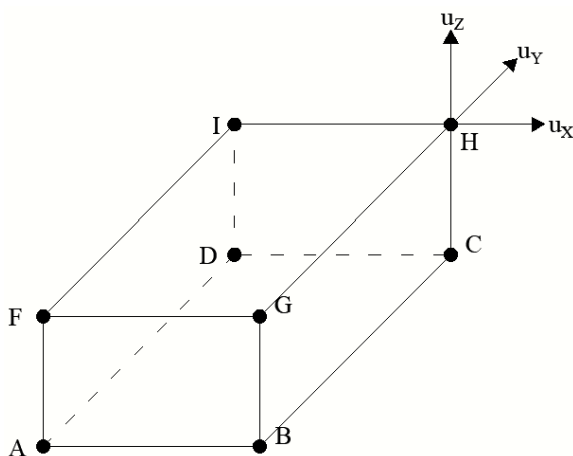


Figura 35 - Configuração de nós do elemento SOLID185

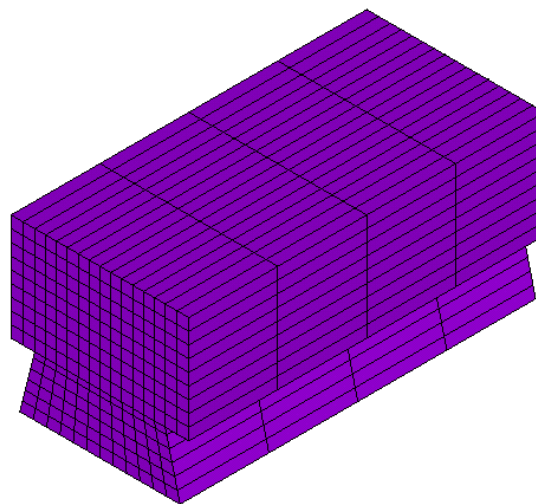


Figura 36 - Elementos finitos SOLID185

A condição de confinamento dos elementos de concreto pôde ser simulada com a aplicação da formulação aprimorada para tensões disponibilizada para o elemento SOLID185.

5.2.2.6. LINK180

O elemento LINK180 é um elemento tridimensional com aplicação estrutural, em particular na modelagem de barras de reforço para estruturas de concreto armado. Este apresenta 2 nós com 3 graus de liberdade em cada nó, como é apresentado na Figura 37.

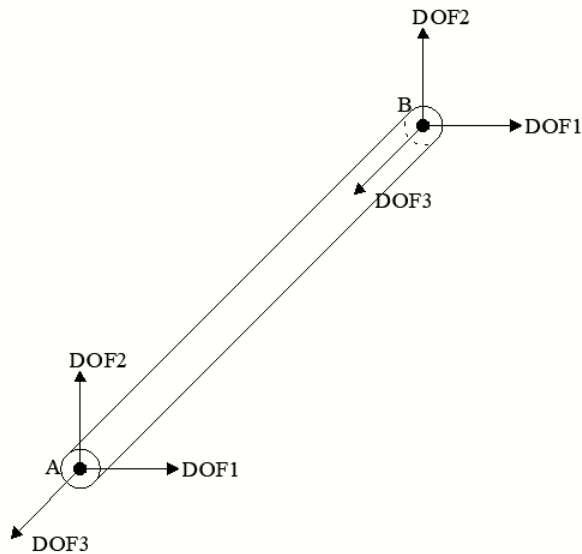


Figura 37 - Configuração de nós do elemento LINK180

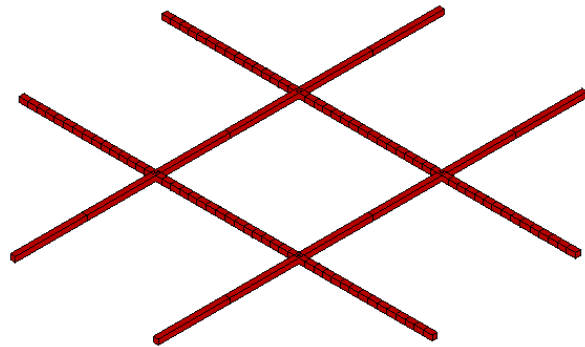


Figura 38 - Elementos finitos LINK180

Apesar de ser um elemento destinado a análises estruturais, o LINK180 compreende capacidade resistiva somente a tensões uniaxiais, não agindo diretamente na flexão.

6. MODELOS DE VALIDAÇÃO

Com o intuito de otimizar e comprovar a fiabilidade dos modelos numéricos que seriam utilizados nos estudos paramétricos que se seguem, foram reproduzidos experimentos documentados na bibliografia que apresentam condições de realização dos testes e estruturas similares aos modelos fictícios que seriam criados.

A seguir serão apresentados estes modelos térmicos e mecânicos baseados em resultados experimentais, assim como comparações dos resultados obtidos e definição do nível de precisão destes resultados.

6.1. HAMERLINCK, 1991 (PRINS PSV73)

No ano de 1991, Alphonse Florentinus Hamerlinck desenvolveu em seu trabalho de doutoramento na Universidade Tecnológica de Eindhoven intitulado “*The behaviour of fire-exposed composite steel/concrete slabs*” experimentos em escala aumentada de lajes mistas com chapa de aço colaborante, que foram submetidas a ação de carga mecânica e térmica [11].

O experimento realizado por Hamerlinck que é retratado neste trabalho e utilizado como modelo de validação para a metodologia de modelagem numérica é identificado por Teste 2. A seguir serão apresentadas todas as características do modelo real, assim como o modelo numérico e os resultados obtidos a partir das simulações realizadas.

6.1.1. CONFIGURAÇÃO DO EXPERIMENTO

O Teste 2 realizado no trabalho de Hamerlinck compreendia uma laje mista de aço e concreto com chapa de aço colaborante de perfil trapezoidal, modelo PSV73, do fabricante PRINS. Ao todo, duas amostras foram submetidas aos testes mecânicos, com apoio simples, onde foram medidos temperatura e deslocamentos.

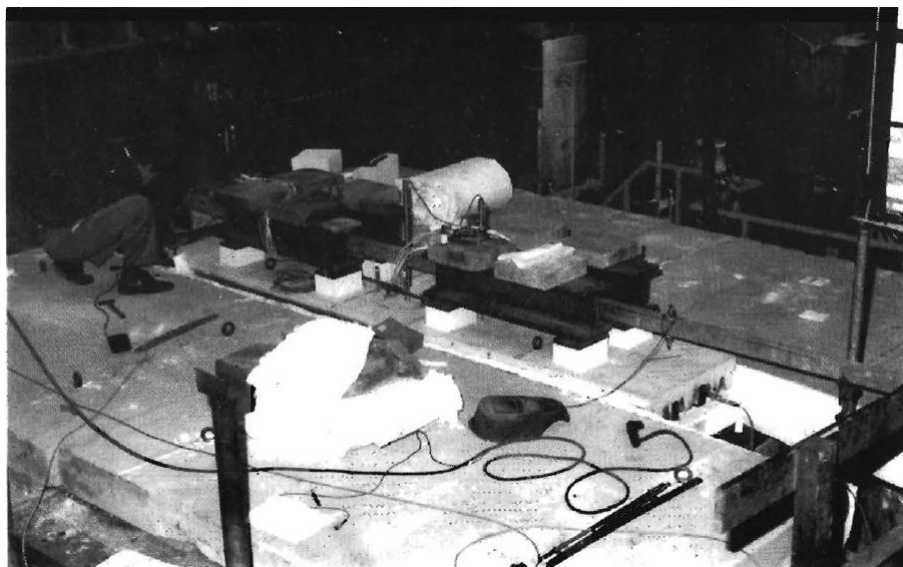


Figura 39 - Disposição de cargas no teste mecânico de Hamerlinck, 1991

Para compor a estrutura do espécime utilizado no Teste 2 foi utilizado concreto convencional (*normal weight concrete*) de classe C20/25 com teor de umidade $u=3.4\%$. O cobrimento de concreto sobre a chapa metálica foi de $h_f=70\text{ mm}$ e a chapa de aço utilizada, com perfil trapezoidal de modelo PRINS PSV73 possuía uma espessura de 0.75 mm. Ainda, foram aplicadas na direção longitudinal, posicionadas a 73 mm a partir da base da laje, barras de reforço para a armadura positiva de diâmetro $\text{Ø}10\text{ mm}$ espaçadas a cada 208 mm, e a 20 mm do topo da laje foi posicionada uma grelha de barras $\text{Ø}6//150\text{ mm}$. A Figura 40 apresenta estes e outros dados da configuração geométrica da laje.

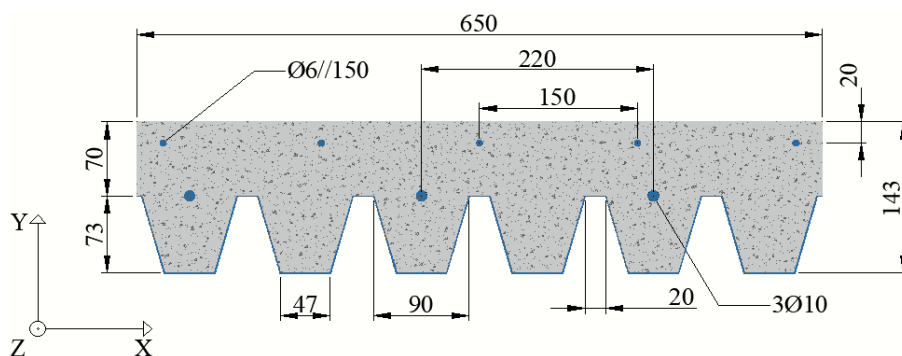


Figura 40 - Seção transversal da laje Hamerlinck, 1991 - Experimental

A laje com vão livre de 3.2 m, e o auxílio de um forno de temperatura monitorada, foi submetida a uma situação de incêndio padrão ISO 834 [8], com temperatura ambiente, ou seja, na face não exposta, era de aproximadamente 20°C . A carga mecânica consistia em quatro linhas de carregamento de 149.5 kg cada uma, espaçadas a 800 mm. A soma do peso total da estrutura, considerando peso próprio e carga aplicada era de 5.7 kN/m^2 . Ainda, como pode ser visto na Figura 41, a laje foi simplesmente apoiada, sendo suportada por um equipamento de medição da reação em uma das extremidades e apoiada sobre um rolamento que permitia livre deslocamento na direção longitudinal da estrutura.

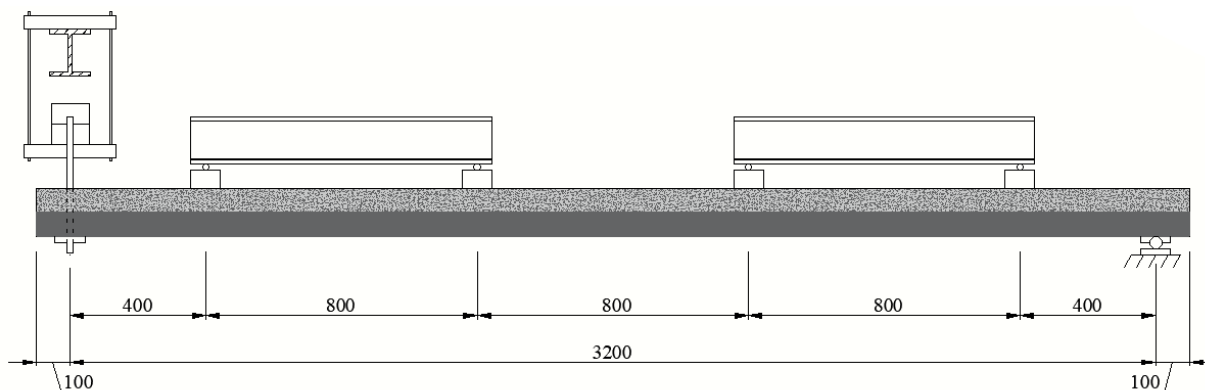


Figura 41 - Secção longitudinal da laje Hamerlinck, 1991 - Experimental

O autor nota que pouco após o início do experimento houve o descolamento entre as faces do concreto e do aço, criando assim uma fina camada de ar entre a superfície superior da chapa de aço e a superfície inferior do concreto.

6.1.2. MODELO NUMÉRICO

Procurando reproduzir as condições de execução do experimento do modo mais fiel possível aos dados fornecidos pelos autores, foram desenvolvidos modelos numéricos com o auxílio do programa ANSYS. Para a criação dos elementos finitos, foram utilizados elementos sólidos para o concreto (SOLID70 e SOLID185), para a chapa de aço e para o ar foram utilizados elementos de casca (SHELL131 e SHELL181), e para as barras de reforço, assim como para as barras da grelha de aço, foram utilizados elementos de ligação (LINK33 e LINK180).

O modelo compreendia exatamente as mesmas dimensões da secção transversal, como apresentado na Figura 40, diferindo somente na secção longitudinal, onde o comprimento completo da laje era de 3,2 m, desconsiderando 100 mm em cada uma das extremidades da laje para assim facilitar a modelagem.

6.1.2.1. MODELO TÉRMICO

Para realização da simulação térmica foram definidas as condições de fronteira do modelo, baseando-se nos valores e metodologias de cálculo fornecidos pelo Eurocódigo EN 1994-1-2 [12].

A Figura 42 apresenta os valores atribuídos ao coeficiente de convecção, assim como as temperaturas de exposição em cada uma das faces da laje.

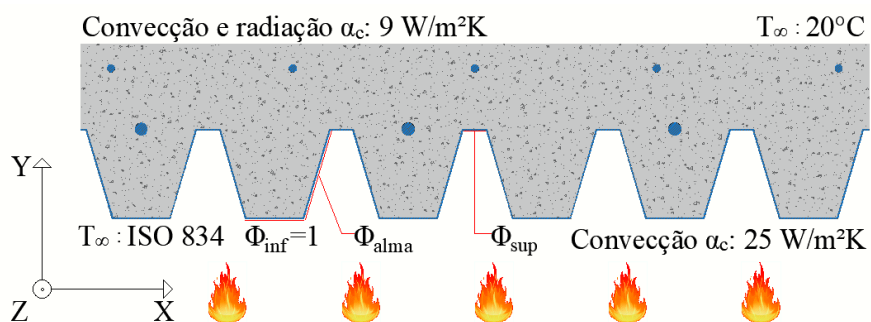


Figura 42 - Condições de fronteira do modelo térmico Hamerlinck, 1991

Os fatores de vista atribuídos para a alma (Φ_{alma}) e para a flange superior (Φ_{sup}) das chapas de aço foram calculados utilizando as equações (5) e (4), respectivamente, e são apresentados na Tabela 10.

Elemento	Fator de Vista (Φ)
Flange superior	0.39
Alma	0.36

Tabela 10 - Fatores de vista Hamerlinck, 1991

A duração do incêndio para a simulação foi a mesma que a reportada por Hamerlinck em seus dados experimentais, ou seja, 2 horas (7200 segundos). Os parâmetros de convergência compreendiam períodos de salvamento de dados de 60 segundos com incremento mínimo de 1 segundo e máximo de 60 segundos.

A análise de convergência foi realizada com base somente no fluxo de calor, tendo como critério de convergência uma tolerância de 10^{-3} e um valor de referência de 10^{-6} .

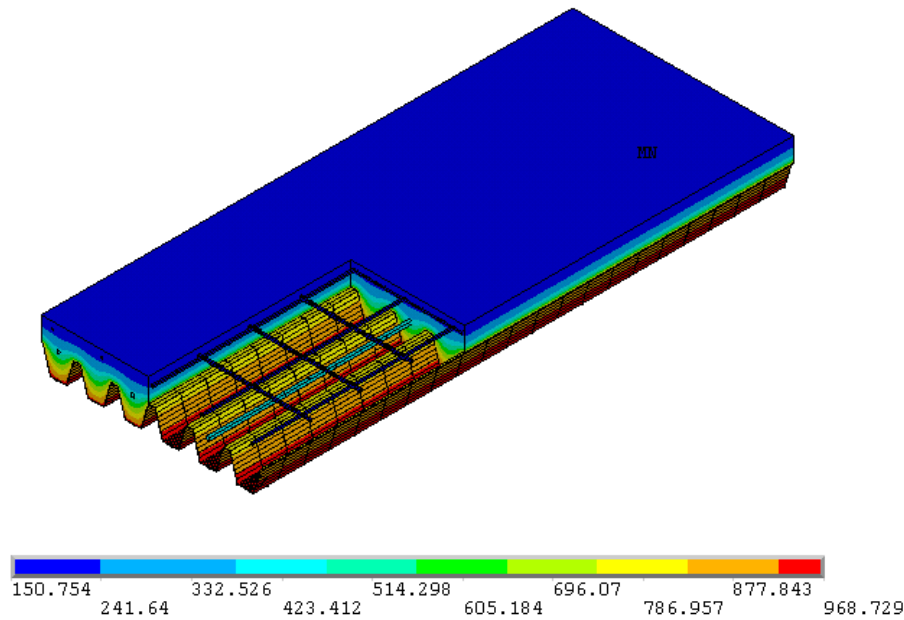


Figura 43 – Modelo térmico de elementos finitos Hamerlinck, 1991

Para os modelos térmicos foram estudadas duas diferentes abordagens do experimento, sendo a primeira (Modelo #1-A) considerando contato entre o concreto e a chapa de aço sobre o qual se encontra, enquanto a segunda abordagem considerava as alegações do autor dos experimentos, de que logo ao iniciar o procedimento de análise experimental, houve o descolamento da interface concreto-chapa de aço. Deste modo, para o segundo tipo de modelo (Modelos #2-A e #2-B), ver Figura 43, foi considerada a existência de uma fina camada de ar entre o concreto e o perfil metálico, simulada com elementos de casca (SHELL131), que por sua vez atua como uma resistência à transmissão de calor para a parte superior da laje, dado que o ar não é um bom condutor de calor, ver Figura 44. Outras possibilidades de simulação da camada de ar são apresentadas pela literatura (ver [51] e [52]) onde são aplicados elementos sólidos para simular o ar, porém estes métodos não apresentam boa compatibilidade para a posterior transição para os modelos mecânicos.

Portanto, nesta segunda abordagem foram elaborados modelos com diferentes espessuras para a camada de ar, com 0.50 mm (Modelo #2-A) e 1.00 mm (Modelo #2-B).

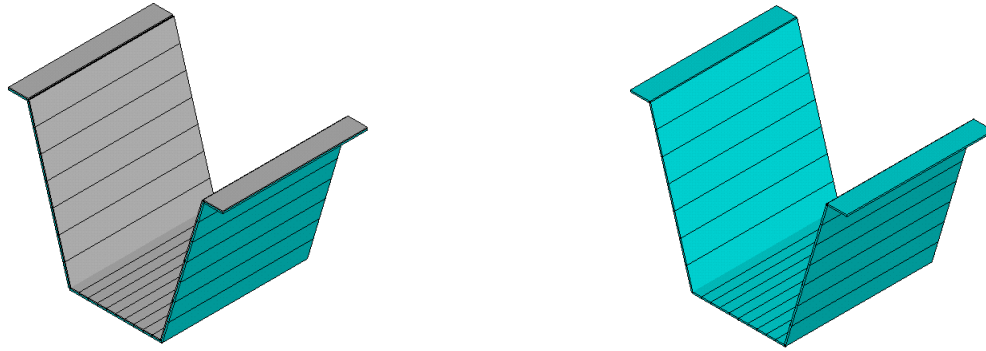


Figura 44 – Comparação entre modelo com e sem camada de ar Hamerlinck, 1991

6.1.2.2. MODELO MECÂNICO

Os modelos mecânicos foram elaborados com condições de apoio que se assemelhassem ao modelo experimental. A Figura 45 apresenta um esquema simplificado da disposição dos apoios. O travamento do modelo aos apoios foi realizado ao longo de toda a linha de nós presentes nas arestas inferiores das lajes.

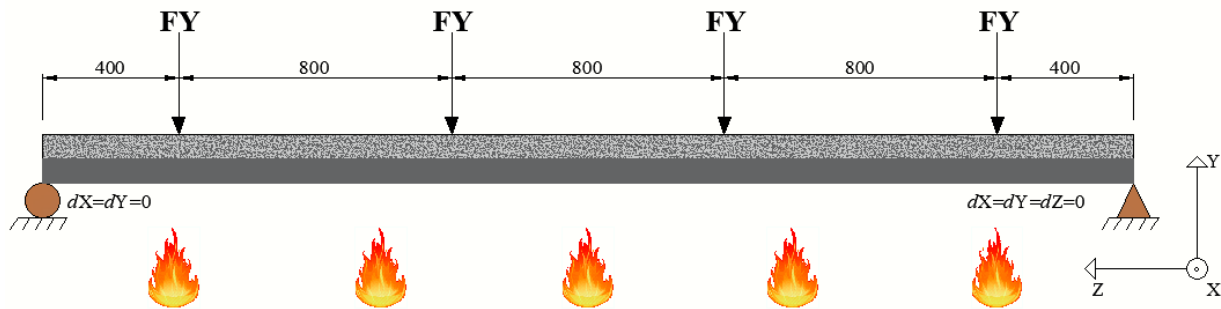


Figura 45 - Sistema de apoios do modelo numérico Hamerlinck, 1991

Para os modelos mecânicos os modelos que consideravam a influência da camada de ar tiveram as malhas referentes à espessura da camada de ar removidas, com a eliminação da respectiva camada dos elementos de casca SHELL181. Deste modo o elemento SHELL181 foi utilizado somente para a representação das chapas de aço.

O estudo mecânico da laje considerou nulo o efeito da deformação da estrutura sobre o campo de temperaturas, assim sendo, o processo incremental e iterativo consistia em transmitir a cada período ou subperíodo de tempo o campo de temperaturas obtido a partir da simulação térmica, e com base em um sistema estático realizar o cálculo dos deslocamentos da estrutura. A posição da estrutura é atualizada a cada passo de carga.

Nestas simulações foi considerada também a inércia gravitacional da laje, gerando o efeito do peso próprio da estrutura.

Como pode ser visto na Figura 45, as cargas aplicadas respeitaram os espaçamentos definidos no modelo real, e foram aplicadas ao modelo numérico na forma de forças nodais. Portanto foram aplicadas forças em 4 linhas de nós localizados na superfície da laje.

Novamente, a duração do incêndio para a simulação foi a mesma que a reportada por Hamerlinck em seus dados experimentais, ou seja, 2 horas (7200 segundos). Os parâmetros de convergência compreendiam períodos de armazenamento de dados de 60 segundos com incremento mínimo de 0.1 segundo e máximo de 60 segundos.

A análise de convergência foi realizada com base nos parâmetros de força e momento, tendo como critérios de convergência uma tolerância de 10^{-3} e um valor de referência de 1. O modelo de elementos finitos elaborado resultante é apresentado na Figura 46.

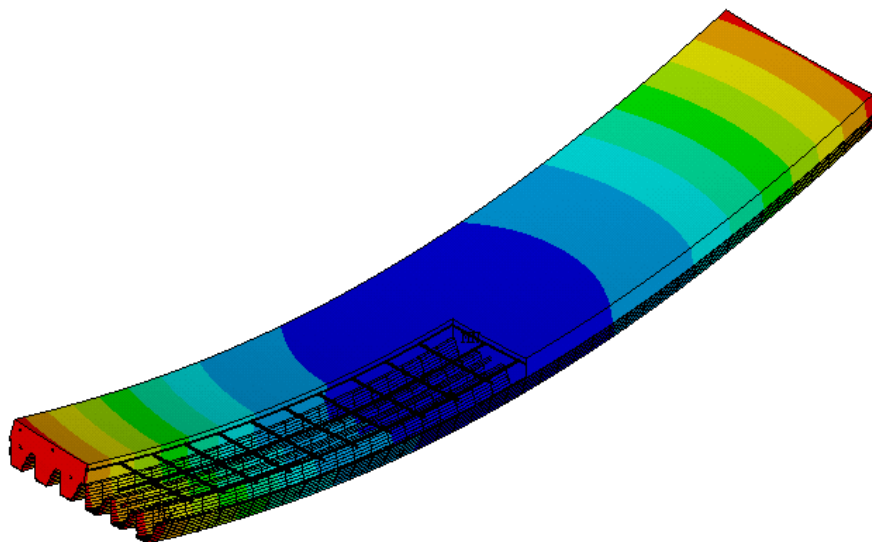


Figura 46 - Modelo mecânico de elementos finitos Hamerlinck, 1991

6.1.3. RESULTADOS

Nesta seção, serão apresentados os resultados obtidos com as simulações, assim como as análises de precisão dos modelos com relação aos dados experimentais.

6.1.3.1. SIMULAÇÃO TÉRMICA

Ao todo, três modelos térmicos foram gerados, sendo um de contato perfeito entre os materiais de concreto e aço (Modelo #1-A) e dois com barreira térmica (Modelos #2-A e #2-B). Para todos os modelos foram aferidas medições de temperaturas na face exposta e na face não exposta para comparação com os resultados experimentais.

As figuras a seguir apresentam os gráficos de evolução das temperaturas comparando dados experimentais e os modelos produzidos.

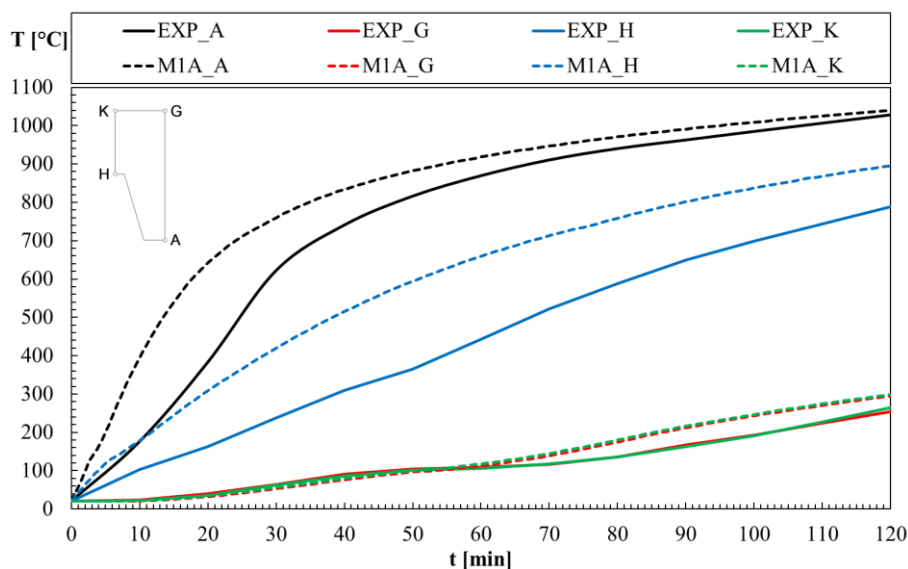


Figura 47 - Temperaturas na secção do Modelo #1-A

O Modelo #1-A (M1A) que representa perfeito contato e interação entre os elementos de concreto e a chapa de aço mostrou inicialmente um afastamento entre as curvas de temperatura da face exposta ao fogo, superestimando o aquecimento da chapa metálica, porém se aproximando nos estágios finais do incêndio. Para a face não exposta, as temperaturas apresentaram boa aproximação aos dados experimentais (EXP) ao longo de todo o incêndio, com um pequeno afastamento das curvas após 1 hora de simulação.

Na Figura 46 é apresentada a comparação dos resultados do Modelo #2-A (M2A), que consiste na existência de uma fina camada de 0.5 mm de ar entre a chapa de aço e do concreto já demonstra uma melhor aproximação das curvas de temperatura do modelo numérico e experimental, tanto para os períodos iniciais como finais do incêndio.

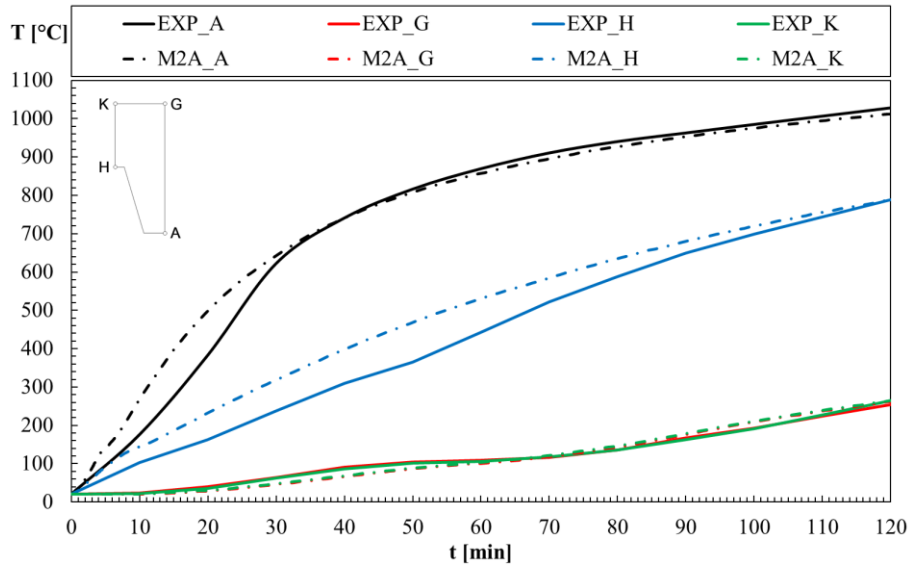


Figura 48 - Temperaturas da secção do Modelo #2-A

Na Figura 49 é apresentada a comparação dos resultados do Modelo #2-B (M2B), que ao aumentar a espessura da camada de ar para 1.0 mm, torna as temperaturas na secção da laje mais baixas e acaba subestimando o aquecimento da face exposta ao incêndio.

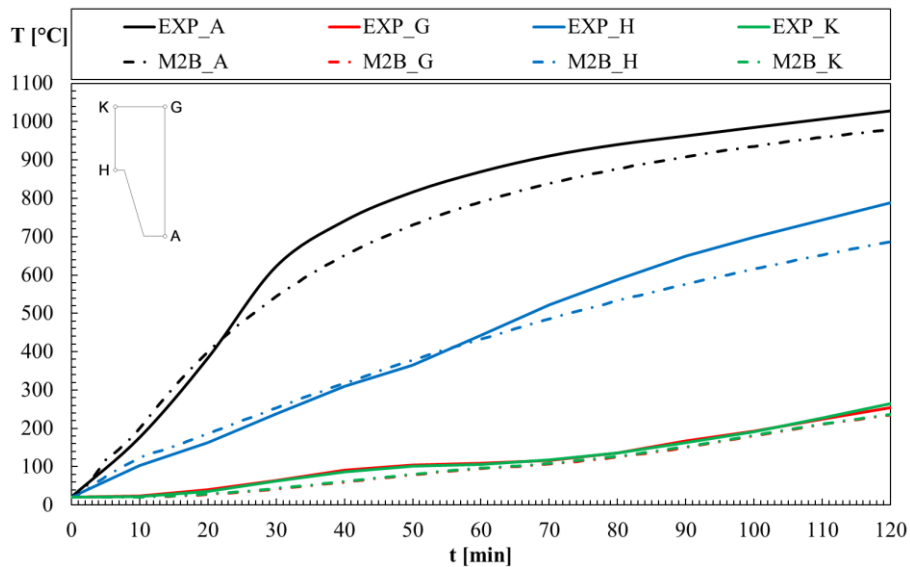


Figura 49 - Temperaturas na secção do Modelo #2-B

Como pode ser observado nos gráficos acima, as temperaturas da chapa de aço calculadas pelo software ANSYS tendem a ser maiores que as temperaturas experimentais nos estágios iniciais de aquecimento. É possível notar também que para os dados experimentais ocorre um considerável aumento na taxa de aquecimento da chapa metálica quando esta atinge temperaturas de aproximadamente 400 °C. Este fato pode ser explicado pela existência da camada de zinco na face exposta da chapa de aço, como indicam diversos autores (ver [15], [4] e [3]). A camada de galvanização dos perfis metálicos é responsável pela redução na taxa de aquecimento destes materiais até seu ponto de fusão, que ocorre aproximadamente a 419.5 °C [53].

Apesar da grande variação entre as temperaturas da face exposta nos estágios iniciais do incêndio, a face não exposta apresenta resultados muito próximos entre os modelos numéricos e experimental. A seguir serão apresentados os gráficos das temperaturas médias e máximas na face não exposta das lajes, para determinação da resistência ao fogo, segundo o critério de isolamento (I), estabelecido pela norma EN 1363-1 [30].

Na Figura 50 é apresentado o resultado de temperatura média e temperatura máxima na face não exposta ao fogo do Modelo #1-A. Nos instantes iniciais ($t < 60$ min) as temperaturas experimentais e numéricas estão próximas, mas depois verifica-se um afastamento de aproximadamente 50°C, aproximadamente, constante, devido a incapacidade do modelo numérico simular os efeitos da movimentação da umidade residual da laje.

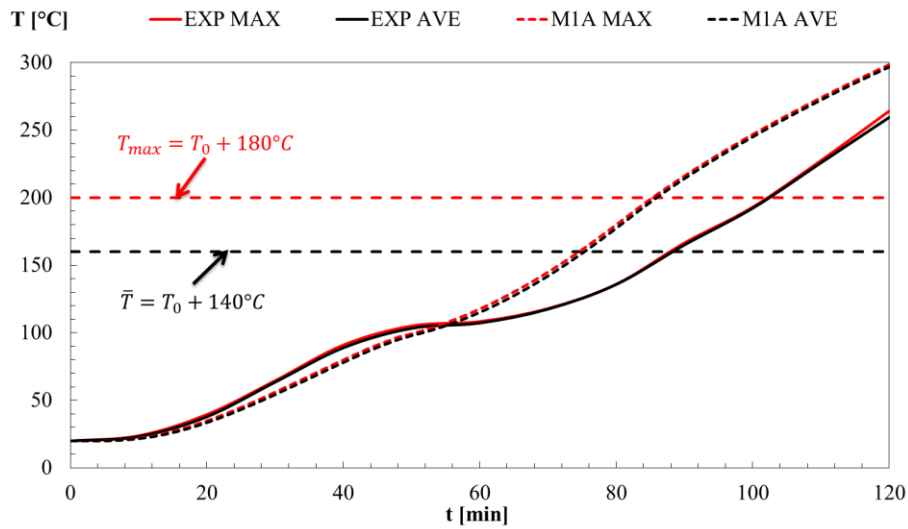


Figura 50 - Critério de isolamento (I) para o Modelo #1-A

Na Figura 51 é apresentado o resultado de temperaturas média e máxima na face não exposta do Modelo #2-A. Assim como no Modelo #1-A, o Modelo #2-A não apresenta um patamar no gráfico de temperaturas médias e máximas como apresentado pela curva experimental à temperatura de 100 °C, aproximadamente. Apesar disto, houve uma considerável aproximação entre as curvas numérica e experimental, próximo aos períodos em que a laje atinge os critérios de incremento da temperatura média (160 °C) e da temperatura máxima (200 °C).

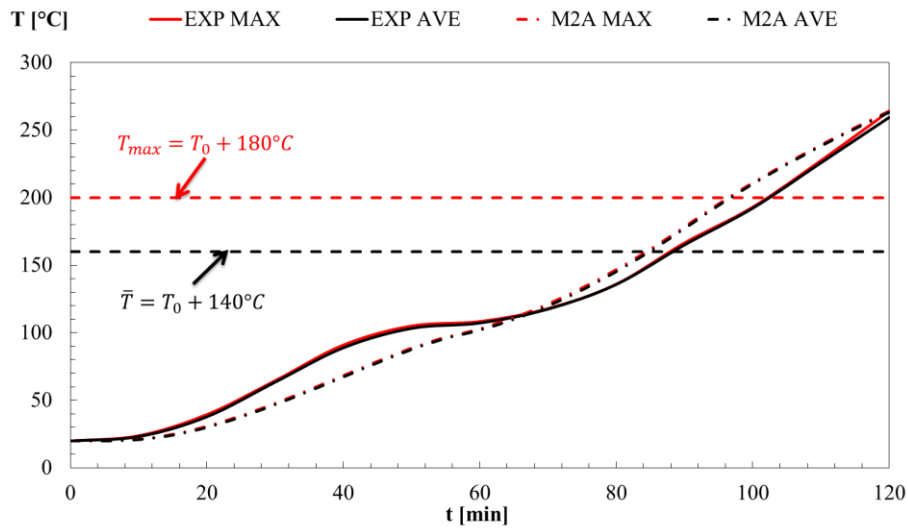


Figura 51 - Critério de isolamento (I) para o Modelo #2-A

Na Figura 52 é apresentada a comparação do Modelo #2-B com os resultados experimentais. A redução das temperaturas na superfície gerou uma situação de superestimação da resistência ao fogo mesmo a aproximação dos resultados sendo boa.

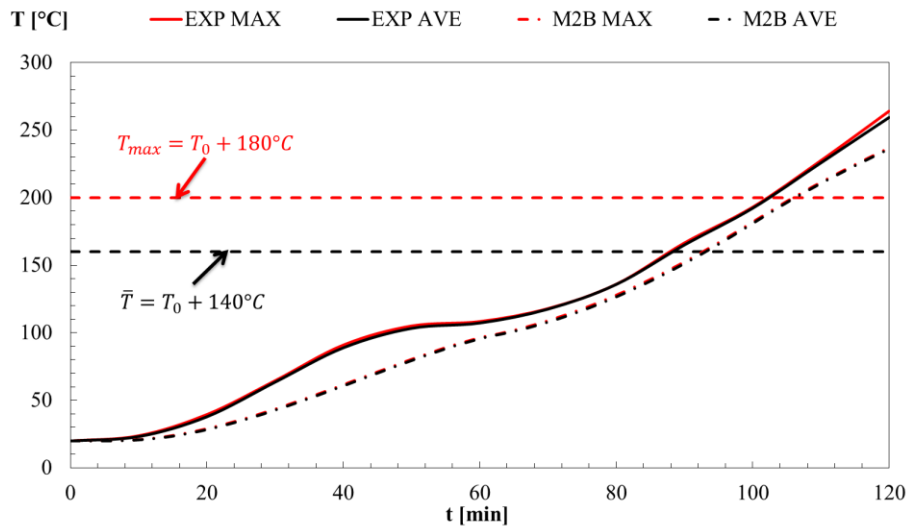


Figura 52 - Critério de isolamento (I) para o Modelo #2-B

A Tabela 11 apresenta de modo resumido o tempo de resistência ao fogo segundo o critério de isolamento (I), alcançado por cada um dos modelos, além dos erros relativos de cada um destes resultados em relação ao valor de resistência experimental.

Isolamento (I)			
Modelo	Média	Máxima	Diferença (%)
Experimental	88.28	101.97	-
Modelo #1-A: Contato Perfeito	75.32	85.26	14.68%
Modelo #2-A: Air-Gap 0.5 mm	84.85	96.43	3.88%
Modelo #2-B: Air-Gap 1.0 mm	93.05	105.92	-5.41%

Tabela 11 – Resumo de resultados das simulações térmicas Hamerlinck, 1991

6.1.3.2. SIMULAÇÃO MECÂNICA

Para as simulações mecânicas foram considerados os três modelos, sendo o primeiro o modelo de contato perfeito (Modelo #1-A) e os dois seguintes os modelos de laje com uma camada de ar com 0.5 mm e 1.0 mm de espessura entre o concreto e a chapa metálica, Modelos #2-A e #2-B, respectivamente.

Nos modelos com camada de ar, a malha de elementos correspondente a resistência térmica é apagada antes de se iniciar a simulação mecânica.

Assim como para o critério de isolamento (I), o critério de capacidade de carga (R) é definido pela norma EN 1363-1 [30] e é composto de dois indicadores: máximo deslocamento vertical da laje (D) e máxima taxa de deslocamento no tempo (dD/dt).

A seguir serão apresentados os gráficos comparando as curvas de deslocamento e taxa de deslocamento dos modelos numéricos com as curvas de resultados experimental (EXP).

Na Figura 53 são comparados o deslocamento e a taxa de deslocamento experimental com as curvas do Modelo #1-A.

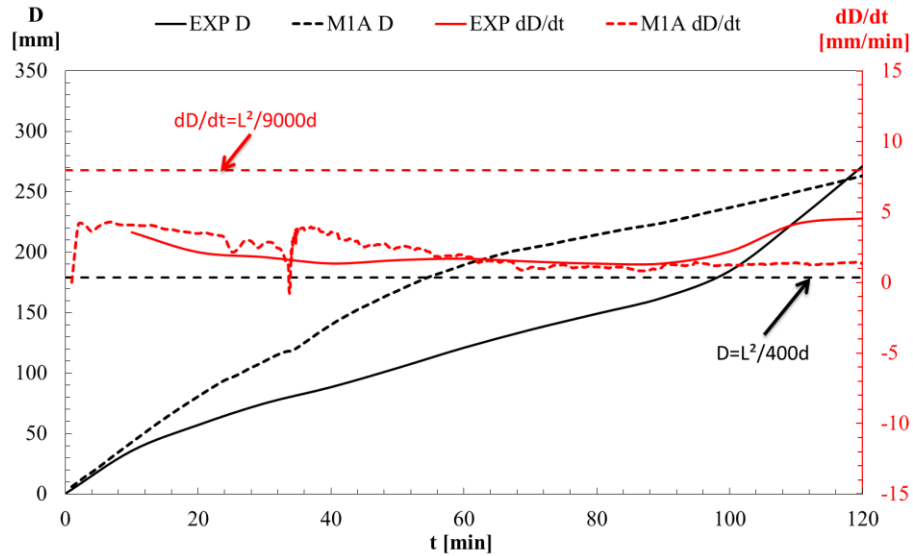


Figura 53 - Gráfico de deslocamentos do Modelo #1-A

O Modelo #1-A, submetido a simulação mecânica demonstrou boa concordância com a taxa de deslocamentos do modelo experimental, apesar da visível divergência das curvas de deslocamento (dD/dt) na primeira hora de simulação. Esta diferença pode ser justificada pela diferença dos campos de temperatura existentes. As temperaturas do modelo são maiores, ocasionando maiores deslocamentos.

Na Figura 54 é apresentada a comparação das curvas de máximo deslocamento e máxima taxa de variação de deslocamento dos resultados experimentais com o Modelo #2-A.

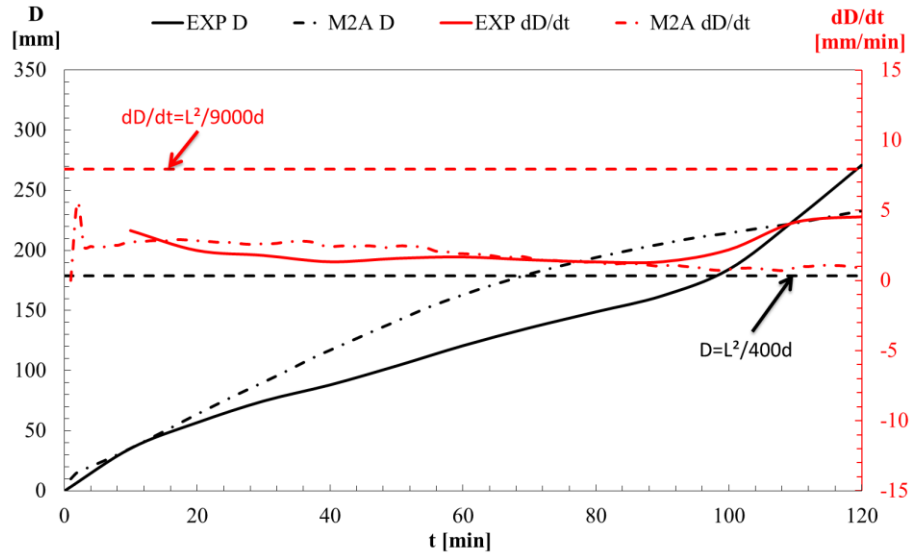


Figura 54 - Gráfico de deslocamentos do modelo #2-A

Já o Modelo #2-A, por apresentar temperaturas mais próximas às obtidas por Hamerlinck em seu experimento [10], permitindo assim a aplicação de características mecânicas dos materiais mais próximas das reais, descreve com maior proximidade a curva de deslocamentos, da mesma forma que tem boa aproximação da taxa de variação de deslocamento.

Na Figura 55 é feita a comparação dos resultados experimentais com os resultados do Modelo #2-B.

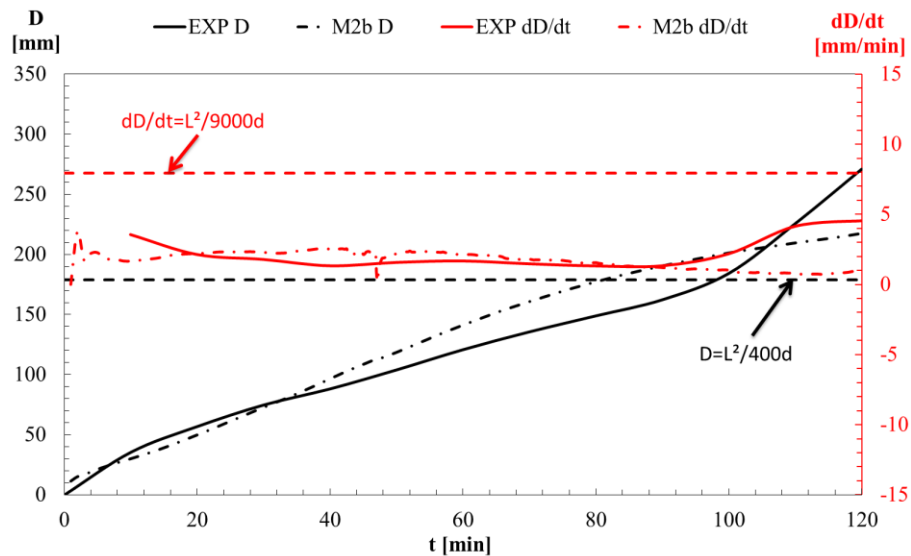


Figura 55 - Gráfico de deslocamentos do modelo #2-B

A melhor aproximação dos resultados experimentais foi alcançada pelo Modelo #2-B, com apenas 16.91% de erro relativo no aferimento da resistência ao fogo da laje segundo o critério de capacidade de carga (R).

A Tabela 12 resume os valores obtidos para cada um dos modelos numéricos, além das diferenças relativas ao resultado experimental.

Deflexão (R)			
Modelo	D	dD/dt	Diferença (%)
Experimental	97.64	-	-
Modelo #1-A: Contato Perfeito	54.53	-	44.15%
Modelo #2-A: Air-Gap 0.5 mm	69.06	-	29.27%
Modelo #2-B: Air-Gap 1.0 mm	81.12	-	16.91%

Tabela 12 – Resumo de resultados das simulações mecânicas Hamerlinck, 1991

7. ESTUDO PARAMÉTRICO

A validação da metodologia utilizada para elaboração dos modelos numéricos foi essencial para que diversos fatores fossem ajustados e que, com base teórica definida, fosse possível prosseguir ao objetivo principal deste trabalho.

7.1. MODELOS NUMÉRICOS

Para isto, foram desenvolvidos modelos de laje com área em plano de $1 \times 3 \text{ m}^2$, que compreendem variações de geometria das chapas de aço, espessura da camada de cobrimento de concreto e do nível de carga aplicado.

Foram desenvolvidos modelos variando a geometria entre 4 chapas de aço, de diferentes fabricantes, sendo 2 geometrias trapezoidais e 2 geometrias reentrantes. Em todos os modelos foi seguido um padrão de disposição das armaduras na estrutura, com 3 barras de reforço de aço S500 e diâmetro $\text{Ø}10 \text{ mm}$, igualmente espaçadas, posicionadas a uma altura h_2 a partir da base da laje. Uma grelha de aço S500 com barras $\text{Ø}6//150 \text{ mm}$ posicionada a 20 mm abaixo do topo das lajes. Para todos os modelos foi considerado o concreto convencional (NWC) C20/25 como padrão, por ser um dos tipos mais comuns na construção civil.

O esquema básico de disposição das armaduras e do tipo de concreto é apresentado na Figura 56.

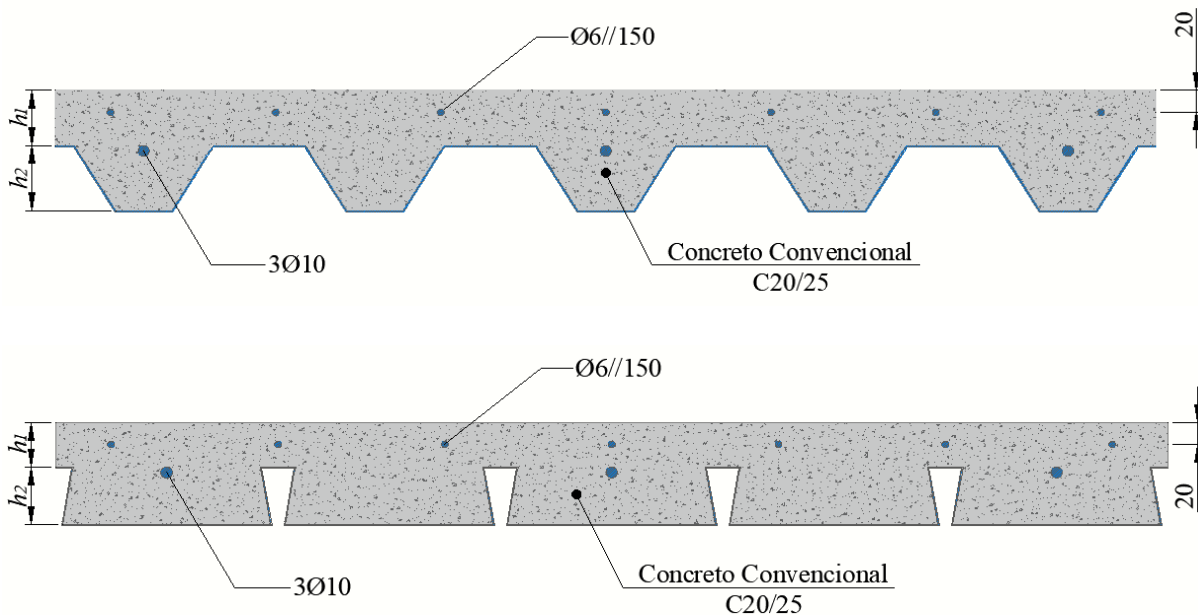


Figura 56 - Esquema de posicionamento das armaduras para o estudo paramétrico

Para as geometrias dos perfis metálicos foram selecionadas 4 geometrias distintas de diferentes fabricantes, sendo 2 geometrias de forma trapezoidal e 2 geometrias de formas reentrantes. A primeira a ser descrita é chapa de aço Polideck 59S, fabricada no Brasil pela ArcelorMittal, foi

considerada em sua versão com 1.25 mm de espessura, composta de aço S275. A Figura 57 apresenta as dimensões desta chapa e a Tabela 13 os fatores de vista referentes a esta geometria.

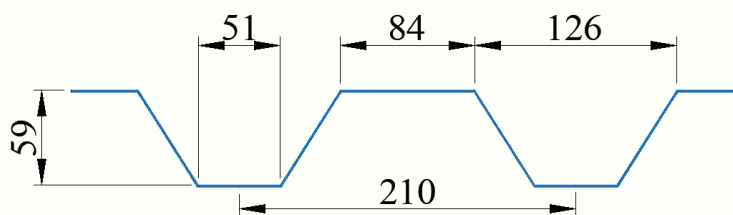


Figura 57 - Dimensões Polideck 59S

Elemento	Fator de Vista (Φ)
Flange superior	0.78
Alma	0.67

Tabela 13 - Fatores de vista Polideck 59S

A segunda chapa de perfil trapezoidal aproxima o modelo Confraplus 60, produzido pela empresa ArcelorMittal da Polônia. Foi considerada também em sua versão com 1.25 mm de espessura, produzida em aço S350. É apresentada na Figura 58 a característica geométrica da chapa e na Tabela 14 são apresentados os fatores de vista referentes a este modelo de chapa.

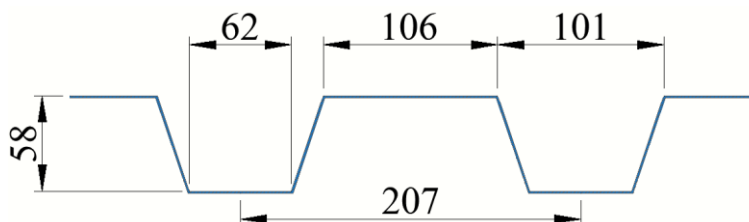


Figura 58 - Dimensões Confraplus 60

Elemento	Fator de Vista (Φ)
Flange superior	0.73
Alma	0.56

Tabela 14 - Fatores de vista Confraplus 60

Já para as lajes de perfil reentrante, foi utilizado o modelo de chapa metálica Multideck 50, produzido em aço S450 pela empresa Kingspan que se situa no Reino Unido. A espessura selecionada para esta chapa metálica foi de 1.00 mm. Demais dados referentes às dimensões da chapa metálica são apresentados na Figura 59 e os fatores de vista a si atribuídos encontram-se descritos na Tabela 15.

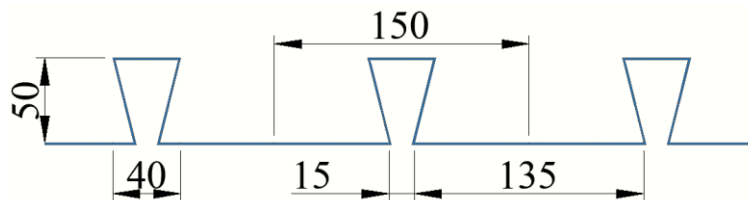


Figura 59 - Dimensões Multideck 50

Elemento	Fator de Vista (Φ)
Flange superior	0.14
Alma	0.09

Tabela 15 - Fatores de vista Multideck 50

A segunda geometria reentrante pretende simular o modelo Bondeck, fabricado na Austrália, em aço S350, pela empresa Lysaght, que foi selecionado em sua versão com 1.00 mm de espessura. Demais detalhes referentes a geometria da chapa metálica são apresentados na Figura 60 e os valores assumidos para os fatores de vista da flange superior e da alma deste perfil metálico são apresentados na tabela Tabela 16.

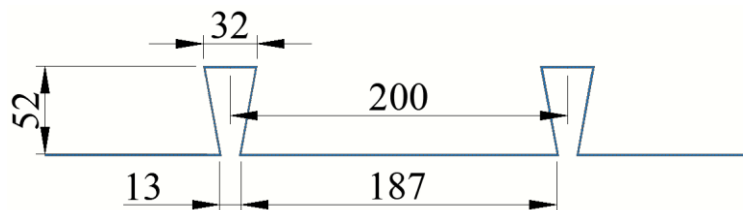


Figura 60 - Dimensões Bondeck

Elemento	Fator de Vista (Φ)
Flange superior	0.28
Alma	0.18

Tabela 16 - Fatores de vista Bondeck

Além do perfil metálico, diferentes alturas de cobrimento de concreto (h_1) foram avaliadas, variando entre 40 mm e 110 mm, com incrementos de 10 mm.

Ao todo, 32 modelos térmicos foram desenvolvidos. A Figura 61 apresenta um diagrama que facilita o entendimento da variedade e quantidade de simulações térmicas realizadas.

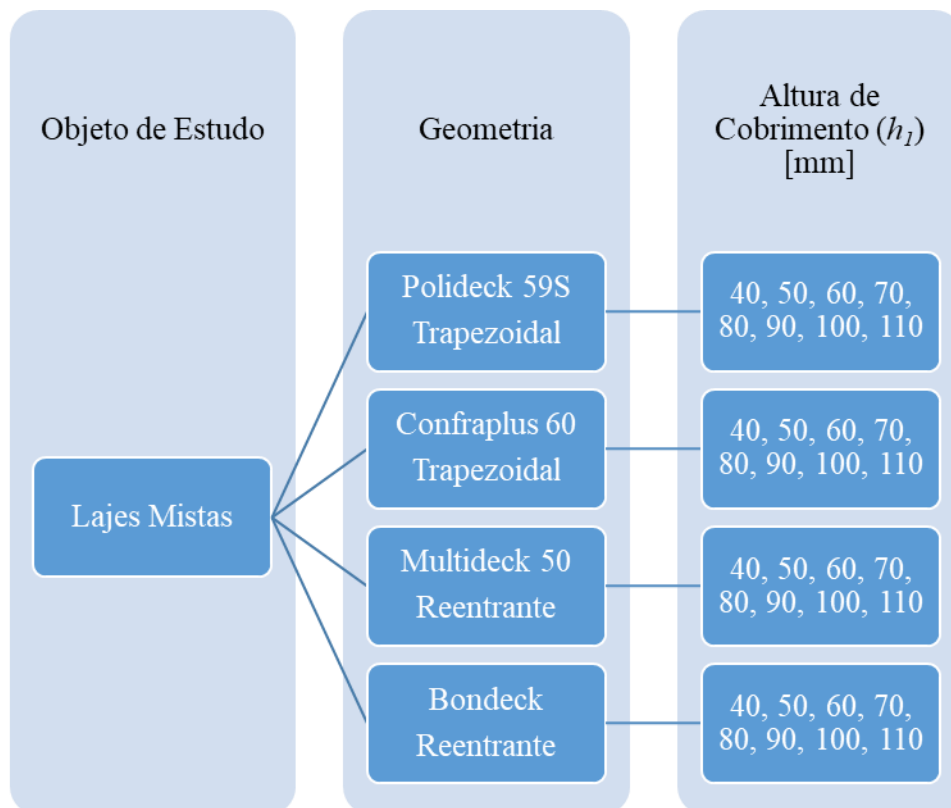


Figura 61 - Diagrama de modelos térmicos elaborados

Os parâmetros de solução e condições de fronteira empregados nestes modelos foram os mesmos utilizados para os modelos de validação (ver Capítulo 6).

Todos os modelos destinados ao estudo paramétrico supunham o contato perfeito entre o concreto e as chapas de aço, ou seja, para este estudo não foram desenvolvidas simulações com *air-gap*.

Como já exposto anteriormente, os modelos mecânicos compunham não somente a variação da geometria e da espessura do cobrimento h_l de concreto, mas também do nível de carga empregado nas lajes.

Para a determinação da capacidade de carga à temperatura ambiente (20°C) de cada uma das 32 lajes, foi utilizado o método fornecido pela norma europeia EN-1994-1-1 [48], como apresentado no Capítulo 4.

Portanto, com base na capacidade de carga à temperatura ambiente de cada uma das lajes foram realizadas simulações mecânicas das lajes mistas em situação de incêndio padrão ISO 834 com o nível de carregamento variando de 40% até 80% em intervalos de 10%.

O diagrama da Figura 62 permite a visualização da amplitude de simulações mecânicas realizadas, que totalizaram 120 simulações.

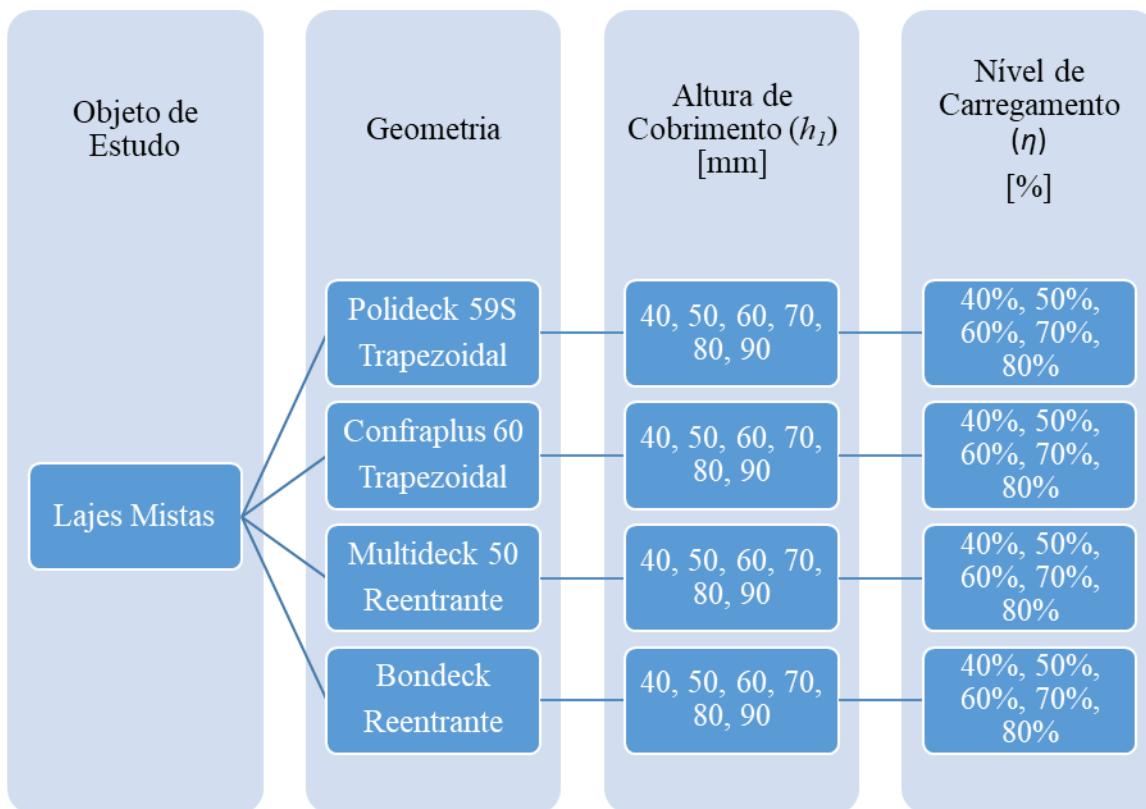


Figura 62 - Diagrama de modelos mecânicos elaborados

Ao todo, foram realizadas 152 simulações destinadas aos estudos paramétricos deste trabalho, sendo 32 modelos térmicos e 120 modelos mecânicos. O tempo médio de cada simulação varia entre 1 hora e 30 minutos, para simulações térmicas de lajes mais esbeltas, e 25 horas para simulações mecânicas de lajes com maior espessura.

7.2. RESULTADOS

Para que posteriormente seja possível comparar diretamente os resultados entre diferentes geometrias de lajes, será adotado como variável padrão a altura efetiva (h_{eff}) para os estudos paramétricos.

Para este trabalho foram realizados 2 estudos paramétricos com base nos resultados obtidos nas simulações térmicas e mecânicas. Determinou-se para cada uma das geometrias de perfil metálico curvas que relacionam a altura efetiva (h_{eff}) com o tempo de resistência ao fogo analisado sob o

critério de isolamento (I) [30] e a partir dos modelos submetidos às simulações mecânicas foi possível caracterizar, para cada uma das geometrias, a influência do nível de carregamento (η) sobre o tempo de resistência ao fogo das lajes, analisado sob o critério da capacidade de carga (R) [30], além de comparar o comportamento destas curvas para diversos valores de altura efetiva das lajes.

O Eurocódigo EN 1994-1-2 define que para cálculo da altura efetiva é utilizada a equação (45) para casos onde a razão $h_2/h_1 \leq 1.5$, e para as demais situações, ou seja, $h_2/h_1 > 1.5$, utiliza-se a equação (46).

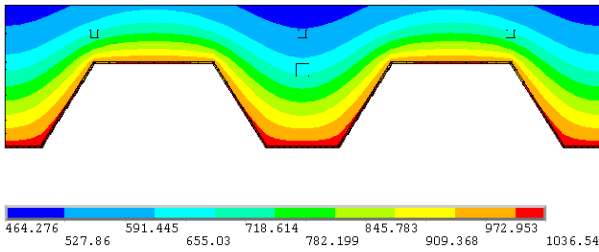
$$h_{eff} = h_1 + 0.5 h_2 \left(\frac{l_1 + l_2}{l_1 + l_3} \right) \quad (45)$$

$$h_{eff} = h_1 \left[1 + 0.75 \left(\frac{l_1 + l_2}{l_1 + l_3} \right) \right] \quad (46)$$

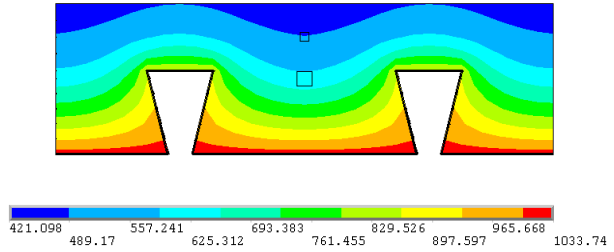
7.2.1. ALTURA EFETIVA (h_{eff})

Foram analisadas ao todo 32 modelos térmicos, submetidos à análise de resistência ao fogo segundo o critério de isolamento (I), resultando em 8 modelos para cada uma das geometrias selecionadas.

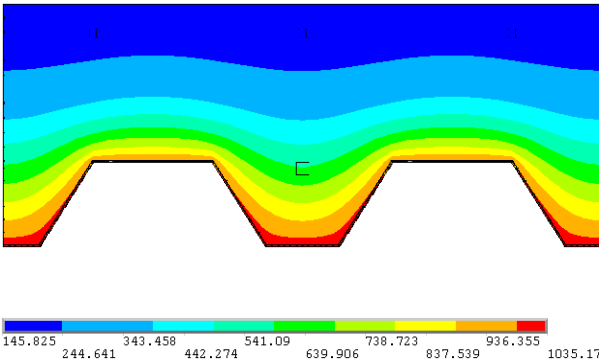
Na Figura 63 são apresentados os campos de temperatura na secção da laje trapezoidal Polideck 59S e da laje reentrante Multideck 50, para as espessuras de cobrimento $h_1=40$ mm e $h_1=110$ mm. Percebe-se que com o incremento do cobrimento de concreto das lajes, a temperatura próxima da face não exposta ao incêndio torna-se mais homogênea.



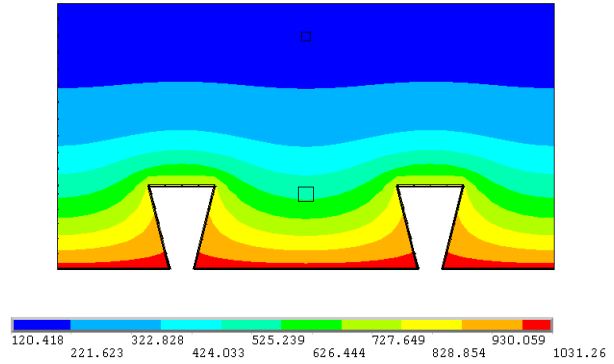
a) Trapezoidal Polideck 59S $h_1=40$ mm



b) Reentrante Multideck 50 $h_1=40$ mm



c) Trapezoidal Polideck 59S $h_1=110$ mm



d) Reentrante Multideck 50 $h_1=110$ mm

Figura 63 - Perfil de temperaturas em lajes mistas

Para a determinação do tempo de resistência ao fogo foi medida, na superfície não exposta da laje, a evolução dos valores de temperatura média e temperatura máxima. Enquanto a temperatura média exige a aferição das temperaturas em vários pontos da superfície, a temperatura máxima costuma ocorrer na região acima do centro das flanges superiores das lajes trapezoidais e reentrantes, como pode ser observado na Figura 63.

Os gráficos apresentados da Figura 64 a Figura 67 correlacionam os resultados dos critérios citados com a altura efetiva das lajes h_{eff} para cada uma das geometrias de chapa de aço selecionadas e novas propostas para o cálculo da resistência ao fogo, tendo em consideração o critério de isolamento (I).

No Anexo A são apresentadas as fichas técnicas de todos os modelos simulados.

Na Figura 64 é apresentada a variação da resistência ao fogo, analisada sob o critério de isolamento (t_i), da laje trapezoidal Polideck 59S para a máxima e média temperatura na face não exposta da laje, de acordo com a variação da altura efetiva (h_{eff}) da laje.

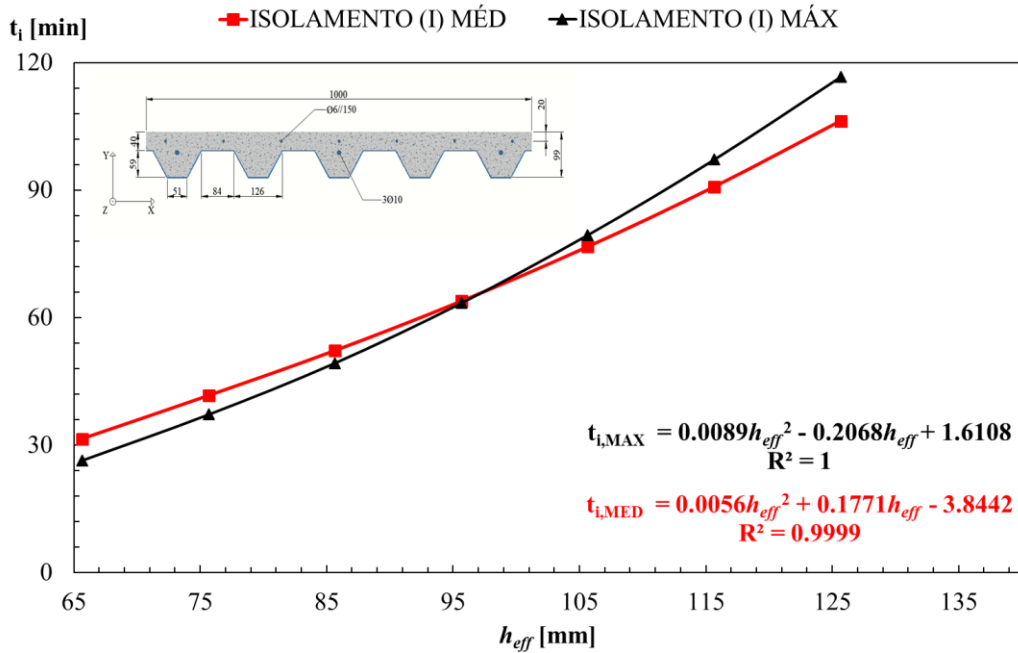


Figura 64 - Curvas de resistência ao fogo segundo o critério I em razão da altura efetiva h_{eff} para laje trapezoidal Polideck 59S

O deck metálico Polideck 59S fabricado pela ArcelorMittal do Brasil apresentou bom desempenho térmico e demonstrou que a partir da simulação com cobrimento $h_I=50$ mm ($h_{eff}=75.66$ mm) foi possível alcançar o mínimo desempenho exigido pela norma EN 1994-1-2 de 30 minutos [12]. Alguns valores de resistência para as espessuras efetivas acima de 125.66 mm não são apresentados pois nestes casos os resultados excederam o período de 120 minutos (2 horas) de simulação. A partir dos dados pontuais obtidos foi possível realizar a análise de regressão para funções polinomiais de segundo grau. As curvas para os critérios de incremento da temperatura média (47) e da temperatura máxima (48) na face não exposta indicadas a seguir apresentaram bons valores para R^2 de aproximadamente 1.00, podendo ser utilizadas para o cálculo da resistência ao fogo das lajes, segundo o critério de isolamento, sendo respeitados os limites de cálculo propostos.

$$99 \text{ mm} < h_{eff} \quad t_{i,MED} = 0.0056h_{eff}^2 + 0.1771h_{eff} - 3.8442 \quad (47)$$

$$h_{eff} \leq 99 \text{ mm} \quad t_{i,MAX} = 0.0089h_{eff}^2 - 0.2068h_{eff} + 1.6108 \quad (48)$$

Ainda, com o auxílio destas equações torna-se possível determinar o valor ótimo de h_{eff} para que seja cumprido o requisito mínimo de resistência ao fogo da laje (I 30). Este valor é atingido a partir da equação (48) com $h_{eff}=69.66$ mm ($h_I=44$ mm).

Na Figura 65 encontra-se a variação da resistência ao fogo, analisada sob o critério de isolamento (t_i), da laje trapezoidal Confraplus 60 para a temperatura média e temperatura máxima na face não exposta, de acordo com a variação da altura efetiva (h_{eff}) da laje.

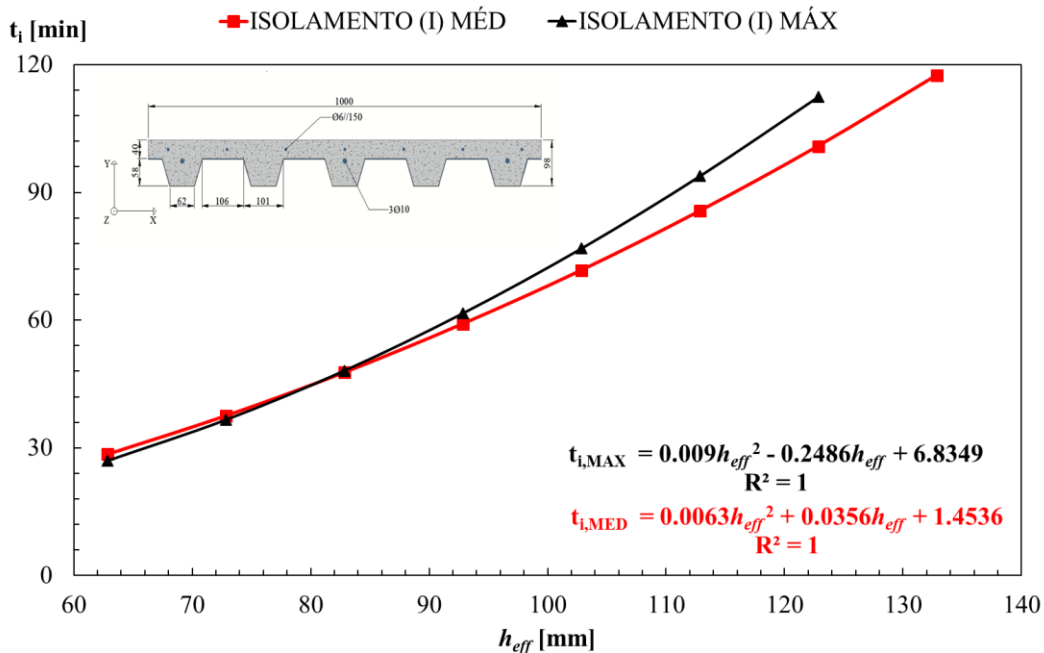


Figura 65 - Curvas de resistência ao fogo segundo o critério I em razão da altura efetiva h_{ef} para laje trapezoidal Confraplus 60

Por sua vez, a chapa metálica de geometria trapezoidal identificada por Confraplus 60, produzida na Polônia pela ArcelorMittal, também apresentou um bom desempenho, com resultados acima das exigências da norma europeia, de 30 minutos de resistência a partir da simulação do modelo $h_I=50$ mm ($h_{eff}=72.84$ mm). A análise de regressão possibilitou a definição das curvas resistência quanto aos critérios de temperatura média (49) e máxima (50) na face não exposta ao incêndio com perfeita interpolação dos dados experimentais ($R^2=1.00$), que podem ser utilizadas para o cálculo da resistência ao fogo das lajes com chapa de aço Confraplus 60, sendo respeitados os limites definidos.

$$82 \text{ mm} < h_{eff} \quad t_{i,MED} = 0.0063h_{eff}^2 + 0.0356h_{eff} + 1.4536 \quad (49)$$

$$h_{eff} \leq 82 \text{ mm} \quad t_{i,MAX} = 0.009h_{eff}^2 - 0.22486h_{eff} + 6.8349 \quad (50)$$

A partir dessas curvas foi definido o valor ótimo de $h_{eff}=65.84 \text{ mm}$ ($h_l=43 \text{ mm}$) para o cobrimento de concreto mínimo a suprir os requisitos de resistência da laje analisado sob o critério de isolamento (I 30).

Na Figura 66 é apresentada a variação da resistência ao fogo, analisada sob o critério de isolamento (t_i), da laje reentrante Multideck 50 para a máxima e média temperatura na face não exposta da laje, de acordo com a variação da altura efetiva (h_{eff}) da laje.

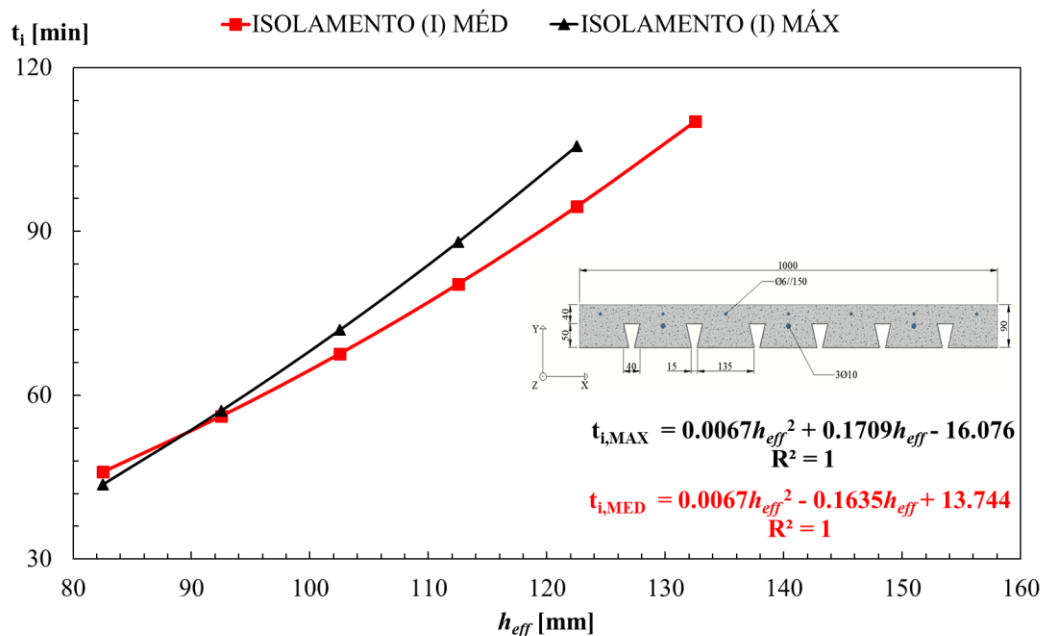


Figura 66 - Curvas de resistência ao fogo segundo o critério I em razão da altura efetiva h_{ef} para laje reentrante Multideck 50

Para a laje reentrante Multideck 50, produzida pela Kingspan do Reino Unido, os resultados de resistência ao fogo foram excelentes, demonstrando que mesmo com o cobrimento de concreto mínimo exigido por norma [48], períodos de resistência acima de 30 minutos são atingidos, podendo ser posicionado nas classes de resistência de 60 minutos e 90 minutos com somente 92.5 mm e 112.5 mm de altura efetiva da laje (h_{eff}), respectivamente.

$$89 \text{ mm} < h_{eff} \quad t_{i,MED} = 0.0067h_{eff}^2 + 0.1635h_{eff} + 13.744 \quad (51)$$

$$h_{eff} \leq 89 \text{ mm} \quad t_{i,MAX} = 0.0067h_{eff}^2 + 0.1709h_{eff} - 16.076 \quad (52)$$

Este modelo de geometria apresenta resistência ao fogo segundo o critério de isolamento (I), acima de 120 minutos (2 horas), para modelos com cobertura de concreto a partir $h_I=90 \text{ mm}$ ($h_{eff}=132.5 \text{ mm}$). Além disso, foi possível determinar as curvas de regressão polinomial de segundo grau que resultaram nas equações (51) e (52).

Na Figura 67 encontra-se a variação da resistência ao fogo, analisada sob o critério de isolamento (t_i), da laje de geometria reentrante Bondeck para a temperatura média e temperatura máxima na face não exposta, de acordo com a variação da altura efetiva (h_{eff}) da laje.

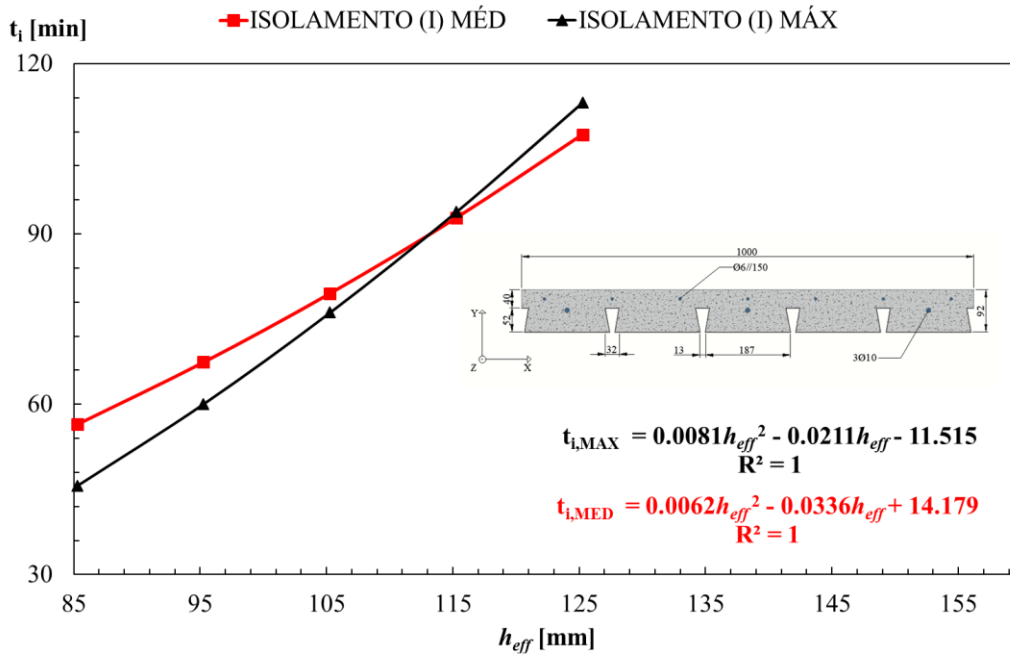


Figura 67 - Curvas de resistência ao fogo segundo o critério I em razão da altura efetiva h_{ef} para laje reentrante Bondeck

Os modelos de laje com chapa metálica, de perfil reentrante Bondeck, produzido pela empresa Lysaght na Austrália, apresentaram também ótimos resultados quanto ao critério de isolamento (I), alcançando períodos de resistência acima de 30 minutos mesmo com o cobertura (h_I) mínimo exigido por norma [48]. A partir de espessuras de cobertura de concreto de 90 mm ($h_{eff}=135.26$

mm) não foi possível obter valores para a resistência pois estes ultrapassavam a marca de 120 minutos (2 horas).

Ainda, a análise de regressão dos dados obtidos com as simulações possibilitou a definição de curvas descritas por funções polinomiais de segunda ordem para os períodos de resistência ao incêndio padrão ISO 834, analisado sob o critério da temperatura média (53) e temperatura máxima (54) na face não exposta ao incêndio.

$$113 \text{ mm} < h_{eff} \quad t_{i,MED} = 0.0062h_{eff}^2 - 0.0336h_{eff} + 14.179 \quad (53)$$

$$h_{eff} \leq 113 \text{ mm} \quad t_{i,MAX} = 0.0081h_{eff}^2 - 0.0211h_{eff} - 11.515 \quad (54)$$

7.2.2. NÍVEL DE CARGA (η)

Com o intuito de caracterizar o efeito do nível de carga na resistência ao fogo de uma laje mista em situação de incêndio, foram realizados estudos paramétricos para 4 tipos diferentes de geometria de chapa de aço colaborante (2 trapezoidais e 2 reentrantes) com diferentes valores para o cobrimento de concreto de espessura h_l , posicionado acima do deck metálico, sendo que para cada um destes modelos se realizaram simulações mecânicas considerando a ação de um incêndio padrão ISO 834. O cálculo do nível de carregamento de cada uma das lajes foi realizado como descrito no Capítulo 4.

Ao todo, 120 simulações mecânicas foram realizadas, sendo 30 para cada um dos tipos de geometria, que contam com 6 curvas de diferentes valores de h_l para a determinação da resistência ao fogo de lajes mistas, analisadas sob o critério capacidade de carga (R), como definido por norma [30] e apresentado no Capítulo 4, a níveis de carregamento das lajes que variavam de 40% a 80% com incrementos de 10%.

Todos os resultados se apresentam resumidos no Anexo A, com fichas técnicas devidamente preenchidas.

A avaliação das estruturas envolverá a apresentação de gráficos que demonstram a evolução da capacidade de carga das estruturas ao longo do período de incêndio, utilizando uma adaptação do método de cálculo já apresentado no capítulo 4 e que é proposto pela norma de estruturas mistas de aço e concreto em situação de incêndios [12]. Para isto, o processo de cálculo deverá

desconsiderar a utilização das equações (35) e (36), antes destinadas ao cálculo das temperaturas a que se encontravam os elementos de aço nos períodos de 60 min, 90 min e 120 min, e passando a aplicar às equações (38) e (39), as temperaturas extraídas das simulações térmicas de cada elemento de aço ao longo de todo o incêndio.

Este processo de cálculo das curvas deve ser realizado de modo iterativo, para que cada intervalo de resultados do modelo térmico fornecido pelo programa ANSYS, atribua corretamente os coeficientes de redução de resistência ($k_{y,\theta}$) para cada um dos elementos de aço da estrutura.

Estas curvas ainda serão comparadas com a metodologia tradicional de cálculo da resistência ao fogo, segundo o critério da capacidade de carga (R), proposto no método simplificado de cálculo apresentado no Eurocódigo [12].

Os resultados mostraram que é possível estabelecer uma relação de redução da capacidade de resistência ao fogo com o aumento do nível de carga aplicado. Pode-se observar que com o aumento da espessura da camada de cobrimento (h_f), há também um aumento gradual da curva que estabelece a resistência ao fogo das lajes, analisada sob o critério de capacidade de carga (R) proposto pela norma EN 1363-1 [30]. Estes resultados podem ser observados, por exemplo, na Figura 68 que apresenta as diversas curvas de resistência (t_{Rd}) para as lajes de geometria trapezoidal Polideck 59S, variando o nível de carga e a espessura da camada de cobrimento de concreto sobre a chapa metálica.

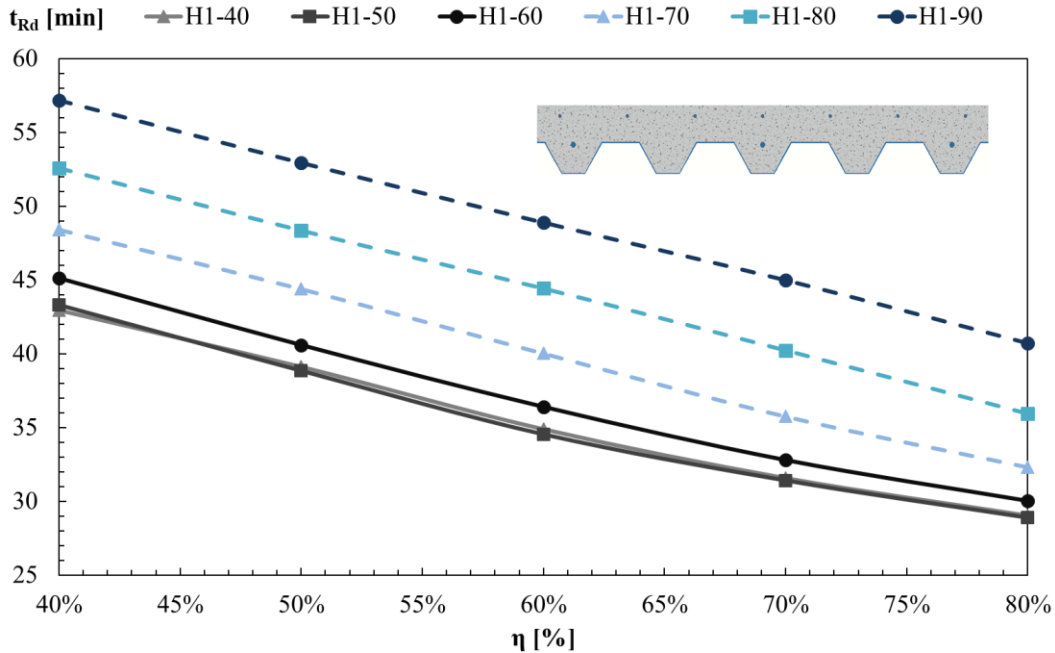


Figura 68 - Resistência ao fogo (t_{Rd}) de lajes trapezoidais Polideck 59S em função do nível de carga (η)

É importante ressaltar a proximidade entre as curvas H1-40 e H1-50, que se encontram sobrepostas em alguns pontos, e que nas simulações do modelo H1-40 para os níveis de carga de 40%, 50% e 60% os resultados para a resistência obtidos foram maiores que os obtidos pelo modelo H1-50.

Este ocorrido apresenta de modo sutil a existência de um ponto de inflexão onde o aumento da camada de cobrimento passa a influenciar de modo proporcional o aumento da resistência da laje ao fogo, segundo o critério de capacidade de carga (R).

Como pode ser visto na Figura 69, os modelos de laje trapezoidal com chapa metálica Confrapplus 60 tornam este fenômeno mais expressivo devido ao comportamento da curvada laje com $h_I=40$ mm em relação às demais curvas.

Na Figura 69 são apresentadas as curvas de resistência ao fogo (t_{Rd}) de lajes mistas, com chapa de aço colaborante do tipo Confrapplus 60, com diferentes espessuras de cobrimento de concreto (h_I).

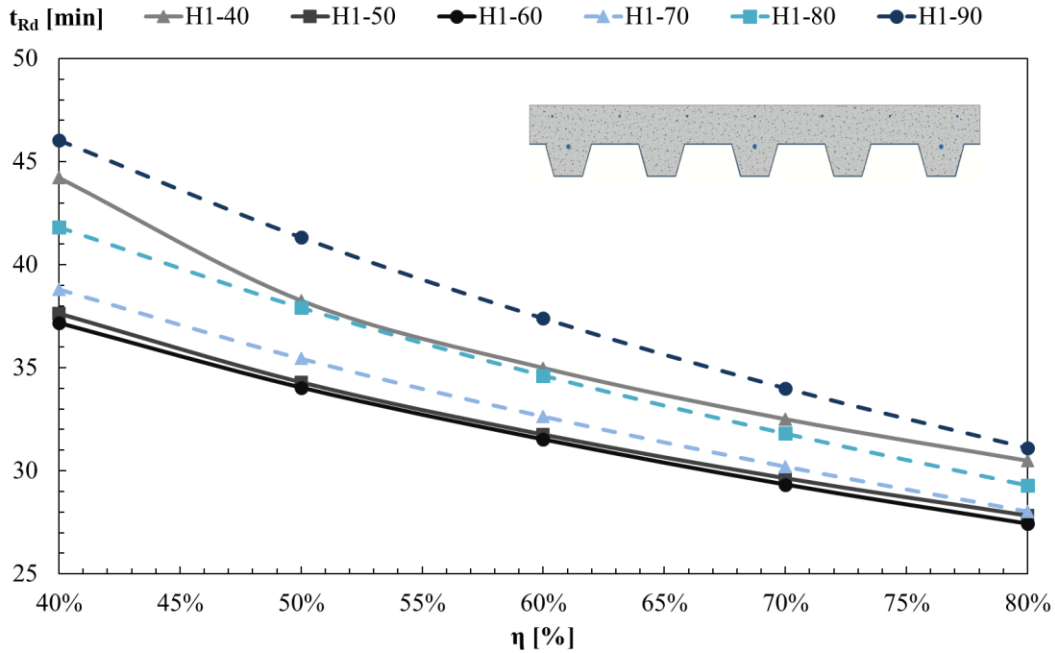


Figura 69 - Resistência ao fogo (t_{Rd}) de lajes trapezoidais Confraplus 60 em função do nível de carga (η)

A resistência ao fogo da laje com $h_l=40$ mm é superior ao valor de resistência ao fogo das lajes com $h_l=50$ mm e $h_l=60$ mm. O ponto de inflexão do padrão de relação entre o cobrimento de concreto e o aumento da resistência t_{Rd} ocorre entre a curva H1-50 e a curva H1-60, só então passando a demonstrar uma relação de aumento do tempo de resistência ao fogo proporcional ao aumento da camada de cobrimento para os modelos com 70 mm, 80 mm e 90 mm de cobrimento.

Para os modelos com geometria reentrante ocorreu o mesmo fenômeno com grande expressividade para lajes com forma colaborante Multideck 50, como pode ser visto na Figura 70.

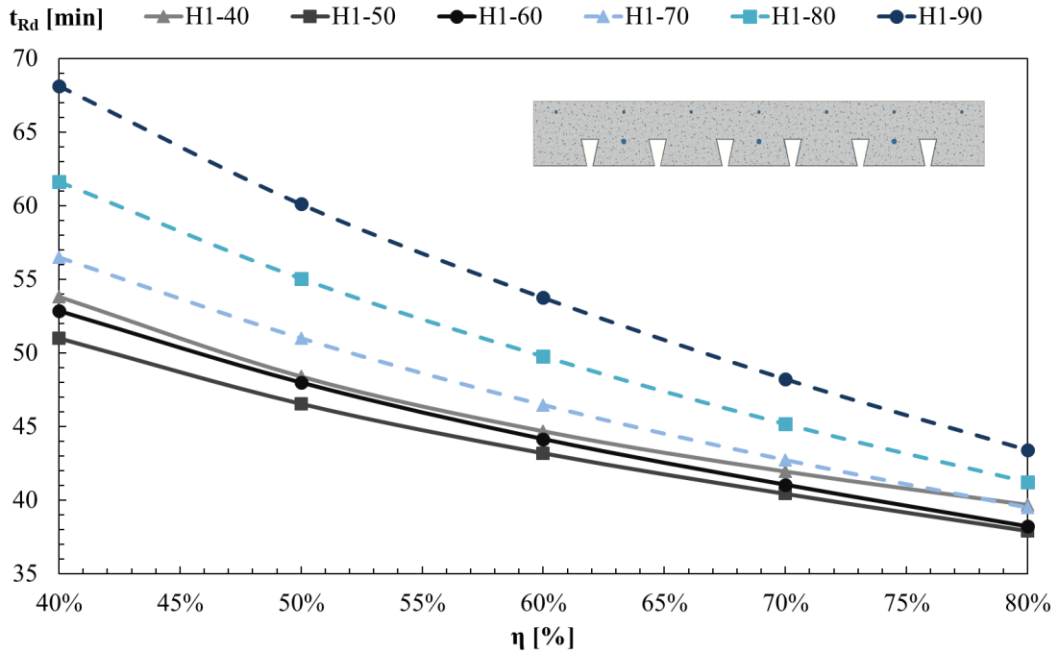


Figura 70 - Resistência ao fogo (t_{Rd}) de lajes reentrantes Multideck 50 em função do nível de carga (η)

Neste caso a curva do modelo com $h_I=40$ mm não se afastou tanto do padrão das demais como na geometria trapezoidal Confraplus 60 (ver Figura 69). De todo modo, esta curva se apresenta acima das curvas dos modelos H1-50 e H1-60 e o ponto de inflexão do padrão de aumento da resistência ao fogo proporcional ao incremento de espessura de revestimento, ocorre para valores de h_I entre 40 mm e 50 mm.

Por fim, a Figura 71 apresenta o gráfico de curvas para a laje reentrante com deck metálico Bondeck, que diferentemente dos demais modelos de laje, apresentou uma elevação gradual das curvas de resistência t_{Rd} desde o modelo H1-40 até o modelo H1-90.

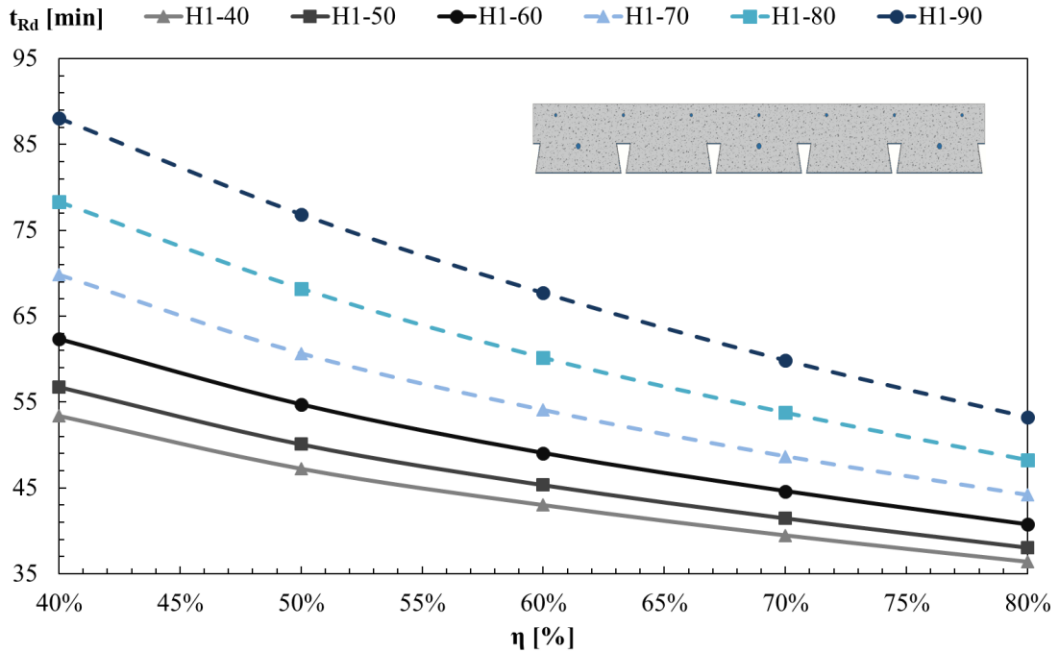


Figura 71 - Resistência ao fogo (t_{Rd}) de lajes reentrantes Bondeck em função do nível de carga (η)

Após a observação do fenômeno de mudança do padrão das curvas apresentado, principalmente nos gráficos da Figura 69 e Figura 70, procurou-se entender mais a fundo a dinâmica destes modelos mecânicos.

Por este motivo, foi desenvolvida uma metodologia de elaboração de curvas para a capacidade de carga das lajes em situação de incêndio, baseando-se no método de cálculo já proposto pela norma EN 1994-1-2 [12] com o uso das equações (38) e (39).

Para isto é dispensado o uso das equações (35) e (36), que destinam-se a estimar a temperatura de cada uma dos elementos de aço que compõe a laje, passando a utilizar as temperaturas extraídas das simulações mecânicas com o programa ANSYS.

Os coeficientes de redução da resistência dos componentes de aço (k_y, θ) foram calculados utilizando a Tabela 4, fornecida pela norma EN 1993-1-2 [44]. Para valores de temperatura intermediários aos fornecidos, permitiu-se a realização de interpolação linear entre os limites.

Considerando que o arquivo de saída do ANSYS trata-se de um ficheiro com uma extensa gama de dados e que a realização do processo de cálculo, se realizado manualmente, deve exigir muito

tempo de análise para atribuição dos corretos coeficientes de redução, foi elaborada uma planilha de cálculo automático utilizando o programa Excel.

Por fim, considerando os parâmetros de simulação empregados nas análises térmicas, cada uma das curvas é composta por ao menos 120 pontos (um ponto a cada 60 segundos) onde são empregadas diferentes temperaturas para as flanges inferior e superior, além da alma da chapa de aço e da barra de aço posicionada longitudinalmente na parte inferior da laje.

A Figura 72 apresenta, para a geometria trapezoidal de chapa Polideck 59S, as curvas de capacidade de carga das lajes com diferentes espessuras para o cobrimento de concreto (h_I) submetidas a um incêndio padrão ISO 834. Nota-se que do início ao fim do incêndio as curvas de resistência se comportam de modo decrescente. Sendo que a maior redução se verifica no início do incêndio.

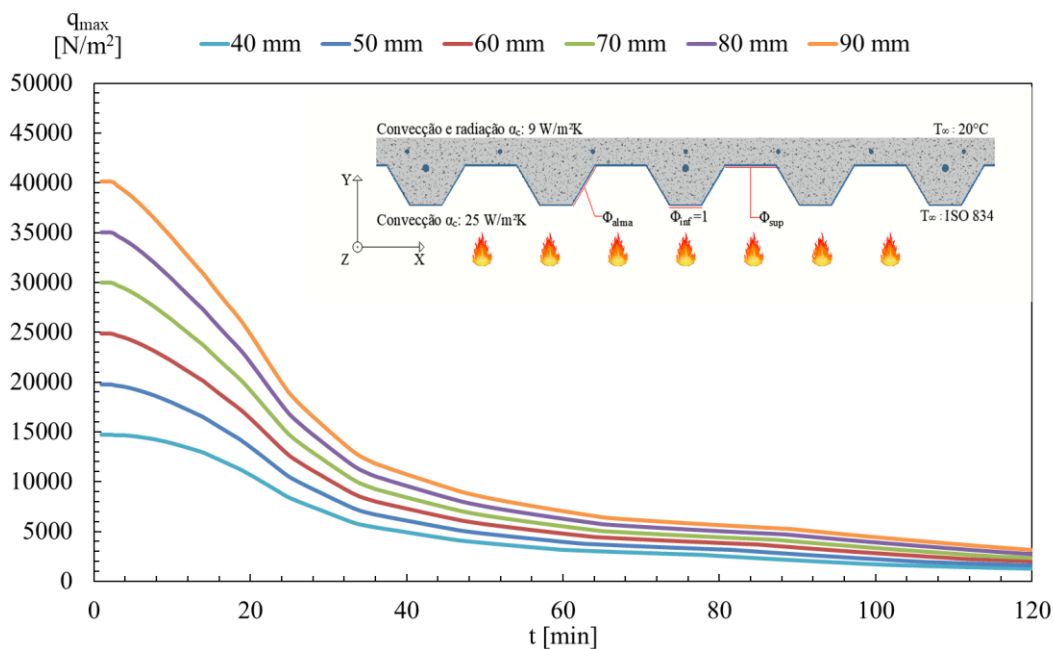


Figura 72 - Curvas de capacidade de carga das lajes com geometria trapezoidal Polideck 59S

Já a Figura 73, a seguir, apresenta as curvas da evolução da capacidade de carga ao longo do tempo para as lajes de geometria trapezoidal com deck metálico Confraplus 60. Nota-se que as curvas para as lajes com $h_I=40$ mm e $h_I=50$ mm apresentam um ligeiro aumento de sua capacidade de carga ao longo dos primeiros 15 minutos de incêndio, aproximadamente.

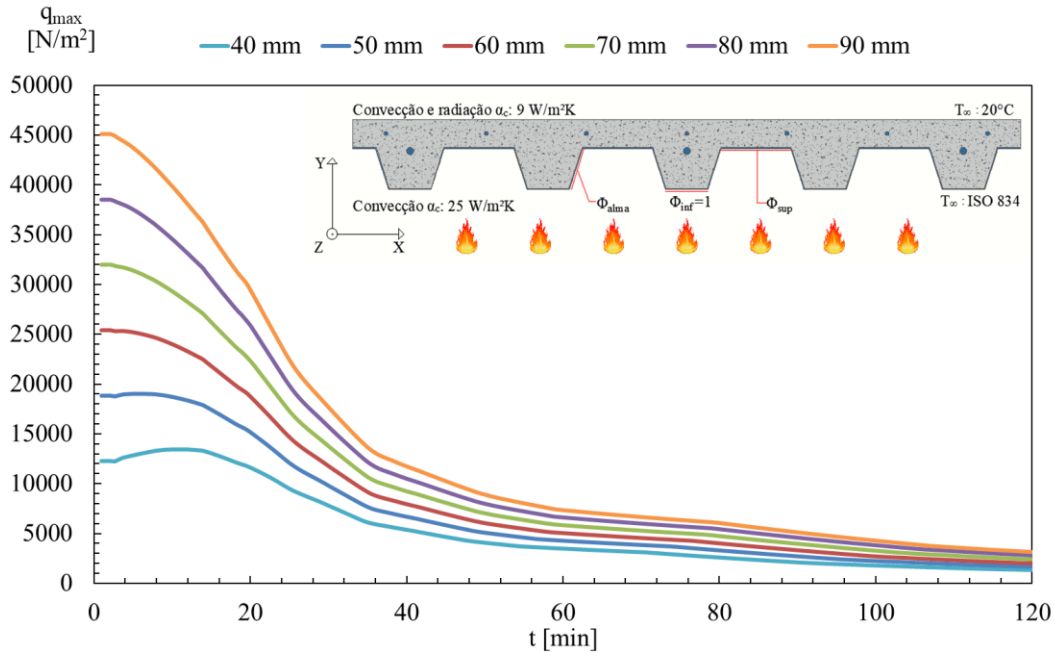


Figura 73 - Curvas de capacidade de carga das lajes com geometria trapezoidal Confraplus 60

Este aumento na capacidade de carga ocorre justamente entre as lajes que descrevem a nomeada inflexão do padrão das curvas de resistência t_{Rd} no gráfico da Figura 69, e pode ser explicado através do posicionamento da linha neutra (X_{pl}) e seu deslocamento em relação ao topo da laje ao longo do incêndio.

A Figura 74 compara a posição da linha neutra nas lajes para a chapa de aço Polideck 59S (T1) e para a chapa Confraplus 60 (T2) ao longo de todo o período de incêndio (2 horas). E a Figura 75 compara as taxas de deslocamento da linha neutra para as lajes com diferentes espessuras destas duas geometrias.

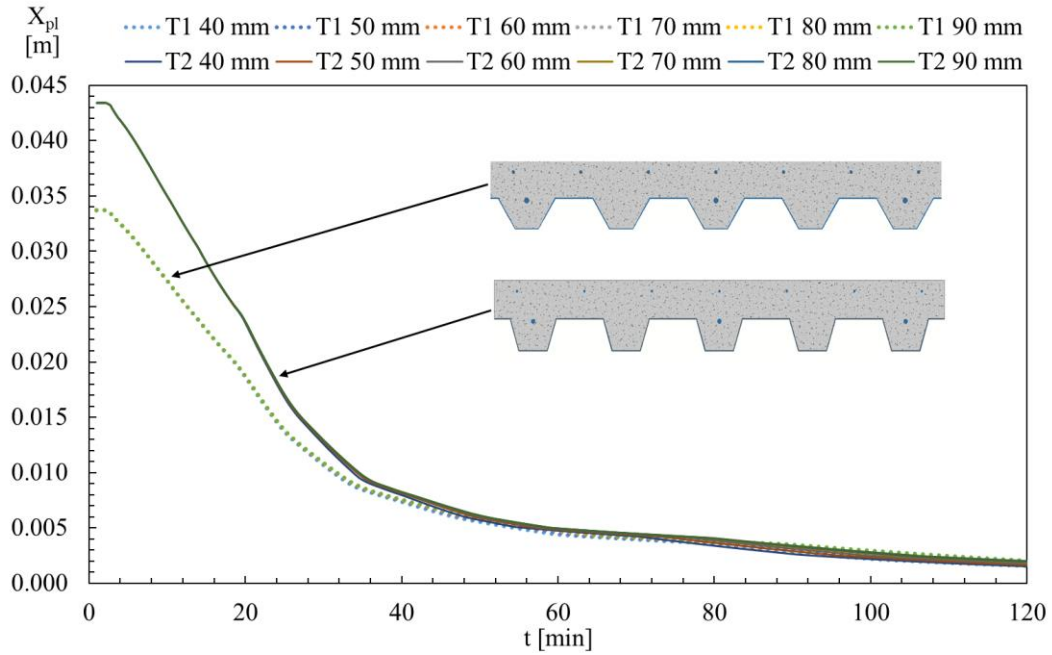


Figura 74 - Posição da linha neutra para as lajes trapezoidais T1 e T2 ao longo da exposição ao incêndio padrão ISO 834

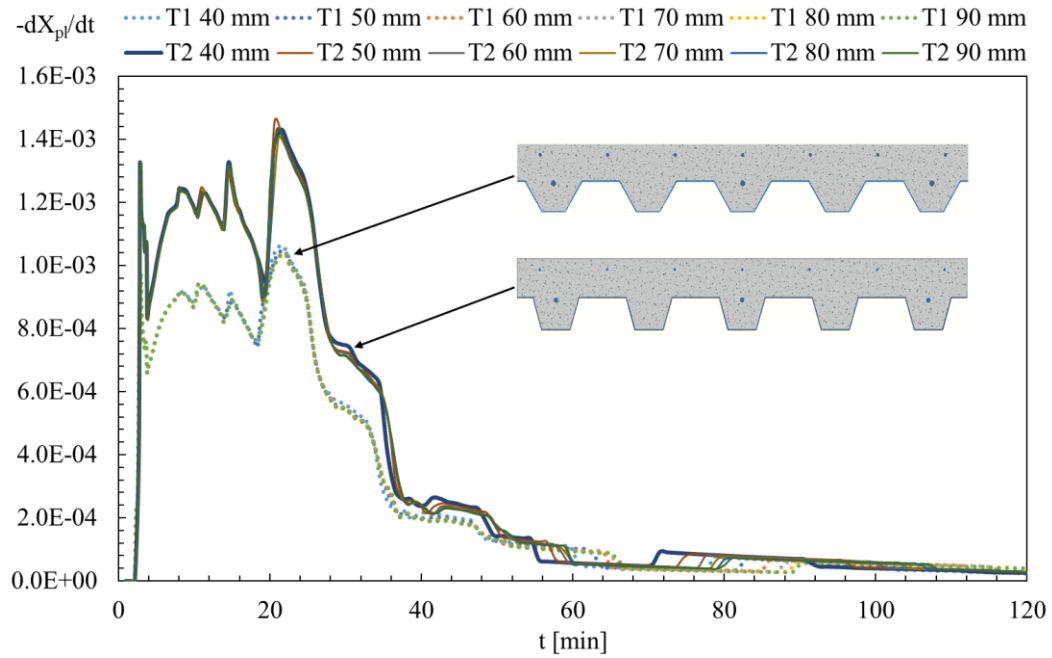


Figura 75 - Taxa de deslocamento da linha neutra para as lajes trapezoidais T1 e T2 ao longo da exposição ao incêndio padrão ISO 834

Conclui-se que para lajes onde as armaduras inferiores encontram-se inicialmente muito próximas da linha neutra, como é o caso das lajes com geometria trapezoidal Confraplus 60, esta alta taxa de afastamento da linha neutra que se desloca para a parte superior da estrutura ocasiona um aumento considerável na capacidade resistente das lajes que, por sua vez ocasiona o aumento do período de resistência ao fogo, analisado sob o critério de capacidade de carga (R).

O mesmo fenômeno pode ser observado nas lajes com geometria reentrante, como é apresentado na Figura 76 para a chapa de aço Multideck 50 e na Figura 77 para as lajes com chapa colaborante Bondeck.

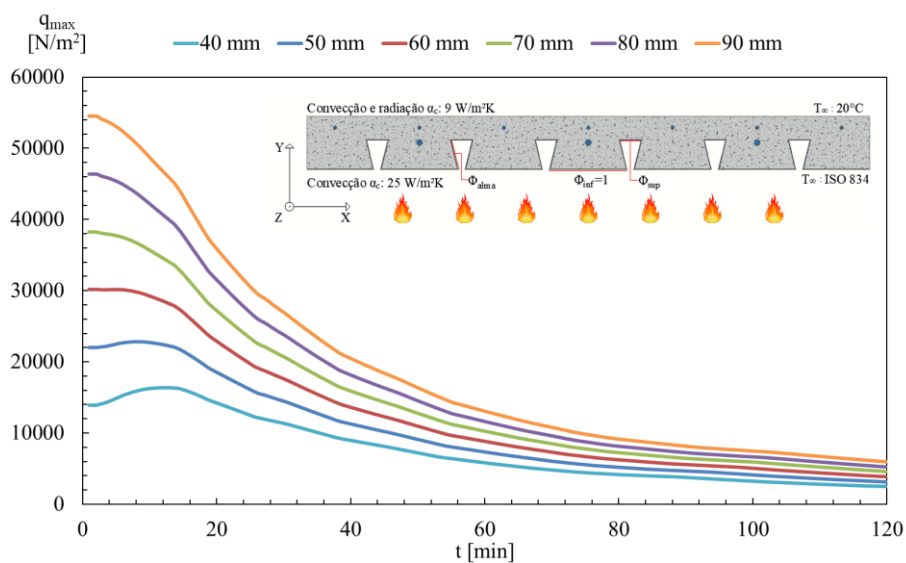


Figura 76 - Curvas de capacidade de carga das lajes com geometria reentrante Multideck 50

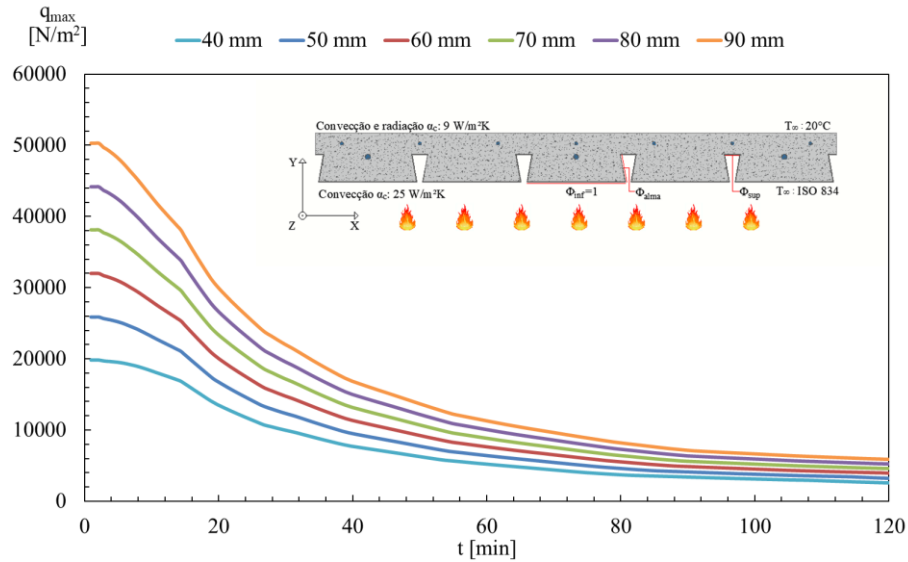


Figura 77 - Curvas de capacidade de carga das lajes com geometria reentrante Bondeck

Faz-se notar que para a laje utilizando chapa de aço Multideck 50 ocorre um aumento da capacidade de carga da laje nos períodos iniciais do incêndio para as lajes com espessura $h_I=40$ mm e $h_I=50$ mm. A Figura 78 apresenta a comparação entre a posição da linha neutra para todos os modelos de laje que utilizam chapas de aço Multideck 50 (R1) e Bondeck (R2).

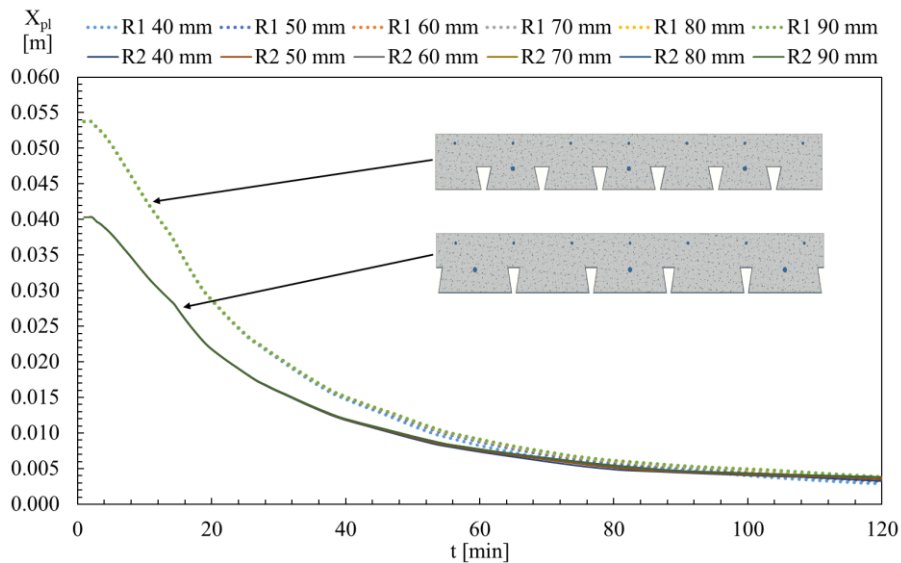


Figura 78 - Posição da linha neutra para as lajes reentrantes R1 e R2 ao longo da exposição ao incêndio padrão ISO 834

Por fim, é apresentado na Figura 79 a comparação entre as taxas de deslocamento da linha neutra para as lajes reentrantes Multideck 50 e Bondeck.

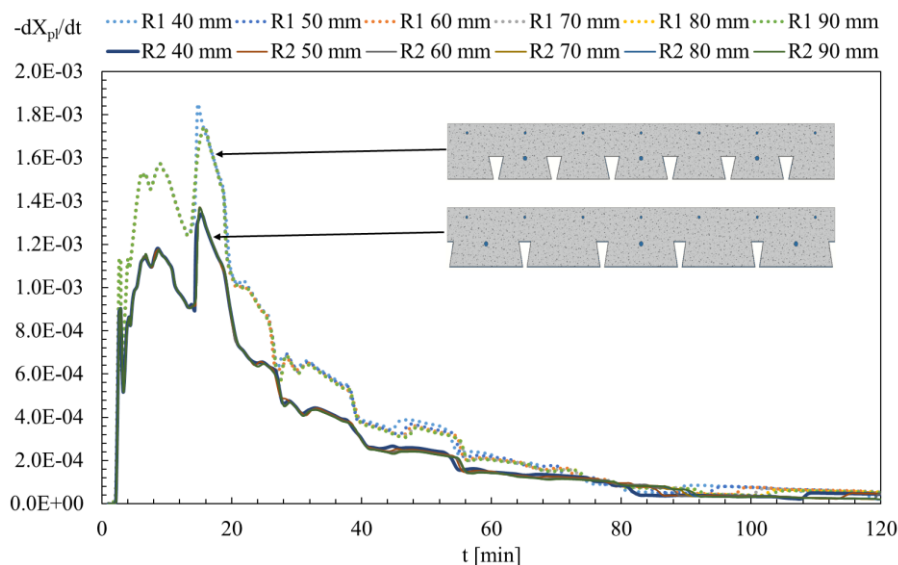


Figura 79 - Taxa de deslocamento da linha neutra para as lajes reentrantes R1 e R2 ao longo da exposição ao incêndio padrão ISO 834

7.3. NOVA PROPOSTA DE CÁLCULO PARA A RESISTÊNCIA AO FOGO (t_{Rd})

Utilizando os resultados obtidos a partir das simulações mecânicas, foram desenvolvidos novos modelos de cálculo para a resistência ao fogo (t_{Rd}) de lajes mistas com chapa de aço colaborante, tendo como variáveis o nível de carregamento (η) e a espessura efetiva (h_{eff}) da laje.

Para isto, com o auxílio do programa MATLAB, foram elaboradas superfícies de aproximação para os conjuntos de resultados provenientes de cada uma das 4 geometrias. Estas superfícies apresentam função quadrática para as variáveis η [%] e h_{eff} [mm] e cada uma contou com a aplicação de 30 pontos de dispersão oriundos dos resultados das simulações numéricas com o programa ANSYS.

A Figura 80 apresenta a superfície referente à nova proposta de cálculo da resistência ao fogo de lajes com geometria trapezoidal Polideck 59S, além de possibilitar a visualização da posição dos resultados obtidos através das simulações mecânicas com o programa ANSYS em relação à nova proposta.

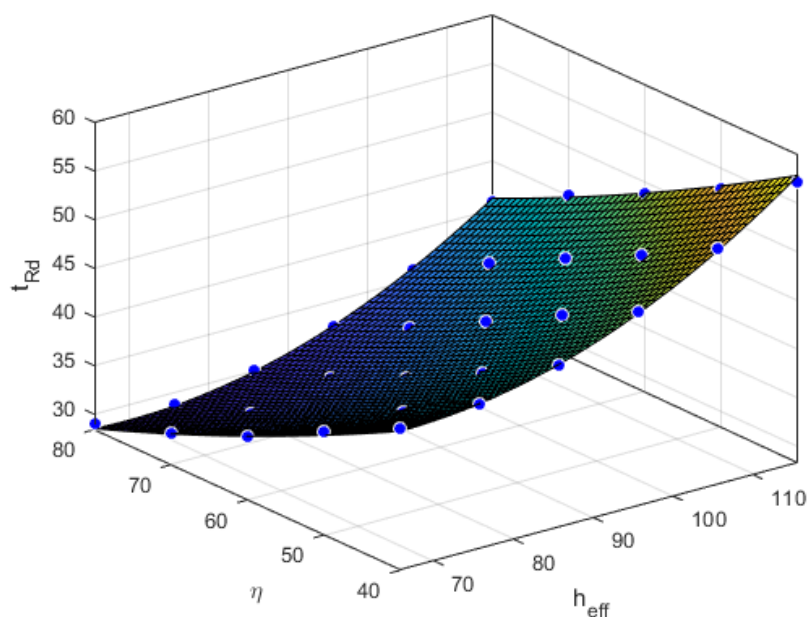


Figura 80 - Superfície de aproximação para a resistência ao fogo (t_{Rd}) das lajes trapezoidais Polideck 59S

A equação (55) define a superfície apresentada, e com 95% de confiança pode ser utilizada para estimar a resistência ao fogo das lajes trapezoidais Polideck 59S.

$$t_{Rd} = 84.58 - 74.01 \times 10^{-2} h_{eff} - 46.11 \times 10^{-2} \eta + 60.49 \times 10^{-4} h_{eff}^2 - 13.20 \times 10^{-4} h_{eff} \cdot \eta + 16.11 \times 10^{-4} \eta^2 \quad (55)$$

Na Figura 81 é apresentado a superfície de aproximação para os dados de resistência ao fogo segundo o critério de capacidade de carga (R), em função do nível de carregamento e da espessura efetiva das lajes trapezoidais Confraplus 60.

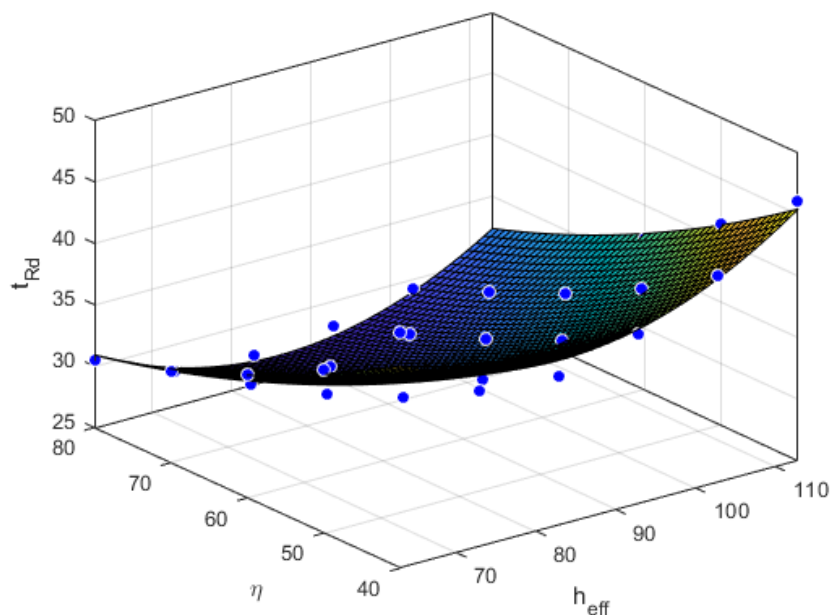


Figura 81 - Superfície de aproximação para a resistência ao fogo (t_{Rd}) das lajes trapezoidais Confraplus 60

A superfície apresentada na Figura 81 é definida pela equação (56) que, com 5% de significância, pode ser utilizada para estimar a resistência ao fogo (t_{Rd}) de lajes mistas com chapa de aço colaborante Confraplus 60.

$$t_{Rd} = 108.2 - 12.28 \times 10^{-1} h_{eff} - 54.39 \times 10^{-2} \eta + 77.26 \times 10^{-4} h_{eff}^2 - 12.47 \times 10^{-4} h_{eff} \cdot \eta + 29.89 \times 10^{-4} \eta^2 \quad (56)$$

A Figura 82 apresenta a superfície de aproximação dos resultados das simulações mecânicas para a resistência ao fogo das lajes mistas com chapa de aço colaborante Multideck 50, compreendendo funções quadráticas para as variáveis η [%] e h_{eff} [mm].

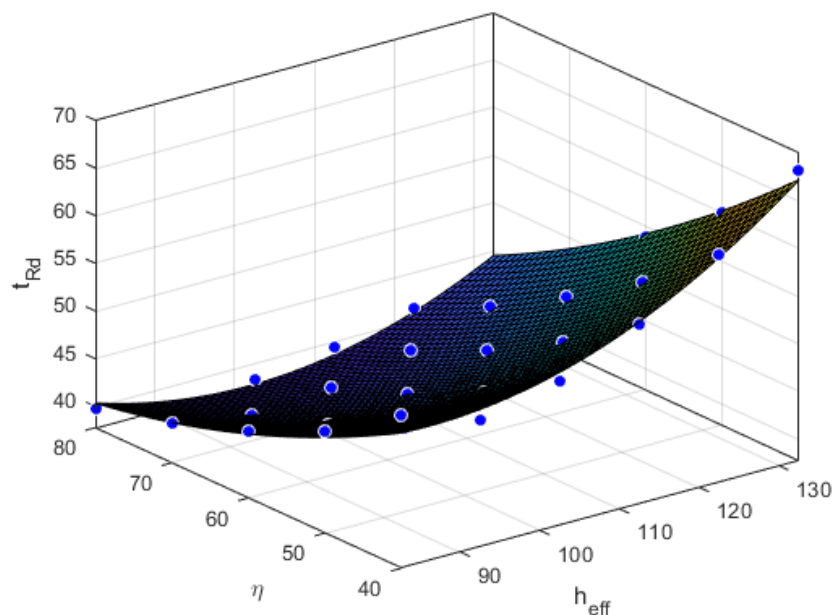


Figura 82 - Superfície de aproximação para a resistência ao fogo (t_{Rd}) das lajes reentrantes Multideck 50

Esta superfície pode ser expressa segundo a equação (57), que apresenta 95% de confiança para a estimativa da resistência ao fogo segundo o critério de capacidade de carga destas lajes.

$$\begin{aligned}
 t_{Rd} = & 110.5 - 98.68 \times 10^{-2} h_{eff} - 33.49 \times 10^{-2} \eta + 70.39 \times 10^{-4} h_{eff}^2 - \\
 & - 55.48 \times 10^{-4} h_{eff} \cdot \eta + 41.84 \times 10^{-4} \eta^2
 \end{aligned} \tag{57}$$

É apresentada na Figura 83 o modelo gráfico da superfície de aproximação dos valores de resistência ao incêndio das lajes mistas com chapa de aço colaborante reentrante Bondeck. Nota-se que neste modelo foi possível obter uma ótima aproximação.

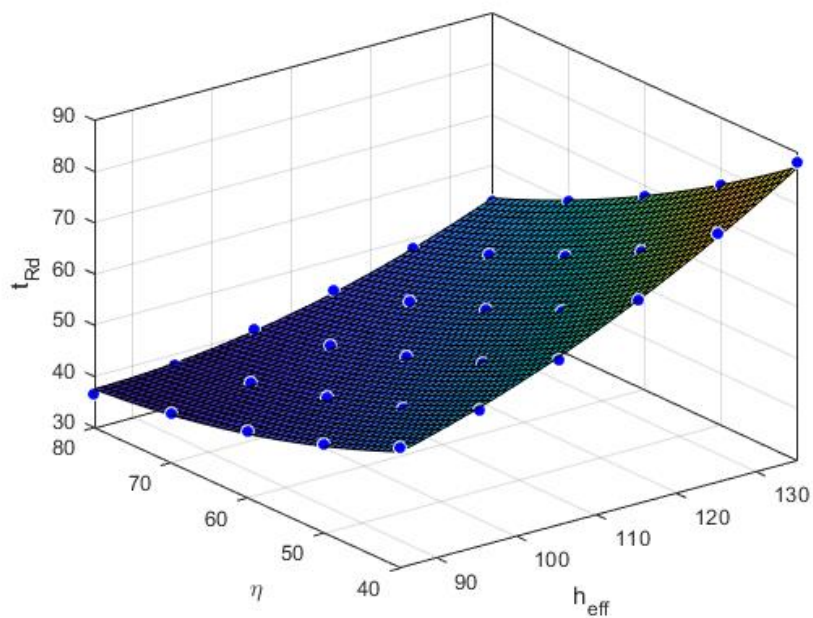


Figura 83 - Superfície de aproximação para a resistência ao fogo (t_{Rd}) das lajes reentrantes Bondeck

Com 5% de significância, é possível afirmar que a superfície apresentada na Figura 83 pode ser descrita segundo a equação (58), e utilizada para estimar a resistência ao fogo (t_{Rd}) de lajes mistas com chapa de aço reentrante, modelo Bondeck.

$$t_{Rd} = 68.94 - 28.57 \times 10^{-2} h_{eff} - 38.21 \times 10^{-2} \eta + 60.90 \times 10^{-4} h_{eff}^2 - 91.66 \times 10^{-4} h_{eff} \cdot \eta + 65.24 \times 10^{-4} \eta^2 \quad (58)$$

8. CONCLUSÕES

Este trabalho teve por seu papel investigar o efeito causado por diferentes níveis de carga aplicados em lajes mistas de aço e concreto com chapas de aço colaborante e para isso foram desenvolvidos modelos numéricos tridimensionais de lajes mistas com o auxílio do programa de elementos finitos ANSYS Mechanical APDL.

Para comprovar a confiabilidade dos parâmetros físicos e computacionais empregados neste estudo foram desenvolvidos modelos de validação com base em dados dispostos na literatura aplicados em 6 simulações. Sendo um modelo considerando o contato perfeito e interação de materiais na interface de concreto e chapa de aço e dois modelos considerando a existência de uma fina camada de ar entre a chapa de aço e o concreto, devido ao descolamento destes materiais, como indicado pelo autor. Os modelos com a camada de ar (*air-gap*) pretendem simular espessuras distintas para este espaço entre o concreto e o aço (0.5 mm e 1.0 mm).

A utilização de elementos de casca (SHELL131) para simular a camada de ar mostrou-se uma técnica eficiente pois reduz o período de processamento do modelo térmico, dada a redução do número de nós empregados nos modelos se comparado com o uso de elementos sólidos para este material como sugerido por outros autores.

Os resultados obtidos com o modelo de validação mostraram-se bons tanto para as simulações térmicas quanto para as mecânicas, com destaque para o Modelo #2-B que simulando o *air-gap* com 1.0 mm de espessura alcançou para a simulação térmica um erro relativo de apenas 5.41% em módulo e de 16.91% para o modelo mecânico.

Para os estudos paramétricos, foram realizadas 120 simulações compostas por modelos de lajes com 4 diferentes geometrias (2 trapezoidais e 2 reentrantes). Nestes modelos foram variados os parâmetros de espessura do cobrimento em concreto da laje (h_1) e nível de carregamento (η) para as simulações térmicas e mecânicas.

Através dos estudos paramétricos foi possível realizar a caracterização da resistência ao fogo (t_i) das lajes para diferentes espessuras de cobrimento (h_1) e para cada uma das geometrias foram definidas novas propostas de cálculo da resistência ao fogo segundo o critério de isolamento (I) para a temperatura máxima e a temperatura média nas superfícies não expostas ao incêndio, em função somente da espessura efetiva (h_{eff}) da laje.

Por fim, a partir dos estudos paramétricos referentes às simulações mecânicas, foi caracterizado o comportamento de lajes mistas submetidas a um incêndio padrão ISO 834 quando solicitadas por diferentes níveis de carga mecânica. Notou-se que a resistência ao fogo (t_{Rd}) analisada segundo o critério de capacidade de carga (R) destas estruturas não depende somente do nível de carregamento, mesmo este tendo grande importância no período de resistência ao fogo, mas também da espessura de cobrimento de concreto aplicada em cada laje.

Durante a análise dos resultados mecânicos, foi detectado um fenômeno que influenciava a quebra no padrão de aumento da capacidade de resistência ao fogo (t_{Rd}) das lajes mistas em função do aumento da espessura efetiva (h_{eff}). O fenômeno foi percebido e estudado, sendo a causa atribuída ao posicionamento e taxa de deslocamento da linha neutra em lajes mais esbeltas que ocasionava um aumento na capacidade de carga da laje nos momentos iniciais do incêndio.

Com base nos resultados obtidos nas simulações mecânicas, novos modelos de cálculo da resistência ao fogo (t_{Rd}), de lajes mistas com chapa de aço colaborante, foram apresentados. Estes modelos consideram para o cálculo a variação do nível de carregamento (η) e da espessura efetiva das lajes (h_{eff}).

8.1. RECOMENDAÇÕES PARA TRABALHOS FUTUROS

Apesar da causa da anomalia no padrão de aumento da capacidade de resistência ao fogo (t_{Rd}) das lajes mistas em função do aumento da espessura efetiva (h_{eff}) ter sido identificada, este é um fenômeno que merece estudos mais aprofundados, com a variação de diversos parâmetros geométricos e das propriedades dos materiais.

Além disso, a verificação experimental dos novos modelos de cálculo propostos é de grande importância para o aprimoramento do método.

Ainda, é aconselhada a realização de mais simulações, térmicas e mecânicas, variando parâmetros como a área de aço de reforço aplicado na região inferior das lajes, a posição da grelha de reforço em relação ao topo da laje os valores de emissividade para o aço das chapas metálicas, o uso de concretos leves (*light weight concrete*) e a atribuição de diferentes tipos de distribuição de cargas (Ex.:lineares, pontuais, triangulares).

9. BIBLIOGRAFIA

- [1] G. M. E. Cooke, R. M. Lawson e G. M. Newman, “Fire Resistance of Composite Deck Slabs,” *The Structural Engineer*, pp. 253-267, 1988.
- [2] MCRMA; SCI, Composite Slabs and Beams Using Steel Decking: Best Practice for Design and Construction, Prenton: The Metal Cladding And Roofing Manufacturers Association Limited, 2009.
- [3] National Institute of Standards and Technology, Technical Note 1958, Washington D. C.: NIST, 2017.
- [4] S. Guo, “Experimental and Numerical Study on Restrained Composite Slab During Heating and Cooling,” *Journal of Constructional Steel Research*, vol. 69, n° 1, pp. 95-105, 2012.
- [5] National Fire Protection Association; Society of Fire Protection Engineers, SFPE Handbook of Fire Protection Engineering, Quincy: National Fire Protection Association, 2002.
- [6] J. Fourier, Analytical Theory of Heat, Cambridge: Cambridge University Press, 1878.
- [7] ECCS, Calculation of Fire Resistance of Composite Concrete Slabs with Profiled Steel Sheet Exposed to the Standard Fire, Rotterdam: ECCS - Technical Committee, 1983.
- [8] International Organization of Standardization, ISO 834: Fire Resistance Tests - Elements of Building Construction, Geneva: ISO, 1999.
- [9] G. Thomson, C. K. Moxon e R. R. Preston, Indicative Fire Test on Composite Concrete/Steel Deck Floor System, Moorgate: British Steel Corporation, 1987.
- [10] R. Hamerlinck, L. Twilt e J. W. B. Stark, “A Numerical Model for Fire-exposed Composite Steel/Concrete Slabs,” *International Specialty Conference on Cold-Formed Steel Structures*, pp. 115-130, 1990.
- [11] A. F. Hamerlinck, The Behaviour of Fire-Exposed Composite Steel/Concrete Slabs, Eindhoven: Technische Universiteit Eindhoven, 1991.

- [12] CEN, EN 1994-1-2: Design of Composite Steel and Concrete Structures - Structural Fire Design, Brussels: European Committee of Standardization, 2004.
- [13] R. Hamerlinck e L. Twilt, "Fire Resistance of Composite Slabs," *J. Construct. Steel Research*, pp. 71-85, 1995.
- [14] K. Both, "Fire-Exposed Continuous Span Composite Steel-Concrete Slabs," *HERON*, vol. 41, n° 3, pp. 187-199, 1996.
- [15] K. Both e J. Fellingner, "Shallow Floor Construction with Deep Composite Deck: From Fire Tests to Simple Calculation Rules," *HERON*, vol. 42, n° 3, pp. 145-158, 1997.
- [16] C. Both, *The Fire Resistance of Composite Steel-Concrete Slabs*, Delf: Technische Universiteit Delf, 1998.
- [17] C. G. Bailey, T. Lennon e D. B. Moore, "The Behaviour of Full-Scale Steel Framed Buildings Subjected to Compartment Fires," *The Structural Engineer*, vol. 77, n° 8, pp. 15-21, 1999.
- [18] C. G. Bailey e D. B. Moore, "The Structural Behaviour of Steel Frames with Composite Floorslabs Subjected to Fire - Part 1: Theory," *The Structural Engineer*, vol. 78, n° 11, pp. 19-27, 2000.
- [19] S. Lamont, A. S. Usmani e D. D. Drysdale, "Heat Transfer Analysis of the Composite Slab in the Cardington Frame Fire Tests," *Fire Safety Journal*, vol. 36, n° 1, pp. 815-839, 2001.
- [20] T. Lennon, *BRE Cardington Steel Frame Building Fire Tests*, Garston: BRE Global, 1997.
- [21] L. Lim e C. Wade, *Experimental Fire Tests of Two-Way Concrete Slabs*, Canterbury: University of Canterbury, 2002.
- [22] L. Lim, A. Buchanan, P. Moss e J.-M. Franssen, "Numerical Modelling of Two-Way Reinforced Concrete Slabs in Fire," *Engineering Structures*, vol. 26, n° 1, pp. 1081-1091, 2004.
- [23] A. J. Wang, "Fire Resistance Design of Composite Slabs in Building Structures: From Research to Practice," *Structural Engineer*, vol. 84, n° 20, pp. 30-36, 2006.

- [24] C. G. Bailey e S. Guo, “Experimental Behaviour of Composite Slabs During the Heating and Cooling Fire Stages,” *Engineering Structures*, vol. 33, n° 1, pp. 563-571, 2011.
- [25] CEN, EN 1991-1-2: Actions on Structures - Actions on Structures Exposed to Fire, Brussels: European Committee for Standardization, 2002.
- [26] J. Jiang, A. Usnami e G.-Q. Li, “Modelling of Steel-Concrete Composite Structures in Fire Using OpenSees,” *Advances in Structural Engineering*, vol. 17, n° 1, pp. 249-264, 2014.
- [27] S.-C. Jiang, G. Ranzi, L.-Z. Chen e G.-Q. Li, “Behaviour and Design of Composite Beams with Composite Slabs at Elevated Temperatures,” *Advances in Structural Engineering*, vol. 20, n° 10, pp. 1451-1465, 2017.
- [28] G.-Q. Li, N. Zhang e J. Jiang, “Experimental Investigation on Thermal and Mechanical Behaviour of Composite Floors Exposed to Standard Fire,” *Fire Safety Journal*, vol. 89, n° 1, pp. 63-76, 2017.
- [29] J. Jiang, J. A. Main, J. M. Weigand e F. H. Sadek, “Thermal Performance of Composite Slabs with Profiled Steel Decking Exposed to Fire Effects,” *Fire Safety Journal*, vol. 95, n° 1, pp. 25-41, 2018.
- [30] CEN, EN 1363-1: Fire Resistance Tests - General Requirements, Brussels: European Committee of Standardization, 2012.
- [31] P. Piloto, C. Balsa, F. Ribeiro, L. Santos, R. Rigobello e É. Kimura, “Three-Dimensional Numerical Modelling of Fire Exposed Composite Slab With Steel Deck,” *MATTER: International Journal of Science and Technology*, vol. 5, n° 2, pp. 48-67, 2019.
- [32] P. Piloto, C. Balsa, F. Ribeiro, R. Rigobello, L. Santos e É. Kimura, “Validation Models on the Fire Resistance of Composite Slab With Steel Deck,” *Congress on Numerical Methods in Engineering*, pp. 625-642, 1 July 2019.
- [33] P. Piloto, C. Balsa, L. Santos e É. Kimura, “Effect of the Load Level in the Resistance of Composite Slabs With Steel Decking Under Fire Conditions,” *Journal of Fire Sciences*, vol. 37, 2019.

- [34] C. Balsa, L. Santos, P. Piloto e É. Kimura, “Effect of the Load Level in the Fire Resistance of Composite Slab with Steel Decking,” *Congresso Ibero-Latino-Americano em Segurança contra Incêndio*, 15 Julho 2019.
- [35] J. H. L. IV e J. H. L. V, *A Heat Transfer Textbook*, Cambridge: Phlogiston Press, 2017.
- [36] M. N. Özişik, *Boundary Value Problems of Heat Conduction*, New York: Dover Publications, 1968.
- [37] M. N. Özişik, *Heat Transfer: A Basic Approach*, Singapura: McGraw-Hill Book Company, 1985.
- [38] A. Atreya, “Convection Heat Transfer,” em *Handbook of Fire Protection Engineering*, New York, Springer, 2016, pp. 53-101.
- [39] F. P. Incropera e D. P. DeWitt, *Fundamentals of Heat and Mass Transfer*, New York: John Wiley & Sons, 1996.
- [40] Y. A. Çengel, *Heat Transfer: A Practical Approach*, Boston: McGraw-Hill, 1998.
- [41] J. H. L. IV e J. H. L. V, *A Heat Transfer Textbook*, Cambridge: Phlogiston Press, 2017.
- [42] C. L. Tien, K. Y. Lee e A. J. Stretton, “Radiation Heat Transfer,” em *Handbook of Fire Protection Engineering*, New York, Springer, 2016, pp. 102-137.
- [43] Y. A. Çengel e A. G. Ghajar, *Heat and Mass Transfer: Fundamentals and Applications*, New York: McGraw-Hill Education, 2015.
- [44] CEN, EN 1993-1-2: *Design of Steel Structures - Structural Fire Design*, Brussels: European Committee of Standardization, 2005.
- [45] CEN, EN 1992-1-2: *Design of Concrete Structures - Structural Fire Design*, Brussels: European Committee of Standardization, 2004.
- [46] CEN, EN 1993-1-1: *Design of Steel Structures - General Rules and Rules for Buildings*, Brussels: European Committee of Standardization, 2009.

- [47] CEN, EN 1992-1-1: Design of Concrete Structures - General Rules and Rules for Buildings, Brussels: European Committee for Standardization, 2004.
- [48] CEN, EN 1994-1-1: Design of Composite Steel and Concrete Structures - General Rules and Rules for Buildings, Brussels: European Committee of Standardization, 2004.
- [49] ANSYS, Inc., Mechanical APDL Element Reference, Canonsburg: SAS IP, 2017.
- [50] L. M. S. Prates, Simulação Numérica do Comportamento ao Fogo de Estruturas Mistas (Lajes), tese de mestrado, Bragança: Instituto Politécnico de Bragança, 2018.
- [51] P. Piloto, C. Balsa, F. Ribeiro e R. Rigobello, “Improved Calculation Methods for the Temperature of the Steel Components of Composite Slabs Under Fire Conditions,” *XII Congresso de Construção Metálica Mista*, 21 Novembro 2019.
- [52] F. F. Ribeiro, Numerical Simulation of Composite Slabs with Steel Deck Under Fire Conditions, tese de mestrado, Bragança: Instituto Politécnico de Bragança, 2019.
- [53] O. M. Oliveira, M. D. Brasil e B. O. Anjos, “Estudo das Propriedades do Zinco e Suas Aplicações na Construção Civil,” *Congresso Brasileiro de Engenharia e Ciência dos Materiais*, pp. 5747-5752, 6 Novembro 2016.
- [54] D. E. Wainman, Summary of Data Obtained During Tests on Three Composite Metal Deck Shelf Angle Floor Beams, Moorgate: British Steel plc, 1996.
- [55] M. Crisinel, “Composite Slabs,” *IABSE Reports*, pp. 69-87, 1990.
- [56] M. A. H. Abdel-Halim, M. R. Hakmi e D. C. O'Leary, “Fire Resistance of Composite Floor Slabs Using a Model Fire Test Facility,” *Engineering Structures*, vol. 21, n° 1, pp. 176-182, 1999.
- [57] A. Nadjai, C. G. Bailey, O. Vassart, S. Han, B. Zhao, M. Hawes, M. Frassen e I. Simms, “Full-Scale Fire Test on a Composite Floor Slab Incorporating Long Span Cellular Steel Beams,” *Structural Engineering*, vol. 89, n° 21, pp. 18-25, 2011.

- [58] J. Jiang, A. Pintar, J. M. Weingard, J. A. Main e F. Sadek, “Improved Calculation Method for Insulation-Based Fire Resistance of Composite Slabs,” *Fire Safety Journal*, vol. 105, pp. 144-153, 2019.
- [59] G.-Q. Li e P. Wang, *Advanced Analysis and Design for Fire Safety of Steel Structures*, New York: Springer, 2013.

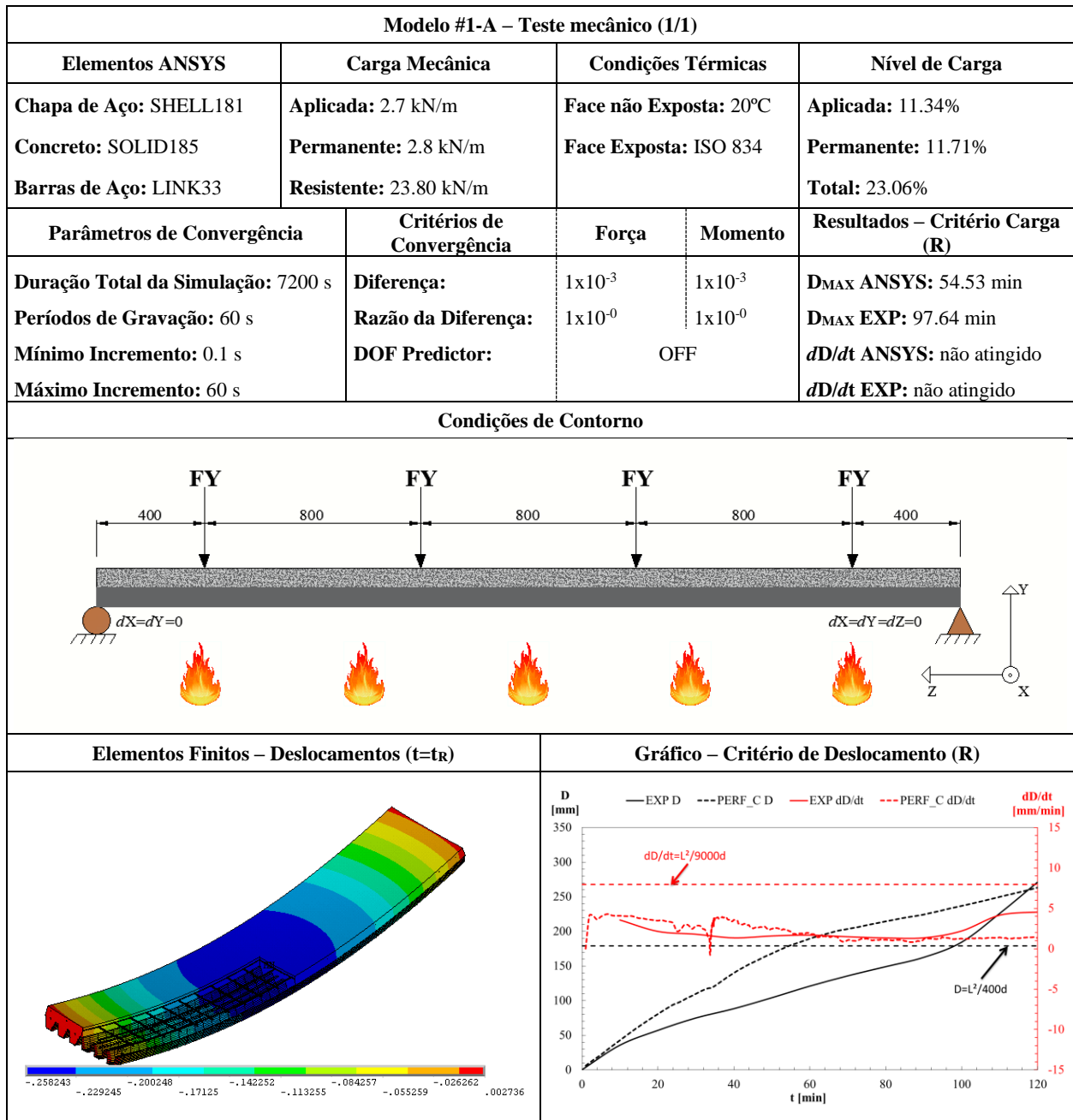
ANEXO A: FICHAS TÉCNICAS

O Anexo A disponibiliza as fichas técnicas de todas as simulações realizadas. A organização das fichas é descrita por:

- Modelos de Validação (Hamerlinck, 1991): Modelo #1-A ~ Modelo #2-B
- Lajes Trapezoidais Polideck 59S: Modelo #3 ~ Modelo #10
- Lajes Trapezoidais Confraplus 60: Modelo #11 ~ Modelo #18
- Lajes Reentrantes Multideck 50: Modelo #19 ~ Modelo #26
- Lajes Reentrantes Bondeck: Modelo #27 ~ Modelo #34

FICHA TÉCNICA			
Modelo #1-A – Validação – Hamerlinck (Contato Perfeito)			
Modelo #1-A – Dados Básicos (1/1)			
Tipo de Experimento	Título: A Numerical Model for Fire-exposed Composite Steel/concrete Slabs		
Validação	Autor(es): R. Hamerlinck, L. Twilt, J. W. B. Stark	Ano: 1990	
Detalhamento			
Chapa de Aço	Concreto	Barras de Aço	
Geometria: Trapezoidal Espessura (mm): 0.75 Classe do aço: S280	Densidade: Convencional Classe: C20/25 Umidade: 3.4%	Varões	Grelha de Reforço
		Descrição: Ø6//150 Classe do aço: S500	Descrição: 3Ø10 Classe do aço: S500
Secção Transversal			
Secção Longitudinal			
Modelo de Elementos Finitos			

Modelo #1-A – Teste térmico (1/1)				
Elementos ANSYS	Coef. de Convecção (α_c)	Curvas de Temperatura	Fator de Vista (Φ)	Emissividade (ϵ)
Chapa de Aço: SHELL131 Concreto: SOLID70 Barras de Aço: LINK33	Sup. Exposta: 25 W/m ² K Sup. Ñ Exposta: 9 W/m ² K	Face não Exposta: 20°C Face Exposta: ISO 834	Flange Superior: 0.36 Alma: 0.33 Flange Inferior: 1.00	Chapa de Aço: 0.7 Concreto: 0.7 Barras de Aço: 0.7
Parâmetros de Convergência		Critérios de Convergência – Heat Flux		Resultados - Critério Isolamento (I)
Duração Total da Simulação: 7200 s Períodos de Gravação: 60 s Mínimo Incremento: 1 s Máximo Incremento: 60 s		Diferença: 1×10^{-3} Razão da Diferença: 1×10^{-6}		T _{MAX} ANSYS: 85.26 min T _{MAX} EXP: 101.97 min T _{MED} ANSYS: 75.32 min T _{MED} EXP: 88.28 min
Condições de Contorno			Elementos Finitos – Temperaturas (t=t _i)	
Gráfico – Critério de Isolamento (I)			Gráfico de Temperaturas na Seção da Laje	



FICHA TÉCNICA				
Modelo #2-A – Validação – Hamerlinck (Camada de Ar 0.5 mm)				
Modelo #2-A – Dados Básicos (1/1)				
Tipo de Experimento	Título: A Numerical Model for Fire-exposed Composite Steel/concrete Slabs			
Validação	Autor(es): R. Hamerlinck, L. Twilt, J. W. B. Stark		Ano: 1990	
Detalhamento				
Chapa de Aço	Concreto	Barras de Aço		Camada de Ar
Geometria: Trapezoidal Espessura (mm): 0.75 Classe do aço: S280	Densidade: Convencional Classe: C20/25 Umidade: 3.4%	Varões	Grelha de Reforço	Espessura de 0.5 mm posicionada entre as faces do concreto e da chapa de aço.
		Descrição: Ø6//150 Classe do aço: S500	Descrição: 3Ø10 Classe do aço: S500	
Secção Transversal				
Secção Longitudinal				
Modelo de Elementos Finitos – Térmico		Modelo de Elementos Finitos – Mecânico		

Modelo #2-A – Teste térmico (1/1)				
Elementos ANSYS	Coef. de Convecção (α_c)	Curvas de Temperatura	Fator de Vista (Φ)	Emissividade (ϵ)
Chapa de Aço: SHEL131 Concreto: SOLID70 Barras de Aço: LINK33 Ar: SHELL131	Sup. Exposta: 25 W/m ² K Sup. Ñ Exposta: 9 W/m ² K	Face não Exposta: 20°C Face Exposta: ISO 834	Flange Superior: 0.36 Alma: 0.33 Flange Inferior: 1.00	Chapa de Aço: 0.7 Concreto: 0.7 Barras de Aço: 0.7 Ar: 0.7
Parâmetros de Convergência		Critérios de Convergência – Heat Flux		Resultados - Critério Isolamento (I)
Duração Total da Simulação: 7200 s Períodos de Gravação: 60 s Mínimo Incremento: 1 s Máximo Incremento: 60 s		Diferença: 1x10 ⁻³ Razão da Diferença: 1x10 ⁻⁶		T _{MAX} ANSYS: 96.43 min T _{MAX} EXP: 101.97 min T _{MED} ANSYS: 84.85 min T _{MED} EXP: 88.28 min
Condições de Contorno			Elementos Finitos – Temperaturas (t=t _i)	
Gráfico – Critério de Isolamento (I)			Gráfico de Temperaturas na Secção da Laje	

Modelo #2-A – Teste mecânico (1/1)				
Elementos ANSYS	Carga Mecânica	Condições Térmicas	Nível de Carga	
Chapa de Aço: SHEL181 Concreto: SOLID185 Barras de Aço: LINK33 Ar: Não Considerado	Aplicada: 2.7 kN/m Permanente: 2.8 kN/m Resistente: 23.80 kN/m	Face não Exposta: 20°C Face Exposta: ISO 834	Aplicada: 11.34% Permanente: 11.71% Total: 23.06%	
Parâmetros de Convergência	CrITÉrios de Convergência	Força	Momento	Resultados – Critério Carga (R)
Duração Total da Simulação: 7200 s Períodos de Gravação: 60 s Mínimo Incremento: 0.1 s Máximo Incremento: 60 s	Diferença: Razão da Diferença: DOF Predictor:	1×10^{-3} 1×10^{-0}	1×10^{-3} 1×10^{-0} OFF	D _{MAX} ANSYS: 69.06 min D _{MAX} EXP: 97.64 min dD/dt ANSYS: não atingido dD/dt EXP: não atingido
Condições de Contorno				
Elementos Finitos – Deslocamentos (t=t _R)		Gráfico – Critério de Deslocamento (R)		

FICHA TÉCNICA				
Modelo #2-B – Validação – Hamerlinck (Camada de Ar 1.0 mm)				
Modelo #2-B – Dados Básicos (1/1)				
Tipo de Experimento	Título: A Numerical Model for Fire-exposed Composite Steel/concrete Slabs			
Validação	Autor(es): R. Hamerlinck, L. Twilt, J. W. B. Stark		Ano: 1990	
Detalhamento				
Chapa de Aço	Concreto	Barras de Aço		Camada de Ar
Geometria: Trapezoidal Espessura (mm): 0.75 Classe do aço: S280	Densidade: Convencional Classe: C20/25 Umidade: 3.4%	Varões	Grelha de Reforço	Espessura de 1.0 mm posicionada entre as faces do concreto e da chapa de aço.
		Descrição: Ø6//150	Descrição: 3Ø10	
		Classe do aço: S500	Classe do aço: S500	
Secção Transversal				
Secção Longitudinal				
Modelo de Elementos Finitos – Térmico			Detalhe – Camada de Ar	

Modelo #2-B – Teste térmico (1/1)				
Elementos ANSYS	Coef. de Convecção (α_c)	Curvas de Temperatura	Fator de Vista (Φ)	Emissividade (ϵ)
Chapa de Aço: SHEL131 Concreto: SOLID70 Barras de Aço: LINK33 Ar: SHELL131	Sup. Exposta: 25 W/m ² K Sup. Ñ Exposta: 9 W/m ² K	Face não Exposta: 20°C Face Exposta: ISO 834	Flange Superior: 0.36 Alma: 0.33 Flange Inferior: 1.00	Chapa de Aço: 0.7 Concreto: 0.7 Barras de Aço: 0.7 Ar: 0.7
Parâmetros de Convergência		Critérios de Convergência – Heat Flux		Resultados - Critério Isolamento (I)
Duração Total da Simulação: 7200 s Períodos de Gravação: 60 s Mínimo Incremento: 1 s Máximo Incremento: 60 s		Diferença: 1x10 ⁻³ Razão da Diferença: 1x10 ⁻⁶		T _{MAX} ANSYS: 96.43 min T _{MAX} EXP: 101.97 min T _{MED} ANSYS: 84.85 min T _{MED} EXP: 88.28 min
Condições de Contorno			Elementos Finitos – Temperaturas (t=t _i)	
Gráfico – Critério de Isolamento (I)			Gráfico de Temperaturas na Secção da Laje	

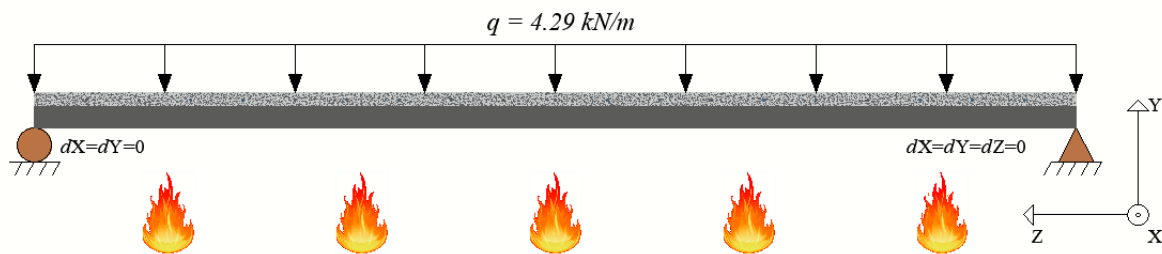
Modelo #2-A – Teste mecânico (1/1)				
Elementos ANSYS	Carga Mecânica	Condições Térmicas	Nível de Carga	
Chapa de Aço: SHEL181 Concreto: SOLID185 Barras de Aço: LINK33 Ar: Não Considerado	Aplicada: 2.7 kN/m Permanente: 2.8 kN/m Resistente: 23.80 kN/m	Face não Exposta: 20°C Face Exposta: ISO 834	Aplicada: 11.34% Permanente: 11.71% Total: 23.06%	
Parâmetros de Convergência	CrITÉrios de Convergência	Força	Momento	Resultados – Critério Carga (R)
Duração Total da Simulação: 7200 s Períodos de Gravação: 60 s Mínimo Incremento: 0.1 s Máximo Incremento: 60 s	Diferença: Razão da Diferença: DOF Predictor:	1×10^{-3} 1×10^{-0}	1×10^{-3} 1×10^{-0} OFF	D _{MAX} ANSYS: 81.12 min D _{MAX} EXP: 97.64 min dD/dt ANSYS: não atingido dD/dt EXP: não atingido
Condições de Contorno				
<p>The diagram shows a horizontal beam of length L. It is supported by a pin support at the left end (X=0) and a roller support at the right end (X=L). The boundary conditions are $dX=dY=0$ at the pin support and $dX=dY=dZ=0$ at the roller support. Four vertical downward forces, each labeled 'FY', are applied to the beam. The distances between the forces are 400, 800, 800, 800, and 400 units. Below the beam, five fire icons represent the thermal loading. A coordinate system is shown at the bottom right with X pointing left, Y pointing up, and Z pointing out of the page.</p>				
Elementos Finitos – Deslocamentos (t=t _R)	Gráfico – Critério de Deslocamento (R)			
<p>A 3D finite element model of the beam showing displacement contours. The color scale ranges from blue (negative displacement) to red (positive displacement). The values are: -.258243, -.229245, -.200248, -.171125, -.142252, -.113255, -.084257, -.055259, -.026262, .002736.</p>	<p>The graph plots displacement D [mm] and rate of displacement dD/dt [mm/min] against time t [min]. The left y-axis is D [mm] (0 to 350) and the right y-axis is dD/dt [mm/min] (-15 to 15). The x-axis is t [min] (0 to 120). The legend includes: EXP D (solid black line), M2b D (dashed black line), EXP dD/dt (solid red line), and M2b dD/dt (dashed red line). A horizontal dashed red line is labeled $dD/dt=L^2/9000d$ and a horizontal dashed black line is labeled $D=L^2/400d$.</p>			

FICHA TÉCNICA			
Modelo #3 – Polideck 59S – 40 mm			
Modelo #3 – Dados Básicos (1/1)			
Tipo de Experimento	Título: Polideck 59S (BRA) / H ₁ =40 mm		
Estudo Paramétrico	Autor(es): Santos, L. M. C.		Ano: 2019
Detalhamento			
Chapa de Aço	Concreto	Barras de Aço	
Geometria: Trapezoidal	Densidade: Convencional	Varões	Grelha de Reforço
Espessura (mm): 1.25	Classe: C20/25	Descrição: Ø6//150	Descrição: 3Ø10
Classe do aço: S275	Umidade: 3.0%	Classe do aço: S500	Classe do aço: S500
Secção Transversal			
Secção Longitudinal			
Modelo de Elementos Finitos			

Modelo #3 – Teste térmico (1/1)				
Elementos ANSYS	Coef. de Convecção (α_c)	Curvas de Temperatura	Fator de Vista (Φ)	Emissividade (ϵ)
Chapa de Aço: SHELL131 Concreto: SOLID70 Barras de Aço: LINK33	Sup. Exposta: 25 W/m ² K Sup. Ñ Exposta: 9 W/m ² K	Face não Exposta: 20°C Face Exposta: ISO 834	Flange Superior: 0.78 Alma: 0.67 Flange Inferior: 1.00	Chapa de Aço: 0.7 Concreto: 0.7 Barras de Aço: 0.7
Parâmetros de Convergência		Critérios de Convergência – Heat Flux		Resultados - Critério Isolamento (I)
Duração Total da Simulação: 7200 s Períodos de Gravação: 60 s Mínimo Incremento: 1 s Máximo Incremento: 60 s		Diferença: 1×10^{-3} Razão da Diferença: 1×10^{-6}		T _{MAX} : 26.45 min T _{MED} : 31.49 min
Condições de Contorno			Elementos Finitos – Temperaturas (t=t _i)	
Gráfico – Critério de Isolamento (I)			Gráfico de Temperaturas na Seção da Laje	

Modelo #3 – Teste mecânico (1/5)				
Elementos ANSYS	Carga Mecânica	Condições Térmicas		Nível de Carga
Chapa de Aço: SHELL181	Aplicada: 4.29 kN/m	Face não Exposta: 20°C		Aplicada: 29.22%
Concreto: SOLID185	Permanente: 1.58 kN/m	Face Exposta: ISO 834		Permanente: 10.78%
Barras de Aço: LINK33	Resistente: 14.69 kN/m			Total: 40.00%
Parâmetros de Convergência	Crítérios de Convergência	Força	Momento	Resultados – Critério Carga (R)
Duração Total da Simulação: 7200 s	Diferença:	1×10^{-3}	1×10^{-3}	D _{MAX} : 42.93 min
Períodos de Gravação: 60 s	Razão da Diferença:	1×10^0	1×10^0	dD/dt: 111.89 min
Mínimo Incremento: 0.1 s	DOF Predictor:	OFF		
Máximo Incremento: 60 s				

Condições de Contorno



Elementos Finitos – Deslocamentos (t=t_R)

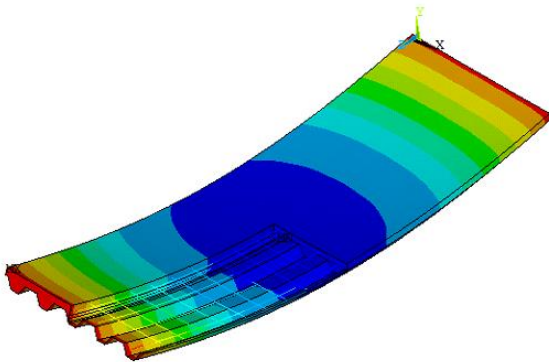
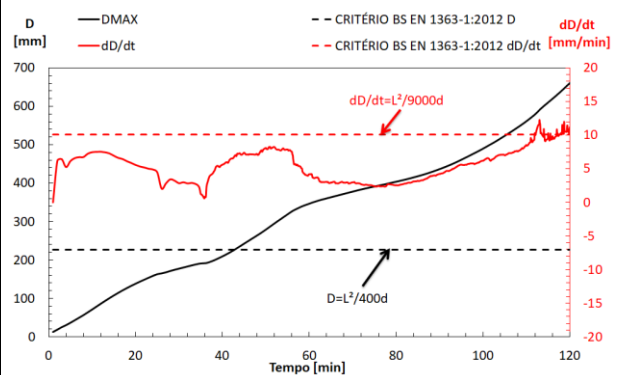
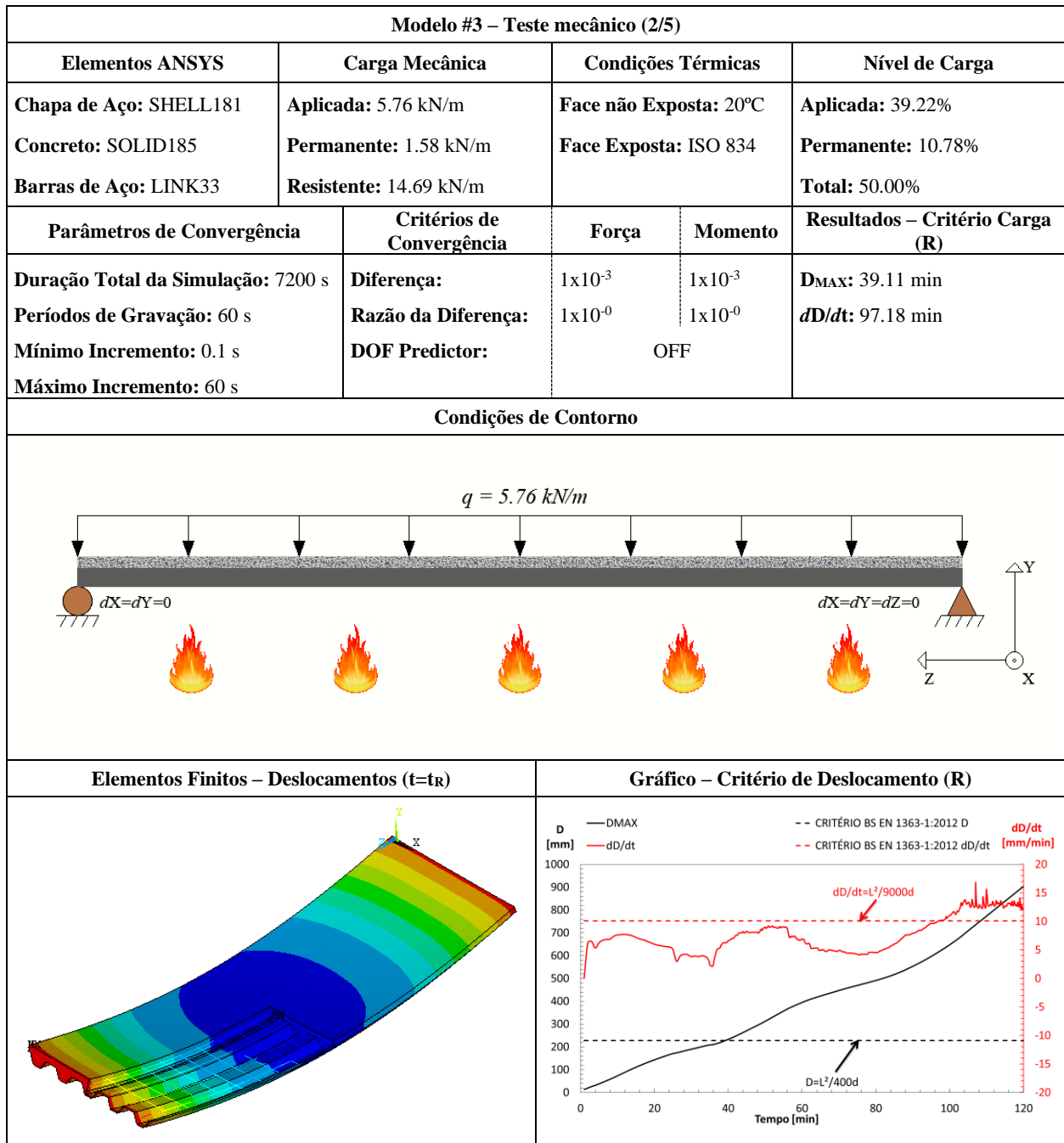
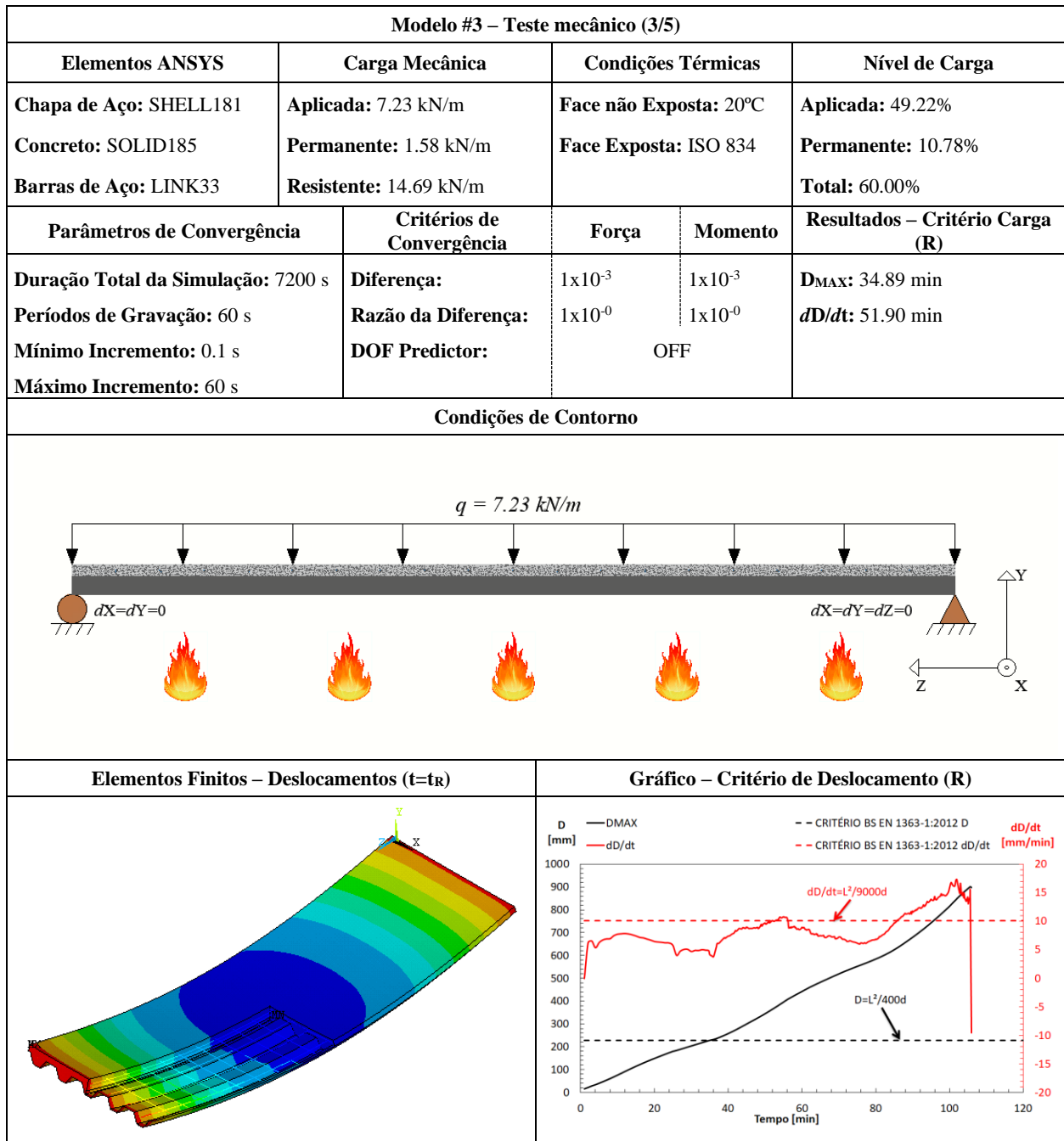
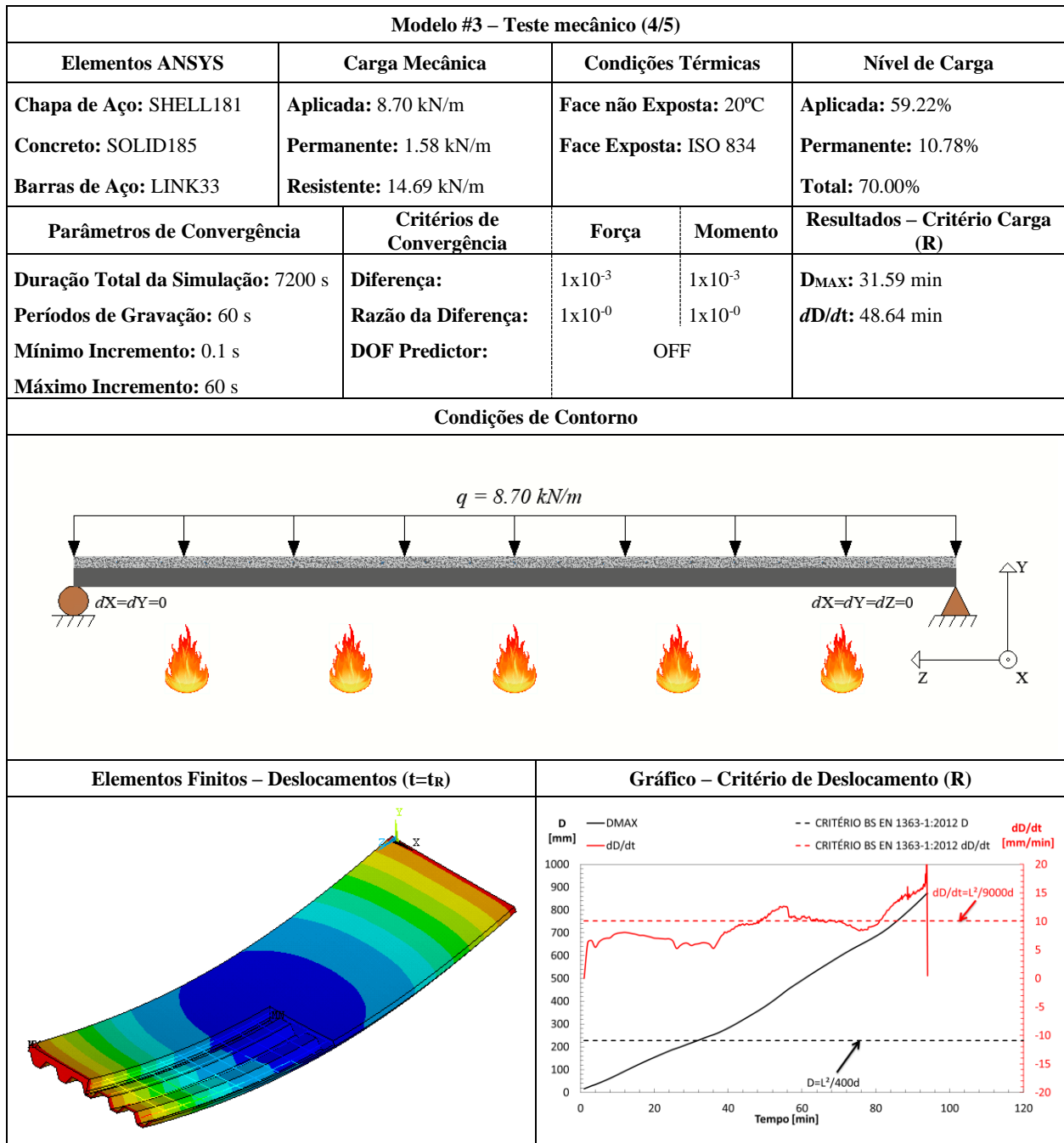


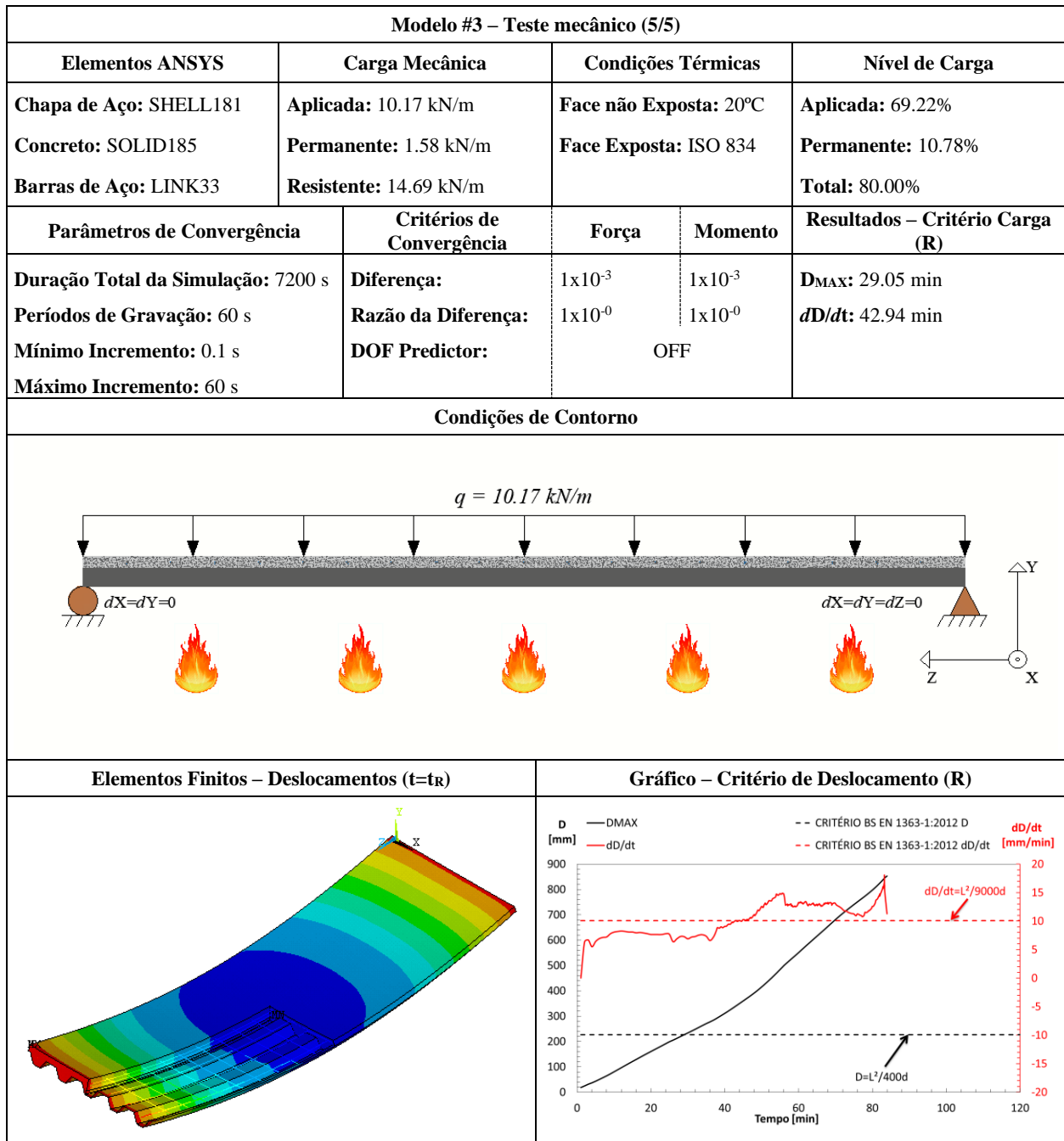
Gráfico – Critério de Deslocamento (R)



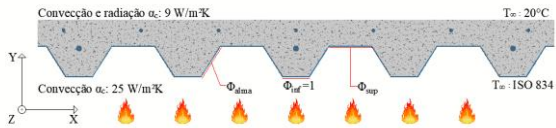
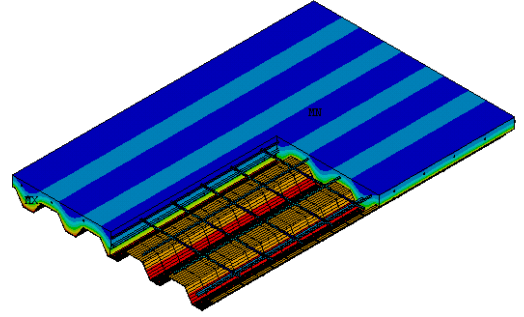
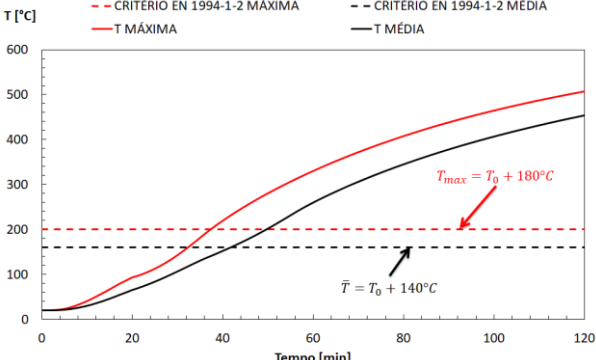
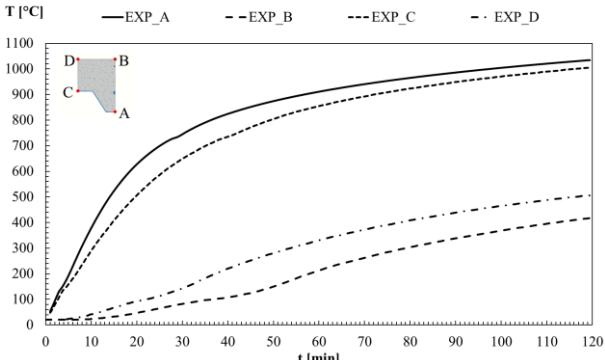


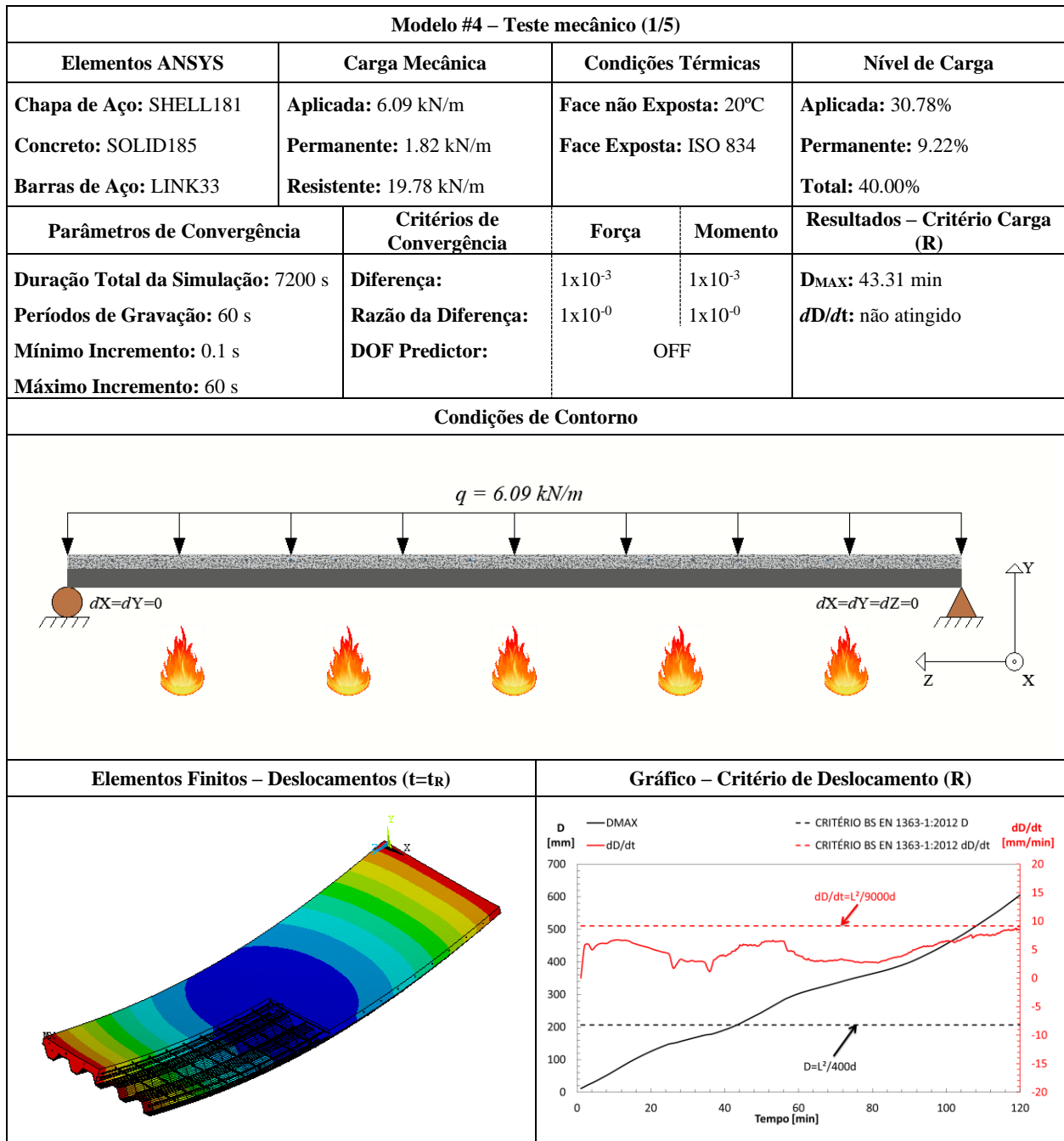


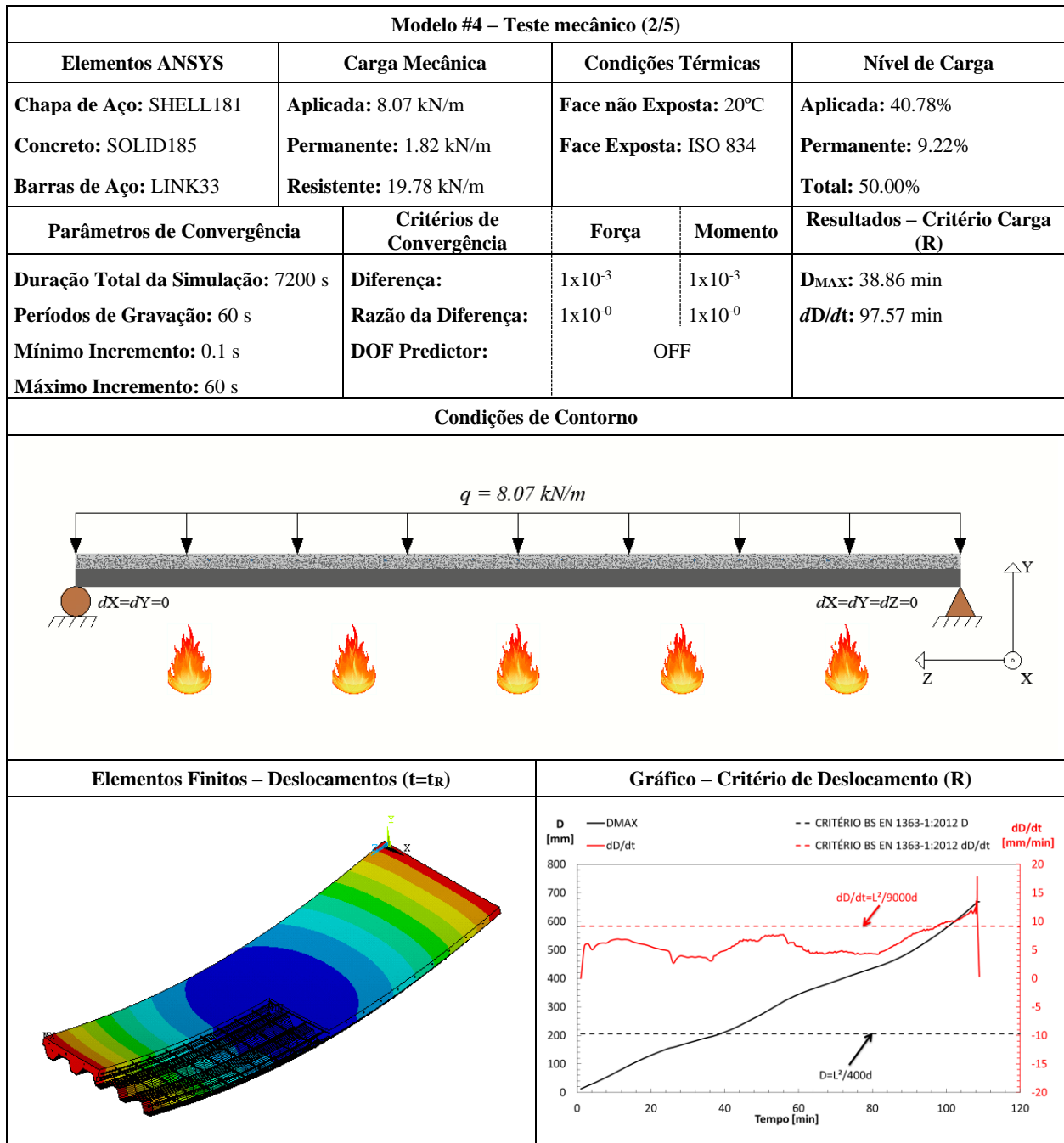


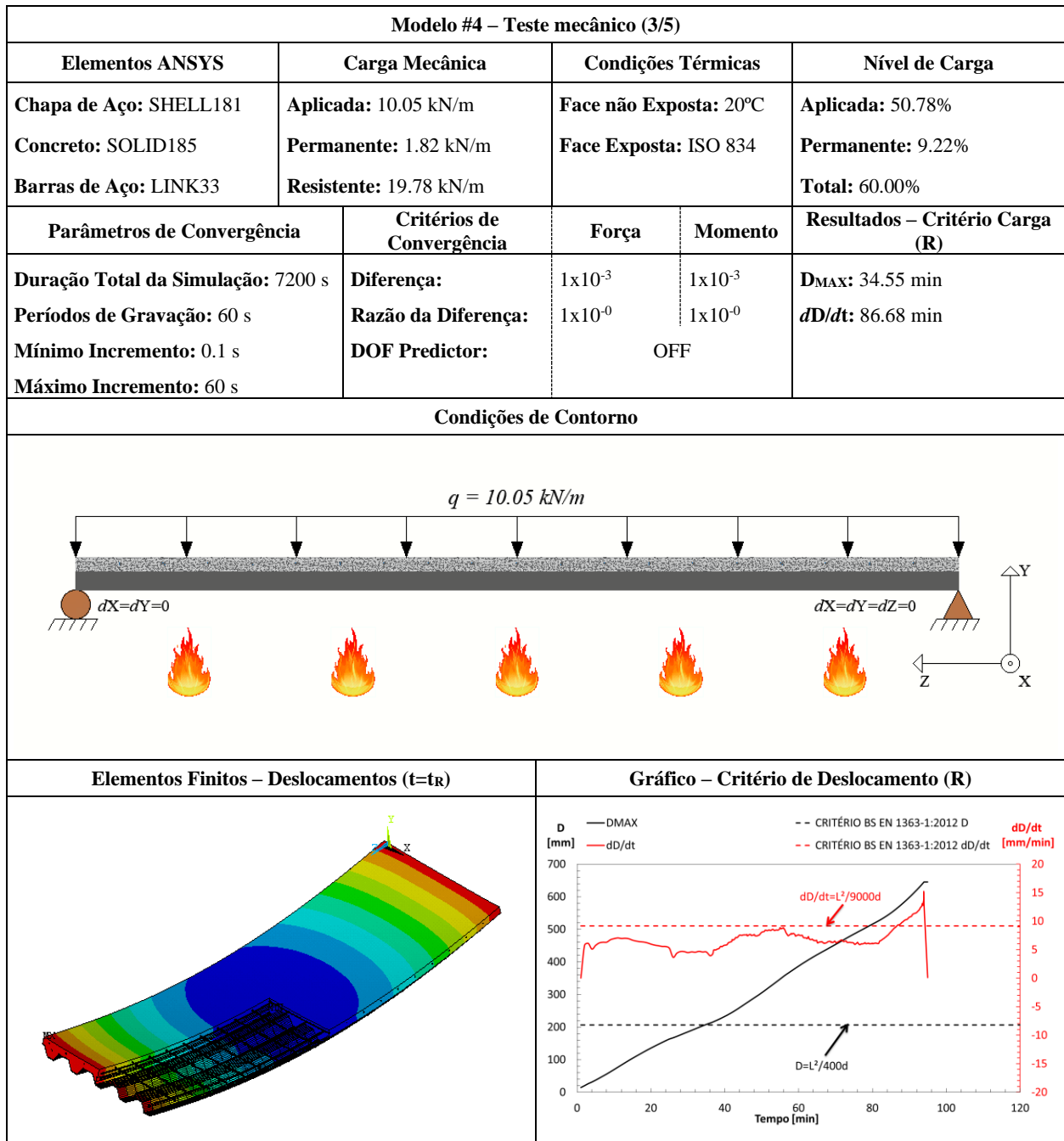


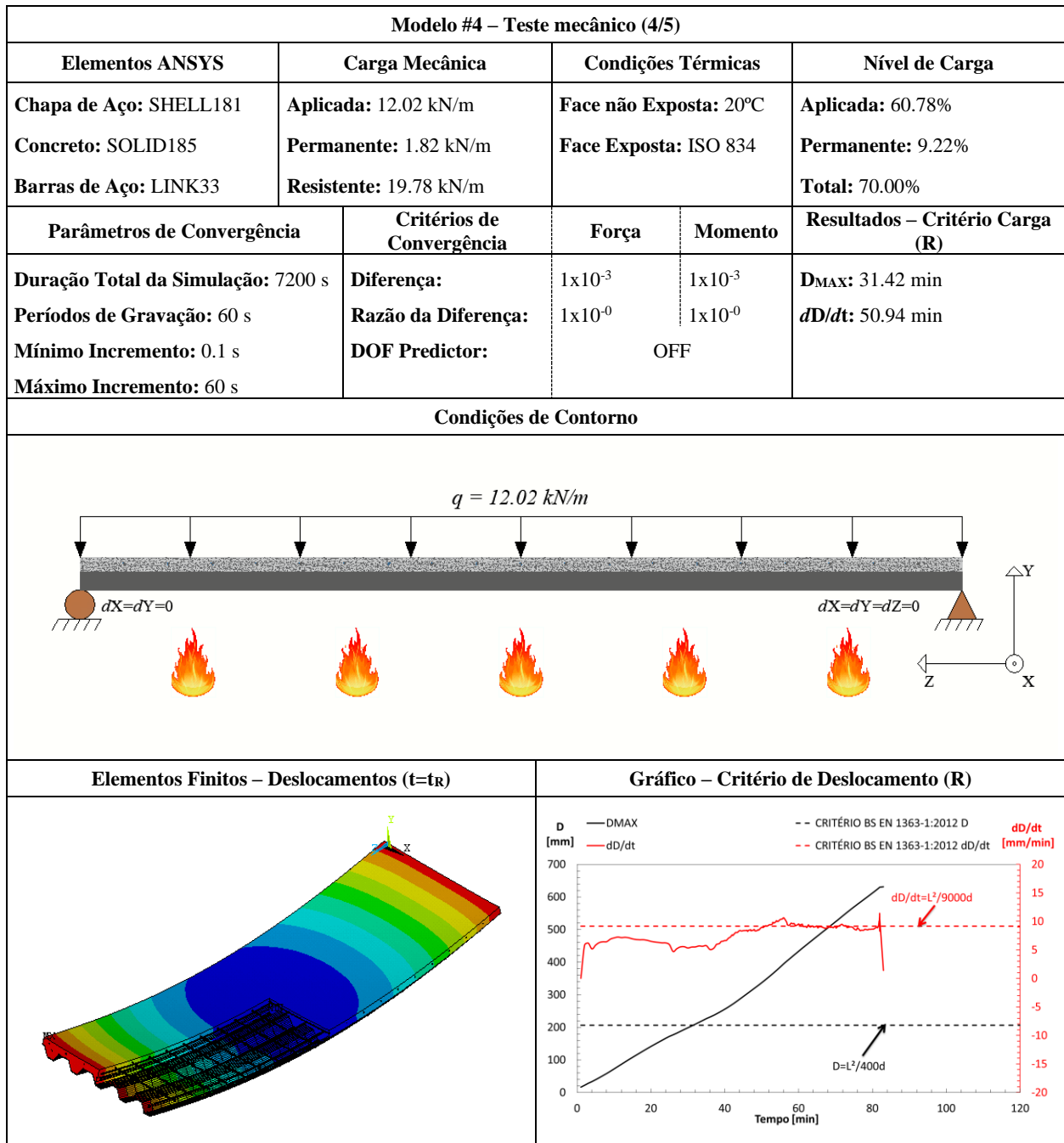
FICHA TÉCNICA			
Modelo #4 – Polideck 59S – 50 mm			
Modelo #4 – Dados Básicos (1/1)			
Tipo de Experimento	Título: Polideck 59S (BRA) / H ₁ =50 mm		
Estudo Paramétrico	Autor(es): Santos, L. M. C.		Ano: 2019
Detalhamento			
Chapa de Aço	Concreto	Barras de Aço	
Geometria: Trapezoidal	Densidade: Convencional	Varões	Grelha de Reforço
Espessura (mm): 1.25	Classe: C20/25	Descrição: Ø6//150	Descrição: 3Ø10
Classe do aço: S275	Umidade: 3.0%	Classe do aço: S500	Classe do aço: S500
Secção Transversal			
Secção Longitudinal			
Modelo de Elementos Finitos			

Modelo #4 – Teste térmico (1/1)				
Elementos ANSYS	Coef. de Convecção (α_c)	Curvas de Temperatura	Fator de Vista (Φ)	Emissividade (ϵ)
Chapa de Aço: SHELL131 Concreto: SOLID70 Barras de Aço: LINK33	Sup. Exposta: 25 W/m ² K Sup. Ñ Exposta: 9 W/m ² K	Face não Exposta: 20°C Face Exposta: ISO 834	Flange Superior: 0.78 Alma: 0.67 Flange Inferior: 1.00	Chapa de Aço: 0.7 Concreto: 0.7 Barras de Aço: 0.7
Parâmetros de Convergência		Critérios de Convergência – Heat Flux		Resultados - Critério Isolamento (I)
Duração Total da Simulação: 7200 s Períodos de Gravação: 60 s Mínimo Incremento: 1 s Máximo Incremento: 60 s		Diferença: 1x10 ⁻³ Razão da Diferença: 1x10 ⁻⁶		T _{MAX} : 37.25 min T _{MED} : 41.67 min
Condições de Contorno			Elementos Finitos – Temperaturas (t=t _i)	
				
Gráfico – Critério de Isolamento (I)			Gráfico de Temperaturas na Secção da Laje	
				



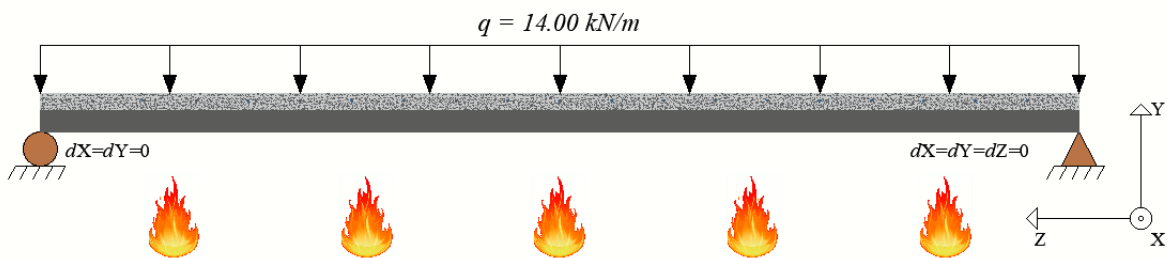






Modelo #4 – Teste mecânico (5/5)				
Elementos ANSYS	Carga Mecânica	Condições Térmicas		Nível de Carga
Chapa de Aço: SHELL181	Aplicada: 14.00 kN/m	Face não Exposta: 20°C		Aplicada: 70.78%
Concreto: SOLID185	Permanente: 1.82 kN/m	Face Exposta: ISO 834		Permanente: 9.22%
Barras de Aço: LINK33	Resistente: 19.78 kN/m			Total: 80.00%
Parâmetros de Convergência	Crítérios de Convergência	Força	Momento	Resultados – Critério Carga (R)
Duração Total da Simulação: 7200 s	Diferença:	1×10^{-3}	1×10^{-3}	D _{MAX} : 28.90 min
Períodos de Gravação: 60 s	Razão da Diferença:	1×10^{-0}	1×10^{-0}	dD/dt: 45.97 min
Mínimo Incremento: 0.1 s	DOF Predictor:	OFF		
Máximo Incremento: 60 s				

Condições de Contorno



Elementos Finitos – Deslocamentos (t=t_R)

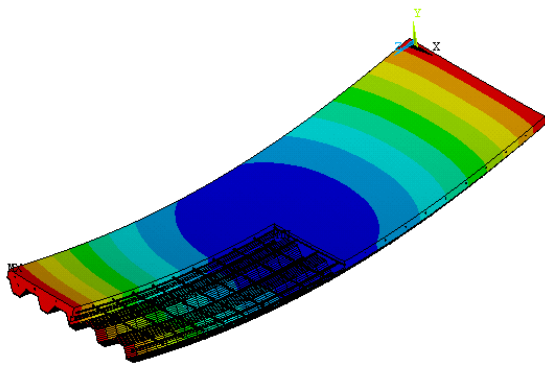
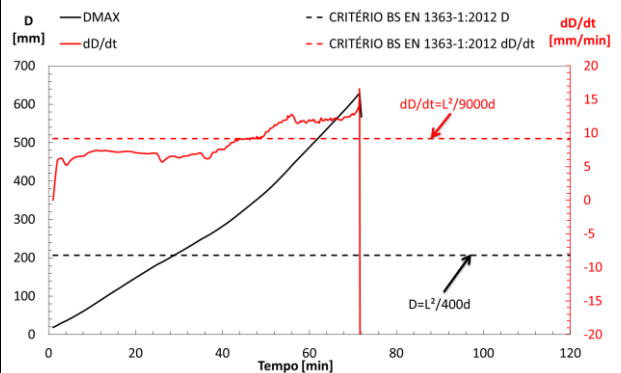
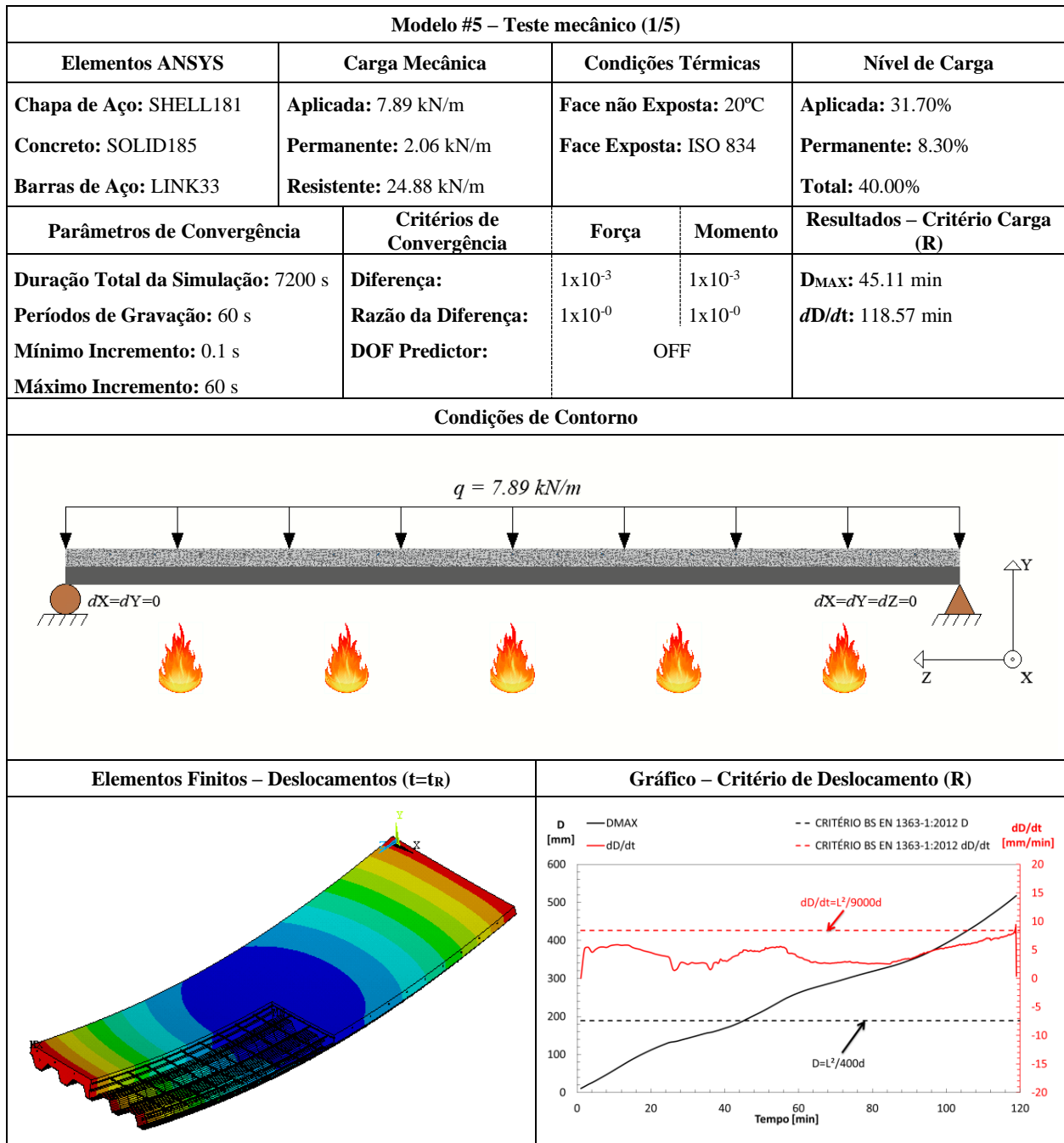


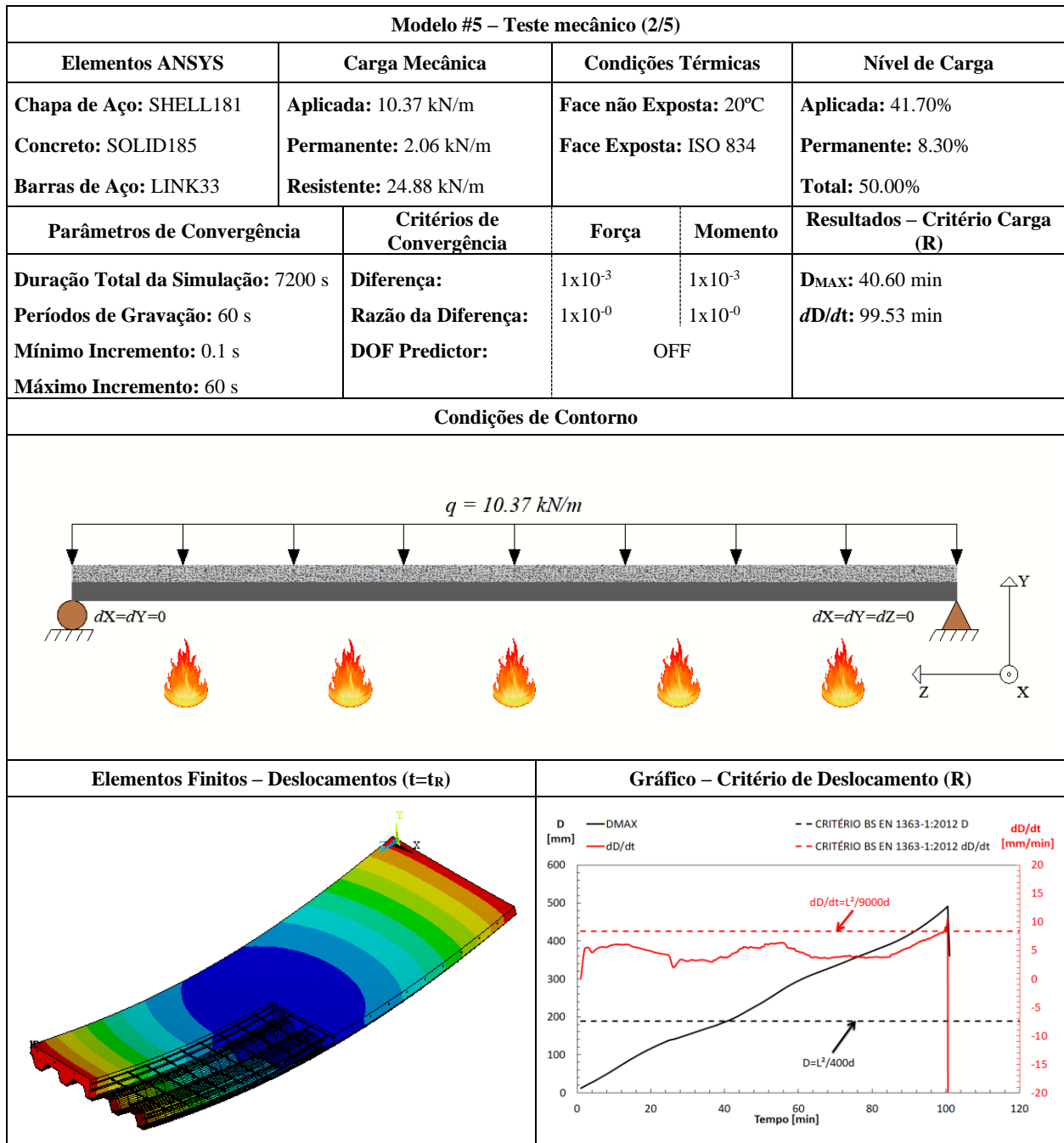
Gráfico – Critério de Deslocamento (R)

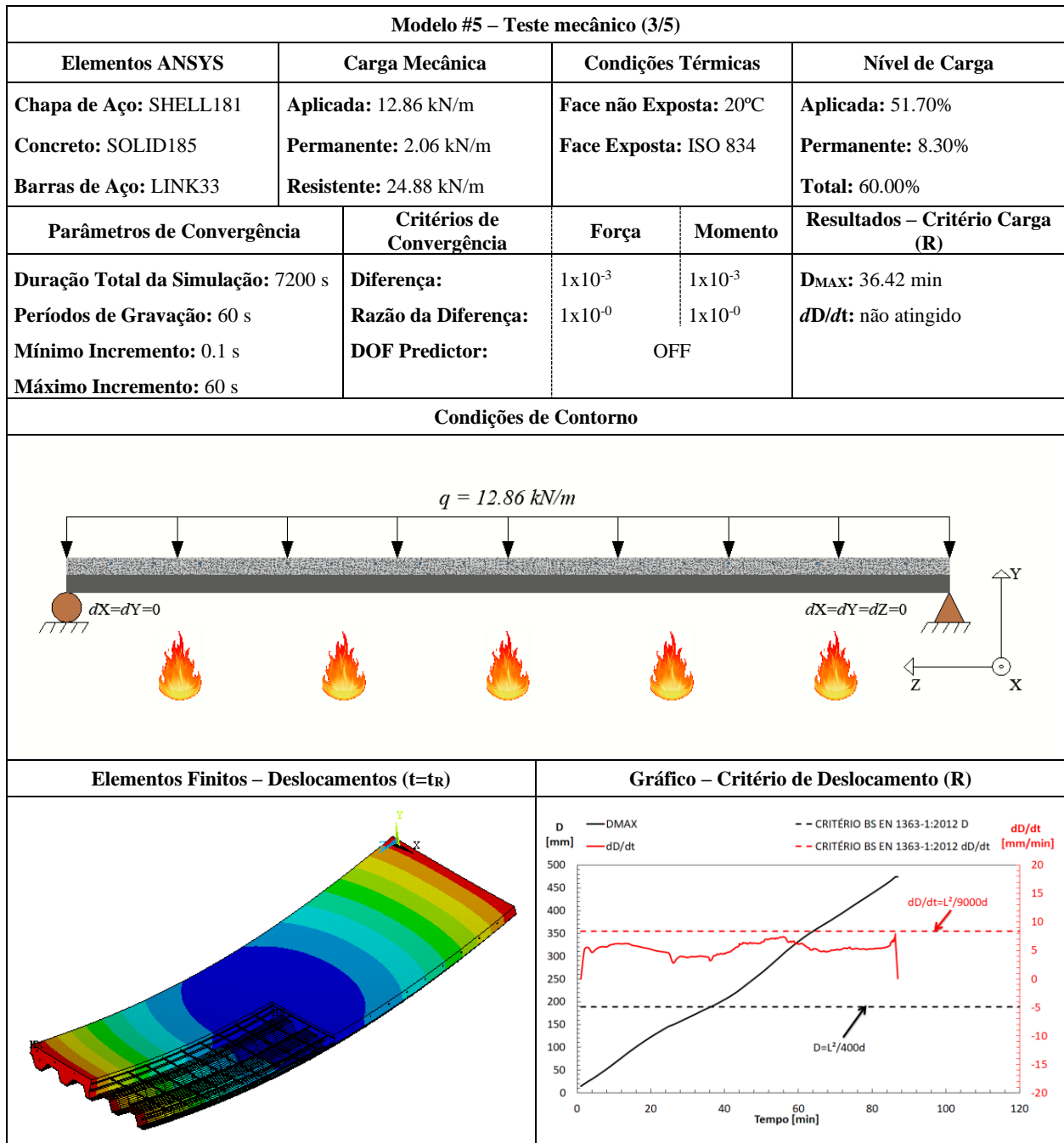


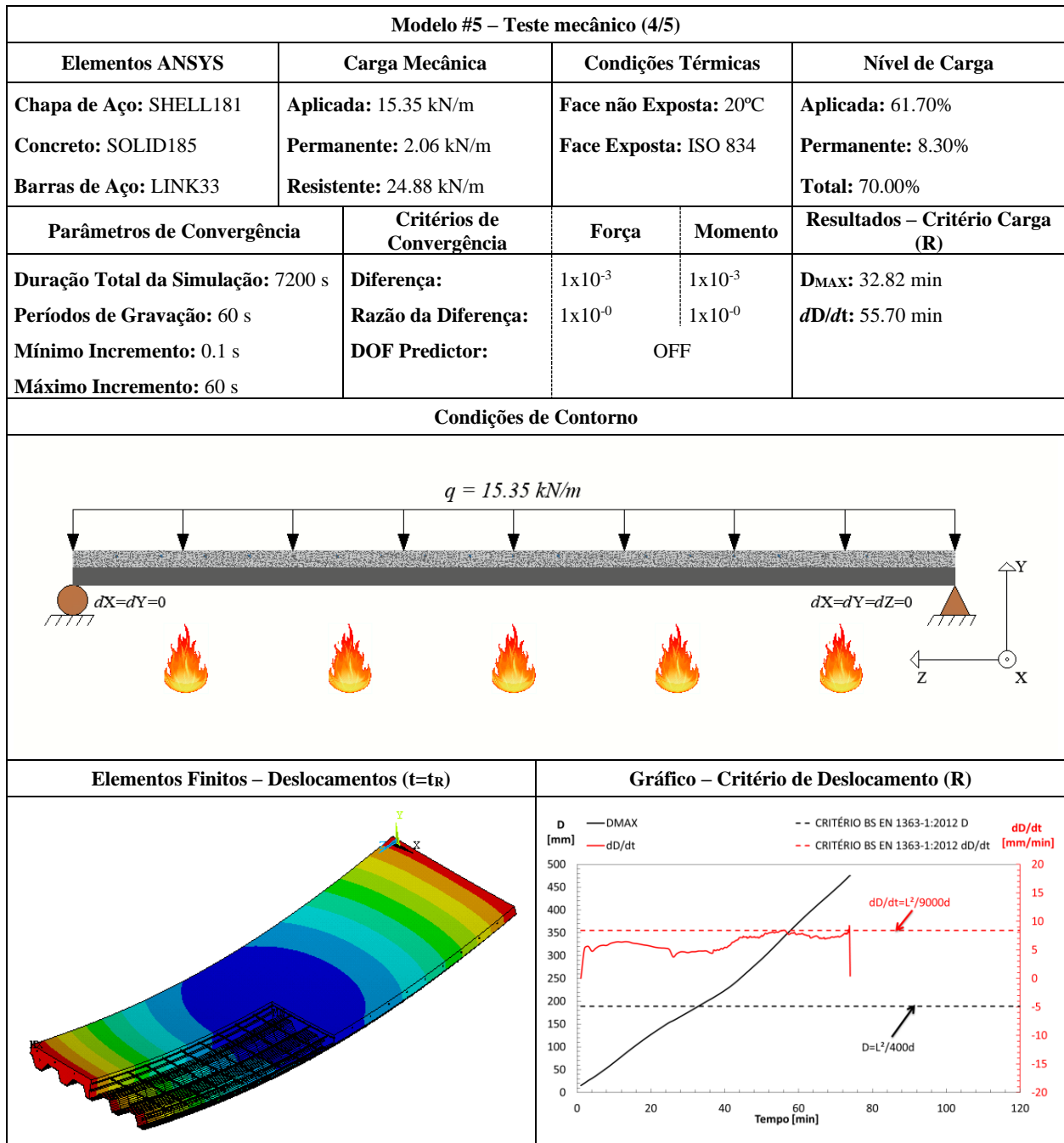
FICHA TÉCNICA			
Modelo #5 – Polideck 59S – 60 mm			
Modelo #5 – Dados Básicos (1/1)			
Tipo de Experimento	Título: Polideck 59S (BRA) / H ₁ =60 mm		
Estudo Paramétrico	Autor(es): Santos, L. M. C.	Ano: 2019	
Detalhamento			
Chapa de Aço	Concreto	Barras de Aço	
Geometria: Trapezoidal Espessura (mm): 1.25 Classe do aço: S275	Densidade: Convencional Classe: C20/25 Umidade: 3.0%	Varões	Grelha de Reforço
		Descrição: Ø6//150 Classe do aço: S500	Descrição: 3Ø10 Classe do aço: S500
Secção Transversal			
Secção Longitudinal			
Modelo de Elementos Finitos			

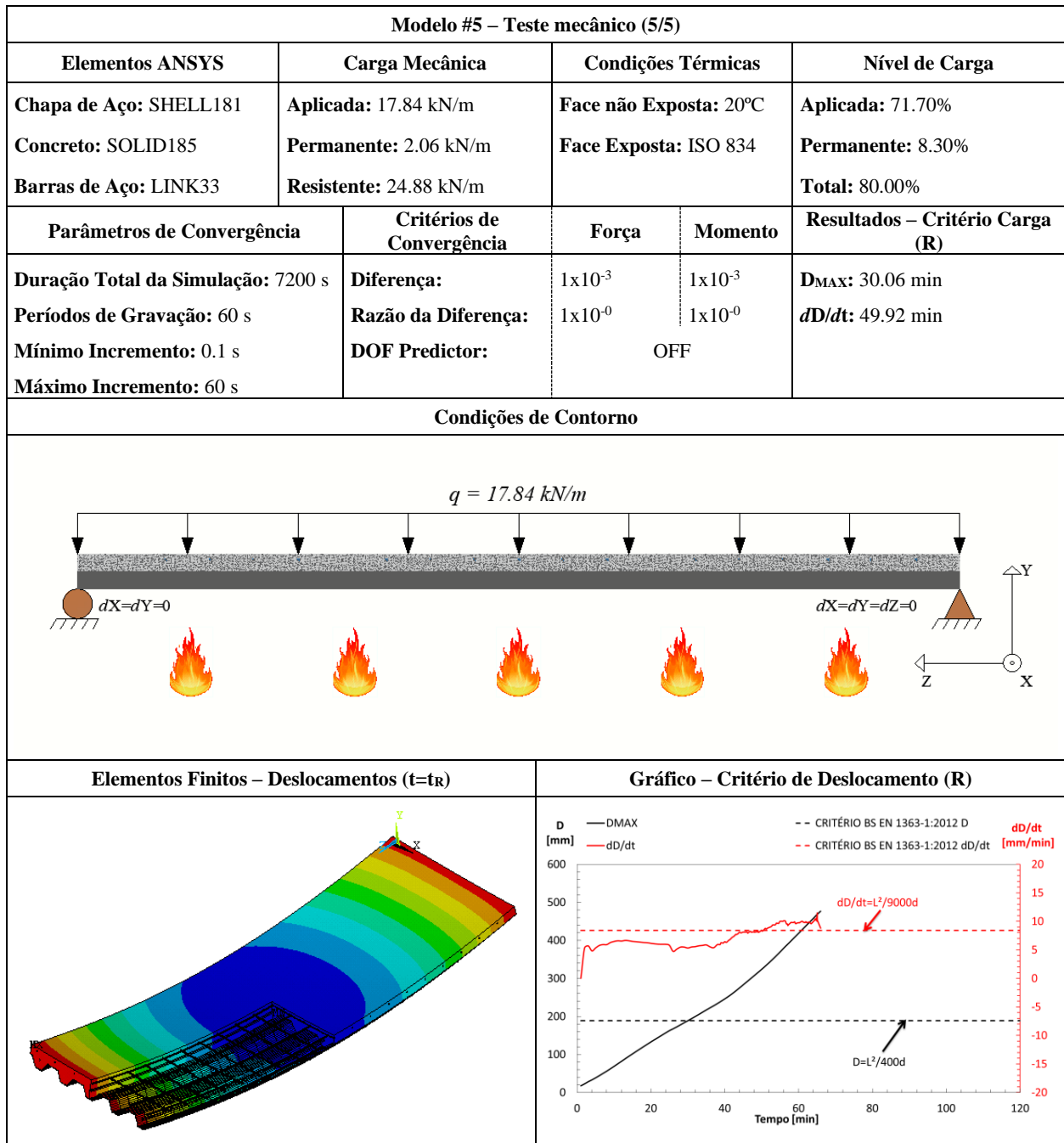
Modelo #5 – Teste térmico (1/1)				
Elementos ANSYS	Coef. de Convecção (α_c)	Curvas de Temperatura	Fator de Vista (Φ)	Emissividade (ϵ)
Chapa de Aço: SHELL131 Concreto: SOLID70 Barras de Aço: LINK33	Sup. Exposta: 25 W/m ² K Sup. Ñ Exposta: 9 W/m ² K	Face não Exposta: 20°C Face Exposta: ISO 834	Flange Superior: 0.78 Alma: 0.67 Flange Inferior: 1.00	Chapa de Aço: 0.7 Concreto: 0.7 Barras de Aço: 0.7
Parâmetros de Convergência		Critérios de Convergência – Heat Flux		Resultados - Critério Isolamento (I)
Duração Total da Simulação: 7200 s Períodos de Gravação: 60 s Mínimo Incremento: 1 s Máximo Incremento: 60 s		Diferença: 1×10^{-3} Razão da Diferença: 1×10^{-6}		T _{MAX} : 49.35 min T _{MED} : 52.26 min
Condições de Contorno			Elementos Finitos – Temperaturas (t=t _i)	
Gráfico – Critério de Isolamento (I)			Gráfico de Temperaturas na Secção da Laje	





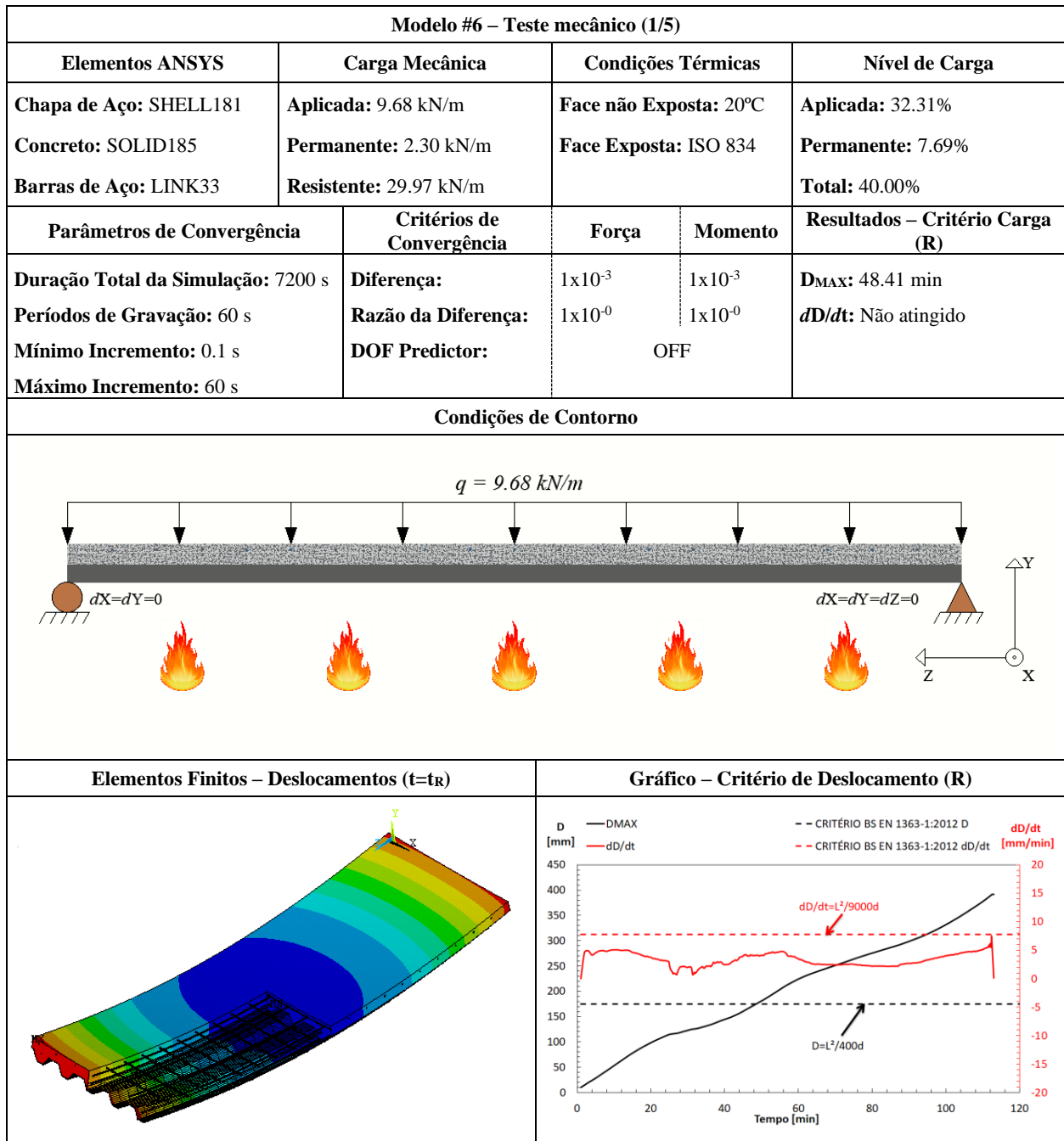


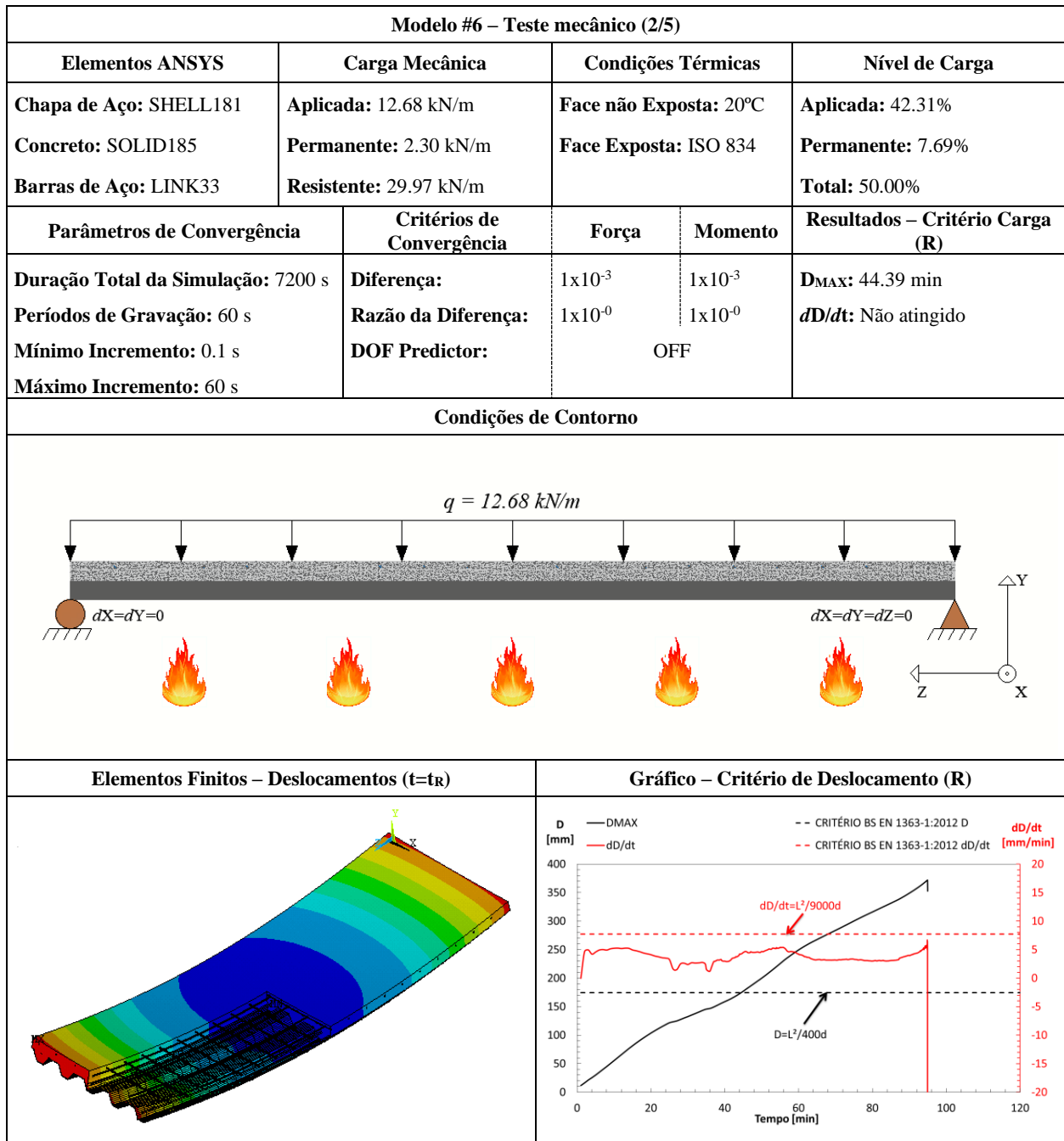


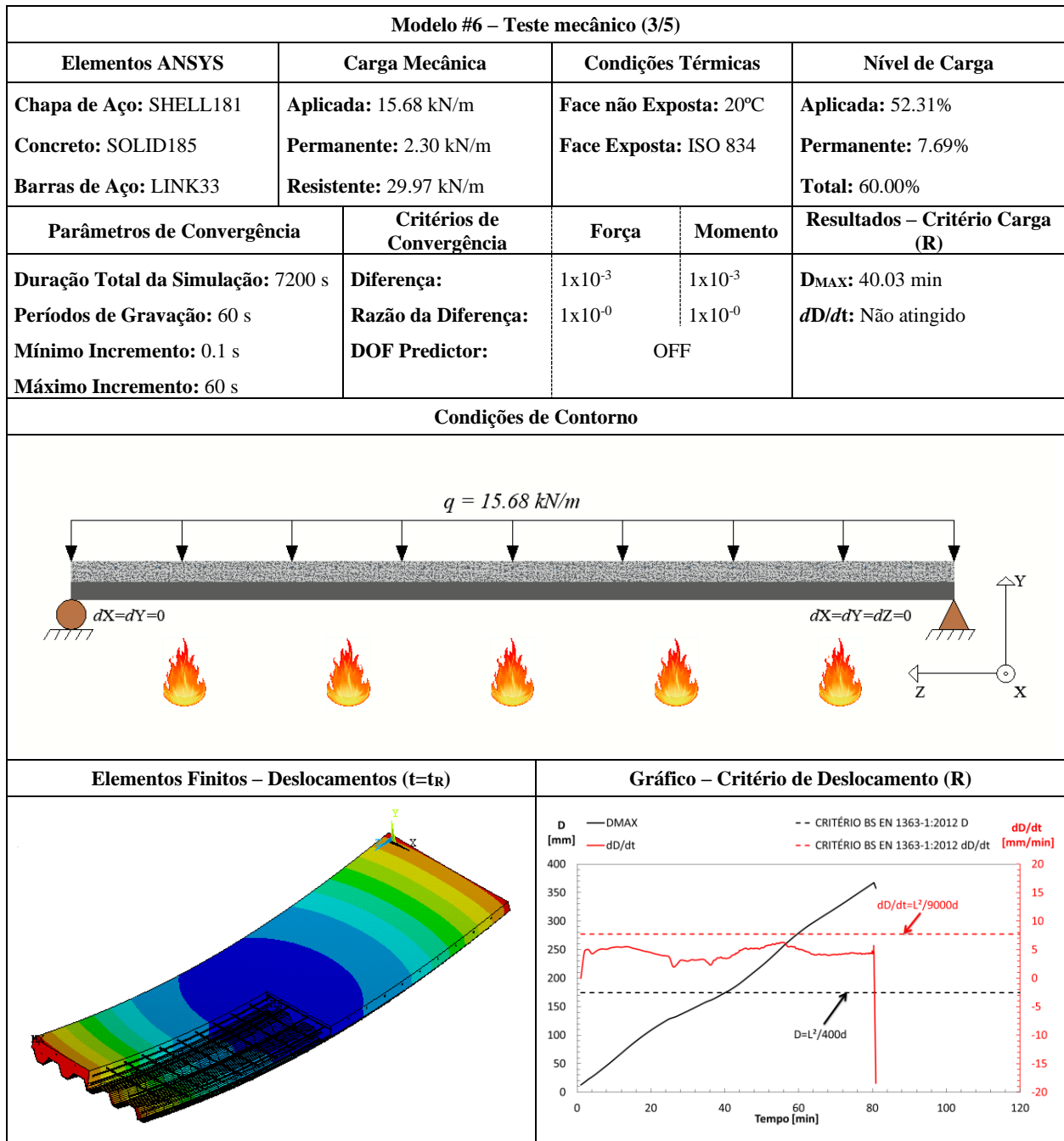


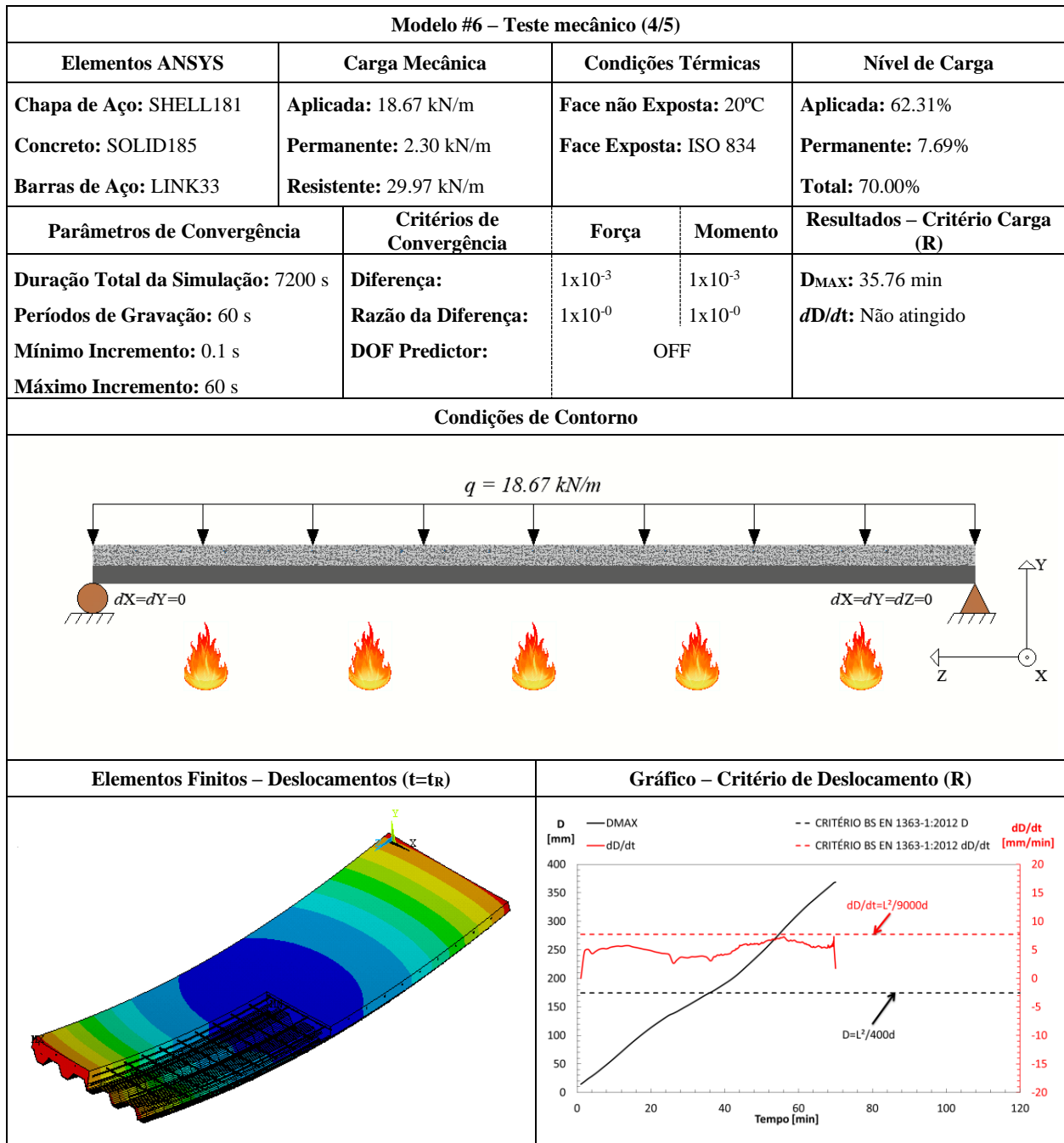
FICHA TÉCNICA		
Modelo #6 – Polideck 59S – 70 mm		
Modelo #6 – Dados Básicos (1/1)		
Tipo de Experimento	Título: Polideck 59S (BRA) / H ₁ =70 mm	
Estudo Paramétrico	Autor(es): Santos, L. M. C.	Ano: 2019
Detalhamento		
Chapa de Aço	Concreto	Barras de Aço
Geometria: Trapezoidal Espessura (mm): 1.25 Classe do aço: S275	Densidade: Convencional Classe: C20/25 Umidade: 3.0%	Varões
		Grelha de Reforço
		Descrição: Ø6//150
		Descrição: 3Ø10
		Classe do aço: S500
		Classe do aço: S500
Secção Transversal		
Secção Longitudinal		
Modelo de Elementos Finitos		

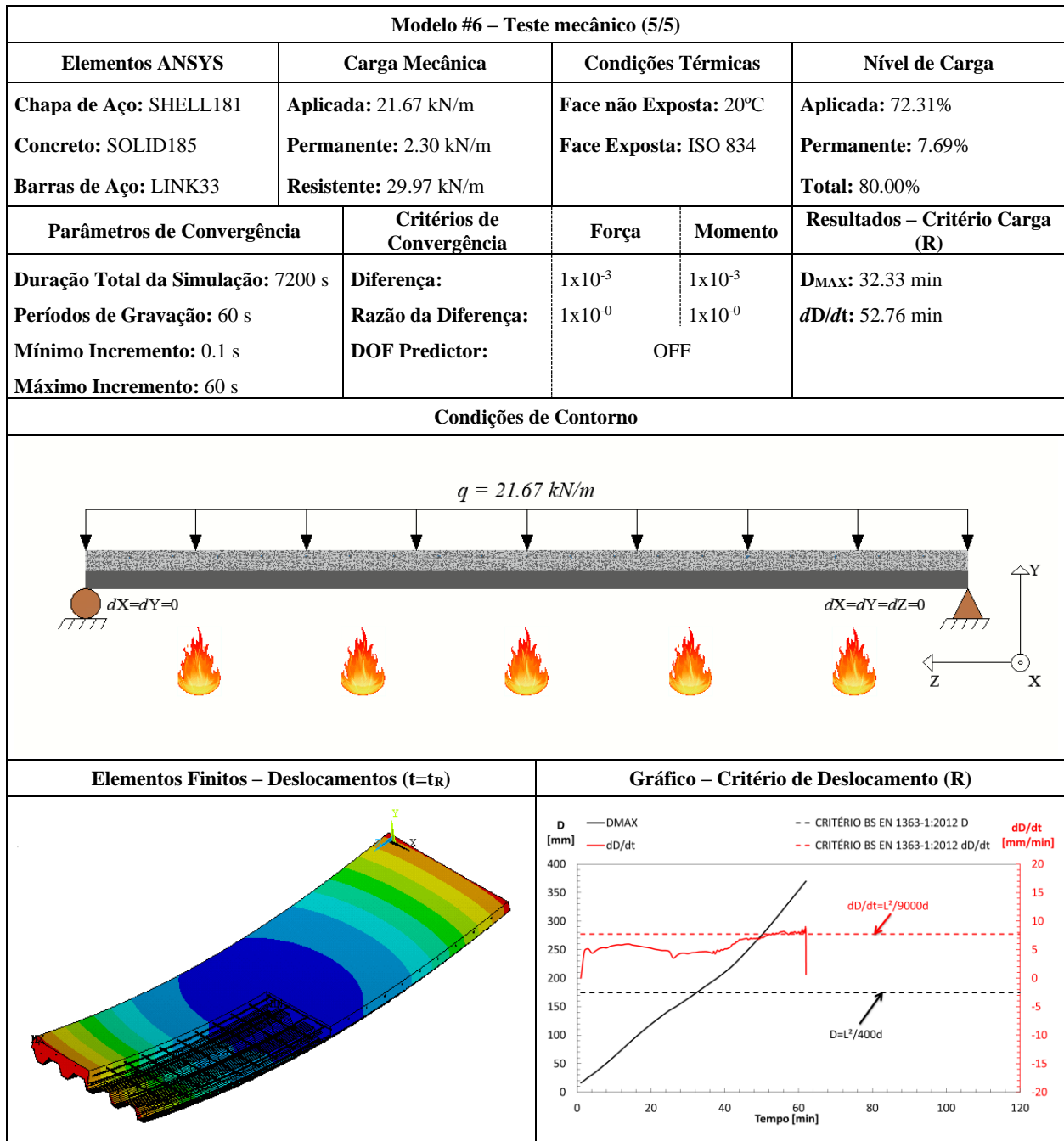
Modelo #6 – Teste térmico (1/1)				
Elementos ANSYS	Coef. de Convecção (α_c)	Curvas de Temperatura	Fator de Vista (Φ)	Emissividade (ϵ)
Chapa de Aço: SHELL131 Concreto: SOLID70 Barras de Aço: LINK33	Sup. Exposta: 25 W/m ² K Sup. Ñ Exposta: 9 W/m ² K	Face não Exposta: 20°C Face Exposta: ISO 834	Flange Superior: 0.78 Alma: 0.67 Flange Inferior: 1.00	Chapa de Aço: 0.7 Concreto: 0.7 Barras de Aço: 0.7
Parâmetros de Convergência		Critérios de Convergência – Heat Flux		Resultados - Critério Isolamento (I)
Duração Total da Simulação: 7200 s Períodos de Gravação: 60 s Mínimo Incremento: 1 s Máximo Incremento: 60 s		Diferença: 1×10^{-3} Razão da Diferença: 1×10^{-6}		T _{MAX} : 63.46 min T _{MED} : 63.88 min
Condições de Contorno			Elementos Finitos – Temperaturas (t=t _i)	
Gráfico – Critério de Isolamento (I)			Gráfico de Temperaturas na Secção da Laje	





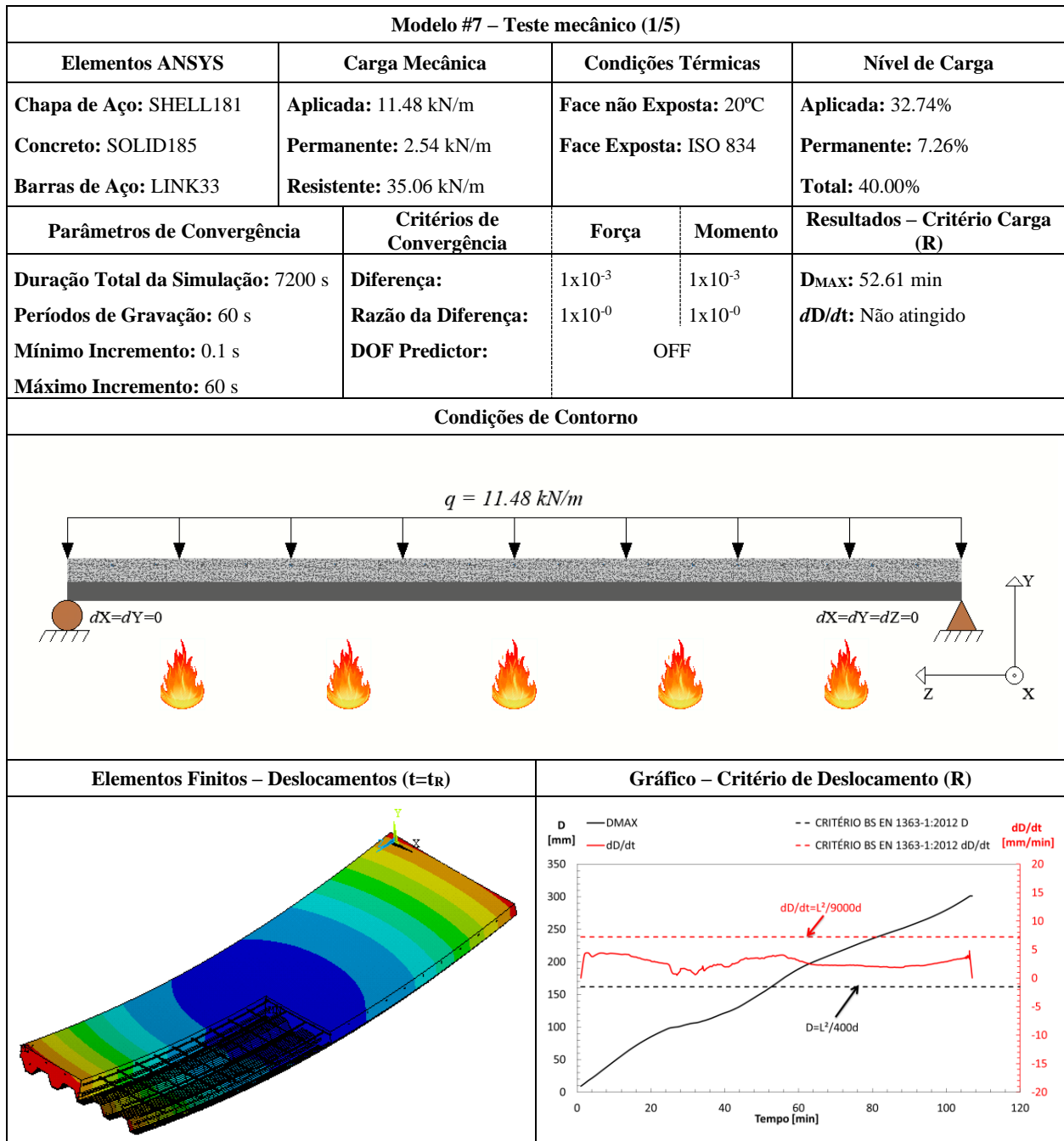


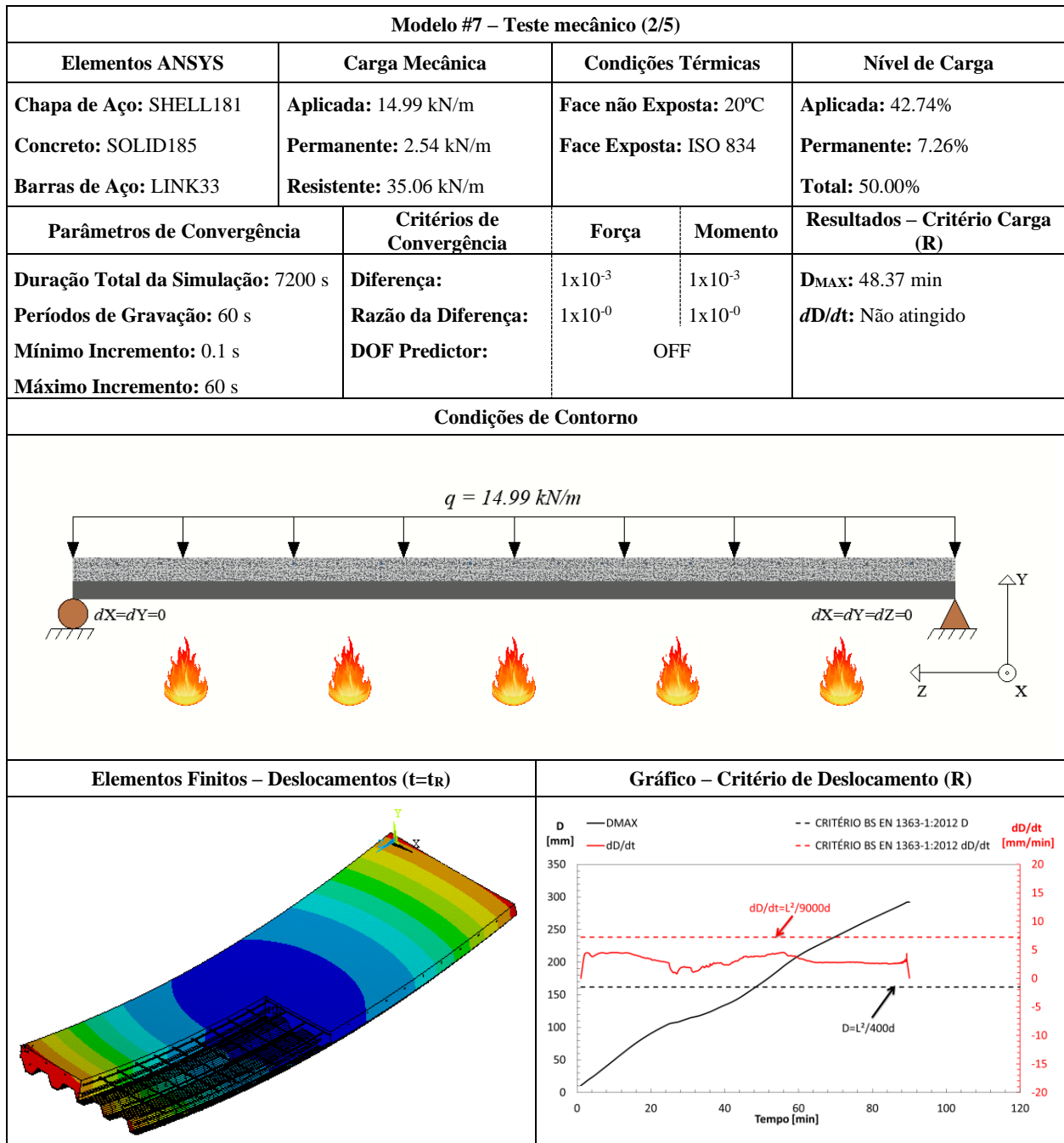


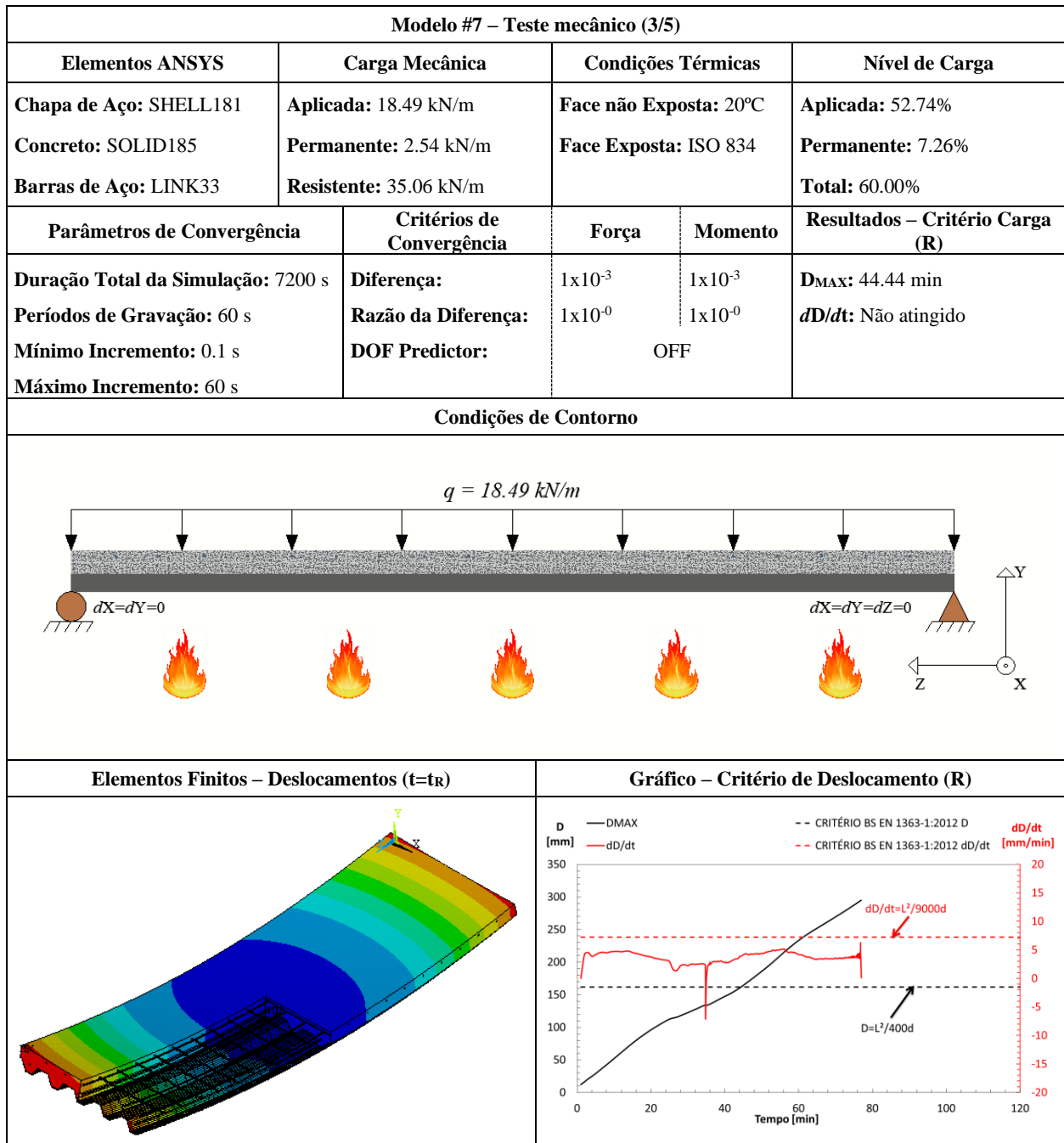


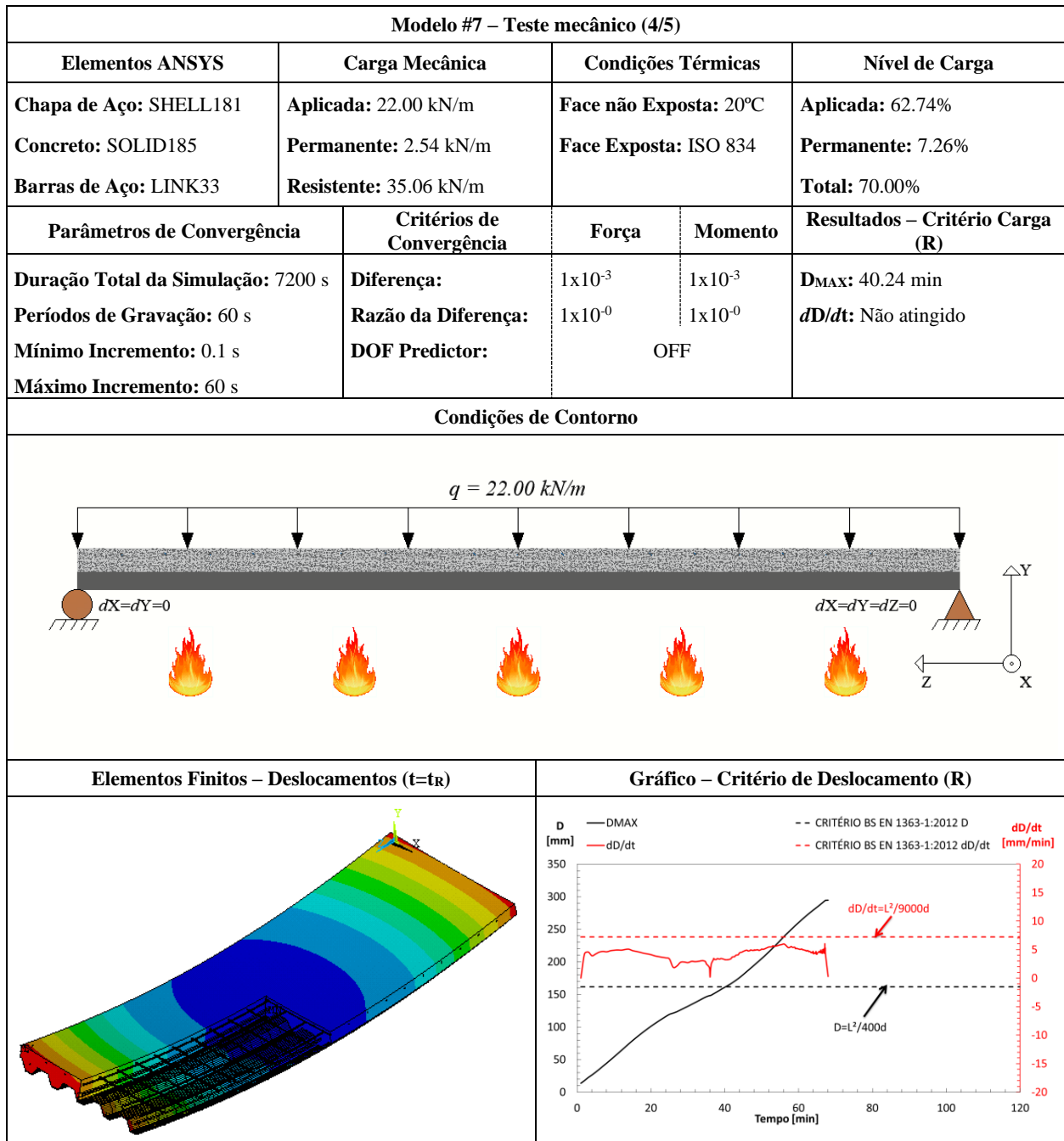
FICHA TÉCNICA			
Modelo #7 – Polideck 59S – 80 mm			
Modelo #7 – Dados Básicos (1/1)			
Tipo de Experimento	Título: Polideck 59S (BRA) / H ₁ =80 mm		
Estudo Paramétrico	Autor(es): Santos, L. M. C.	Ano: 2019	
Detalhamento			
Chapa de Aço	Concreto	Barras de Aço	
Geometria: Trapezoidal Espessura (mm): 1.25 Classe do aço: S275	Densidade: Convencional Classe: C20/25 Umidade: 3.0%	Varões	Grelha de Reforço
		Descrição: Ø6//150 Classe do aço: S500	Descrição: 3Ø10 Classe do aço: S500
Secção Transversal			
Secção Longitudinal			
Modelo de Elementos Finitos			

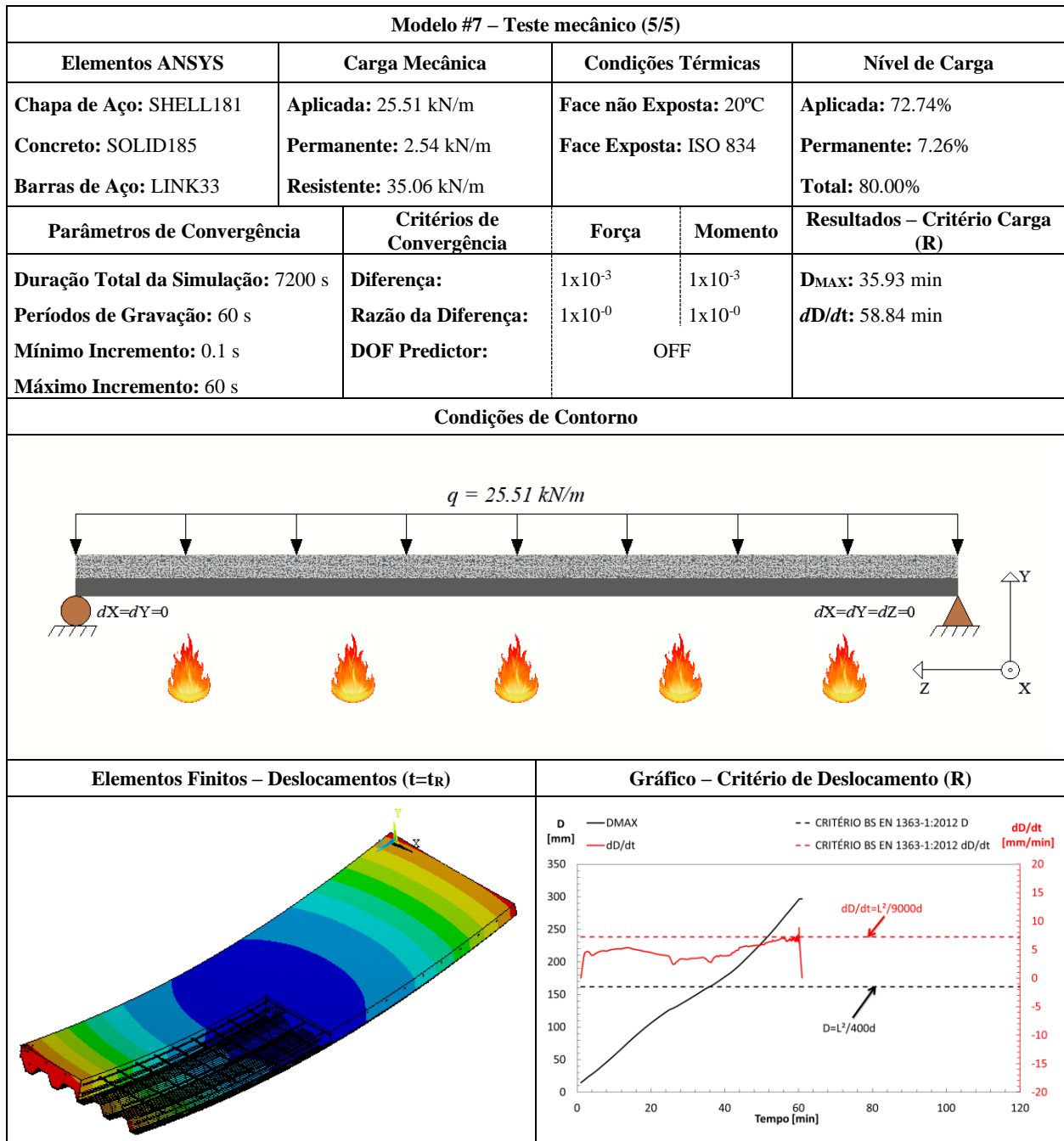
Modelo #7 – Teste térmico (1/1)				
Elementos ANSYS	Coef. de Convecção (α_c)	Curvas de Temperatura	Fator de Vista (Φ)	Emissividade (ϵ)
Chapa de Aço: SHELL131 Concreto: SOLID70 Barras de Aço: LINK33	Sup. Exposta: 25 W/m ² K Sup. Ñ Exposta: 9 W/m ² K	Face não Exposta: 20°C Face Exposta: ISO 834	Flange Superior: 0.78 Alma: 0.67 Flange Inferior: 1.00	Chapa de Aço: 0.7 Concreto: 0.7 Barras de Aço: 0.7
Parâmetros de Convergência		Critérios de Convergência – Heat Flux		Resultados - Critério Isolamento (I)
Duração Total da Simulação: 7200 s Períodos de Gravação: 60 s Mínimo Incremento: 1 s Máximo Incremento: 60 s		Diferença: 1x10 ⁻³ Razão da Diferença: 1x10 ⁻⁶		T _{MAX} : 79.45 min T _{MED} : 76.70 min
Condições de Contorno			Elementos Finitos – Temperaturas (t=t _i)	
Gráfico – Critério de Isolamento (I)			Gráfico de Temperaturas na Seção da Laje	





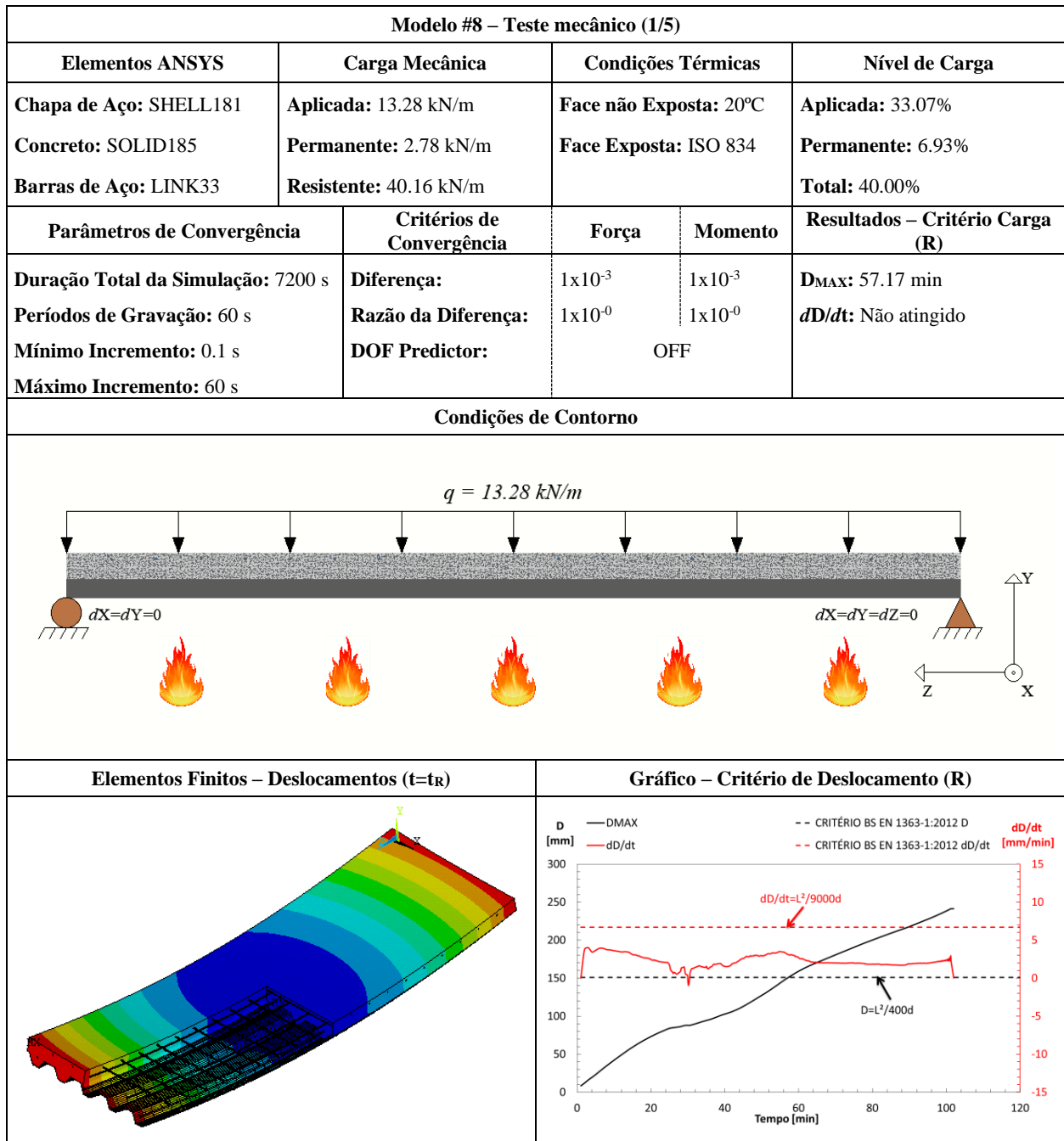


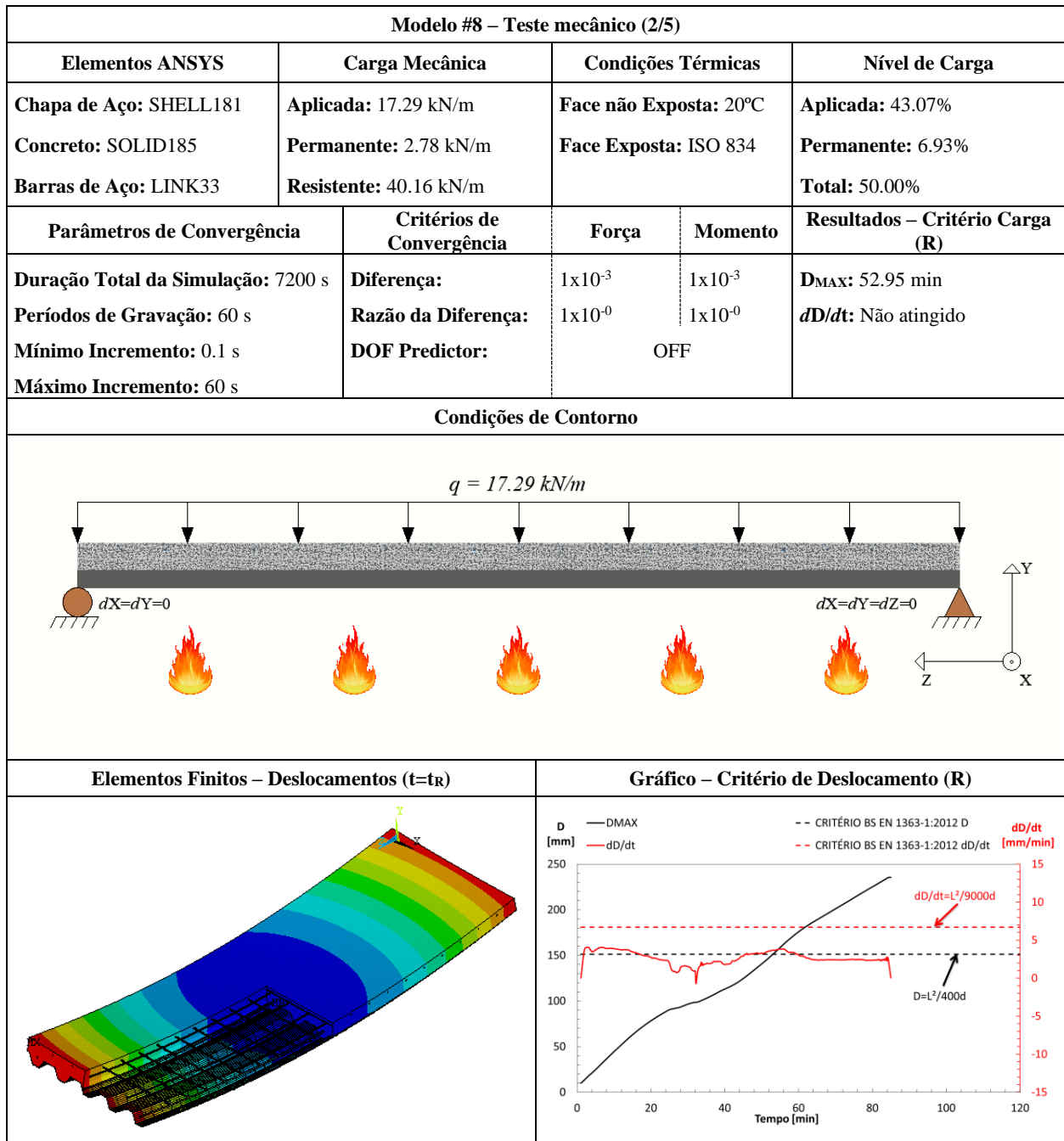


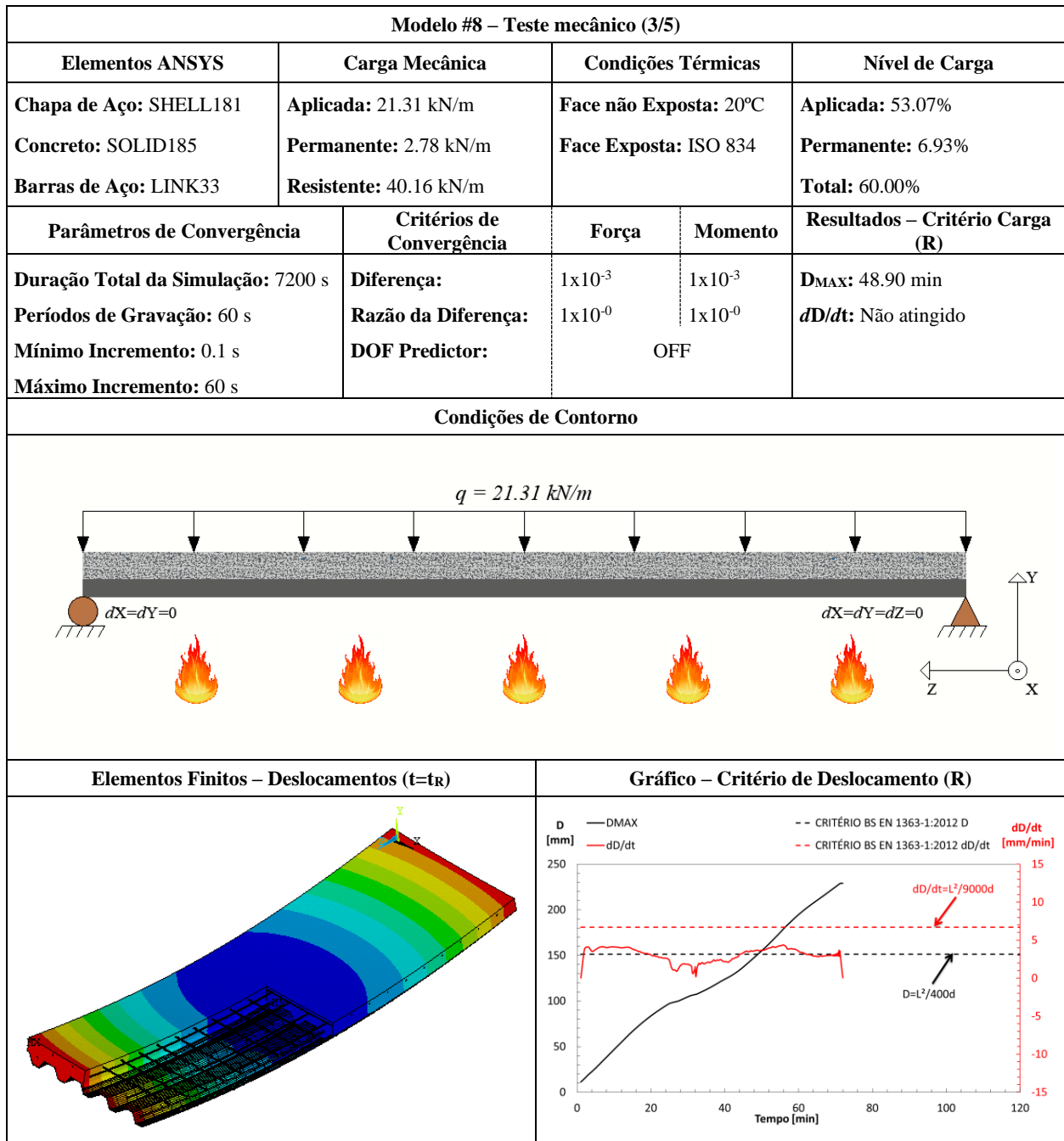


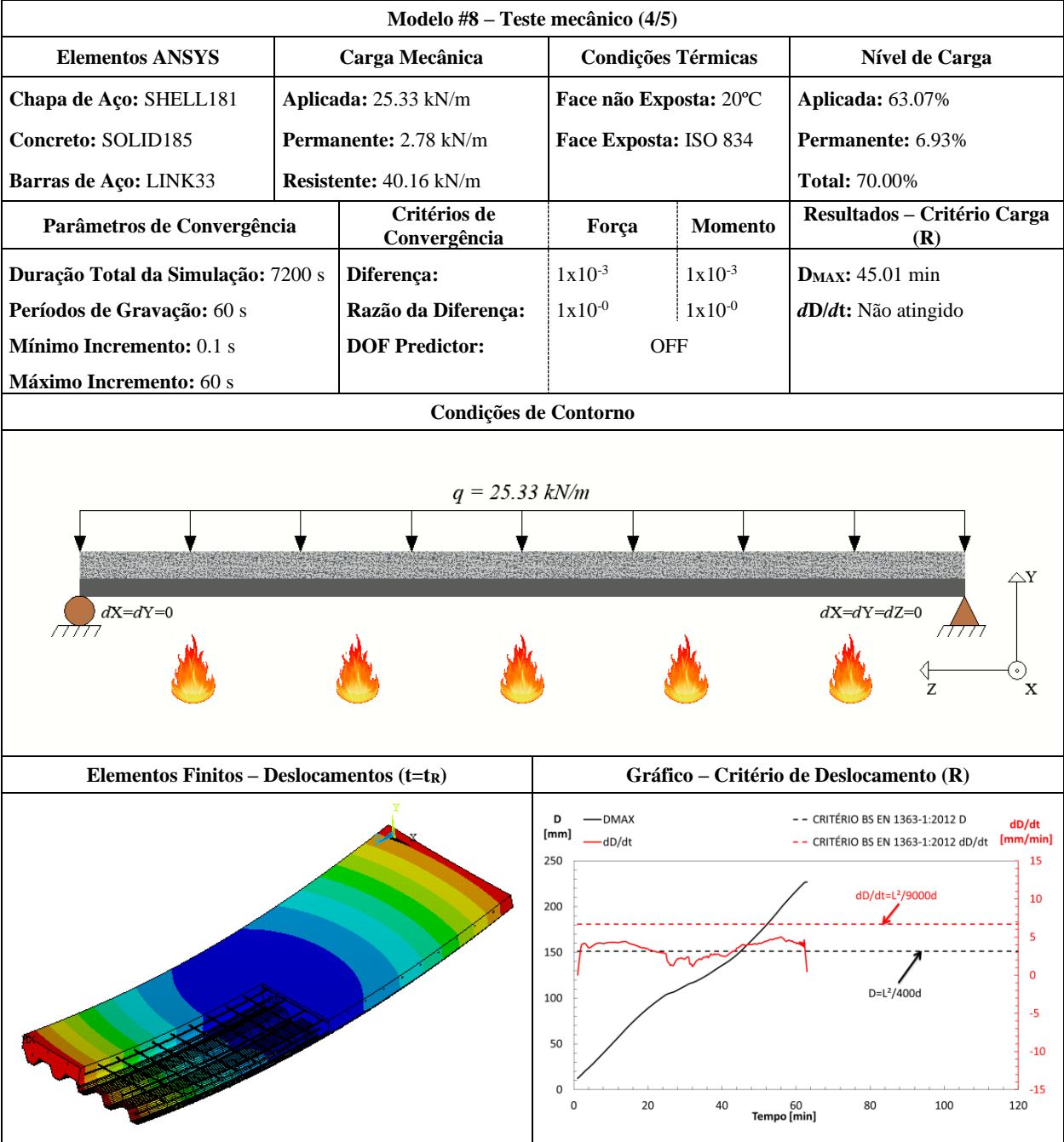
FICHA TÉCNICA			
Modelo #8 – Polideck 59S – 90 mm			
Modelo #8 – Dados Básicos (1/1)			
Tipo de Experimento	Título: Polideck 59S (BRA) / H ₁ =90 mm		
Estudo Paramétrico	Autor(es): Santos, L. M. C.		Ano: 2019
Detalhamento			
Chapa de Aço	Concreto	Barras de Aço	
Geometria: Trapezoidal Espessura (mm): 1.25 Classe do aço: S275	Densidade: Convencional Classe: C20/25 Umidade: 3.0%	Varões	Grelha de Reforço
		Descrição: Ø6//150 Classe do aço: S500	Descrição: 3Ø10 Classe do aço: S500
Secção Transversal			
Secção Longitudinal			
Modelo de Elementos Finitos			

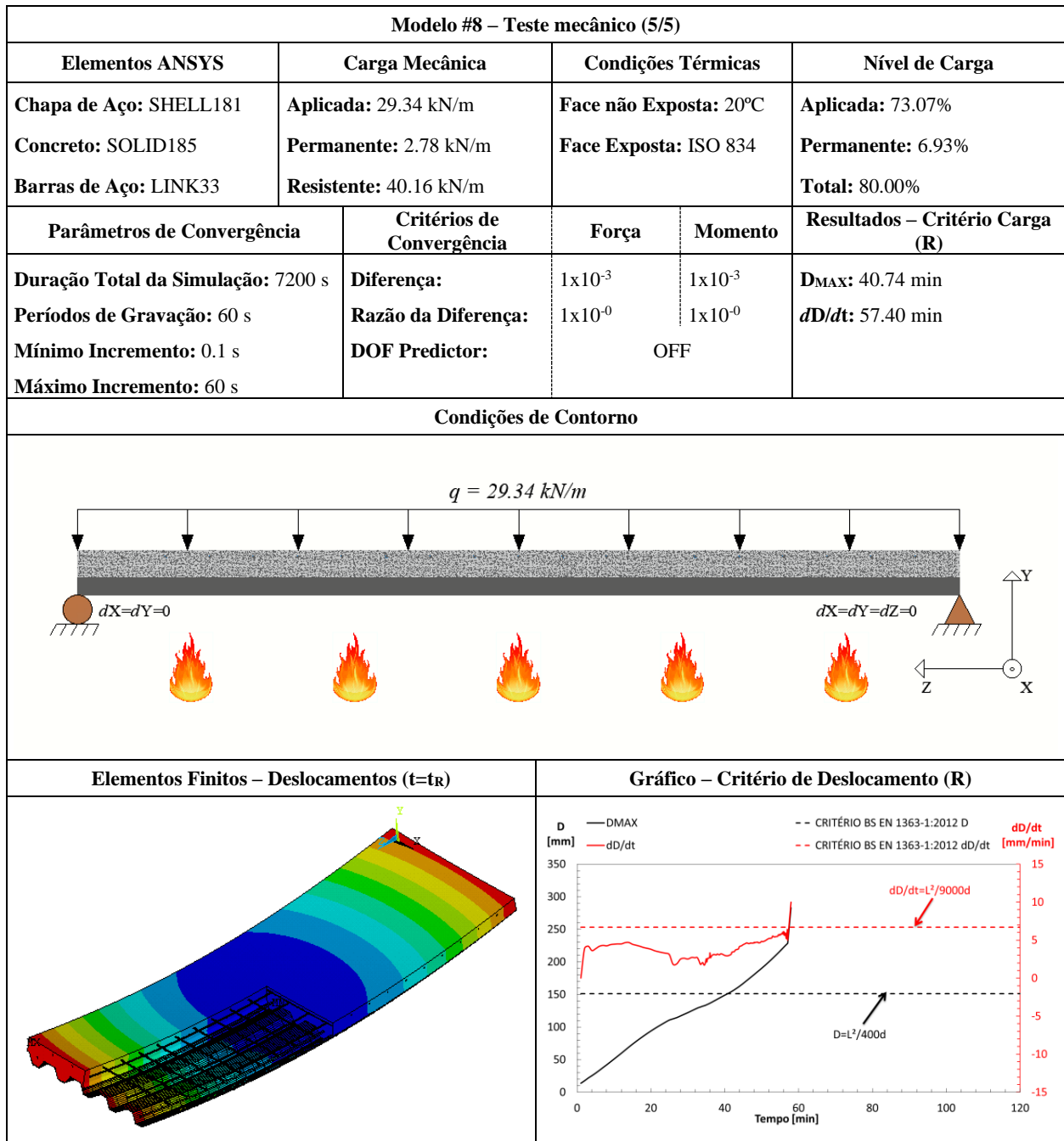
Modelo #8- Teste térmico (1/1)				
Elementos ANSYS	Coef. de Convecção (α_c)	Curvas de Temperatura	Fator de Vista (Φ)	Emissividade (ϵ)
Chapa de Aço: SHELL131 Concreto: SOLID70 Barras de Aço: LINK33	Sup. Exposta: 25 W/m ² K Sup. Ñ Exposta: 9 W/m ² K	Face não Exposta: 20°C Face Exposta: ISO 834	Flange Superior: 0.78 Alma: 0.67 Flange Inferior: 1.00	Chapa de Aço: 0.7 Concreto: 0.7 Barras de Aço: 0.7
Parâmetros de Convergência		Critérios de Convergência – Heat Flux		Resultados - Critério Isolamento (I)
Duração Total da Simulação: 7200 s Períodos de Gravação: 60 s Mínimo Incremento: 1 s Máximo Incremento: 60 s		Diferença: 1x10 ⁻³ Razão da Diferença: 1x10 ⁻⁶		T _{MAX} : 97.18 min T _{MED} : 90.82 min
Condições de Contorno			Elementos Finitos – Temperaturas (t=t _i)	
Gráfico – Critério de Isolamento (I)			Gráfico de Temperaturas na Secção da Laje	











FICHA TÉCNICA			
Modelo #9 – Polideck 59S – 100 mm			
Modelo #9 – Dados Básicos (1/1)			
Tipo de Experimento	Título: Polideck 59S (BRA) / H ₁ =100 mm		
Estudo Paramétrico	Autor(es): Santos, L. M. C.	Ano: 2019	
Detalhamento			
Chapa de Aço	Concreto	Barras de Aço	
Geometria: Trapezoidal Espessura (mm): 1.25 Classe do aço: S275	Densidade: Convencional Classe: C20/25 Umidade: 3.0%	Varões	Grelha de Reforço
		Descrição: Ø6//150 Classe do aço: S500	Descrição: 3Ø10 Classe do aço: S500
Secção Transversal			
Secção Longitudinal			
Modelo de Elementos Finitos			

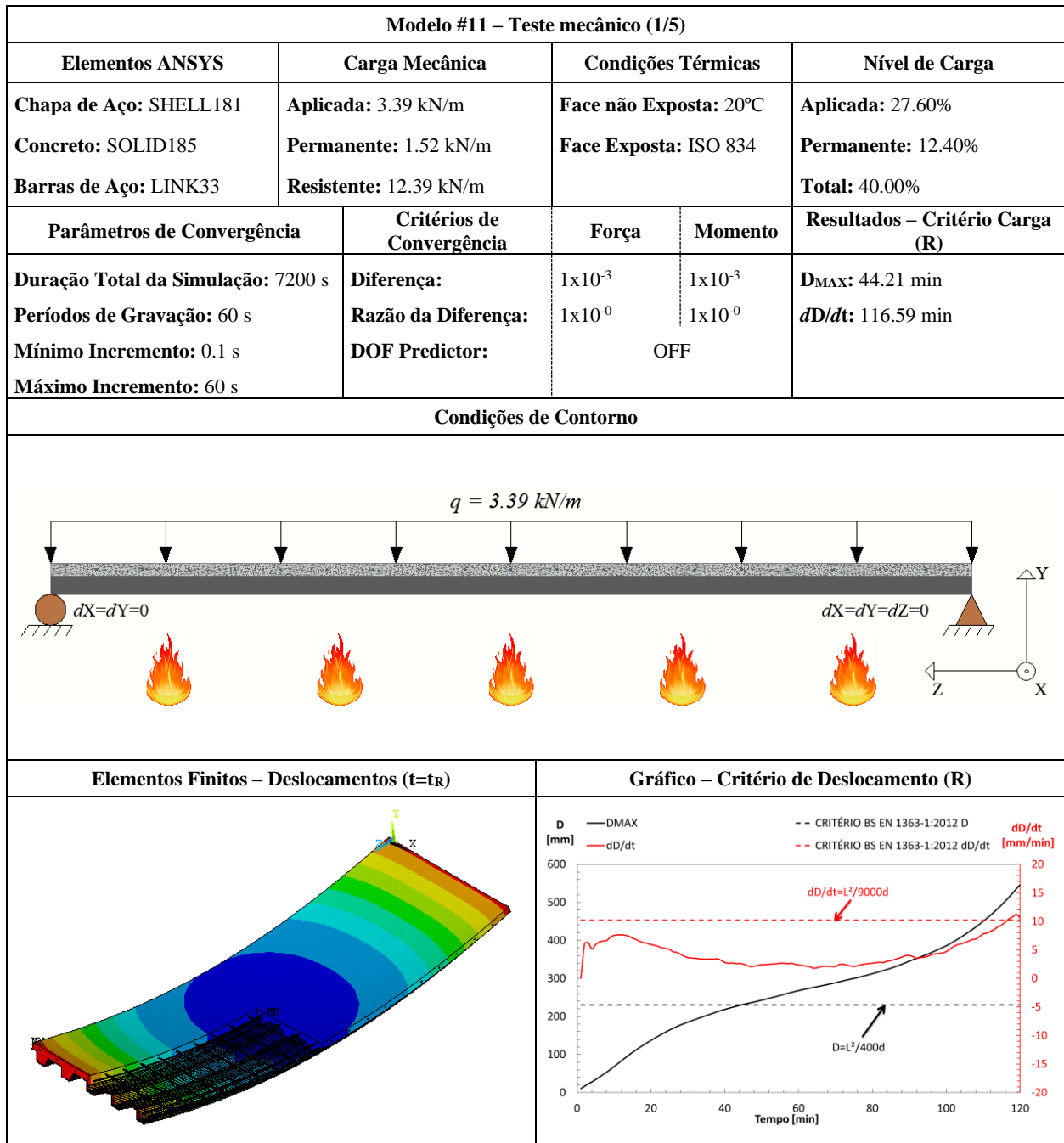
Modelo #9- Teste térmico (1/1)				
Elementos ANSYS	Coef. de Convecção (α_c)	Curvas de Temperatura	Fator de Vista (Φ)	Emissividade (ϵ)
Chapa de Aço: SHELL131 Concreto: SOLID70 Barras de Aço: LINK33	Sup. Exposta: 25 W/m ² K Sup. Ñ Exposta: 9 W/m ² K	Face não Exposta: 20°C Face Exposta: ISO 834	Flange Superior: 0.78 Alma: 0.67 Flange Inferior: 1.00	Chapa de Aço: 0.7 Concreto: 0.7 Barras de Aço: 0.7
Parâmetros de Convergência		Critérios de Convergência – Heat Flux		Resultados - Critério Isolamento (I)
Duração Total da Simulação: 7200 s Períodos de Gravação: 60 s Mínimo Incremento: 1 s Máximo Incremento: 60 s		Diferença: 1x10 ⁻³ Razão da Diferença: 1x10 ⁻⁶		T _{MAX} : 116.60 min T _{MED} : 106.32 min
Condições de Contorno			Elementos Finitos – Temperaturas (t=t _i)	
Gráfico – Critério de Isolamento (I)			Gráfico de Temperaturas na Secção da Laje	

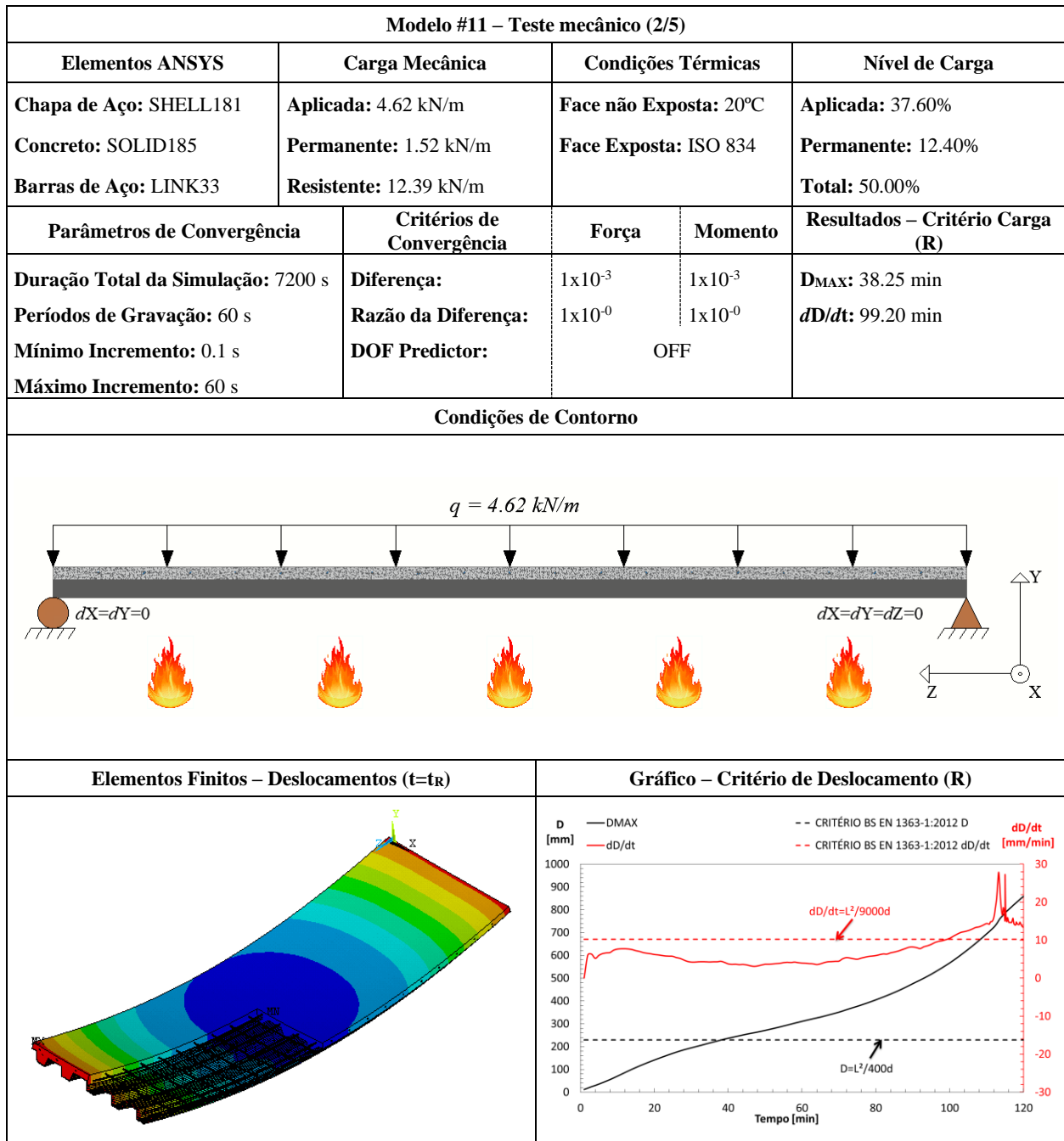
FICHA TÉCNICA			
Modelo #10 – Polideck 59S – 110 mm			
Modelo #10 – Dados Básicos (1/1)			
Tipo de Experimento	Título: Polideck 59S (BRA) / H ₁ =110 mm		
Estudo Paramétrico	Autor(es): Santos, L. M. C.		Ano: 2019
Detalhamento			
Chapa de Aço	Concreto	Barras de Aço	
Geometria: Trapezoidal Espessura (mm): 1.25 Classe do aço: S275	Densidade: Convencional Classe: C20/25 Umidade: 3.0%	Varões	Grelha de Reforço
		Descrição: Ø6//150 Classe do aço: S500	Descrição: 3Ø10 Classe do aço: S500
Secção Transversal			
Secção Longitudinal			
Modelo de Elementos Finitos			

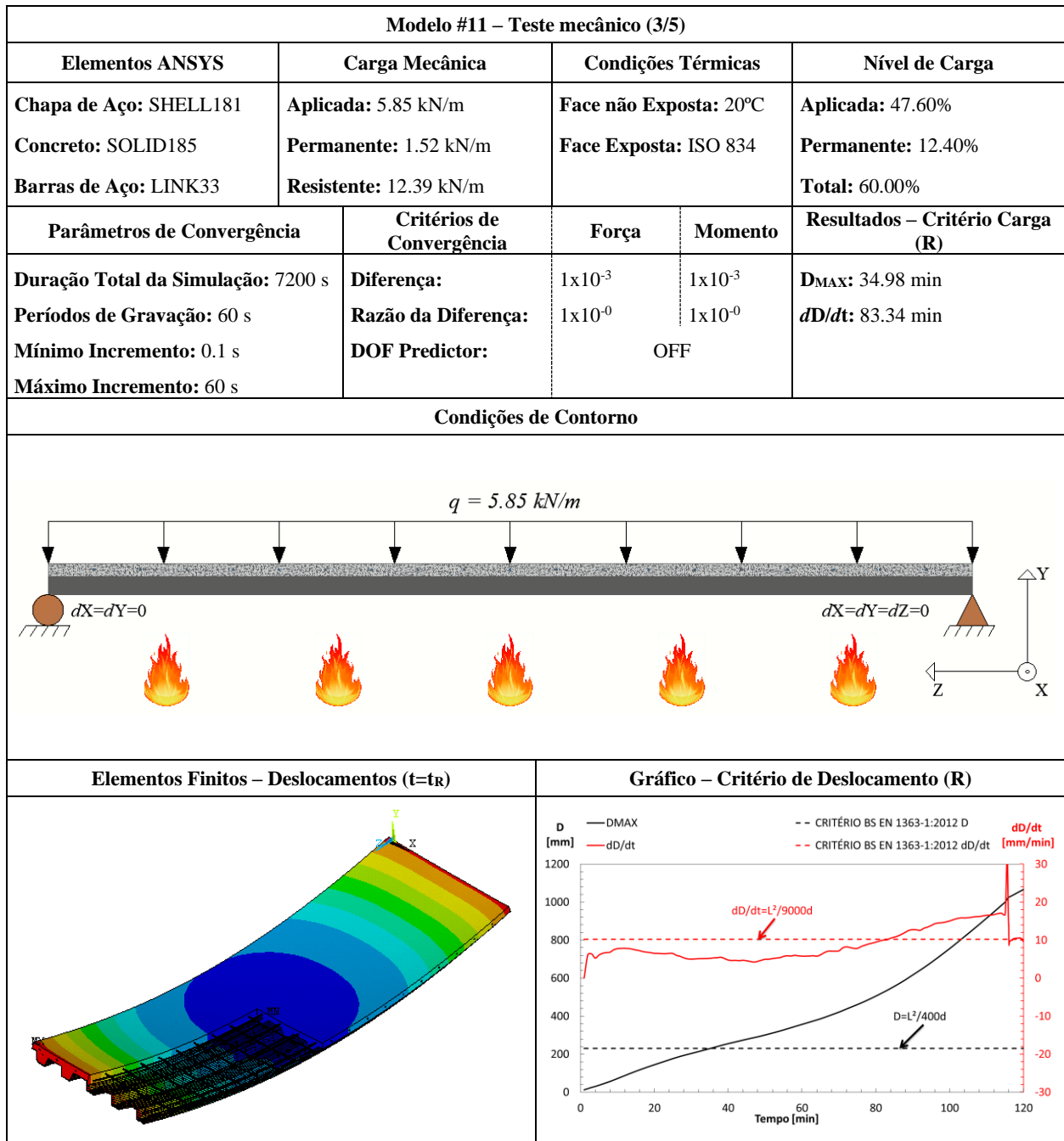
Modelo #10– Teste térmico (1/1)				
Elementos ANSYS	Coef. de Convecção (α_c)	Curvas de Temperatura	Fator de Vista (Φ)	Emissividade (ϵ)
Chapa de Aço: SHELL131 Concreto: SOLID70 Barras de Aço: LINK33	Sup. Exposta: 25 W/m ² K Sup. Ñ Exposta: 9 W/m ² K	Face não Exposta: 20°C Face Exposta: ISO 834	Flange Superior: 0.78 Alma: 0.67 Flange Inferior: 1.00	Chapa de Aço: 0.7 Concreto: 0.7 Barras de Aço: 0.7
Parâmetros de Convergência		Critérios de Convergência – Heat Flux		Resultados - Critério Isolamento (I)
Duração Total da Simulação: 7200 s Períodos de Gravação: 60 s Mínimo Incremento: 1 s Máximo Incremento: 60 s		Diferença: 1x10 ⁻³ Razão da Diferença: 1x10 ⁻⁶		T _{MAX} : Não atingido T _{MED} : Não atingido
Condições de Contorno			Elementos Finitos – Temperaturas (t=7200 s)	
Gráfico – Critério de Isolamento (I)			Gráfico de Temperaturas na Seção da Laje	

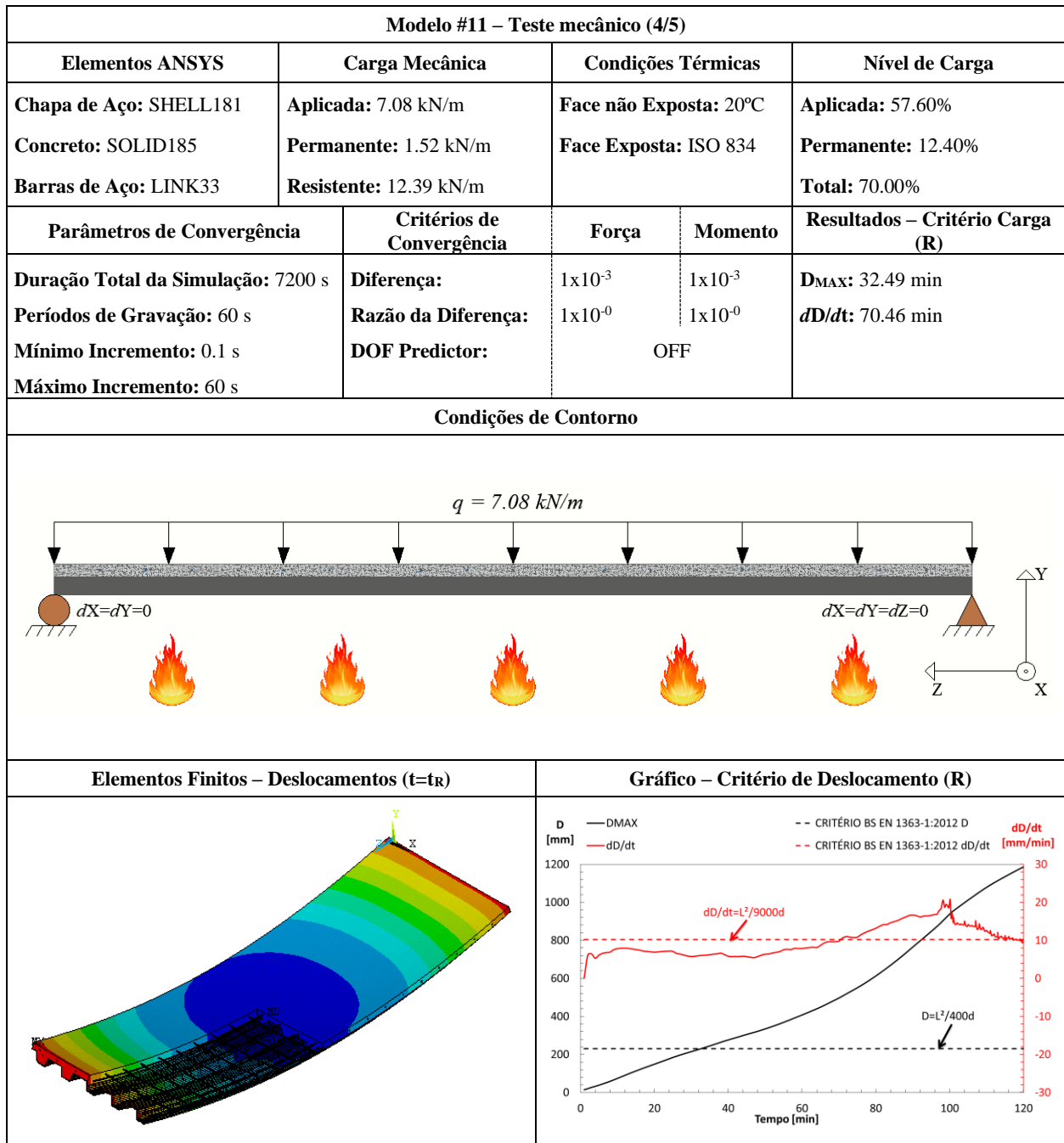
FICHA TÉCNICA			
Modelo #11 – Confraplus 60 – 40 mm			
Modelo #11 – Dados Básicos (1/1)			
Tipo de Experimento	Título: Confraplus 60 (POL) / H ₁ =40 mm		
Estudo Paramétrico	Autor(es): Santos, L. M. C.		Ano: 2019
Detalhamento			
Chapa de Aço	Concreto	Barras de Aço	
Geometria: Trapezoidal Espessura (mm): 1.25 Classe do aço: S350	Densidade: Convencional Classe: C20/25 Umidade: 3.0%	Varões	Grelha de Reforço
		Descrição: Ø6//150 Classe do aço: S500	Descrição: 3Ø10 Classe do aço: S500
Secção Transversal			
Secção Longitudinal			
Modelo de Elementos Finitos			

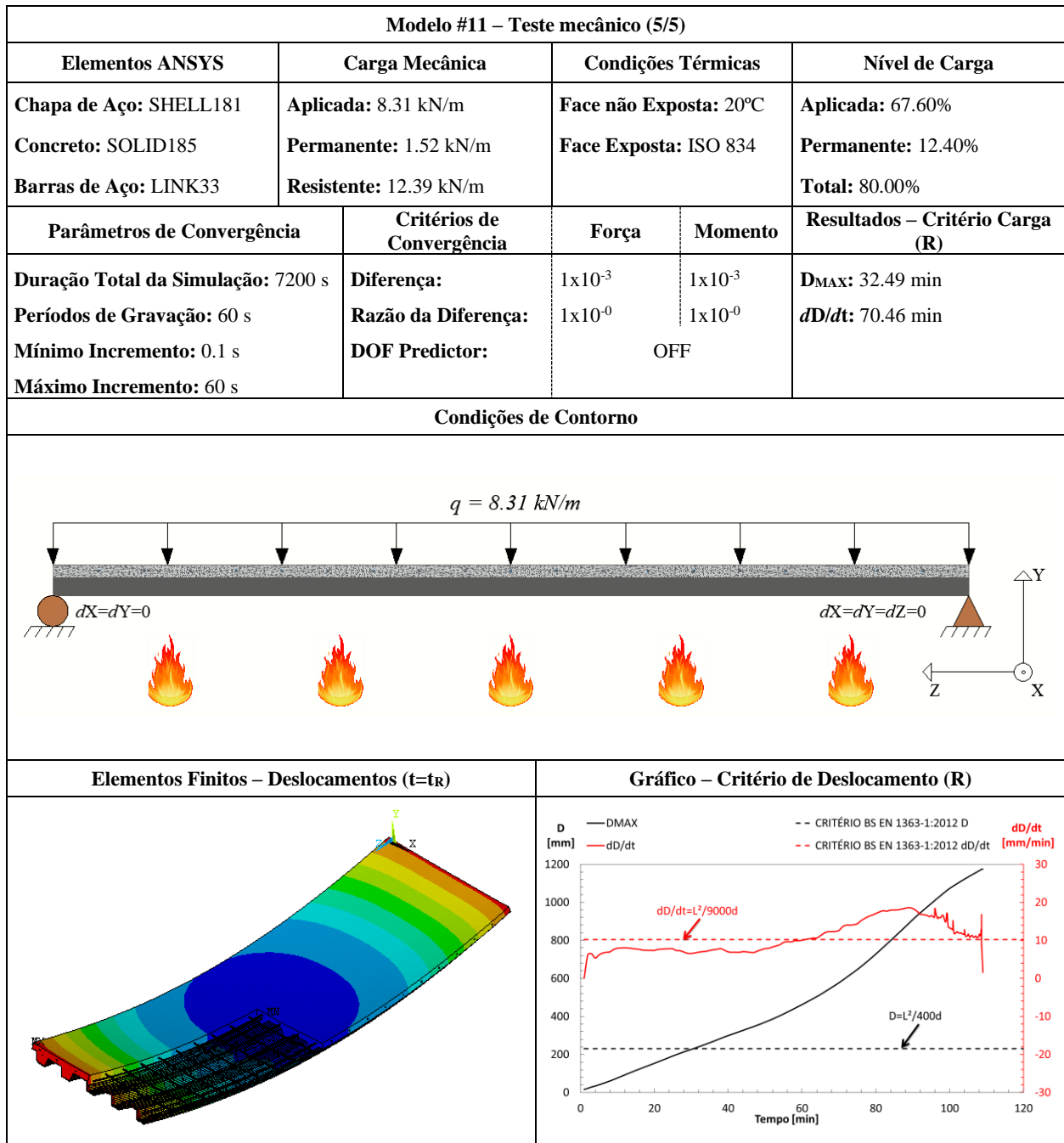
Modelo #11– Teste térmico (1/1)				
Elementos ANSYS	Coef. de Convecção (α_c)	Curvas de Temperatura	Fator de Vista (Φ)	Emissividade (ϵ)
Chapa de Aço: SHELL131 Concreto: SOLID70 Barras de Aço: LINK33	Sup. Exposta: 25 W/m ² K Sup. Ñ Exposta: 9 W/m ² K	Face não Exposta: 20°C Face Exposta: ISO 834	Flange Superior: 0.73 Alma: 0.56 Flange Inferior: 1.00	Chapa de Aço: 0.7 Concreto: 0.7 Barras de Aço: 0.7
Parâmetros de Convergência		Critérios de Convergência – Heat Flux		Resultados - Critério Isolamento (I)
Duração Total da Simulação: 7200 s Períodos de Gravação: 60 s Mínimo Incremento: 1 s Máximo Incremento: 60 s		Diferença: 1x10 ⁻³ Razão da Diferença: 1x10 ⁻⁶		T _{MAX} : 26.93 min T _{MED} : 28.48 min
Condições de Contorno			Elementos Finitos – Temperaturas (t=t ₁)	
Gráfico – Critério de Isolamento (I)			Gráfico de Temperaturas na Secção da Laje	





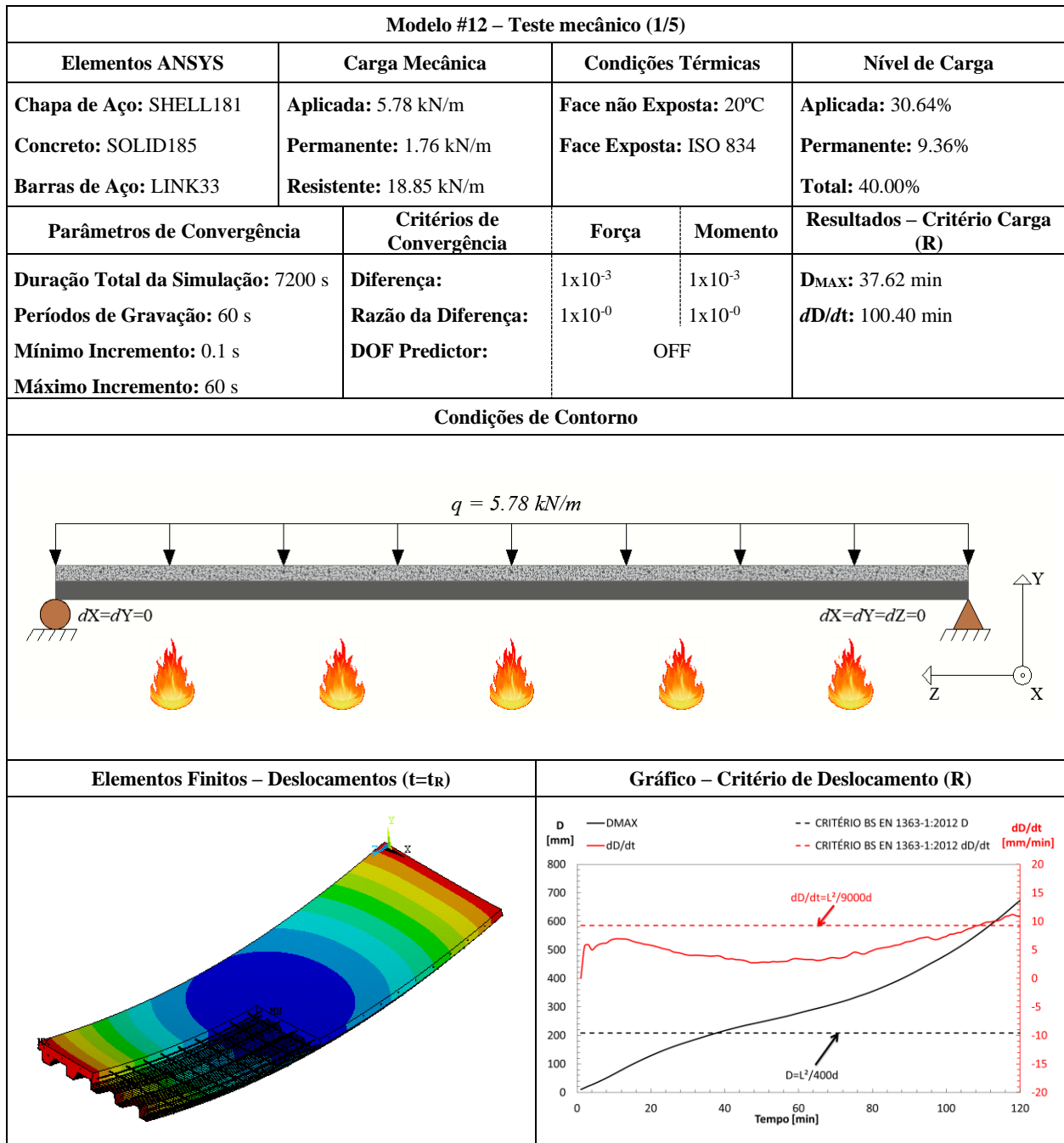


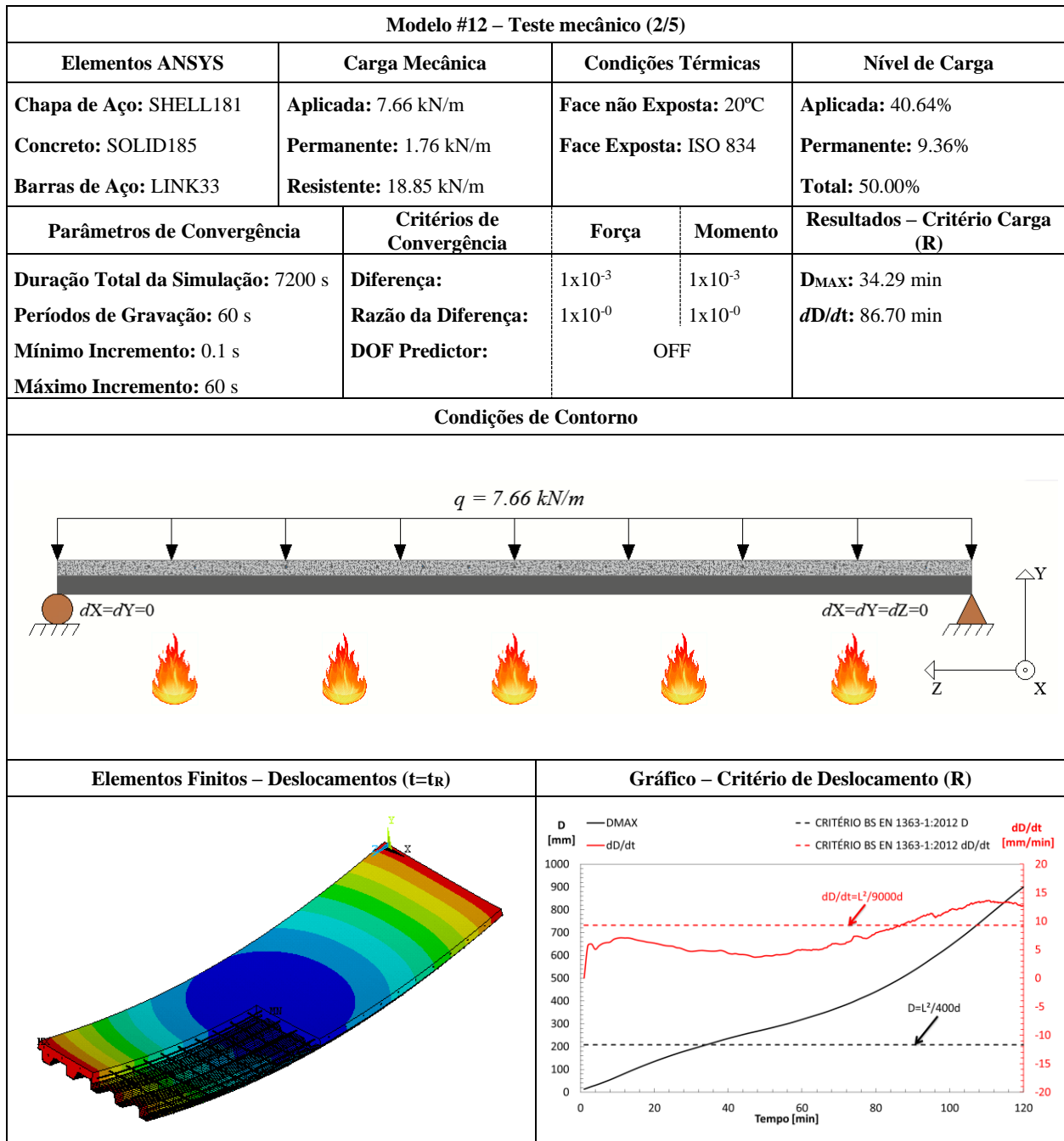


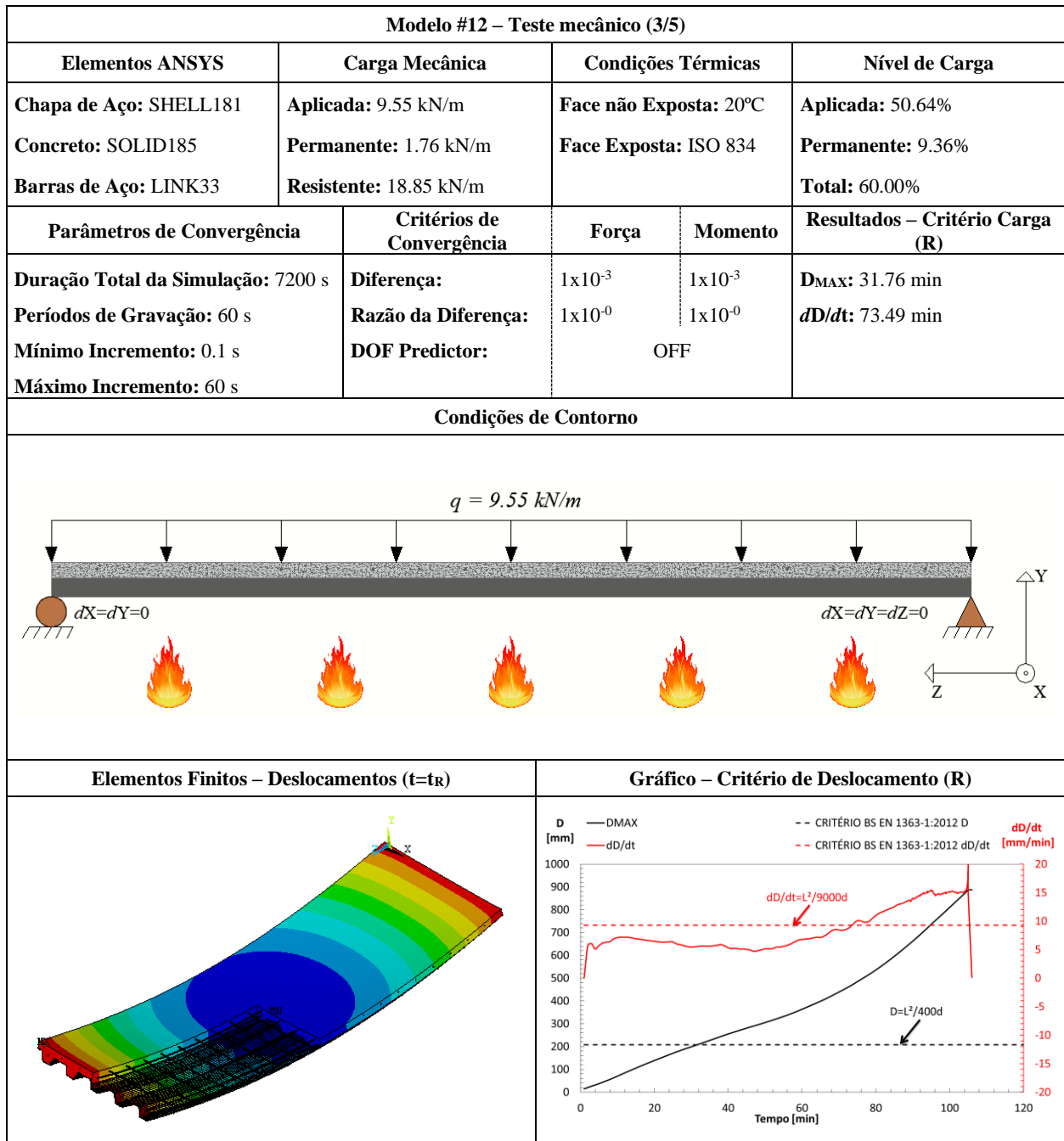


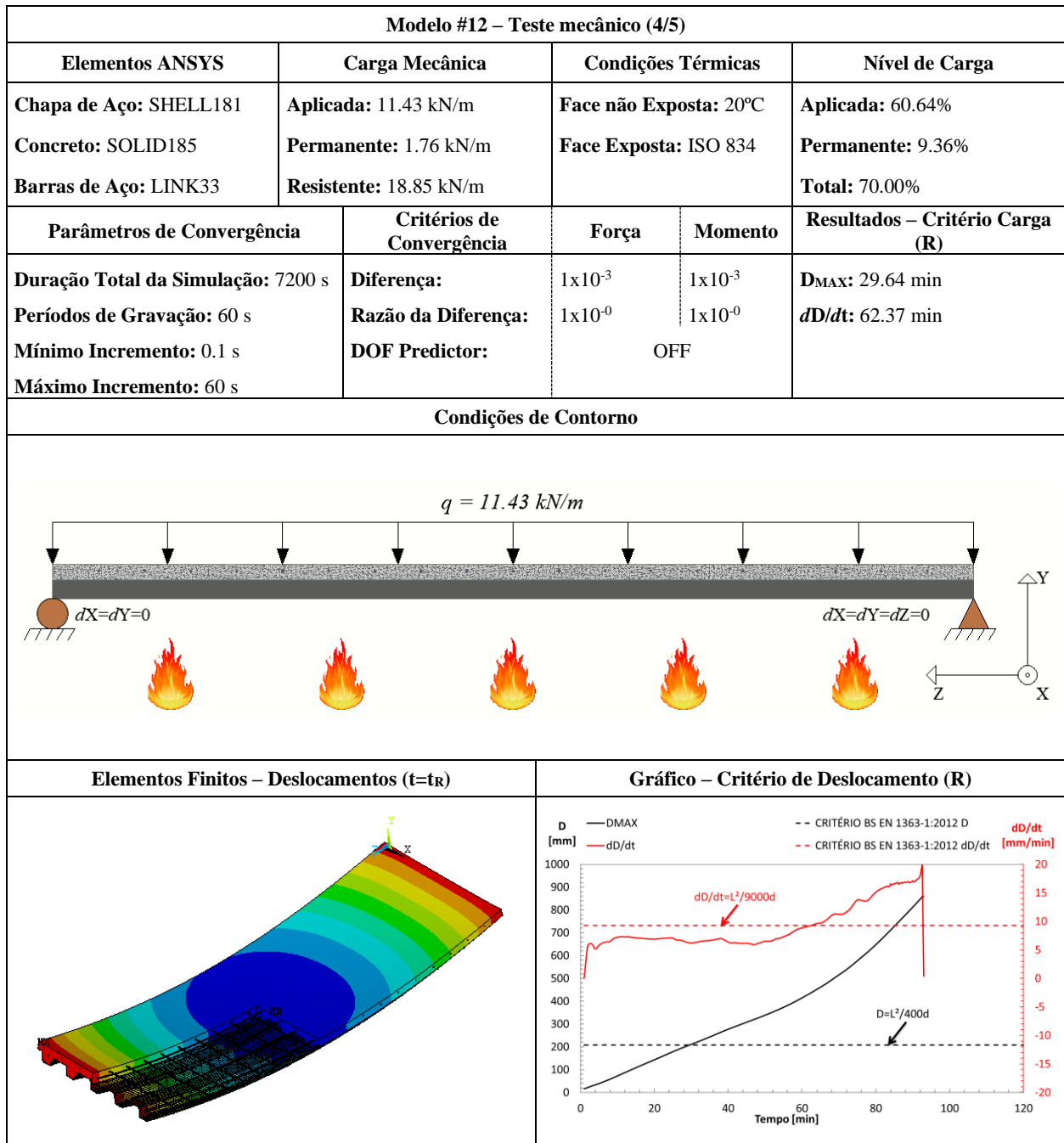
FICHA TÉCNICA			
Modelo #12 – Confraplus 60 – 50 mm			
Modelo #12 – Dados Básicos (1/1)			
Tipo de Experimento	Título: Confraplus 60 (POL) / H ₁ =50 mm		
Estudo Paramétrico	Autor(es): Santos, L. M. C.		Ano: 2019
Detalhamento			
Chapa de Aço	Concreto	Barras de Aço	
Geometria: Trapezoidal Espessura (mm): 1.25 Classe do aço: S350	Densidade: Convencional Classe: C20/25 Umidade: 3.0%	Varões	Grelha de Reforço
		Descrição: Ø6//150 Classe do aço: S500	Descrição: 3Ø10 Classe do aço: S500
Secção Transversal			
Secção Longitudinal			
Modelo de Elementos Finitos			

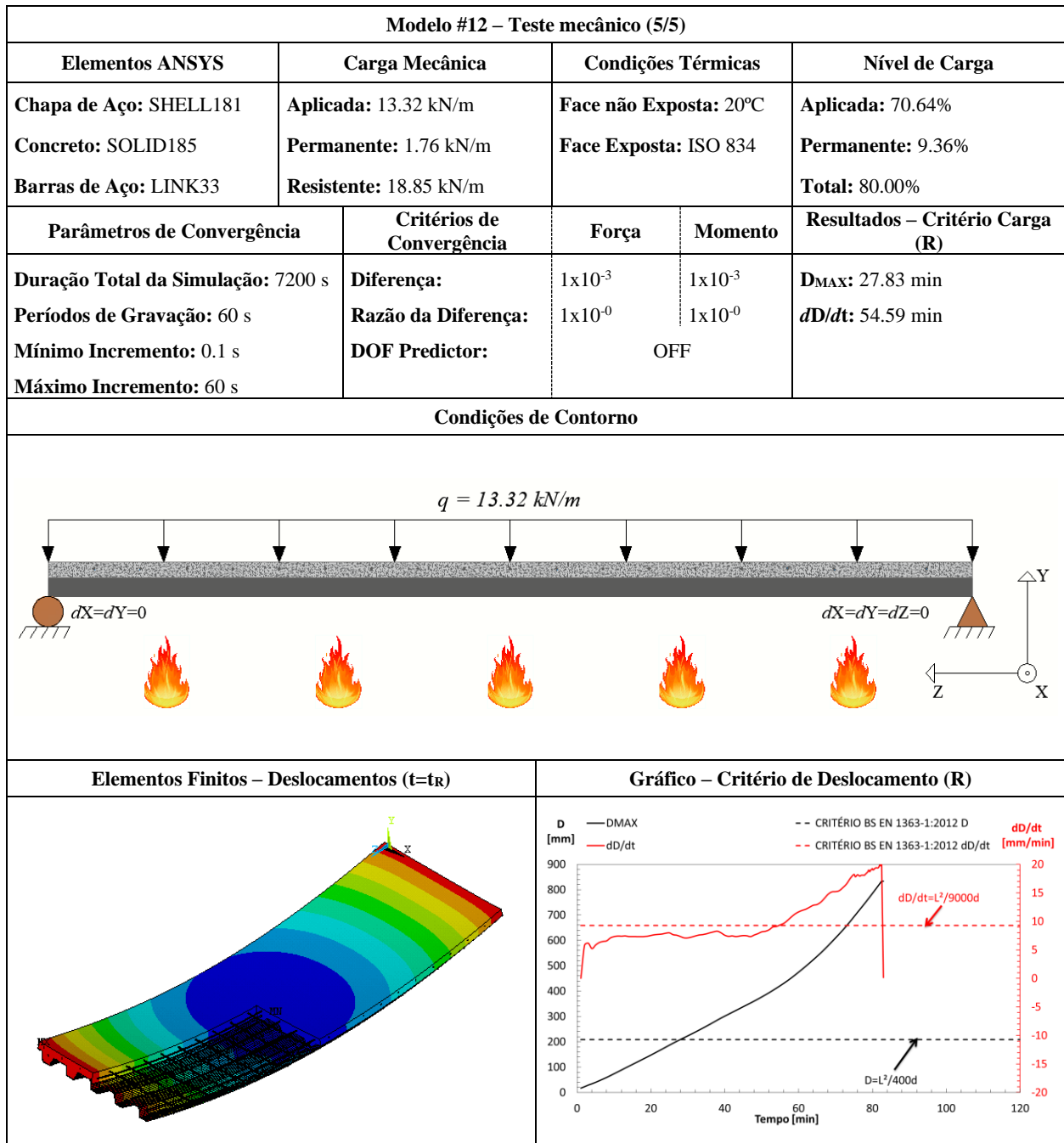
Modelo #12– Teste térmico (1/1)				
Elementos ANSYS	Coef. de Convecção (α_c)	Curvas de Temperatura	Fator de Vista (Φ)	Emissividade (ϵ)
Chapa de Aço: SHELL131 Concreto: SOLID70 Barras de Aço: LINK33	Sup. Exposta: 25 W/m ² K Sup. Ñ Exposta: 9 W/m ² K	Face não Exposta: 20°C Face Exposta: ISO 834	Flange Superior: 0.73 Alma: 0.56 Flange Inferior: 1.00	Chapa de Aço: 0.7 Concreto: 0.7 Barras de Aço: 0.7
Parâmetros de Convergência		Critérios de Convergência – Heat Flux		Resultados - Critério Isolamento (I)
Duração Total da Simulação: 7200 s Períodos de Gravação: 60 s Mínimo Incremento: 1 s Máximo Incremento: 60 s		Diferença: 1x10 ⁻³ Razão da Diferença: 1x10 ⁻⁶		T _{MAX} : 36.56 min T _{MED} : 37.54 min
Condições de Contorno			Elementos Finitos – Temperaturas (t=t _i)	
Gráfico – Critério de Isolamento (I)			Gráfico de Temperaturas na Secção da Laje	





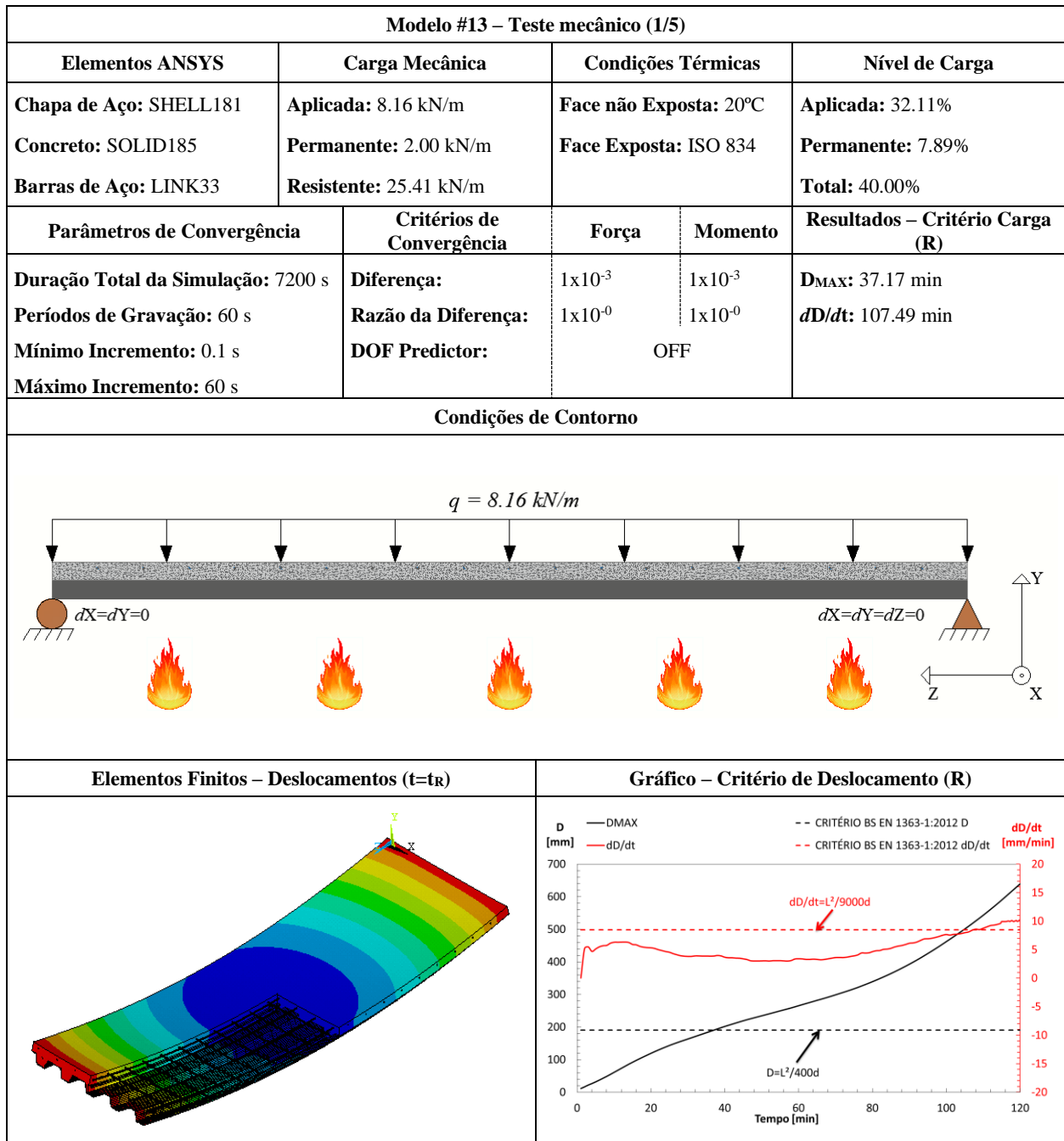


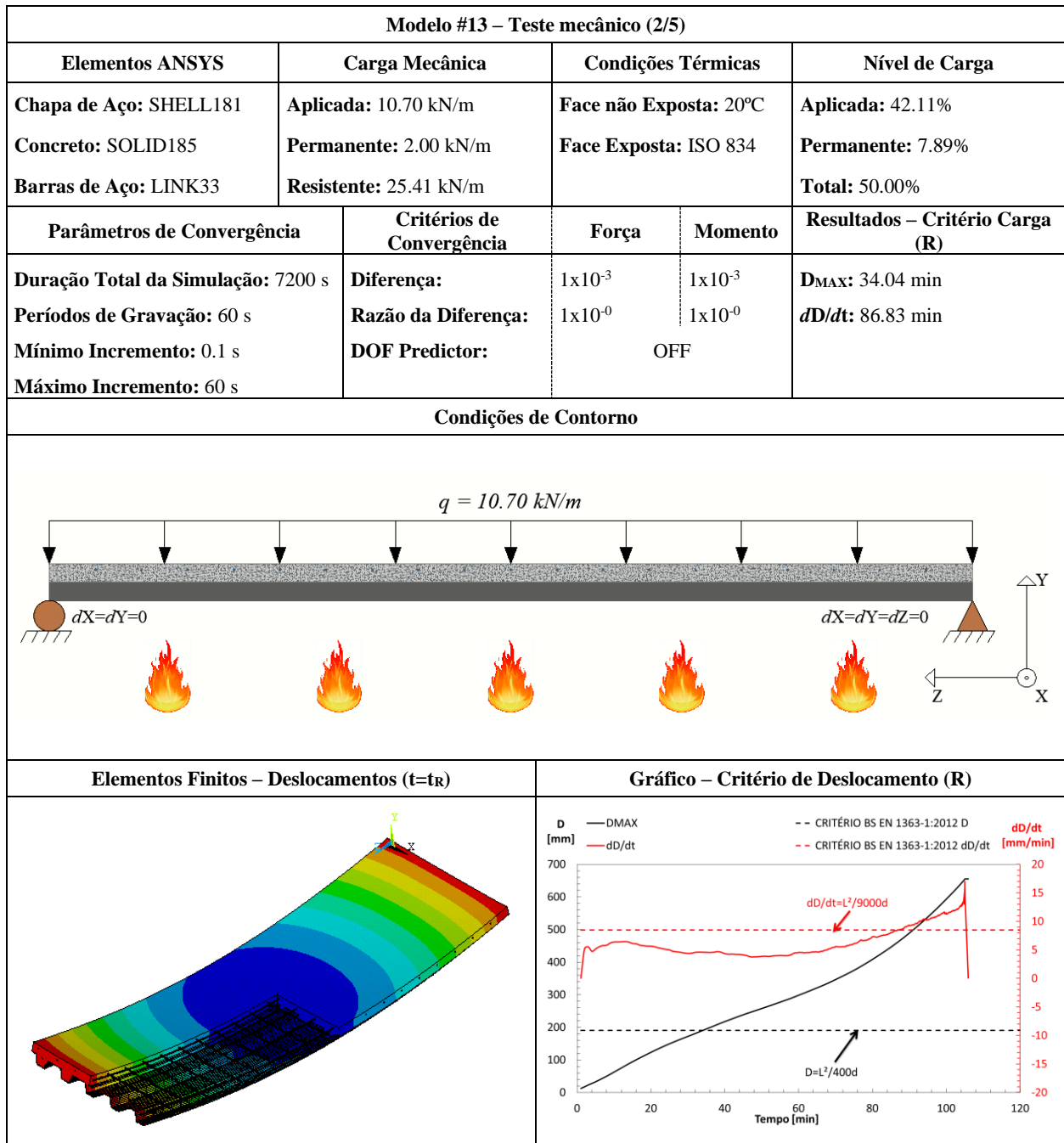


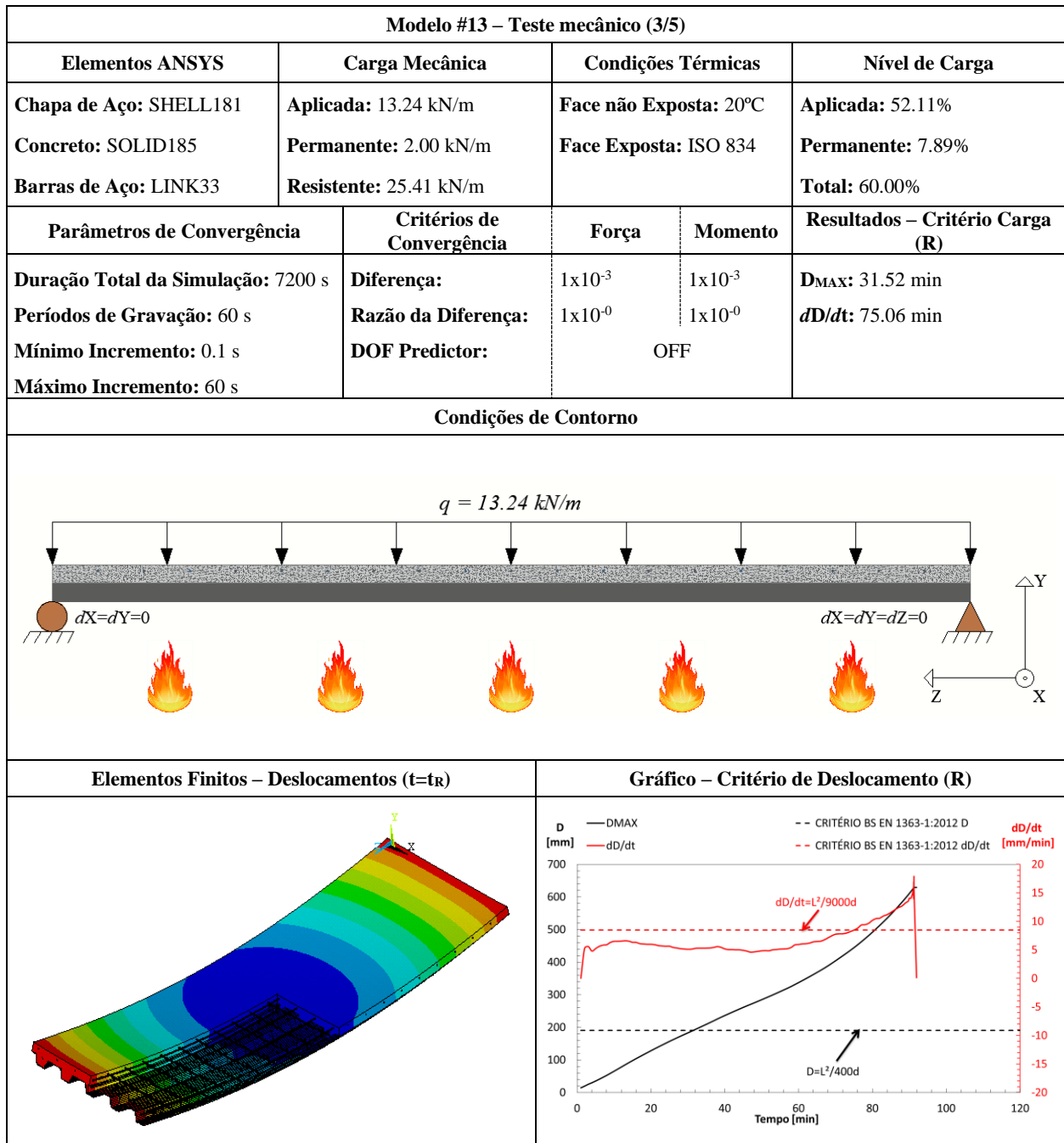


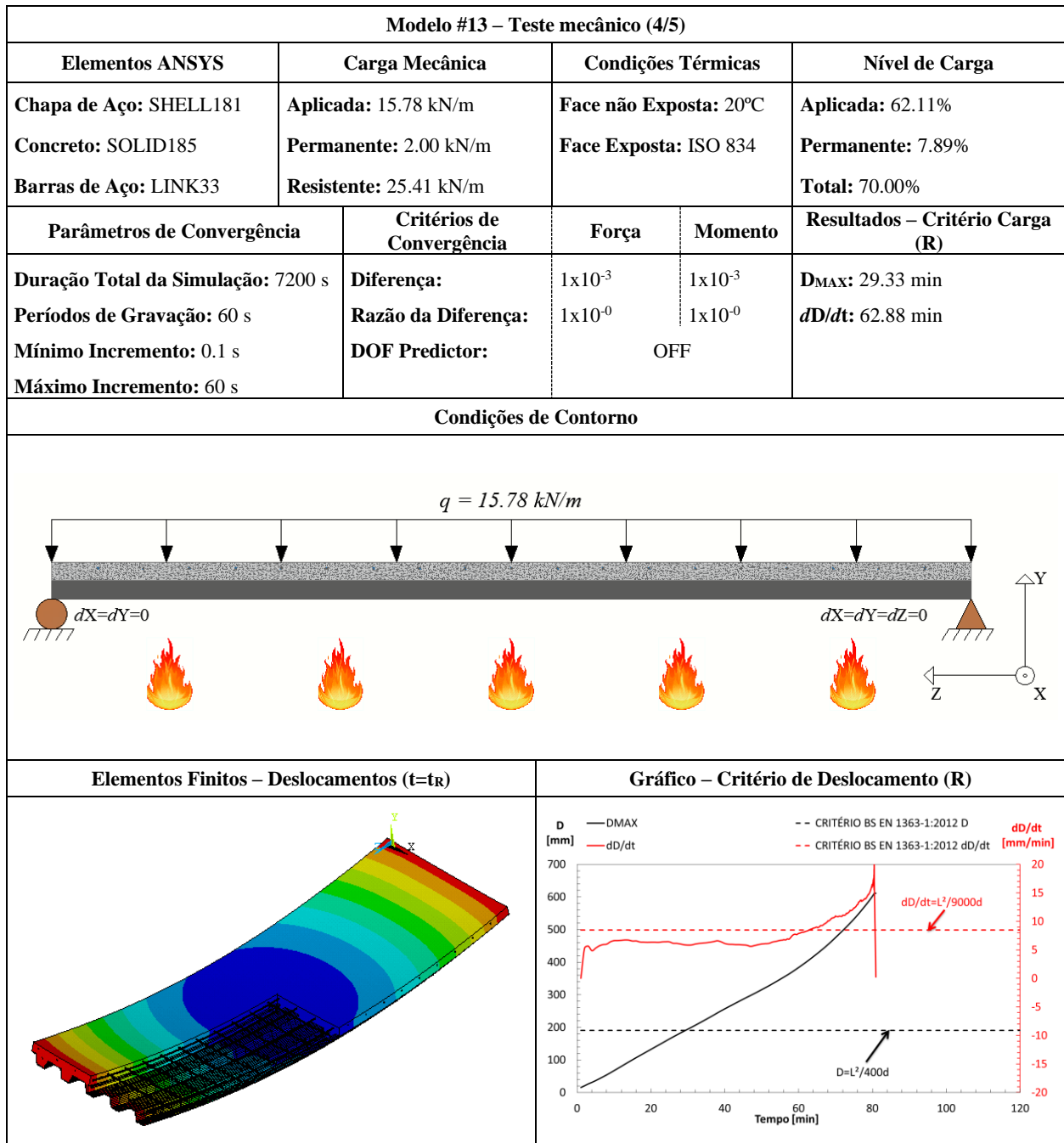
FICHA TÉCNICA			
Modelo #13 – Confraplus 60 – 60 mm			
Modelo #13 – Dados Básicos (1/1)			
Tipo de Experimento	Título: Confraplus 60 (POL) / H ₁ =60 mm		
Estudo Paramétrico	Autor(es): Santos, L. M. C.	Ano: 2019	
Detalhamento			
Chapa de Aço	Concreto	Barras de Aço	
Geometria: Trapezoidal Espessura (mm): 1.25 Classe do aço: S350	Densidade: Convencional Classe: C20/25 Umidade: 3.0%	Varões	Grelha de Reforço
		Descrição: Ø6//150 Classe do aço: S500	Descrição: 3Ø10 Classe do aço: S500
Secção Transversal			
Secção Longitudinal			
Modelo de Elementos Finitos			

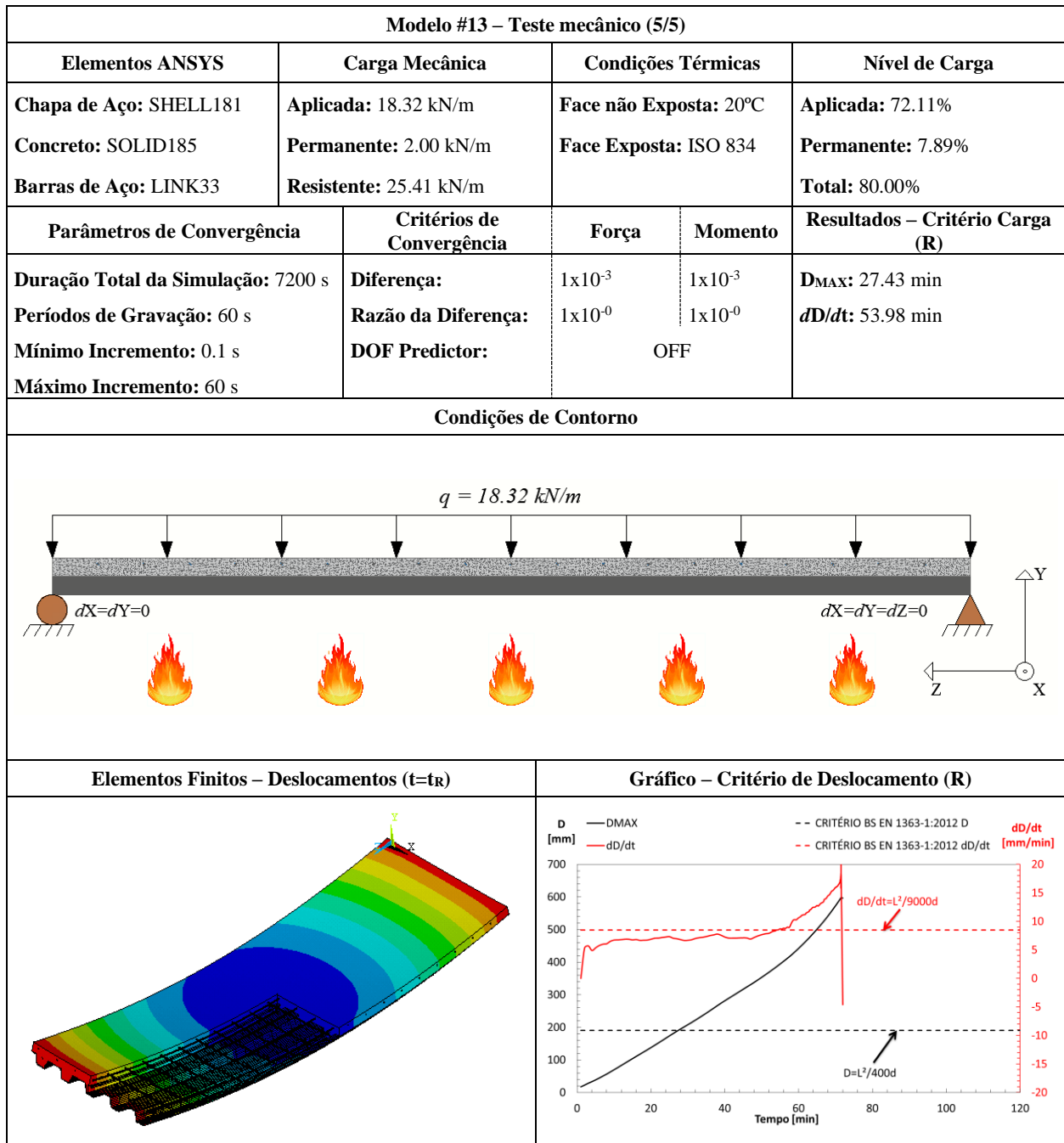
Modelo #13– Teste térmico (1/1)				
Elementos ANSYS	Coef. de Convecção (α_c)	Curvas de Temperatura	Fator de Vista (Φ)	Emissividade (ϵ)
Chapa de Aço: SHELL131 Concreto: SOLID70 Barras de Aço: LINK33	Sup. Exposta: 25 W/m ² K Sup. Ñ Exposta: 9 W/m ² K	Face não Exposta: 20°C Face Exposta: ISO 834	Flange Superior: 0.73 Alma: 0.56 Flange Inferior: 1.00	Chapa de Aço: 0.7 Concreto: 0.7 Barras de Aço: 0.7
Parâmetros de Convergência		Critérios de Convergência – Heat Flux		Resultados - Critério Isolamento (I)
Duração Total da Simulação: 7200 s Períodos de Gravação: 60 s Mínimo Incremento: 1 s Máximo Incremento: 60 s		Diferença: 1x10 ⁻³ Razão da Diferença: 1x10 ⁻⁶		T _{MAX} : 48.10 min T _{MED} : 47.72 min
Condições de Contorno			Elementos Finitos – Temperaturas (t=t _f)	
Gráfico – Critério de Isolamento (I)			Gráfico de Temperaturas na Secção da Laje	





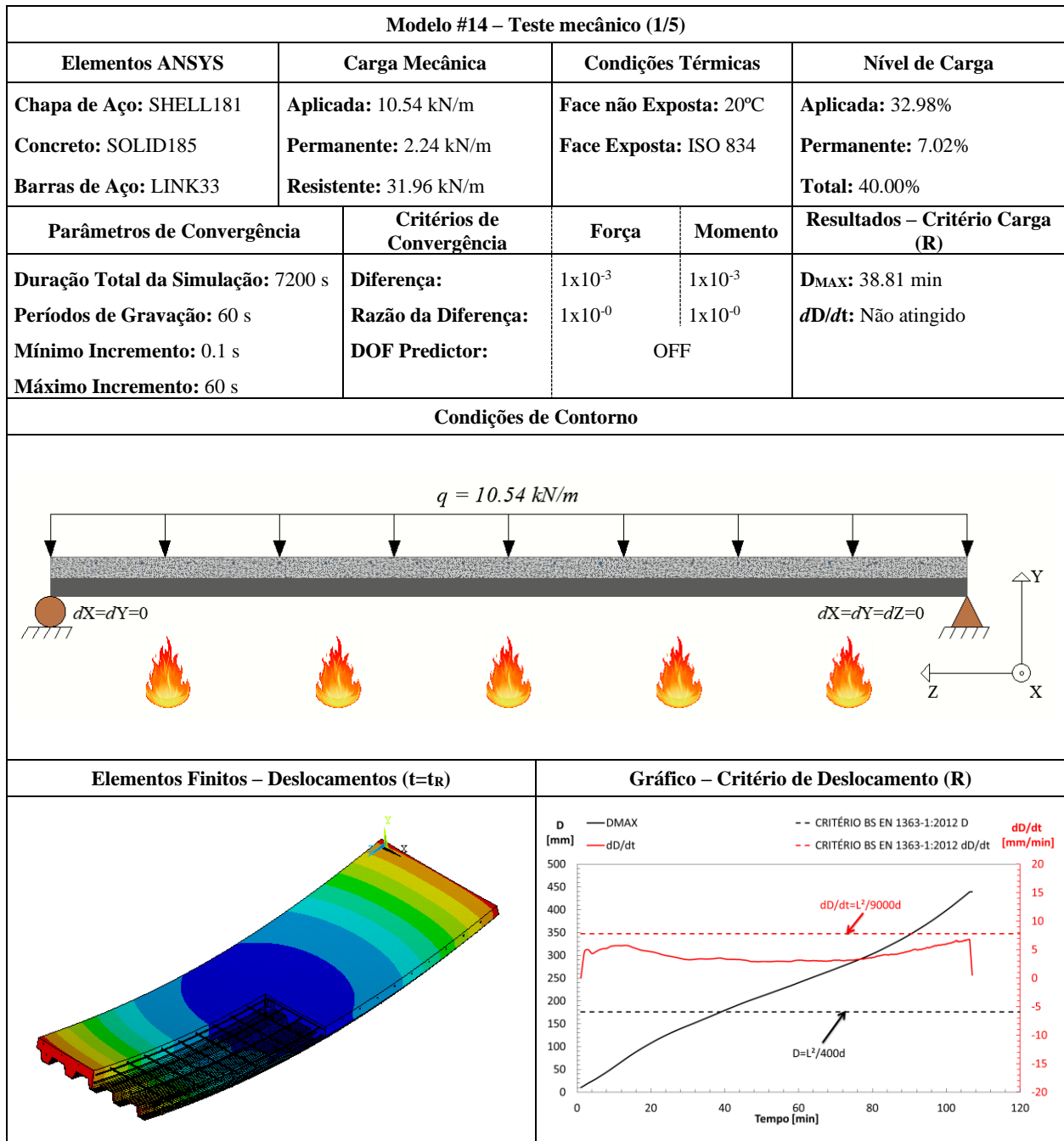


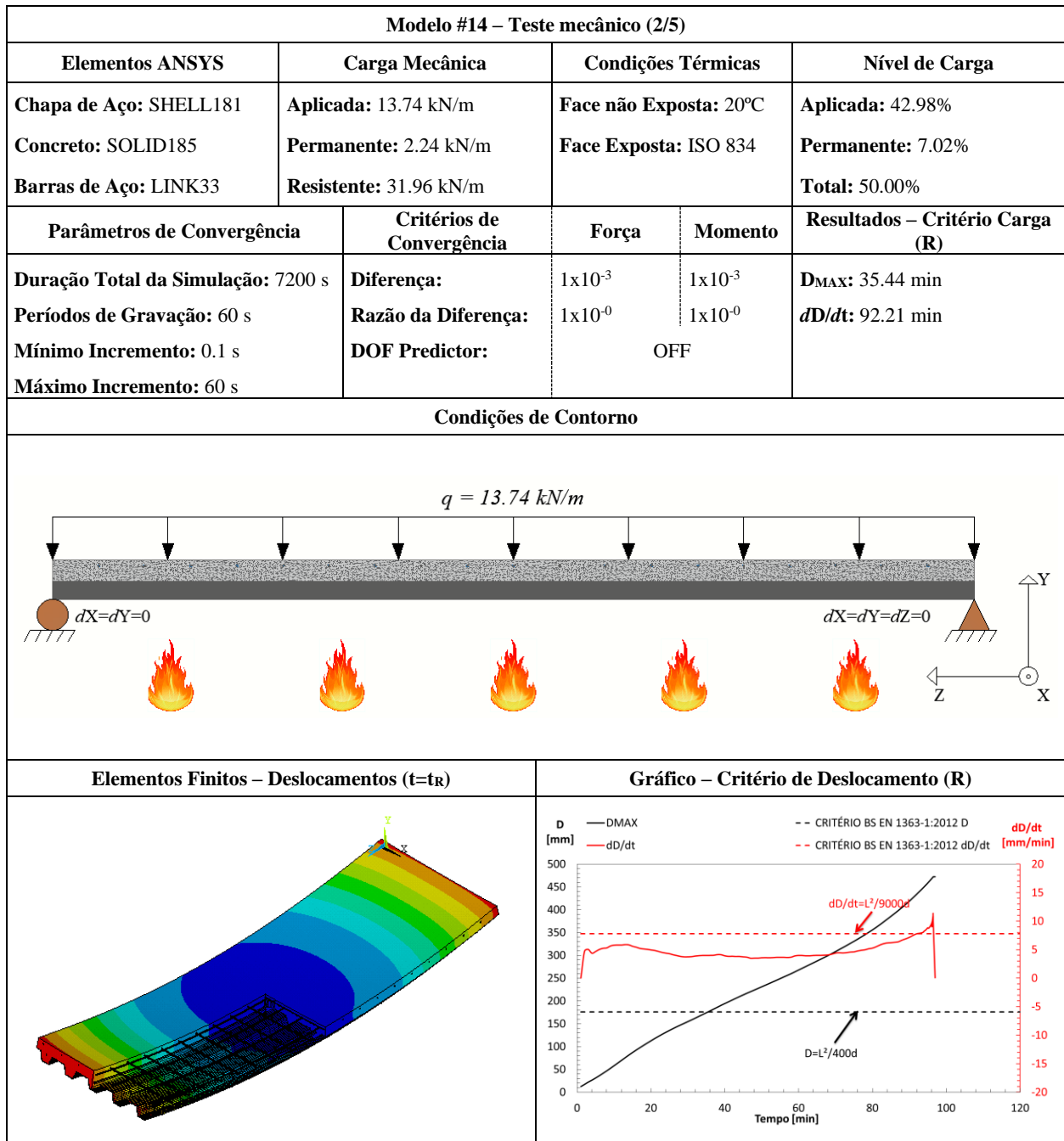


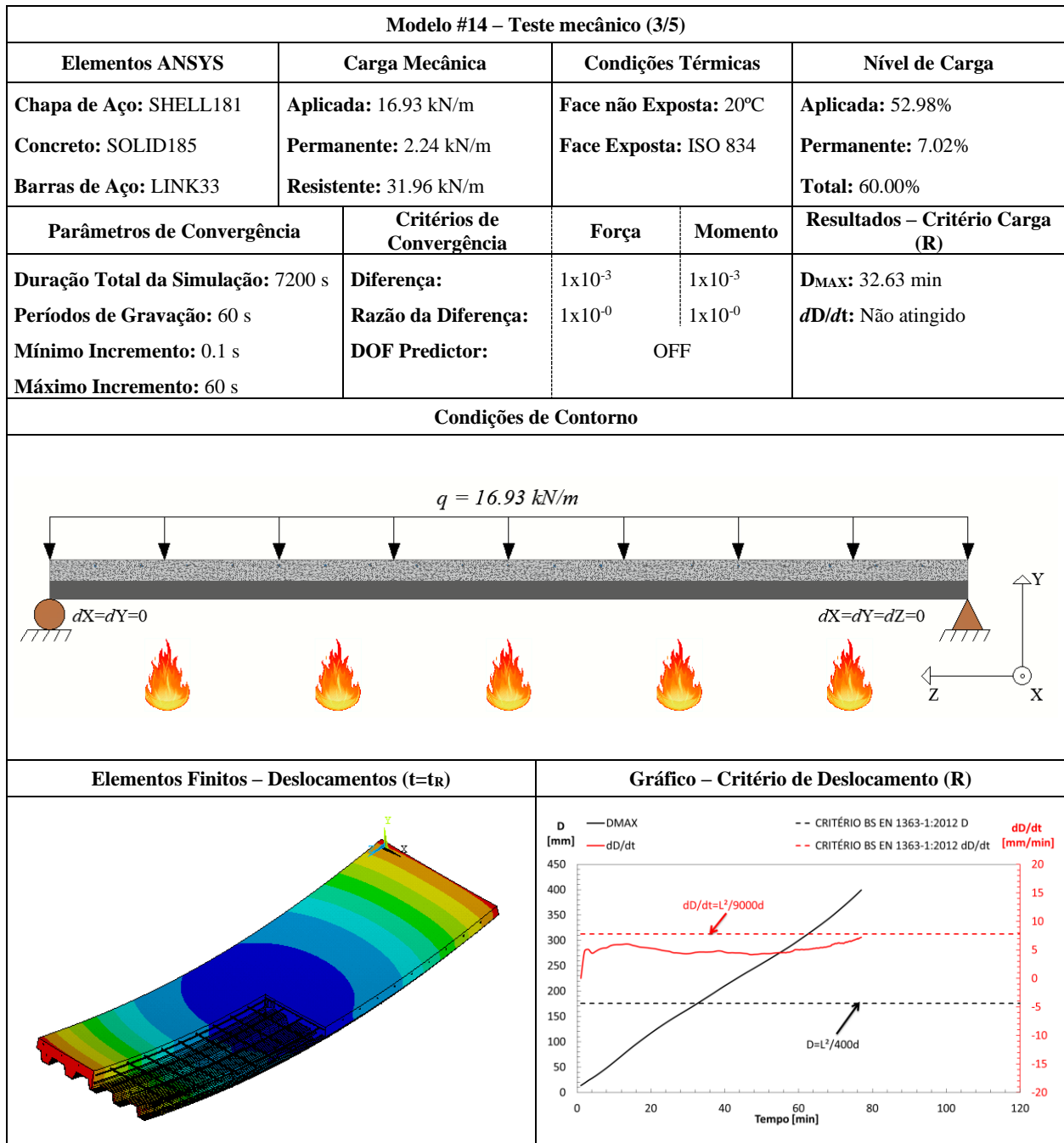


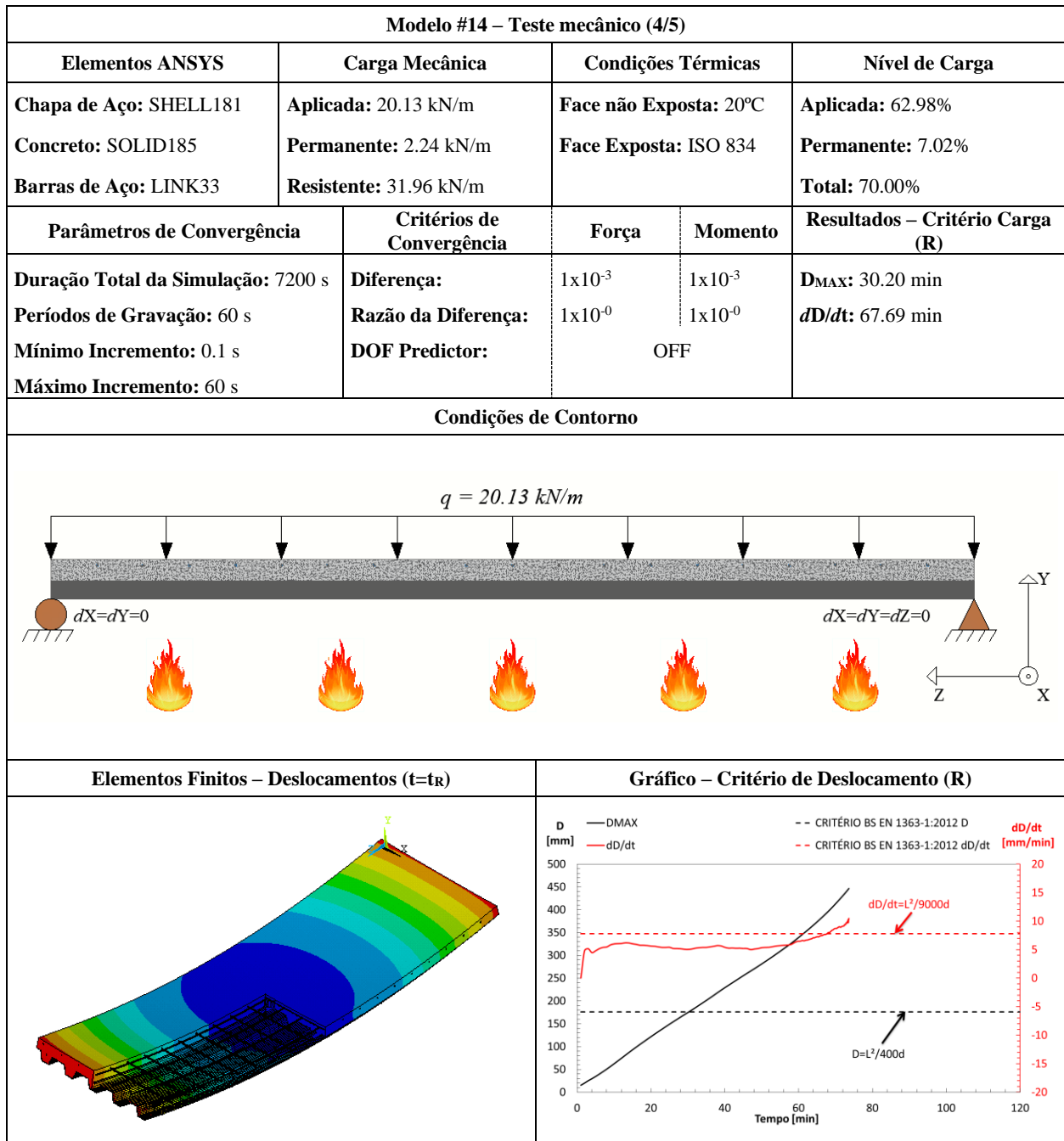
FICHA TÉCNICA			
Modelo #14 – Confraplus 60 – 70 mm			
Modelo #14 – Dados Básicos (1/1)			
Tipo de Experimento	Título: Confraplus 60 (POL) / H ₁ =70 mm		
Estudo Paramétrico	Autor(es): Santos, L. M. C.	Ano: 2019	
Detalhamento			
Chapa de Aço	Concreto	Barras de Aço	
Geometria: Trapezoidal Espessura (mm): 1.25 Classe do aço: S350	Densidade: Convencional Classe: C20/25 Umidade: 3.0%	Varões	Grelha de Reforço
		Descrição: Ø6//150 Classe do aço: S500	Descrição: 3Ø10 Classe do aço: S500
Secção Transversal			
Secção Longitudinal			
Modelo de Elementos Finitos			

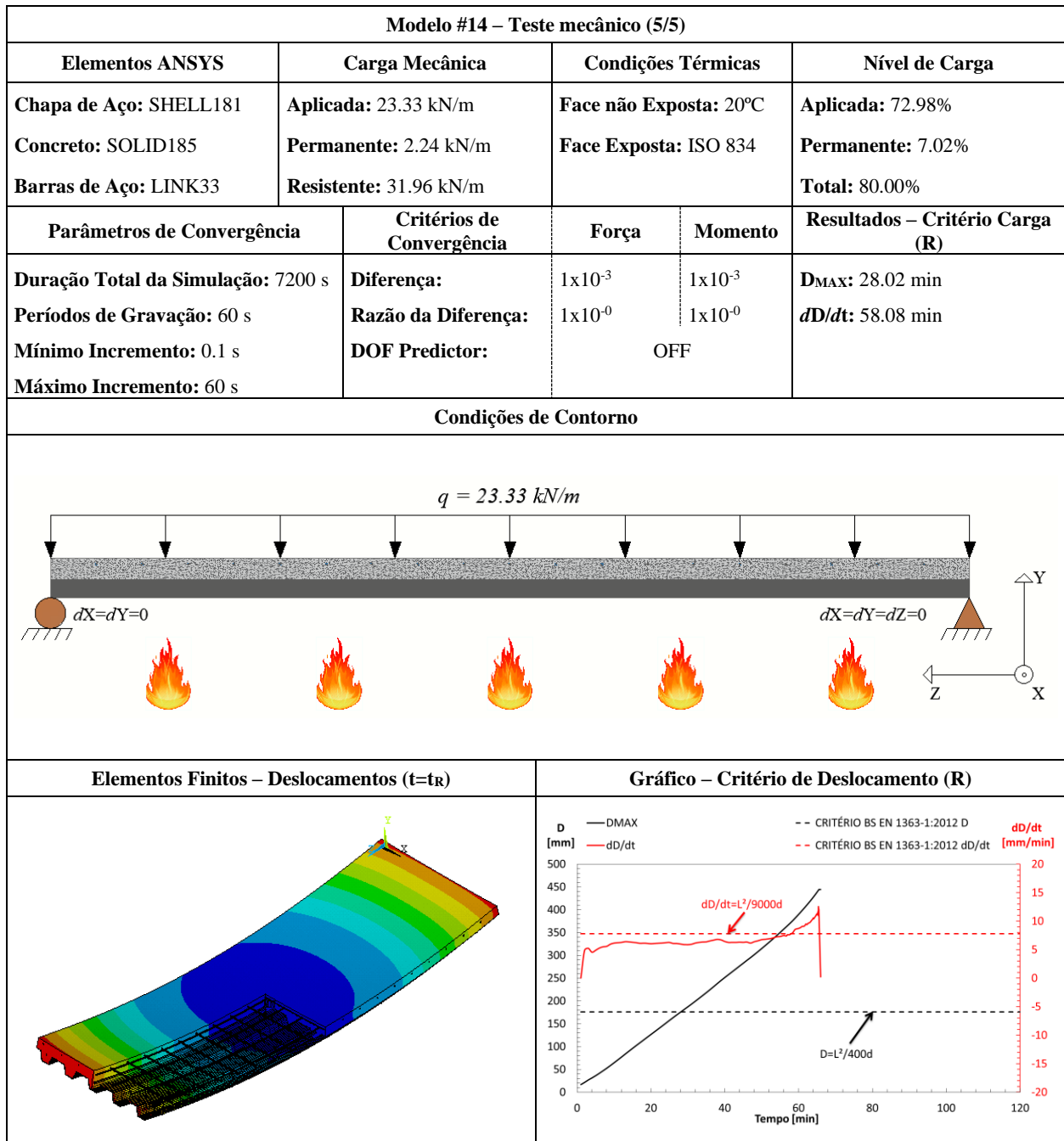
Modelo #14– Teste térmico (1/1)				
Elementos ANSYS	Coef. de Convecção (α_c)	Curvas de Temperatura	Fator de Vista (Φ)	Emissividade (ϵ)
Chapa de Aço: SHELL131 Concreto: SOLID70 Barras de Aço: LINK33	Sup. Exposta: 25 W/m ² K Sup. Ñ Exposta: 9 W/m ² K	Face não Exposta: 20°C Face Exposta: ISO 834	Flange Superior: 0.73 Alma: 0.56 Flange Inferior: 1.00	Chapa de Aço: 0.7 Concreto: 0.7 Barras de Aço: 0.7
Parâmetros de Convergência		Critérios de Convergência – Heat Flux		Resultados - Critério Isolamento (I)
Duração Total da Simulação: 7200 s Períodos de Gravação: 60 s Mínimo Incremento: 1 s Máximo Incremento: 60 s		Diferença: 1x10 ⁻³ Razão da Diferença: 1x10 ⁻⁶		T _{MAX} : 61.59 min T _{MED} : 59.13 min
Condições de Contorno			Elementos Finitos – Temperaturas (t=t _f)	
Gráfico – Critério de Isolamento (I)			Gráfico de Temperaturas na Secção da Laje	





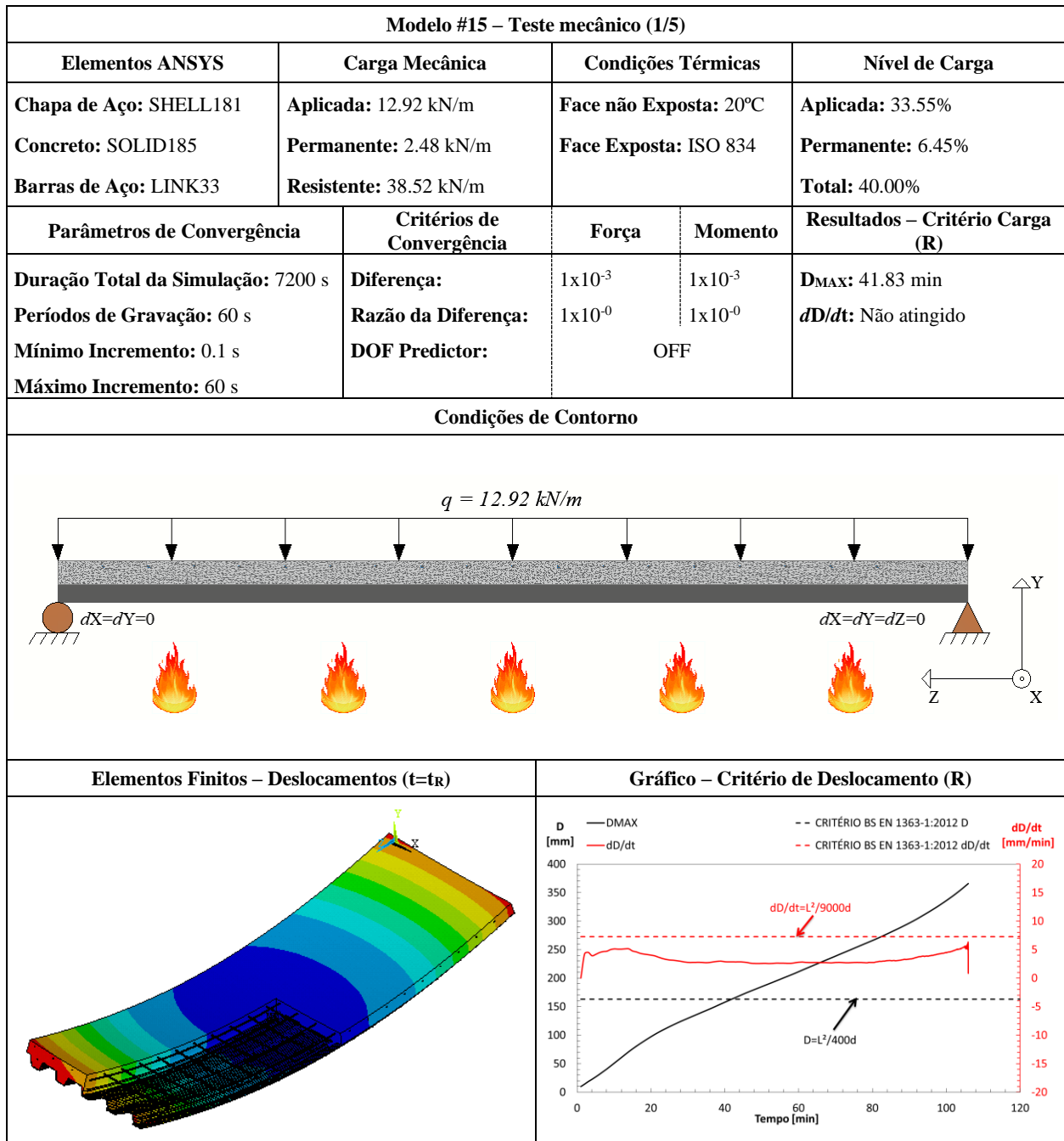


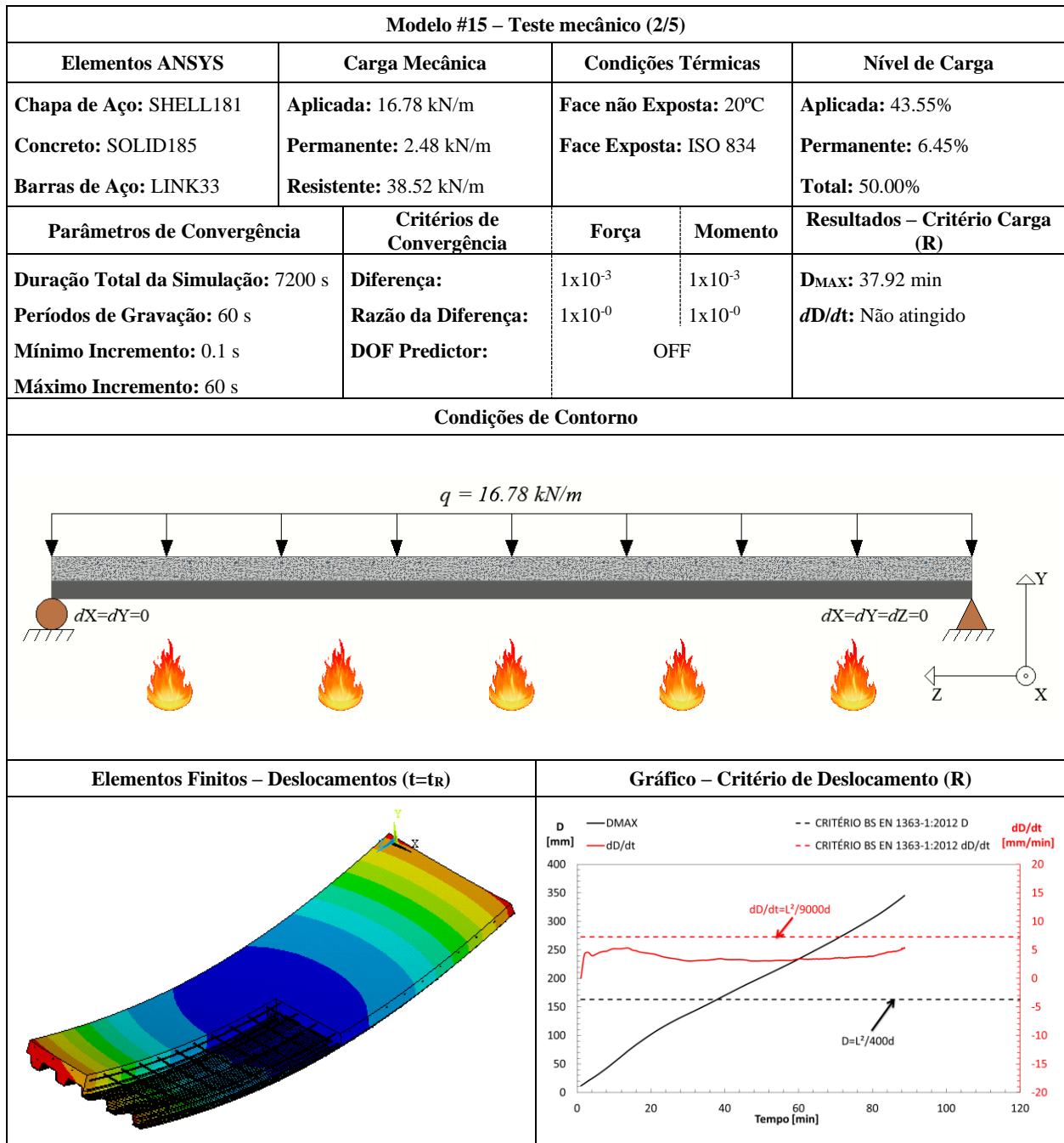


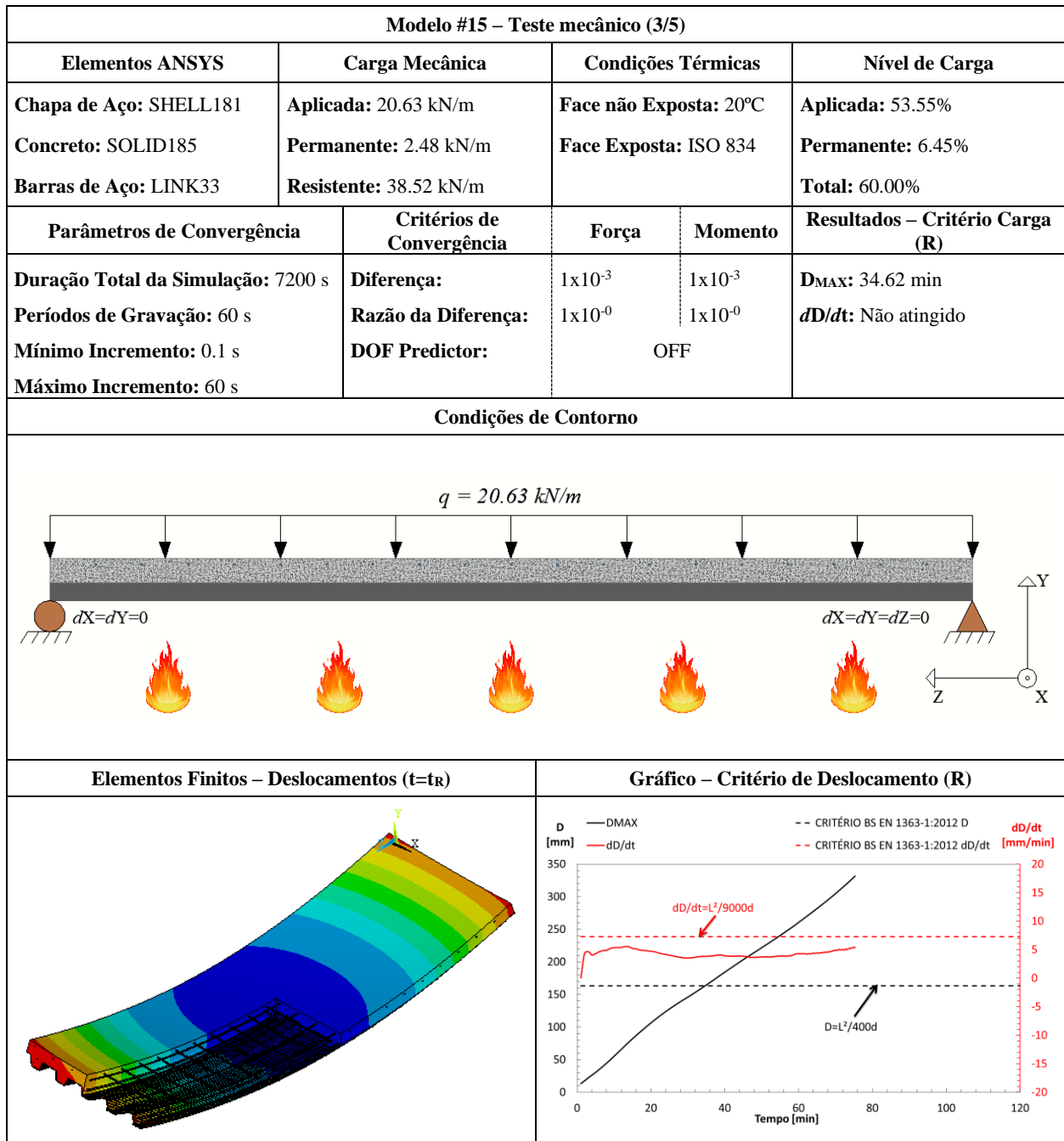


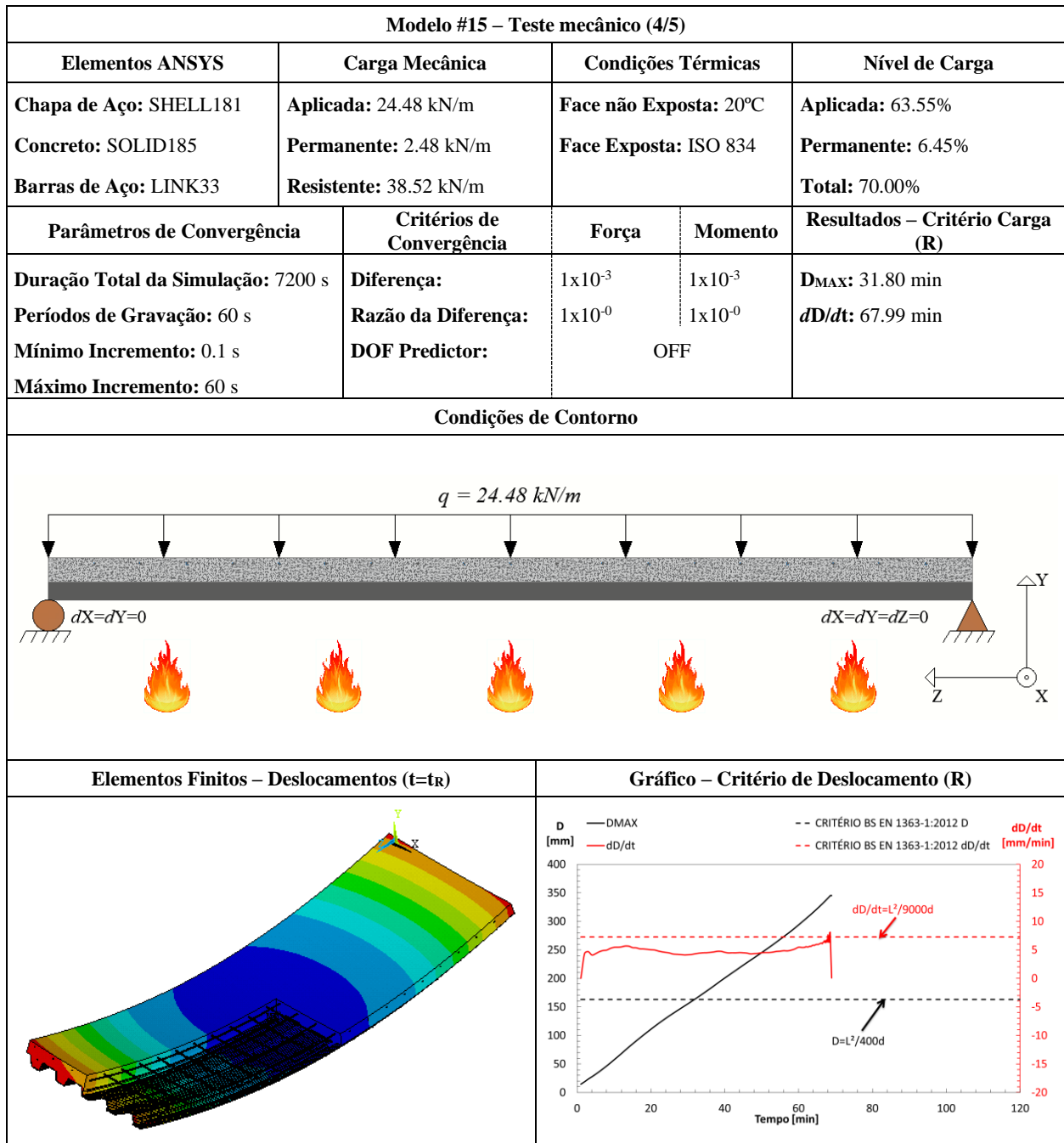
FICHA TÉCNICA			
Modelo #15 – Confraplus 60 – 80 mm			
Modelo #15 – Dados Básicos (1/1)			
Tipo de Experimento	Título: Confraplus 60 (POL) / H ₁ =80 mm		
Estudo Paramétrico	Autor(es): Santos, L. M. C.	Ano: 2019	
Detalhamento			
Chapa de Aço	Concreto	Barras de Aço	
Geometria: Trapezoidal Espessura (mm): 1.25 Classe do aço: S350	Densidade: Convencional Classe: C20/25 Umidade: 3.0%	Varões	Grelha de Reforço
		Descrição: Ø6//150 Classe do aço: S500	Descrição: 3Ø10 Classe do aço: S500
Secção Transversal			
Secção Longitudinal			
Modelo de Elementos Finitos			

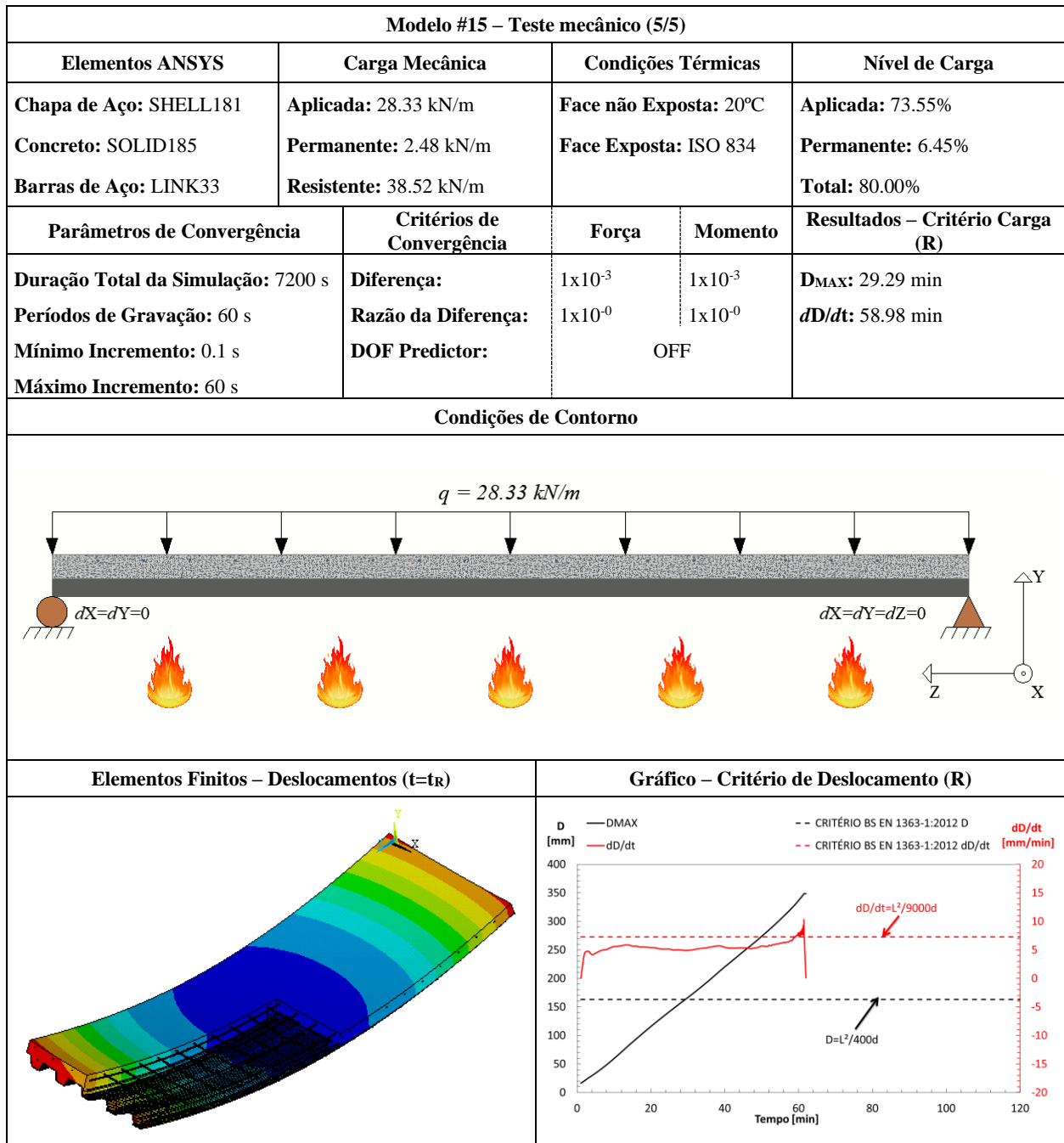
Modelo #15– Teste térmico (1/1)				
Elementos ANSYS	Coef. de Convecção (α_c)	Curvas de Temperatura	Fator de Vista (Φ)	Emissividade (ϵ)
Chapa de Aço: SHELL131 Concreto: SOLID70 Barras de Aço: LINK33	Sup. Exposta: 25 W/m ² K Sup. Ñ Exposta: 9 W/m ² K	Face não Exposta: 20°C Face Exposta: ISO 834	Flange Superior: 0.73 Alma: 0.56 Flange Inferior: 1.00	Chapa de Aço: 0.7 Concreto: 0.7 Barras de Aço: 0.7
Parâmetros de Convergência		Critérios de Convergência – Heat Flux		Resultados - Critério Isolamento (I)
Duração Total da Simulação: 7200 s Períodos de Gravação: 60 s Mínimo Incremento: 1 s Máximo Incremento: 60 s		Diferença: 1x10 ⁻³ Razão da Diferença: 1x10 ⁻⁶		T _{MAX} : 76.80 min T _{MED} : 71.70 min
Condições de Contorno			Elementos Finitos – Temperaturas (t=t ₁)	
Gráfico – Critério de Isolamento (I)			Gráfico de Temperaturas na Secção da Laje	





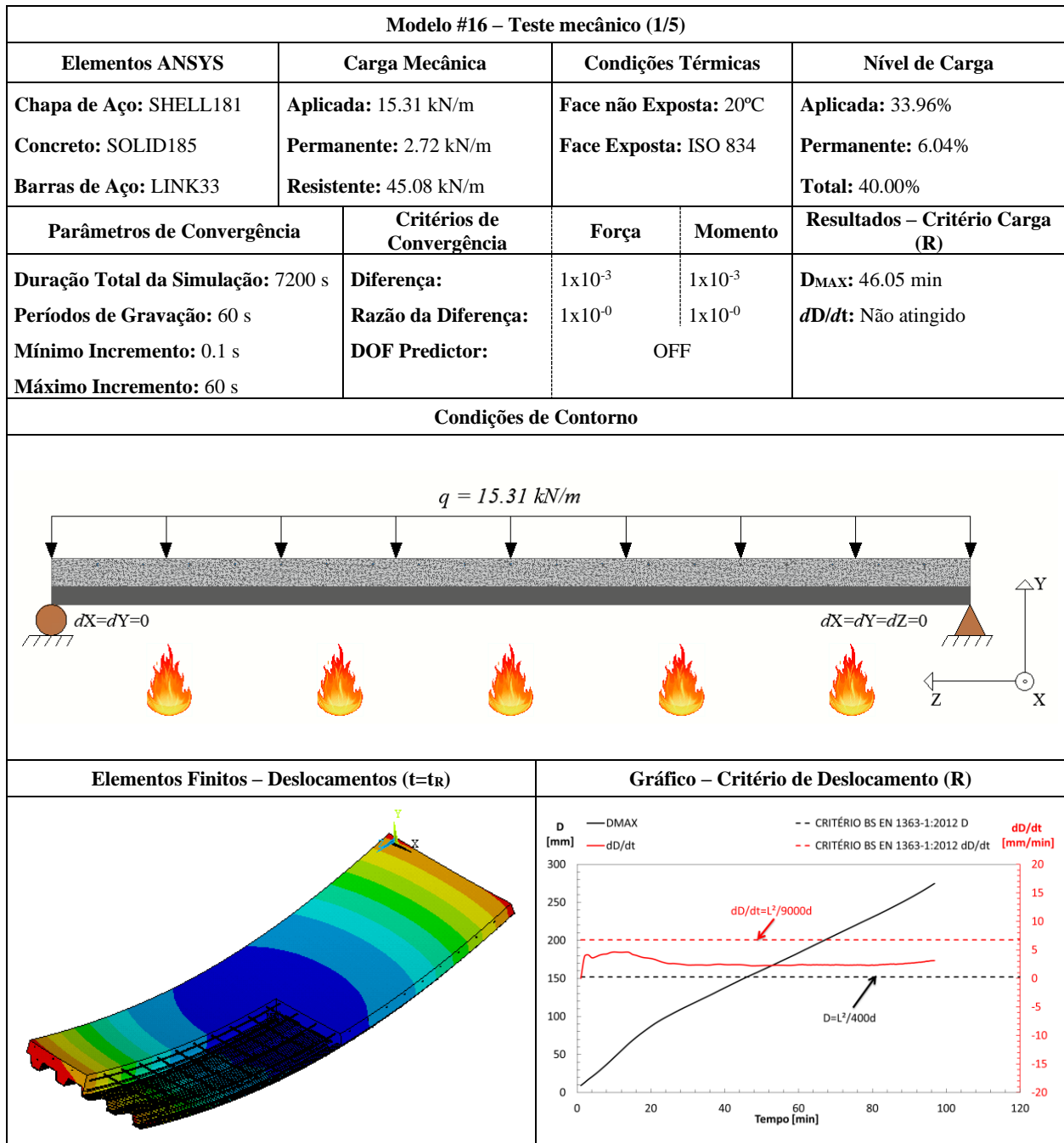


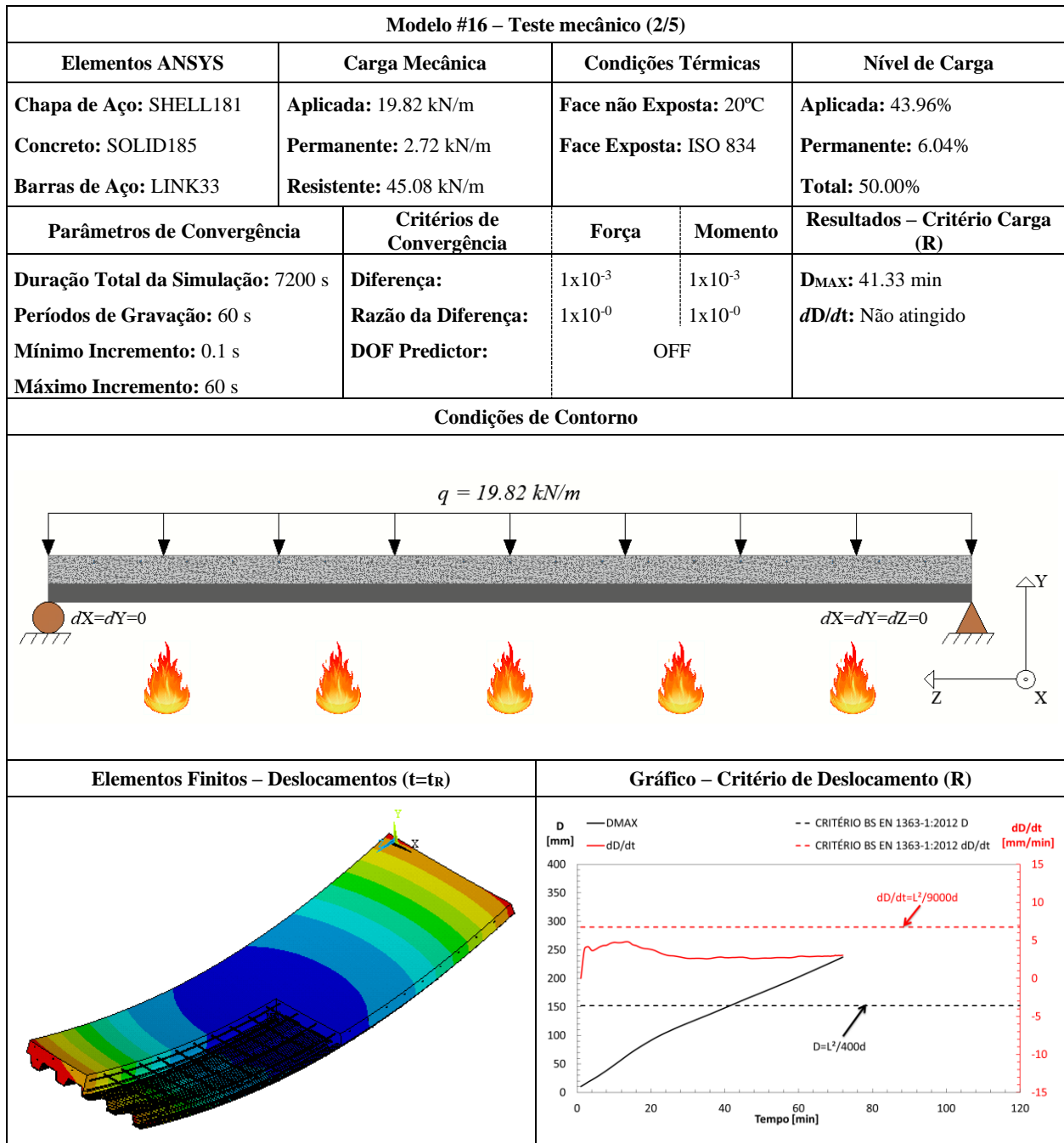


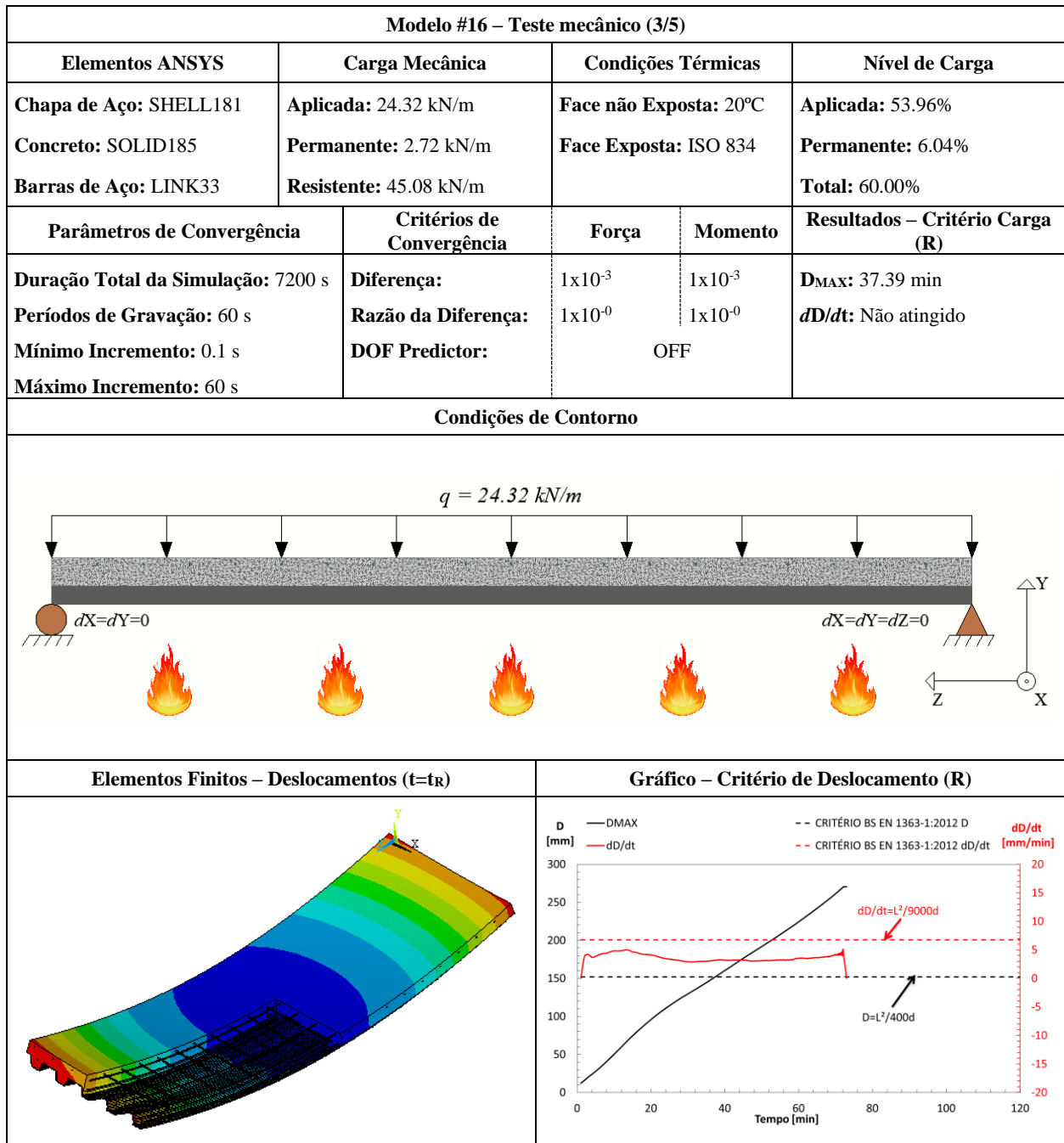


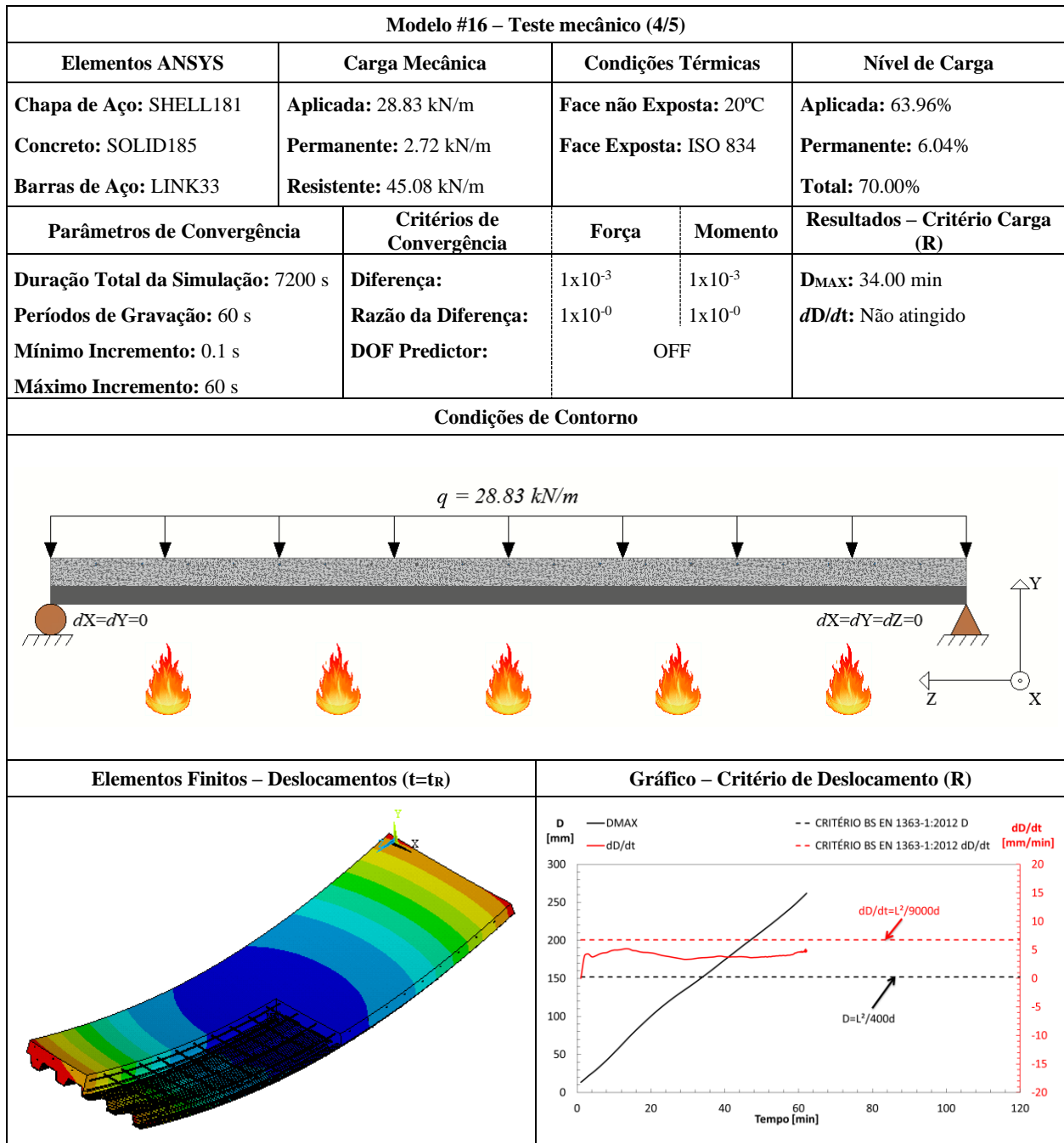
FICHA TÉCNICA			
Modelo #16 – Confraplus 60 – 90 mm			
Modelo #16 – Dados Básicos (1/1)			
Tipo de Experimento	Título: Confraplus 60 (POL) / H ₁ =90 mm		
Estudo Paramétrico	Autor(es): Santos, L. M. C.	Ano: 2019	
Detalhamento			
Chapa de Aço	Concreto	Barras de Aço	
Geometria: Trapezoidal Espessura (mm): 1.25 Classe do aço: S350	Densidade: Convencional Classe: C20/25 Umidade: 3.0%	Varões	Grelha de Reforço
		Descrição: Ø6//150 Classe do aço: S500	Descrição: 3Ø10 Classe do aço: S500
Secção Transversal			
Secção Longitudinal			
Modelo de Elementos Finitos			

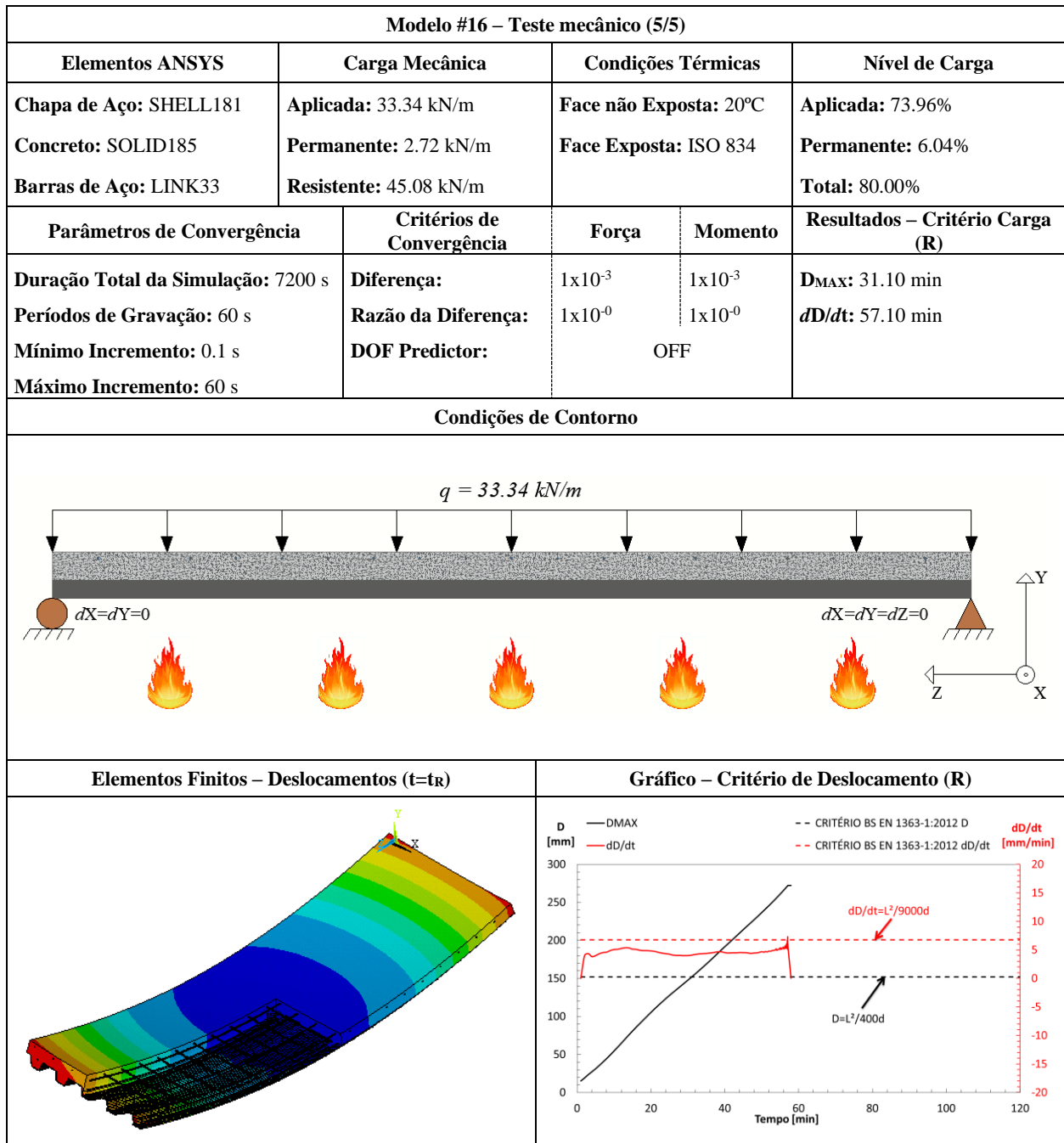
Modelo #16– Teste térmico (1/1)				
Elementos ANSYS	Coef. de Convecção (α_c)	Curvas de Temperatura	Fator de Vista (Φ)	Emissividade (ϵ)
Chapa de Aço: SHELL131 Concreto: SOLID70 Barras de Aço: LINK33	Sup. Exposta: 25 W/m ² K Sup. Ñ Exposta: 9 W/m ² K	Face não Exposta: 20°C Face Exposta: ISO 834	Flange Superior: 0.73 Alma: 0.56 Flange Inferior: 1.00	Chapa de Aço: 0.7 Concreto: 0.7 Barras de Aço: 0.7
Parâmetros de Convergência		Critérios de Convergência – Heat Flux		Resultados - Critério Isolamento (I)
Duração Total da Simulação: 7200 s Períodos de Gravação: 60 s Mínimo Incremento: 1 s Máximo Incremento: 60 s		Diferença: 1x10 ⁻³ Razão da Diferença: 1x10 ⁻⁶		T _{MAX} : 93.81 min T _{MED} : 85.62 min
Condições de Contorno			Elementos Finitos – Temperaturas (t=t _i)	
Gráfico – Critério de Isolamento (I)			Gráfico de Temperaturas na Secção da Laje	











FICHA TÉCNICA			
Modelo #17 – Confraplus 60 – 100 mm			
Modelo #17 – Dados Básicos (1/1)			
Tipo de Experimento	Título: Confraplus 60 (POL) / H ₁ =100 mm		
Estudo Paramétrico	Autor(es): Santos, L. M. C.	Ano: 2019	
Detalhamento			
Chapa de Aço	Concreto	Barras de Aço	
Geometria: Trapezoidal Espessura (mm): 1.25 Classe do aço: S350	Densidade: Convencional Classe: C20/25 Umidade: 3.0%	Varões	Grelha de Reforço
		Descrição: Ø6//150 Classe do aço: S500	Descrição: 3Ø10 Classe do aço: S500
Secção Transversal			
Secção Longitudinal			
Modelo de Elementos Finitos			

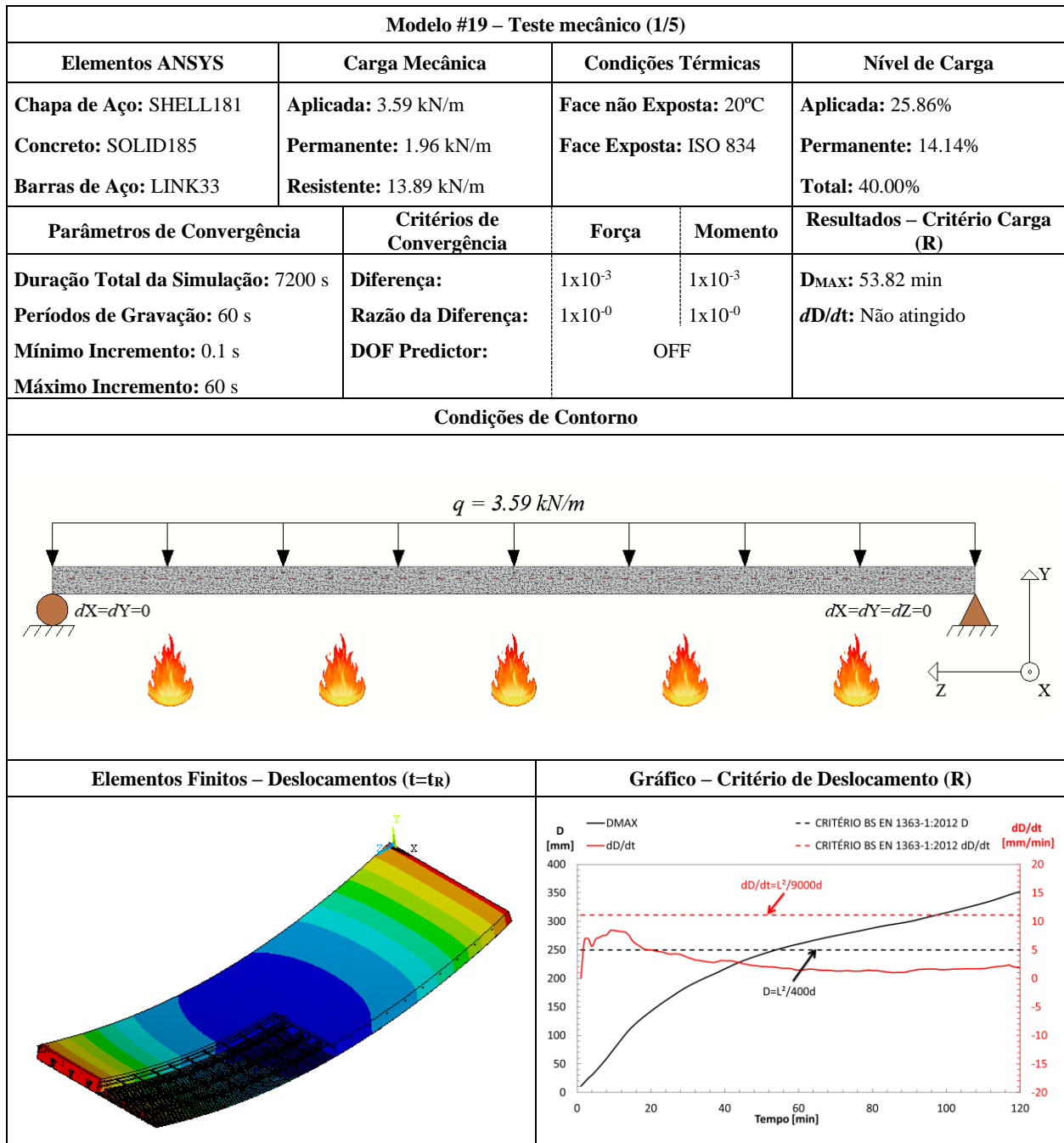
Modelo #17– Teste térmico (1/1)				
Elementos ANSYS	Coef. de Convecção (α_c)	Curvas de Temperatura	Fator de Vista (Φ)	Emissividade (ϵ)
Chapa de Aço: SHELL131 Concreto: SOLID70 Barras de Aço: LINK33	Sup. Exposta: 25 W/m ² K Sup. Ñ Exposta: 9 W/m ² K	Face não Exposta: 20°C Face Exposta: ISO 834	Flange Superior: 0.73 Alma: 0.56 Flange Inferior: 1.00	Chapa de Aço: 0.7 Concreto: 0.7 Barras de Aço: 0.7
Parâmetros de Convergência		Critérios de Convergência – Heat Flux		Resultados - Critério Isolamento (I)
Duração Total da Simulação: 7200 s Períodos de Gravação: 60 s Mínimo Incremento: 1 s Máximo Incremento: 60 s		Diferença: 1x10 ⁻³ Razão da Diferença: 1x10 ⁻⁶		T _{MAX} : 112.45 min T _{MED} : 100.86 min
Condições de Contorno			Elementos Finitos – Temperaturas (t=t _i)	
Gráfico – Critério de Isolamento (I)			Gráfico de Temperaturas na Secção da Laje	

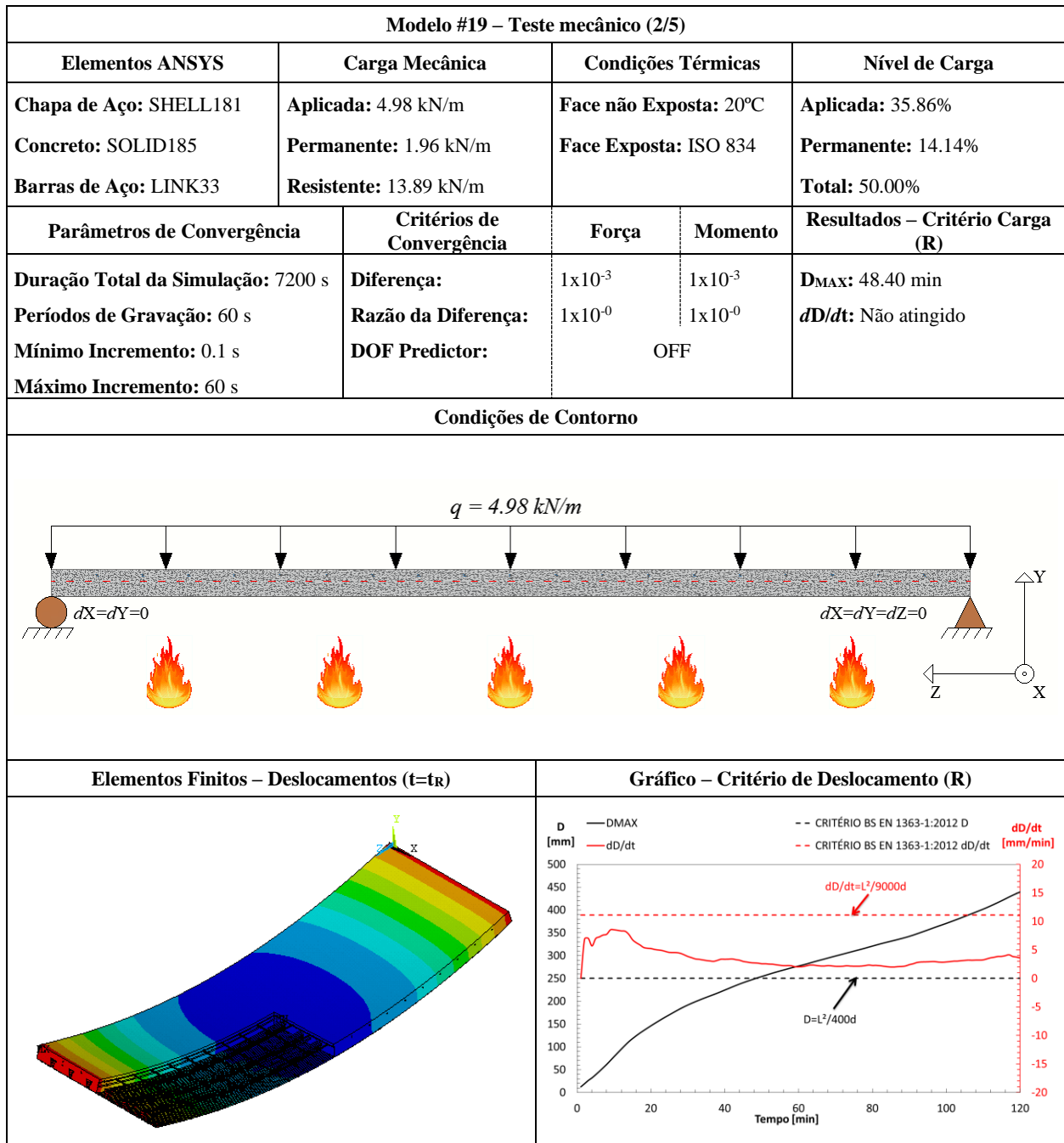
FICHA TÉCNICA			
Modelo #18 – Confraplus 60 – 110 mm			
Modelo #18 – Dados Básicos (1/1)			
Tipo de Experimento	Título: Confraplus 60 (POL) / H ₁ =110 mm		
Estudo Paramétrico	Autor(es): Santos, L. M. C.	Ano: 2019	
Detalhamento			
Chapa de Aço	Concreto	Barras de Aço	
Geometria: Trapezoidal Espessura (mm): 1.25 Classe do aço: S350	Densidade: Convencional Classe: C20/25 Umidade: 3.0%	Varões	Grelha de Reforço
		Descrição: Ø6//150 Classe do aço: S500	Descrição: 3Ø10 Classe do aço: S500
Secção Transversal			
Secção Longitudinal			
Modelo de Elementos Finitos			

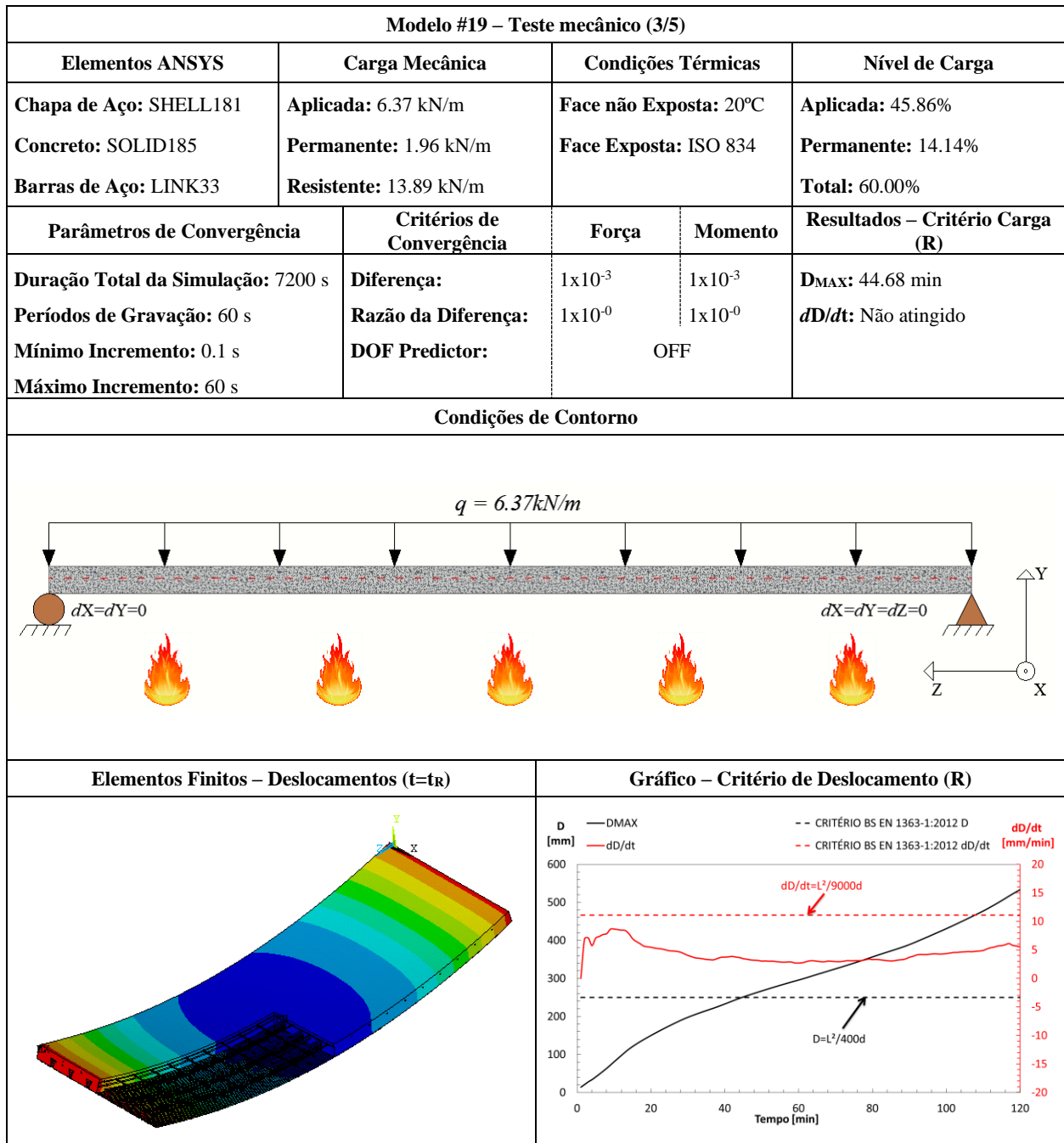
Modelo #18– Teste térmico (1/1)				
Elementos ANSYS	Coef. de Convecção (α_c)	Curvas de Temperatura	Fator de Vista (Φ)	Emissividade (ϵ)
Chapa de Aço: SHELL131 Concreto: SOLID70 Barras de Aço: LINK33	Sup. Exposta: 25 W/m ² K Sup. Ñ Exposta: 9 W/m ² K	Face não Exposta: 20°C Face Exposta: ISO 834	Flange Superior: 0.73 Alma: 0.56 Flange Inferior: 1.00	Chapa de Aço: 0.7 Concreto: 0.7 Barras de Aço: 0.7
Parâmetros de Convergência		Critérios de Convergência – Heat Flux		Resultados - Critério Isolamento (I)
Duração Total da Simulação: 7200 s Períodos de Gravação: 60 s Mínimo Incremento: 1 s Máximo Incremento: 60 s		Diferença: 1x10 ⁻³ Razão da Diferença: 1x10 ⁻⁶		T _{MAX} : 117.47 min T _{MED} : Não atingido
Condições de Contorno			Elementos Finitos – Temperaturas (t=t _f)	
Gráfico – Critério de Isolamento (I)			Gráfico de Temperaturas na Secção da Laje	

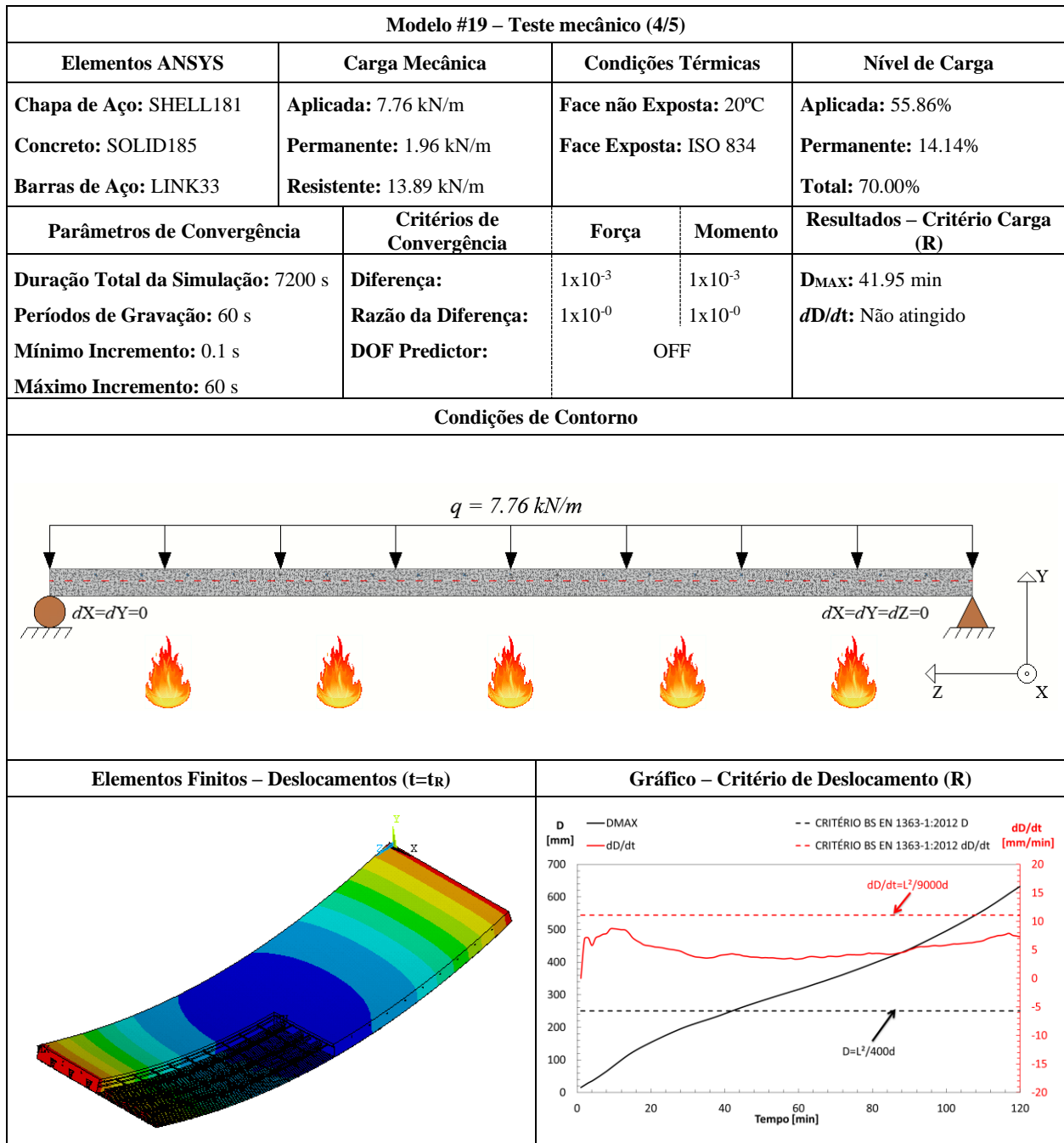
FICHA TÉCNICA		
Modelo #19 – Multideck 50 – 40 mm		
Modelo #19 – Dados Básicos (1/1)		
Tipo de Experimento	Título: Multideck 50 (UK) / H ₁ =40 mm	
Estudo Paramétrico	Autor(es): Santos, L. M. C.	Ano: 2019
Detalhamento		
Chapa de Aço	Concreto	Barras de Aço
Geometria: Reentrante Espessura (mm): 1.00 Classe do aço: S450	Densidade: Convencional Classe: C20/25 Umidade: 3.0%	Varões
		Grelha de Reforço
		Descrição: Ø6//150
		Descrição: 3Ø10
		Classe do aço: S500
		Classe do aço: S500
Secção Transversal		
Secção Longitudinal		
Modelo de Elementos Finitos		

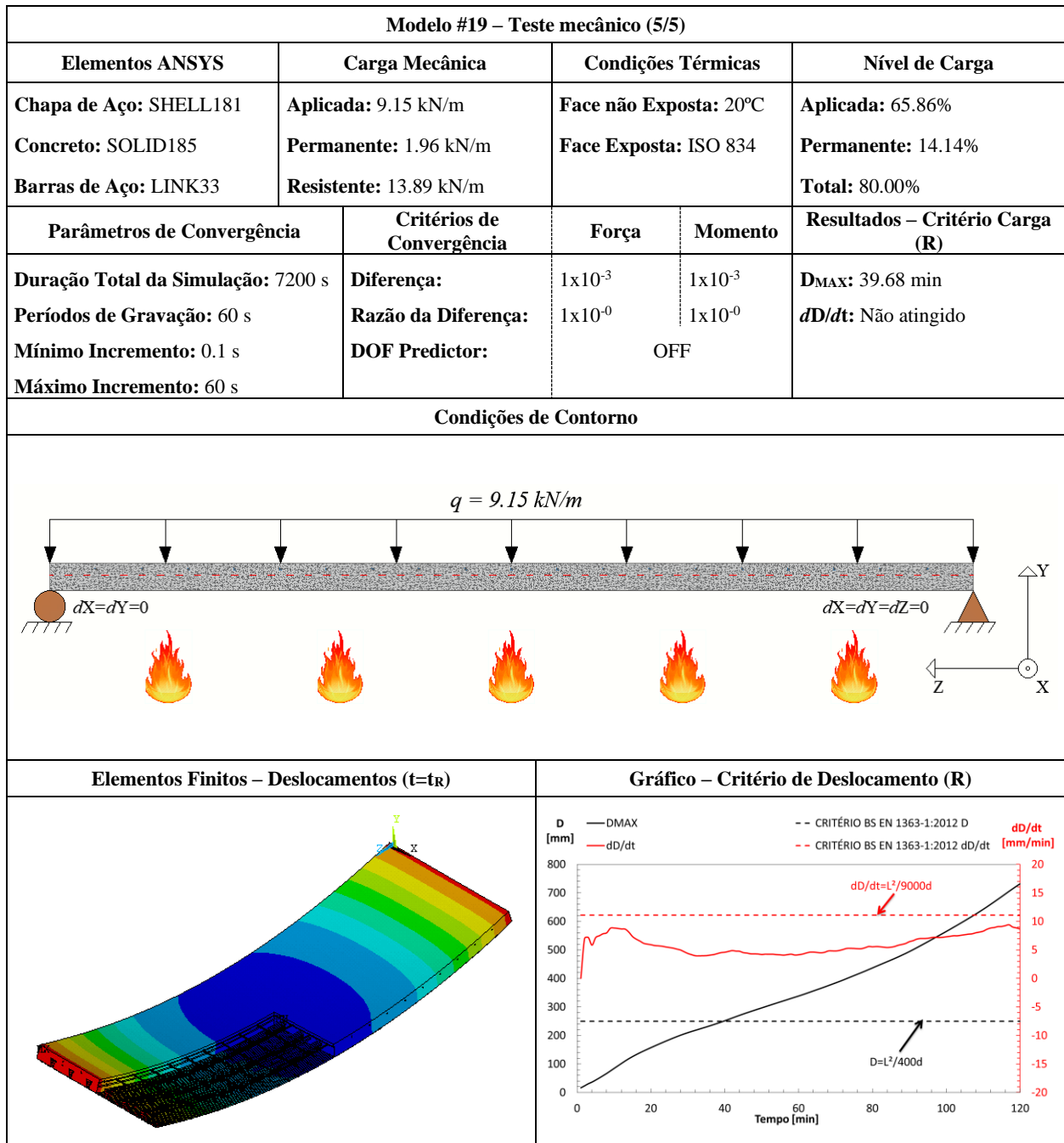
Modelo #19– Teste térmico (1/1)				
Elementos ANSYS	Coef. de Convecção (α_c)	Curvas de Temperatura	Fator de Vista (Φ)	Emissividade (ϵ)
Chapa de Aço: SHELL131 Concreto: SOLID70 Barras de Aço: LINK33	Sup. Exposta: 25 W/m ² K Sup. Ñ Exposta: 9 W/m ² K	Face não Exposta: 20°C Face Exposta: ISO 834	Flange Superior: 0.14 Alma: 0.09 Flange Inferior: 1.00	Chapa de Aço: 0.7 Concreto: 0.7 Barras de Aço: 0.7
Parâmetros de Convergência		Critérios de Convergência – Heat Flux		Resultados - Critério Isolamento (I)
Duração Total da Simulação: 7200 s Períodos de Gravação: 60 s Mínimo Incremento: 1 s Máximo Incremento: 60 s		Diferença: 1x10 ⁻³ Razão da Diferença: 1x10 ⁻⁶		T _{MAX} : 43.71 min T _{MED} : 45.97 min
Condições de Contorno			Elementos Finitos – Temperaturas (t=t _i)	
Gráfico – Critério de Isolamento (I)			Gráfico de Temperaturas na Secção da Laje	





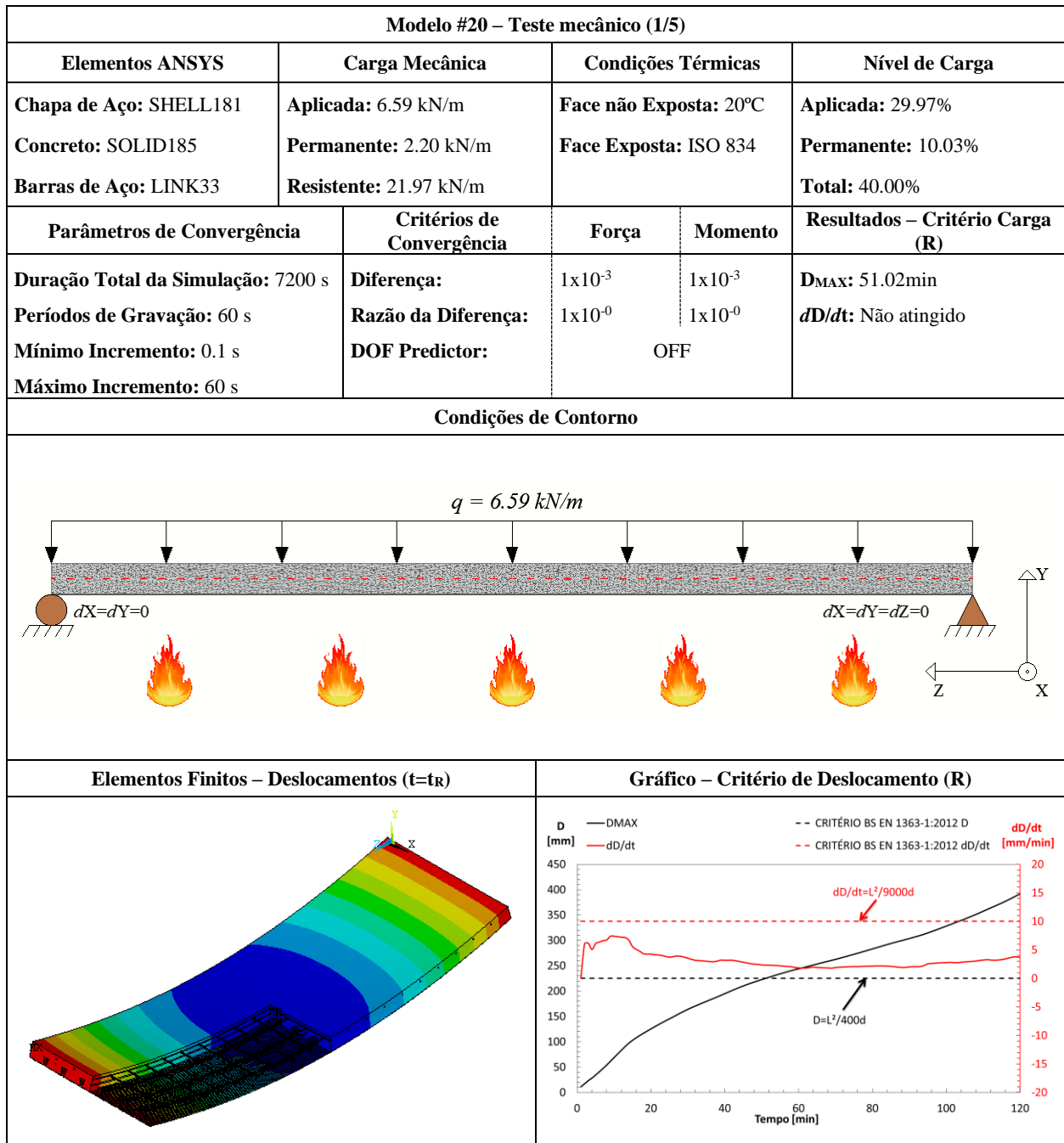


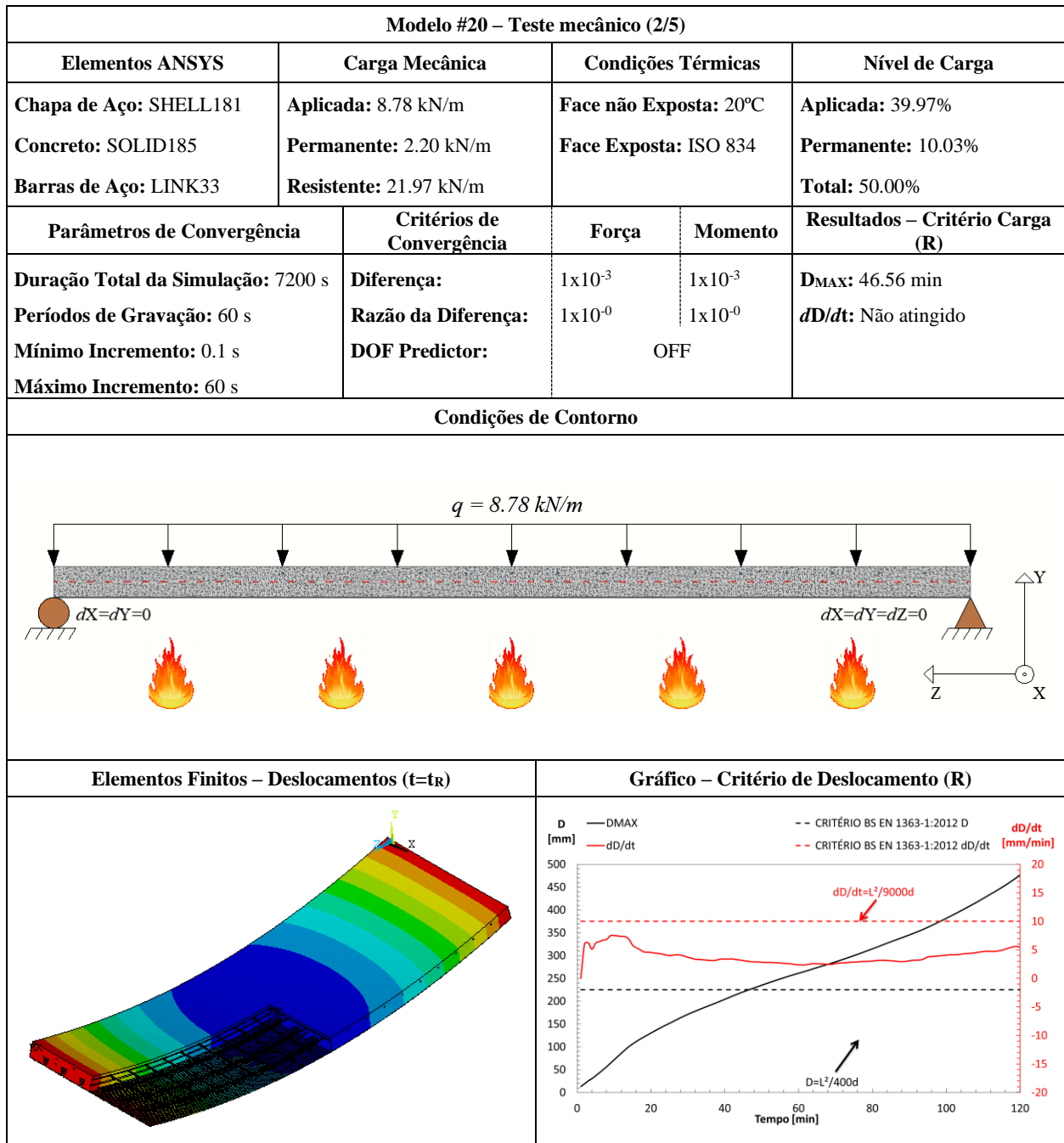


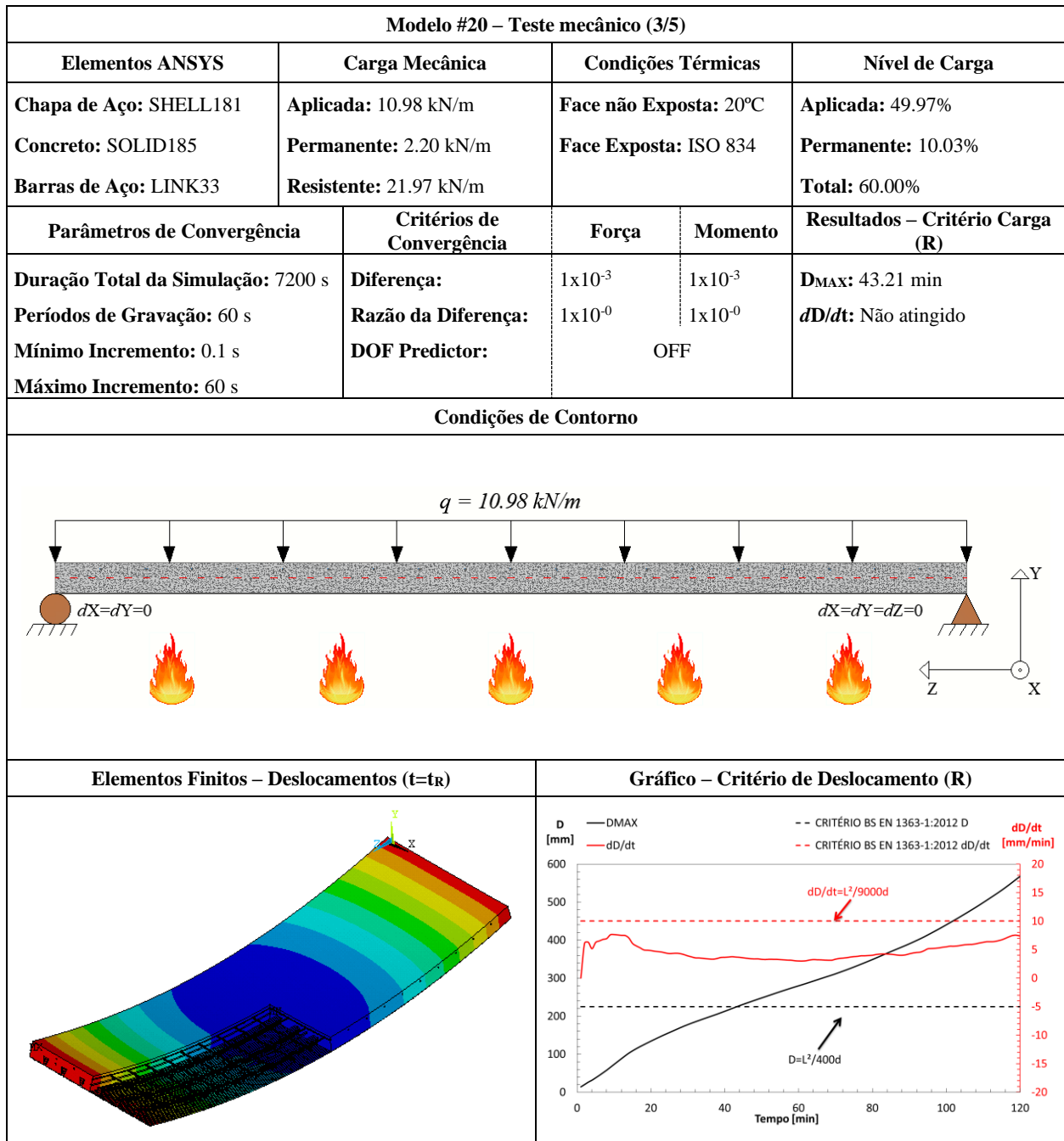


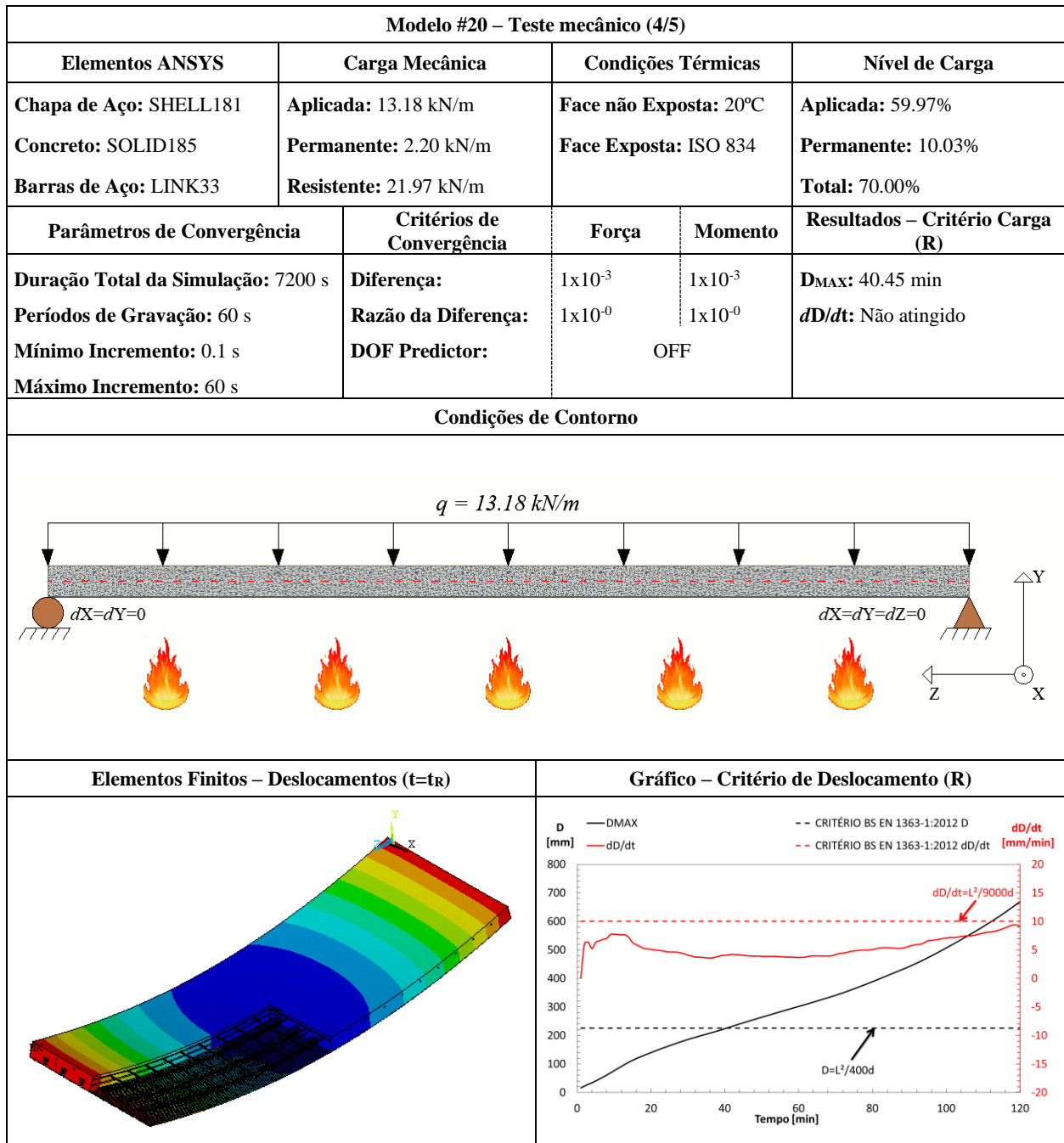
FICHA TÉCNICA			
Modelo #20 – Multideck 50 – 50 mm			
Modelo #20 – Dados Básicos (1/1)			
Tipo de Experimento	Título: Multideck 50 (UK) / H ₁ =50 mm		
Estudo Paramétrico	Autor(es): Santos, L. M. C.	Ano: 2019	
Detalhamento			
Chapa de Aço	Concreto	Barras de Aço	
Geometria: Reentrante Espessura (mm): 1.00 Classe do aço: S450	Densidade: Convencional Classe: C20/25 Umidade: 3.0%	Varões	Grelha de Reforço
		Descrição: Ø6//150	Descrição: 3Ø10
		Classe do aço: S500	Classe do aço: S500
Secção Transversal			
Secção Longitudinal			
Modelo de Elementos Finitos			

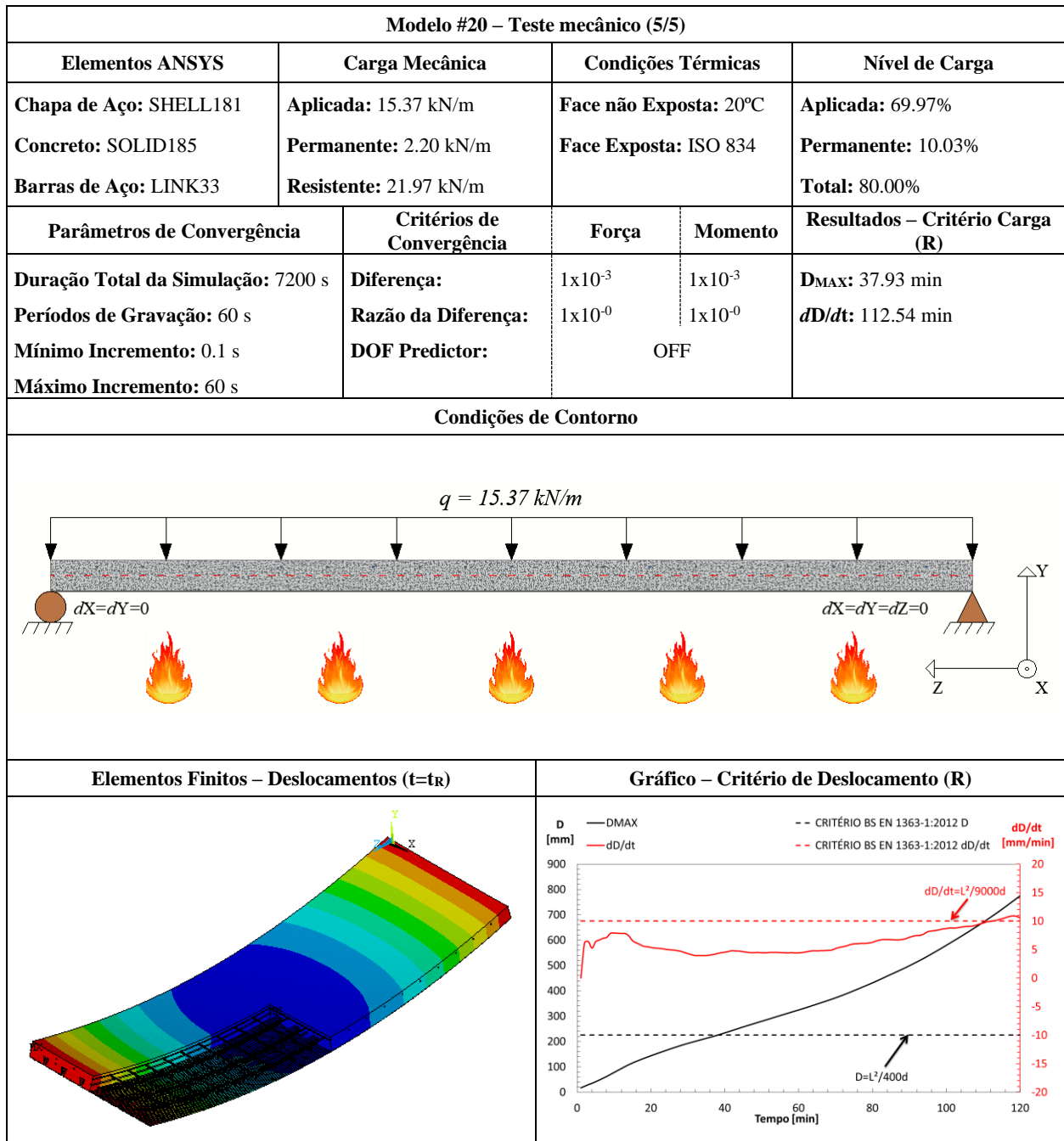
Modelo #20– Teste térmico (1/1)				
Elementos ANSYS	Coef. de Convecção (α_c)	Curvas de Temperatura	Fator de Vista (Φ)	Emissividade (ϵ)
Chapa de Aço: SHELL131 Concreto: SOLID70 Barras de Aço: LINK33	Sup. Exposta: 25 W/m ² K Sup. Ñ Exposta: 9 W/m ² K	Face não Exposta: 20°C Face Exposta: ISO 834	Flange Superior: 0.14 Alma: 0.09 Flange Inferior: 1.00	Chapa de Aço: 0.7 Concreto: 0.7 Barras de Aço: 0.7
Parâmetros de Convergência		Critérios de Convergência – Heat Flux		Resultados - Critério Isolamento (I)
Duração Total da Simulação: 7200 s Períodos de Gravação: 60 s Mínimo Incremento: 1 s Máximo Incremento: 60 s		Diferença: 1x10 ⁻³ Razão da Diferença: 1x10 ⁻⁶		T _{MAX} : 57.21 min T _{MED} : 56.21 min
Condições de Contorno			Elementos Finitos – Temperaturas (t=t _i)	
Gráfico – Critério de Isolamento (I)			Gráfico de Temperaturas na Secção da Laje	





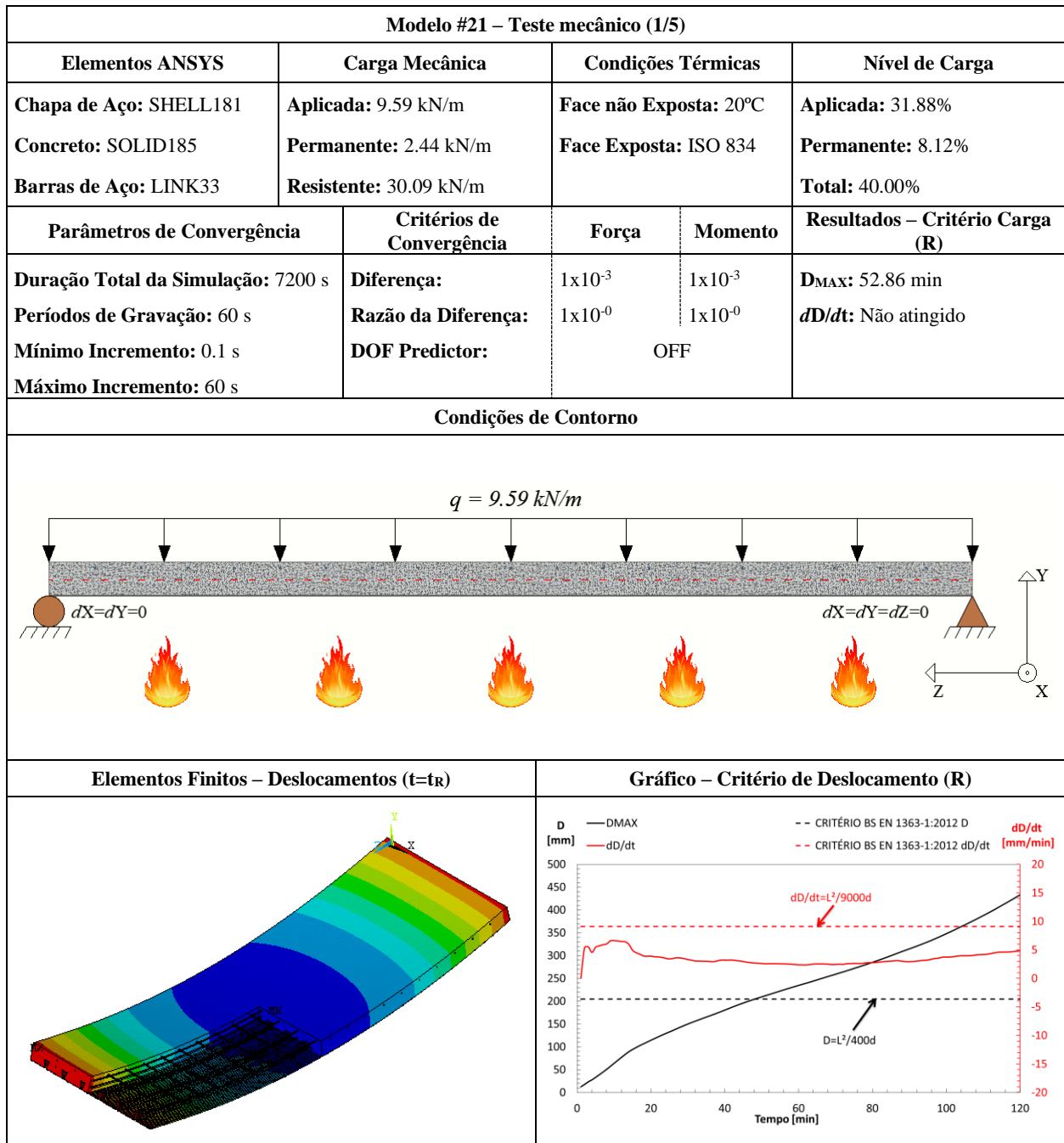


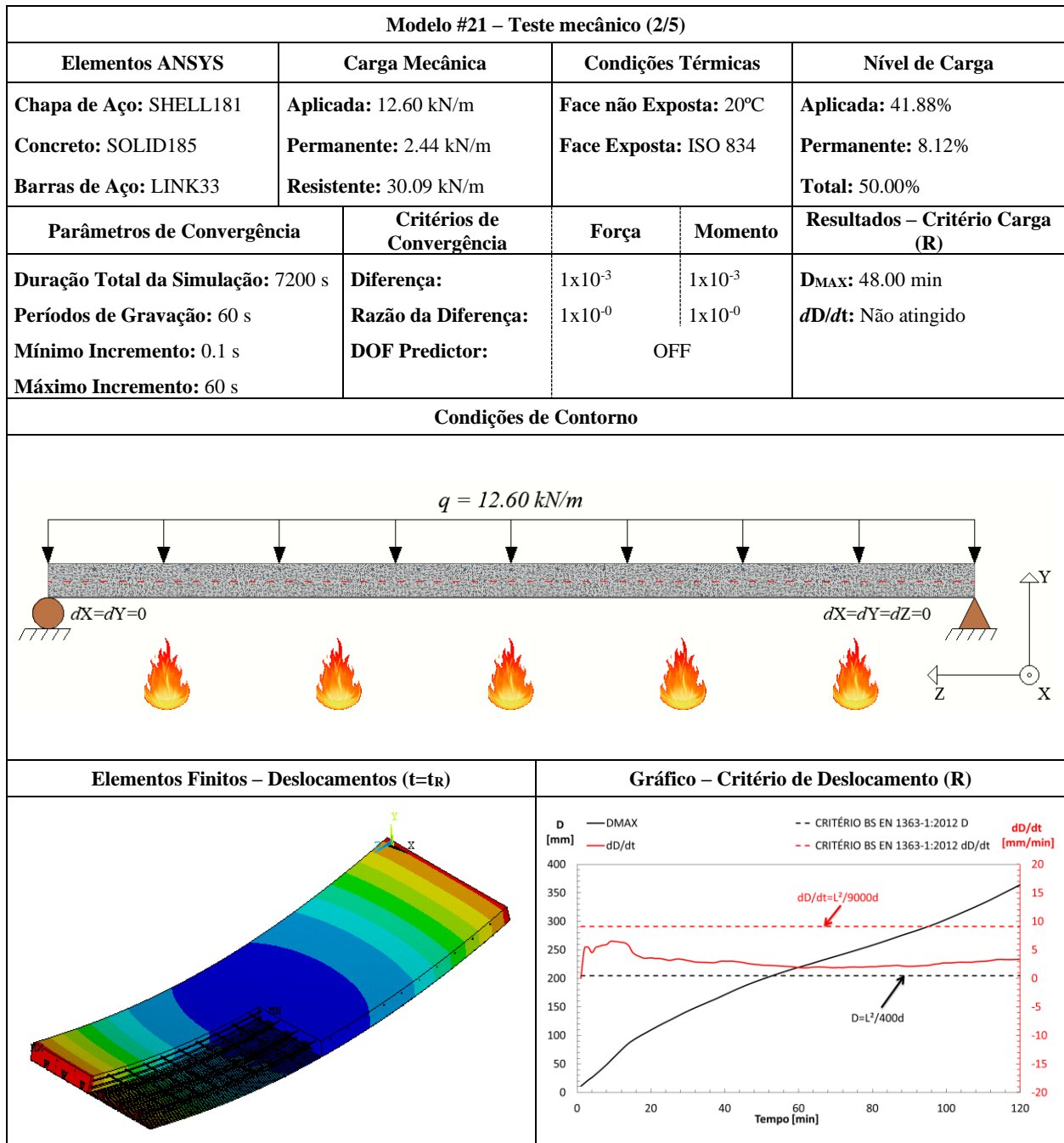


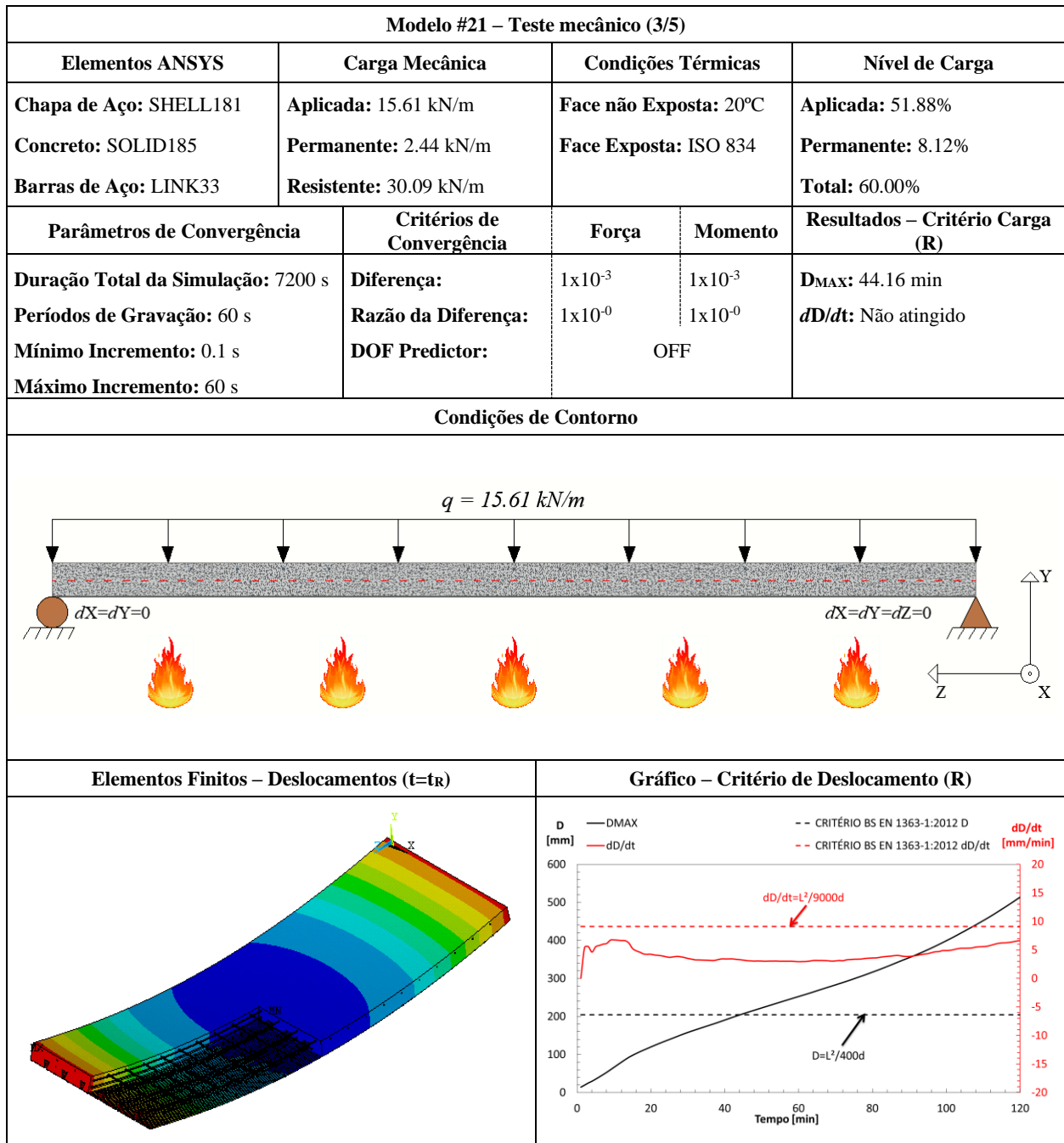


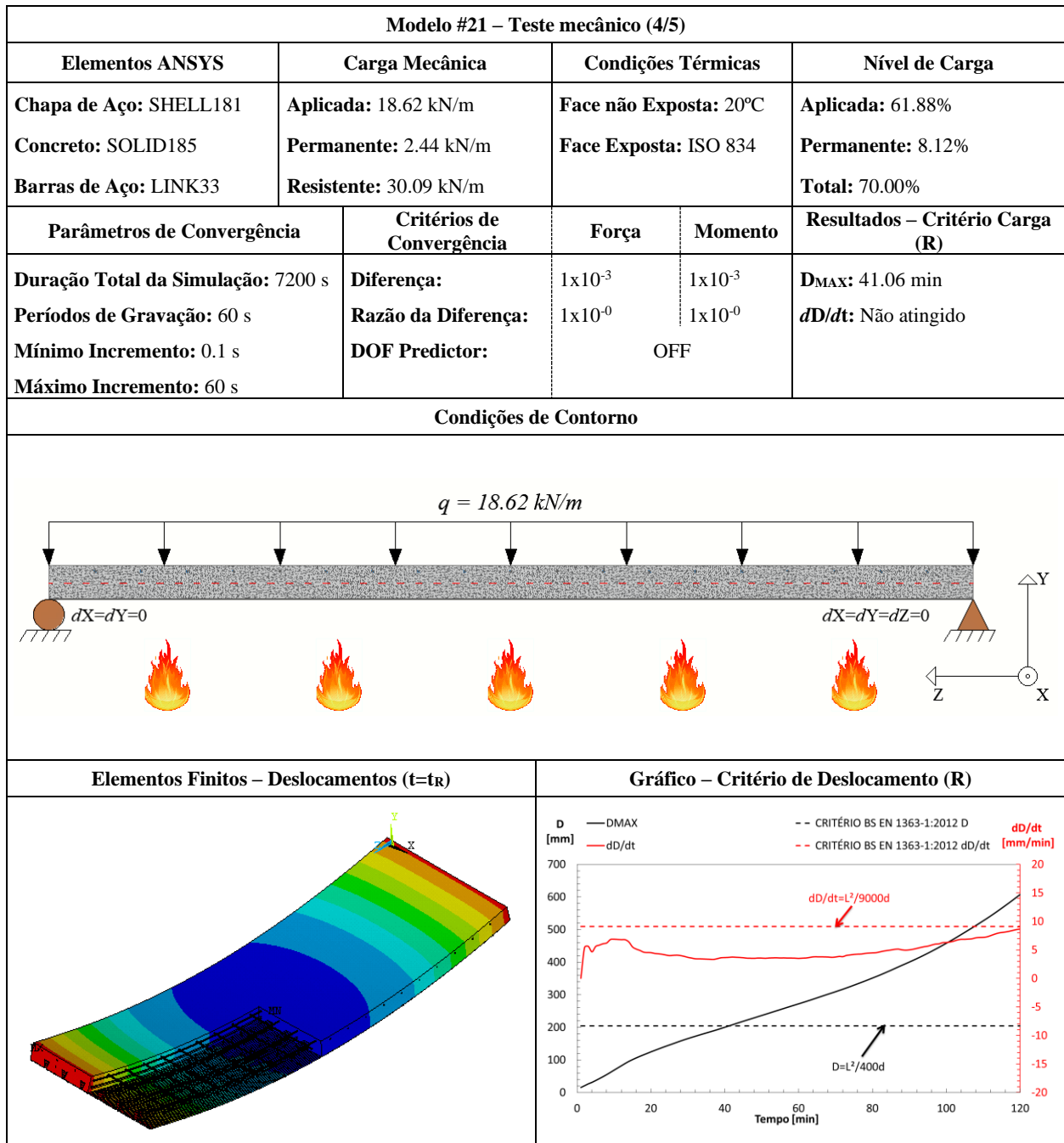
FICHA TÉCNICA			
Modelo #21 – Multideck 50 – 60 mm			
Modelo #21 – Dados Básicos (1/1)			
Tipo de Experimento	Título: Multideck 50 (UK) / H ₁ =60 mm		
Estudo Paramétrico	Autor(es): Santos, L. M. C.	Ano: 2019	
Detalhamento			
Chapa de Aço	Concreto	Barras de Aço	
Geometria: Reentrante Espessura (mm): 1.00 Classe do aço: S450	Densidade: Convencional Classe: C20/25 Umidade: 3.0%	Varões	Grelha de Reforço
		Descrição: Ø6//150	Descrição: 3Ø10
	Classe do aço: S500	Classe do aço: S500	
Secção Transversal			
Secção Longitudinal			
Modelo de Elementos Finitos			

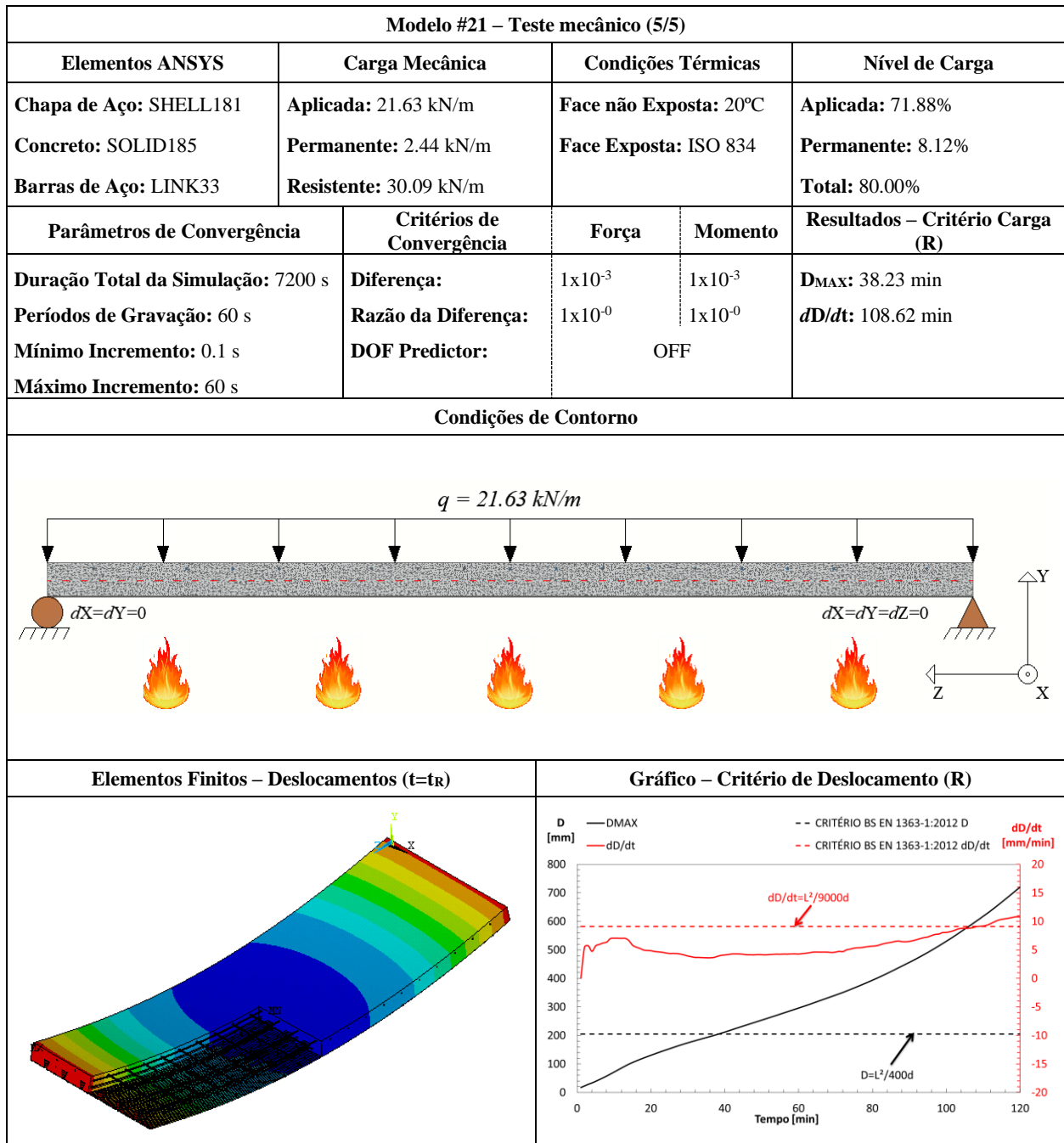
Modelo #21– Teste térmico (1/1)				
Elementos ANSYS	Coef. de Convecção (α_c)	Curvas de Temperatura	Fator de Vista (Φ)	Emissividade (ϵ)
Chapa de Aço: SHELL131 Concreto: SOLID70 Barras de Aço: LINK33	Sup. Exposta: 25 W/m ² K Sup. Ñ Exposta: 9 W/m ² K	Face não Exposta: 20°C Face Exposta: ISO 834	Flange Superior: 0.14 Alma: 0.09 Flange Inferior: 1.00	Chapa de Aço: 0.7 Concreto: 0.7 Barras de Aço: 0.7
Parâmetros de Convergência		Critérios de Convergência – Heat Flux		Resultados - Critério Isolamento (I)
Duração Total da Simulação: 7200 s Períodos de Gravação: 60 s Mínimo Incremento: 1 s Máximo Incremento: 60 s		Diferença: 1x10 ⁻³ Razão da Diferença: 1x10 ⁻⁶		T _{MAX} : 71.98 min T _{MED} : 67.63 min
Condições de Contorno			Elementos Finitos – Temperaturas (t=t _i)	
Gráfico – Critério de Isolamento (I)			Gráfico de Temperaturas na Secção da Laje	





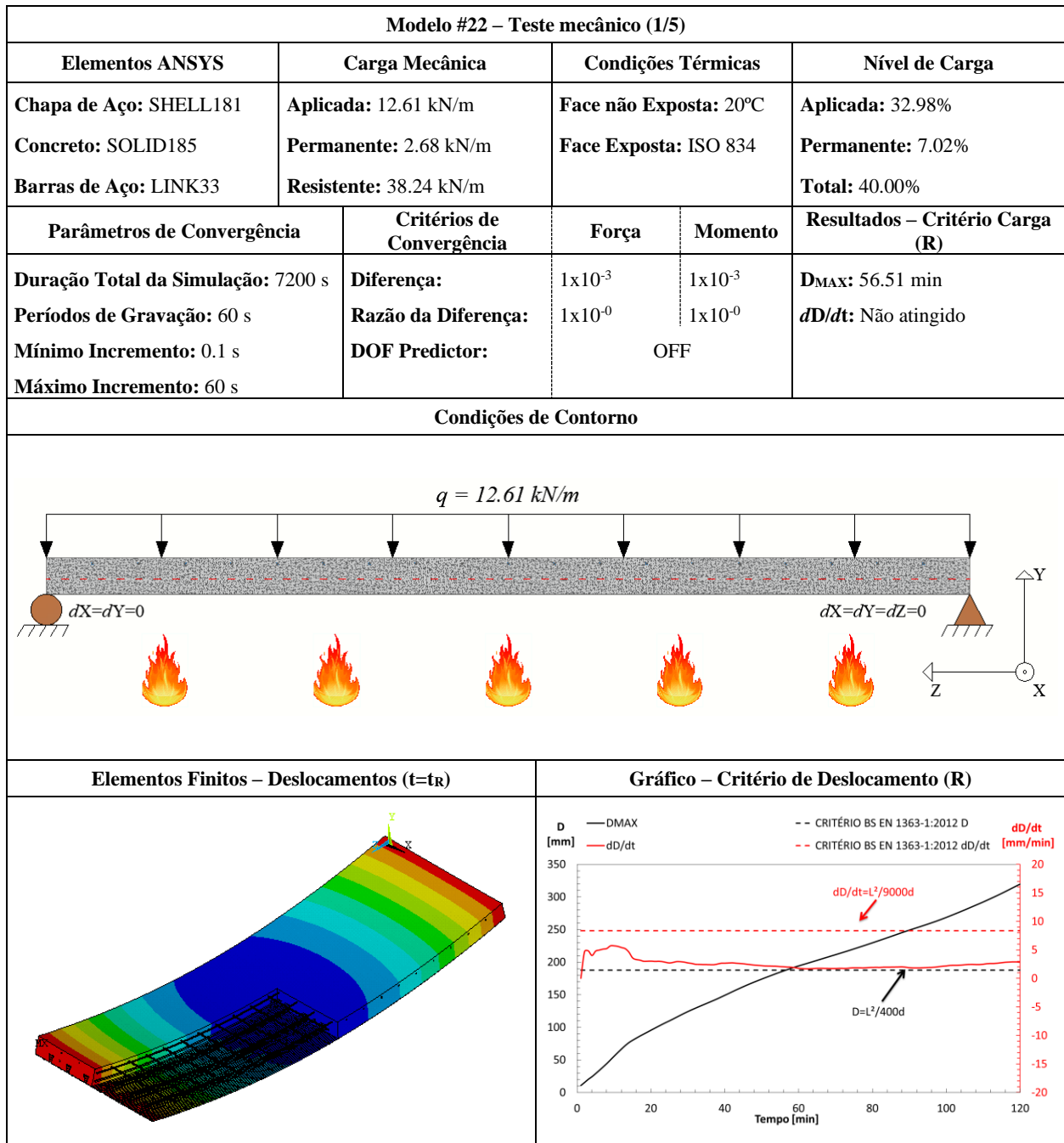


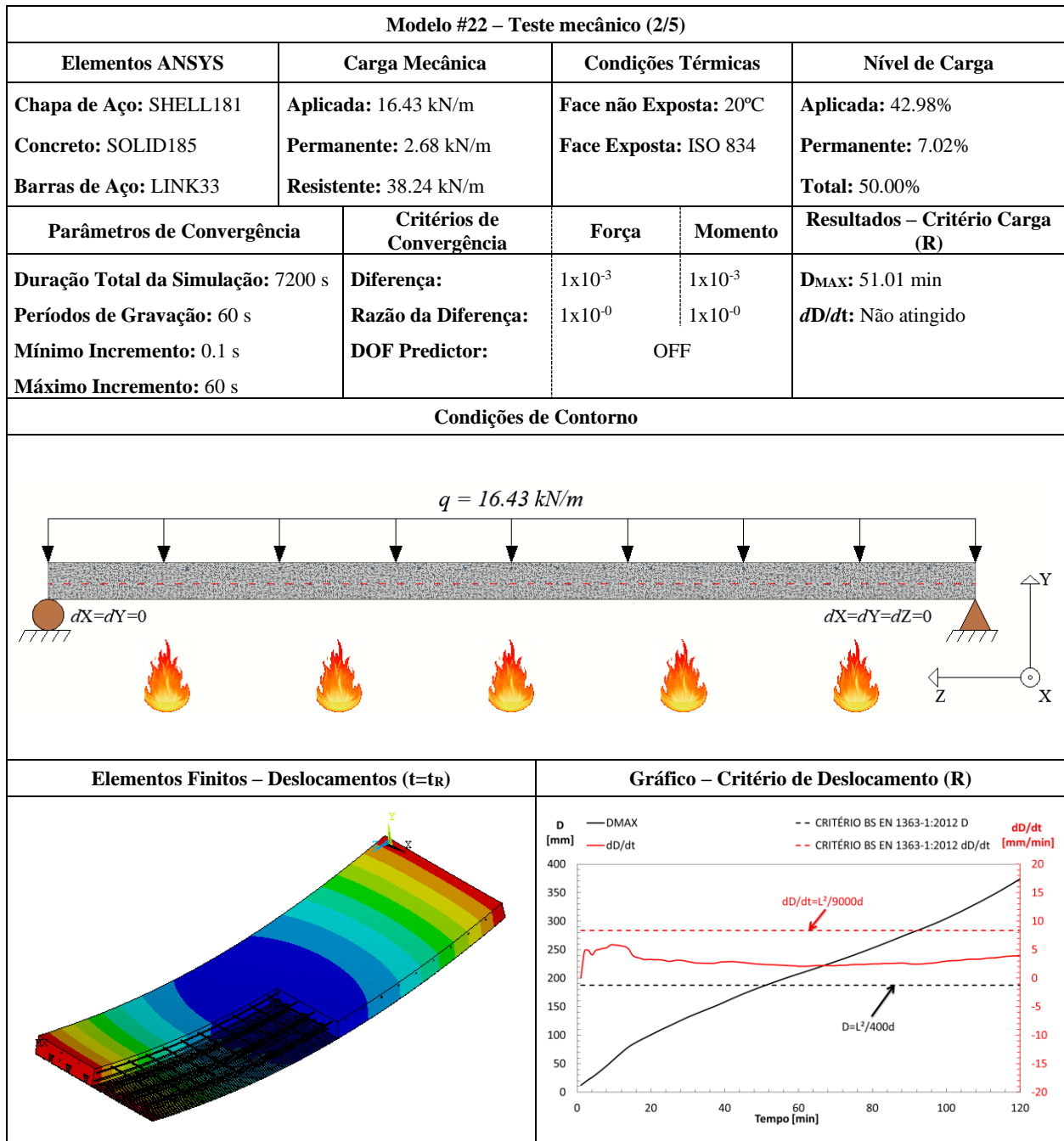


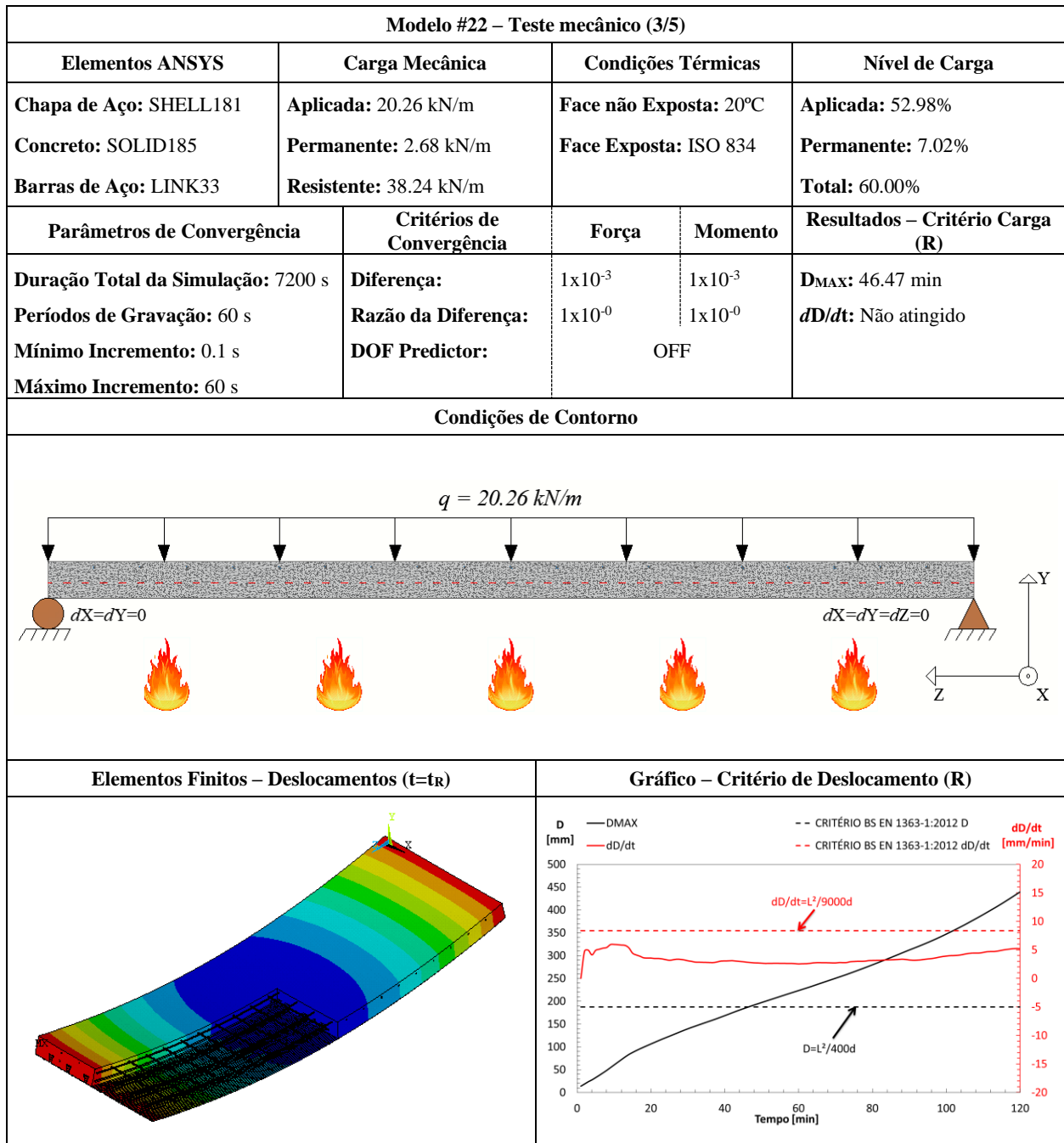


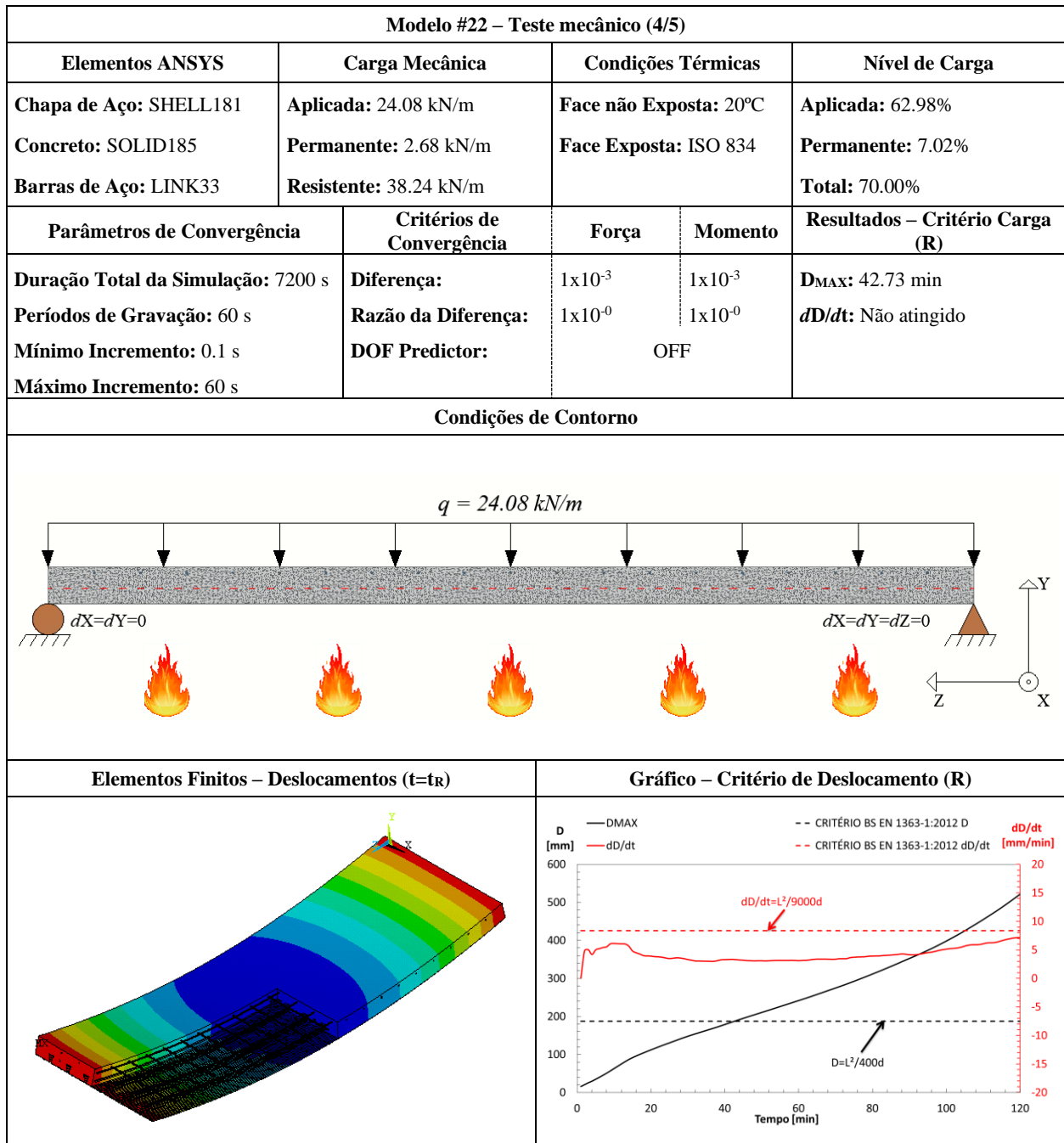
FICHA TÉCNICA			
Modelo #22 – Multideck 50 – 70 mm			
Modelo #22 – Dados Básicos (1/1)			
Tipo de Experimento	Título: Multideck 50 (UK) / H ₁ =70 mm		
Estudo Paramétrico	Autor(es): Santos, L. M. C.		Ano: 2019
Detalhamento			
Chapa de Aço	Concreto	Barras de Aço	
Geometria: Reentrante Espessura (mm): 1.00 Classe do aço: S450	Densidade: Convencional Classe: C20/25 Umidade: 3.0%	Varões	Grelha de Reforço
		Descrição: Ø6//150 Classe do aço: S500	Descrição: 3Ø10 Classe do aço: S500
Secção Transversal			
Secção Longitudinal			
Modelo de Elementos Finitos			

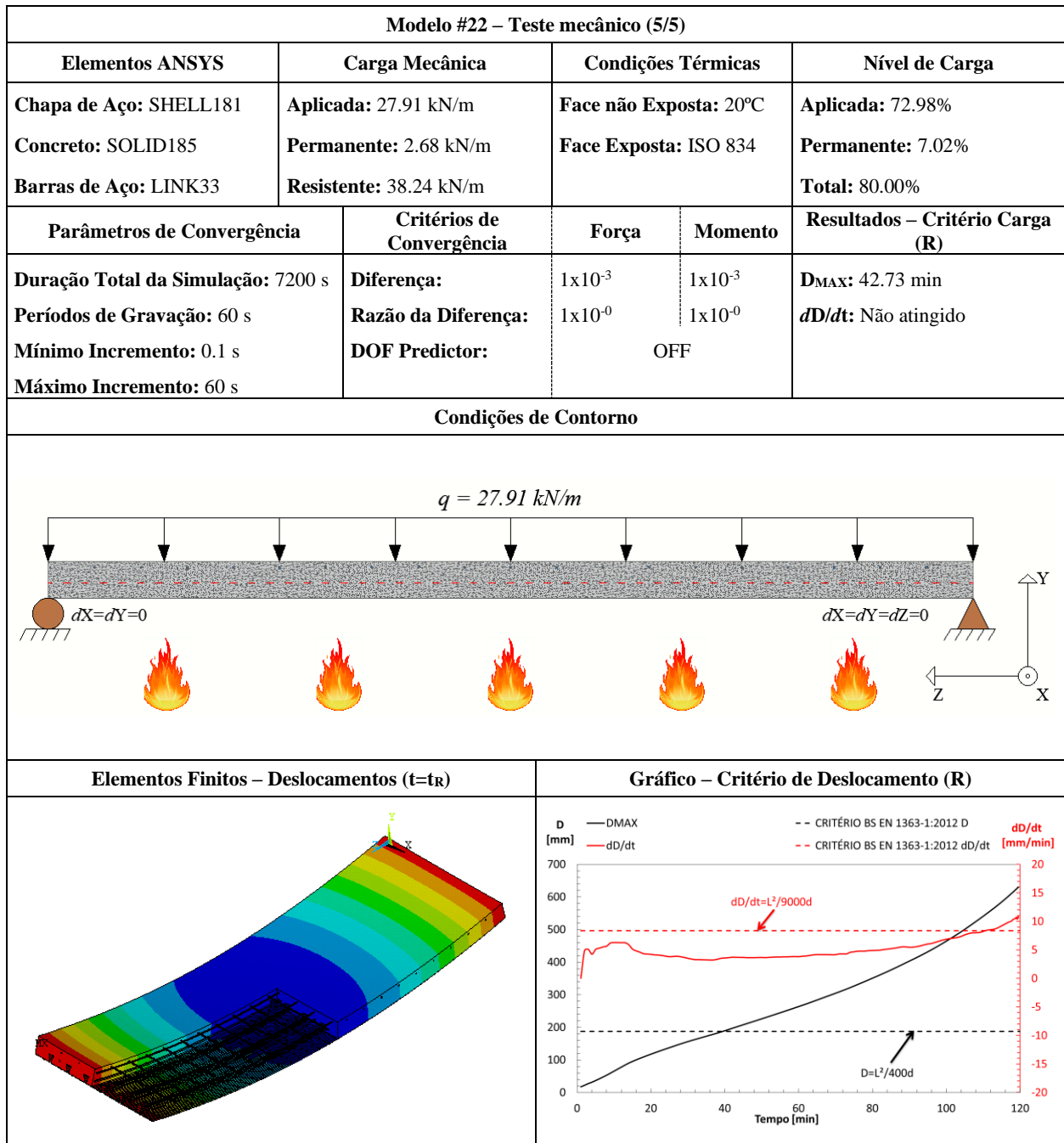
Modelo #22– Teste térmico (1/1)				
Elementos ANSYS	Coef. de Convecção (α_c)	Curvas de Temperatura	Fator de Vista (Φ)	Emissividade (ϵ)
Chapa de Aço: SHELL131 Concreto: SOLID70 Barras de Aço: LINK33	Sup. Exposta: 25 W/m ² K Sup. Ñ Exposta: 9 W/m ² K	Face não Exposta: 20°C Face Exposta: ISO 834	Flange Superior: 0.14 Alma: 0.09 Flange Inferior: 1.00	Chapa de Aço: 0.7 Concreto: 0.7 Barras de Aço: 0.7
Parâmetros de Convergência		Critérios de Convergência – Heat Flux		Resultados - Critério Isolamento (I)
Duração Total da Simulação: 7200 s Períodos de Gravação: 60 s Mínimo Incremento: 1 s Máximo Incremento: 60 s		Diferença: 1x10 ⁻³ Razão da Diferença: 1x10 ⁻⁶		T _{MAX} : 88.10 min T _{MED} : 80.41 min
Condições de Contorno			Elementos Finitos – Temperaturas (t=t _i)	
Gráfico – Critério de Isolamento (I)			Gráfico de Temperaturas na Secção da Laje	





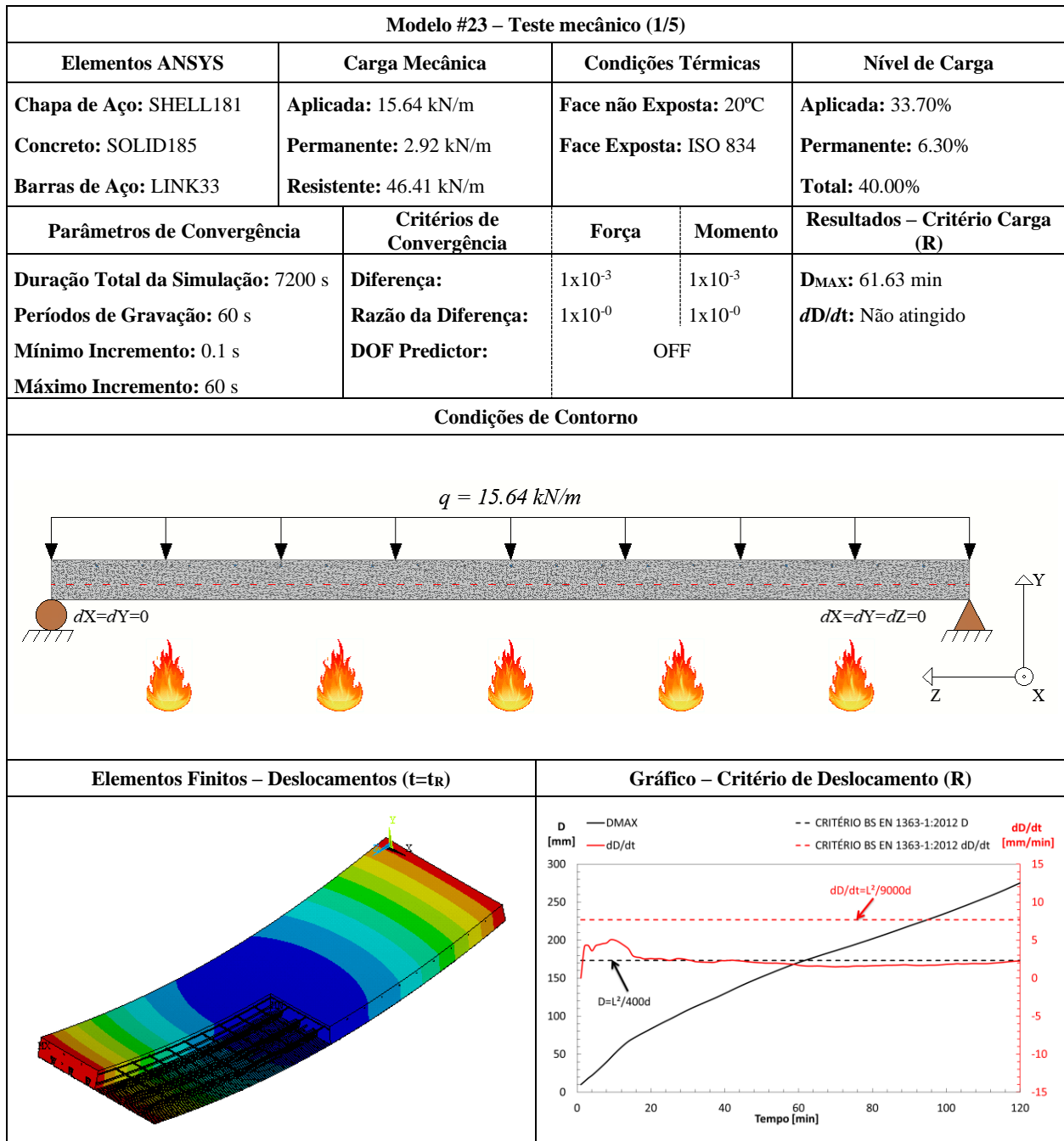


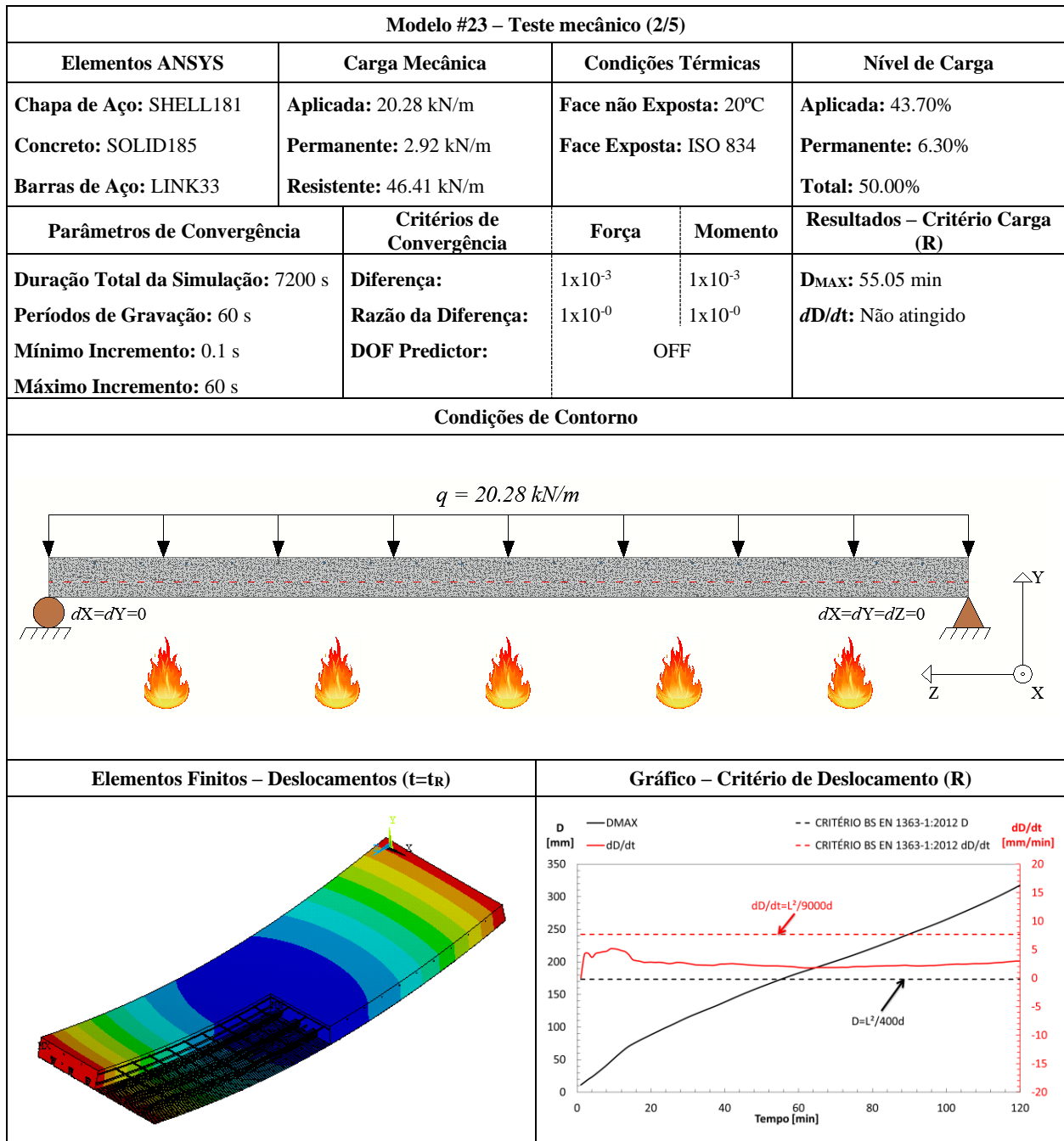


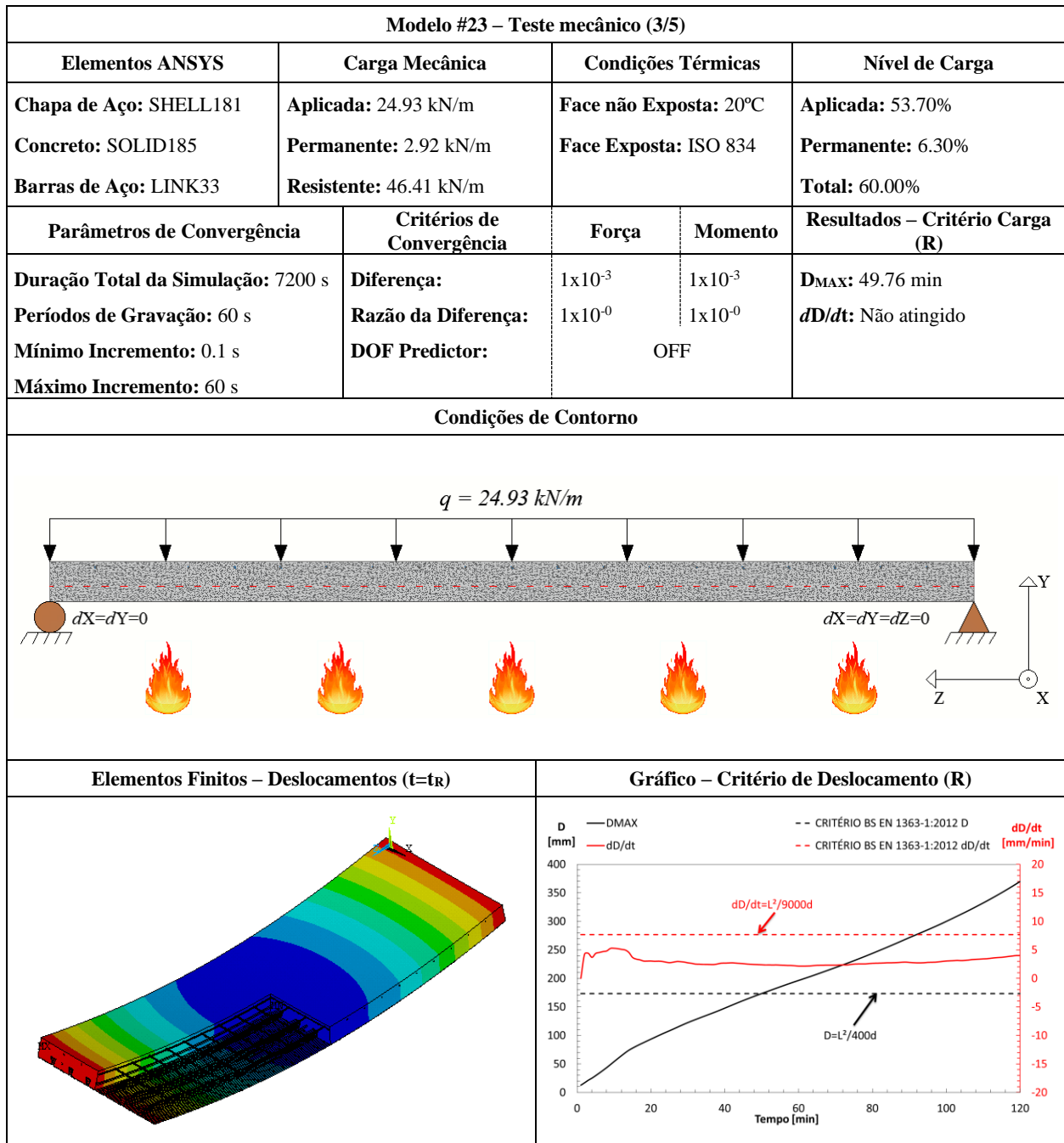


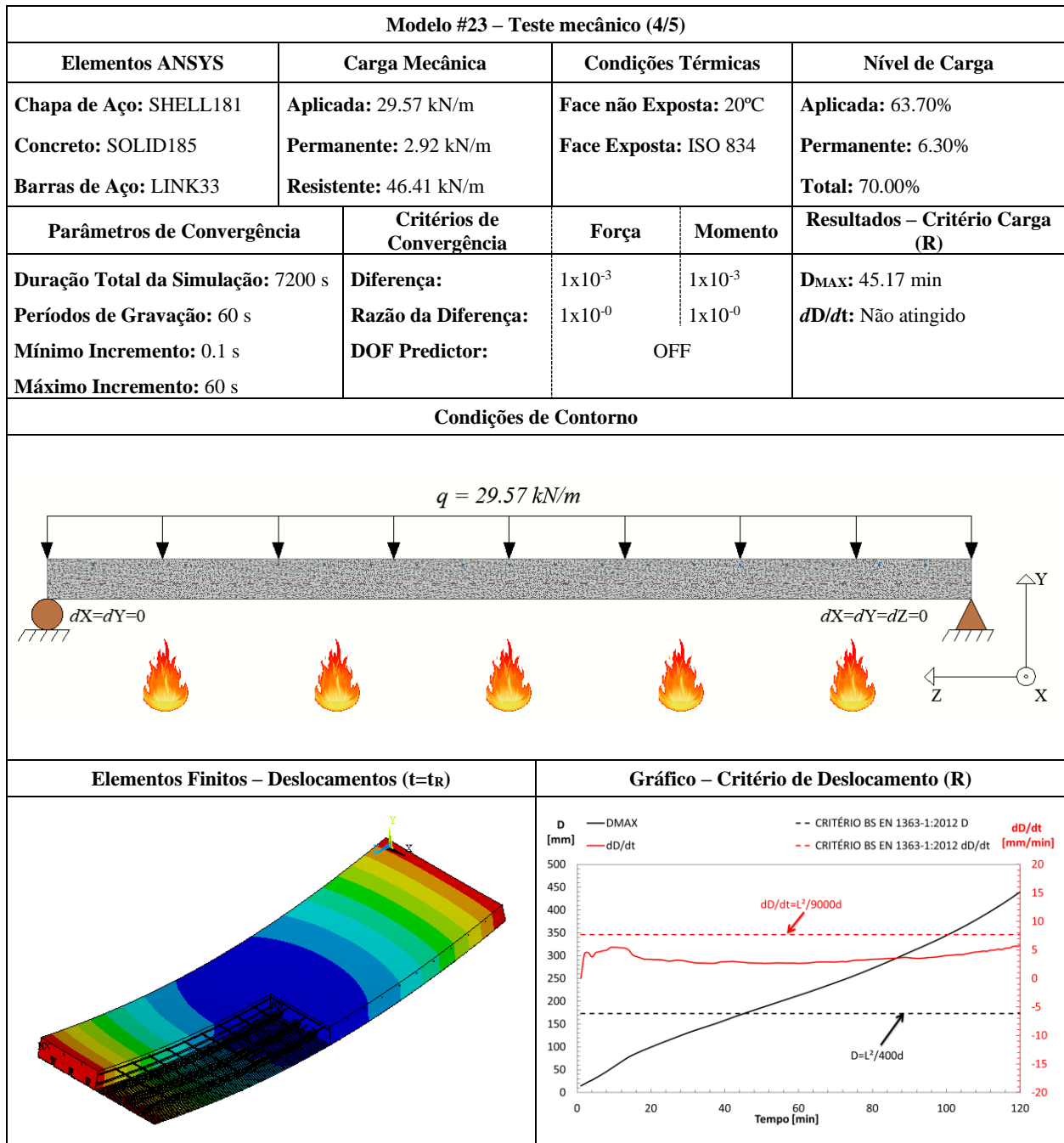
FICHA TÉCNICA			
Modelo #23 – Multideck 50 – 80 mm			
Modelo #23 – Dados Básicos (1/1)			
Tipo de Experimento	Título: Multideck 50 (UK) / H ₁ =80 mm		
Estudo Paramétrico	Autor(es): Santos, L. M. C.		Ano: 2019
Detalhamento			
Chapa de Aço	Concreto	Barras de Aço	
Geometria: Reentrante Espessura (mm): 1.00 Classe do aço: S450	Densidade: Convencional Classe: C20/25 Umidade: 3.0%	Varões	Grelha de Reforço
		Descrição: Ø6//150 Classe do aço: S500	Descrição: 3Ø10 Classe do aço: S500
Secção Transversal			
Secção Longitudinal			
Modelo de Elementos Finitos			

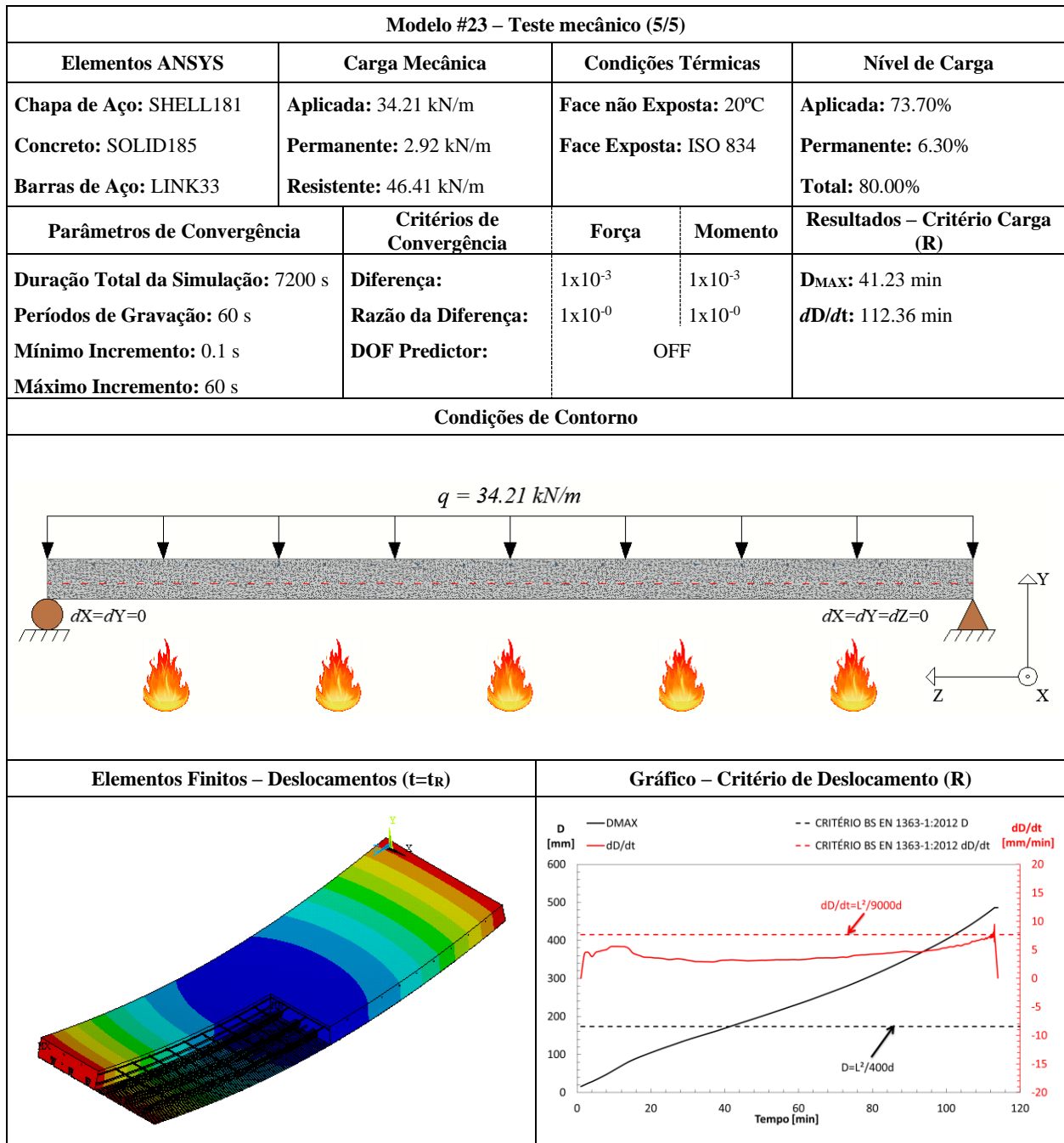
Modelo #23– Teste térmico (1/1)				
Elementos ANSYS	Coef. de Convecção (α_c)	Curvas de Temperatura	Fator de Vista (Φ)	Emissividade (ϵ)
Chapa de Aço: SHELL131 Concreto: SOLID70 Barras de Aço: LINK33	Sup. Exposta: 25 W/m ² K Sup. Ñ Exposta: 9 W/m ² K	Face não Exposta: 20°C Face Exposta: ISO 834	Flange Superior: 0.14 Alma: 0.09 Flange Inferior: 1.00	Chapa de Aço: 0.7 Concreto: 0.7 Barras de Aço: 0.7
Parâmetros de Convergência		Critérios de Convergência – Heat Flux		Resultados - Critério Isolamento (I)
Duração Total da Simulação: 7200 s Períodos de Gravação: 60 s Mínimo Incremento: 1 s Máximo Incremento: 60 s		Diferença: 1x10 ⁻³ Razão da Diferença: 1x10 ⁻⁶		T _{MAX} : 94.57 min T _{MED} : 105.63 min
Condições de Contorno			Elementos Finitos – Temperaturas (t=t _i)	
Gráfico – Critério de Isolamento (I)			Gráfico de Temperaturas na Secção da Laje	





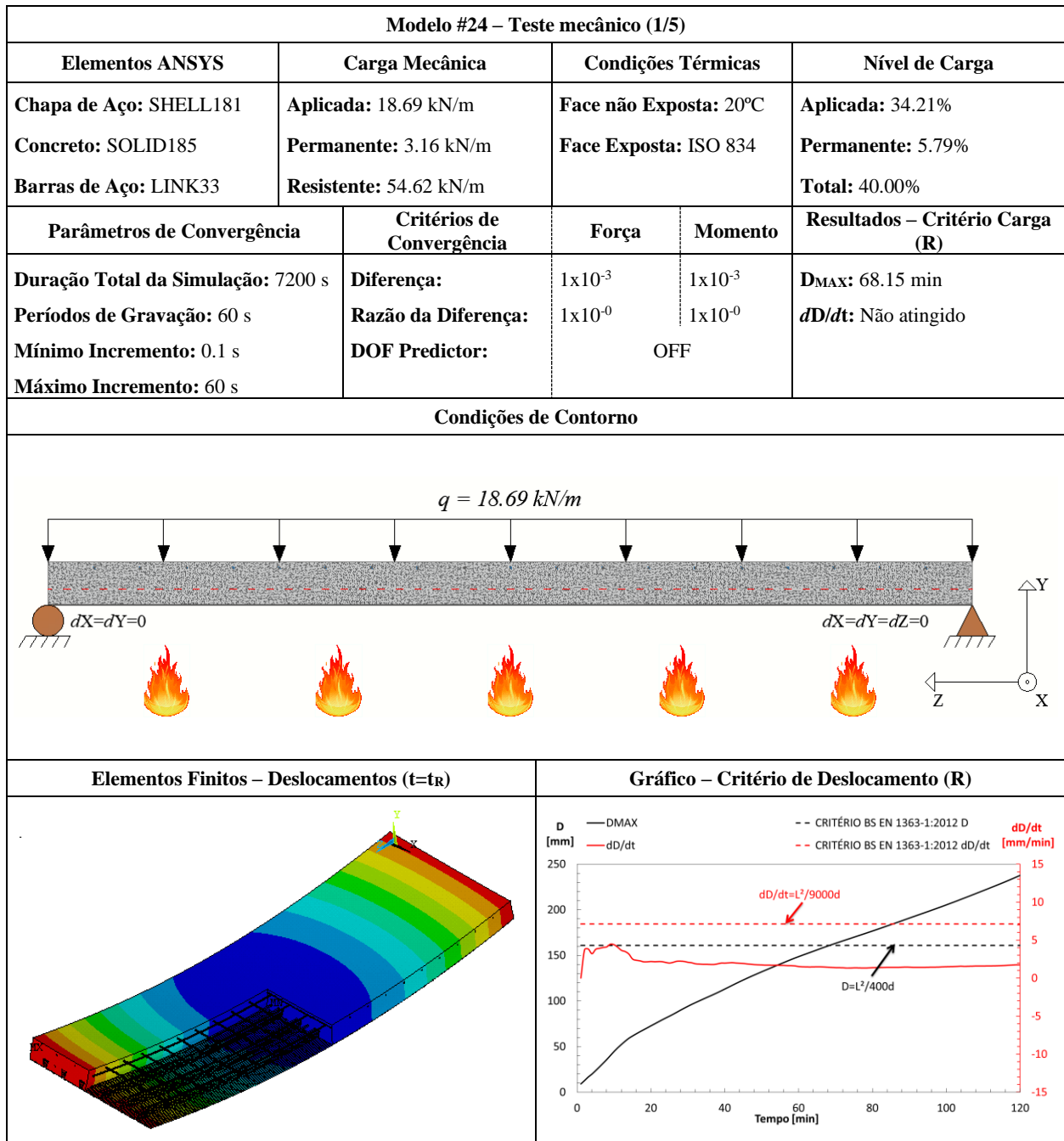


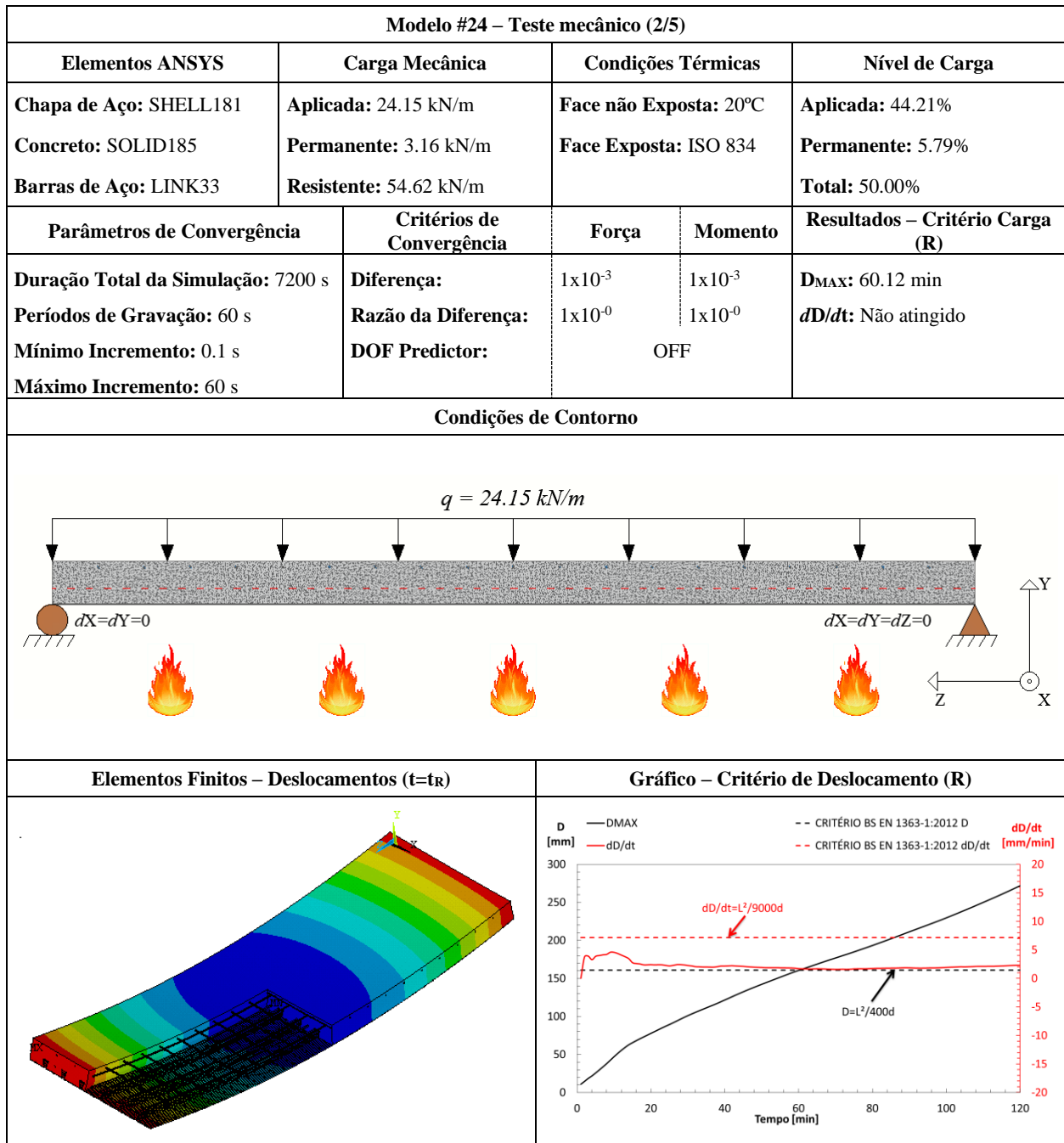


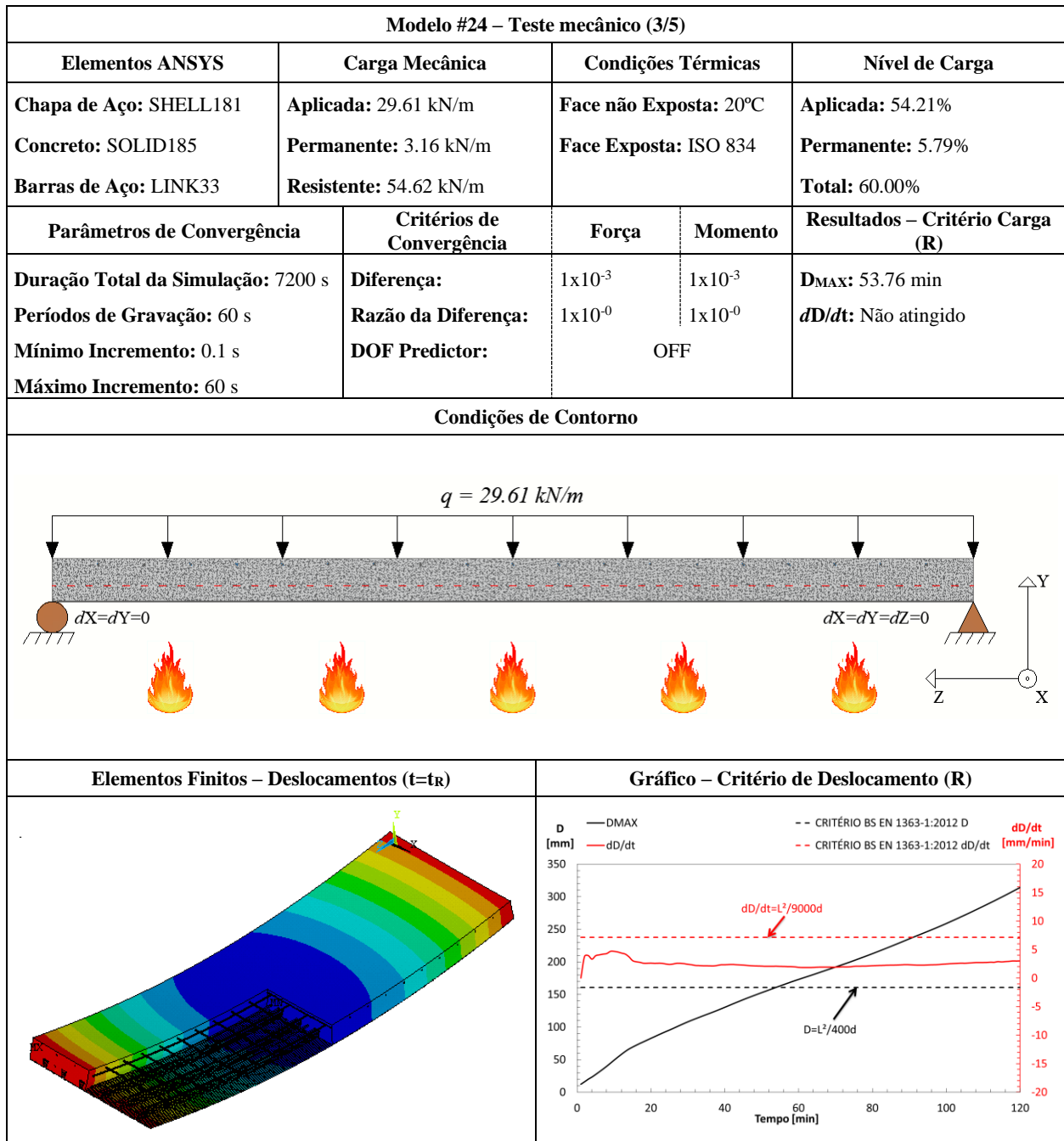


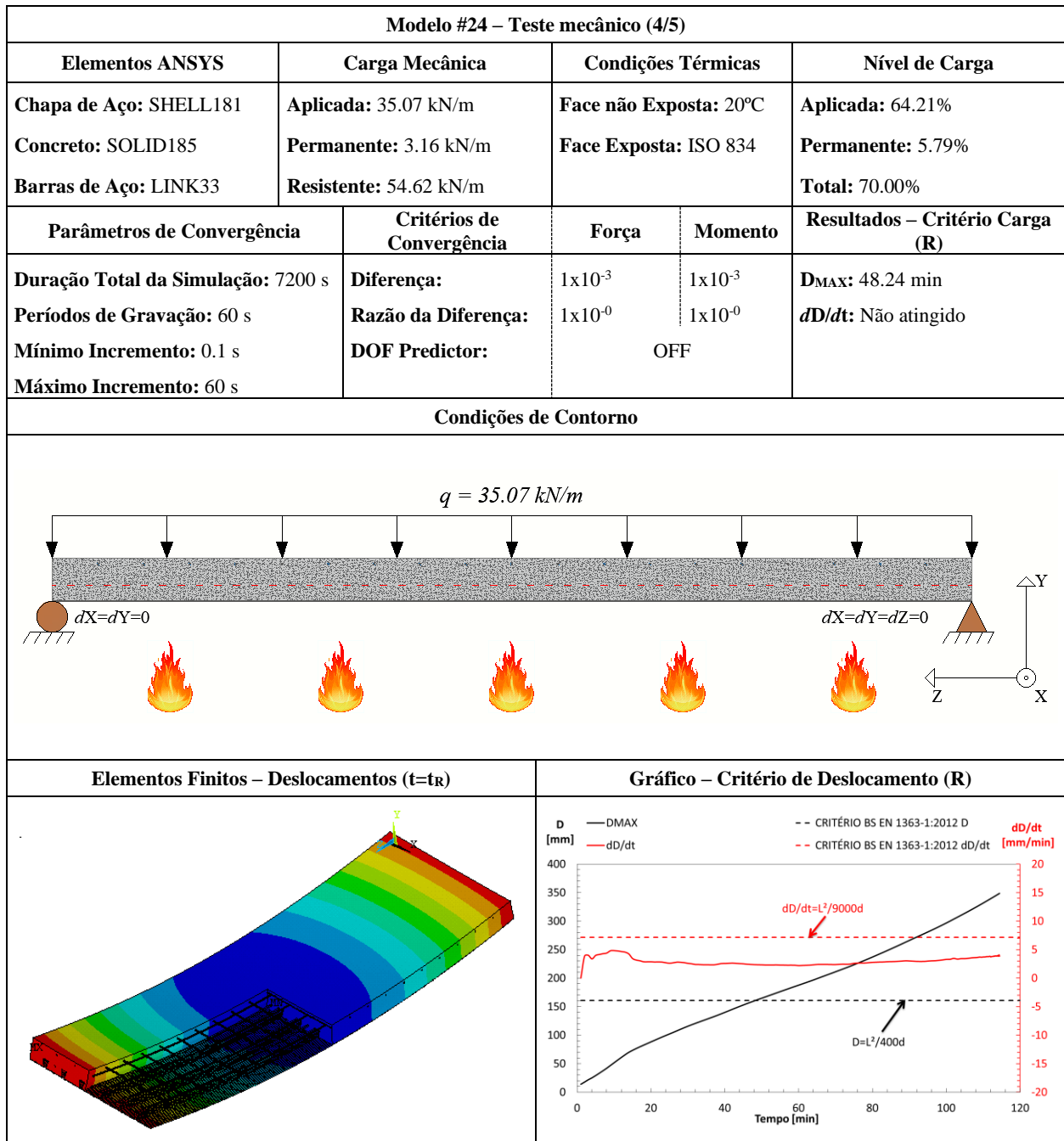
FICHA TÉCNICA			
Modelo #24 – Multideck 50 – 90 mm			
Modelo #24 – Dados Básicos (1/1)			
Tipo de Experimento	Título: Multideck 50 (UK) / H ₁ =90 mm		
Estudo Paramétrico	Autor(es): Santos, L. M. C.		Ano: 2019
Detalhamento			
Chapa de Aço	Concreto	Barras de Aço	
Geometria: Reentrante Espessura (mm): 1.00 Classe do aço: S450	Densidade: Convencional Classe: C20/25 Umidade: 3.0%	Varões	Grelha de Reforço
		Descrição: Ø6//150	Descrição: 3Ø10
		Classe do aço: S500	Classe do aço: S500
Secção Transversal			
Secção Longitudinal			
Modelo de Elementos Finitos			

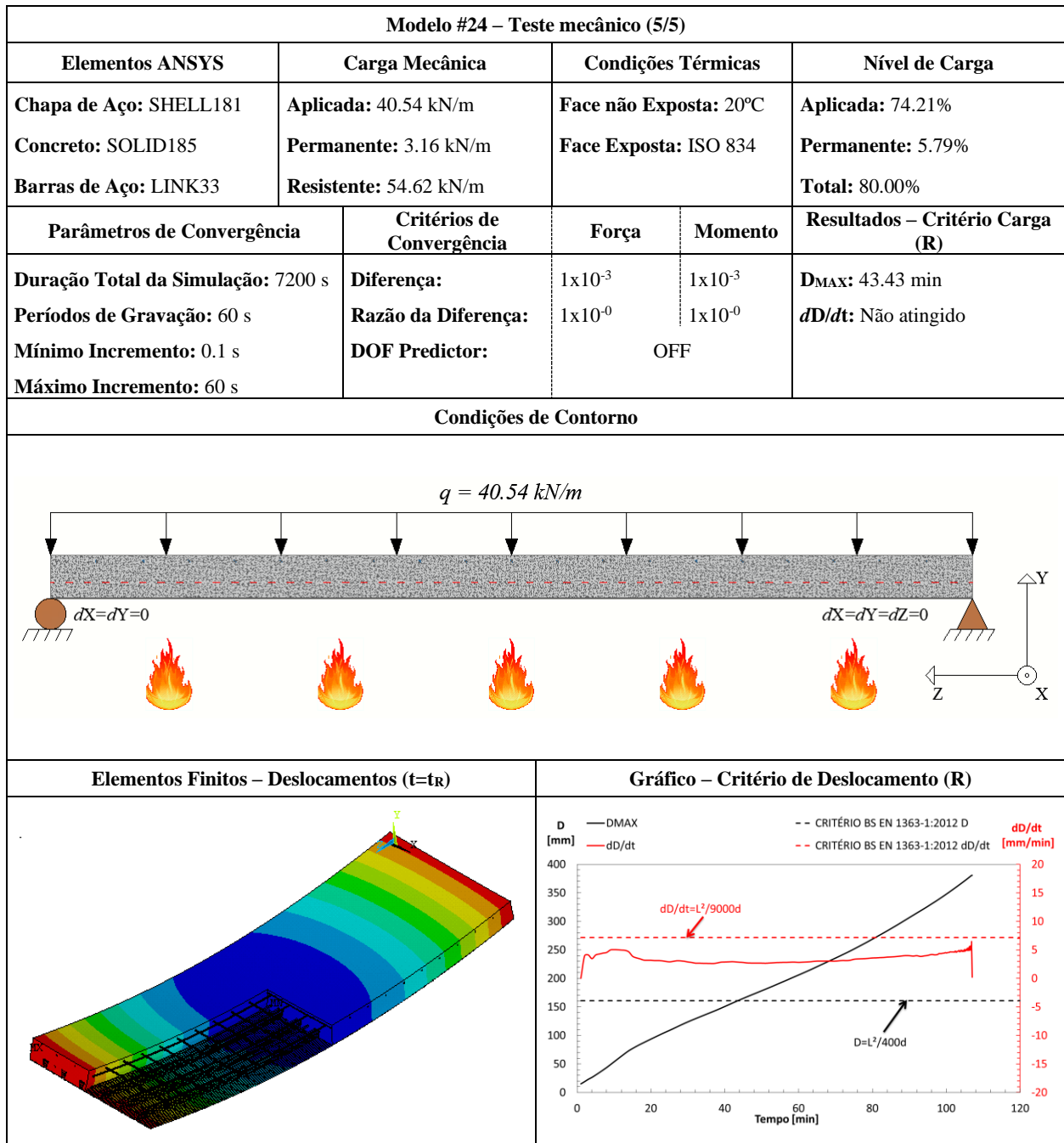
Modelo #24– Teste térmico (1/1)				
Elementos ANSYS	Coef. de Convecção (α_c)	Curvas de Temperatura	Fator de Vista (Φ)	Emissividade (ϵ)
Chapa de Aço: SHELL131 Concreto: SOLID70 Barras de Aço: LINK33	Sup. Exposta: 25 W/m ² K Sup. Ñ Exposta: 9 W/m ² K	Face não Exposta: 20°C Face Exposta: ISO 834	Flange Superior: 0.14 Alma: 0.09 Flange Inferior: 1.00	Chapa de Aço: 0.7 Concreto: 0.7 Barras de Aço: 0.7
Parâmetros de Convergência		Critérios de Convergência – Heat Flux		Resultados - Critério Isolamento (I)
Duração Total da Simulação: 7200 s Períodos de Gravação: 60 s Mínimo Incremento: 1 s Máximo Incremento: 60 s		Diferença: 1x10 ⁻³ Razão da Diferença: 1x10 ⁻⁶		T _{MAX} : Não atingido T _{MED} : 110.14 min
Condições de Contorno			Elementos Finitos – Temperaturas (t=t _i)	
Gráfico – Critério de Isolamento (I)			Gráfico de Temperaturas na Secção da Laje	











FICHA TÉCNICA		
Modelo #25 – Multideck 50 – 100 mm		
Modelo #25 – Dados Básicos (1/1)		
Tipo de Experimento	Título: Multideck 50 (UK) / H ₁ =100 mm	
Estudo Paramétrico	Autor(es): Santos, L. M. C.	Ano: 2019
Detalhamento		
Chapa de Aço	Concreto	Barras de Aço
Geometria: Reentrante Espessura (mm): 1.00 Classe do aço: S450	Densidade: Convencional Classe: C20/25 Umidade: 3.0%	Varões
		Grelha de Reforço
		Descrição: Ø6//150 Classe do aço: S500
		Descrição: 3Ø10 Classe do aço: S500
Secção Transversal		
Secção Longitudinal		
Modelo de Elementos Finitos		

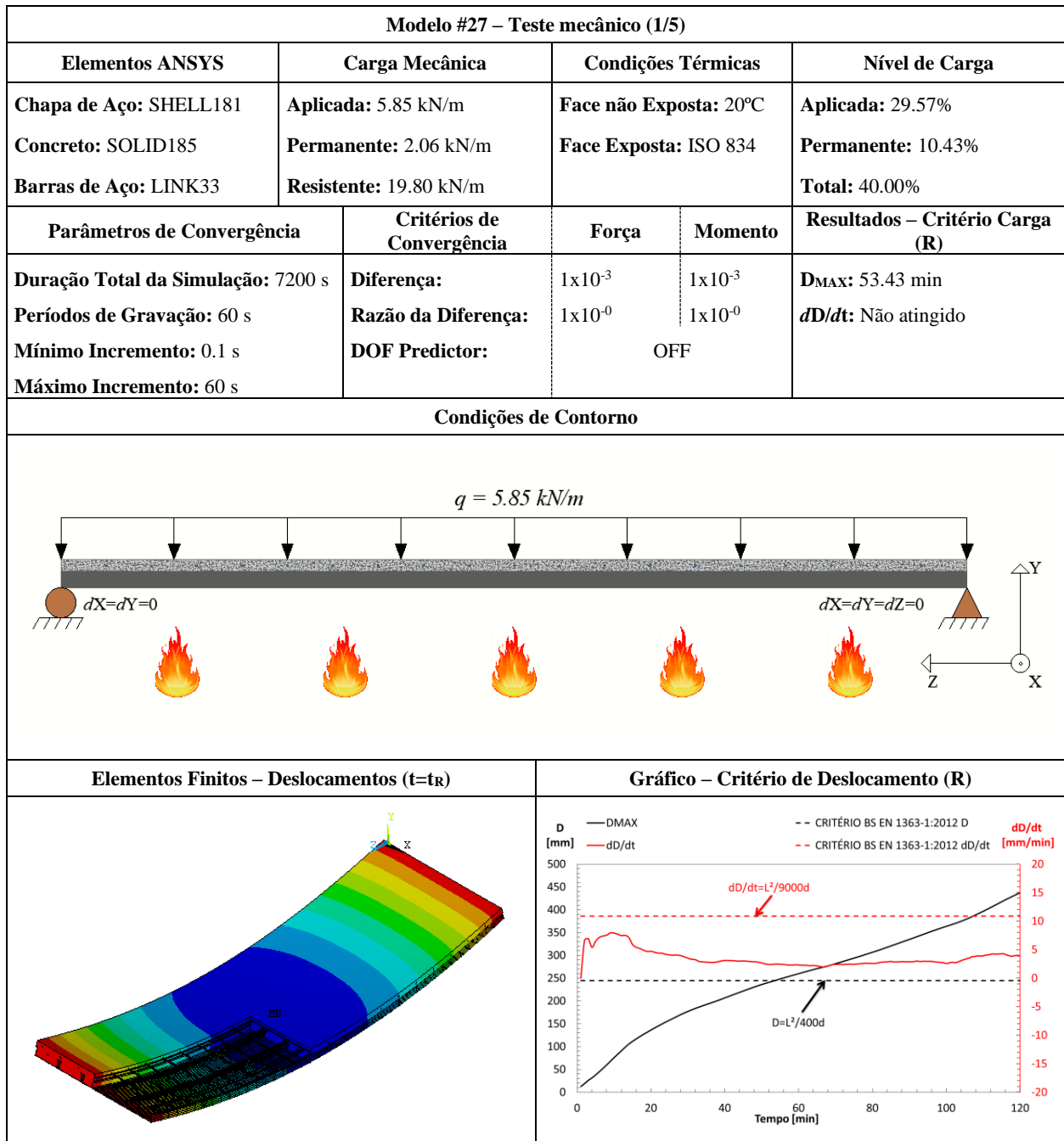
Modelo #25– Teste térmico (1/1)				
Elementos ANSYS	Coef. de Convecção (α_c)	Curvas de Temperatura	Fator de Vista (Φ)	Emissividade (ϵ)
Chapa de Aço: SHELL131 Concreto: SOLID70 Barras de Aço: LINK33	Sup. Exposta: 25 W/m ² K Sup. Ñ Exposta: 9 W/m ² K	Face não Exposta: 20°C Face Exposta: ISO 834	Flange Superior: 0.14 Alma: 0.09 Flange Inferior: 1.00	Chapa de Aço: 0.7 Concreto: 0.7 Barras de Aço: 0.7
Parâmetros de Convergência		Critérios de Convergência – Heat Flux		Resultados - Critério Isolamento (I)
Duração Total da Simulação: 7200 s Períodos de Gravação: 60 s Mínimo Incremento: 1 s Máximo Incremento: 60 s		Diferença: 1x10 ⁻³ Razão da Diferença: 1x10 ⁻⁶		T _{MAX} : Não atingido T _{MED} : Não atingido
Condições de Contorno			Elementos Finitos – Temperaturas (t=7200 s)	
Gráfico – Critério de Isolamento (I)			Gráfico de Temperaturas na Secção da Laje	

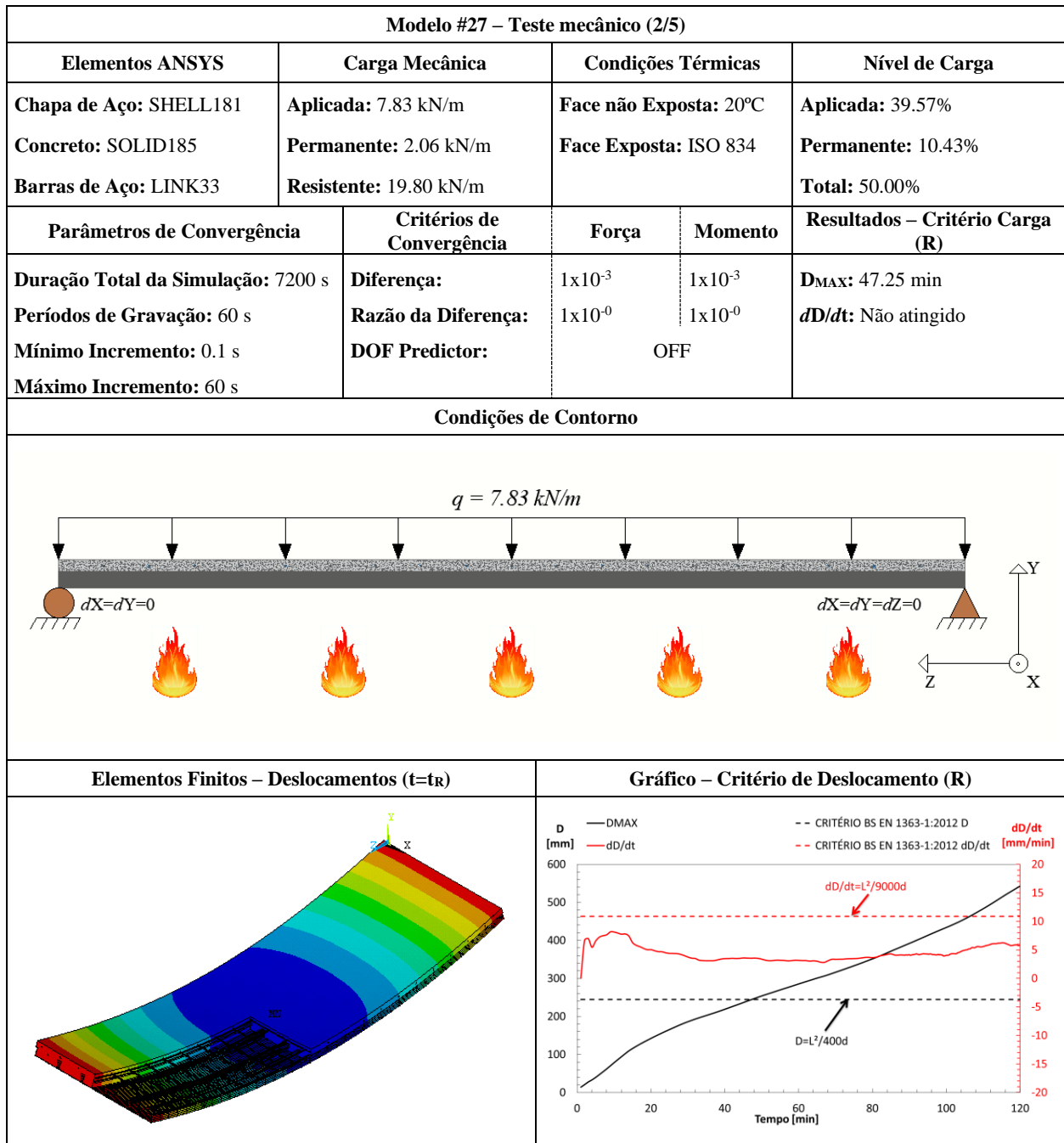
FICHA TÉCNICA			
Modelo #26 – Multideck 50 – 110 mm			
Modelo #26 – Dados Básicos (1/1)			
Tipo de Experimento	Título: Multideck 50 (UK) / H ₁ =110 mm		
Estudo Paramétrico	Autor(es): Santos, L. M. C.	Ano: 2019	
Detalhamento			
Chapa de Aço	Concreto	Barras de Aço	
Geometria: Reentrante Espessura (mm): 1.00 Classe do aço: S450	Densidade: Convencional Classe: C20/25 Umidade: 3.0%	Varões	Grelha de Reforço
		Descrição: Ø6//150 Classe do aço: S500	Descrição: 3Ø10 Classe do aço: S500
Secção Transversal			
Secção Longitudinal			
Modelo de Elementos Finitos			

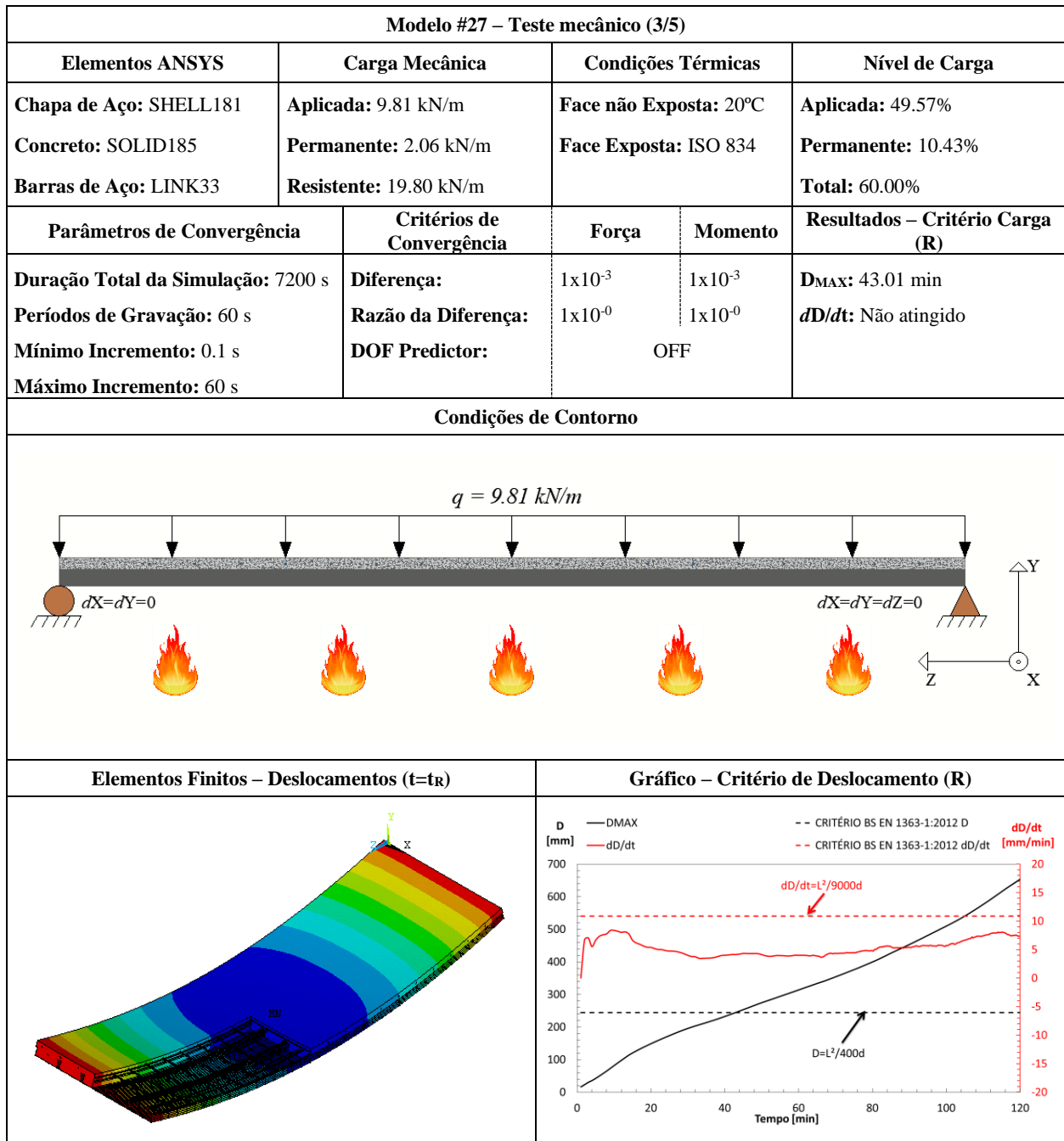
Modelo #26– Teste térmico (1/1)				
Elementos ANSYS	Coef. de Convecção (α_c)	Curvas de Temperatura	Fator de Vista (Φ)	Emissividade (ϵ)
Chapa de Aço: SHELL131 Concreto: SOLID70 Barras de Aço: LINK33	Sup. Exposta: 25 W/m ² K Sup. Ñ Exposta: 9 W/m ² K	Face não Exposta: 20°C Face Exposta: ISO 834	Flange Superior: 0.14 Alma: 0.09 Flange Inferior: 1.00	Chapa de Aço: 0.7 Concreto: 0.7 Barras de Aço: 0.7
Parâmetros de Convergência		Critérios de Convergência – Heat Flux		Resultados - Critério Isolamento (I)
Duração Total da Simulação: 7200 s Períodos de Gravação: 60 s Mínimo Incremento: 1 s Máximo Incremento: 60 s		Diferença: 1x10 ⁻³ Razão da Diferença: 1x10 ⁻⁶		T _{MAX} : Não atingido T _{MED} : Não atingido
Condições de Contorno			Elementos Finitos – Temperaturas (t=7200 s)	
Gráfico – Critério de Isolamento (I)			Gráfico de Temperaturas na Secção da Laje	

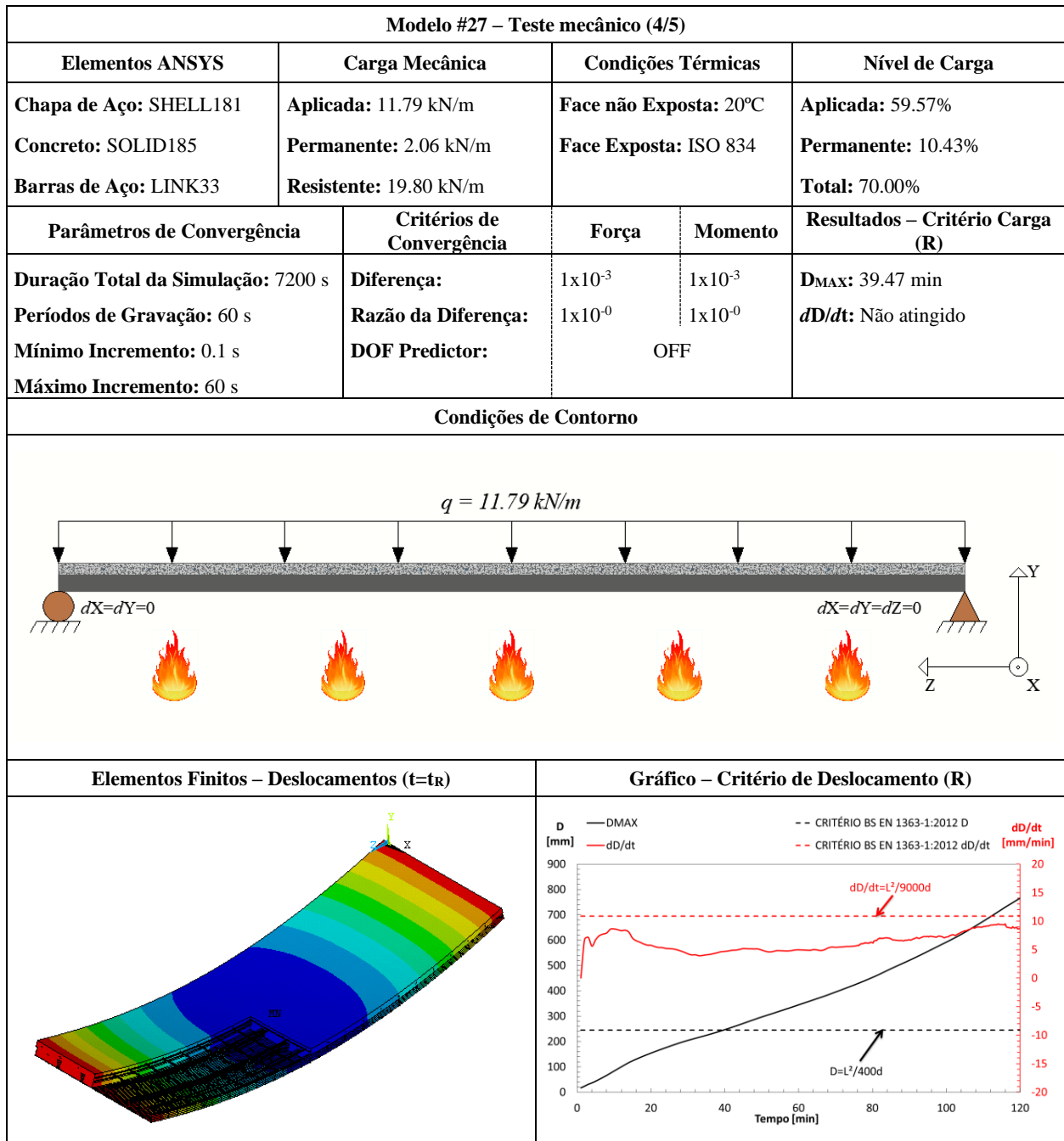
FICHA TÉCNICA			
Modelo #27 – Bondeck – 40 mm			
Modelo #27 – Dados Básicos (1/1)			
Tipo de Experimento	Título: Bondeck (AUS) / H ₁ =40 mm		
Estudo Paramétrico	Autor(es): Santos, L. M. C.	Ano: 2019	
Detalhamento			
Chapa de Aço	Concreto	Barras de Aço	
Geometria: Reentrante Espessura (mm): 1.00 Classe do aço: S350	Densidade: Convencional Classe: C20/25 Umidade: 3.0%	Varões	Grelha de Reforço
		Descrição: Ø6//150 Classe do aço: S500	Descrição: 3Ø10 Classe do aço: S500
Secção Transversal			
Secção Longitudinal			
Modelo de Elementos Finitos			

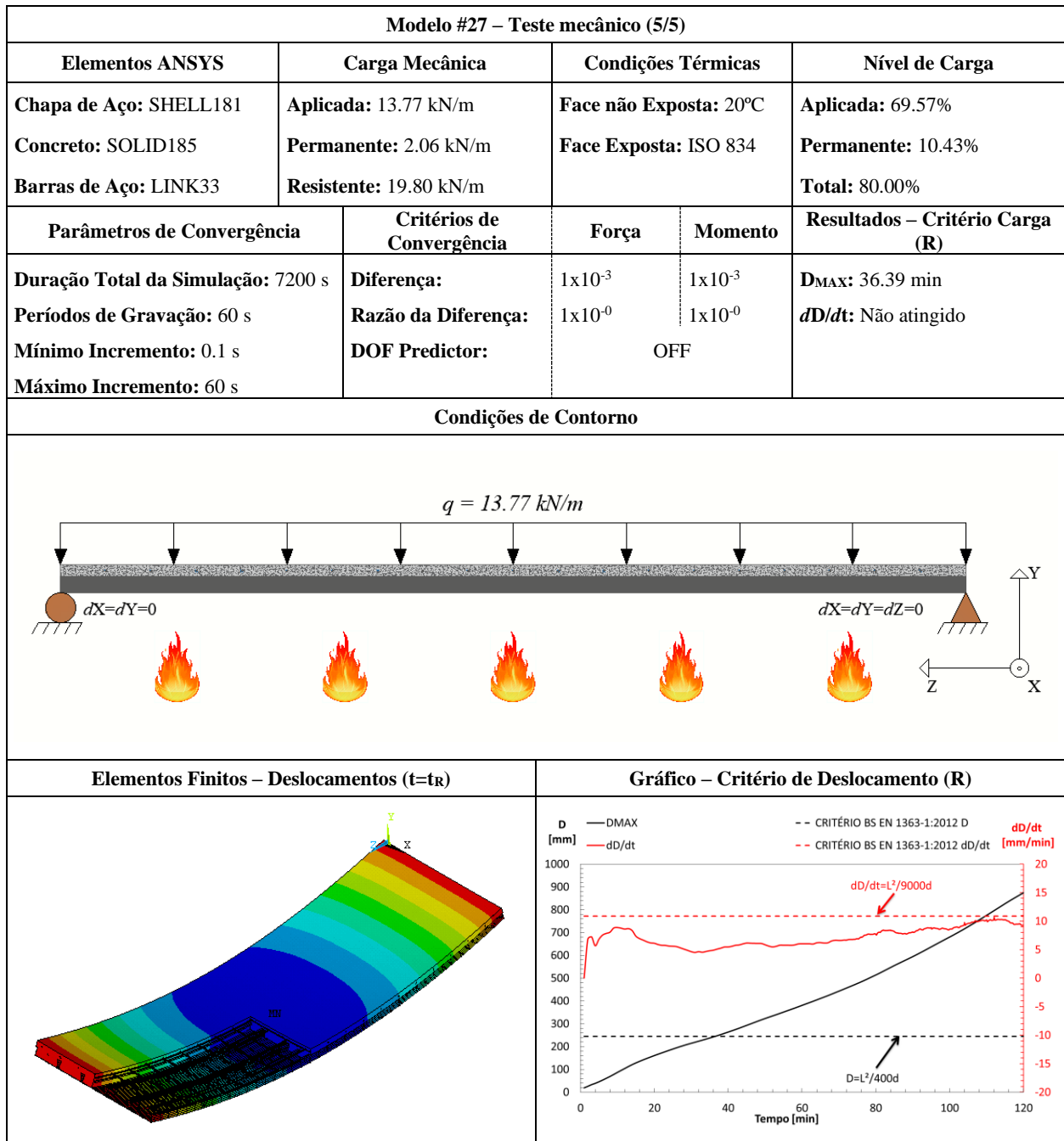
Modelo #27– Teste térmico (1/1)				
Elementos ANSYS	Coef. de Convecção (α_c)	Curvas de Temperatura	Fator de Vista (Φ)	Emissividade (ϵ)
Chapa de Aço: SHELL131 Concreto: SOLID70 Barras de Aço: LINK33	Sup. Exposta: 25 W/m ² K Sup. Ñ Exposta: 9 W/m ² K	Face não Exposta: 20°C Face Exposta: ISO 834	Flange Superior: 0.28 Alma: 0.18 Flange Inferior: 1.00	Chapa de Aço: 0.7 Concreto: 0.7 Barras de Aço: 0.7
Parâmetros de Convergência		Critérios de Convergência – Heat Flux		Resultados - Critério Isolamento (I)
Duração Total da Simulação: 7200 s Períodos de Gravação: 60 s Mínimo Incremento: 1 s Máximo Incremento: 60 s		Diferença: 1x10 ⁻³ Razão da Diferença: 1x10 ⁻⁶		T _{MAX} : 45.67 min T _{MED} : 56.48 min
Condições de Contorno			Elementos Finitos – Temperaturas (t=t _i)	
Gráfico – Critério de Isolamento (I)			Gráfico de Temperaturas na Secção da Laje	





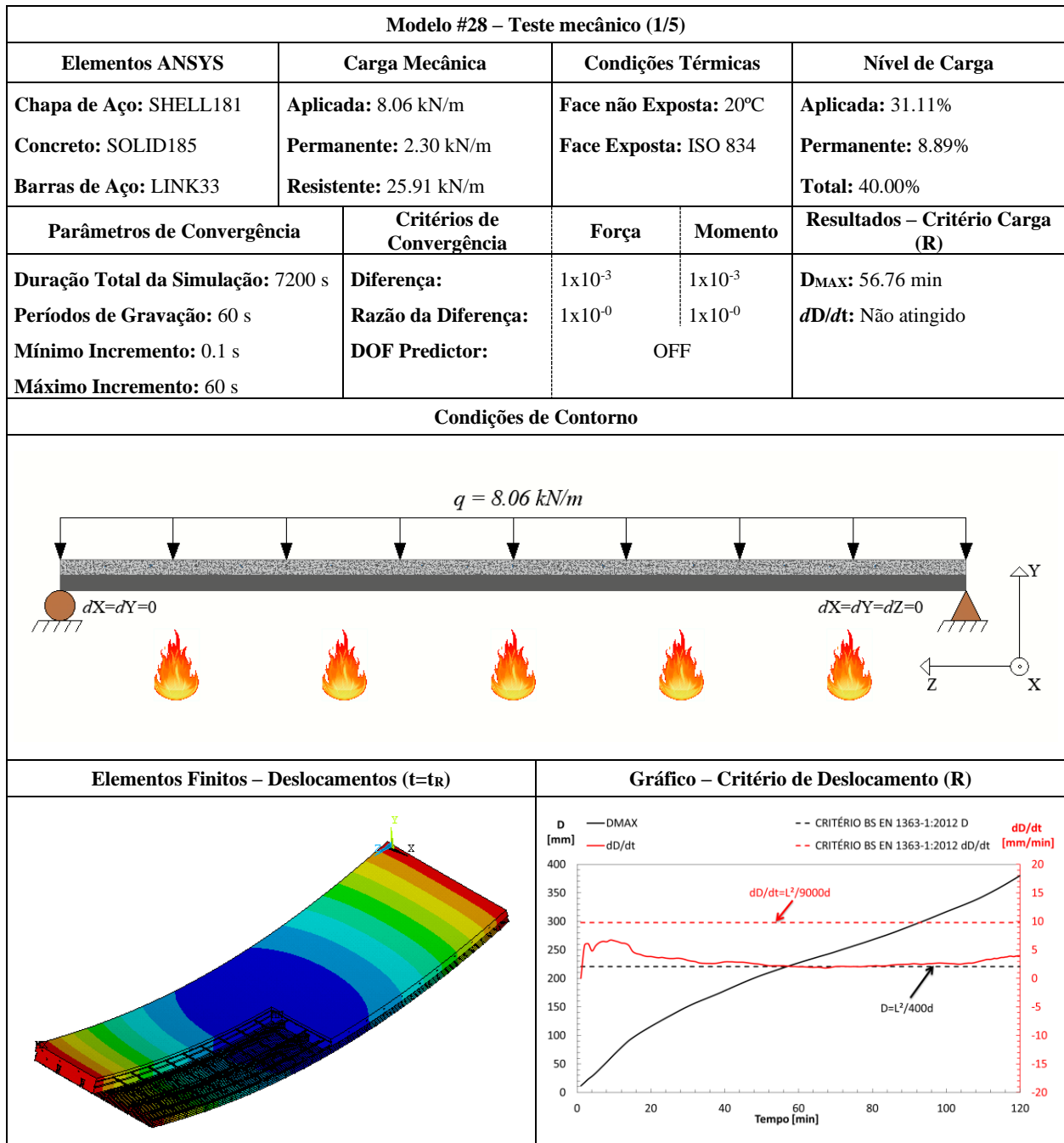


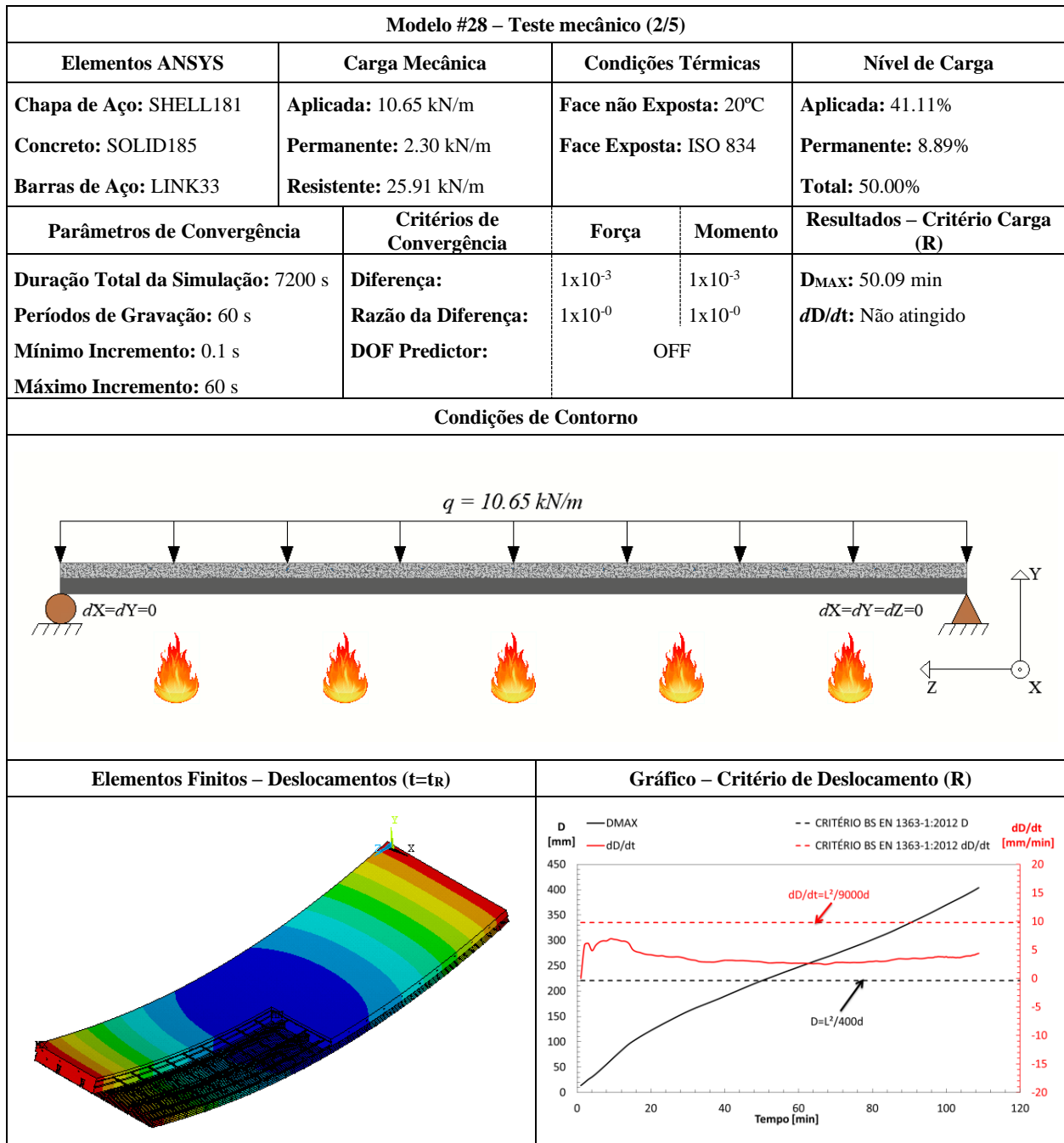


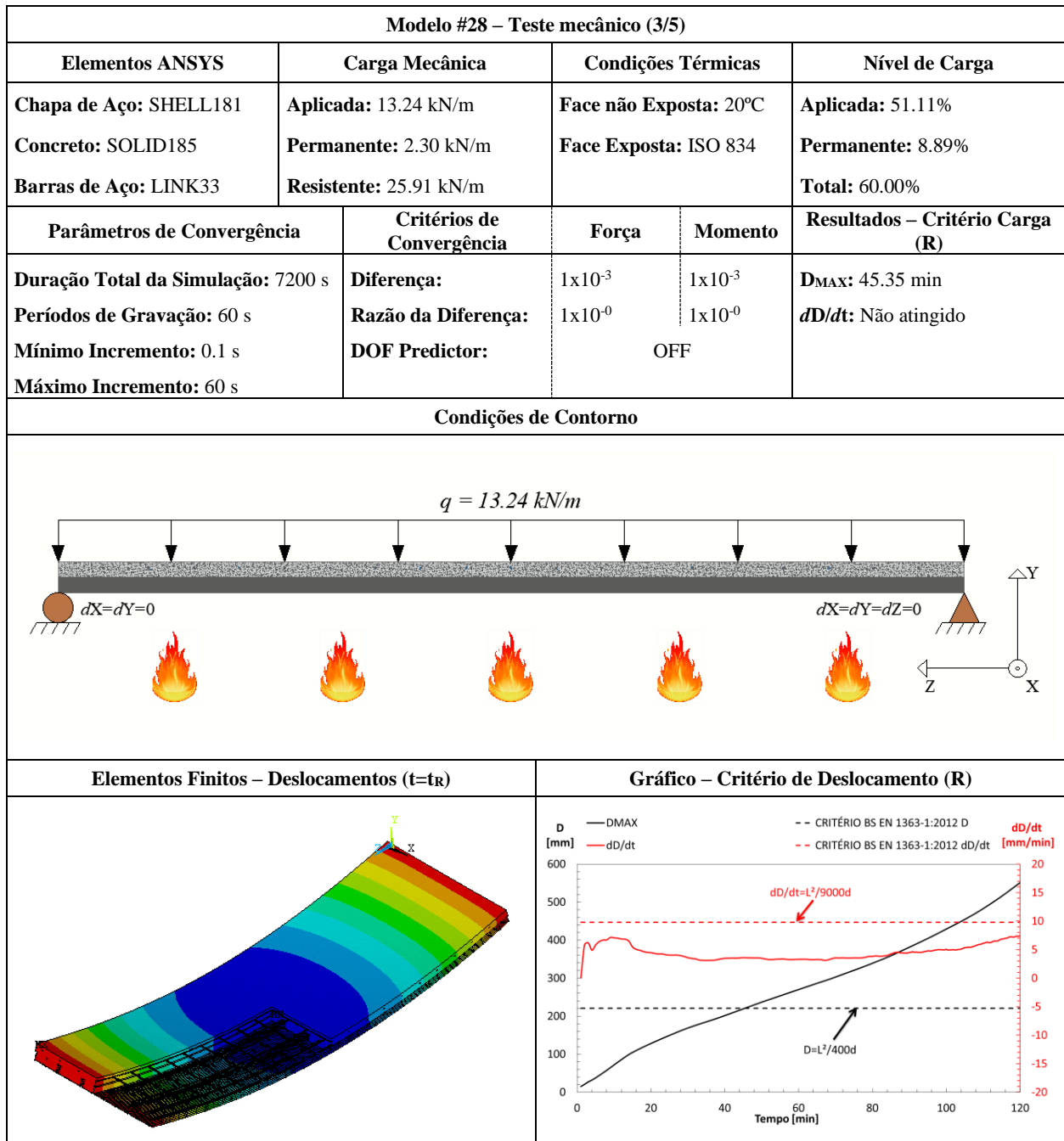


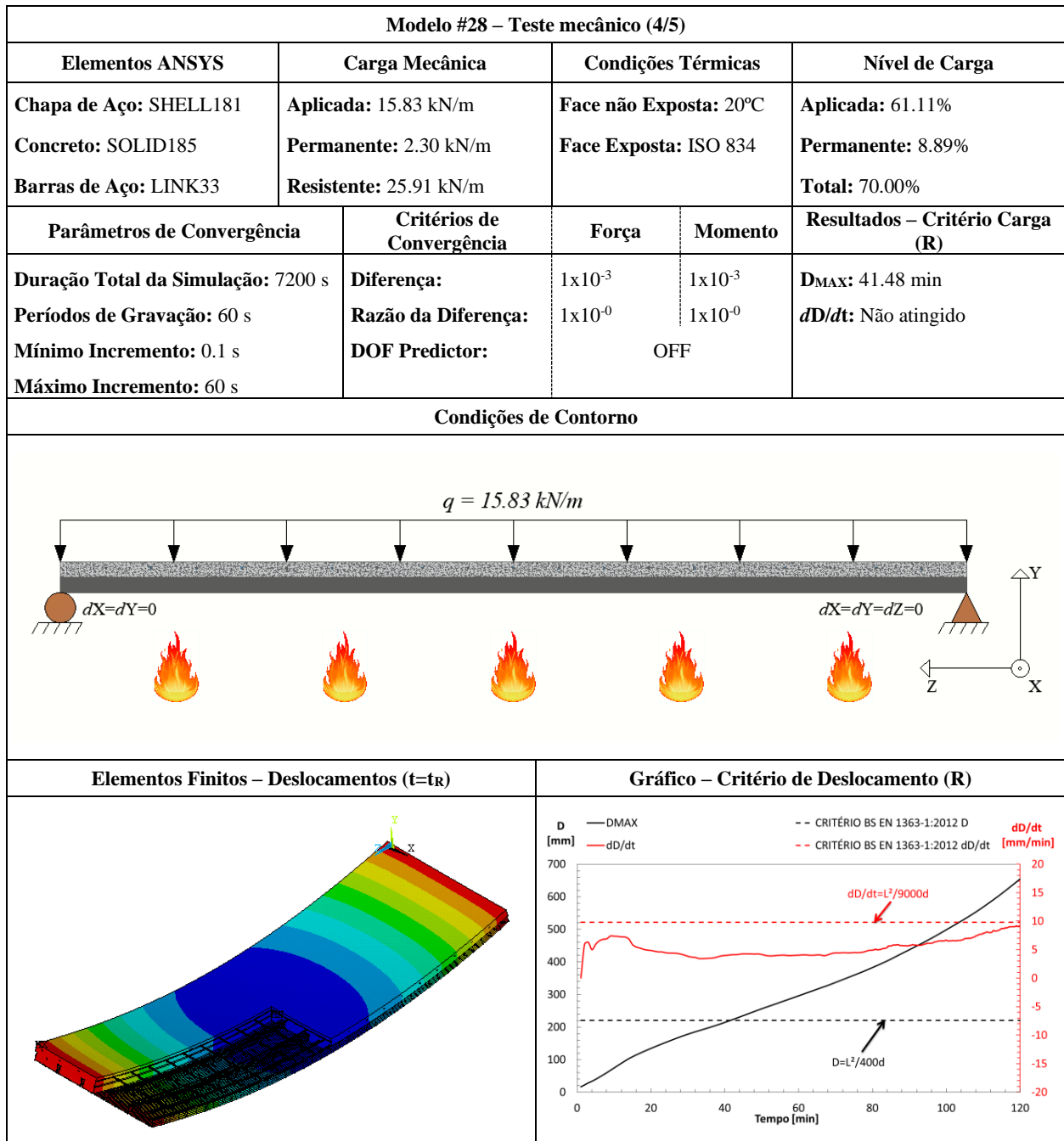
FICHA TÉCNICA			
Modelo #28 – Bondeck – 50 mm			
Modelo #28 – Dados Básicos (1/1)			
Tipo de Experimento	Título: Bondeck (AUS) / H ₁ =50 mm		
Estudo Paramétrico	Autor(es): Santos, L. M. C.		Ano: 2019
Detalhamento			
Chapa de Aço	Concreto	Barras de Aço	
Geometria: Reentrante Espessura (mm): 1.00 Classe do aço: S350	Densidade: Convencional Classe: C20/25 Umidade: 3.0%	Varões	Grelha de Reforço
		Descrição: Ø6//150 Classe do aço: S500	Descrição: 3Ø10 Classe do aço: S500
Secção Transversal			
Secção Longitudinal			
Modelo de Elementos Finitos			

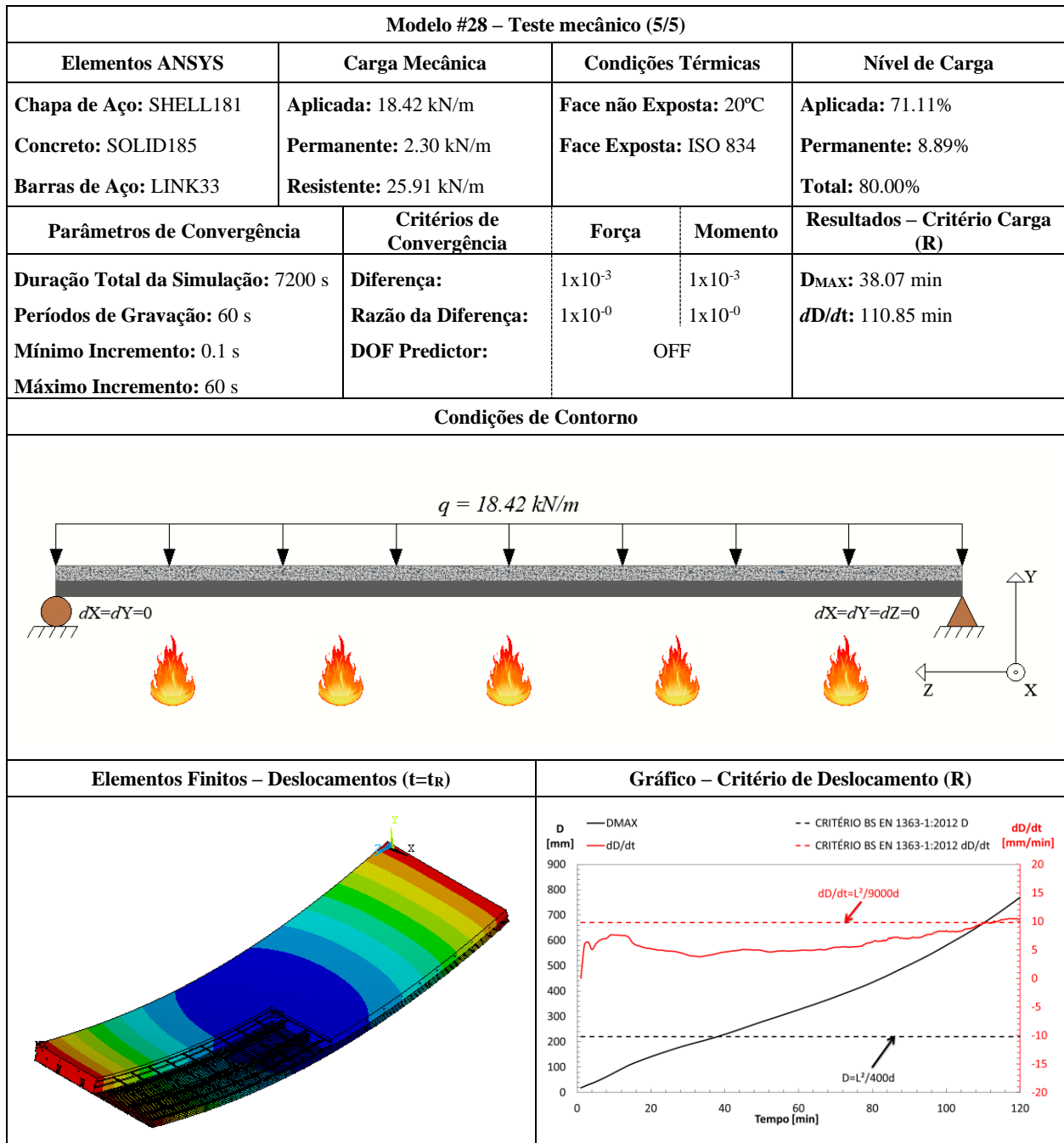
Modelo #28– Teste térmico (1/1)				
Elementos ANSYS	Coef. de Convecção (α_c)	Curvas de Temperatura	Fator de Vista (Φ)	Emissividade (ϵ)
Chapa de Aço: SHELL131 Concreto: SOLID70 Barras de Aço: LINK33	Sup. Exposta: 25 W/m ² K Sup. Ñ Exposta: 9 W/m ² K	Face não Exposta: 20°C Face Exposta: ISO 834	Flange Superior: 0.28 Alma: 0.18 Flange Inferior: 1.00	Chapa de Aço: 0.7 Concreto: 0.7 Barras de Aço: 0.7
Parâmetros de Convergência		Critérios de Convergência – Heat Flux		Resultados - Critério Isolamento (I)
Duração Total da Simulação: 7200 s Períodos de Gravação: 60 s Mínimo Incremento: 1 s Máximo Incremento: 60 s		Diferença: 1x10 ⁻³ Razão da Diferença: 1x10 ⁻⁶		T _{MAX} : 67.42 min T _{MED} : 60.06 min
Condições de Contorno			Elementos Finitos – Temperaturas (t=t _f)	
Gráfico – Critério de Isolamento (I)			Gráfico de Temperaturas na Secção da Laje	





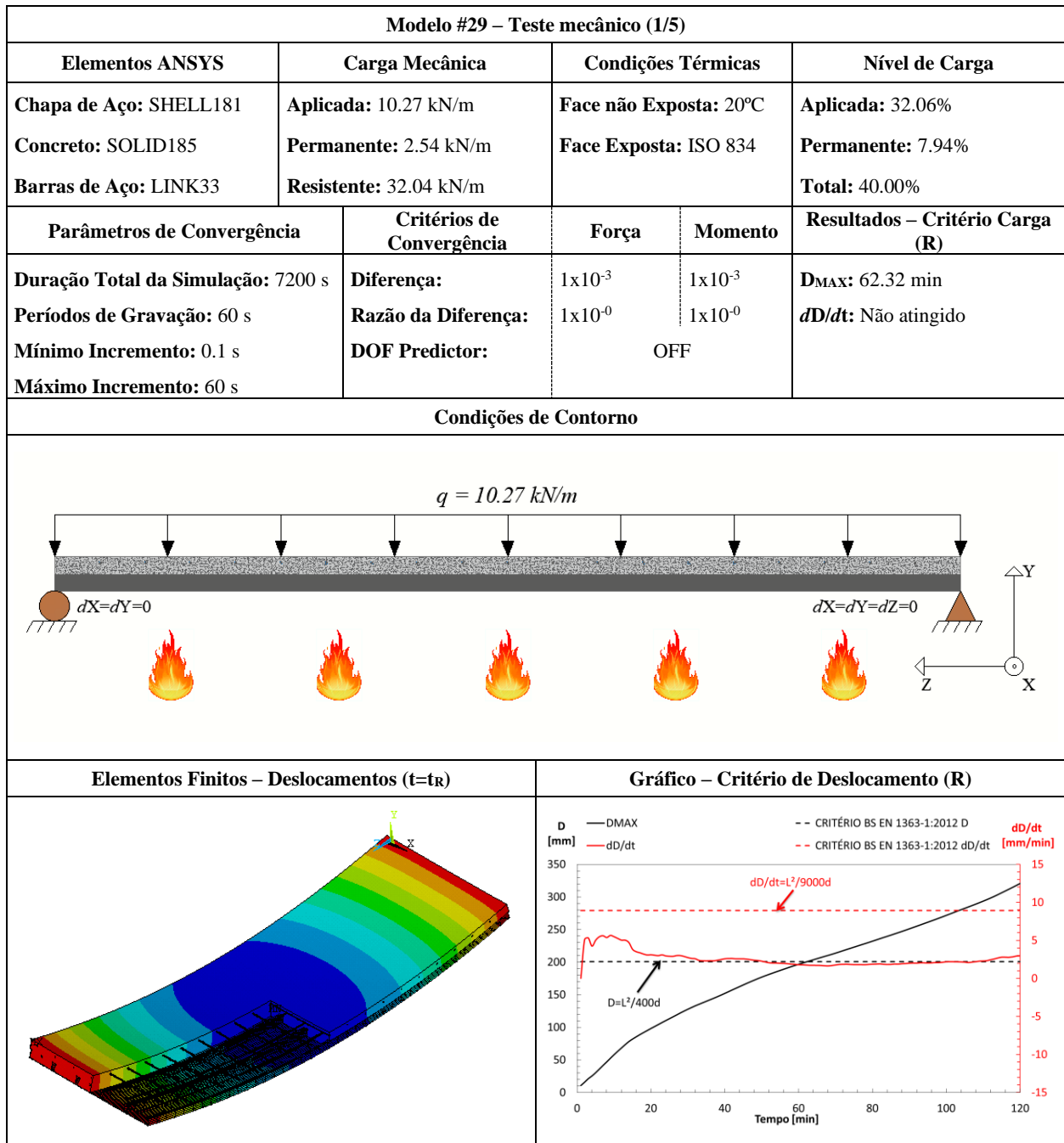


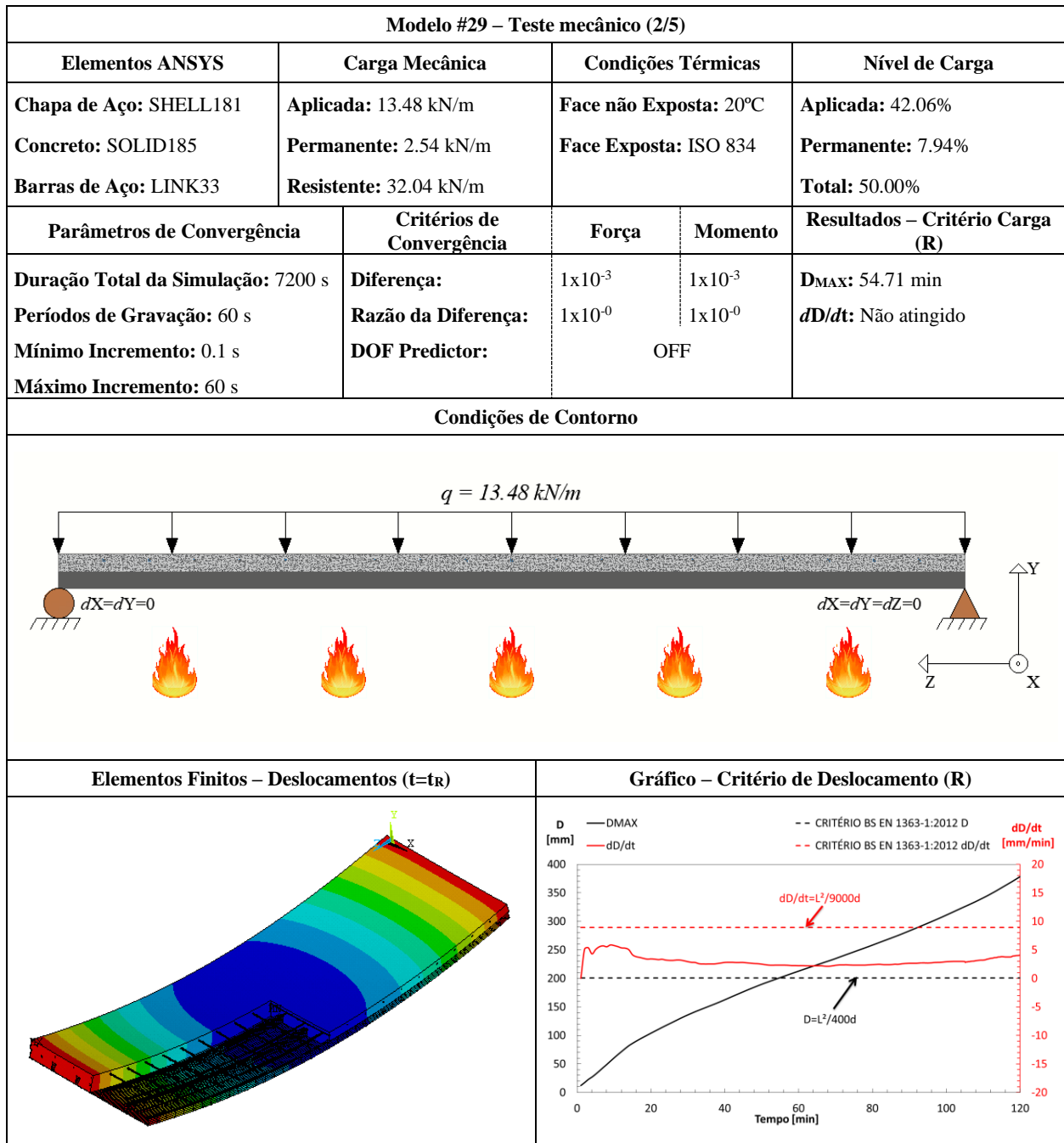


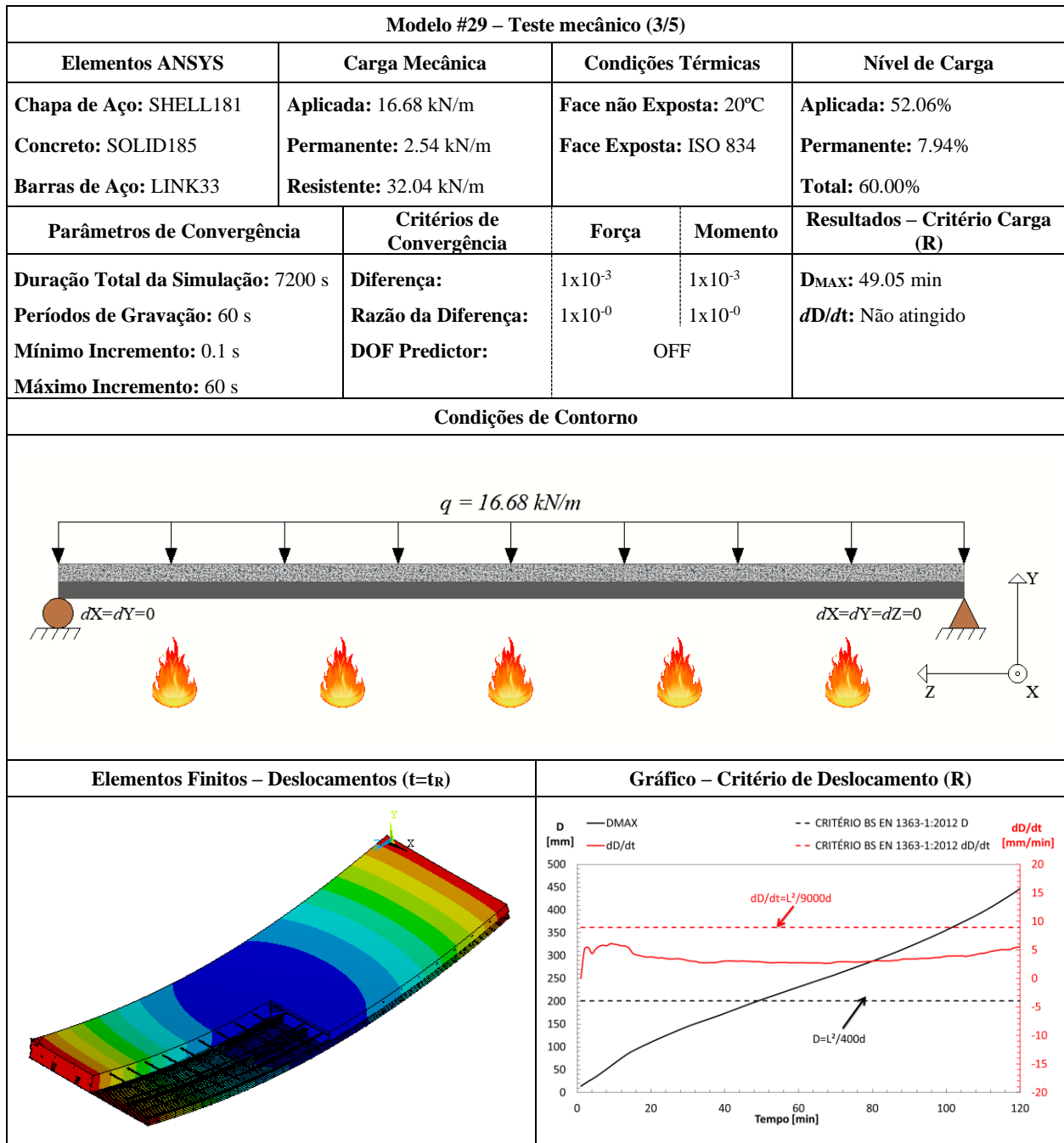


FICHA TÉCNICA			
Modelo #29 – Bondeck – 60 mm			
Modelo #29 – Dados Básicos (1/1)			
Tipo de Experimento	Título: Bondeck (AUS) / H ₁ =60 mm		
Estudo Paramétrico	Autor(es): Santos, L. M. C.	Ano: 2019	
Detalhamento			
Chapa de Aço	Concreto	Barras de Aço	
Geometria: Reentrante Espessura (mm): 1.00 Classe do aço: S350	Densidade: Convencional Classe: C20/25 Umidade: 3.0%	Varões	Grelha de Reforço
		Descrição: Ø6//150 Classe do aço: S500	Descrição: 3Ø10 Classe do aço: S500
Secção Transversal			
Secção Longitudinal			
Modelo de Elementos Finitos			

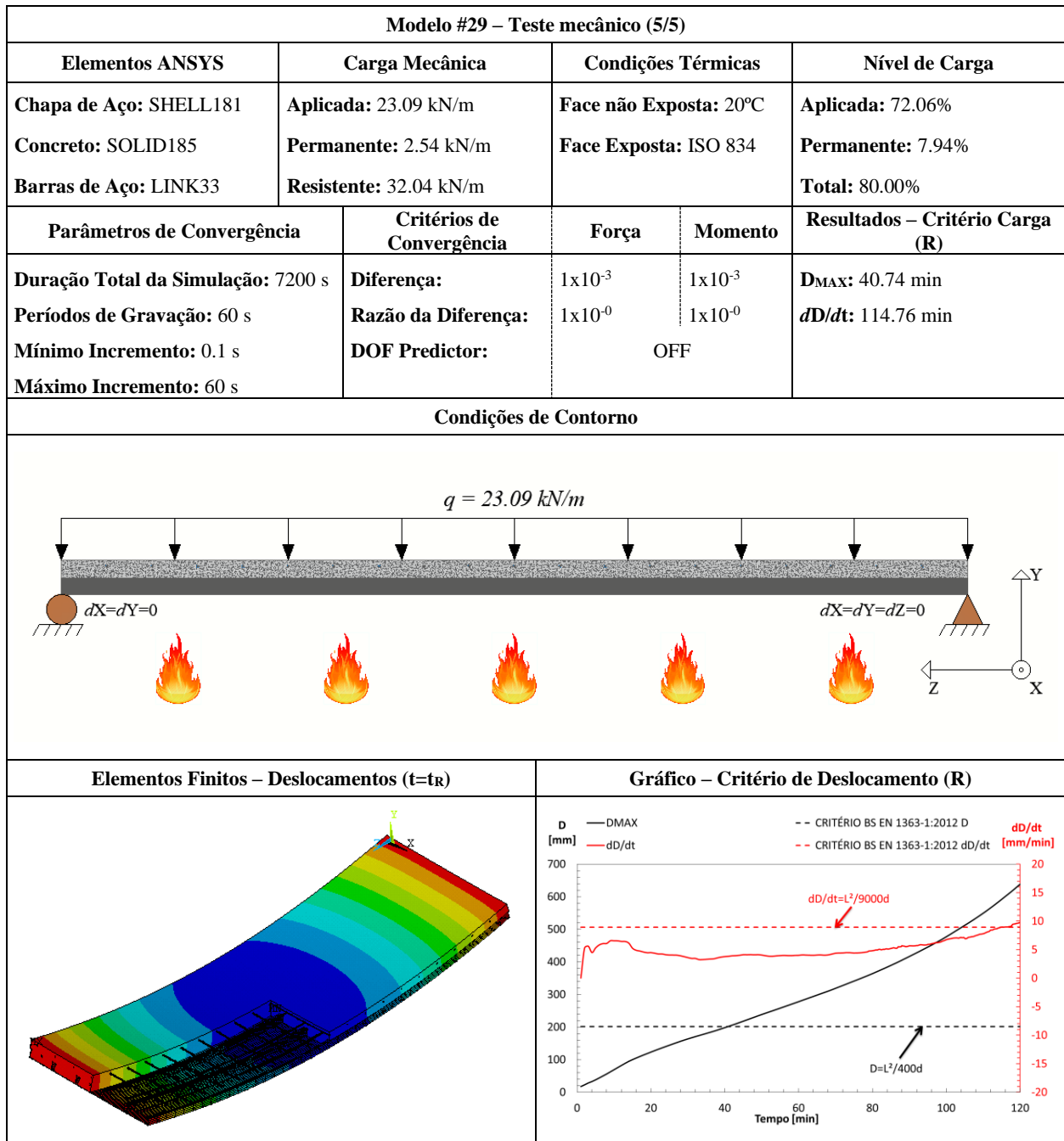
Modelo #29– Teste térmico (1/1)				
Elementos ANSYS	Coef. de Convecção (α_c)	Curvas de Temperatura	Fator de Vista (Φ)	Emissividade (ϵ)
Chapa de Aço: SHELL131 Concreto: SOLID70 Barras de Aço: LINK33	Sup. Exposta: 25 W/m ² K Sup. Ñ Exposta: 9 W/m ² K	Face não Exposta: 20°C Face Exposta: ISO 834	Flange Superior: 0.28 Alma: 0.18 Flange Inferior: 1.00	Chapa de Aço: 0.7 Concreto: 0.7 Barras de Aço: 0.7
Parâmetros de Convergência		Critérios de Convergência – Heat Flux		Resultados - Critério Isolamento (I)
Duração Total da Simulação: 7200 s Períodos de Gravação: 60 s Mínimo Incremento: 1 s Máximo Incremento: 60 s		Diferença: 1x10 ⁻³ Razão da Diferença: 1x10 ⁻⁶		T _{MAX} : 76.15 min T _{MED} : 79.52 min
Condições de Contorno			Elementos Finitos – Temperaturas (t=t _f)	
Gráfico – Critério de Isolamento (I)			Gráfico de Temperaturas na Secção da Laje	





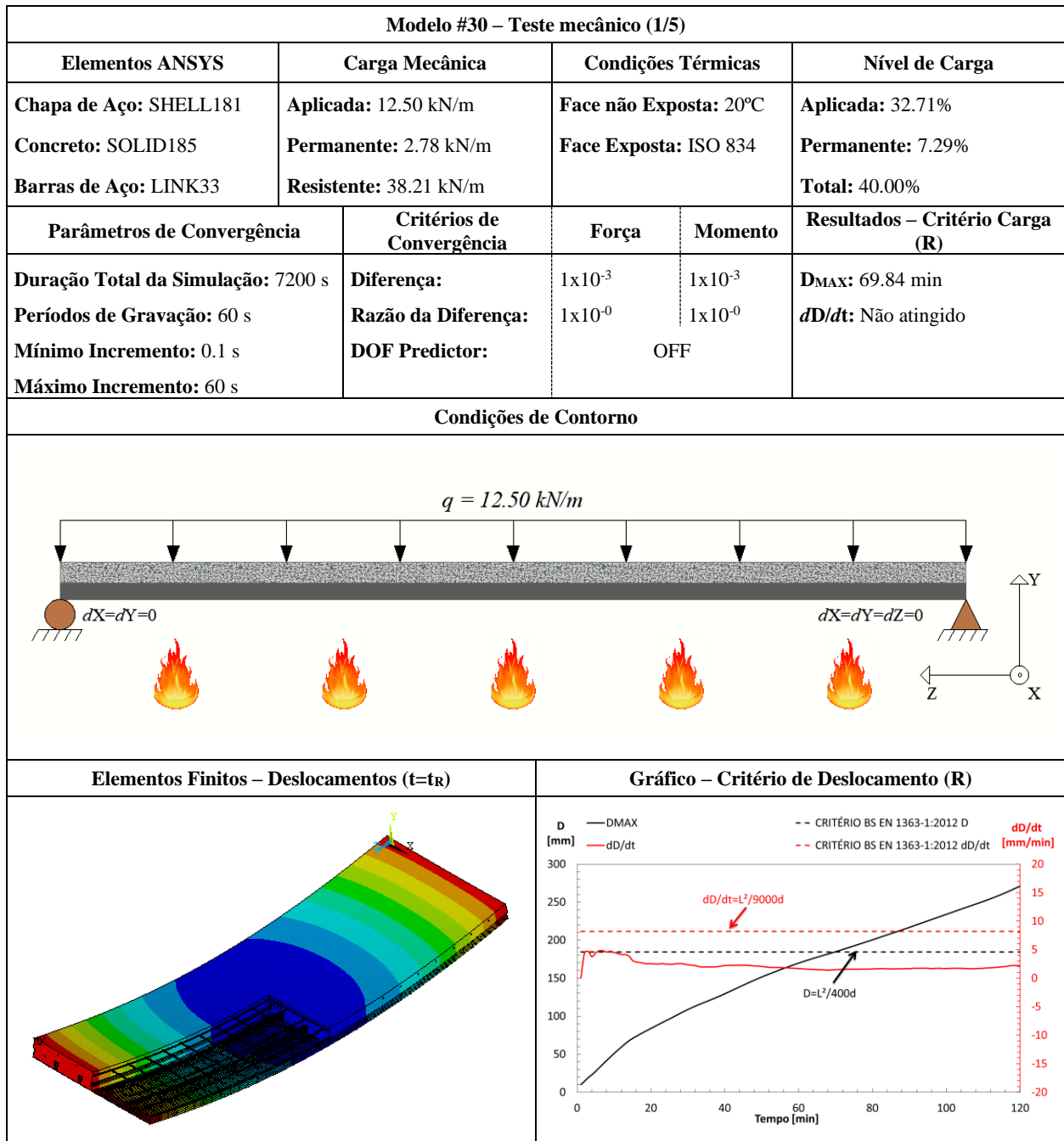


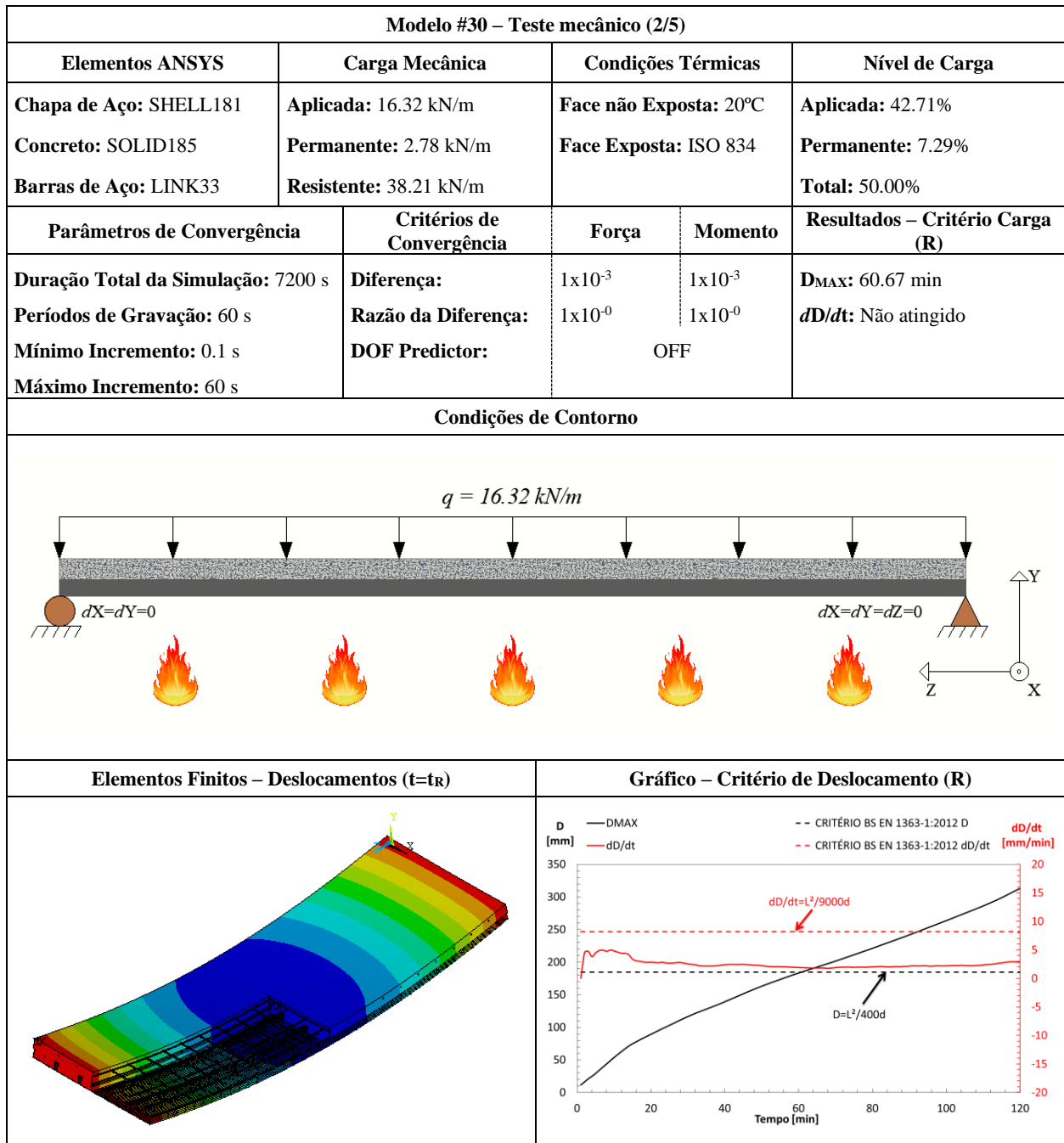
Modelo #29 – Teste mecânico (4/5)				
Elementos ANSYS	Carga Mecânica	Condições Térmicas		Nível de Carga
Chapa de Aço: SHELL181	Aplicada: 19.89 kN/m	Face não Exposta: 20°C		Aplicada: 62.06%
Concreto: SOLID185	Permanente: 2.54 kN/m	Face Exposta: ISO 834		Permanente: 7.94%
Barras de Aço: LINK33	Resistente: 32.04 kN/m			Total: 70.00%
Parâmetros de Convergência	Crítérios de Convergência	Força	Momento	Resultados – Critério Carga (R)
Duração Total da Simulação: 7200 s	Diferença:	1×10^{-3}	1×10^{-3}	D _{MAX} : 44.62 min
Períodos de Gravação: 60 s	Razão da Diferença:	1×10^{-0}	1×10^{-0}	dD/dt: Não atingido
Mínimo Incremento: 0.1 s	DOF Predictor:	OFF		
Máximo Incremento: 60 s				
Condições de Contorno				
Elementos Finitos – Deslocamentos (t=t _R)		Gráfico – Critério de Deslocamento (R)		

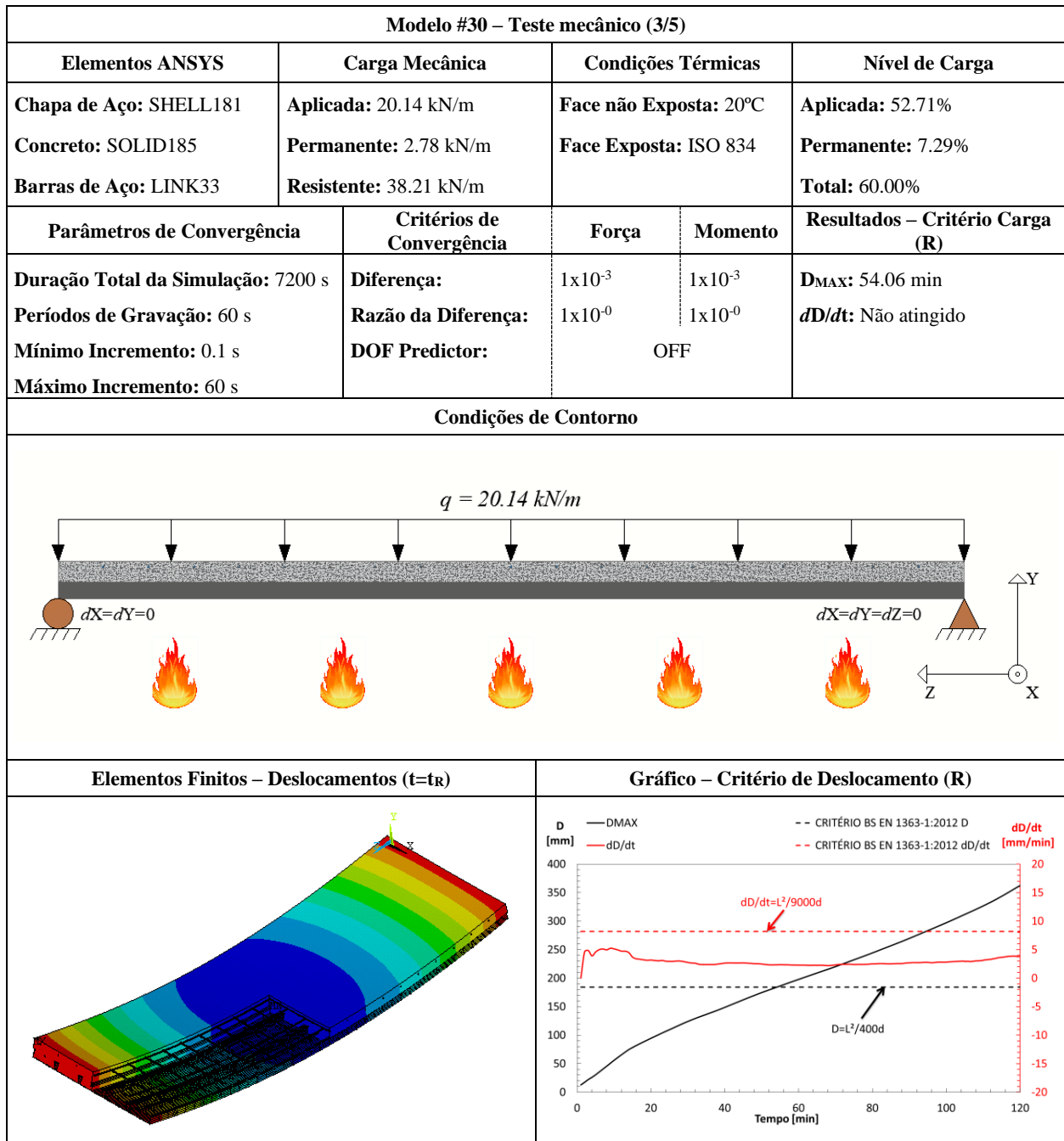


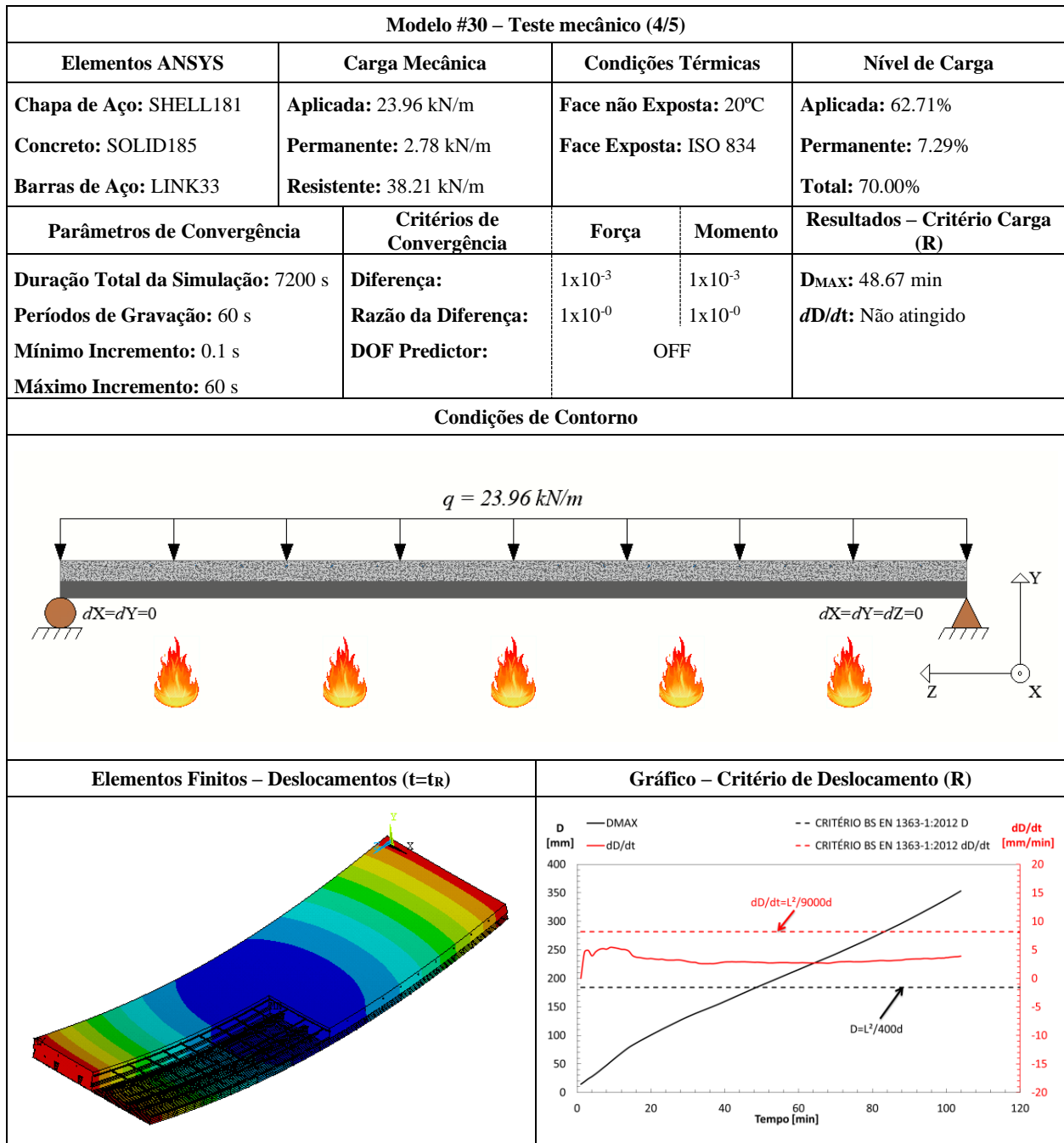
FICHA TÉCNICA		
Modelo #30 – Bondeck – 70 mm		
Modelo #30 – Dados Básicos (1/1)		
Tipo de Experimento	Título: Bondeck (AUS) / $H_1=70$ mm	
Estudo Paramétrico	Autor(es): Santos, L. M. C.	Ano: 2019
Detalhamento		
Chapa de Aço	Concreto	Barras de Aço
Geometria: Reentrante Espessura (mm): 1.00 Classe do aço: S350	Densidade: Convencional Classe: C20/25 Umidade: 3.0%	Varões
		Grelha de Reforço
		Descrição: $\text{Ø}6//150$ Classe do aço: S500
		Descrição: $3\text{Ø}10$ Classe do aço: S500
Secção Transversal		
Secção Longitudinal		
Modelo de Elementos Finitos		

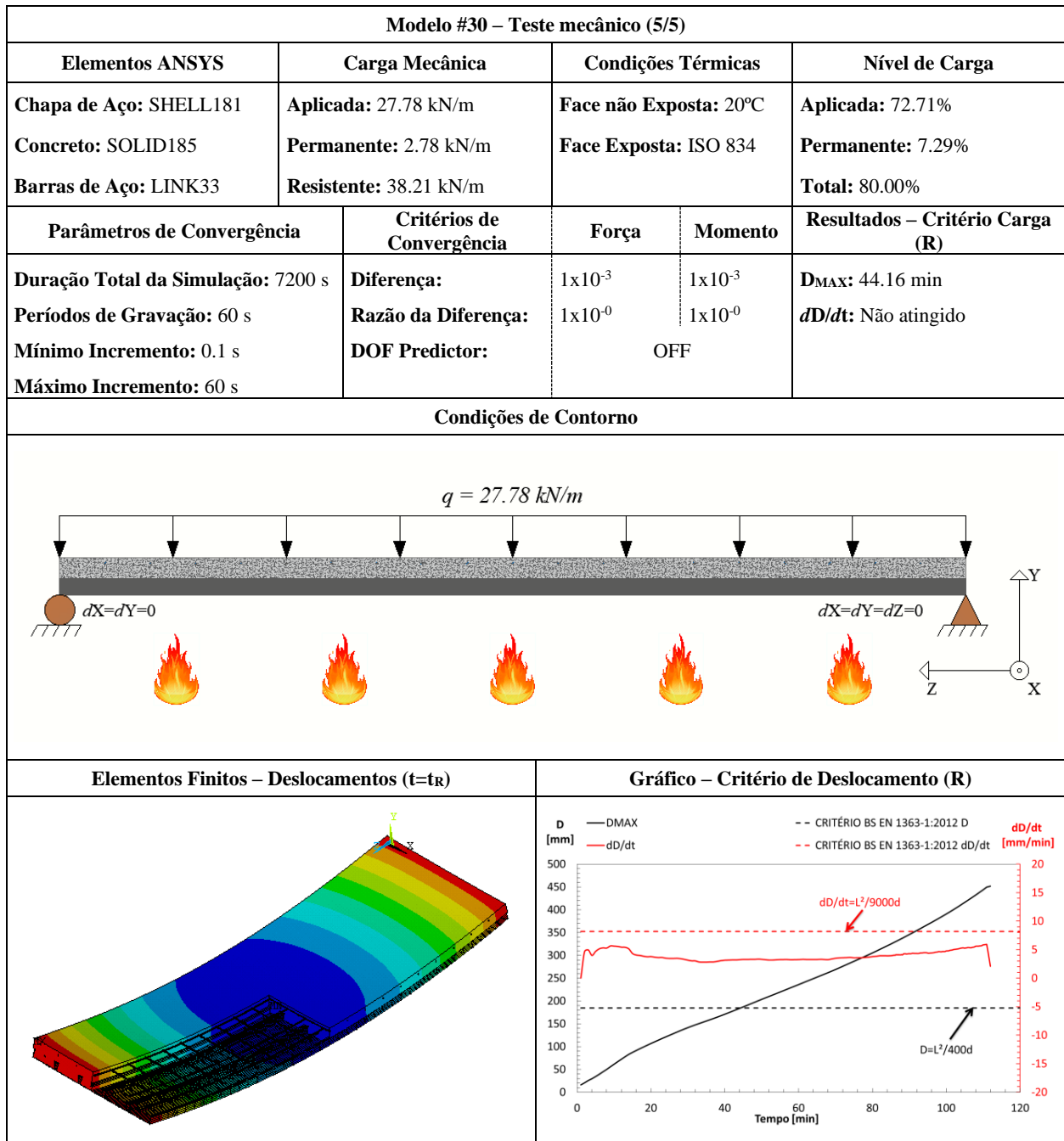
Modelo #30– Teste térmico (1/1)				
Elementos ANSYS	Coef. de Convecção (α_c)	Curvas de Temperatura	Fator de Vista (Φ)	Emissividade (ϵ)
Chapa de Aço: SHELL131 Concreto: SOLID70 Barras de Aço: LINK33	Sup. Exposta: 25 W/m ² K Sup. Ñ Exposta: 9 W/m ² K	Face não Exposta: 20°C Face Exposta: ISO 834	Flange Superior: 0.28 Alma: 0.18 Flange Inferior: 1.00	Chapa de Aço: 0.7 Concreto: 0.7 Barras de Aço: 0.7
Parâmetros de Convergência		Critérios de Convergência – Heat Flux		Resultados - Critério Isolamento (I)
Duração Total da Simulação: 7200 s Períodos de Gravação: 60 s Mínimo Incremento: 1 s Máximo Incremento: 60 s		Diferença: 1x10 ⁻³ Razão da Diferença: 1x10 ⁻⁶		T _{MAX} : 93.84 min T _{MED} : 93.83 min
Condições de Contorno			Elementos Finitos – Temperaturas (t=t _i)	
Gráfico – Critério de Isolamento (I)			Gráfico de Temperaturas na Secção da Laje	





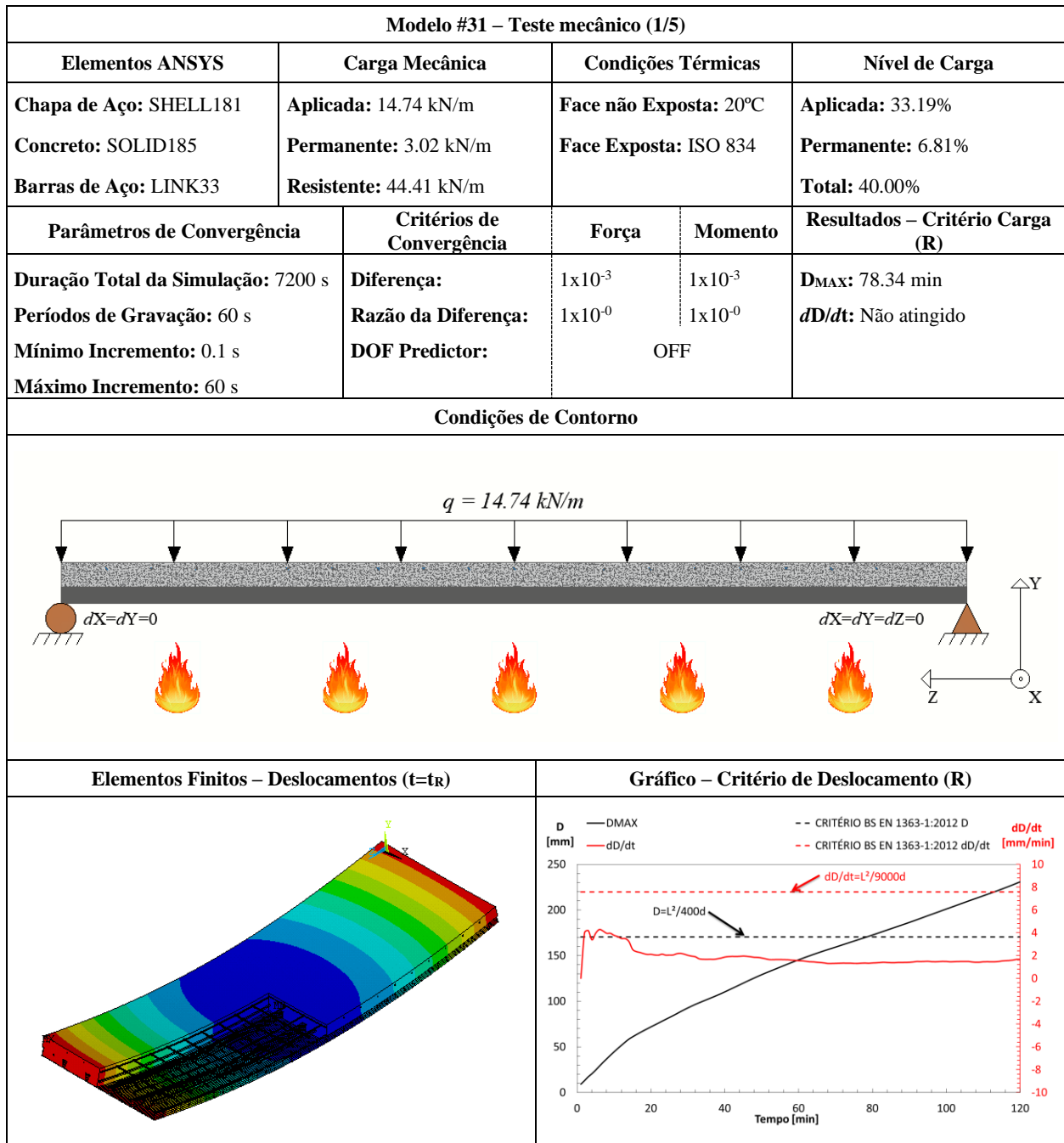


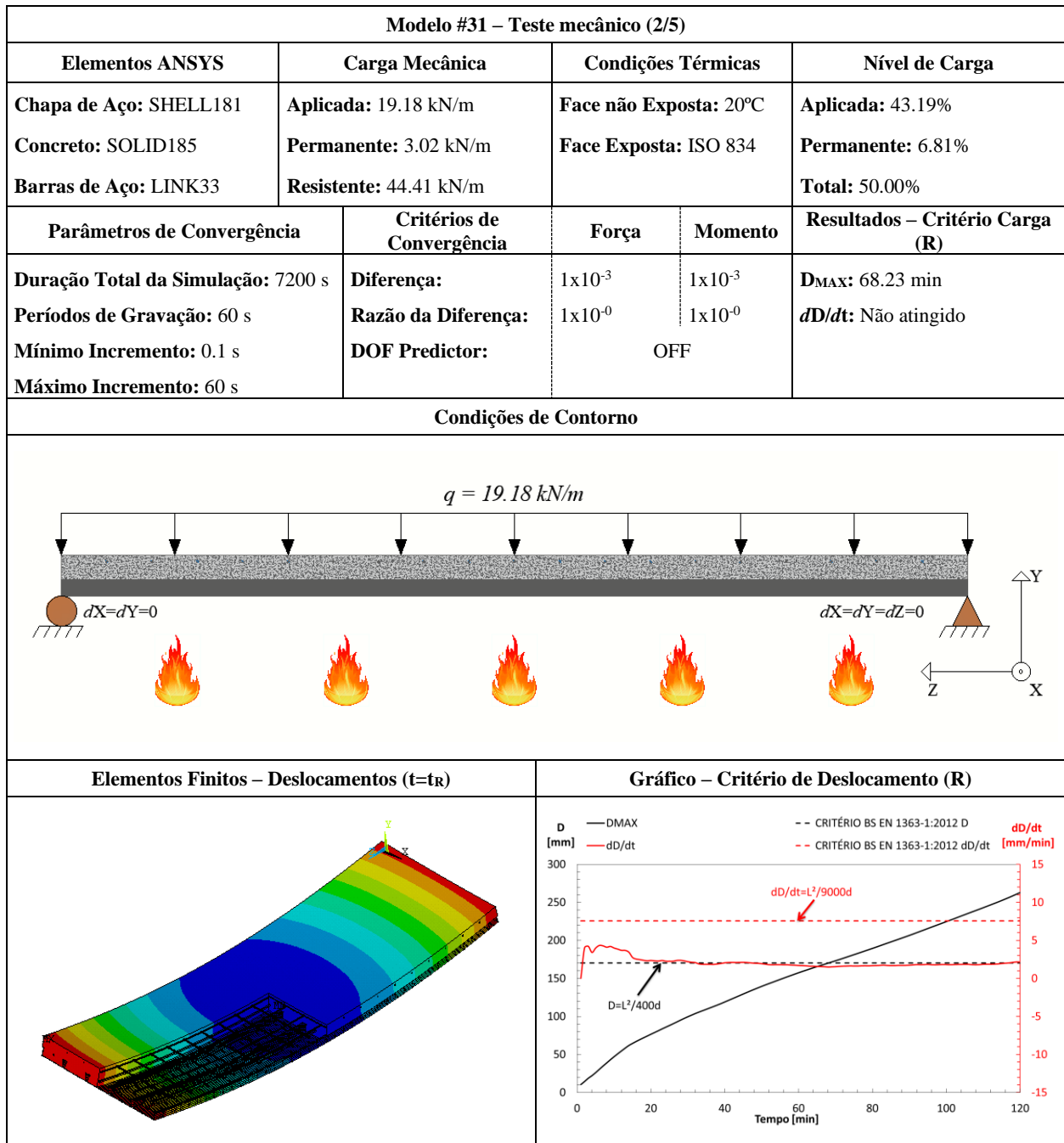


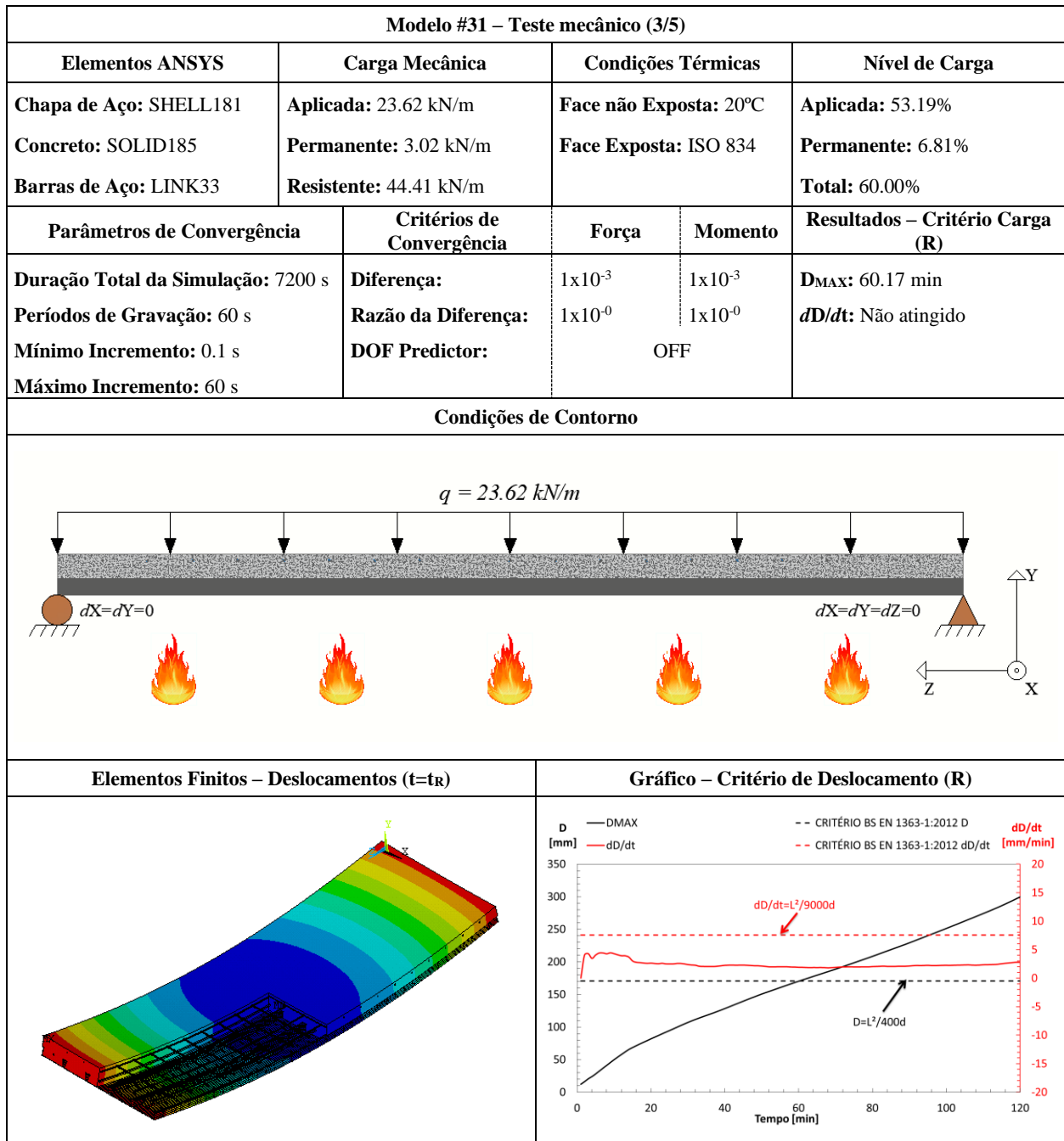


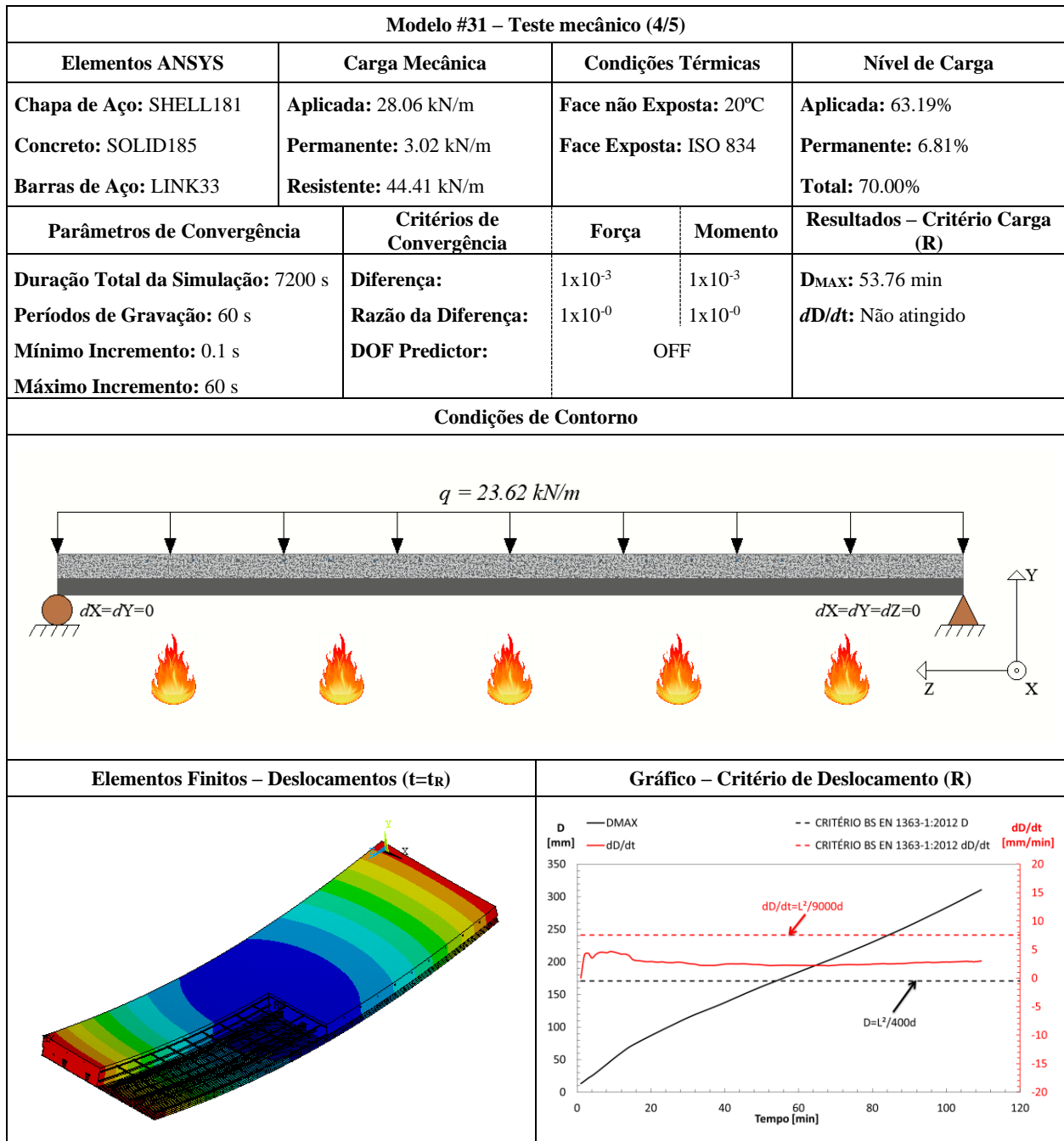
FICHA TÉCNICA			
Modelo #31 – Bondeck – 80 mm			
Modelo #31 – Dados Básicos (1/1)			
Tipo de Experimento	Título: Bondeck (AUS) / H ₁ =80 mm		
Estudo Paramétrico	Autor(es): Santos, L. M. C.	Ano: 2019	
Detalhamento			
Chapa de Aço	Concreto	Barras de Aço	
Geometria: Reentrante Espessura (mm): 1.00 Classe do aço: S350	Densidade: Convencional Classe: C20/25 Umidade: 3.0%	Varões	Grelha de Reforço
		Descrição: Ø6//150 Classe do aço: S500	Descrição: 3Ø10 Classe do aço: S500
Secção Transversal			
Secção Longitudinal			
Modelo de Elementos Finitos			

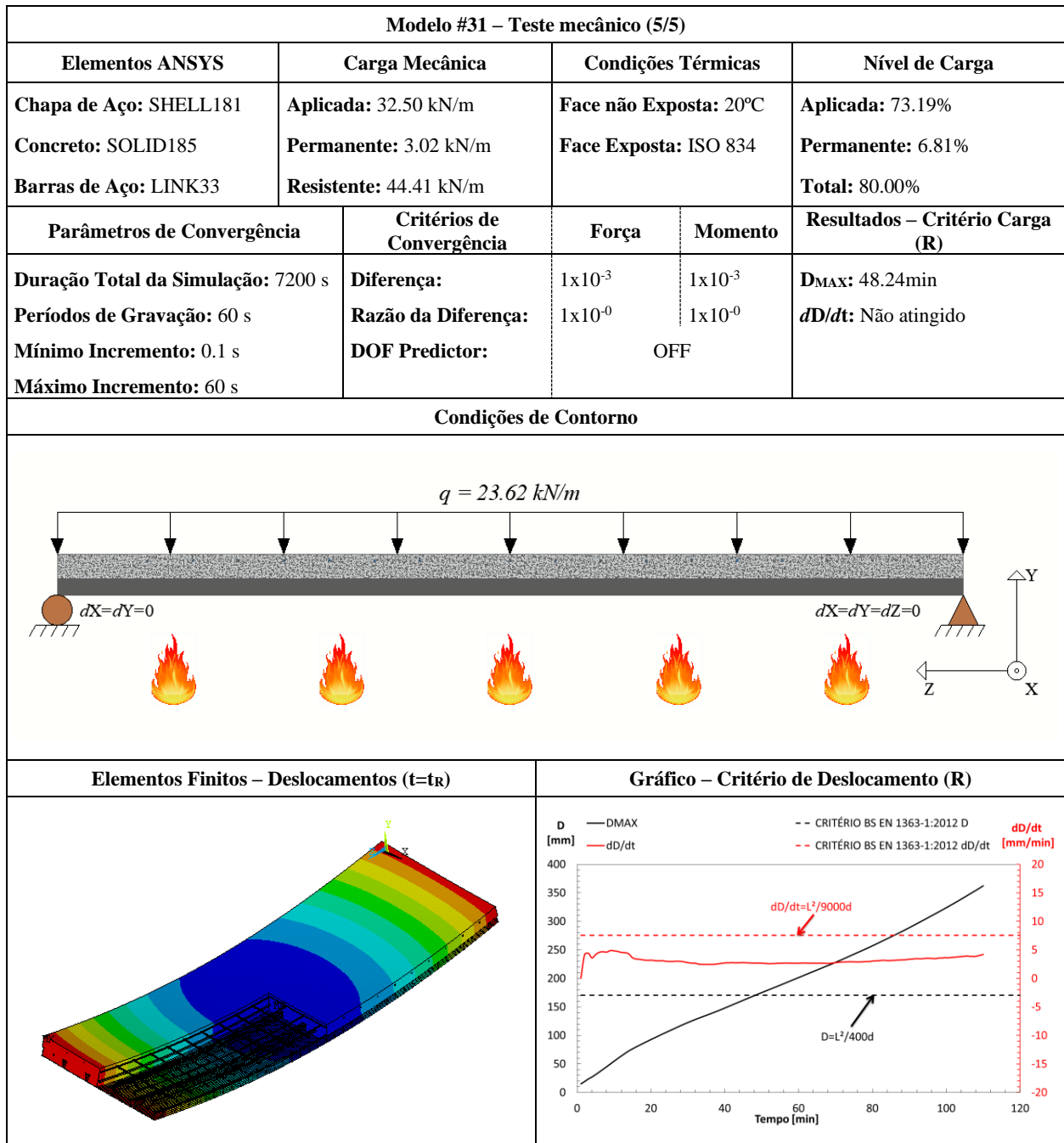
Modelo #31– Teste térmico (1/1)				
Elementos ANSYS	Coef. de Convecção (α_c)	Curvas de Temperatura	Fator de Vista (Φ)	Emissividade (ϵ)
Chapa de Aço: SHELL131 Concreto: SOLID70 Barras de Aço: LINK33	Sup. Exposta: 25 W/m ² K Sup. Ñ Exposta: 9 W/m ² K	Face não Exposta: 20°C Face Exposta: ISO 834	Flange Superior: 0.28 Alma: 0.18 Flange Inferior: 1.00	Chapa de Aço: 0.7 Concreto: 0.7 Barras de Aço: 0.7
Parâmetros de Convergência		Critérios de Convergência – Heat Flux		Resultados - Critério Isolamento (I)
Duração Total da Simulação: 7200 s Períodos de Gravação: 60 s Mínimo Incremento: 1 s Máximo Incremento: 60 s		Diferença: 1x10 ⁻³ Razão da Diferença: 1x10 ⁻⁶		T _{MAX} : 113.11 min T _{MED} : 107.52 min
Condições de Contorno			Elementos Finitos – Temperaturas (t=t _i)	
Gráfico – Critério de Isolamento (I)			Gráfico de Temperaturas na Secção da Laje	





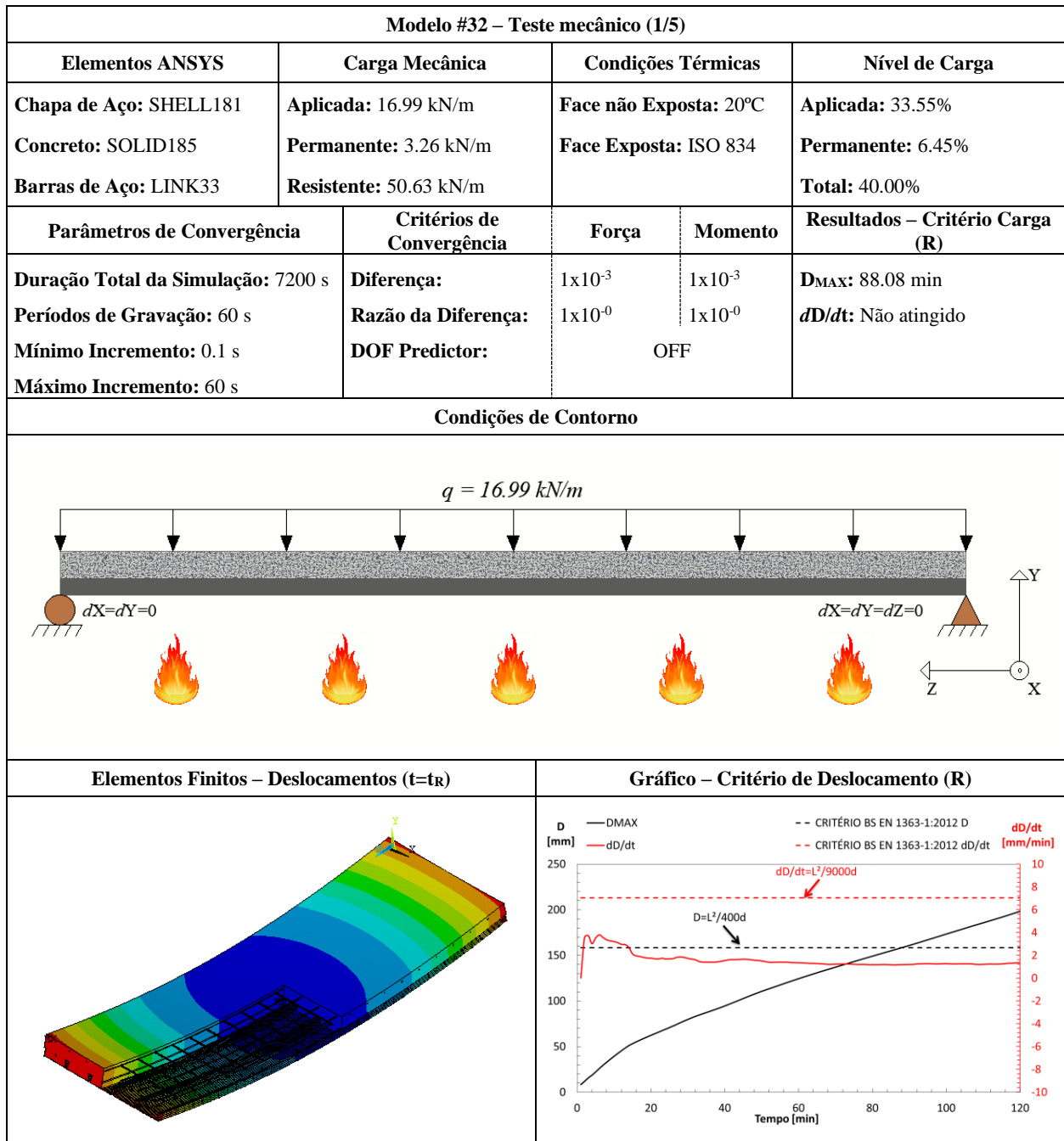


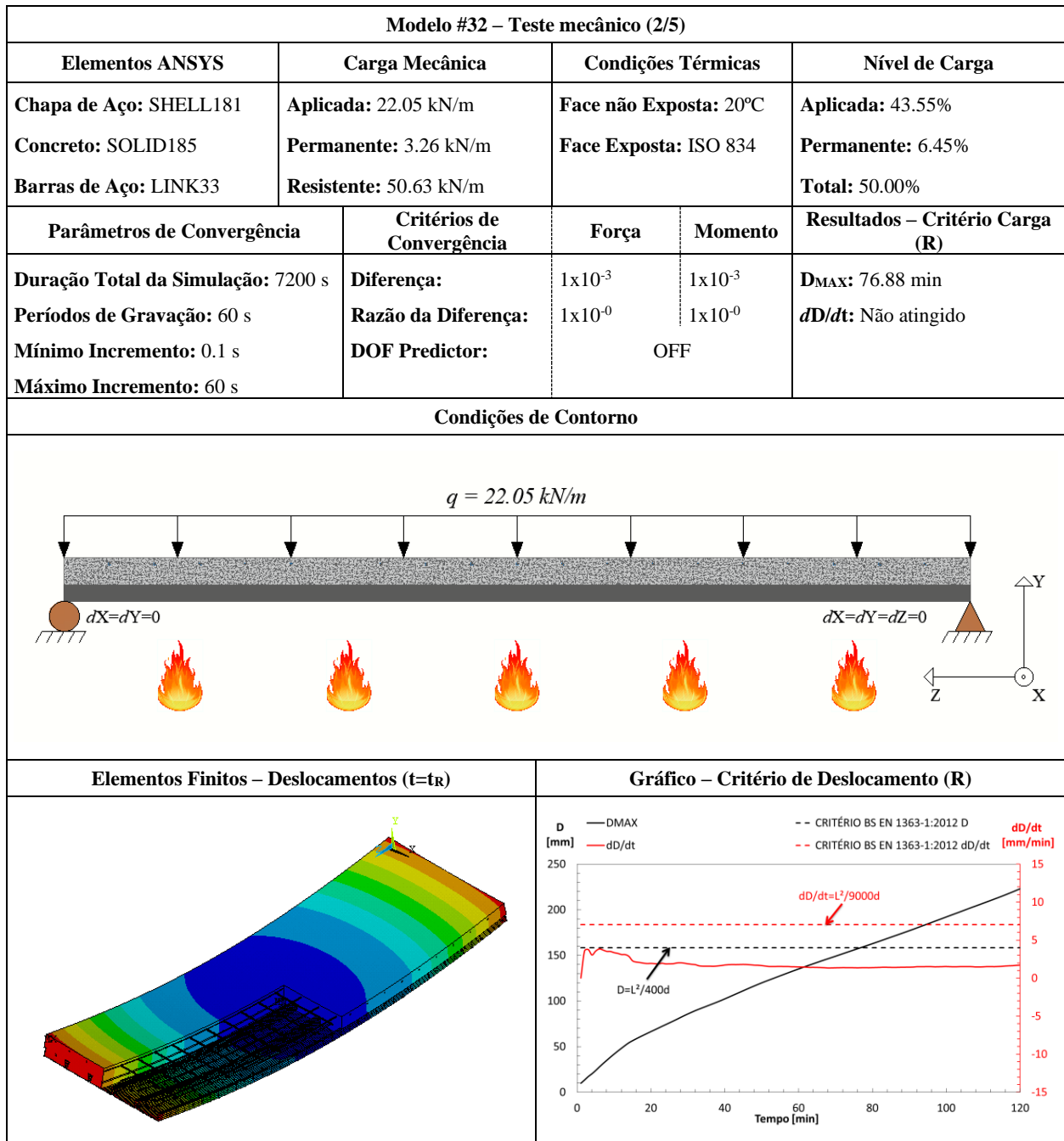




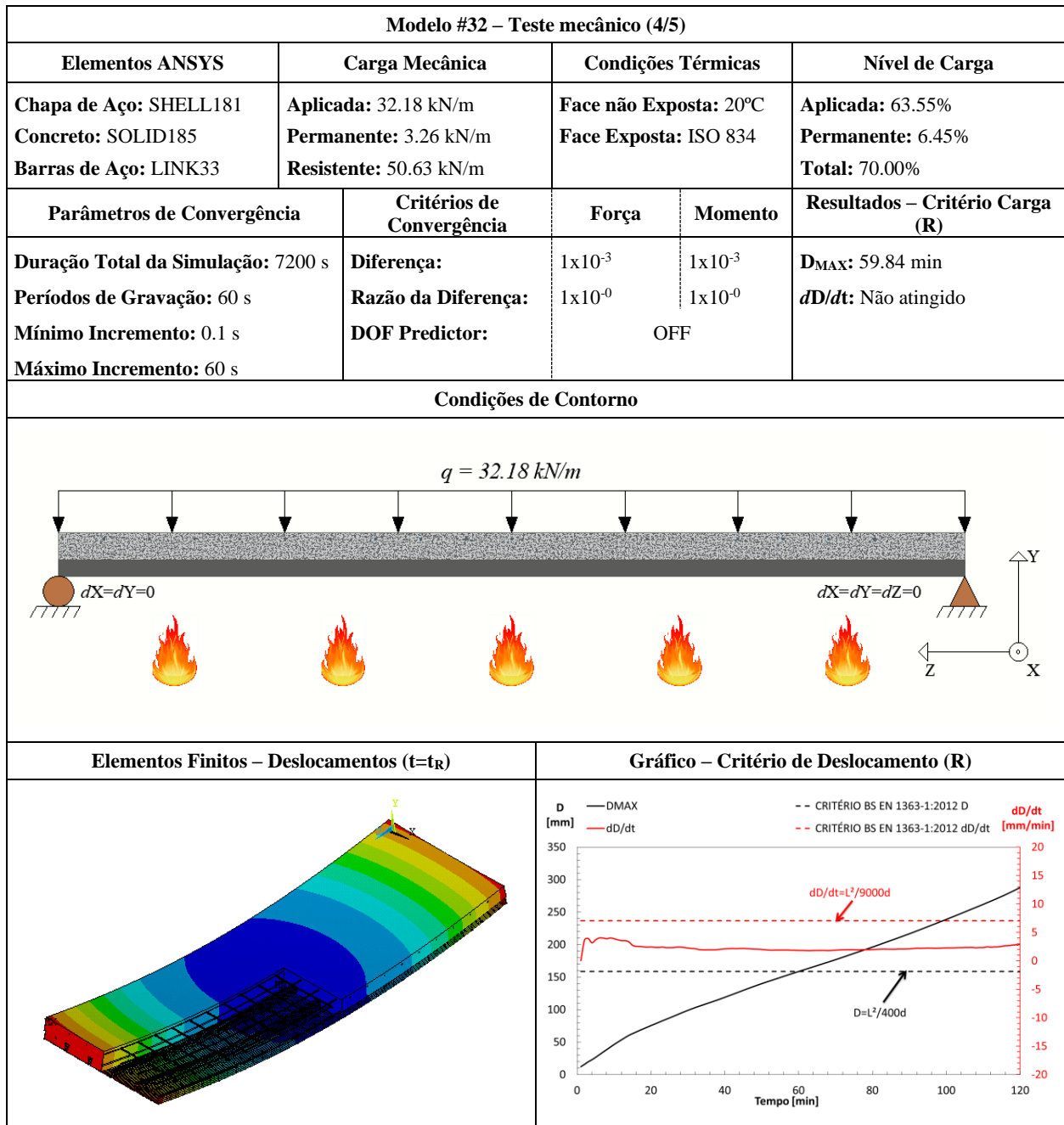
FICHA TÉCNICA			
Modelo #32 – Bondeck – 90 mm			
Modelo #32 – Dados Básicos (1/1)			
Tipo de Experimento	Título: Bondeck (AUS) / $H_1=90$ mm		
Estudo Paramétrico	Autor(es): Santos, L. M. C.	Ano: 2019	
Detalhamento			
Chapa de Aço	Concreto	Barras de Aço	
Geometria: Reentrante Espessura (mm): 1.00 Classe do aço: S350	Densidade: Convencional Classe: C20/25 Umidade: 3.0%	Varões	Grelha de Reforço
		Descrição: $\varnothing 6//150$ Classe do aço: S500	Descrição: $3\varnothing 10$ Classe do aço: S500
Secção Transversal			
Secção Longitudinal			
Modelo de Elementos Finitos			

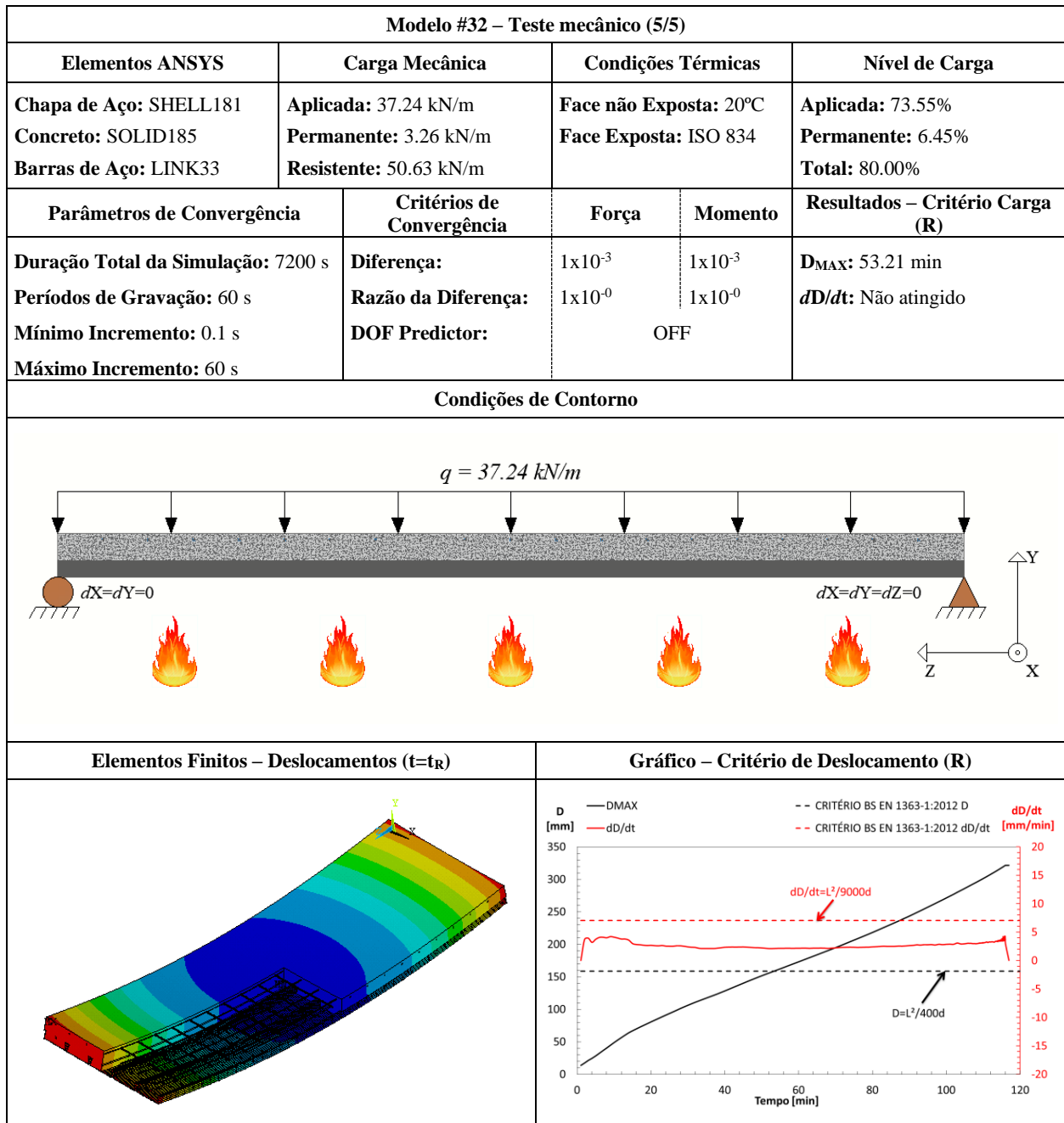
Modelo #32– Teste térmico (1/1)				
Elementos ANSYS	Coef. de Convecção (α_c)	Curvas de Temperatura	Fator de Vista (Φ)	Emissividade (ϵ)
Chapa de Aço: SHELL131 Concreto: SOLID70 Barras de Aço: LINK33	Sup. Exposta: 25 W/m ² K Sup. Ñ Exposta: 9 W/m ² K	Face não Exposta: 20°C Face Exposta: ISO 834	Flange Superior: 0.28 Alma: 0.18 Flange Inferior: 1.00	Chapa de Aço: 0.7 Concreto: 0.7 Barras de Aço: 0.7
Parâmetros de Convergência		Critérios de Convergência – Heat Flux		Resultados - Critério Isolamento (I)
Duração Total da Simulação: 7200 s Períodos de Gravação: 60 s Mínimo Incremento: 1 s Máximo Incremento: 60 s		Diferença: 1x10 ⁻³ Razão da Diferença: 1x10 ⁻⁶		T _{MAX} : Não atingido T _{MED} : Não atingido
Condições de Contorno			Elementos Finitos – Temperaturas (t=7200 s)	
Gráfico – Critério de Isolamento (I)			Gráfico de Temperaturas na Secção da Laje	





Modelo #32 – Teste mecânico (3/5)				
Elementos ANSYS	Carga Mecânica	Condições Térmicas		Nível de Carga
Chapa de Aço: SHELL181 Concreto: SOLID185 Barras de Aço: LINK33	Aplicada: 27.11 kN/m Permanente: 3.26 kN/m Resistente: 50.63 kN/m	Face não Exposta: 20°C Face Exposta: ISO 834		Aplicada: 53.55% Permanente: 6.45% Total: 60.00%
Parâmetros de Convergência	CrITÉrios de Convergência	Força	Momento	Resultados – Critério Carga (R)
Duração Total da Simulação: 7200 s Períodos de Gravação: 60 s Mínimo Incremento: 0.1 s Máximo Incremento: 60 s	Diferença: Razão da Diferença: DOF Predictor:	1×10^{-3} 1×10^{-0}	1×10^{-3} 1×10^{-0} OFF	D _{MAX} : 67.70 min dD/dt : Não atingido
Condições de Contorno				
Elementos Finitos – Deslocamentos (t=t _R)		Gráfico – Critério de Deslocamento (R)		





FICHA TÉCNICA			
Modelo #33 – Bondeck – 100 mm			
Modelo #33 – Dados Básicos (1/1)			
Tipo de Experimento	Título: Bondeck (AUS) / H ₁ =100 mm		
Estudo Paramétrico	Autor(es): Santos, L. M. C.	Ano: 2019	
Detalhamento			
Chapa de Aço	Concreto	Barras de Aço	
Geometria: Reentrante Espessura (mm): 1.00 Classe do aço: S350	Densidade: Convencional Classe: C20/25 Umidade: 3.0%	Varões	Grelha de Reforço
		Descrição: Ø6//150 Classe do aço: S500	Descrição: 3Ø10 Classe do aço: S500
Secção Transversal			
Secção Longitudinal			
Modelo de Elementos Finitos			

Modelo #33– Teste térmico (1/1)				
Elementos ANSYS	Coef. de Convecção (α_c)	Curvas de Temperatura	Fator de Vista (Φ)	Emissividade (ϵ)
Chapa de Aço: SHELL131 Concreto: SOLID70 Barras de Aço: LINK33	Sup. Exposta: 25 W/m ² K Sup. Ñ Exposta: 9 W/m ² K	Face não Exposta: 20°C Face Exposta: ISO 834	Flange Superior: 0.28 Alma: 0.18 Flange Inferior: 1.00	Chapa de Aço: 0.7 Concreto: 0.7 Barras de Aço: 0.7
Parâmetros de Convergência		Critérios de Convergência – Heat Flux		Resultados - Critério Isolamento (I)
Duração Total da Simulação: 7200 s Períodos de Gravação: 60 s Mínimo Incremento: 1 s Máximo Incremento: 60 s		Diferença: 1x10 ⁻³ Razão da Diferença: 1x10 ⁻⁶		T _{MAX} : Não atingido T _{MED} : Não atingido
Condições de Contorno			Elementos Finitos – Temperaturas (t=7200 s)	
Gráfico – Critério de Isolamento (I)			Gráfico de Temperaturas na Secção da Laje	

FICHA TÉCNICA			
Modelo #34 – Bondeck – 110 mm			
Modelo #34 – Dados Básicos (1/1)			
Tipo de Experimento	Título: Bondeck (AUS) / H ₁ =110 mm		
Estudo Paramétrico	Autor(es): Santos, L. M. C.		Ano: 2019
Detalhamento			
Chapa de Aço	Concreto	Barras de Aço	
Geometria: Reentrante Espessura (mm): 1.00 Classe do aço: S350	Densidade: Convencional Classe: C20/25 Umidade: 3.0%	Varões	Grelha de Reforço
		Descrição: Ø6//150 Classe do aço: S500	Descrição: 3Ø10 Classe do aço: S500
Secção Transversal			
Secção Longitudinal			
Modelo de Elementos Finitos			

Modelo #34– Teste térmico (1/1)				
Elementos ANSYS	Coef. de Convecção (α_c)	Curvas de Temperatura	Fator de Vista (Φ)	Emissividade (ϵ)
Chapa de Aço: SHELL131 Concreto: SOLID70 Barras de Aço: LINK33	Sup. Exposta: 25 W/m ² K Sup. Ñ Exposta: 9 W/m ² K	Face não Exposta: 20°C Face Exposta: ISO 834	Flange Superior: 0.28 Alma: 0.18 Flange Inferior: 1.00	Chapa de Aço: 0.7 Concreto: 0.7 Barras de Aço: 0.7
Parâmetros de Convergência		Critérios de Convergência – Heat Flux		Resultados - Critério Isolamento (I)
Duração Total da Simulação: 7200 s Períodos de Gravação: 60 s Mínimo Incremento: 1 s Máximo Incremento: 60 s		Diferença: 1x10 ⁻³ Razão da Diferença: 1x10 ⁻⁶		T _{MAX} : Não atingido T _{MED} : Não atingido
Condições de Contorno			Elementos Finitos – Temperaturas (t=7200 s)	
Gráfico – Critério de Isolamento (I)			Gráfico de Temperaturas na Secção da Laje	