



MARCILIO MARIANO ALENCAR FILHO

**INFLUÊNCIA DA FASE DE ARREFECIMENTO NA
RESISTÊNCIA DE LAJES MISTAS EM SITUAÇÃO DE INCÊNDIO**

Outubro-2020



MARCÍLIO MARIANO ALENCAR FILHO

**INFLUÊNCIA DA FASE DE ARREFECIMENTO NA
RESISTÊNCIA DE LAJES MISTAS EM SITUAÇÃO DE INCÊNDIO**

Dissertação desenvolvida no âmbito de Dupla Diplomação
apresentada ao **Instituto Federal de Alagoas**
e à **Escola Superior de Tecnologia e de Gestão**
Instituto Politécnico de Bragança
para obtenção do grau de bacharel em **Engenharia Civil**
e mestre em **Engenharia da Construção**

Orientadores:

Prof. Dr. Paulo Alexandre Gonçalves Piloto (IPB)

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

Coorientador:

Prof. Me. Jackson Pedrosa de Farias (IFAL)

Outubro – 2020

*“A felicidade pode ser encontrada mesmo nas horas
mais difíceis, se você lembrar de acender a luz”*

Obrigado, Bragança.

AGRADECIMENTOS

Primeiramente não poderia deixar de agradecer aos meus pais, aos meus irmãos, e meus avós que sempre estiveram comigo e tornaram essa minha jornada possível. Agareço também a minha mardinha Herlei Mariano, que sempre me incentivou nos estudos.

Aos meus orientadores Dr. Paulo Piloto, Dr. Carlos Balsa e meu coorientador Me. Jackson Pedrosa, que tanto contribuíram para minha formação acadêmica, bem como à todos os docentes do Instituto Federal de Alagoas – Campus Palmeira do Índios, em especial aos professores Dr. Rodrigo Lustosa e Dra. Sheyla Marques que me auxiliaram no início dessa jornada.

À todos meus amigos que me acompanharam durante minhas dificuldades e conquistas, aos que conheci no Brasil, e aos que conheci durante o intercâmbio.

Agradeço em especial à minhas amigas de graduação Erica Lopes, Iana Maria e Karoline Queiroz, que tanto me ajudaram e contribuíram durante todo o curso.

À Beatriz Ricardo, Guilherme Vaz e Marcelo Martins, que estiveram comigo durante os momentos mais difíceis dessa jornada, mesmo que à distância.

Por fim, agradeço em especial ao Dionatan Gerber, que esteve ao meu lado e se fez presente durante essa etapa da minha vida.

Obrigado a todos!

RESUMO

As lajes mistas de concreto com chapa de aço colaborante oferecem uma alternativa mais eficiente e econômica se comparada às lajes convencionais. Dentre as vantagens apresentadas pelas lajes mistas, está a redução no uso do concreto, que resulta em um menor peso próprio da estrutura, além da redução no tempo de execução, uma vez que é a forma de aço que age como confragem permanente.

Apesar das vantagens apresentadas, a presença da chapa de aço nas lajes mistas promove uma desvantagem no que diz respeito à resistência ao fogo. Devido à sensibilidade das propriedades térmicas e mecânicas do aço, quando as chapas são expostas ao fogo, apresentam uma rápida perda de suas propriedades mecânicas.

O Eurocódigo 4 – Parte 2 aborda os métodos de projeto e de cálculo para a verificação das lajes mistas em situação de incêndio, no entanto, assim como a maioria dos estudos existentes envolvendo lajes mistas em condição de incêndio, apenas a fase de aquecimento é considerada, seguindo o cenário padrão de incêndio descrito pela curva ISO 834.

Entretanto, estudos recentes mostram que a fase de arrefecimento do incêndio é igualmente importante, pois pode levar ao colapso tardio da estrutura. Portanto, a presente pesquisa apresenta os efeitos da espessura da camada de concreto, e da fase de arrefecimento na resistência ao fogo de lajes mistas com chapa de aço colaborante.

Para a realização da investigação foram utilizados modelos numéricos desenvolvidos nos programas MATLAB e ANSYS, validados através de resultados experimentais registrados por outros autores.

Além disso, foi elaborado um estudo paramétrico, realizando 128 simulações, utilizando os modelos numéricos desenvolvidos, para propor novas formulações que estimem o tempo de resistência ao isolamento (I) e descrevam o comportamento térmico dos componentes de lajes mistas em situação de incêndio natural.

Palavras-Chave: Lajes Mistas, Resistência ao fogo, Incêndio natural, Modelo numérico.

ABSTRACT

Composite slabs with steel deck offer a more efficient and economical alternative compared to conventional slabs. Among the advantages presented by composite slabs, is the reduction in the use of concrete, which results in a lower weight of the structure, besides the reduction in the execution time, since it is the steel deck acts as permanent confection.

Despite the advantages presented, the presence of the steel deck in the composite slabs promotes a disadvantage with regard to fire resistance. Due to the sensitivity of the thermal and mechanical properties of steel, when the deck is exposed to fire, they present a rapid loss of their mechanical properties.

Eurocode 4 - Part 2 addresses the design and calculation methods for the verification of mixed slabs in fire situations. However, like most existing studies involving composite slabs in fire condition, only the heating phase is considered, following the standard fire scenario described by the ISO 834 curve.

However, recent studies show that the cooling phase of the fire is equally important, as it can lead to late collapse of the structure. Therefore, this research presents the effects of the concrete thickness, and the cooling phase on the fire resistance of composite slabs with steel deck.

Numerical models developed in MATLAB and ANSYS programs, validated through experimental results registered by other authors, were used for the research.

In addition, a parametric study was carried out, performing 128 simulations, using the numerical models developed, to propose new formulations that estimate the insulation resistance time (I) and describe the thermal behavior of the components of composite slabs in a natural fire situation.

Keywords: Composite slabs, Fire resistance, Natural fire, Numerical model.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1: Perfis geométricos de chapa de aço colaborante: (a) Trapezóidal, (b) Reentrante, (c) Flatdeck.....	17
Figura 2: Parâmetros geométricos do perfil metálico Multideck 50.....	26
Figura 3: Parâmetros geométricos do perfil metálico Bondeck.....	27
Figura 4: Parâmetros geométricos do perfil metálico Polideck 59S.....	27
Figura 5: Parâmetros geométricos do perfil metálico Confraplus 60.....	28
Figura 6: Disposição geométrica das lajes modeladas. (a) Perfil Multideck 50, (b) Perfil Bondeck, (c) Perfil Polideck 59S, (d) Perfil Confraplus 60.....	28
Figura 7: Disposição das armaduras nos modelos utilizados no estudo paramétrico.	29
Figura 8: Diagrama dos modelos térmicos desenvolvidos.....	30
Figura 9: Comparação entre as curvas de incêndio natural e padrão.....	32
Figura 10: Exemplos de curvas paramétricas variando fator de abertura.....	35
Figura 11: Exemplos de curvas paramétricas variando a densidade de carga de incêndio.	36
Figura 12: Parâmetros para determinação dos fatores de vista: (a) Perfil trapezoidal, (b) Perfil reentrante.....	43
Figura 13: Fatores de vista: (a) Perfil trapezoidal, (b) Perfil reentrante.....	43
Figura 14: Calor específico do aço.....	45
Figura 15: Condutividade térmica do aço.....	46
Figura 16: Calor específico do concreto.....	47
Figura 17: Limites da condutividade térmica do concreto.....	48
Figura 18: Formulações alternativas de condutividade do concreto durante as fases de aquecimento e arrefecimento.....	50
Figura 19: Densidade do concreto.....	51
Figura 20: Propriedades térmicas do ar.....	52
Figura 21: Gráfico de tensão x deformação do aço [41].....	54
Figura 22: Gráfico de tensão <i>versus</i> deformação do concreto [42].	56
Figura 23: Laje mista simplesmente apoiada submetida a carregamento uniformemente distribuído.....	60
Figura 24: Componentes da laje mista em que deve ser calculada a temperatura no método simplificado.....	60

Figura 25: Parâmetros para a posição dos varões de aço: (a) Perfil trapezoidal, (b) Perfil reentrante [36].	62
Figura 26: Curvas de incêndio natural utilizadas nos modelos térmicos.	64
Figura 27: Condições de fronteira adotadas para as lajes mistas em incêndio natural. ..	66
Figura 28: Geometria da laje mista gerada no programa MATLAB.	66
Figura 29: Malha de elementos finitos da laje mista no programa MATLAB.	66
Figura 30: Configuração dos nós e camadas do elemento SHELL131.	68
Figura 31: Elemento finito SHELL131.	68
Figura 32: Parâmetros referentes a espessura do elemento SHELL131.	69
Figura 33: Configuração dos nós do elemento SOLID70.	70
Figura 34: Elemento finito SOLID70.	70
Figura 35: Configuração dos nós do elemento LINK33.	71
Figura 36: Elemento finito LINK33.	71
Figura 37: Ensaio de laje mista submetida a carregamento mecânico em incêndio natural (S. Guo [23]).	72
Figura 38: Configurações e disposições geométricas das lajes mistas ensaiadas (Adaptado de S. Guo, C.G. Bailey [22]).	72
Figura 39: Localização dos apoios, dos pontos de aplicação das cargas e do forno nas lajes mistas ensaiadas (Adaptado de S. Guo, C.G. Bailey [22]).	73
Figura 40: Curvas de temperatura do gás para os três cenários de incêndio natural ensaiados (Adaptado de S. Guo, C.G. Bailey [22]).	74
Figura 41: Pontos de medição da temperatura nas lajes de validação.	77
Figura 42: Comparação entre os modelos térmicos e valores experimentais dos pontos P4 e P6 da Laje 1.	77
Figura 43: Comparação entre o modelo térmico MAT.AG1 e valores experimentais dos pontos P4, P5 e P6 da Laje 1 utilizando as duas propostas de equações de condutividade térmica do concreto.	79
Figura 44: Comparação entre o modelo térmico ANSYS.CONV1 e valores experimentais dos pontos P4, P5 e P6 da Laje 1.	80
Figura 45: Comparação entre o modelo térmico ANSYS.CONV1, MAT.AG1 e valores e valores experimentais dos pontos P1, P2 e P3 da Laje 2.	81
Figura 46: Comparação entre o modelo térmico ANSYS.CONV1, MAT.AG1 e valores e valores experimentais dos pontos P1, P2 e P3 da Laje 3.	82

Figura 47: Comparação entre o modelo térmico ANSYS.CONV2 e valores experimentais dos pontos P4, P5 e P6 da Laje 1.	83
Figura 48: Disposição dos pontos de medição da temperatura nos modelos utilizados no estudo paramétrico.	84
Figura 49: Comparação entre os resultados obtidos nos programas ANSYS e MATLAB, da laje de perfil Confraplus 60, com cobertura de 40 mm e submetida a curva de incêndio Paramétrica 2.	85
Figura 50: Comparação entre os resultados obtidos nos programas ANSYS e MATLAB, da laje de perfil Confraplus 60, com cobertura de 100 mm e submetida a curva de incêndio Paramétrica 2.	85
Figura 51: Comparação entre as temperaturas máximas e mínimas na superfície não exposta da laje de perfil Confraplus 60, com cobertura de 100 mm e submetida a curva de incêndio Paramétrica 2.	86
Figura 52: Perfil de temperatura em lajes mistas com perfil reentrante no arrefecimento (ANSYS).	87
Figura 53: Perfil de temperatura da laje Confraplus no tempo de resistência ao Isolamento (ANSYS).	88
Figura 54: Curvas de resistência ao fogo segundo o critério (I) em razão da altura h1 para as lajes submetidas a curva de incêndio Paramétrica 1.	89
Figura 55: Curvas de resistência ao fogo segundo o critério (I) em razão da altura h1 para as lajes submetidas a curva de incêndio Paramétrica 2.	91
Figura 56: Curvas de resistência ao fogo segundo o critério (I) em razão da altura h1 para as lajes submetidas a curva de incêndio Paramétrica 3.	93
Figura 57: Curvas de resistência ao fogo segundo o critério (I) em razão da altura h1 para as lajes submetidas a curva de incêndio Paramétrica 4.	96
Figura 58: Comparação entre os tempos de resistência ao fogo segundo o critério (I) para laje Bondeck com cobertura de 60 mm, submetida as 4 curvas de incêndio paramétricas.	99
Figura 59: Comparação das temperaturas na chapa de aço para o perfil Bondeck submetida à curva de incêndio Paramétrica 1 com o tempo de resistência ao fogo de 120 min.	102
Figura 60: Comparação das temperaturas na chapa de aço para o perfil Polideck 59S submetida a curva de incêndio Paramétrica 3 com o tempo de resistência ao fogo de 90 min.	106

Figura 61: Comparação das temperaturas na chapa de aço para o perfil Confraplus 60 submetida a curva de incêndio Paramétrica 4 com o tempo de resistência ao fogo de 60 min.	109
Figura 62: Comparação das temperaturas no varão de aço para o perfil Bondeck submetida a curva de incêndio Paramétrica 1 com os tempos de resistência ao fogo de 27.43 e 120 min.	111
Figura 63: Comparação das temperaturas no varão de aço para o perfil Polideck 59S submetida a curva de incêndio Paramétrica 2.	113
Figura 64: Comparação das temperaturas no varão de aço para o perfil Multideck 50 submetida a curva de incêndio Paramétrica 3 com o tempo de resistência ao fogo de 90 minutos.	115
Figura 65: Comparação das temperaturas no varão de aço para o perfil Confraplus 60 submetida a curva de incêndio Paramétrica 4 com os tempos de resistência ao fogo de 22, 60 e 90 minutos.	117
Figura 66: Posição da linha neutra para as lajes mistas com espessura $h_1=100\text{mm}$ submetidas a curva de incêndio Paramétrica 1	118
Figura 67: Curvas de capacidade de carga das lajes com geometria reentrante Bondeck submetidas a curva de incêndio Paramétrica 1	118
Figura 68: Posição da linha neutra para as lajes mistas com espessura $h_1=100\text{mm}$ submetidas a curva de incêndio Paramétrica 2.	119
Figura 69: Curvas de capacidade de carga das lajes com geometria trapezoidal Confraplus 60 submetidas a curva de incêndio Paramétrica 2.	119
Figura 70: Posição da linha neutra para as lajes mistas com espessura $h_1=100\text{mm}$ submetidas a curva de incêndio Paramétrica 3.	120
Figura 71: Curvas de capacidade de carga das lajes com geometria trapezoidal Polideck 59S submetidas a curva de incêndio Paramétrica 3.	120
Figura 72: Posição da linha neutra para as lajes mistas com espessura $h_1=100\text{mm}$ submetidas a curva de incêndio Paramétrica 4.	121
Figura 73: Curvas de capacidade de carga das lajes com geometria reentrante Bondeck submetidas a curva de incêndio Paramétrica 4.	121

LISTA DE QUADROS

Quadro 1: Propriedades térmicas do ar [38].	52
Quadro 2: Limites de deformação do aço [41].....	55
Quadro 3: Fatores de redução da resistência do aço [41].....	55
Quadro 4: Fatores de redução da resistência do concreto [36].	57
Quadro 5: Coeficientes para determinação da temperatura na chapa de aço [36].	61
Quadro 6: Coeficientes para determinação da temperatura no varão de aço [36].	61
Quadro 7: Detalhamento dos modelos utilizados na validação dos modelos numéricos.	76
Quadro 8: Comparação entre MATLAB, ANSYS, método proposto e método simplificado dos tempos de resistência ao fogo segundo o critério (I), para lajes submetidas a curva de incêndio Paramétrica 1.	90
Quadro 9: Comparação entre MATLAB, ANSYS, método proposto e método simplificado dos tempos de resistência ao fogo segundo o critério (I), para lajes submetidas a curva de incêndio Paramétrica 2.	92
Quadro 10: Comparação entre MATLAB, ANSYS, método proposto e método simplificado dos tempos de resistência ao fogo segundo o critério (I), para lajes submetidas a curva de incêndio Paramétrica 3.	95
Quadro 11: Comparação entre MATLAB, ANSYS, método proposto e método simplificado dos tempos de resistência ao fogo segundo o critério (I), para lajes submetidas a curva de incêndio Paramétrica 4.	98
Quadro 12: Coeficientes propostos para determinação da temperatura na chapa de aço em lajes mistas submetidas a curva de incêndio Paramétrica 1.	101
Quadro 13: Coeficientes <i>bi</i> propostos para determinação da temperatura na chapa de aço em lajes mistas submetidas a curva de incêndio Paramétrica 2.	103
Quadro 14: Coeficientes <i>bi</i> propostos para determinação da temperatura na chapa de aço em lajes mistas submetidas a curva de incêndio Paramétrica 3.	105
Quadro 15: Coeficientes propostos para determinação da temperatura na chapa de aço em lajes mistas submetidas a curva de incêndio Paramétrica 4.	108
Quadro 16: Coeficientes <i>ci</i> propostos para determinação da temperatura no varão de aço em lajes mistas submetidas a curva de incêndio Paramétrica 1.	110
Quadro 17: Coeficientes <i>ci</i> propostos para determinação da temperatura no varão de aço em lajes mistas submetidas a curva de incêndio Paramétrica 2.	112

Quadro 18: Coeficientes ci propostos para determinação da temperatura no varão de aço em lajes mistas submetidas a curva de incêndio Paramétrica 3.....	114
Quadro 19: Coeficientes ci propostos para determinação da temperatura no varão de aço em lajes mistas submetidas a curva de incêndio Paramétrica 4.....	116

LISTA DE TABELAS

Tabela 1: Fatores de vista do perfil metálico Multideck 50.....	26
Tabela 2: Fatores de vista do perfil metálico Bondeck.....	27
Tabela 3: Fatores de vista do perfil metálico Polideck 59S.....	27
Tabela 4: Fatores de vista do perfil metálico Confraplus 60.	28
Tabela 5: Densidades de carga de incêndio $q_{f,k}$ para diferentes tipos de ocupação [17].	34
Tabela 6: Limites de deformação do concreto [42].	57
Tabela 7: Campo de aplicação do método simplificado de cálculo [36].	59
Tabela 8: Coeficientes para determinação da resistência ao fogo em relação ao critério de isolamento (I) [36].....	59
Tabela 9: Dados referente as curvas de incêndio paramétricas.....	65
Tabela 10: Características das lajes mistas ensaiadas utilizadas para validação.	74
Tabela 11: Fatores de vista S. Guo, C.G. Bailey [22].....	75
Tabela 12: Novos coeficientes propostos para determinação da resistência ao fogo em relação ao critério de isolamento (I) em lajes submetidas a curva de incêndio Paramétrica 1.....	89
Tabela 13: Coeficientes propostos para determinação da resistência ao fogo em relação ao critério de isolamento (I) em lajes submetidas a curva de incêndio Paramétrica 2....	92
Tabela 14: Coeficientes propostos para determinação da resistência ao fogo em relação ao critério de isolamento (I) em lajes submetidas a curva de incêndio Paramétrica 3....	94
Tabela 15: Coeficientes propostos para determinação da resistência ao fogo em relação ao critério de isolamento (I) em lajes submetidas a curva de incêndio Paramétrica 4....	97
Tabela 16: Comparação entre as temperaturas no varão de aço dos modelos Polideck 59S com espessuras de cobrimento de 40 e 100mm, submetida a curva de incêndio Paramétrica 2.....	113
Tabela 17: Erro relativo entre as temperaturas no varão de aço obtidas no ANSYS e no método do eurocódigo, para modelo Multideck 50 submetido a curva de incêndio Paramétrica 3 aos 90 minutos.	115

LISTA DE SÍMBOLOS

LETRAS LATINAS

A – Área [m²]

T – Temperatura [°C ou °K]

\dot{h}_{cv} – Fluxo de calor por condução [W/m²]

$\dot{h}_{net,cv}$ – Fluxo de calor por convecção [W/m²]

$\dot{h}_{net,r}$ – Fluxo de calor por radiação [W/m²]

c_a – Calor específico do aço [J/kgK]

c_c – Calor específico do concreto [J/kgK]

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

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]

$k_{y,\theta}$ – Fator de redução da tensão de cedência efetiva do aço

$k_{p,\theta}$ – Fator de redução da tensão limite de proporcionalidade do aço

$k_{E,\theta}$ – Fator de redução para a inclinação da reta que representa o domínio elástico do aço

LETRAS GREGAS

∇ – Operador gradiente

λ_a – Condutividade térmica do aço [W/mK]

λ_c – Condutividade térmica do concreto [W/mK]

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

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

ε – Emissividade

$\Phi_{f,inf}$ – Fator de vista da flange inferior das chapas de aço

$\Phi_{f,sup}$ – Fator de vista da flange superior das chapas de aço

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

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

ρ_a – Densidade do aço [kg/m³]

ρ_c – Densidade do concreto [kg/m³]

ρ_{air} – Densidade do ar [kg/m³]

θ_a – Temperatura no aço [°C]

θ_c – Temperatura no concreto [°C]

θ_{air} – Temperatura no ar [°C]

$\theta_{air,K}$ – Temperatura no aço [K]

$\varepsilon_{p,\theta}$ – Extensão limite de proporcionalidade do aço

$\varepsilon_{y,\theta}$ – Extensão de cedência do aço

$\varepsilon_{c1,\theta}$ – Extensão correspondente a resistência a compressão

$\varepsilon_{cu1,\theta}$ – Extensão máxima de concreto em situação de incêndio

ÍNDICE

1	INTRODUÇÃO.....	16
1.1	ESTADO DA ARTE.....	18
1.2	OBJETIVOS DO TRABALHO.....	24
1.3	ORGANIZAÇÃO DA DISSERTAÇÃO.....	24
2	MATERIAIS E MÉTODOS.....	26
3	CURVAS DE INCÊNDIO.....	30
3.1	CURVA DE INCÊNDIO PADRÃO ISO 834.....	31
3.2	CURVAS PARAMÉTRICAS EUROCÓDIGO 1 PARTE 1-2.....	32
4	CRITÉRIOS DE RESISTÊNCIA AO FOGO.....	36
4.1	ISOLAMENTO (I).....	37
4.2	INTEGRIDADE (E).....	37
4.3	CAPACIDADE DE CARGA (R).....	38
5	TRANSFERÊNCIA DE CALOR.....	38
5.1	CONDUÇÃO.....	39
5.2	CONVECÇÃO.....	40
5.3	RADIAÇÃO.....	41
6	PROPRIEDADES DOS MATERIAIS.....	43
6.1	PROPRIEDADES TÉRMICAS.....	44
6.1.1	Aço.....	44
6.1.2	Concreto.....	46
6.1.3	Ar.....	51
6.2	PROPRIEDADES MECÂNICAS.....	53
6.2.1	Aço.....	53
6.2.2	Concreto.....	56
7	MÉTODOS SIMPLIFICADOS DE CÁLCULO.....	58
7.1	ISOLAMENTO (I).....	58
7.2	CAPACIDADE DE CARGA (R).....	60
8	MÉTODOS AVANÇADOS DE CÁLCULO.....	63
8.1	CONDIÇÕES DE CONTORNO.....	63
8.1.1	Curvas de incêndio natural.....	64
8.1.2	Transferência de calor.....	65
8.2	PROGRAMAS DE ELEMENTOS FINITOS.....	66
8.2.1	Programa MATLAB.....	66

8.2.2 Programa ANSYS	67
9 VALIDAÇÃO DOS MODELOS TÉRMICOS.....	71
9.1.1 Caracterização do ensaio	72
9.1.2 Modelo numérico térmico	74
9.1.3 Resultados.....	77
10 RESULTADOS E DISCUSSÕES.....	83
10.1 ISOLAMENTO (I).....	88
10.2 CAPACIDADE DE CARGA (R)	100
11 CONCLUSÃO.....	122
11.1 RECOMENDAÇÕES PARA TRABALHOS FUTUROS	123
12 REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	125
ANEXO A: FICHAS TÉCNICAS	128

1 INTRODUÇÃO

O ramo da Construção Civil está sempre buscando inovação, seja em técnicas; materiais ou métodos construtivos. No entanto, apesar de toda tecnologia disponível atualmente e da vasta gama de opções e soluções no ramo da construção civil, o custo-benefício é um dos fatores primordiais para a viabilidade de um projeto. Sendo assim, além de funcionalidade, durabilidade e segurança, o fator econômico tem grande impacto nesse setor.

Dito isto, torna-se claro a razão da incessante busca por alternativas mais seguras e econômicas. Uma destas soluções são as lajes mistas com chapa de aço colaborante, que se apresenta como uma solução estrutural mais eficiente e leve se comparada com a solução de lajes convencionais em concreto armado.

De acordo com M. Crisinel e D. O’Leary [1], o sistema de lajes mistas foi desenvolvido pela primeira vez no final da década de 1930 para uso em edifícios altos. Essa técnica trouxe uma redução considerável do peso próprio e foi visto na época como um substituto para as lajes convencionais em concreto armado. Devido à eficiência e vantagens apresentadas por esse novo modelo de laje, logo se tornou amplamente aplicada em projetos de construção baseadas em estruturas de aço.

Por muitos anos, a utilização das lajes mistas tem sido comum na América do Norte, e a partir da década de 1980 se deu um rápido aumento da sua utilização na Europa. J. Jiang *et al.* [2] cita que entre as vantagens do uso dessa estrutura, está a redução do uso de concreto e a redução no tempo de construção, uma vez que a chapa de aço serve como cofragem permanente.

X. Yu *et al.* [3] enunciou em seu trabalho que essas lajes consistem em um fino perfil de aço enformado a frio, comumente com espessuras entre 0,6 e 1,2 mm, sendo o concreto lançado sobre o perfil da chapa. Usualmente o concreto é reforçado com uma leve malha antifissura e pode também conter barras individuais, geralmente posicionadas nas direção das nervuras. Por muito tempo, os perfis comercialmente utilizados consistiam em dois diferentes perfis geométricos, classificados como trapezoidal e reentrante.

Apesar desses perfis serem os mais usuais e conhecidos, um terceiro perfil de chapa de aço para lajes mistas começou a ser utilizado recentemente, cujo nome atribuído ao perfil foi: “*Flatdeck*”. A Figura 1 mostra a configuração dos três perfis de chapa de aço em lajes mistas.

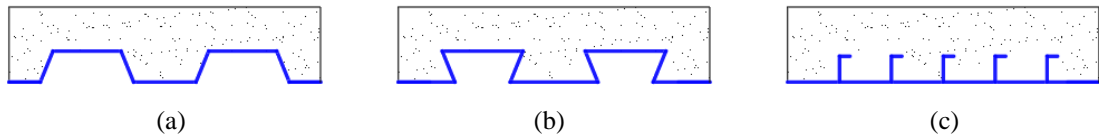


Figura 1: Perfis geométricos de chapa de aço colaborante: (a) Trapezoidal, (b) Reentrante, (c) Flatdeck.

Embora as evidentes vantagens que as lajes mistas apresentam em detrimento das lajes convencionais, a presença da chapa de aço nas lajes mistas proporciona uma desvantagem no que diz respeito à resistência à ação do fogo. Uma vez que as chapas de aço colaborantes podem ser expostas diretamente ao fogo, neste cenário, o aço apresenta uma rápida perda de suas propriedades mecânicas [4].

M. Gillie *et al.* [5] destaca que na engenharia de segurança contra incêndio, um dos principais objetivos é evitar que a estrutura chegue ao colapso catastrófico durante uma situação de incêndio. O objetivo principal, é garantir que a estrutura resista tempo suficiente para que os ocupantes evacuem do local com segurança.

A resistência de um material ao fogo é dada pela capacidade de resistir ou fornecer proteção contra ele. Ainda de acordo com M. A. H. Abdel-Halim *et al.* [6], quando se trata do caso de elementos estruturais, deve ser garantida a capacidade de limitar um incêndio ou manter a sua função estrutural mesmo que exposta ao fogo.

As lajes mistas exercem papel fundamental na estabilidade da estrutura durante o incêndio, devendo fornecer proteção e atraso na propagação do fogo. Para esse tipo de elemento em questão, a resistência ao fogo é determinada de acordo com três critérios, são eles: suporte de carga (R), integridade (E) e isolamento (I).

Para a análise do comportamento dessas lajes em situação de incêndio, é preciso efetuar análises de transferência de calor e análises estruturais. As temperaturas resultantes da transferência de calor influenciam na resposta da estrutura através de expansão térmica e da degradação da rigidez e resistência do material. Os gradientes térmicos ao longo da espessura da laje também podem produzir curvaturas, que potencialmente introduzem momentos de flexão adicionais no sistema da laje [7].

J. Jiang *et al.* [8], refere que normalmente a classificação da resistência ao fogo dos elementos estruturais é baseada em testes de incêndio nos quais o elemento é submetido durante um período de tempo, a uma curva de incêndio padrão. A temperatura do forno é pré-estabelecida utilizando uma equação. No entanto, devido ao custo associado a estes testes, os métodos numéricos tornam-se uma solução alternativa. Uma

vez que, com algum refinamento, podem ser usados para fornecer uma previsão, com boa precisão, dos resultados obtidos em testes com forno, oferecendo uma abordagem rápida e mais econômica.

Entretanto, para uma boa previsão e representatividade do modelo numérico, é necessária uma boa definição das condições de contorno. Um exemplo de tais considerações é apresentado por C. Both *et al.* [9], que refere que para uma boa previsão da temperatura na chapa de aço e no concreto, é necessário considerar a resistência térmica proveniente da perda de contato entre a chapa aço e o concreto na fase inicial do incêndio, pois o aço sofre uma expansão térmica diferente do concreto. Tal perda de contato é atribuída o nome de “*air-gap*”, representando uma pequena camada de ar entre a chapa de aço e o concreto, que oferece considerável resistência térmica ao fluxo de calor entre os materiais.

Deste modo, o presente trabalho busca estudar o comportamento de lajes mistas com diferentes perfis de chapa de aço e diferentes espessuras de recobrimento de concreto, em variadas configurações de incêndio natural, constituídas por uma fase de aquecimento e uma fase de arrefecimento. Serão realizadas simulações numéricas através dos programas MATLAB e ANSYS, e a modelagem será validada através de dados obtidos em testes realizados por outros autores.

1.1 ESTADO DA ARTE

No ano de 1975, a Organização Internacional de Padronização (ISO) apresentou uma curva de incêndio padrão na norma internacional ISO 834: 1975 – “Ensaio de resistência ao fogo - Elementos de construção civil”. Essa norma passou por uma revisão, e foi substituída em 1999 pela primeira edição da ISO 834-1 [10], em que foram alterados alguns requisitos dos ensaios, como a tolerância aplicada ao desvio da curva de temperatura média do forno com relação à curva de incêndio padrão e outras instruções relacionadas aos equipamentos de medição e instrumentação.

Entre os anos de 1995 e 2003 o *Building Research Establishment* (BRE) [11] [12], realizou no laboratório de Cardington, diversos testes em escala real de um edifício com 8 pisos, construído em estruturas metálicas e mista e submetido a diferentes situações de incêndio. O edifício tinha como dimensões 21 x 45 m, e uma altura total de 33 m. Para simulação do efeito da carga nos compartimentos, foram utilizados sacos de areia. Sete testes são relatados na literatura, sendo os cinco últimos realizados com incêndio natural.

Pôde-se observar que o colapso de lajes mistas em situação de incêndio era subestimado nos métodos da época, além disso, constatou-se que as falhas nas conexões ocorrem geralmente durante a fase de arrefecimento. Os testes tinham como objetivo recolher dados representativos de incêndios reais a fim de possibilitar a verificação e validação de programas de cálculo avançado para a realização de análises numéricas de estruturas em situação de incêndio. Esses testes foram fundamentais para o estudo de lajes mistas em situação de incêndio natural, uma vez que os custos associados aos testes são onerosos e inviáveis na maioria dos casos.

Apesar do uso de estruturas mistas ser usada desde a década de 70, na América do Norte, no Reino Unido e na Europa, as autoridades mostravam-se preocupadas com a falta de dados sobre a resistência de lajes mistas ao fogo. Deste modo, após 1982 realizou-se uma quantidade considerável de testes em larga escala de lajes mistas [13].

Avançando os estudos de resistência ao fogo, no ano de 1988, G. Cooke *et al.* [13] buscou mostrar a possibilidade de lajes mistas apresentarem uma resistência ao fogo de 90 minutos, de forma que não haveria necessidade de incluir isolamento adicional na face exposta da laje, apenas sendo aplicado um reforço em grelha de aço na parte superior da laje mista. Os estudos foram realizados com base nos testes realizados pelo *Cronstruction Industry Research & Information Association (CIRIA)* e pelo *British Steel Corporation (BSC)*, realizados em 1983/1985 e 1984/1986 respectivamente. Com os dados dos testes, foi possível provar que as lajes atingem o nível de resistência ao fogo de 90 minutos, apenas com a inclusão das grelhas de reforço ao momento negativo na parte superior da laje.

Posteriormente, C. G. Bailey *et al.* [14] descreve os resultados de um teste realizado em lajes mistas no ano de 2000, a fim de estudar o efeito de tensão de membrana em situações de incêndio. A estrutura continha dimensões 9,5 x 6,5 m e foi testada até o colapso. Para a simulação do comportamento deste elemento em situação de incêndio, a chapa de aço colaborante foi removida e a laje submetida a progressivo aumento de carregamento. Constatou-se que a carga de falha foi aproximadamente duas vezes maior que o valor teórico calculado.

No ano seguinte, em 2001, S. Lamont *et al.* [15] executa uma simulação numérica, utilizando elementos finitos com auxílio do programa HADAP, sendo que o modelo foi validado de acordo com os três primeiros testes realizados em Cardington. O estudo teve como finalidade reproduzir o fluxo de calor em lajes mistas e prever as temperaturas na laje referente ao teste 4 que não teve suas temperaturas registradas. Apesar de uma boa

previsão nas temperaturas do concreto, o modelo falha em prever as temperaturas no aço, superestimando-as.

Ainda através dos dados fornecidos pelos testes de Cardington, em 2003, T. Lennon *et al.* [16] utiliza tais dados referentes a 8 testes realizados no referente laboratório para comparar as curvas de incêndio coletadas em situação real com as paramétricas propostas pelo Eurocódigo [17] e com a ISO 834 [10]. Em seu estudo, Lennon comprova a ineficácia das paramétricas em representar a fase de arrefecimento, uma vez que o Eurocódigo propõe um arrefecimento linear. Além disso, o autor alerta para a importância da necessidade de uma melhor definição do efeito de inércia térmica no compartimento em situação de incêndio.

Em 2004, S. Lamont *et al.* [18] realiza um estudo numérico em elementos finitos no programa ABAQUS, simulando um edifício de 5 andares em estrutura metálica em que no segundo andar são estudados dois cenários de incêndio, e validado com os dados de teste de Cardington. No primeiro caso, que descreve um incêndio de curta duração e atingindo uma maior temperatura máxima, constata-se que apresenta uma maior agressividade à estabilidade da estrutura, uma vez que atinge grandes deflexões em um curto período de tempo. O segundo cenário, em que o incêndio é mais longo e de temperatura máxima inferior ao primeiro caso, nota-se que gerou uma maior temperatura no concreto e no aço protegido, mas em um instante de tempo mais tardio.

N.D. Pope, C.G. Bailey [19] realizaram no ano de 2006 uma análise numérica através do modelo FDS baseado em um modelo de *Dinâmica dos Fluidos Computacional* (CFD). Os resultados foram comparados com 8 testes de incêndio natural em escala real realizados no laboratório de Cardington, com as curvas paramétricas do Eurocódigo e com a curva empírica para incêndio natural BFD proposta por C.R. Barnett [20]. Constatou-se que a curva BFD apresenta as previsões mais representativas. Embora falhe na previsão de temperatura máxima dos gases, o modelo FDS apresenta junto com a curva BFD uma melhor previsão acerca da duração do incêndio em relação ao Eurocódigo. Os autores atentam ainda para os problemas envolvendo a falta de representatividade do arrefecimento linear de temperatura, quando é utilizada a curva paramétrica proposta pelo Eurocódigo.

Outro importante teste em escala real foi realizado no ano de 2008, na República Checa [21], a estrutura simulava um prédio administrativo com dimensões 12 x 18 m e 4 metros de altura. O carregamento na laje mista foi simulado através de sacos contendo metal com pesos entre 793 a 1087 kg. A carga de incêndio foi simulada com blocos de

madeira, de modo que simulou uma carga de incêndio de 620 MJ/m². Na parte oeste da estrutura, o gás atingiu temperaturas superiores aos 900 °C nos 45 e 60 minutos de incêndio. A falha tardia ocorreu durante esse teste, já durante a fase de arrefecimento, a laje mista perdeu a resistência à compressão aos 62 minutos, levando ao colapso da estrutura.

Em 2011, S. Guo, C.G. Bailey [22] realizaram testes em 7 Lajes Mistas submetidos a incêndio com estágios de aquecimento e arrefecimento. Foram ensaiados três tipos de incêndio natural: no cenário 1, o forno foi aquecido por 40 minutos até uma temperatura máxima de 950 °C, e posteriormente arrefecido; no caso 2, o forno foi aquecido por 90 minutos atingindo uma temperatura máxima de 800 °C; no cenário 3, repetiu-se a fase de aquecimento do incêndio 1 até uma temperatura máxima de 950 °C, mas com uma fase de arrefecimento mais lenta devido à retirada dos ventiladores de arrefecimento. Para os cenários 1 e 2 foram ensaiadas 3 lajes com os respectivos níveis de carregamento: 72, 44 e 12 kN, sendo o cenário 3 ensaiado apenas uma laje com carregamento de 44 kN. Os autores confirmaram a importância de considerar a fase de arrefecimento, uma vez que a máxima temperatura na face da laje não exposta e na malha de reforço aconteceram durante essa fase. Além disso, ficou evidente que o deslocamento vertical é diretamente proporcional ao valor da temperatura máxima e ao nível de carregamento, e que o deslocamento residual é diretamente proporcional à duração da fase de arrefecimento.

No mesmo ano, S. Guo [23] utilizou os testes realizados em conjunto com C.G. Bailey [22] para estudar a variação dos esforços internos nas lajes durante o incêndio. Realizou uma análise numérica utilizando o programa ABAQUS para simular o comportamento térmico e mecânico de lajes mistas durante o incêndio natural. Por fim, elaborou um estudo paramétrico analisando o efeito da resistência do concreto, espessura da chapa de aço colaborante e tamanho da malha. Com os testes o autor constatou que a medida em que ocorria o aquecimento, a força de reação e o momento sofriam aumento nos suportes verticais. O estudo paramétrico mostrou que a chapa de aço colaborante tem efeito mais significativo se comparado com a resistência do concreto e com a malha, no que diz respeito ao comportamento das lajes mistas. Pode-se notar também que o deslocamento máximo depende da temperatura máxima do forno atingida e na carga aplicada, e também que mesmo com um aumento de 40% na resistência do concreto, o comportamento da laje mista tem pouca alteração, já a redução da espessura da chapa de

aço provoca grandes mudanças, principalmente durante a fase de arrefecimento, em que a deflexão durante essa fase é dominada pela área de aço coberta.

Em 2013, VKR. Kodur *et al.* [24] realiza uma simulação numérica com elementos finitos, na qual utiliza o programa ANSYS para analisar o comportamento de 3 conjuntos de vigas e lajes mistas, alterando o tipo de conexões de cisalhamento e curvas de incêndio natural. Durante a fase de validação, o modelo apresentou boa resposta e boa precisão, mostrando que a ação composta entre a viga e a laje aprimora consideravelmente o desempenho da estrutura em situação de incêndio. Além disso, pôde-se observar que as conexões não tiveram influência significativa na resistência ao fogo dos conjuntos de vigas e lajes, apesar de estar sujeito a temperaturas elevadas e deformações permanentes.

Avançando nas pesquisas em incêndio natural, T. Gernay, J.-M Franssen [25] alertam em 2015 sobre os riscos da desconsideração da fase de resfriamento nas atuais abordagens da engenharia de incêndio estrutural, uma vez que a resistência ao incêndio garantido durante a temperatura de pico, não descarta a possibilidade de uma falha tardia durante ou após o arrefecimento. Estes investigadores concluem que diferentes elementos estruturais, com mesma classificação de resistência ao fogo (R) podem apresentar comportamento distintos em incêndio natural. Os autores alertam para o fato de que a temperatura máxima do incêndio e o tempo mínimo de capacidade de carga geralmente não coincidem, sendo o tempo mínimo de capacidade de carga surgindo posteriormente. Nestas condições a capacidade de carga da estrutura continua diminuindo após atingida a temperatura máxima, chegando posteriormente ao seu valor mínimo, e em seguida recuperando parcial ou totalmente quando a temperatura da estrutura retorna à temperatura ambiente. As curvas de incêndio utilizadas para análise foram tomadas de modo que a fase de aquecimento da curva se aproximasse da curva ISO 834 [10], de modo que o único parâmetro variável é a duração da fase de aquecimento das curvas de incêndio natural. Através de simulações numéricas por elementos finitos, os autores propõem um novo indicador de resistência (DHP - *Duration of the Heating Phase*) que caracteriza o desempenho das estruturas ao fogo natural, permitindo comparar e classificar sistemas estruturais com relação a sensibilidade a falhas tardias. Concluíram que para todas as configurações estruturais estudadas, a falha durante o arrefecimento é possível, tendo sempre um DHP menor ou igual à resistência ao fogo (R), alertando mais uma vez para o fato de que, ao considerar apenas a resistência ao fogo, o projetista está negligenciando esse efeito.

Em 2019, P. A. G. Piloto *et al.* [26] [27] realizam simulações numéricas através dos programas ANSYS e MATLAB, com soluções térmicas baseadas em incêndio padrão, com modelos de validação numérica em 3D para os critérios de suporte de carga (R) e isolamento (I). Os autores buscaram estudar o efeito da carga no critério de capacidade de carga (R) bem como o efeito da espessura do concreto no critério de isolamento (I). No modelo térmico, utilizaram um modelo alternativo com uma folga de ar entre o aço e o concreto, pois durante a exposição da laje ao incêndio, a chapa de aço aquece rapidamente expandindo-se, gerando assim uma separação com o concreto, a esse efeito é dado o nome de “*air-gap*”. Os resultados obtidos correspondentes ao critério de isolamento (I) foram comparados com o método simplificado de cálculo, além da proposição de uma nova equação para o cálculo de resistência ao fogo (I). Os autores concluíram que as formulações propostas pela norma superestimam a resistência real das lajes, no entanto, os resultados do modelo que simula contato perfeito entre a chapa de aço e o concreto subestimam a resistência, uma vez que o efeito “*air-gap*” fornece um aumento resistência no que diz respeito a resistência das lajes mistas ao incêndio. Por outro lado, a nova equação para o cálculo da resistência pelo critério de isolamento (I) apresenta uma dependência quadrática entre a resistência ao fogo e a espessura efetiva da laje.

Em 2019, S. Sharma *et al.* [28] realizou uma análise numérica utilizando o programa ABAQUS a fim de estudar o efeito “*air-gap*” da separação entre o concreto e a chapa de aço colaborante, que fornece uma resistência térmica ao aumento da temperatura no concreto, sendo o incêndio simulado através da curva ISO 834. Os autores consideraram 2 formas de fluxo de calor: a Iterativa sequencialmente acoplada, em que se calculava a diferença entre o aço e o concreto usando os alongamentos diferenciais térmicos, uma vez conhecido o espaço entre os dois, era calculado as temperaturas no concreto e no aço através de radiação e condução, os cálculos eram repetidos iterativamente até atingir a convergência de valores na temperatura do aço; A transferência de calor totalmente acoplada e análise de tensão é uma abordagem alterantiva ao método iterativo, sendo a resolução da transferência de calor e da análise de tensões realizadas de forma simultânea, e apesar de ambos os métodos apresentarem bom resultado, este segundo método apresenta uma melhor representatividade. Por fim, foi elaborada uma equação empírica para descrever a temperatura na face inferior do concreto.

1.2 OBJETIVOS DO TRABALHO

Uma vez que a maioria dos estudos envolvendo resistência dos elementos estruturais ao fogo, são baseadas na curva de incêndio padrão, surge uma lacuna no conhecimento dos efeitos da fase arrefecimento na resistência das estruturas. Sendo assim, esse trabalho tem como intuito o desenvolvimento de modelos térmicos de elementos finitos tridimensionais, aplicando o método avançado de cálculo através de modelos numéricos, a fim de estudar os efeitos da fase de arrefecimento no comportamento de lajes mistas com chapa de aço colaborante em situação de incêndio natural. Deste modo, serão utilizados os programas MATLAB R2018a e ANSYS Mechanical APDL 18.2 para a realização de análises térmicas. A fim de validar a confiabilidade do modelo numérico desenvolvido, serão realizados modelos numéricos de validação como base em dados experimentais coletados em bibliografia.

O objetivo principal desse estudo é investigar a influência de alguns parâmetros no que diz respeito à resistência ao fogo por isolamento (I) e por capacidade de carga (R). Os parâmetros analisados são: diferentes curvas de incêndio natural, diferentes perfis comerciáveis de chapa de aço e diferentes espessuras de concreto.

Além disso, será realizado um estudo paramétrico a fim de propor formulações simplificadas para a determinação da resistência ao fogo de lajes mistas em situação de incêndio natural, uma vez que as formulações do método simplificado propostos pelas normas europeias são válidas apenas para incêndio padrão ISO 834, que não contempla a fase de arrefecimento.

1.3 ORGANIZAÇÃO DA DISSERTAÇÃO

O presente trabalho será compartimentado em 11 capítulos, e duas seções adicionais relativos às referências e as fichas técnicas apresentadas no Anexo A.

Neste capítulo foram retratados alguns dos estudos realizados ao longo dos últimos anos sobre o comportamento ao fogo de lajes mistas com chapa de aço colaborante. Os trabalhos apresentados foram utilizados como referência para a elaboração e corroboração dos conceitos e procedimentos utilizados no desenvolvimento desse trabalho.

No capítulo 2 serão descritos e detalhados os materiais e métodos utilizados para a elaboração do estudo e dos modelos numéricos, bem como toda a metodologia seguida para a elaboração dos estudos paramétrico.

O Capítulo 3 aborda diferentes curvas de incêndio, suas características e diferenças. Além disso, são abordadas as formulações e parâmetros propostos pelo Eurocódigo para as curvas de incêndio padrão ISO 834 e de incêndio natural.

No Capítulo 4, é apresentado o desenvolvimento dos critérios de resistência ao fogo e quais são os parâmetros a serem atendidos por cada tipo de critério.

No Capítulo 5 é detalhado como se dá o processo de transferência de calor, quais os conceitos associados, os modos de transferência existentes e como ocorrem. Apresenta ainda as formulações referentes a cada modo de transferência, bem como dos fatores que influenciam.

O Capítulo 6 apresenta as propriedades térmicas e mecânicas associadas aos materiais considerados na investigação, que terão papel essencial na elaboração dos modelos uma vez que interferem diretamente nos resultados obtidos.

No Capítulo 7 são descritos os métodos simplificados de cálculo propostos pelo Eurocódigo para o cálculo da resistência ao fogo de lajes mistas com chapa de aço colaborante. As formulações apresentadas para os critérios de isolamento (I) e capacidade de carga (R) são válidas apenas para elementos submetido a curva ISO 834, no entanto, serão utilizadas como referência para a proposição de equações alternativas para o cálculo de resistência ao fogo de elementos em incêndio natural.

No Capítulo 8 é abordada a metodologia utilizada no modelo avançado de cálculo aplicado nos programas MATLAB e ANSYS para as simulações térmicas a fim de estimar a resistência das lajes mistas aos critérios de isolamento (I) e capacidade de carga (R). Todas as condições de fronteira e parâmetros aplicados nos programas para a elaboração dos modelos estão descritos neste capítulo.

O Capítulo 9 descreve os modelos utilizados para a validação e convergência dos modelos numéricos. Através dos resultados descritos neste capítulo foi possível refinar e validar as técnicas e parâmetros utilizados nas simulações que posteriormente foram utilizadas para o estudo paramétrico.

No Capítulo 10 serão apresentados e discutidos todos os resultados obtidos nas simulações térmicas e mecânicas. Além disso, serão apresentado os resultados obtidos no estudo paramétrico, além das novas formulações propostas para a determinação da

resistência ao fogo, de lajes mistas com chapa de aço colaborante submetidas a incêndio natural, pelos critérios de isolamento (I) e capacidade de carga (R).

O Capítulo 11 são apresentadas as conclusões obtidas através dos resultados das simulações e do estudo paramétrico realizado. Apresenta ainda algumas sugestões para a elaboração de trabalhos futuros que possam dar continuidade ao trabalho aqui apresentado.

2 MATERIAIS E MÉTODOS

Para a determinação da resistência das lajes mistas pelos critérios de isolamento térmico (I) e capacidade de carga (R), será utilizado o método avançado de cálculo seguindo as recomendações do Eurocódigo. O método avançado é baseado em modelos de elementos finitos tridimensionais.

Os estudos paramétricos contam com um total de 128 simulações térmicas, sendo 64 realizadas com o programa ANSYS Mechanical APDL 18.2 [29] e as 64 simulações restantes no programa MATLAB R2018a. Além disso, realizaram-se as simulações térmicas de validação dos modelos numéricos.

Para os modelos serão realizadas análises considerando uma fina camada de ar chamada de “*air-gap*”. Foram selecionadas 4 geometrias distintas, sendo 2 perfis metálicos do tipo reentrante, e 2 perfis do tipo trapezoidal. A começar pelos perfis reentrantes, o primeiro modelo utilizado foi o Multideck 50, produzido pela empresa Kingspan. A chapa é feita de aço S450, e o modelo escolhido possui 1,00 mm de espessura. A Figura 2 indica os parâmetros geométricos do modelo em questão e a Tabela 1 apresenta os fatores de vista descrito no Capítulo 5 da presente investigação.

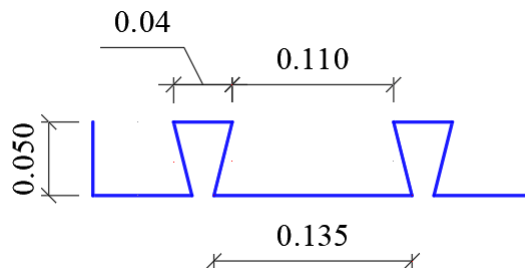


Figura 2: Parâmetros geométricos do perfil metálico Multideck 50.

Tabela 1: Fatores de vista do perfil metálico Multideck 50.

Elemento	Fator de vista (Φ)
Flange superior	0,14
Alma	0,09

O segundo modelo de perfil reentrante selecionado foi o Bondeck, fabricado pela empresa Lysaght. A chapa é feita com aço S350 e a versão escolhido também possui 1,00 mm de espessura. A Figura 3 e a Tabela 2 apresentam os parâmetros geométricos e os fatores de vista da chapa de aço Bondeck.

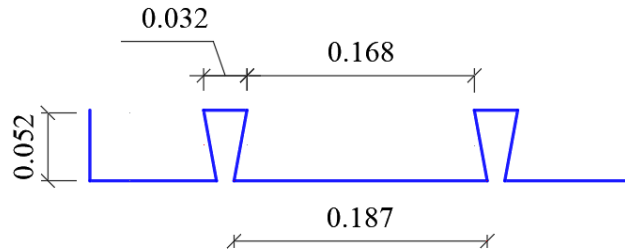


Figura 3: Parâmetros geométricos do perfil metálico Bondeck.

Tabela 2: Fatores de vista do perfil metálico Bondeck.

Elemento	Fator de vista (Φ)
Flange superior	0,12
Alma	0,09

Para os perfis do tipo trapezoidal, foi escolhida o modelo Polideck 59S, produzido pela empresa ArcelorMittal. A chapa é fabricada com aço S275, e foi selecionado o modelo com 1,25 mm de espessura. Os parâmetros geométricos do perfil metálico e os fatores de vista na *flange* superior e na *alma*, estão apresentados na Figura 4 e na Tabela 3 respectivamente.

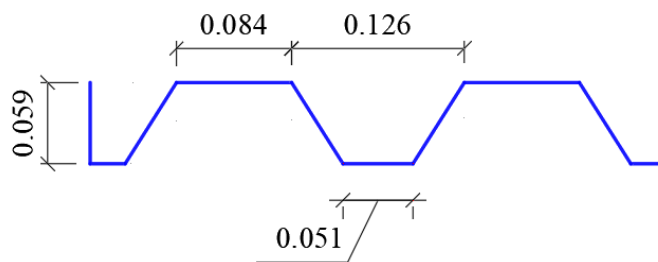


Figura 4: Parâmetros geométricos do perfil metálico Polideck 59S.

Tabela 3: Fatores de vista do perfil metálico Polideck 59S.

Elemento	Fator de vista (Φ)
Flange superior	0,78
Alma	0,67

A segunda chapa de aço de perfil trapezoidal utilizada foi a Confraplus 60, também produzido pela empresa ArcelorMittal. A chapa é produzida com aço S350 e o modelo escolhido possui 1,25 mm de espessura. A Figura 5 indica os parâmetros geométricos da chapa de aço, já os fatores de vista estão apresentados na Tabela 4.

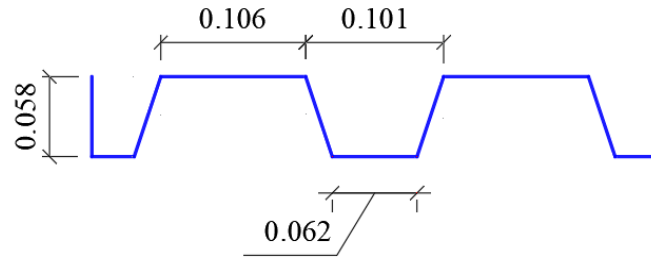


Figura 5: Parâmetros geométricos do perfil metálico Confraplus 60.

Tabela 4: Fatores de vista do perfil metálico Confraplus 60.

Elemento	Fator de vista (Φ)
Flange superior	0,73
Alma	0,55

As lajes foram modeladas contendo 3 m de comprimento, visando otimizar o tempo das simulações e os perfis trapezoidais e reentrantes com 4 células, sendo as bordas laterais terminadas com meia célula como apresentado na Figura 6.

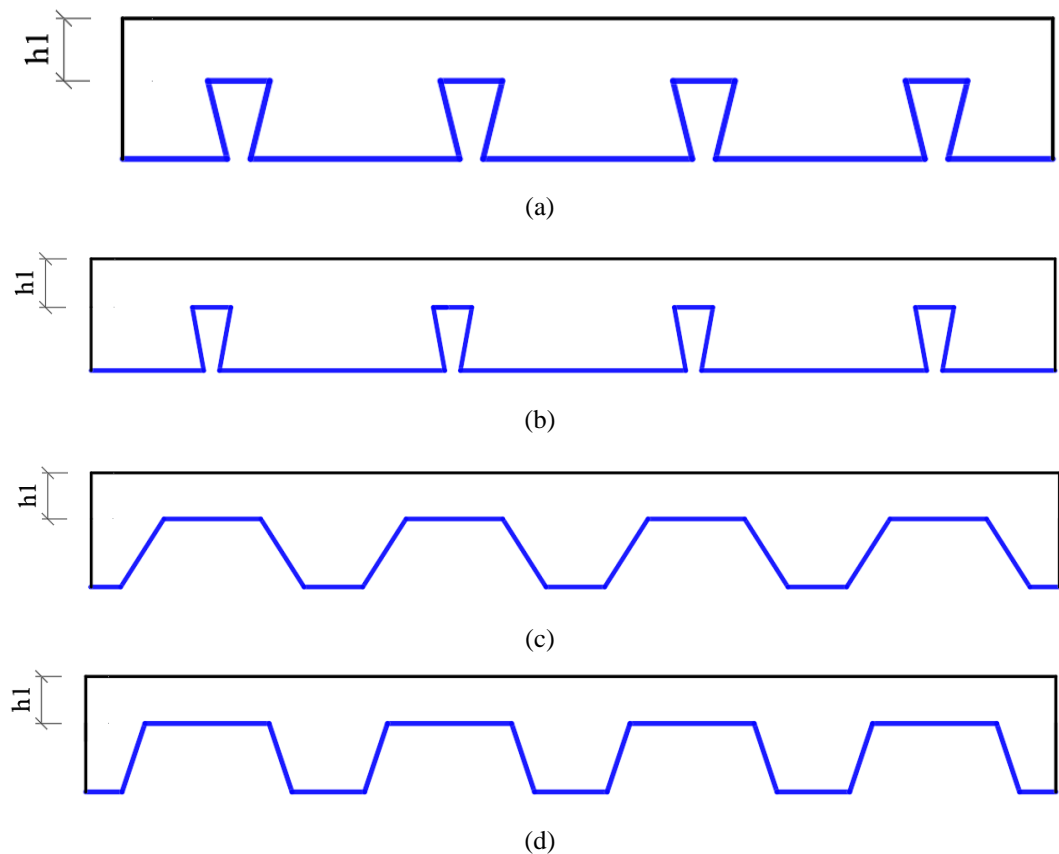


Figura 6: Disposição geométrica das lajes modeladas. (a) Perfil Multideck 50, (b) Perfil Bondeck, (c) Perfil Polideck 59S, (d) Perfil Confraplus 60.

Nos modelos elaborados as armaduras das lajes foram padronizadas, sendo 3 barras de reforço aço S500 com diâmetro $\text{Ø}10$ mm, e posicionadas a uma altura $h/2$ da superfície exposta. A malha de reforço utilizada é uma grelha de aço S500 com barras de $\text{Ø}6$ mm, espaçadas a 150 mm e posicionadas a 20 mm abaixo da superfície não exposta da laje.

A posição da malha de reforço foi atribuída tendo como origem o centro da laje, com as respectivas barras espaçadas a 150 mm como indicado na Figura 7:

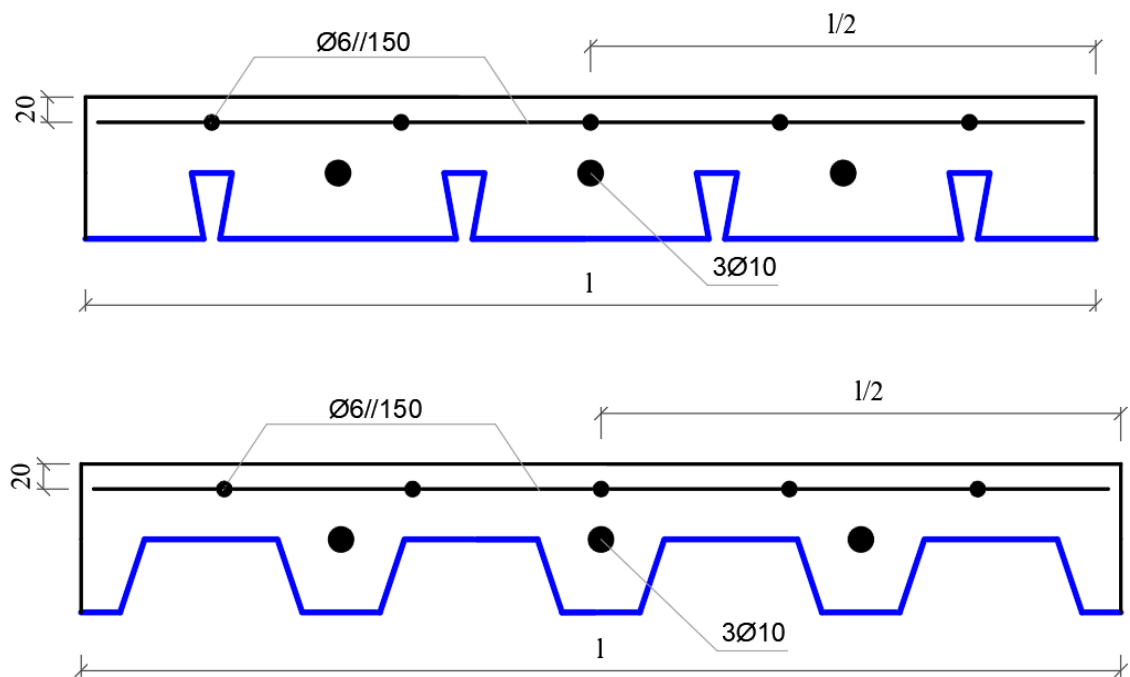


Figura 7: Disposição das armaduras nos modelos utilizados no estudo paramétrico.

O concreto adotado nos modelos é do tipo convencional C25/30 uma vez que é um dos tipos mais usual na construção civil. Além disso, para determinação das propriedades térmicas do concreto, foi considerado o material com uma umidade de 2,00%.

O modelo térmico desenvolvido contém os seguintes parâmetros: 4 diferentes curvas de incêndio natural, sendo 3 em que a fase de aquecimento é similar a curva ISO 834, e uma outra curva em que a taxa de aquecimento é superior a curva ISO 834; 4 diferentes perfis comerciais de chapa colaborante; 4 diferentes espessuras de concreto.

A Figura 8 descreve os parâmetros adotados para as simulações térmicas, totalizando 64 simulações em cada programa.

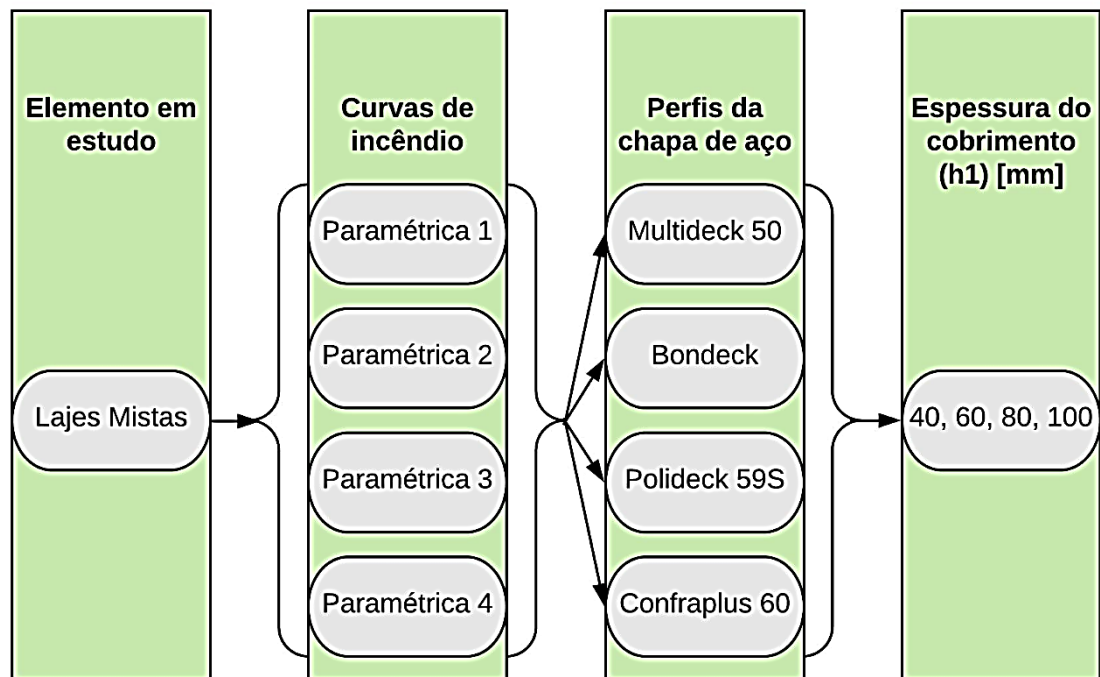


Figura 8: Diagrama dos modelos térmicos desenvolvidos.

As curvas de incêndio e as demais condições de fronteiras adotadas nos modelos estão descritos no Capítulo 7 desse trabalho.

Para o estudo de capacidade de carga, foram considerados os parâmetros adotados no modelo térmico, adotando um comprimento de laje de 4 metros para avaliar as curvas de carga máxima ao longo do incêndio.

Para o cálculo da capacidade de carga (nível de carregamento 100%) das 9 lajes à temperatura ambiente de 20 °C, e ao longo do incêndio, foram utilizadas as formulações propostas pelo Eurocódigo 4 Parte 1-1 [30] apresentada no Capítulo 7 desse trabalho.

3 CURVAS DE INCÊNDIO

Os incêndios em edifícios podem ter início de diversas formas. Podem ser causados por falhas na construção, mais precisamente nas instalações: elétrica ou de gás. Podem ainda ter origem acidentalmente por má utilização dos usuários. Uma vez que o incêndio não é controlado, propaga-se e têm-se início a um incêndio, que iminente compromete a estrutura e a segurança dos ocupantes.

Após diferentes estudos, foi assumido que a curva-temperatura de um incêndio real pode ser descrito por três diferentes fases: ignição; aquecimento e arrefecimento. De modo que a primeira fase corresponde ao início do incêndio, com temperaturas baixas e

sem influência no comportamento da estrutura. A segunda fase ocorre com a propagação generalizada do incêndio em que o combustível será consumido, acarretando rápido aumento de temperatura, chamado “*Flashover*”. Por último registra-se o arrefecimento, com diminuição progressiva da temperatura, seja por falta de combustível, de oxigênio, ou até mesmo por ação humana relacionada ao combate ao incêndio.

No entanto, devido à grande quantidade de variáveis (a exemplo a carga de incêndio e grau de ventilação) que estão envolvidas na determinação da curva tempo-temperatura de um incêndio real, convencionou-se adotar uma curva padrão a fim de simplificar análises experimentais e pesquisas [31].

3.1 CURVA DE INCÊNDIO PADRÃO ISO 834

As curvas padronizadas têm como vantagem a independência das características do compartimento analisado, e contém apenas a fase de aquecimento. Três curvas nominais de incêndio são apresentadas no Eurocódigo 1 Parte 1-2 [17]: curva temperatura-tempo padrão, curva para elementos exteriores e curva de hidrocarbonetos.

A curva de incêndio padrão (ISO 834) [10], é a mais amplamente usada para a determinação de resistência dos elementos estruturais ao fogo.

A Organização Internacional de Padronização (ISO) é uma federação mundial de organismos nacionais de normalização, que em 1975, através da norma internacional ISO 834, introduziu a curva de fogo padrão. No ano de 1999, a primeira edição da ISO 834-1 [10] foi lançada para substituir a anterior, alterando critérios, especificações e tolerâncias para os ensaios de resistência ao fogo.

A equação da curva ISO 834 relaciona de forma logarítmica a temperatura e o tempo, como demonstrado abaixo:

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

De modo que θ (°C) é a temperatura no gás e t (min) é o tempo. A Figura 9 apresenta uma comparação entre as curvas de incêndio real e a curva de incêndio nominal.

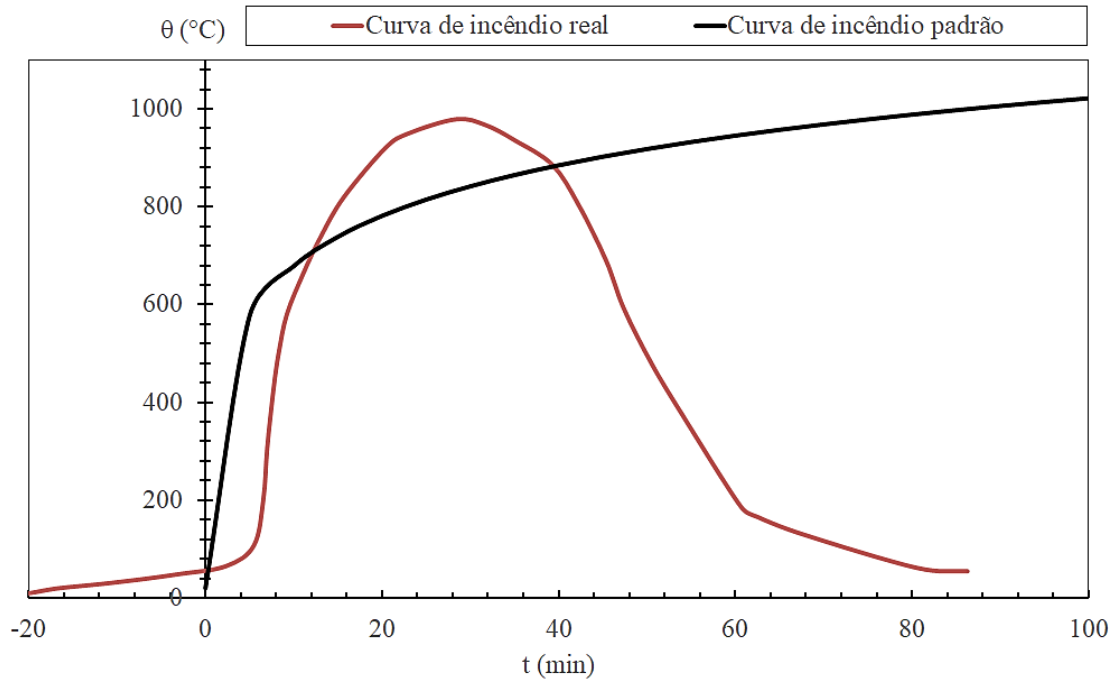


Figura 9: Comparação entre as curvas de incêndio natural e padrão.

Nota-se que a curva de incêndio padrão desconsidera a fase de ignição presente no incêndio real, considerando que o início do incêndio e a fase “*Flashover*” ocorrem simultaneamente.

3.2 CURVAS PARAMÉTRICAS EUROCÓDIGO 1 PARTE 1-2

O Eurocódigo 1 Parte 1-2 [17] apresenta um modelo para determinação das curvas paramétricas temperatura-tempo, de modo a representar as fases de aquecimento e arrefecimento. O modelo detalhado no Anexo A da norma, contém limitações físicas no compartimento a ser considerado, são elas: a área em planta não deve exceder 500 m²; não deve haver aberturas no teto e a altura máxima é de 4 metros.

Diferente das curvas de incêndio nominais, além de conter a fase de arrefecimento, as curvas paramétricas contêm ainda a dependência com as características do compartimento, como são exemplo: dimensões do compartimento; carga de incêndio; grau de ventilação, propriedade térmica dos materiais de vedação, entre outros.

De acordo com a norma, a fase de aquecimento deve ser calculada de acordo com a equação (2):

$$\theta_g = 20 + 1325(1 - 0,324e^{-0,2t^*} - 0,204e^{-1,7t^*} - 0,472e^{-19t^*}) \quad (2)$$

Em que Θ_g é a temperatura ($^{\circ}\text{C}$) dos gases no compartimento do incêndio e t^* é calculado de acordo com a equação (3):

$$t^* = t \Gamma \quad (3)$$

De modo que t é o tempo (h) e Γ é um fator adimensional de conversão do tempo, obtido em função do fator de abertura “ O ” e da absorvidade térmica “ b ”:

$$\Gamma = \left(\frac{O}{b}\right)^2 / \left(\frac{0,04}{1160}\right)^2 \quad (4)$$

O fator de abertura é obtido de acordo com a equação abaixo, de modo que respeitem os seguintes limites: $0,02 \leq O \leq 0,20$ ($\text{m}^{1/2}$).

$$O = \frac{A_v \sqrt{h_{eq}}}{A_t} \quad (5)$$

Em que A_v é a área (m^2) total de aberturas verticais em todas as paredes do compartimento, h_{eq} é a média ponderada das alturas (m) das janelas e A_t é a área (m^2) total do compartimento incluindo aberturas.

A absorvidade térmica deve respeitar os limites $100 \leq b \leq 2200$ ($\text{J}/\text{m}^2\text{s}^{1/2}\text{K}$), e é dada pela equação (6):

$$b = \sqrt{\rho c \lambda} \quad (6)$$

Onde os parâmetros de cálculo são referentes ao material de vedação, sendo ρ a densidade (kg/m^3) do material, c é o calor específico (J/kgK) e λ a condutividade térmica (W/mK).

No que diz respeito a fase de arrefecimento, seu início é determinado através da temperatura máxima de incêndio “ Θ_{max} ”, correspondente ao fim do aquecimento e obtida na equação (2) considerando $t^* = t^*_{max}$.

$$t^*_{max} = t_{max} \Gamma \quad (7)$$

$$t_{max} = \max[(0,2 * 10^{-3} q_{t,d} / O) ; t_{lim}] \quad (8)$$

Nas equações acima t^*_{max} , t_{max} e t_{lim} são tempos considerados em horas; $q_{t,d}$ é o valor de cálculo da densidade de carga de incêndio (MJ/m^2) relacionada a área total do compartimento, de modo que $50 \leq q_{t,d} \leq 1000$; t_{lim} é o tempo em que ocorre a temperatura máxima no gás caso o incêndio seja controlado pelo combustível, sendo $t_{lim} = 20$ minutos para uma taxa de crescimento de incêndio média. No cenário em que o tempo de temperatura máxima do gás é obtido através da formulação $(0,2 * 10^{-3} q_{t,d} / O)$, o incêndio é controlado pela ventilação.

A fase de arrefecimento é representada nas curvas paramétricas através de uma relação linear decrescente entre temperatura e tempo, e devem ser calculadas de acordo com as seguintes equações:

$$\Theta_g = \Theta_{max} - 625(t^* - t_{max}^* x) \text{ para } t_{max}^* \leq 0,5 \quad (9)$$

$$\Theta_g = \Theta_{max} - 250(3 - t_{max}^*)(t^* - t_{max}^* x) \text{ para } 0,5 \leq t_{max}^* \leq 2 \quad (10)$$

$$\Theta_g = \Theta_{max} - 250(t^* - t_{max}^* x) \text{ para } t_{max}^* \geq 2 \quad (11)$$

Sendo x um fator admissional em que: para $t_{max} > t_{lim}$, $x = 1$; para $t_{max} = t_{lim}$, $x = t_{lim} \Gamma / t_{max}^*$; t^* obtido de acordo com equação (3); e t_{max}^* dado pela equação abaixo:

$$t_{max}^* = 0,2 * 10^{-3} q_{t,d} / O t_{lim} \quad (12)$$

A Figura 10 e Figura 11 apresentam uma comparação entre algumas paramétricas elaboradas de acordo com o método do Eurocódigo 1 Parte 1-2 [17], e a curva de incêndio padrão ISO 834.

Os valores de carga de incêndio podem ser obtidos de acordo com a Tabela 5:

Tabela 5: Densidades de carga de incêndio $q_{f,k}$ para diferentes tipos de ocupação [17].

Ocupação	Média	Quantilho de 80%
Habitação	780	948
Hospital (quarto)	230	80
Hotel (quarto)	310	377
Biblioteca	1500	1824
Escritório	420	511
Sala de aulas de uma escola	285	347
Centro comercial	600	730
Teatro (cinema)	300	365
Transporte (espaço público)	100	122

Nota: Admite-se uma distribuição de Gumbel para o quantilho de 80%

Para o primeiro gráfico, variando o fator de abertura “ O ”, utilizaram-se os seguintes parâmetros: $q_{t,d}=197,47 \text{ MJ/m}^2$ (densidade de carga de incêndio referente a uma habitação) e $t_{lim}=20$ minutos. Foram utilizados 4 valores diferentes de fator de abertura, em que as dimensões do compartimento se mantiveram as mesmas, variando apenas as aberturas (janelas e portas).

O valor de absorvidade térmica “ b ” consequentemente varia para cada caso, uma vez que este parâmetro depende da área ocupada pelo material de vedação, que será diferente em cada caso devido as diferentes áreas de abertura vertical. A vedação foi considerada como sendo os tetos e piso em concreto convencional, e as paredes com acabamento em gesso. A seguir será detalhado cada um dos quatro casos:

- Fator de abertura $O=0,0465 \text{ m}^{1/2}$, corresponde a presença de quatro janelas de dimensões 1 x 1,5 m. Com um absorvidade térmica $b=1364,5 \text{ J/m}^2\text{s}^{1/2}\text{K}$.
- Fator de abertura $O=0,0698 \text{ m}^{1/2}$, corresponde a presença de seis janelas de dimensões 1 x 1,5 m. Com um absorvidade térmica $b=1376,9 \text{ J/m}^2\text{s}^{1/2}\text{K}$.
- Fator de abertura $O=0,0716 \text{ m}^{1/2}$, corresponde a presença de quatro janelas de dimensões 1 x 2 m. Com um absorvidade térmica $b=1372,7 \text{ J/m}^2\text{s}^{1/2}\text{K}$.
- Fator de abertura $O=0,1074 \text{ m}^{1/2}$, corresponde a presença de seis janelas de dimensões 1 x 2 m. Com um absorvidade térmica $b=1389,8 \text{ J/m}^2\text{s}^{1/2}\text{K}$.

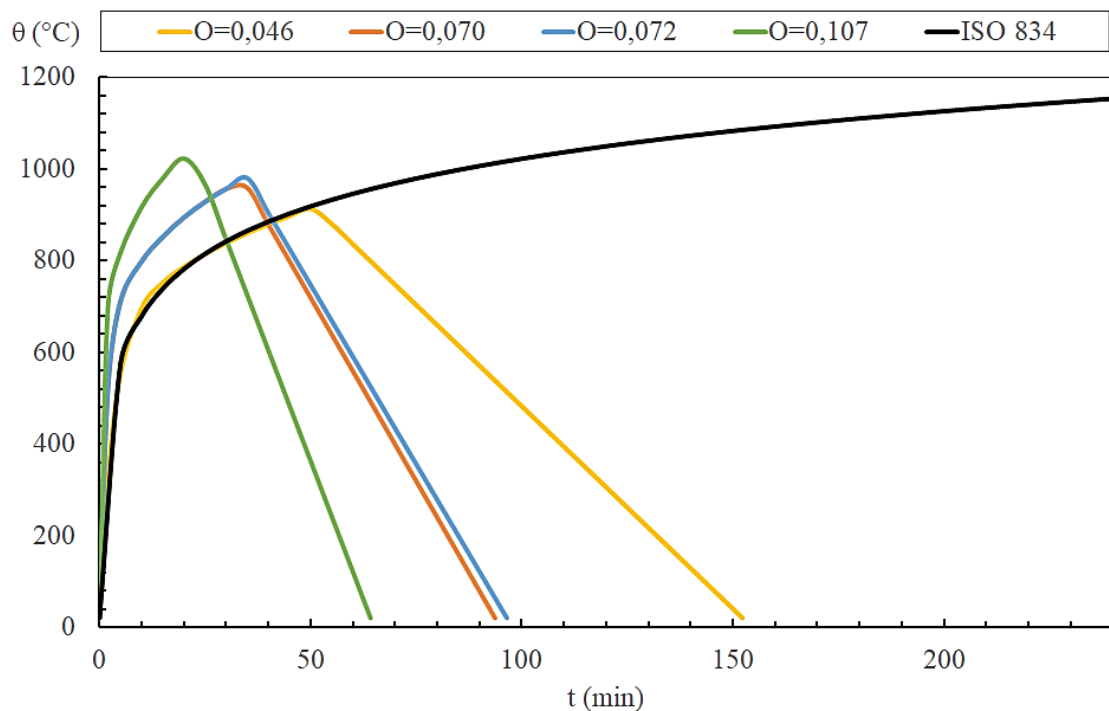


Figura 10: Exemplos de curvas paramétricas variando fator de abertura.

Para o próximo gráfico, variando a densidade de carga de incêndio, utilizaram-se os seguintes parâmetros: $O=0,046 \text{ m}^{1/2}$ (corresponde a presença de quatro janelas de dimensões 1 x 1,5 m), $t_{lim}=20$ minutos e uma absorvidade térmica $b=1364,5 \text{ J/m}^2\text{s}^{1/2}\text{K}$.

Foram utilizados 4 valores diferentes de densidade de carga de incêndio, em que cada caso corresponde a um tipo diferente de ocupação como apresentado no Tabela 5, de modo que as dimensões e aberturas do compartimento mantiveram-se as mesmas.

Os quatro valores obtidos foram: $q_{t,d}=72,15 \text{ MJ/m}^2$ considerando uma sala de aula; $q_{t,d}=106,32 \text{ MJ/m}^2$ para um escritório; $q_{t,d}=197,47 \text{ MJ/m}^2$ para uma habitação; $q_{t,d}=379,75 \text{ MJ/m}^2$ para uma biblioteca.

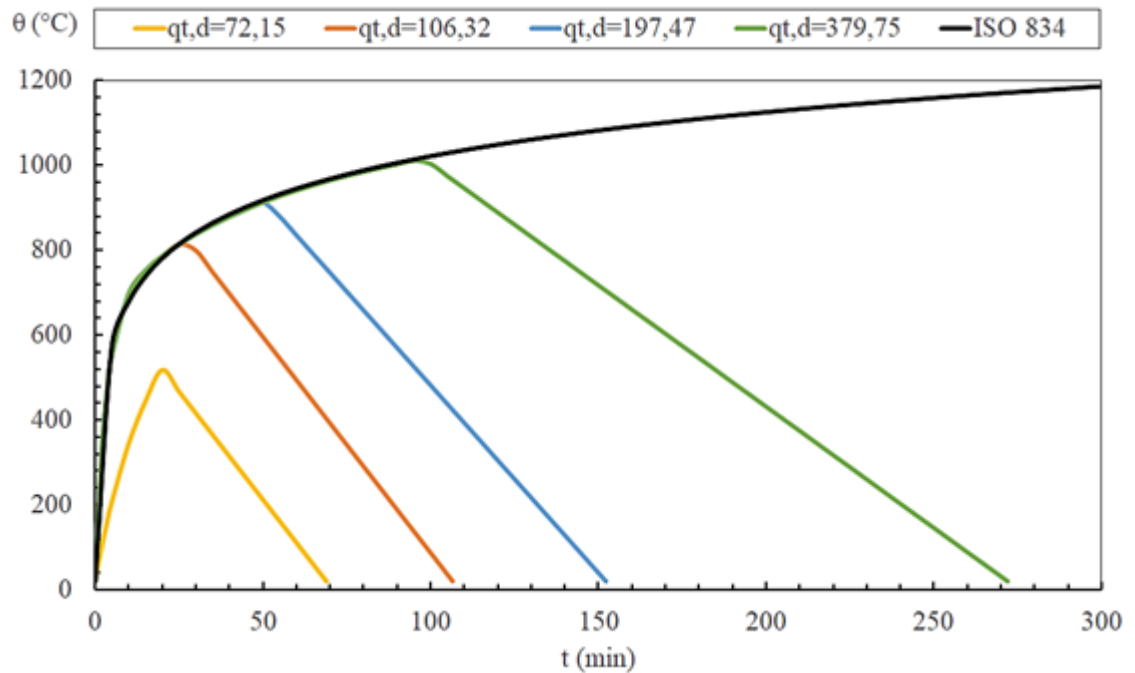


Figura 11: Exemplos de curvas paramétricas variando a densidade de carga de incêndio.

O aumento do fator de abertura implica um aumento na temperatura máxima que ocorre de forma mais rápida, além de uma diminuição na duração do incêndio. Na Figura 11, fica ainda mais evidente a influência do aumento da densidade de carga de incêndio no aumento da temperatura máxima que acontece de modo mais tardio, aumentando também o tempo de duração do incêndio.

4 CRITÉRIOS DE RESISTÊNCIA AO FOGO

Todos os elementos estruturais precisam atender aos critérios de segurança contra incêndio, referenciados em normas e códigos de construção civil. Sendo assim, torna-se necessário entender quais são esses critérios de resistência, e como se caracterizam.

Usualmente a classificação de lajes mistas em incêndio é realizada através de testes seguindo aquecimento regido pela curva de incêndio padrão, devendo ter em consideração três critérios: Isolamento (I), Integridade (E) e Capacidade de carga (R).

A norma europeia EN 13501-2 [32] apresenta a classe de resistência para os elementos de construção mais comuns. Neste caso, as lajes mistas que possuem a característica de suporte de carga e simultaneamente possuem funções de isolamento e estanquidade, podem ser classificadas com REI= 15, 20, 30, 45, 60, 90, 120, 180 e 240 minutos.

Devido a sensibilidade térmica do aço, a chapa de aço colaborante não apresenta contribuição significativa na capacidade de resistência (R) de lajes mistas ao incêndio. No entanto, Hamerlinck *et al.* [33] menciona sua importância nos critérios de isolamento e integridade, uma vez que a chapa de aço evita fissuração no concreto, e age como escudo, impedindo a passagem de chamas e gases quentes.

4.1 ISOLAMENTO (I)

O critério de isolamento (I) está relacionado com capacidade da estrutura impedir a propagação do fogo. Por outras palavras, diz respeito à capacidade de resistir ao fogo na superfície exposta e evitar a transmissão de calor excessivo à face não exposta, impedindo assim a combustão de algum material na parte superior, que conseqüentemente levaria a propagação do incêndio.

De acordo com EN 1363-1 [34], e como mencionado por Jiang [2], a resistência ao fogo pelo critério de isolamento é expressa em minutos, e refere-se ao menor tempo entre: a temperatura máxima da superfície não exposta da laje, quando atinge em algum ponto um aumento de máximo de temperatura de 180 °C em relação à temperatura média inicial:

$$\theta_{max} - \bar{\theta}_0 = 180 \text{ } ^\circ\text{C}$$

A temperatura média da superfície não exposta da laje, quando atinge um aumento de médio de temperatura de 140 °C em relação à temperatura média inicial:

$$\bar{\theta} - \bar{\theta}_0 = 140 \text{ } ^\circ\text{C}$$

4.2 INTEGRIDADE (E)

O critério de integridade (E) traduz a capacidade do elemento de resistir ao fogo na superfície diretamente exposta ao incêndio, e resistir à penetração dos gases quentes e das chamas que poderiam passar através de fendas e aberturas na laje.

As normas brasileira e europeia ([35] e [36]), determinam que para lajes mistas, é assumido que o critério de integridade é cumprido devido a existência da chapa de aço colaborante.

4.3 CAPACIDADE DE CARGA (R)

O critério de capacidade de carga (R) traduz a capacidade do elemento estrutural de suportar o carregamento durante o incêndio sem colapsar ou sofrer deformações excessivas.

De acordo com Both [37], quando desconsiderado o efeito membrana, é possível diferenciar três modos de ruptura: ruptura por flexão, ruptura por cisalhamento longitudinal, e ruptura por cisalhamento vertical.

Os critérios estabelecidos para elementos submetidos a flexão em situação de incêndio padrão, devem ter em consideração o valor da deflexão máxima D (mm) e o valor da taxa de deflexão $\frac{dD}{dt}$ (mm/min). Estes critérios têm vindo a ser alterados ao longo do tempo, sendo definidos pela norma EN 1363-1 [34]. Na versão mais atual desta norma, 2020, os critérios são definidos pelas equações seguintes: utilizando a disjunção lógica “ou” entre elas.

$$\begin{aligned} D_{\text{limit}} &= L^2/400d \\ (dD/dt)_{\text{limit}} &= L^2/9000d \text{ [mm/min]} \end{aligned} \quad (13)$$

$$\begin{aligned} D_{\text{measured}} &\geq 1.5 D_{\text{limit}} \quad \vee \\ D &= D_{\text{limit}} \wedge dD/dt = (dD/dt)_{\text{limit}} \end{aligned} \quad (14)$$

Nestas equações e inequações, L (mm) é o vão da laje e d (mm) é a distância entre a fibra mais distante na zona comprimida e a fibra mais distante na zona tracionada da seção transversal do elemento.

5 TRANSFERÊNCIA DE CALOR

Para realizar uma análise de estruturas mistas em situação de incêndio, será necessário, antes de tudo, uma boa compreensão acerca de alguns conceitos básicos da Termodinâmica, ramo da física que estuda as causas e efeitos na variação de temperatura, pressão e volume e ainda conceitos de e transferência de calor.

Em outras palavras, é preciso ter conhecimento sobre os mecanismos de transferência de calor, a fim de entender como se dará a variação de temperatura na estrutura de estudo ao longo do incêndio. A “temperatura” pode ser definida como a

quantidade de energia cinética presente nas moléculas de um corpo, em outras palavras, é a medida do grau de agitação das moléculas que o compõe.

Dois corpos com temperaturas diferentes tendem a interagir até que ambos permaneçam com mesma temperatura. Essa interação trata-se da transferência de energia que é denominada por “Calor”, de modo que a transferência ocorre do corpo de maior temperatura para o corpo de menor temperatura.

Y. A. Çengel e A. J. Ghajar [38] afirmam que para haver transferência de calor, é requisito básico que haja diferença de temperatura, a taxa dessa transferência depende da magnitude do gradiente de temperatura, que é determinado através da diferença de temperatura por unidade de comprimento. De modo que o gradiente de temperatura e a taxa de transferência de calor são diretamente proporcionais.

De acordo com F. P. Incropera *et al.* [39], sempre que houver uma diferença de temperatura no sistema, ocorrerá a transferência de calor, que pode ocorrer por três diferentes tipos de processos: condução que ocorre em um sólido ou líquido em meios estacionários; convecção que ocorre entre uma superfície e um fluido em movimento; radiação que é a transferência de calor em forma de ondas eletromagnéticas emitidas por uma superfície de temperatura finita e que pode ocorrer entre duas superfícies.

A seguir será abordado brevemente uma descrição, conceitos e de modo enfático as formulações usadas para determinar quantitativamente a transferência de calor referente a cada tipo de processo citado anteriormente.

5.1 CONDUÇÃO

A condução está fundamentalmente associada a atividade atômica e molecular, pois são, processos nesses níveis, os responsáveis por esse modo de transferência de calor. De modo que a transferência de energia ocorre do corpo mais energético, para as partículas menos energéticas da outra substância, causado pela interação entre as partículas [39].

Em gases e líquidos, a condução ocorre decorrente das colisões e difusão das moléculas durante seus movimentos aleatórios. Já nos sólidos, ocorre em virtude da combinação das vibrações das moléculas e o transporte de energia se dá pelos elétrons livres. De modo que a taxa de condução de calor depende da diferença de temperatura, geometria, espessura e material do meio [38].

J. H. Lienhard IV e J. H. Lienhard V [40] relatam que Joseph Fourier formulou em 1822 a lei empírica, conhecida como Lei de Fourier, que descreve esse fenômeno de condução de calor, na qual o fluxo de calor h_{cd} (W/m²). O resultado da condução térmica é proporcional à amplitude do gradiente de temperatura $\frac{d\theta}{dx}$ (K/m) e oposto a ele no sinal, como apresentado na equação (15):

$$\dot{h}_{cd} = -\lambda \cdot \frac{d\theta}{dx} \quad (15)$$

O coeficiente λ apresentado na equação acima representa a condutividade térmica (W/mK), que representa a capacidade do material de conduzir calor. Devido a transferência de calor ocorrer das partículas de maior temperatura para as de menor temperatura, a variação de temperatura apresenta um valor negativo no sentido do fluxo de calor. Sendo assim, o sinal negativo presente na formulação é necessário, pois a transferência de calor na direção positiva de x é um valor também positivo.

Sabendo que o fluxo de calor é uma quantidade vetorial, a forma tridimensional da Lei de Fourier é dada por:

$$\vec{h}_{cd} = -\lambda \cdot \vec{\nabla} \theta \quad (16)$$

De modo que $\nabla\theta$ é um vetor gradiente de temperatura, que indica a variação de temperatura nos três eixos tridimensionais.

5.2 CONVECÇÃO

A convecção é o modo de transferência no qual há troca de calor entre uma superfície sólida e o líquido ou gás adjacente que se apresenta em movimento, esse tipo de transferência envolve efeitos combinados de condução e movimento de fluidos. De modo que a velocidade do movimento do fluido influi diretamente na taxa de transferência de calor. Em caso de ausência de movimento, a transferência de calor será inteiramente liderada pelo fenômeno de condução [38].

Além disso, a transferência por convecção pode ser classificada de acordo com a natureza do fluxo. É definida por *convecção forçada* quando o fluxo do fluido é causado por meios externos, seja maquinários (ventilador, bombas), ou ventos atmosféricos. Por outro lado, também pode ser definida por *convecção natural* quando o fluxo é originado por diferenças de densidade causadas por variação de temperatura no fluido [39].

Em 1701, Isaac Newton considerou o processo convectivo e sugeriu que o processo se daria de modo que a taxa de transferência de calor é proporcional à diferença de temperatura entre a superfície e o fluido [40].

De acordo com o Eurocodigo 1 – Parte 1-2 [17], o fluxo de calor convectivo do fluido deve ser calculado de acordo com a equação (17):

$$\dot{h}_{net,cv} = \alpha_c(\theta_s - \theta_\infty) \quad (17)$$

Onde, α_c é o Coeficiente de Convecção [$\text{W}/\text{m}^2\text{C}$], θ_s a temperatura da superfície de corpo e θ_∞ é a temperatura do gás próximo nas proximidades da superfície.

5.3 RADIAÇÃO

A radiação é a energia emitida pela matéria a uma temperatura diferente de zero, seja uma superfície sólida, líquida ou gasosa. Independente da forma da matéria, a emissão é atribuída a alteração nas configurações eletrônicas dos átomos que os constituem. A energia de radiação é emitida por fótons (ondas eletromagnéticas), diferentemente da condução e convecção, não necessitando de um meio material [39].

O modelo para radiador térmico perfeito é chamado de “corpo negro”, de modo que, em teoria, este corpo absorveria toda a energia que o atinge, e não reflete nada [40]. Assim, a radiação que é emitida pela superfície é originária da energia térmica da matéria delimitada pela superfície, de modo que a taxa de energia que é liberada por unidade de área é denominada potência emissora de superfície E [W/m^2]. Assim o limite superior para a *potência emissiva* é descrito pela lei de Stefan-Boltzmann [39]:

$$E_b = \sigma\theta^4 \quad (18)$$

Onde T é a temperatura absoluta [K] da superfície e σ é a constante de Boltzmann ($\sigma = 5.67 \times 10^{-8} \text{ W}/\text{m}^2.\text{K}^4$) e descreve a superfície ideal referente a um corpo negro.

Para ser possível calcular a emissão de radiação por outros corpos, é necessário introduzir um novo parâmetro na equação. Este parâmetro é a *emissividade* (ε) que é adimensional e quantifica a capacidade de um corpo emitir ou absorver a energia térmica em todos os seus comprimentos de onda, este coeficiente assume valores entre 0 e 1, sendo 1 o valor atribuído ao corpo negro. Deste modo, a equação (18) pode ser reescrita como:

$$E = \varepsilon\sigma\theta^4 \quad (19)$$

Uma vez que os conceitos envolvendo a radiação foram apresentados, a equação do fluxo de calor por radiação na superfície exposta ao incêndio, utilizada para analisar a temperatura de elementos estruturais é apresentada no Eurocodigo 1 – Parte 1-2 [17].

$$\dot{h}_{net,r} = \Phi \varepsilon_f \cdot \varepsilon_m \cdot \sigma [(\theta_r + 273)^4 - (\theta_m + 273)^4] \quad (20)$$

Sendo Φ (adimensional) o fator de vista, θ_r (°C) é a temperatura efetiva de radiação no ambiente em incêndio, e θ_m (°C) é a temperatura na superfície do elemento que recebe a radiação.

O fator de vista (Φ) é o coeficiente responsável por determinar o quanto a superfície que recebe radiação está exposta à emissão da radiação pelo corpo emissor, de modo que a geometria da superfície tem completa influência nesta relação.

É importante destacar as características da superfície emissora de radiação, em se tratando de estudos relacionados a incêndio na engenharia. Neste âmbito, as chamas são sempre consideradas como sendo difusas, de modo que a intensidade da energia emitida (calor) independe da direção.

J. Jiang *et al.* [8] explica em seu trabalho que o fator depende da área e da orientação da superfície que emite radiação com relação a superfície receptora, como também depende da distância entre elas.

Apesar da complexidade envolvida na determinação do fator de vista, devido à alta variabilidade de situações, são fornecidas, pela literatura, simplificações para o caso específico dos elementos de superfície das lajes mistas com chapa de aço colaborante que são expostas ao incêndio.

A Figura 13 mostra os diferentes formatos da nervura da laje em que é necessário realizar um cálculo individual do fator de vista. Para a flange inferior, considera-se $\Phi_{f,inf} = 1$, pois encontra-se paralela e exposta diretamente ao incêndio. No entanto, a alma e a flange superior apresentam um fator de vista menor, pois não estão diretamente expostas a radiação, uma vez que as nervuras da chapa de aço causam uma certa obstrução à exposição da radiação.

Para o cálculo dos fatores de vista dos perfis trapezoidais e reentrantes, pode-se utilizar o método desenvolvido em 1950 por HC Hottel, chamado *método de seqüências cruzadas*, para calcular do fator de vista [38], sendo esta a mesma abordagem referenciada pela EN 1994 1-2 [36].

A Figura 12 indica os parâmetros em ambos os perfis de lajes mistas para o cálculo dos fatores de vista.

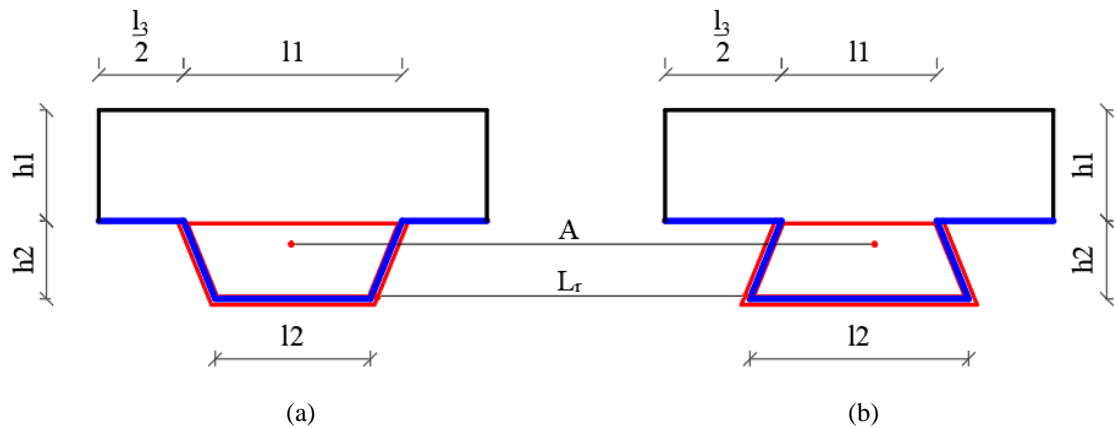


Figura 12: Parâmetros para determinação dos fatores de vista: (a) Perfil trapezoidal, (b) Perfil reentrante.

As equações abaixo indicam como devem ser calculados os fatores de vista na flange superior e na alma respectivamente, em função das distâncias entre as paredes da chapa de aço.

$$\Phi_{f,sup} = \frac{\sqrt{h_2^2 + \left(l_3 + \frac{l_1 - l_2}{2}\right)^2} - \sqrt{h_2^2 + \left(\frac{l_1 - l_2}{2}\right)^2}}{l_3} \quad (21)$$

$$\Phi_{alma} = \frac{\sqrt{h_2^2 + \left(\frac{l_1 - l_2}{2}\right)^2} + (l_3 + l_1 - l_2) - \sqrt{h_2^2 + \left(l_3 + \frac{l_1 - l_2}{2}\right)^2}}{2\sqrt{h_2^2 + \left(\frac{l_1 - l_2}{2}\right)^2}} \quad (22)$$

A imagem a seguir indica a posição referente a cada fator de vista para os 3 perfis de chapa de aço colaborante:

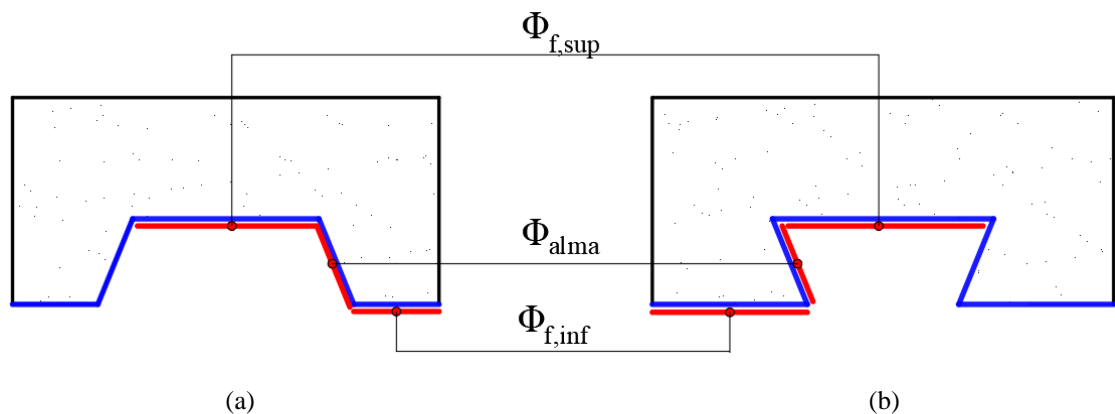


Figura 13: Fatores de vista: (a) Perfil trapezoidal, (b) Perfil reentrante.

6 PROPRIEDADES DOS MATERIAIS

O desempenho estrutural dos elementos depende diretamente das propriedades dos materiais que o compõe, em se tratando de estruturas submetidas a incêndio, além

das propriedades mecânicas, o conhecimento das propriedades térmicas é fundamental para conseguir descrever o comportamento real dos componentes estruturais.

Para o desenvolvimento da modelagem numérica, é preciso conhecer a variabilidade das propriedades dos materiais, e quais fatores influenciam no desempenho das componentes da laje mista. Além disso, é necessário determinar como se dá a variação das propriedades mecânicas dos materiais, durante o aquecimento, por influência indireta das propriedades térmicas.

6.1 PROPRIEDADES TÉRMICAS

Para obter os melhores resultados possíveis no modelo térmico, devem-se considerar as propriedades térmicas dos materiais o mais próximo da realidade. Assim, é preciso considerar a não linearidade do material, de modo que a variação de temperatura no decorrer do tempo de incêndio implica em uma variação no calor específico, na condutividade térmica e na densidade dos materiais.

As propriedades de cada material utilizadas no modelo numérico seguem as determinações do Eurocódigo 1994-1-2 [36], sendo as propriedades do aço e do concreto especificadas na EN 1993-1-2 [41] e EN 1992-1-2 [42] respectivamente. As propriedades referentes ao ar foram obtidas em bibliografia específica [38].

6.1.1 Aço

As propriedades a seguir, são representativas para os aços de função estrutural e de reforço, deste modo, é aplicável para as chapas de aço e para as barras de reforço das lajes mistas.

O calor específico do aço (c_a) varia de acordo com a temperatura é obtido através de equações disponíveis no Eurocódigo 3 Parte 1-2 [41].

$$20^{\circ}\text{C} \leq \theta_a \leq 600^{\circ}\text{C}$$

$$c_a(\theta_a) = 425 + 7,73 * 10^{-1}\theta_a - 1,69 * 10^{-3}\theta_a^2 + 2,22 * 10^{-6}\theta_a^3 \quad (23)$$

$$600^{\circ}\text{C} \leq \theta_a < 735^{\circ}\text{C}$$

$$c_a(\theta_a) = 666 + \frac{13002}{738 - \theta_a} \quad (24)$$

$$735^{\circ}\text{C} \leq \theta_a < 900^{\circ}\text{C}$$

$$c_a(\theta_a) = 545 + \frac{17820}{\theta_a - 731} \quad (25)$$

$$900^\circ\text{C} \leq \theta_a \leq 1200^\circ\text{C}$$

$$c_a(\theta_a) = 650 \quad (26)$$

A Figura 14 mostra a variação no calor específico do aço em função da temperatura no material. Esta variação que se verifica entre os 700 e os 800 °C está relacionada com a transformação alotrópica da matriz cristalina do aço. Corresponde à transformação da fase ferrítica em autenítica. O nível de temperatura para o qual ocorre esta transformação depende de vários fatores, entre os quais, o valor da percentagem de carbono.

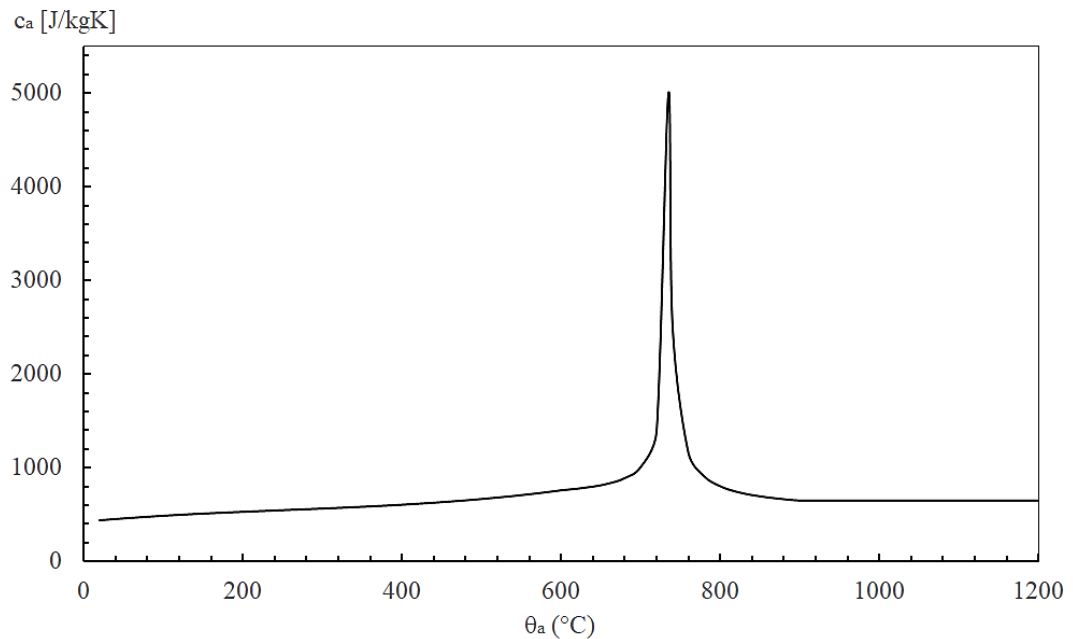


Figura 14: Calor específico do aço.

A condutividade térmica do aço varia de acordo com a temperatura, sendo determinada através das seguintes equações:

$$20^\circ\text{C} \leq \theta_a < 800^\circ\text{C}$$

$$\lambda_a(\theta_a) = 54 - 3,33 * 10^{-2} \theta_a \quad (27)$$

$$800^\circ\text{C} \leq \theta_a \leq 1200^\circ\text{C}$$

$$\lambda_a(\theta_a) = 27,3 \quad (28)$$

A Figura 15 representa a variação na condutividade térmica do aço em função da temperatura no aço.

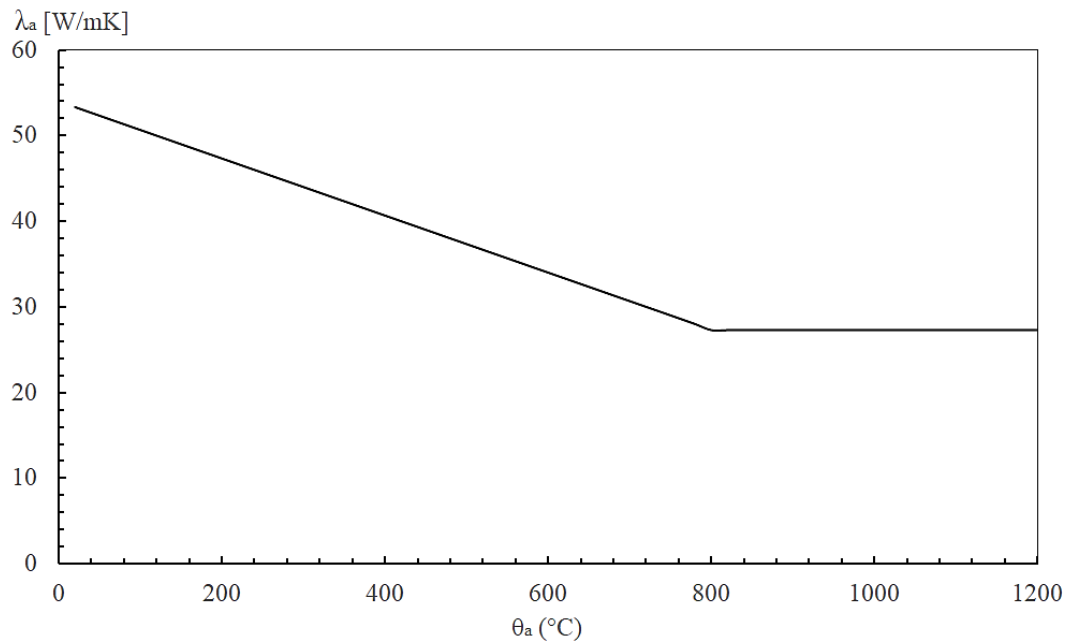


Figura 15: Condutividade térmica do aço.

A densidade do aço independe da variação de temperatura, assumindo valor constante de modo que: $\rho_{\alpha} = 7850 \text{ kg/m}^3$.

A emissividade do aço também é considerada constante e igual a 0.7.

6.1.2 Concreto

De acordo com o Eurocódigo 2 Parte 1-2 [42], o calor específico do material varia de acordo com a umidade do concreto e sua temperatura, para um concreto seco ($u=0\%$), a norma europeia fornece as seguintes equações:

$$20^{\circ}\text{C} \leq \theta_c \leq 100^{\circ}\text{C}$$

$$c_c(\theta_c) = 900 \quad (29)$$

$$100^{\circ}\text{C} < \theta_c \leq 200^{\circ}\text{C}$$

$$c_c(\theta_c) = 900 + (\theta_c - 100) \quad (30)$$

$$200^{\circ}\text{C} < \theta_c \leq 400^{\circ}\text{C}$$

$$c_c = 1000 + \frac{\theta_c - 200}{2} \quad (31)$$

$$400^{\circ}\text{C} < \theta_c \leq 1200^{\circ}\text{C}$$

$$c_c(\theta_c) = 1100 \quad (32)$$

Os valores obtidos nas equações acima são descritivos apenas para 0% de umidade. Para a obtenção do calor específico referente a outras porcentagens de umidade, a norma apresenta valores do calor específico de pico, que se apresenta constante entre temperaturas entre 100 °C e 115 °C, decrescendo linearmente entre 115 °C e 200 °C.

$$u=0\%$$

$$c_{c,pico} = 900 \text{ J/kgK} \quad (33)$$

$$u=1,5\%$$

$$c_{c,pico} = 1470 \text{ J/kgK} \quad (34)$$

$$u=3,0\%$$

$$c_{c,pico} = 2020 \text{ J/kgK} \quad (35)$$

Para outros teores de umidade, é possível realizar interpolação linear. A Figura 16 mostra o calor específico em função da temperatura, para 4 diferentes teores de umidade no concreto. Esta variação tem relação com a absorção de energia necessária para a transformação de água líquida em vapor.

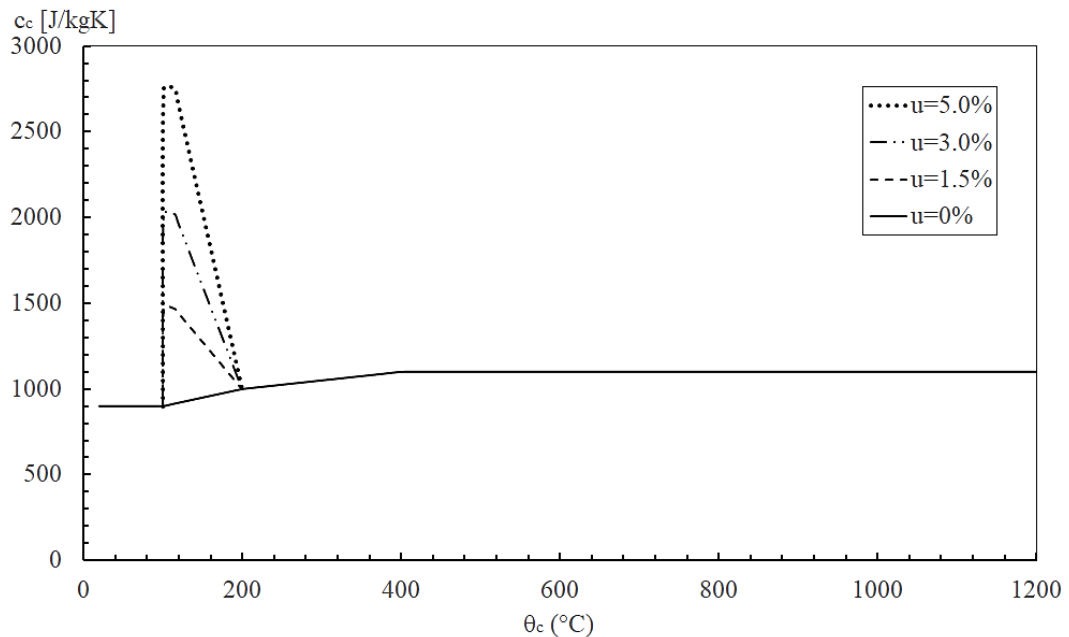


Figura 16: Calor específico do concreto.

A norma também apresenta duas equações para determinação da condutividade térmica do concreto variando de acordo com a temperatura, as equações representam os limites inferior e superior, de modo que pode-se assumir qualquer valor dentro desse intervalo. Entretanto, no caso de estruturas mistas, a EN 1994-1-2 [36] recomenda a utilização do limite superior.

Limite inferior

$$\lambda_c(\theta_c) = 1,36 - 0,136 * \left(\frac{\theta_c}{100}\right) + 0,0057 * \left(\frac{\theta_c}{100}\right)^2 \quad (36)$$

Limite superior

$$\lambda_c(\theta_c) = 2 - 0,2451 * \left(\frac{\theta_c}{100}\right) + 0,0107 * \left(\frac{\theta_c}{100}\right)^2 \quad (37)$$

A Figura 17 mostra os limites superior e inferior para a condutividade térmica.

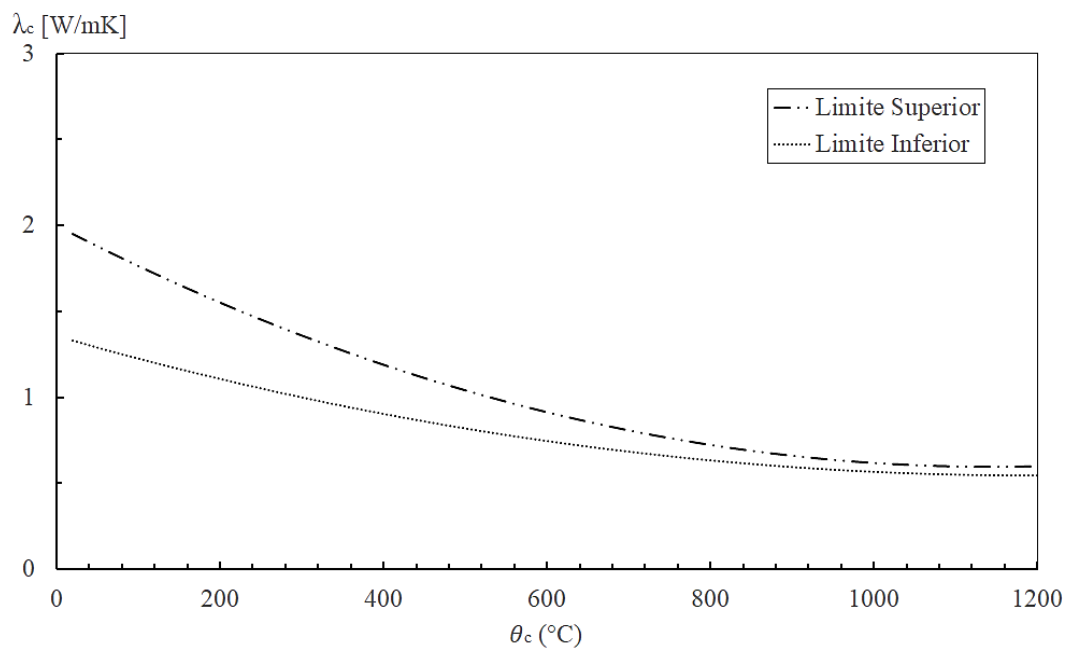


Figura 17: Limites da condutividade térmica do concreto.

Apesar da norma permitir a adoção de uma condutividade que se enquadre dentro dos limites superiores e inferiores, outros autores como W. N. Dos Santos [43] alerta para a alteração nas propriedades térmicas de materiais porosos devido a presença de umidade. O autor estudou o efeito da água na condutividade térmica e no calor específico do concreto de cimento Portland, constatando que durante o ciclo de aquecimento e arrefecimento a água tem forte influência nessas propriedades do material.

S. Guo, C.G. Bailey [22] também destacam em seu trabalho o fato de que o aumento de temperatura na face exposta da laje causa migração da umidade em direção a face não exposta, conseqüentemente causando alteração nas propriedades térmicas do concreto. Sendo assim, os autores utilizam equações alternativas de condutividade do concreto buscando adaptar esse efeito, as equações são divididas em duas situações: aquecimento e arrefecimento.

Aquecimento:

$$\theta_c \leq 150^\circ\text{C}$$

$$\lambda_c(\theta_c) = 2,2 \quad (38)$$

$$150^\circ\text{C} < \theta_c \leq 400^\circ\text{C}$$

$$\lambda_c(\theta_c) = 2,2 - \frac{1,29(\theta_c - 150)}{250} \quad (39)$$

$$\theta_c > 400^\circ\text{C}$$

$$\lambda_c(\theta_c) = 1,36 - 0,136 * \left(\frac{\theta_c}{100}\right) + 0,0057 * \left(\frac{\theta_c}{100}\right)^2 \quad (40)$$

Arrefecimento:

$$\theta_c \leq 150^\circ\text{C}$$

$$\lambda_c(\theta_c) = 1,36 - 0,136 * \left(\frac{\theta_c}{100}\right) + 0,0057 * \left(\frac{\theta_c}{100}\right)^2 \quad (41)$$

A Figura 18 mostra o comportamento da condutividade térmica de acordo com S. Guo, C.G. Bailey [22] durante as fases de aquecimento e resfriamento:

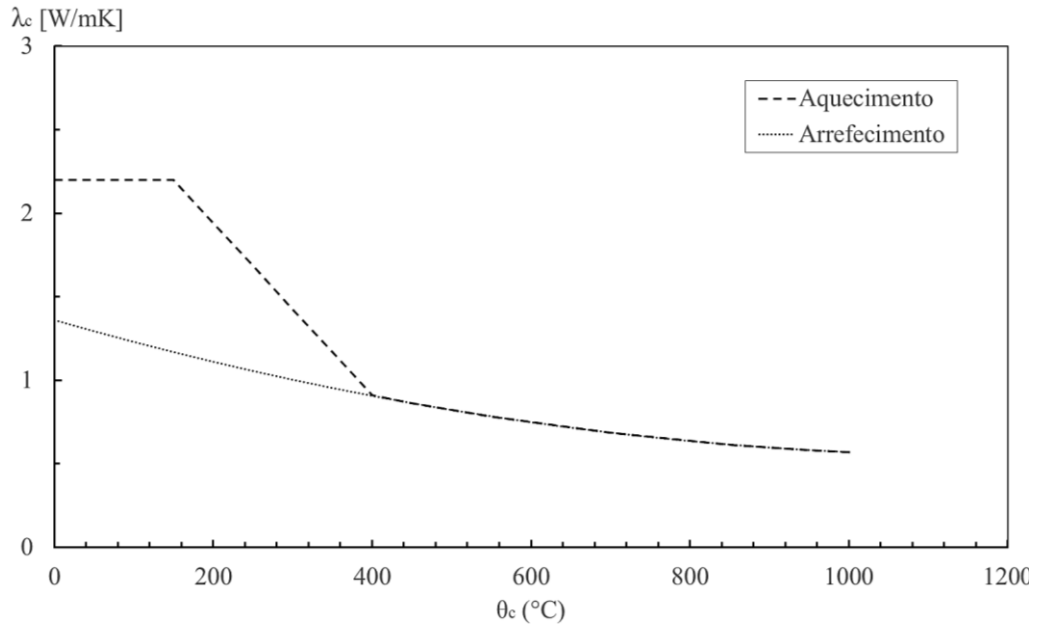


Figura 18: Formulações alternativas de condutividade do concreto durante as fases de aquecimento e arrefecimento.

Para o modelo numérico realizado nesse trabalho, foi utilizada a curva de limite superior de condutividade térmica do concreto, seguindo recomendação do Eurocódigo 4 Parte 1-2 [36]. Também foram realizadas simulações utilizando as formulações alternativas para condutividade térmica do concreto, a comparação entre os resultados obtidos será abordada no capítulo 9 desse trabalho.

Por fim, a densidade do material varia de acordo com a temperatura, tal influência é atribuída ao processo de perda de água por evaporação durante o aquecimento do material. As equações para obtenção do parâmetro são:

$$20^{\circ}\text{C} \leq \theta_c \leq 115^{\circ}\text{C}$$

$$\rho_c(\theta_c) = \rho_c(20^{\circ}\text{C}) = 2300 \quad (42)$$

$$115^{\circ}\text{C} < \theta_c \leq 200^{\circ}\text{C}$$

$$\rho_c(\theta_c) = \rho_c(20^{\circ}\text{C}) * \left(1 - 0,02 * \frac{\theta_c - 115}{85}\right) \quad (43)$$

$$200^{\circ}\text{C} < \theta_c \leq 400^{\circ}\text{C}$$

$$\rho_c(\theta_c) = \rho_c(20^{\circ}\text{C}) * \left(0,98 - 0,03 * \frac{\theta_c - 200}{200}\right) \quad (44)$$

$$400^{\circ}\text{C} < \theta_c \leq 1200^{\circ}\text{C}$$

$$\rho_c(\theta_c) = \rho_c(20^{\circ}\text{C}) * \left(0,95 - 0,07 * \frac{\theta_c - 400}{800} \right) \quad (45)$$

A variação da densidade do concreto em função da temperatura é mostrada abaixo:

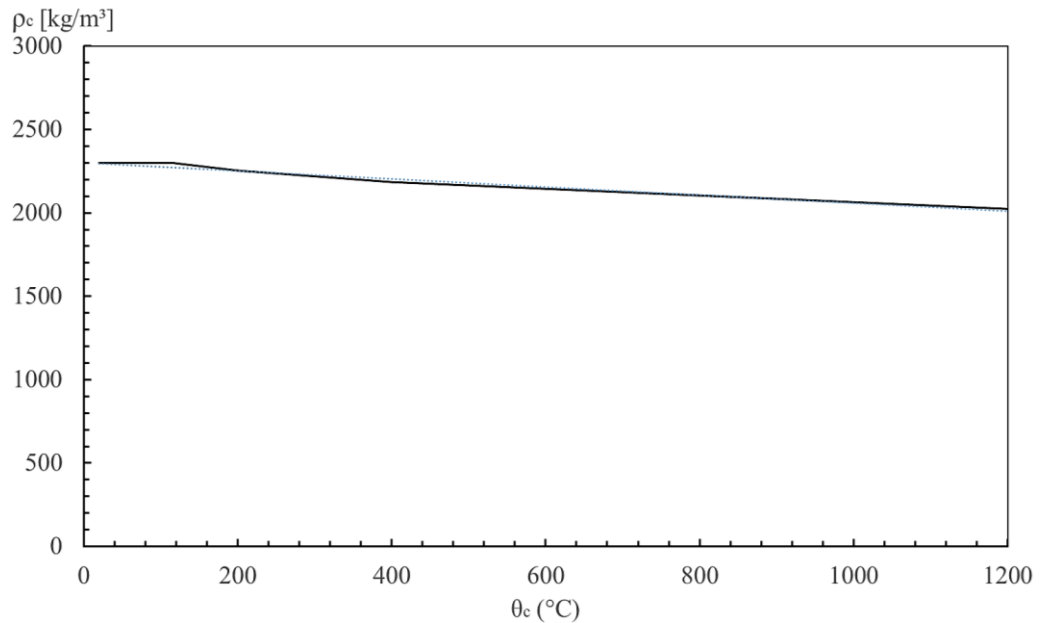


Figura 19: Densidade do concreto.

A emissividade do concreto é considerada constante e igual a 0.7.

6.1.3 Ar

As propriedades do ar foram obtidas na obra de Y. A. Çengel e A. J. Ghajar [38], de modo que o calor específico, a condutividade térmica e a densidade variam de acordo com a temperatura.

As propriedades do ar são necessárias a fim de poder simular o efeito da camada de ar existente entre a chapa de aço e o concreto “*air-gap*”, efeito esse causado pela dilatação térmica durante o incêndio, que faz com que haja separação da chapa de aço. Como referido na seção 1.1 desse trabalho, essa camada de ar tem grande influência na transferência de calor ao longo da laje mista.

A seguir, serão apresentadas o Quadro 1 e a Figura 20 referente a variação das propriedades térmicas do ar em função da temperatura para uma pressão de 1 atm.

Quadro 1: Propriedades térmicas do ar [38].

θ_{air} (°C)	c_{air} (J/kgK)	λ_{air} (W/mK)	ρ_{air} (kg/m ³)
20	1007	0.02514	1.20400
30	1007	0.02588	1.16400
60	1007	0.02808	1.05900
100	1009	0.03095	0.94580
200	1023	0.03779	0.74590
300	1044	0.04418	0.61580
400	1069	0.05015	0.52430
500	1093	0.05572	0.45650
600	1115	0.06093	0.40420
700	1135	0.06581	0.36270
800	1153	0.07037	0.32890
900	1169	0.07465	0.30080
1000	1184	0.07868	0.27720
1500	1234	0.09599	0.19900

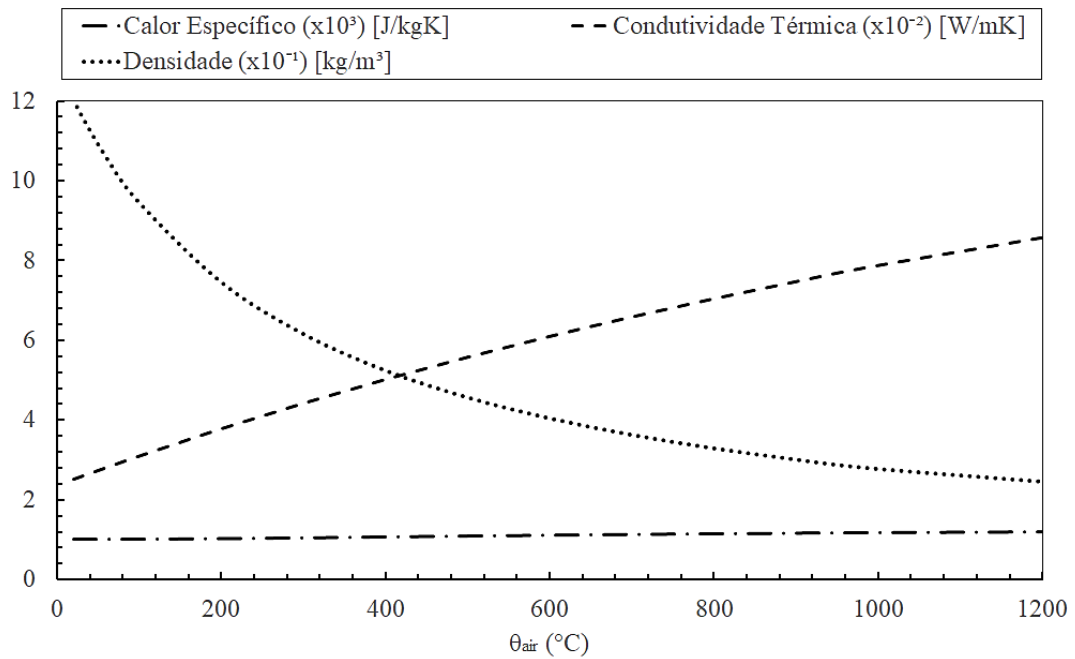


Figura 20: Propriedades térmicas do ar.

Para o modelo numérico, utilizaram-se as equações de linha de tendência de polinômios de quarto grau. As equações são apresentadas abaixo:

Calor específico:

$$c_{air}(\theta_{air,c}) = 1.9813 * 10^{-10} \theta_{air,c}^4 - 6.5304 * 10^{-7} \theta_{air,c}^3 + 6.4345 * 10^{-4} \theta_{air,c}^2 - 1.2464 * 10^{-2} \theta_{air,c} + 1006 \quad (46)$$

Condutividade térmica:

$$\lambda_{air}(\theta_{air,K}) = 1,5207 * 10^{-11} \theta_k^3 - 4,857 * 10^{-8} \theta_k^2 + 1,0184 * 10^{-4} \theta_k - 3,933 * 10^{-4} \quad (47)$$

Densidade:

$$\rho_{air}(\theta_{air,K}) = 1.292 * \frac{273.15}{\theta_k} \quad (48)$$

De modo que $\theta_{air,c}$ é a temperatura do ar em grau Celsius (°C) e $\theta_{air,K}$ a temperatura em Kelvin (K).

6.2 PROPRIEDADES MECÂNICAS

Para análise dos efeitos do carregamento na resistência da laje mista em situação de incêndio, é necessário a utilização das propriedades mecânicas dos materiais. As propriedades do aço e do concreto à temperatura de 20 °C seguem indicação dos Eurocódigo 3 Parte 1-1 [44] e Eurocódigo 2 Parte 1-1 [45].

No entanto, levando em consideração que a variação de temperatura em situação de incêndio tem influência nas propriedades mecânicas, os valores de cálculo para essa situação são apresentadas de acordo com o Eurocódigo 3 Parte 1-2 [41] e Eurocódigo 2 Parte 1-2 [42].

6.2.1 Aço

O aço é o material responsável por resistir aos esforços de tração na laje mista, sendo fundamental para garantir a resistência do elemento. A preocupação em situações de incêndio se dá ao fato das chapas de aço colaborantes estarem diretamente expostas ao fogo durante o incêndio, dado que uma das principais desvantagens do aço é a elevada condutividade térmica, o que afeta as propriedades resistentes com o aumento da temperatura.

Sendo assim, a compreensão do comportamento dessas propriedades é primordial para a elaboração de modelos numéricos de alta precisão.

Em incêndios com taxa de crescimento entre 2 e 50 K/min, a determinação das resistências à tração, compressão, flexão e corte são obtidas de acordo com a Figura 21:

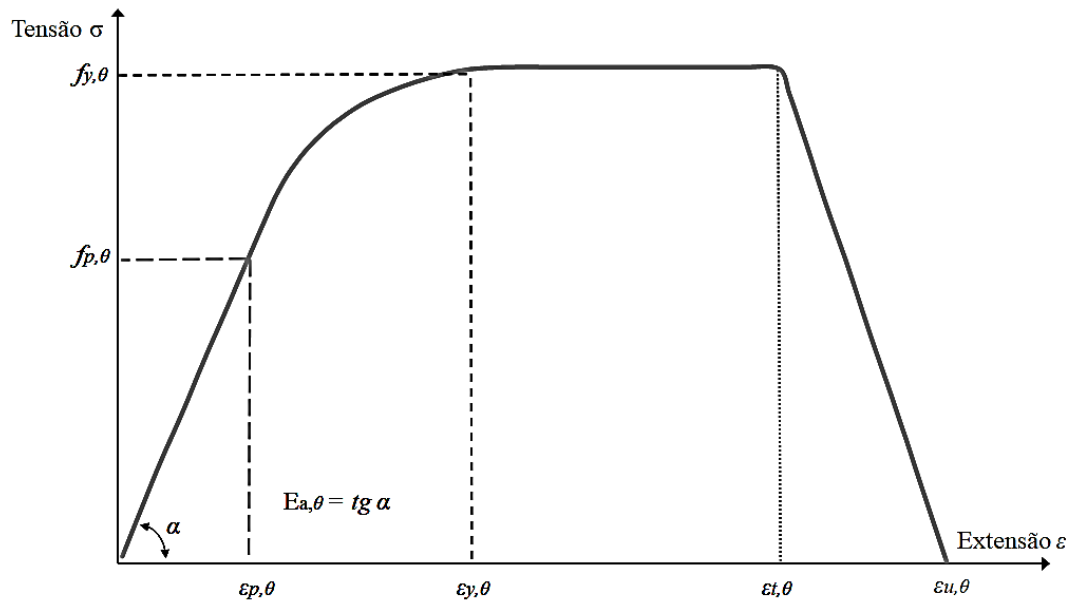


Figura 21: Gráfico de tensão x deformação do aço [41].

De modo que:

$f_{y,\theta}$ é a tensão de cedência efetiva;

$f_{p,\theta}$ é a tensão limite de proporcionalidade;

$E_{a,\theta}$ é a inclinação da reta que representa o domínio elástico (módulo de elasticidade);

$\varepsilon_{p,\theta}$ é a extensão limite de proporcionalidade;

$\varepsilon_{y,\theta}$ é a extensão de cedência;

Os limites de deformação apresentados na figura acima são estabelecidos pela norma e são apresentados no Quadro 2:

Quadro 2: Limites de deformação do aço [41].

Domínio de extensões	Tensão σ			Módulo tangente
$\varepsilon \leq \varepsilon_{p,\theta}$	$\varepsilon E_{a,\theta}$			$E_{a,\theta}$
$\varepsilon_{p,\theta} < \varepsilon < \varepsilon_{y,\theta}$	$f_{p,\theta} - c + \left(\frac{b}{a}\right) \left[a^2 - (\varepsilon_{y,\theta} - \varepsilon)^2 \right]^{0,5}$			$\frac{b(\varepsilon_{y,\theta} - \varepsilon)}{(a \left[a^2 - (\varepsilon_{y,\theta} - \varepsilon)^2 \right]^{0,5}}$
$\varepsilon_{y,\theta} \leq \varepsilon \leq \varepsilon_{t,\theta}$	$f_{y,\theta}$			0
$\varepsilon_{t,\theta} \leq \varepsilon \leq \varepsilon_{u,\theta}$	$f_{p,\theta} \left[1 - \frac{\varepsilon - \varepsilon_{t,\theta}}{\varepsilon_{u,\theta} - \varepsilon_{t,\theta}} \right]$			-
$\varepsilon = \varepsilon_{u,\theta}$	0,00			-
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	$a^2 = (\varepsilon_{y,\theta} - \varepsilon_{p,\theta}) \left(\varepsilon_{y,\theta} - \varepsilon_{p,\theta} + \frac{c}{E_{a,\theta}} \right)$			
	$b^2 = c(\varepsilon_{y,\theta} - \varepsilon_{p,\theta})E_{a,\theta} + c^2$			
	$c = \frac{(f_{y,\theta} - f_{p,\theta})^2}{(\varepsilon_{y,\theta} - \varepsilon_{p,\theta})E_{a,\theta} - 2(f_{y,\theta} - f_{p,\theta})}$			

Os fatores de redução para as relações de tensão-deformação, a temperaturas elevadas, são descritos na norma e apresentadas abaixo:

Quadro 3: Fatores de redução da resistência do aço [41].

Temperatura do aço θ_a	Fatores de redução à temperatura θ_a referidos ao valor de f_y ou E_a a 20°C			
	Seções de classe 1, 2 e 3			Seções de classe 4
	Fator de redução (referido a f_y) para a tensão de cedência efetiva $k_{y,\theta} = f_{y,\theta}/f_y$	Fator de redução (referido a f_y) para a tensão de proporcionalidade $k_{p,\theta} = f_{p,\theta}/f_y$	Fator de redução (referido a E_a) para a inclinação da reta que representa o domínio elástico $k_{E,\theta} = E_{a,\theta}/E_a$	Fator de redução (referido a f_y) para a tensão de cedência de seções laminadas a quente e soldadas a frio respectivamente $k_{0,2p,\theta} = f_{0,2p,\theta}/f_y$ $k_{0,2p,\theta} = f_{0,2p,\theta}/f_{yb}$
20 °C	1,000	1,000	1,000	1,000
100 °C	1,000	1,000	1,000	1,000
200 °C	1,000	0,807	0,900	0,890
300 °C	1,000	0,613	0,800	0,780
400 °C	1,000	0,420	0,700	0,650
500 °C	0,780	0,360	0,600	0,530
600 °C	0,470	0,180	0,310	0,300
700 °C	0,230	0,075	0,130	0,130
800 °C	0,110	0,050	0,090	0,070
900 °C	0,060	0,0375	0,0675	0,050
1000 °C	0,040	0,0250	0,0450	0,030
1100 °C	0,020	0,0125	0,0225	0,020
1200 °C	0,000	0,0000	0,0000	0,000

A norma especifica ainda que para temperaturas intermediárias, a interpolação é permitida.

6.2.2 Concreto

As propriedades de resistência e deformação do concreto em situação de incêndio, definidas no Eurocódigo 2 Parte 1-2 [42], são aplicáveis apenas para situações com taxas de aquecimento entre 2 e 50 K/min. A norma especifica ainda refere que, para taxas de aquecimento fora do intervalo mencionado, a confiabilidade das propriedades devem ser demonstradas explicitamente.

A norma apresenta um gráfico representativo de tensão versus deformação do concreto convencional.

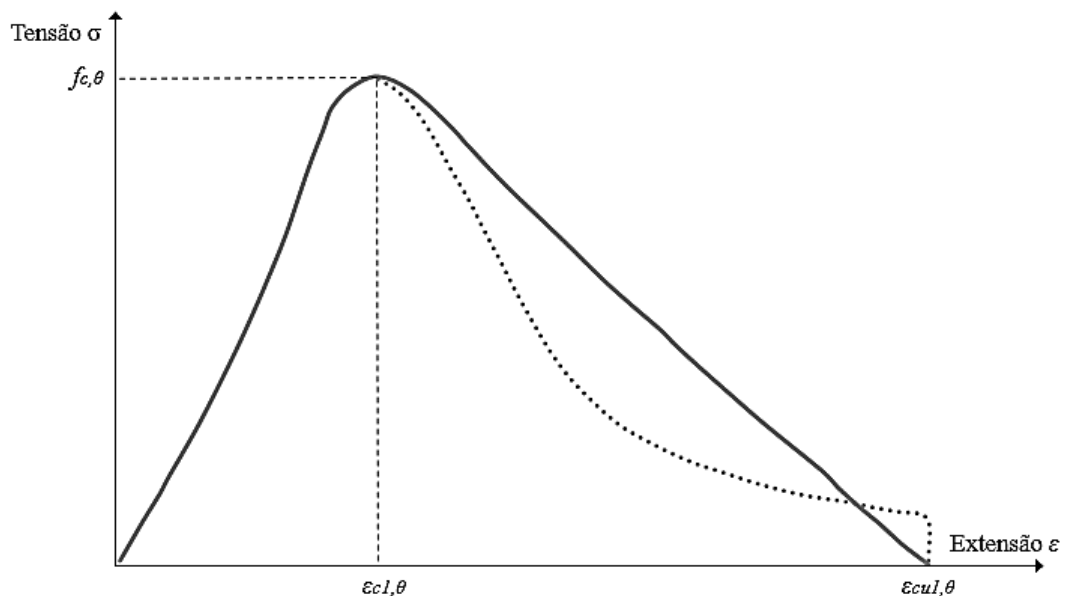


Figura 22: Gráfico de tensão *versus* deformação do concreto [42].

De modo que:

$f_{c,\theta}$ é a resistência a compressão;

$\epsilon_{c1,\theta}$ é a extensão correspondente a resistência a compressão;

$\epsilon_{cu1,\theta}$ é a extensão última do concreto;

Os parâmetros apresentados na Figura 22 são determinados pela norma através das informações apresentadas na Tabela 6:

Tabela 6: Limites de deformação do concreto [42].

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

No entanto, a norma indica que, para o caso de incêndio natural, na fase de arrefecimento, os modelos matemáticos para as relações de tensão versus deformação devem ser modificados, além de que o eventual ganho de resistência do concreto na fase de arrefecimento deve ser desconsiderado devido ao comportamento irreversível deste material (exemplo: dano por tração e compressão).

A norma indica fatores de minoração de resistência a serem aplicados de acordo com a temperatura do concreto, os fatores são indicados no Quadro 4:

Quadro 4: Fatores de redução da resistência do concreto [36].

Temperatura do concreto θ_c	Fator de redução $k_{c,\theta} = f_{c,\theta}/f_{ck}$	Extensão correspondente a resistência a compressão $\varepsilon_{c1,\theta}$
20 °C	1,00	0,00
100 °C	1,00	0,00
200 °C	0,95	0,01
300 °C	0,85	0,01
400 °C	0,75	0,01
500 °C	0,60	0,02
600 °C	0,45	0,03
700 °C	0,30	0,03
800 °C	0,15	0,03
900 °C	0,08	0,03
1000 °C	0,04	0,03
1100 °C	0,01	0,03
1200 °C	0,00	0,00

Uma vez que o concreto é arrefecido após o aquecimento, o material não recupera sua capacidade de resistência à compressão. Desse modo, a norma propõe formulações para tal efeito no Anexo C, a fim de ser utilizado em modelos de cálculo avançado com incêndio natural.

A resistência residual do concreto aquecido a uma temperatura máxima $\theta_{c,max}$ e arrefecido a uma temperatura ambiente de 20 °C, é dado pela seguinte equação:

$$f_{c,\theta,20^\circ C} = \varphi f_c \quad (49)$$

De modo que f_c é a resistência à compressão inicial e φ é dado pelas equações abaixo:

$$20^{\circ}\text{C} \leq \theta_{c,max} < 100^{\circ}\text{C}$$

$$\varphi = k_{c,\theta_{max}} \quad (50)$$

$$100^{\circ}\text{C} \leq \theta_{c,max} < 300^{\circ}\text{C}$$

$$\varphi = 0,95 - \left[\frac{0,185(\theta_{max} - 100)}{200} \right] \quad (51)$$

$$300^{\circ}\text{C} \leq \theta_{c,max}$$

$$\varphi = 0,90k_{c,\theta_{max}} \quad (52)$$

Durante a fase de arrefecimento do concreto em que $20^{\circ}\text{C} \leq \theta_c \leq \theta_{c,max}$, a resistência a compressão $f_{c,\theta}$ pode ser obtida através de interpolação linear entre $f_{c,\theta,20^{\circ}\text{C}}$ e $f_{c,\theta_{max}}$.

7 MÉTODOS SIMPLIFICADOS DE CÁLCULO

Os métodos simplificados são determinados através de testes experimentais e análises numéricas. Em se tratando de incêndio, uma vez que o custo associado a esses testes é elevado, é fundamental a existência de modelos de cálculo simplificados ao qual os projetistas possam recorrer.

Sendo assim, o Eurocódigo 4 Parte 1-2 [36] apresenta no Anexo D métodos simplificados referentes ao comportamento de lajes mistas em situação de incêndio, para o critério de isolamento (I) e de capacidade de carga (R).

Convém referir que os métodos simplificados apresentados são referentes a um incêndio padrão ISO 834 [10]. As equações apresentadas servirão de referência para a proposição de um modelo considerando incêndio natural que, em fase de aquecimento, é similar à curva padrão.

7.1 ISOLAMENTO (I)

O modelo proposto para calcular a resistência das lajes mistas pelo critério de isolamento térmico (I), é baseado em diversos aspectos, principalmente na geometria da laje. Vale ressaltar que este método simplificado, para além de aplicável apenas com incêndio padrão, não é aplicável no projeto em lajes com proteção passiva contra incêndio.

Outro aspecto importante é que a método de cálculo possui um campo de aplicação limitado pela geometria da laje. A seguir será apresentada a Tabela 7 com as limitações geométricas para aplicação do método em lajes com chapa de aço de perfis trapezoidais e reentrantes.

Tabela 7: Campo de aplicação do método simplificado de cálculo [36].

Perfil reentrante	Perfil trapezoidal
$77,0 \leq l_1 \leq 135,0$ mm	$80,0 \leq l_1 \leq 155,0$ mm
$110,0 \leq l_2 \leq 150,0$ mm	$32,0 \leq l_2 \leq 132,0$ mm
$38,5 \leq l_3 \leq 97,5$ mm	$40,0 \leq l_3 \leq 115,0$ mm
$50,0 \leq h_1 \leq 130,0$ mm	$50,0 \leq h_1 \leq 125,0$ mm
$30,0 \leq h_2 \leq 60,0$ mm	$50,0 \leq h_2 \leq 100,0$ mm

O cálculo da resistência ao fogo de lajes mistas com chapa de aço colaborante, pelo critério de isolamento térmico (I), é expresso de acordo com a equação (53):

$$t_i = a_0 + a_1 h_1 + a_2 \Phi + a_3 \frac{A}{L_r} + a_4 \frac{1}{l_3} + a_5 \frac{A}{L_r l_3} \quad (53)$$

Nesta equação: t_i é a resistência ao fogo pelo critério de isolamento (min); Φ é o fator de vista da flange superior obtido através das equações (21); l_3 é o comprimento da flange superior da chapa de aço colaborante indicado na Figura 12; $\frac{A}{L_r}$ (mm) é o fator de geometria da nervura obtido através da equação abaixo:

$$\frac{A}{L_r} = \frac{h_2 \left(\frac{l_1 + l_2}{2} \right)}{l_2 + 2 \sqrt{h_2^2 + \left(\frac{l_1 - l_2}{2} \right)^2}} \quad (54)$$

Onde A é o volume de concreto da nervura por metro de comprimento da nervura, e L_r é a área exposta da costela por metro de comprimento da costela.

Os parâmetros a_i são determinados na Tabela 8 e dependem do tipo de concreto utilizado na estrutura.

Tabela 8: Coeficientes para determinação da resistência ao fogo em relação ao critério de isolamento (I) [36].

Tipo de concreto	a_0 (min)	a_1 (min/mm)	a_2 (min)	a_3 (min/mm)	a_4 (mm.min)	a_5 (min)
Concreto convencional	-28,8	1,55	-12,6	0,33	-735	48,0
Concreto leve	-79,2	2,18	-2,44	0,56	-542	52,3

7.2 CAPACIDADE DE CARGA (R)

O cálculo simplificado para o critério de capacidade de carga (R) também é descrito no Anexo D do Eurocódigo 4 Parte 1-2 [36]. O cálculo baseia-se na classe de resistência ao fogo em questão, e na temperatura dos componentes de aço da laje mista.

Sendo as regras aplicáveis apenas para lajes simplesmente apoiadas submetidas a incêndio padrão, o método fornece equações para calcular a temperatura na *flange* superior, inferior e na alma da chapa de aço colaborante, e nos varões de aço do reforço, tendo em vista que são esses os elementos principais a resistir aos esforços de tração decorrentes de uma consição do momento positivo, ver Figura 23 e Figura 24.

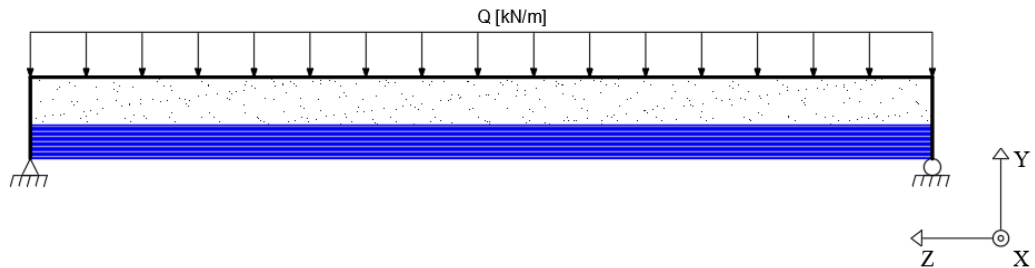


Figura 23: Laje mista simplesmente apoiada submetida a carregamento uniformemente distribuído.

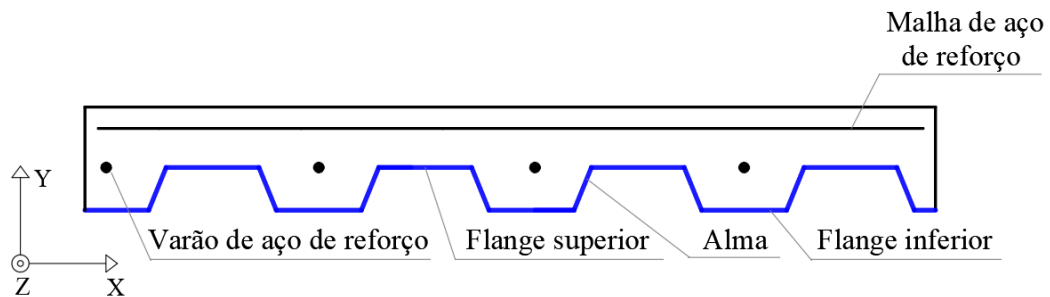


Figura 24: Componentes da laje mista em que deve ser calculada a temperatura no método simplificado.

Para o cálculo da temperatura nas respectivas regiões da chapa de aço colaborante (θ_a), a norma apresenta a seguinte equação:

$$\theta_a = b_0 + b_1 \frac{1}{l_3} + b_2 \frac{A}{L_r} + b_3 \Phi + b_4 \Phi^2 \quad (55)$$

Os parâmetros b_i são determinados no Quadro 5 dependem do tipo de concreto utilizado na estrutura e da região da chapa de aço a ser analisada. A norma indica também que para valores intermediários a interpolação linear pode ser utilizada.

Quadro 5: Coeficientes para determinação da temperatura na chapa de aço [36].

Concreto	Resistência ao fogo (min)	Região 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	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

Já para a temperatura nos varões de aço (θ_s), a norma apresenta a seguinte equação:

$$\theta_s = c_0 + c_1 \frac{u_3}{h_2} + c_2 z + c_3 \frac{A}{L_r} + c_4 \alpha + c_5 \frac{1}{l_3} \quad (56)$$

De modo que u_3 é a distância (mm) do varão de aço até à flange inferior, z é o indicador de posição ($\text{mm}^{-0,5}$) do varão de aço e α é o ângulo (°) entre a alma e a direção horizontal.

Os valores dos parâmetros c_i são apresentados no Quadro 6 e dependem do tipo de concreto utilizado na estrutura. Novamente, a norma indica também que para valores intermediários a interpolação linear pode ser utilizada.

Quadro 6: Coeficientes para determinação da temperatura no varão de aço [36].

Concreto	Resistência ao fogo (min)	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

De modo a melhor entender os parâmetros u_3 e z , a Figura 25 indica a posição dos parâmetros u_i , de modo que u_1 e u_2 são a menor distância entre o varão e as almas da chapa de aço.

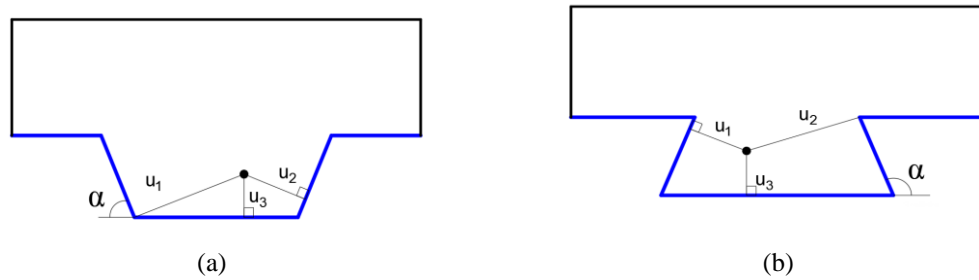


Figura 25: Parâmetros para a posição dos varões de aço: (a) Perfil trapezoidal, (b) Perfil reentrante [36].

Sendo assim, o fator z que indica a posição dos varões de aço é dado pela Equação (57):

$$\frac{1}{z} = \frac{1}{\sqrt{u_1}} + \frac{1}{\sqrt{u_2}} + \frac{1}{\sqrt{u_3}} \quad (57)$$

Após a determinação das temperaturas nos elementos de aço responsáveis por resistir aos esforços de tração, realiza-se a redução da tensão de cedência do aço, de acordo com a temperatura. Uma vez obtida as tensões, é possível realizar o somatório das forças provenientes das componentes de aço e do concreto comprimido a fim de obter a profundidade da linha neutra.

Para isso, a norma fornece a seguinte equação para a determinação da linha neutra em lajes mistas.

$$\sum_{i=1}^n A_i k_{y,\theta,i} \left(\frac{f_{y,i}}{\gamma_{M,f,i,a}} \right) + \alpha_{slab} \sum_{j=1}^m A_j k_{c,\theta,j} \left(\frac{f_{c,j}}{\gamma_{M,f,i,c}} \right) = 0 \quad (58)$$

Onde α_{slab} é um coeficiente de minoração de valor 0,85, atribuído ao fato de considerar um bloco de tensão retangular; $f_{y,i}$ é a tensão de escoamento associada ao elemento de aço de área A_i , de modo que deve-se considerar positivo caso esteja na região comprimida, e negativo caso esteja na região tracionada; $f_{c,j}$ é a resistência do concreto a 20 °C referente à área A_j presente acima da linha neutra e responsável por resistir aos esforços de compressão.

O fator de redução $k_{y,\theta,i}$ é obtido através Quadro 3, de acordo com a temperatura do elemento de aço em questão, calculada através das equações (55) e (56).

Após a determinação da posição da linha neutra, uma vez que é conhecido a posição de aplicação das forças resultantes das componentes de aço e do concreto comprimido, é possível calcular o momento resistente das lajes mistas.

O momento resistente de cálculo $M_{f,i,t,Rd}$ (positivo) é obtido através da seguinte equação:

$$M_{f,i,t,Rd} = \sum_{i=1}^n A_i z_i k_{y,\theta,i} \left(\frac{f_{y,i}}{\gamma_{M,f,i,a}} \right) + \alpha_{slab} \sum_{j=1}^m A_j z_j k_{c,\theta,j} \left(\frac{f_{c,j}}{\gamma_{M,f,i,c}} \right) \quad (59)$$

De modo que z_i e z_j são a distância entre a linha neutra e os centroides das áreas A_i e A_j .

Para o cálculo da capacidade de carga das lajes mistas à temperatura ambiente de 20 °C, foram utilizadas as equações (58) e (59) como indicado no Eurocódigo 1994 Parte 1-1 [30]. Uma vez que a temperatura em análise é de 20 °C, os coeficientes de redução $k_{y,\theta,i}$ e $k_{c,\theta,j}$ valem 1.

8 MÉTODOS AVANÇADOS DE CÁLCULO

Os métodos de cálculo avançados, diferentemente dos simplificados, permitem uma abordagem mais próxima da realidade. Através de processos iterativos em métodos e análises numéricas de problemas não lineares em condições de incêndio (análises não lineares geométricas e materiais). O Eurocódigo 1 Parte 1-2 [17] indica que os modelos avançados devem levar em consideração: as propriedades dos gases; as transferências de massa e as transferências de energia.

O modelo térmico, permitirá o estudo da distribuição da temperatura ao longo do elemento estrutural, tornando possível a avaliação da capacidade de carga das lajes mistas durante o aquecimento e arrefecimento através das equações (58) e (59).

Tendo em consideração a vasta quantidade de variáveis que envolvem a problemática das lajes mistas em situação de incêndio natural, foi necessário limitar a quantidade de configurações possíveis, e fixar algumas considerações a serem feitas nos modelos adotados.

8.1 CONDIÇÕES DE CONTORNO

A seguir serão abordadas todas as condições de contorno adotadas, de modo que os resultados obtidos estarão diretamente associados às condições estabelecidas seguindo as recomendações presentes na EN 1991-1-2 [17].

8.1.1 Curvas de incêndio natural

Uma vez que se pretende estudar o comportamento das estruturas em situações de incêndio natural, algumas adversidades devem ser apresentadas.

Durante muito tempo, os estudos envolvendo elementos estruturais em situação de incêndio foram realizadas com base em curvas de incêndio padrão. Isso se deu ao fato de que o incêndio natural pode representar uma grande quantidade de diferentes cenários, desse modo, tentar simplificar e padronizar os estudos envolvendo segurança contra incêndio foi durante muito tempo conveniente.

Como consequência, os estudos e recomendações envolvendo estudos em incêndio natural tornam-se escassos e incompletos, mesmo nos Eurocódigos. Sendo assim, buscando ao máximo compartilhar das recomendações impostas aos modelos com curva ISO 834, três das curvas de incêndio abordadas apresentarão uma fase de aquecimento análoga à da curva padrão, tendo como variável apenas a temperatura máxima e o tempo máximo de aquecimento.

Uma quarta curva de incêndio natural também deverá ser considerada, sendo caracterizada com rápido aquecimento e temperatura máxima superior aos valores apresentados para os mesmos instantes na curva de incêndio padrão ISO 834. O objetivo será estudar os efeitos causados por uma taxa de aquecimento superior à presente nos estudos envolvendo incêndio padrão.

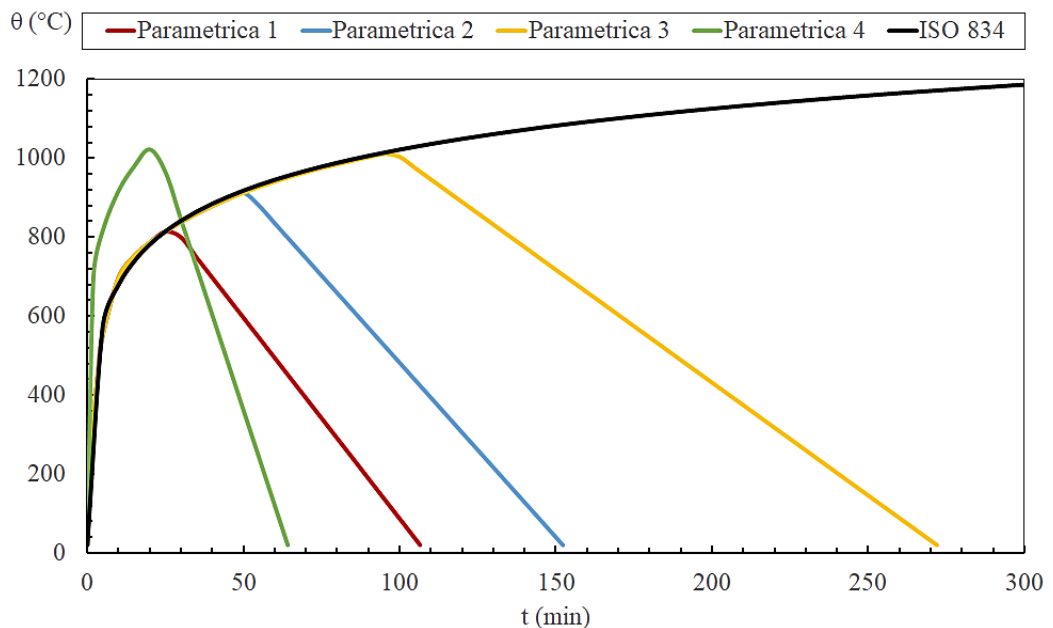


Figura 26: Curvas de incêndio natural utilizadas nos modelos térmicos.

A seguir serão apresentados valores referentes a temperatura máxima, o tempo referente a temperatura máxima e o tempo total de incêndio das curvas paramétricas apresentadas acima:

Tabela 9: Dados referente as curvas de incêndio paramétricas.

Curva de incêndio	Temperatura máxima (°C)	Tempo em que ocorre a temperatura máxima	Duração total do incêndio
Paramétrica 1	825,79	27 minutos e 26 segundos	1 hora e 46 minutos
Paramétrica 2	915,38	50 minutos e 56 segundos	2 horas e 32 minutos
Paramétrica 3	1015,05	1 hora e 38 minutos	4 horas e 32 minutos
Paramétrica 4	1036,60	22 minutos	1 hora e 4 minutos

8.1.2 Transferência de calor

Para a análise térmica, considerou-se na superfície exposta da laje mista um fluxo de calor por convecção e radiação. Sendo assim, seguindo os parâmetros de convecção recomendados pela EN 1991-1-2 [17], para incêndio natural foram feita as seguintes considerações:

Na superfície não exposta: coeficiente de convecção ($\alpha_c = 9$ [W/m²K]) e temperatura ambiente fixa ($\theta_0 = 20$ °C). Esta condição permite compensação do efeito da radiação.

Na superfície exposta: coeficiente de convecção ($\alpha_c = 35$ [W/m²K]) e temperatura inicial ($\theta_0 = 20$ °C).

Por outro lado, considerando a radiação, dentre os vários fatores que determinam a taxa de calor absorvido e emitido pelos materiais, está a emissividade (ϵ). Com base na EN 1994-1-2 [36], deve ser adotado o valor de 0,70 para o concreto e para o aço, já para o fogo, atribui-se o valor da emissividade o valor de 1,00.

Apesar do valor constante de emissividade do aço indicado na norma, os autores Hamerlinck *et al.* [33] descrevem que no caso das chapas de aço galvanizada, a emissividade é dependente da temperatura em decorrência da existência da camada de zinco. De acordo com os autores até atingir temperaturas de 400 °C, a emissividade do aço galvanizado é menor que a do concreto. No entanto, com o aumento da temperatura, há um aumento no valor da emissividade devido ao escurecimento da superfície decorrente do derretimento da camada de zinco.

A Figura 27 demonstra as condições de fronteira impostas:

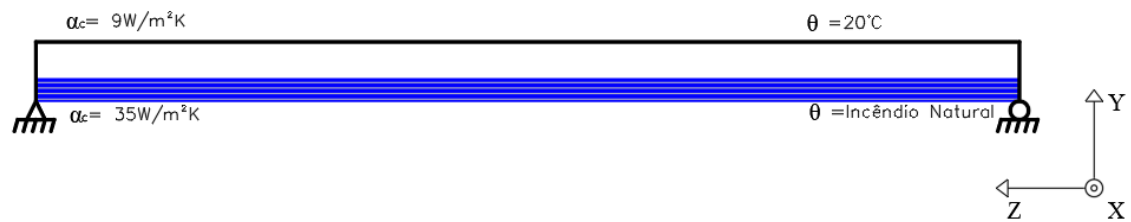


Figura 27: Condições de fronteira adotadas para as lajes mistas em incêndio natural.

8.2 PROGRAMAS DE ELEMENTOS FINITOS

8.2.1 Programa MATLAB

O MATLAB (MATrix LABoratory) é um conhecido *software* numérico de alto desempenho utilizado para cálculos numéricos. Devido à simplicidade e alta disseminação do programa, optou-se por utilizar este programa para realização de análises térmicas transitórias não lineares.

Para a construção da geometria das lajes mistas e da malha de elementos finitos, responsável pela solução das equações diferenciais parciais envolvendo os problemas de transferência de calor, utilizaram-se os códigos desenvolvidos por V. Galizzi [46] no qual a geometria da laje é gerada tendo como dados de entrada apenas os parâmetros h_1 , h_2 , l_1 , l_2 e l_3 apresentados na seção 4.3.1 desse trabalho. Havendo ainda a possibilidade de inserir uma espessura de camada de ar atribuída ao efeito “*air-gap*”.

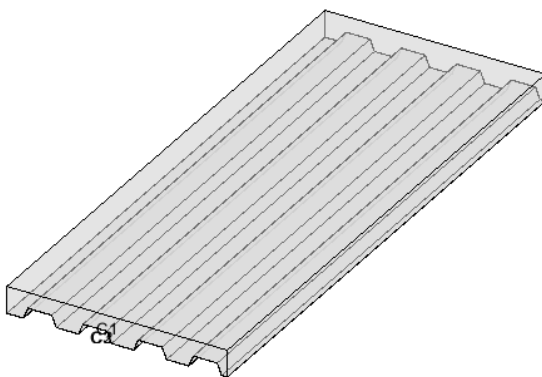


Figura 28: Geometria da laje mista gerada no programa MATLAB.

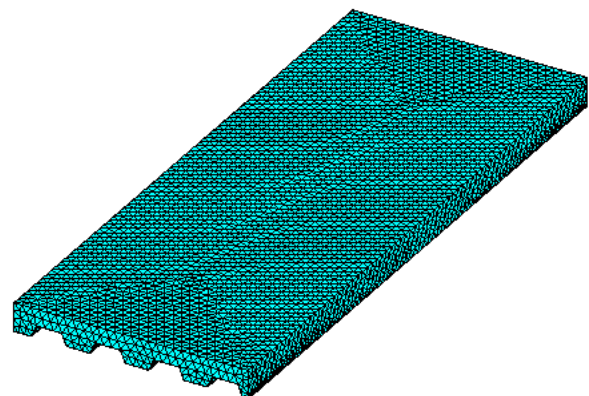


Figura 29: Malha de elementos finitos da laje mista no programa MATLAB.

Os elementos finitos utilizados são tetraedros lineares com quatro nós, essa escolha foi feita visando possibilitar uma redução no tempo de processamento. O elemento apresenta funções de interpolação linear, contendo apenas um grau de liberdade por nó referente a temperatura. A integração de Gauss é completa.

Utilizou-se no código do programa as equações apresentadas no Capítulo 6, para a obtenção das propriedades dos materiais. Além disso, através das equações apresentadas no Capítulo 5 foram aplicados os fluxos de calor por convecção e radiação na superfície exposta, o fluxo de calor por convecção na superfície não exposta das lajes mistas modeladas.

Dada a limitação computacional, e a fim de otimizar o tempo de processamento, e a precisão nos resultados obtidos, a análise de convergência, foi realizada considerando o fluxo de calor, tendo como critério de convergência uma tolerância absoluta de 10^{-1} e um valor relativo 10^{-2} .

8.2.2 Programa ANSYS

O ANSYS é um produto de uma empresa fundada em 1970 que desenvolve programas de simulação de engenharia. Para as soluções dos modelos térmicos desse trabalho, foi utilizado o programa Mechanical APDL 18.2 do ANSYS 18.2 Academic [29].

Para as simulações, foram utilizados elementos finitos disponíveis na biblioteca ANSYS. Ao todo foram selecionados 3 elementos distintos capazes de simular com eficiência a propriedade dos materiais que retratavam. Nos modelos, cada um dos 3 elementos representavam a chapa de aço colaborante, o concreto e as barras de reforço.

Para as chapas de aço, foram utilizados elementos de casca (SHELL131), apropriados para a modelagem de estruturas de paredes finas. Estes elementos são compatíveis com o comportamento de flexão e fornecem bons resultados de deformação.

Para a representação do concreto, foram adotados os elementos tridimensionais sólidos (SOLID70), normalmente utilizados para a modelagem de estruturas com paredes espessas.

Por fim, as barras de reforço, tanto para os momentos negativos quanto para os positivos, foram utilizados elementos unidimensionais de ligação (LINK33).

Alguns modelos adicionais foram realizados visando simular o efeito “*air-gap*”. Para isso, utilizou-se o elemento de casca SHELL131 para representar a fina camada de ar presente entre a chapa de aço e o concreto.

A seguir, será detalhado cada elemento adotado, explicitando suas respectivas propriedades e funções de aproximação.

SHELL131

O elemento SHELL131 é tridimensional e possui capacidade de condução térmica em seu plano e através da sua espessura. O elemento é formado por 4 nós, podendo possuir até 32 graus de liberdade de temperatura por nó. Ele é aplicável em análises térmicas tridimensionais, tanto em estado estacionário quanto transitório. A escolha do elemento SHELL131 se deu pela capacidade de transmitir calor e gerar temperatura nos elementos.

Uma vez que esse elemento permite a criação de camadas distintas (LAYERS), com espessuras e propriedades de materiais distintos, foi possível a elaboração de modelos com contato direto entre a chapa de aço e o concreto, considerando apenas uma camada, e modelos considerando o “*air-gap*”, considerando duas camadas.

A Figura 30 apresenta visualmente a configuração de nós e camadas do elemento SHELL131:

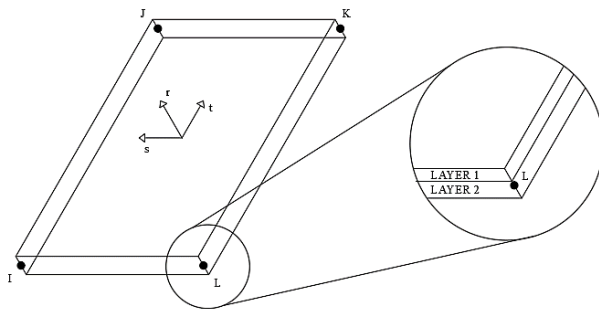


Figura 30: Configuração dos nós e camadas do elemento SHELL131.

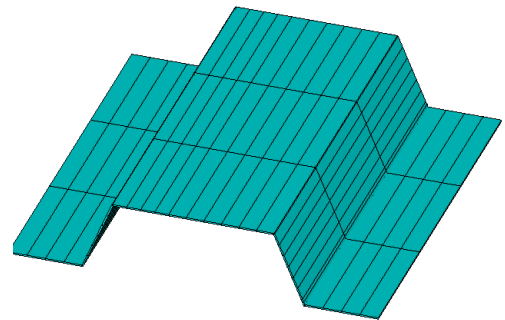


Figura 31: Elemento finito SHELL131.

De acordo com a imagem apresentada, nos modelos que continham a camada representativa da camada de ar, o LAYER 1 simula o “*air-gap*”, enquanto que o LAYER 2 retrata a chapa de aço colaborante.

Apesar do elemento possibilitar uma evolução quadrática das temperaturas na espessura, foi adotada uma variação linear da temperatura no sentido do eixo perpendicular à superfície da chapa de aço. Uma vez que como constatado e relatado por L. M. S. Prates [47], em decorrência da alta condutividade térmica do aço, da fina espessura da chapa de aço colaborante e conseqüente baixa influência no desenvolvimento do campo de temperaturas, a temperatura na espessura da chapa de aço será aproximadamente constante.

Os cálculos de temperatura no elemento são realizados conforme seu desenvolvimento na superfície e na espessura do material, para o cálculo da temperatura no plano, utiliza-se a equação (60):

$$\theta = \frac{1}{4} [\theta_I(1-s)(1-t) + \theta_J(1+s)(1-t) + \theta_K(1+s)(1+t) + \theta_L(1-s)(1+t)] \quad (60)$$

Seguindo a mesma lógica, a temperatura ao longo da espessura do material é dada pela equação (61):

$$\theta = \frac{1}{2} [\theta_{SUP}(1+r) + \theta_{INF}(1-r)] \quad (61)$$

Em que os parâmetros de espessura são demonstrados na Figura 32:

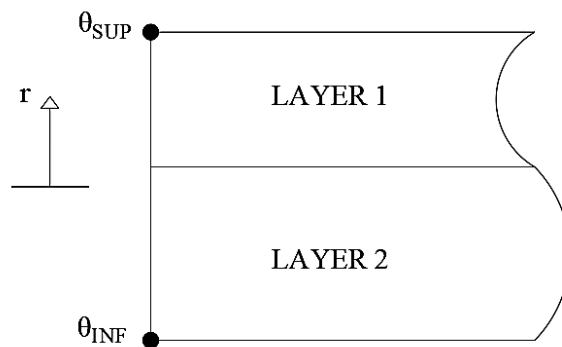


Figura 32: Parâmetros referentes a espessura do elemento SHELL131.

Além disso, visando a interligação entre os elementos SHELL e SOLID, a opção “Paint” foi ativada, para considerar que a temperatura na superfície inferior de cada nó seja igual à temperatura de nó em lidação com o elemento sólido.

SOLID70

O elemento SOLID70 dispõe de uma capacidade de condução térmica tridimensional. Composto por oito nós, contendo um único grau de liberdade em cada nó, que é referente à temperatura. O SOLID70 pode ser aplicado tanto em análises térmicas em regime estacionário quanto em regime transitório.

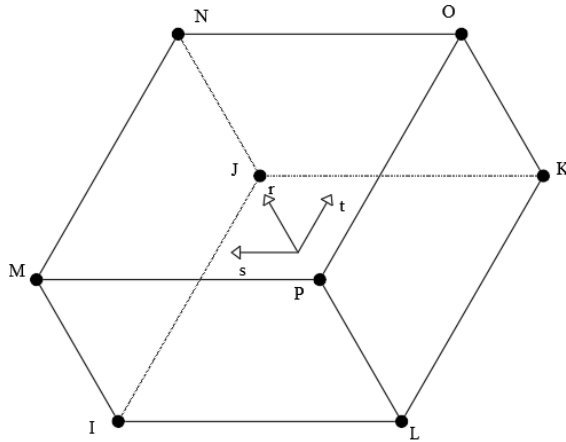


Figura 33: Configuração dos nós do elemento SOLID70.

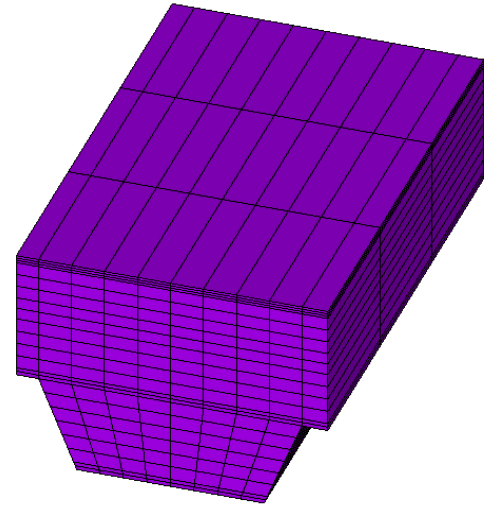


Figura 34: Elemento finito SOLID70.

$$\theta = \frac{1}{8} [\theta_I(1-s)(1-t)(1-r) + \theta_J(1+s)(1-t)(1-r) + \theta_K(1+s)(1+t)(1-r) + \theta_L(1-s)(1+t)(1-r) + \theta_M(1-s)(1-t)(1+r) + \theta_N(1+s)(1-t)(1+r) + \theta_O(1+s)(1+t)(1+r) + \theta_P(1-s)(1+t)(1+r)] \quad (62)$$

Para o cálculo da temperatura, é utilizada a equação (62):

LINK33

O elemento unidimensional LINK33 possui capacidade de conduzir calor entre seus dois nós, contendo apenas um único grau de liberdade em cada nó, correspondente à temperatura. Assim como os elementos SHELL131 e SOLID70, o LINK33 pode ser aplicado em análises térmicas em regime estacionário ou transiente.

Podendo a área do elemento ser variável, torna-se possível modificar a seção dos varões de acordo com a necessidade, distinguindo assim os varões de aço da malha de reforço.

Este elemento utiliza funções de interpolação lineares entre os dois nós e possui integração exata (programada).

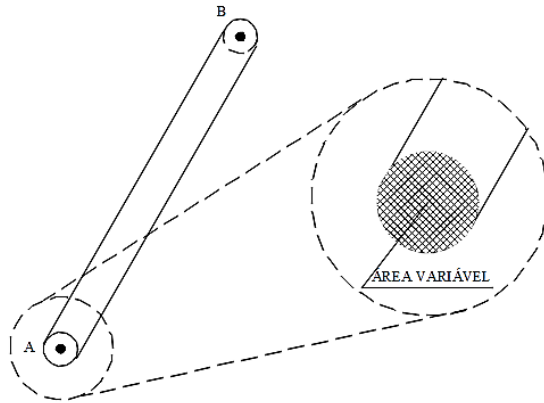


Figura 35: Configuração dos nós do elemento LINK33.

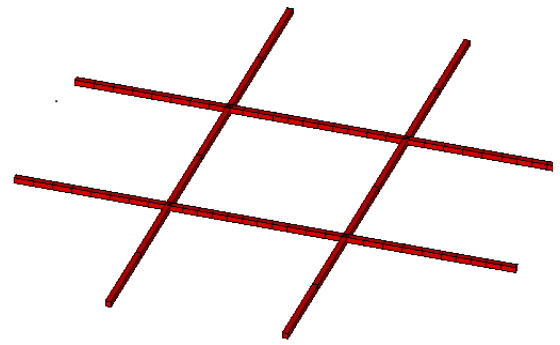


Figura 36: Elemento finito LINK33.

9 VALIDAÇÃO DOS MODELOS TÉRMICOS

Uma vez que os custos associados aos testes de lajes mistas em situação de incêndio são elevados, as simulações numéricas se mostraram uma excelente ferramenta para complementar ou substituir essa necessidade.

No entanto, diversos são os parâmetros e condições de fronteiras que podem ser adotados e impostos nesses modelos. Antes de avaliar os resultados obtidos pelos modelos numéricos, são necessárias validações do modelo a fim de que possa se comprovar a confiabilidade dos resultados.

Sendo assim, com o intuito de comprovar a confiabilidade e precisão dos resultados obtidos nos modelos utilizados para a elaboração desse trabalho, foram reproduzidos alguns ensaios reais de lajes mistas em situação de incêndio natural. O registro em questão dispunha de informações e condições necessárias para a reprodução dos testes e estão registrados na bibliografia.

Em seguida serão descritos e detalhados os modelos numéricos realizados baseados nos resultados experimentais, bem como a apresentação e comparação dos resultados obtidos nos modelos numéricos e os experimentais.

Os pesquisadores S. Guo, C.G. Bailey [22], realizaram no ano de 2010 ensaios reais de lajes mistas em situação de incêndio natural. O trabalho utilizado apresenta 7 lajes com chapa de aço colaborante submetidas a diferentes níveis de carregamento e configurações de incêndio natural.

A seguir serão detalhadas todas as características referentes ao modelo real, ao modelo numérico, e os resultados obtidos nas simulações.

9.1.1 Caracterização do ensaio

As 7 lajes mistas ensaiadas em situação de incêndio eram compostas de concreto convencional e continham o mesmo perfil de chapa de aço colaborante, de geometria trapezoidal CF60/1.2. a malha de aço (A193) utilizada tinha barras com 7mm de diâmetro espaçadas com uma distância de 200 mm.



Figura 37: Ensaio de laje mista submetida a carregamento mecânico em incêndio natural (S. Guo [23]).

As lajes possuíam um enchimento de 85 mm de concreto sobre a chapa de aço colaborante, sendo a espessura da chapa de 1,2 mm. A malha de reforço (A193) foi posicionada a 30 mm da superfície superior da laje. Por fim, para cada laje foi realizada a medida da umidade do concreto.

A Figura 38 demonstra as configurações e disposições geométricas das lajes ensaiadas:

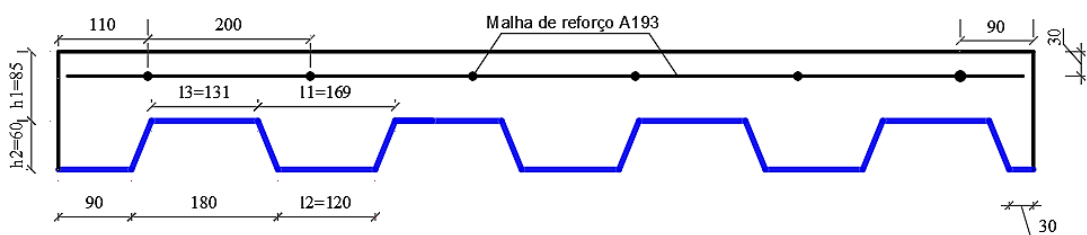


Figura 38: Configurações e disposições geométricas das lajes mistas ensaiadas (Adaptado de S. Guo, C.G. Bailey [22]).

As lajes apresentavam uma dimensão de 1,2 m de largura e 6,45 m de comprimento, sendo apoiadas por consolas nas extremidades, posicionadas a uma distância de 1,1 m dos apoios verticais, de modo a formar um vão médio de 4 m.

Todas as lajes tiveram carregamento aplicado por um cilindro hidráulico, que distribuiu a carga em 4 locais, sendo a intensidade da carga mantida constante durante todo o ensaio. O peso próprio da laje foi de 9,6 kN e a carga total aplicada nas lajes variou entre 12 a 72 kN.

A Figura 39 apresenta a disposição dos apoios, dos pontos de aplicação das cargas, do forno e suas respectivas locações:

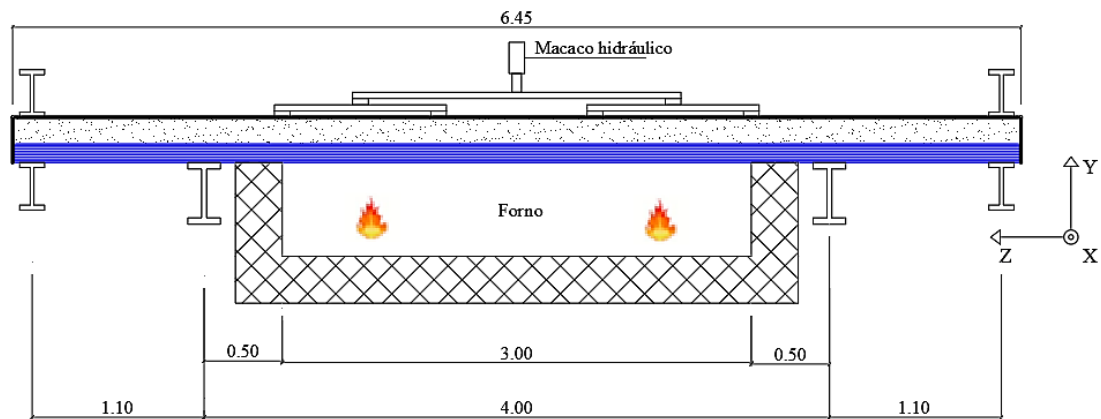


Figura 39: Localização dos apoios, dos pontos de aplicação das cargas e do forno nas lajes mistas ensaiadas (Adaptado de S. Guo, C.G. Bailey [22]).

Em relação às análises térmicas, o forno aqueceu a laje ao longo de 3 metros, como apresentado na Figura 39. No total, foram simulados três diferentes cenários de incêndio: o Fogo 1, apresenta uma fase de aquecimento com duração de 40 minutos e seguido por uma fase de arrefecimento; o Fogo 2, a fase de aquecimento durou 90 minutos e foi seguido de uma longa fase de arrefecimento; o Fogo 3, apresenta uma fase de aquecimento idêntica ao Fogo 1, com duração de 40 minutos, porém com uma fase de arrefecimento de longa duração.

A Figura 40 apresenta as curvas de temperatura do gás para os três diferentes cenários de incêndio:

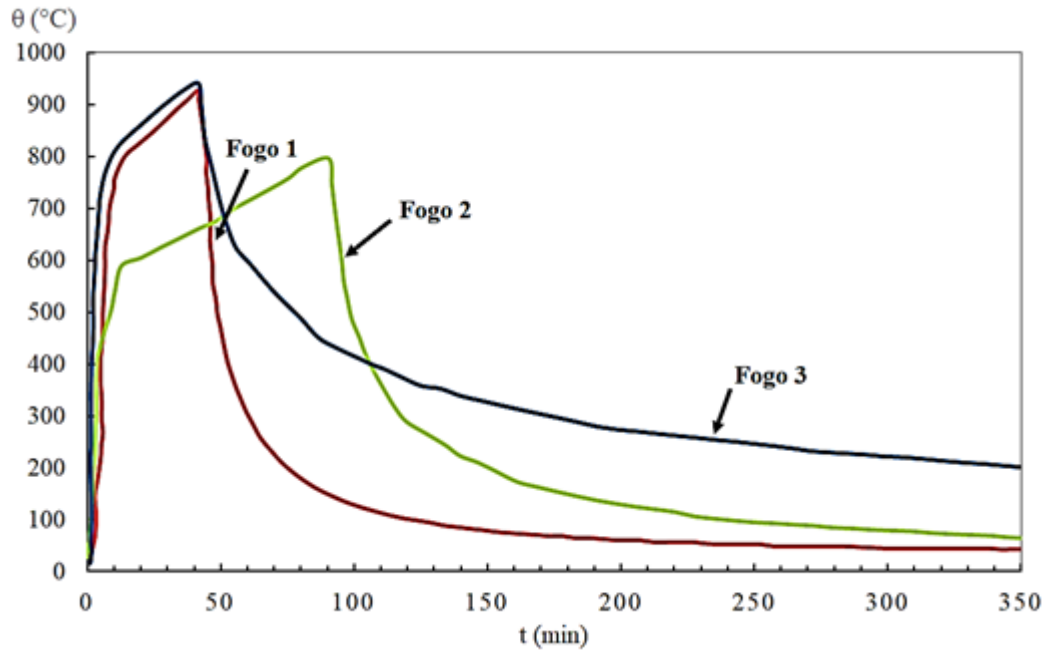


Figura 40: Curvas de temperatura do gás para os três cenários de incêndio natural ensaiados (Adaptado de S. Guo, C.G. Bailey [22]).

Apenas três das 7 lajes ensaiadas serão abordadas na validação do modelo deste trabalho, a Tabela 10 apresenta a nomenclatura utilizada para identificação de cada laje, a carga mecânica à qual foi aplicada, o cenário de incêndio submetido e a umidade do concreto.

Tabela 10: Características das lajes mistas ensaiadas utilizadas para validação.

Laje N°	Carga aplicada (kN)	Cenário de incêndio	Umidade (%)
Laje 1	44 kN	Fogo 1	1,50
Laje 2	44 kN	Fogo 2	2,00
Laje 3	44 kN	Fogo 3	1,86

Fonte: Adaptado de S. Guo, C.G. Bailey [22].

9.1.2 Modelo numérico térmico

Os modelos numéricos desenvolvidos nos programas ANSYS e MATLAB, buscaram reproduzir as configurações apresentadas no experimento com a maior fidelidade possível aos dados fornecidos pelos autores.

No programa ANSYS, para a representação do concreto foram utilizados elementos sólidos (SOLID70), já para a chapa de aço colaborante a camada “*air-gap*”, foram utilizados elementos de casca (SHELL131), para os varões de reforço e para a malha de reforço, foram utilizados elementos de ligação (LINK33).

Já no programa MATLAB, reproduziu-se a geometria das lajes como indicado na Figura 38, assim como os parâmetros de incêndio e umidade apresentados na Tabela 10. A seção longitudinal da laje foi reduzida a uma dimensão de 3 m, referentes à parcela da laje que está inserida no forno, como representado na Figura 39.

Nas simulações térmica foram utilizadas as condições de contorno descritas na seção 8.1.2 desse trabalho, de modo que baseou-se nos valores e recomendações presentes no Eurocódigo 1 Parte 1-2 [17].

Os fatores de vista atribuídos ao perfil da chapa de aço das lajes, para a flange superior ($\Phi_{f, sup}$) e para a alma (Φ_{alma}), foram determinados de acordo com as equações (21) e (22) respectivamente, e são indicados na Tabela 11.

Tabela 11: Fatores de vista S. Guo, C.G. Bailey [22].

Elemento	Fator de vista (Φ)
Flange superior	0,78
Alma	0,60

O tempo de incêndio utilizado nas simulações foi de 300 minutos, um pouco menos que o incêndio reportado pelos autores, essa redução busca otimizar o tempo de simulação, os resultados não são afetados pois a partir dos 300 minutos de incêndio há pouca variação na temperatura, uma vez que já encontra-se na fase final do arrefecimento.

Todas as 3 lajes foram simuladas considerando 4 configurações de contato entre a chapa de aço e o concreto, foram elas: contato perfeito entre os elementos (MAT.CD); camada de “*air-gap*” com 0,5 mm (MAT.AG1), 1,0 mm (MAT.AG2) e 2,0 mm (MAT.AG3) de espessura.

Inicialmente consideraram-se os valores de condutividade do concreto de acordo com a equação (37) proposta pela norma europeia. Após a determinação da melhor configuração de contato entre chapa de aço e concreto, realizou-se novamente a simulação no programa MATLAB das 3 lajes para tal modelo, considerando as equações (38), (39), (40) e (41) de condutividade do concreto apresentadas por S. Guo, C.G. Bailey [22].

Em seguida, realizaram-se-se as simulações térmicas através do programa ANSYS, utilizando a espessura de “*air-gap*” determinada como a melhor opção, as mesmas configurações geométricas, condições de fronteira e propriedades dos materiais utilizados no programa MATLAB.

Dois modelos foram utilizados na validação: o primeiro considerava o coeficiente de convecção $\alpha_c = 9$ [W/m²K] na superfície não exposta da laje, como indicado pela EN

1991-1-2 [17] (ANSYS.CONV1), já o segundo modelo considerava o coeficiente de convecção $\alpha_c = 20$ [W/m²K] na superfície não exposta da laje (ANSYS.CONV2).

O modelo ANSYS.CONV2 foi realizado na tentativa de melhorar a convergência entre os resultados experimentais e numéricos, no entanto, tal consideração só seria justificada caso houvesse algum mecanismo de ventilação na superfície não exposta da laje no ensaio de S. Guo, C.G. Bailey [22].

O Quadro 7 a seguir apresenta os modelos elaborados na validação dos modelos numéricos.

Quadro 7: Detalhamento dos modelos utilizados na validação dos modelos numéricos.

Programa	Simbologia	Descrição
MATLAB	MAT.CD	Contato direto entre o concreto e o aço
	MAT.AG1	Camada de air-gap com 0.5 mm de espessura
	MAT.AG2	Camada de air-gap com 1.0 mm de espessura
	MAT.AG3	Camada de air-gap com 2.0 mm de espessura
	EN	Condutividade térmica proposta pelo Eurocódigo [42]
	GUO	Condutividade térmica proposta pelos autores S. Guo, C.G. Bailey [22]
ANSYS	ANSYS.CONV1	Coeficiente de convecção na superfície não exposta de 9W/m ² K
	ANSYS.CONV2	Coeficiente de convecção na superfície não exposta de 20W/m ² K

9.1.3 Resultados

Para os quatro modelos térmicos de contato direto entre o aço e o concreto (MAT.CD) e os três considerando a camada de ar (MAT.AG1, MAT.AG2 e MAT.AG3), foram medidas as temperaturas das lajes na face exposta, e a 5 e 45 mm da face não exposta, comparando os valores com os resultados experimentais (EXP).

A Figura 41 apresenta a posição dos termopares utilizados para a medição das temperaturas no experimento, bem como os pontos de coleta de dados de temperatura dos modelos térmicos. Todos estes pontos foram analisados no meio vão da laje.

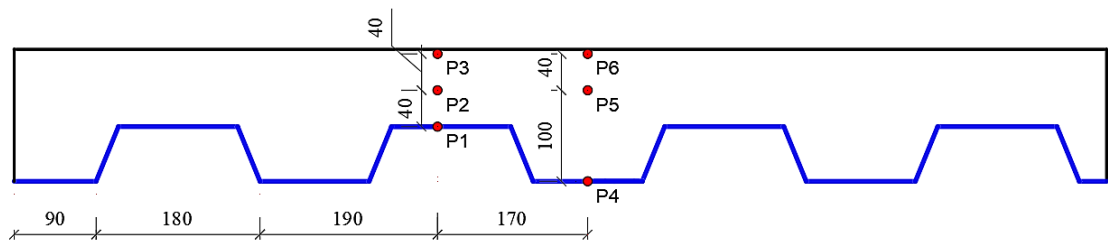


Figura 41: Pontos de medição da temperatura nas lajes de validação.

A Figura 42 apresenta a comparação entre os 4 modelos térmicos e o experimental para os pontos P4 e P6 da Laje 1. Os demais gráficos referentes aos pontos restantes das 3 lajes estão dispostos no Anexo A desta tese.

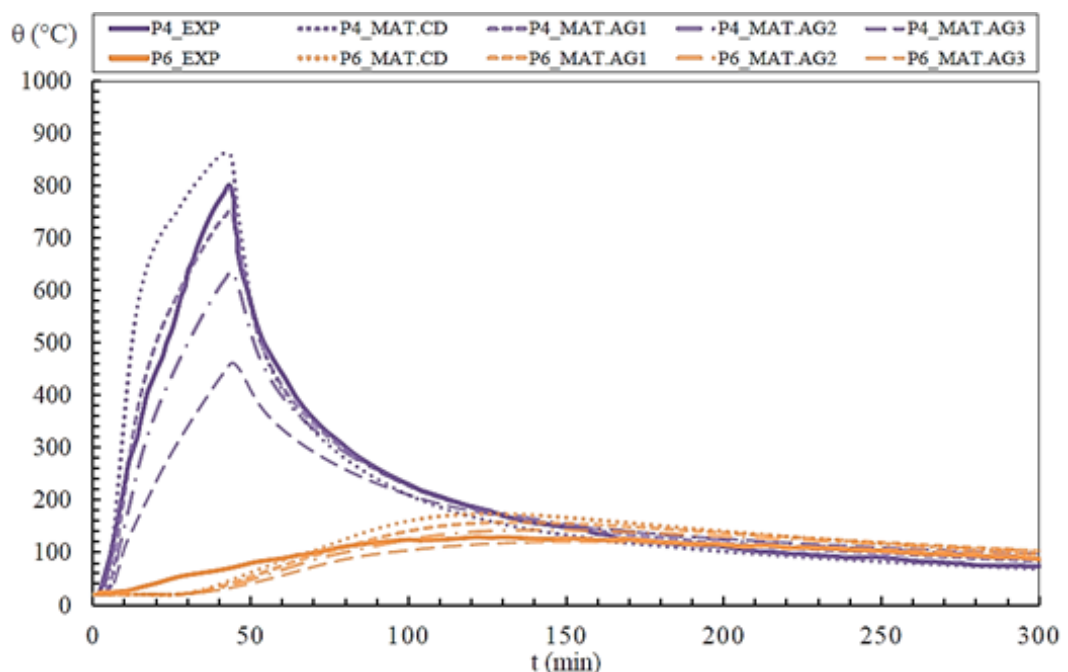


Figura 42: Comparação entre os modelos térmicos e valores experimentais dos pontos P4 e P6 da Laje 1.

Como pode-se observar na imagem acima, que entre os quatro modelos, o modelo MAT.AG1, que corresponde a uma camada de ar com espessura de 0,5 mm, apresenta uma melhor convergência de modo geral. No ponto P4 que está localizado próximo a face exposta da laje, os instantes iniciais do incêndio, que correspondem à fase de aquecimento, apresentam um leve atraso no aquecimento da região. Em contrapartida, estágio avançados de arrefecimento as temperaturas do modelo numérico apresentam-se superiores, causando um ligeiro afastamento da curva experimental. Por outro lado, no Ponto 6 que está localizado a apenas 5 mm da face não exposta, todos os 4 modelos apresentam um desfasamento no aquecimento, nos minutos iniciais do incêndio. Este desfasamento pode estar relacionado com a migração de água no processo de aquecimento que poderá retardar o aquecimento do concreto nesta posição.

Tendo em vista que o desfasamento inicial atrasa o aquecimento nos pontos mais acima da seção transversal da laje, os instantes iniciais acabam por subestimar a temperatura real, enquanto que a fase de arrefecimento acaba por subestimar a velocidade de arrefecimento da região. No entanto, de modo geral, tal diferença entre as temperaturas é reduzida, de modo que o modelo MAT.AG1 apresenta uma boa representatividade em ambas as fases de aquecimento e arrefecimento. As mesmas considerações podem ser feitas para as Lajes 2 e 3.

Sendo assim, o modelo que apresentou melhor convergência foi o MAT.AG1, logo, convencionou-se para as simulações térmicas a adoção de uma camada isolante de ar “*air-gap*” de 0,5 mm. Uma vez definido o modelo ideal, realizaram-se novas simulações para todas as lajes, a Figura 43 apresenta a comparação dos modelos considerando utilizando a equação de condutividade do concreto (37) proposta pelo Eurocódigo (EN) e utilizando as equações (38), (39), (40) e (41) apresentadas por S. Guo, C.G. Bailey [22] (GUO).

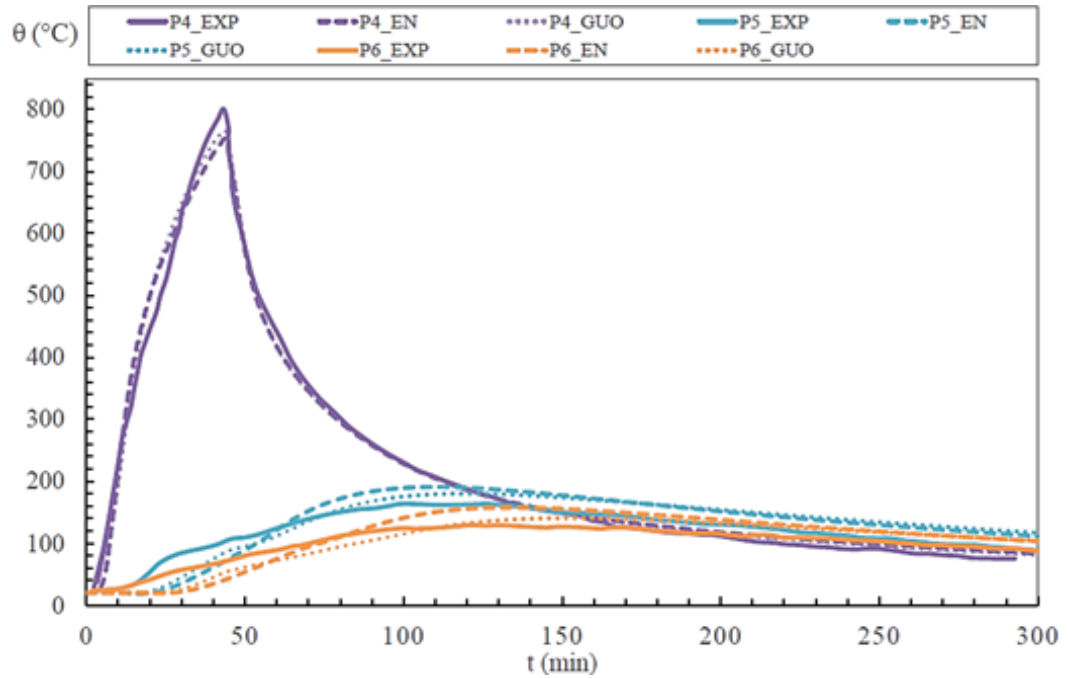


Figura 43: Comparação entre o modelo térmico MAT.AG1 e valores experimentais dos pontos P4, P5 e P6 da Laje 1 utilizando as duas propostas de equações de condutividade térmica do concreto.

Como pode-se observar na Figura 43, o modelo térmico MAT.AG1 apresenta bons resultados para as duas propostas de condutividade térmica do concreto. Entretanto, o modelo em que considera as equações alternativas de S. Guo, C.G. Bailey [22] (GUO), apresenta uma convergência ainda maior, principalmente na fase de arrefecimento.

Sendo assim, visando representar a maior fidelidade possível para com a realidade, optou-se por utilizar nos modelos térmicos, o modelo MAT.AG1.

A Figura 44 apresenta os resultados obtidos com o modelo térmico ANSYS.CONV1.

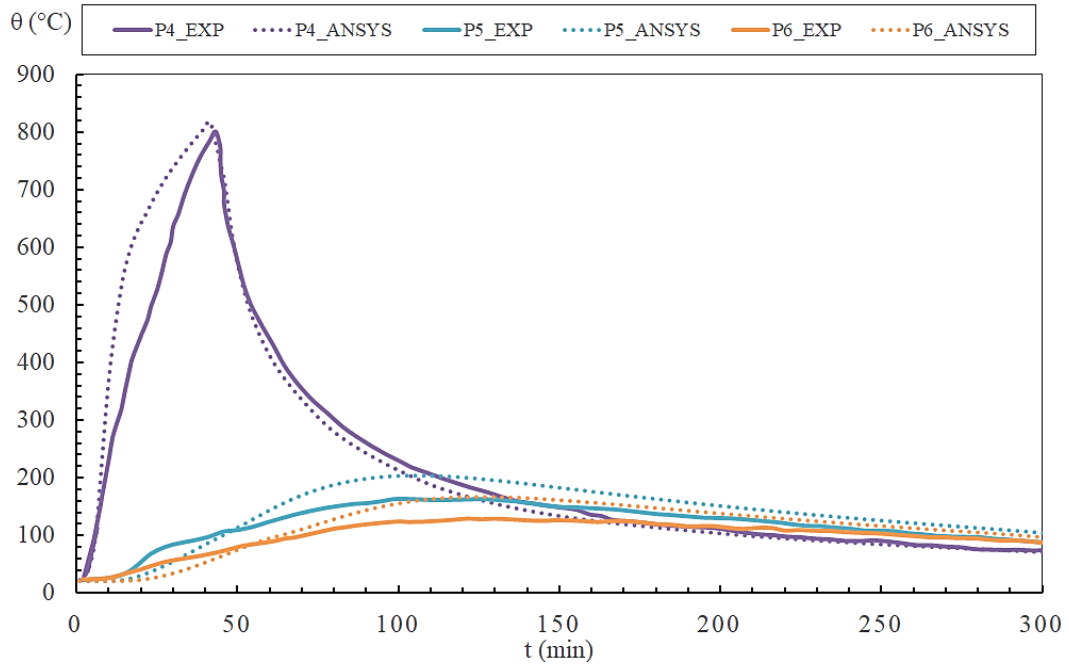


Figura 44: Comparação entre o modelo térmico ANSYS.CONV1 e valores experimentais dos pontos P4, P5 e P6 da Laje 1.

Como pode ser observado, as curvas de temperatura obtidas no programa ANSYS são equivalentes às obtidas no modelo MAT.AG1 que utiliza as equações de condutividade do concreto do Eurocódigo. Destaca-se apenas o fato de que as curvas obtidas no ANSYS apresentarem uma evolução da temperatura levemente superior à obtida no MATLAB. Tal efeito pode ser atribuído à forma como é representada a chapa de aço colaborante e a camada de ar nos programas de elementos finitos. No programa MATLAB, a chapa de aço e a camada de ar são representadas como elementos sólidos, já no ANSYS, estas regiões são representadas como elementos de casca, possuindo coincidência de nós.

A Figura 45 apresenta os resultados obtidos nos modelos térmicos dos programas ANSYS e MATLAB, para a Laje 2, que está submetida a curva de incêndio Fogo 2. Destaca-se que que o cenário de incêndio é diferente do anterior, sendo o tempo da fase de aquecimento superior.

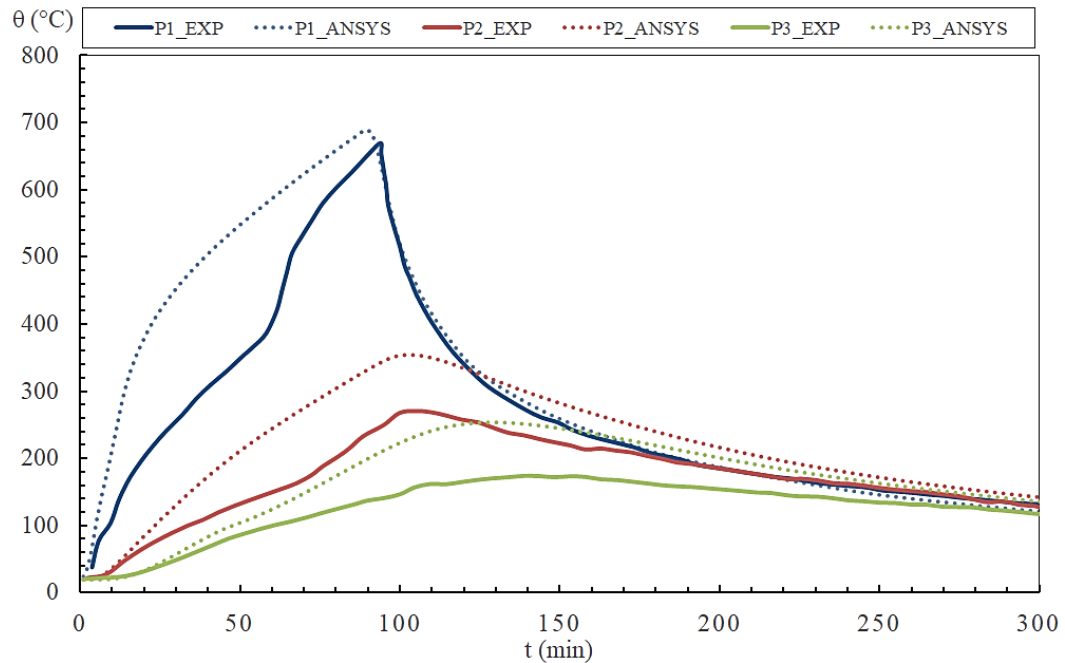


Figura 45: Comparação entre o modelo térmico ANSYS.CONV1, MAT.AG1 e valores e valores experimentais dos pontos P1, P2 e P3 da Laje 2.

Observa-se novamente que apesar do comportamento das curvas serem semelhantes, o modelo do programa ANSYS acabou por superestimar as temperaturas em todas as regiões das medições apresentadas nesta laje mista. A medição experimental também apresenta uma variação significativa da taxa de aquecimento no ponto P1, ao minuto 60. Este evento não está justificado no documento de consulta.

O modelo numérico do programa MATLAB, apresenta uma melhor convergência, pois apesar de ainda superestimar as temperaturas na região do concreto, apresenta-se ligeiramente mais próximo das curvas de temperatura do ensaio, quando comparado aos resultados obtidos no modelo numérico do ANSYS. Essa diferença pode ser atribuída ao modo que foi realizado o arrefecimento durante o ensaio, fator que pode alterar as condições de fronteira impostas. Sendo assim, será necessário mais resultados experimentais para melhor calibrar os modelos.

A Figura 46 apresenta a comparação entre as temperaturas obtidas no ensaio experimental e nos modelos numéricos para a Laje 3. Esta última laje foi submetida a curva de incêndio natural Fogo 3, que apresenta a mesma fase de arrefecimento à qual foi submetida a Laje 1, porém com uma longa fase de arrefecimento.

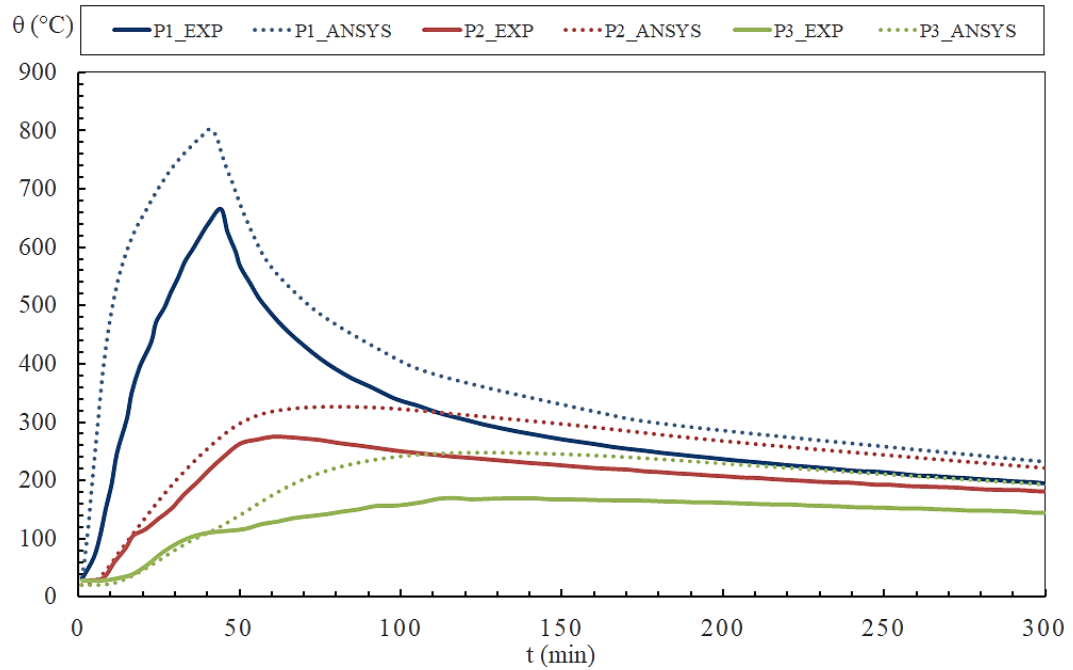


Figura 46: Comparação entre o modelo térmico ANSYS.CONV1, MAT.AG1 e valores e valores experimentais dos pontos P1, P2 e P3 da Laje 3.

Como pode-se observar, mais uma vez, os modelos numéricos acabam por superestimar as temperaturas na laje mista, sendo as temperaturas obtidas no modelo numérico do ANSYS levemente superiores as obtidas nos modelos do MATLAB. Além das hipóteses já abordadas para explicar a diferença entre os modelos numéricos, pode-se atribuir a diferença dos parâmetros de convergência como outro fator que contribui para isso.

Além disso, para esse cenário de incêndio, observa-se que ambos os modelos numéricos superestimam as temperaturas também durante a fase de arrefecimento, efeito que não foi tão evidente na Laje 1 que estava submetida a uma rápida fase de arrefecimento.

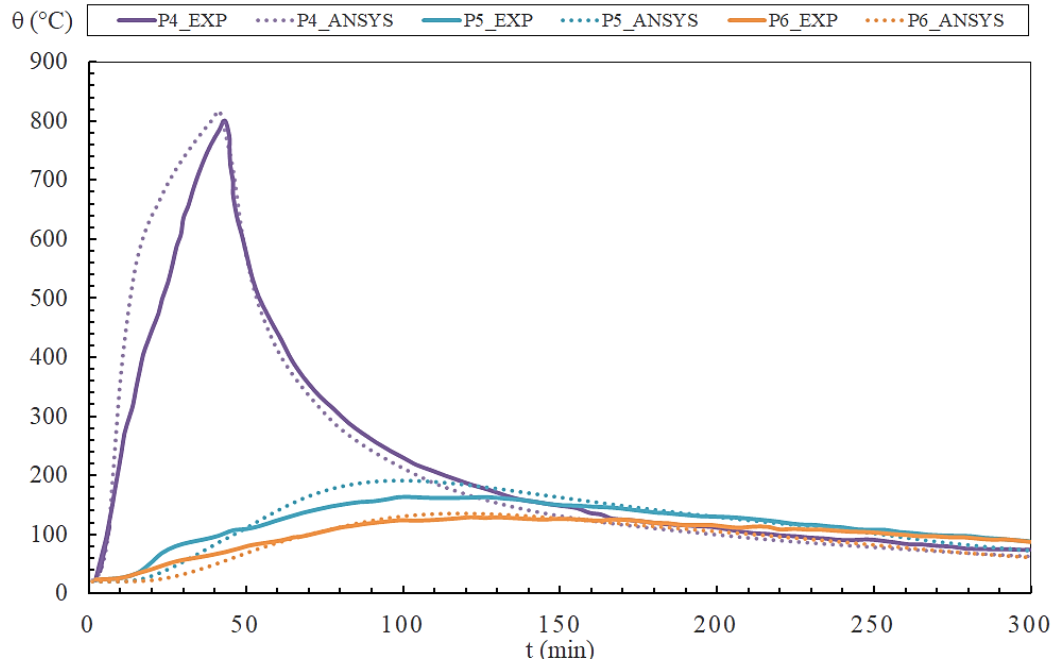


Figura 47: Comparação entre o modelo térmico ANSYS.CONV2 e valores experimentais dos pontos P4, P5 e P6 da Laje 1.

A Figura 47 apresenta os resultados obtidos no modelo térmico ANSYS.CONV2, as temperaturas obtidas nesse modelo numérico apresentam-se consideravelmente mais próximas dos valores obtidos no ensaio, uma vez que o aumento no coeficiente de convecção na superfície não exposta da laje aumenta a taxa de transferência de calor nessa região, consequentemente resultando em temperaturas menores que do modelo ANSYS.CONV1 na superfície não exposta. Entretanto, tal modelo apenas poderia ser utilizado caso fosse possível a confirmação de mecanismos de ventilação na superfície não exposta da laje, informação que não pôde ser obtida através dos documentos de consulta.

Deste modo, buscando obter nos modelos numéricos a maior fidelidade possível dos ensaios experimentais, e seguir as recomendações do Eurocódigo, para a realização das simulações térmicas nos modelos paramétricos, foram adotados os modelos MAT.AG1 e ANSYS.CONV1.

10 RESULTADOS E DISCUSSÕES

A seguir serão apresentados os resultados obtidos nas simulações do estudo paramétrico.

Serão demonstradas algumas curvas de incêndio, comparando os resultados numéricos obtidos através dos programas MATLAB e ANSYS, além da proposição de novos modelos simplificados para a determinação da resistência de lajes mistas ao incêndio natural, pelos critérios de isolamento e capacidade de carga.

A fim de verificar a convergência dos resultados obtidos, foram observadas as curvas de temperatura, no meio vão da laje para todos os modelos, nos seguintes pontos.

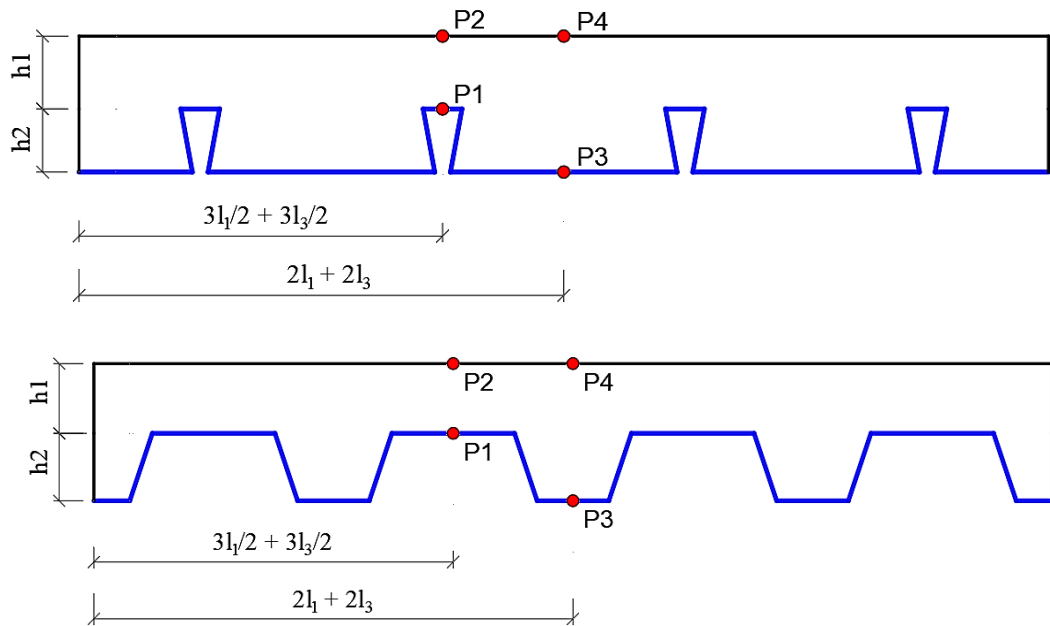


Figura 48: Disposição dos pontos de medição da temperatura nos modelos utilizados no estudo paramétrico.

Sendo assim, a Figura 49 e Figura 50 apresentam a comparação entre as curvas de temperatura para as simulações em ambos os programas, em uma laje com perfil trapezoidal Confraplus 60, para $h_1=40$ mm e $h_1=100$ mm de enchimento, submetidas a curva de incêndio Paramétrica 2.

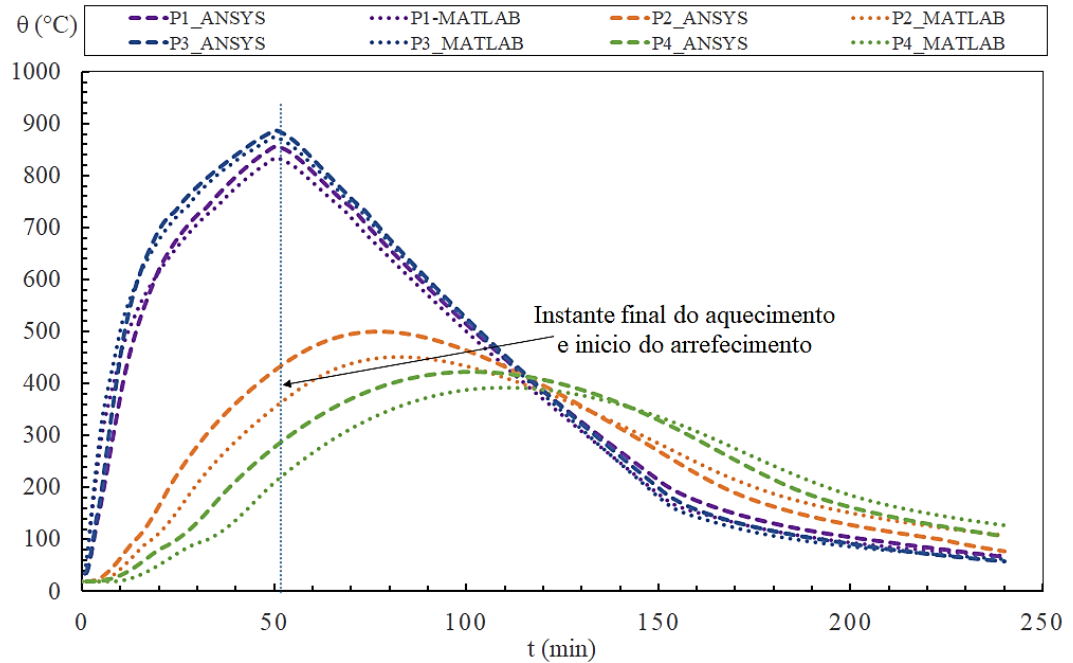


Figura 49: Comparação entre os resultados obtidos nos programas ANSYS e MATLAB, da laje de perfil Confraplus 60, com cobertura de 40 mm e submetida a curva de incêndio Paramétrica 2.

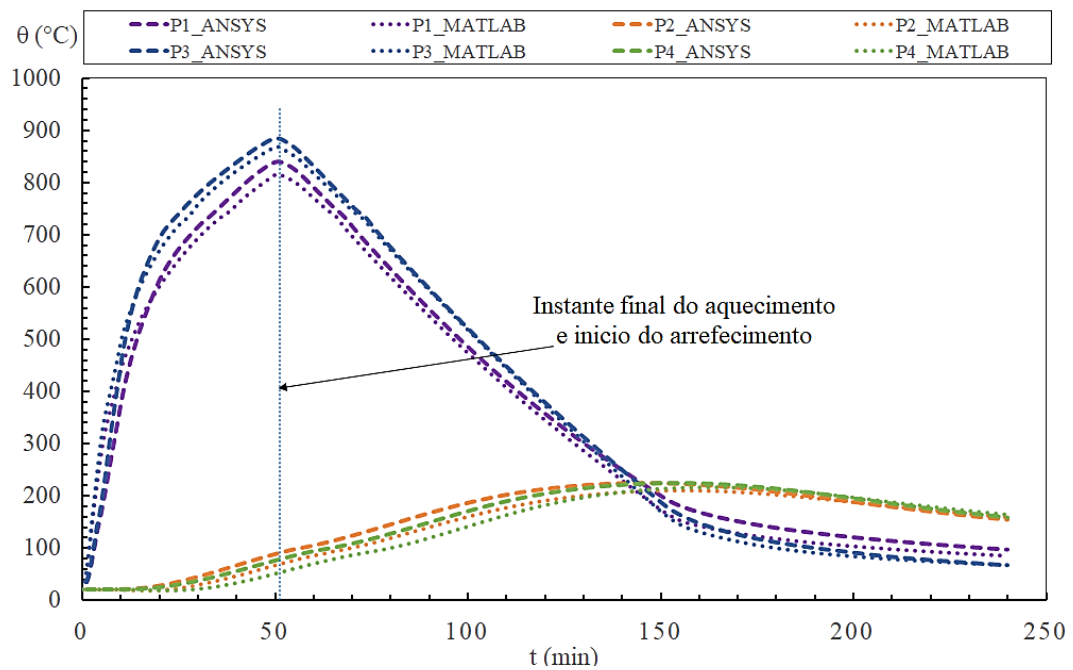


Figura 50: Comparação entre os resultados obtidos nos programas ANSYS e MATLAB, da laje de perfil Confraplus 60, com cobertura de 100 mm e submetida a curva de incêndio Paramétrica 2.

Nota-se que a medida há um incremento no enchimento h_1 das lajes, verifica-se uma significativa melhoria na convergência dos resultados obtidos em ambos os programas nas temperaturas da superfície não exposta da laje. Tal efeito foi observado em todos os modelos simulados.

Além disso, percebe-se que o instante em que ocorre a temperatura máxima na chapa de aço coincide com o tempo de temperatura máxima do gás. No entanto, fica evidente que as temperaturas máximas na face não exposta ocorrem durante a fase de arrefecimento.

Como observado também nos modelos de validação, as temperaturas obtidas através do programa ANSYS apresentam-se superiores às obtidas no programa MATLAB.

A representação da camada de ar através de elementos de casca, compartilhando os mesmos nós com a chapa de aço, faz que com o fluxo de calor através dessas camadas seja superior ao fluxo de calor quando considerado elementos sólidos.

Tal efeito também pôde-se observar nas curvas de temperatura máxima e média na superfície não exposta das lajes, como representado na Figura 51.

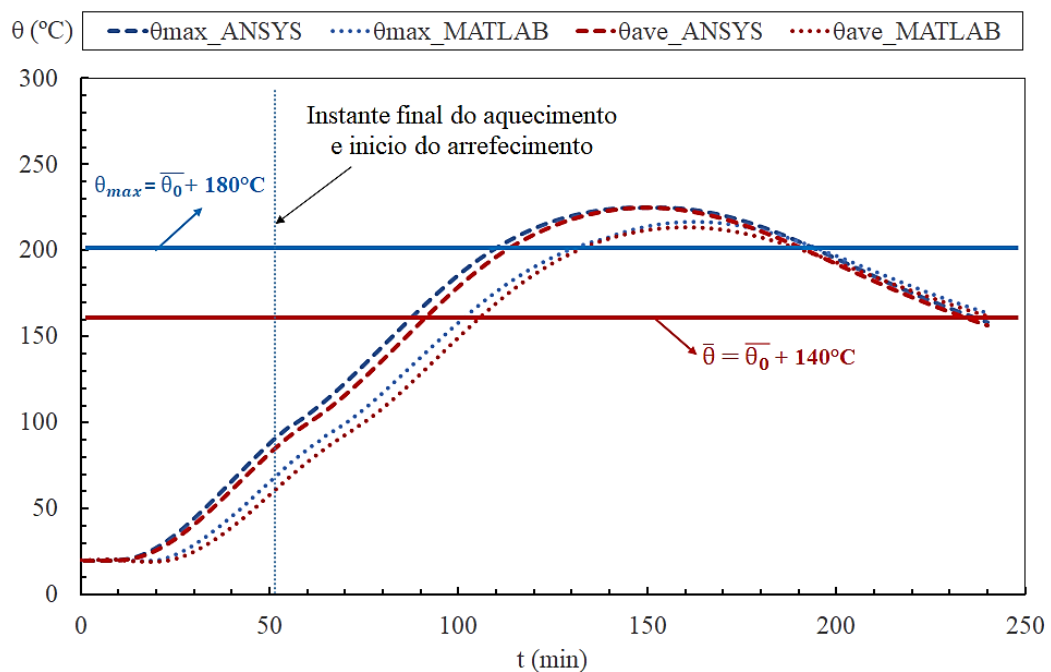


Figura 51: Comparação entre as temperaturas máximas e mínimas na superfície não exposta da laje de perfil Conraplus 60, com cobertura de 100 mm e submetida a curva de incêndio Paramétrica 2.

A determinação do tempo de resistência ao fogo foi realizada medindo as temperaturas máximas e médias na superfície não exposta das lajes. Para a determinação da temperatura média, realizou-se a aferição das temperaturas em 20 nós da superfície, já para a temperatura máxima, foi obtido o valor máximo de temperatura entre os 20 nós coletados.

As curvas de temperatura máxima e média na superfície não exposta, obtidas nos programas ANSYS e MATLAB, apresentam mesmo comportamento, chegando a ter convergência dos resultados durante a fase de arrefecimento. No entanto, há uma diferença nítida no que diz respeito ao instante em que se inicia o aquecimento, havendo um atraso no aquecimento do MATLAB quando comparado ao ANSYS. Tal efeito faz com que os resultados de tempo de resistência ao isolamento obtidos pelo programa ANSYS sejam menores quando comparados ao MATLAB.

Na Figura 52 são apresentadas as temperaturas em fase avançada de arrefecimento, na secção da laje reentrante Multideck 50, para as espessuras de enchimento h_1 de 40, 60, 80 e 100 mm. Percebe-se que durante a fase de arrefecimento, é gerado uma zona de concentração de calor no centro das nervuras, local em que estão posicionados os varões de aço, sendo as temperaturas na região superiores as faces expostas e não expostas. Nota-se também que com o incremento do enchimento de concreto das lajes, a temperatura na face não exposta ao incêndio torna-se mais homogênea.

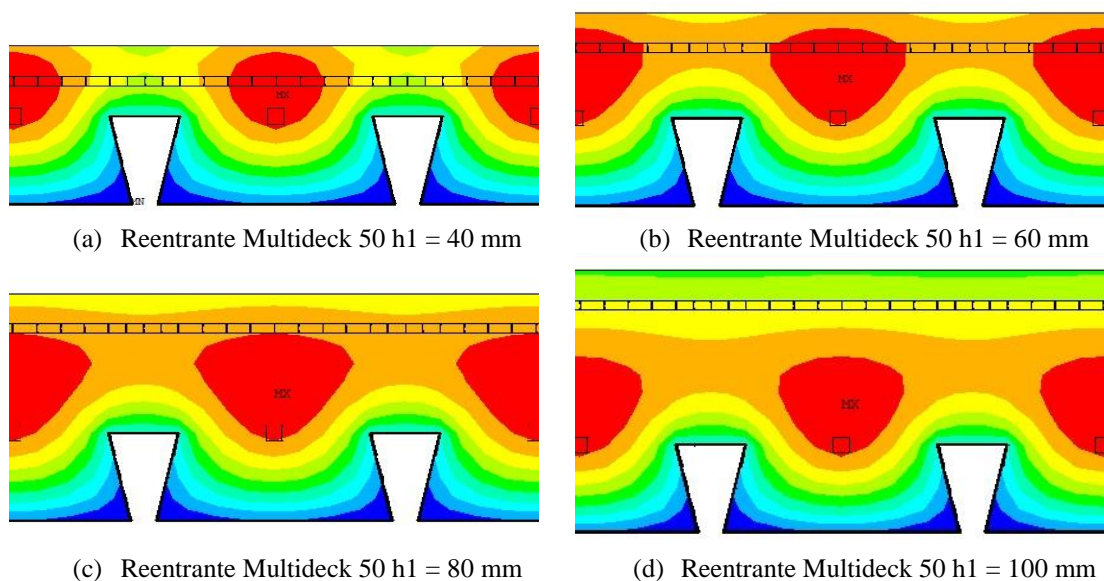


Figura 52: Perfil de temperatura em lajes mistas com perfil reentrante no arrefecimento (ANSYS).

A Figura 53 são apresentadas as temperaturas no instante de tempo t_i , na secção da laje trapezoidal Confraplus 60, para as espessuras de enchimento h_1 de 40, 60, 80 e 100 mm. Novamente percebe-se que à medida em que há aumento na espessura h_1 , a temperatura na face não exposta ao incêndio torna-se mais homogênea. Além disso, uma vez que o modelo com espessura $h_1=100$ mm atinge o critério de resistência (I) cerca de

30 minutos após o fim do aquecimento, observa-se o início da formação da concentração de calor no centro das nervuras durante o arrefecimento.

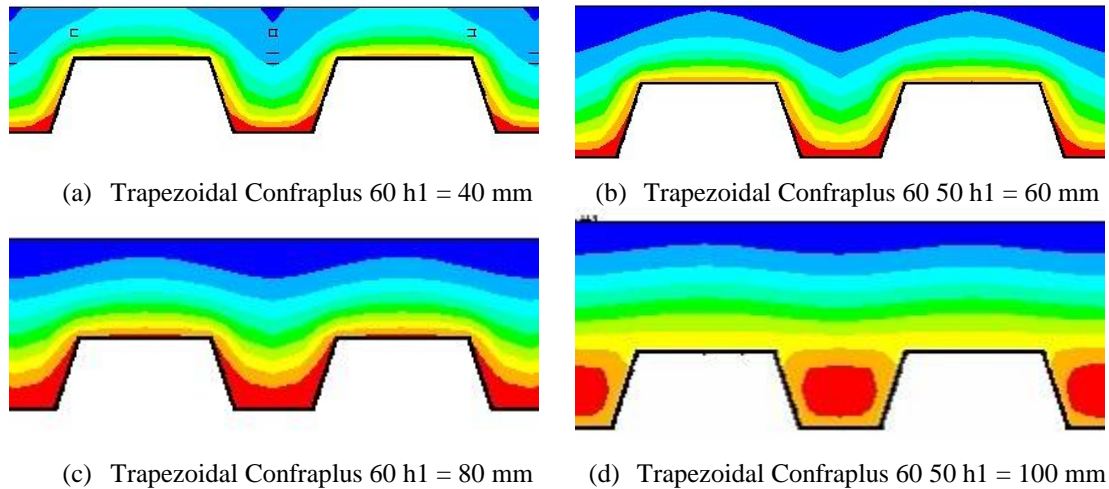


Figura 53: Perfil de temperatura da laje Confraplus no tempo de resistência ao Isolamento (ANSYS).

10.1 ISOLAMENTO (I)

Tendo em vista que as temperaturas obtidas no programa ANSYS são levemente superiores, visando priorizar a segurança, o estudo paramétrico no que diz respeito ao tempo de resistência ao isolamento foi realizado com base nos resultados do programa em questão.

Uma vez que a formulação do método simplificado para obtenção do tempo de resistência ao isolamento (t_i) fornecido pelo Eurocódigo, negligencia os efeitos do arrefecimento, desenvolveram-se novos coeficientes a_i , alternativos aos apresentados na Tabela 8, que prevêm valores mais condizentes com o efeito do arrefecimento e poderão ser aplicados na equação (53).

A Figura 54 apresenta a relação entre o tempo de resistência ao isolamento e a espessura de enchimento h_1 da laje mista para a situação de incêndio Paramétrica 1.

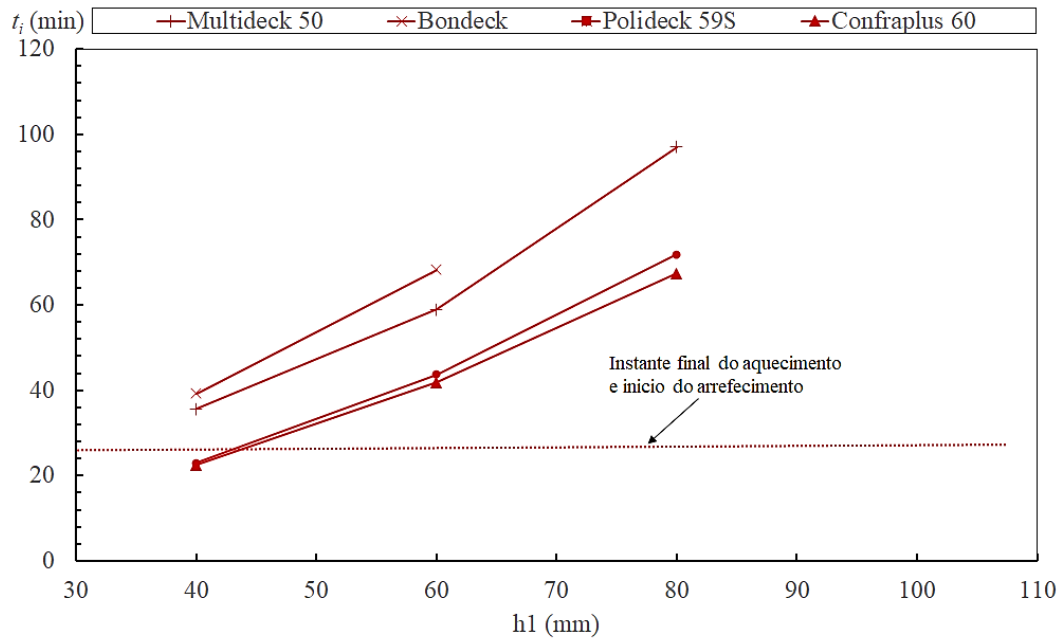


Figura 54: Curvas de resistência ao fogo segundo o critério (I) em razão da altura h_1 para as lajes submetidas a curva de incêndio Paramétrica 1.

A linha tracejada representa o instante de tempo em que se encerra a fase de aquecimento do incêndio, atingindo a temperatura máxima no gás, a partir desse momento, inicia-se a fase de arrefecimento. Sendo assim, como pode ser observado, uma vez que a curva de incêndio Paramétrica 1 possui um tempo de fase de aquecimento de pouco mais de 27 minutos, a maioria das lajes atingiram o critério de resistência (I) durante a fase de arrefecimento, de modo que apenas 12,5% das lajes atingiu o critério de resistência (I) durante essa fase de aquecimento, não alcançando o mínimo desempenho de 30 minutos exigido pela EN 1994-1-2 [36]. Por outro lado, 31,25% das lajes não atingiram os valores limites de temperatura máxima e temperatura mínima para esse cenário, sendo todos os modelos construídos com perfis reentrantes.

A Tabela 12 apresenta os novos coeficientes a_i propostos, para o cálculo do tempo de resistência ao isolamento pela equação (53), para lajes mistas submetidas a curva de incêndio Paramétrica 1.

Tabela 12: Novos coeficientes propostos para determinação da resistência ao fogo em relação ao critério de isolamento (I) em lajes submetidas a curva de incêndio Paramétrica 1.

Tipo de concreto	a_0 (min)	a_1 (min/mm)	a_2 (min)	a_3 (min/mm)	a_4 (mm.min)	a_5 (min)
Concreto convencional	-30,79	1,21	-12,78	0,32	-758,77	45,18

A fim de demonstrar a precisão dos coeficientes propostos, e comparar com os resultados obtidos utilizando os valores do método simplificado do Eurocódigo, que considera a curva de incêndio padrão ISO 834, o Quadro 8 apresenta as diferenças relativas ao resultado numérico.

Quadro 8: Comparação entre MATLAB, ANSYS, método proposto e método simplificado dos tempos de resistência ao fogo segundo o critério (I), para lajes submetidas a curva de incêndio Paramétrica 1.

Curva de incêndio	Perfil	h1 (mm)	TEMPO DE RESISTÊNCIA (min)				Erro entre o ANSYS e o método proposto (%)	Erro entre o ANSYS e o método do eurocódigo (%)
			MATLAB	ANSYS	Método Simplificado (PROPOSTO)	Método Simplificado (EUROCÓDIGO)		
Paramétrica 1	Multideck 50	40	46,095	35,644	34,412	52,447	3,46%	47,14%
		60	72,255	58,936	58,698	83,447	0,40%	41,59%
		80	-	97,074	82,984	114,447	14,51%	17,90%
		100	-	-	-	-	-	-
	Bondeck	40	54,758	39,237	47,253	66,439	20,43%	69,33%
		60	87,556	68,228	71,539	97,439	4,85%	42,81%
		80	-	-	-	-	-	-
		100	-	-	-	-	-	-
	Polideck 59S	40	30,825	23,022	22,388	37,175	2,75%	61,47%
		60	55,922	43,658	46,674	68,175	6,91%	56,16%
		80	91,050	71,864	70,961	99,175	1,26%	38,00%
		100	-	-	-	-	-	-
	Confraplus 60	40	29,762	22,510	20,537	37,175	8,77%	65,15%
		60	52,366	41,860	44,823	68,175	7,08%	62,86%
		80	83,834	67,347	69,109	99,175	2,62%	47,26%
		100	-	-	-	-	-	-

Percebe-se que a menor e o maior erro relativo entre os valores do ANSYS, e os valores obtidos com o novo método proposto, para a curva de incêndio Paramétrica 1, são 0,40% e 20,43% respectivamente. Em contrapartida, os valores mínimos e máximos de erro relativo utilizando o método do eurocódigo são de 17,90% e 69,33%, devidamente justificados pelo pressuposto dos coeficientes terem sido ajustados para curva de incêndio padrão (ISO834).

Ao desprezar o efeito da fase de arrefecimento na resistência das lajes mistas, o Eurocódigo acaba por superestimar a resistência dos elementos, e subestimar os efeitos do arrefecimento no avanço da temperatura na superfície não exposta da laje.

O mesmo estudo foi realizado para a curva de incêndio Paramétrica 2. A Figura 55 apresenta a relação entre o tempo de resistência ao isolamento e a espessura de enchimento h_1 .

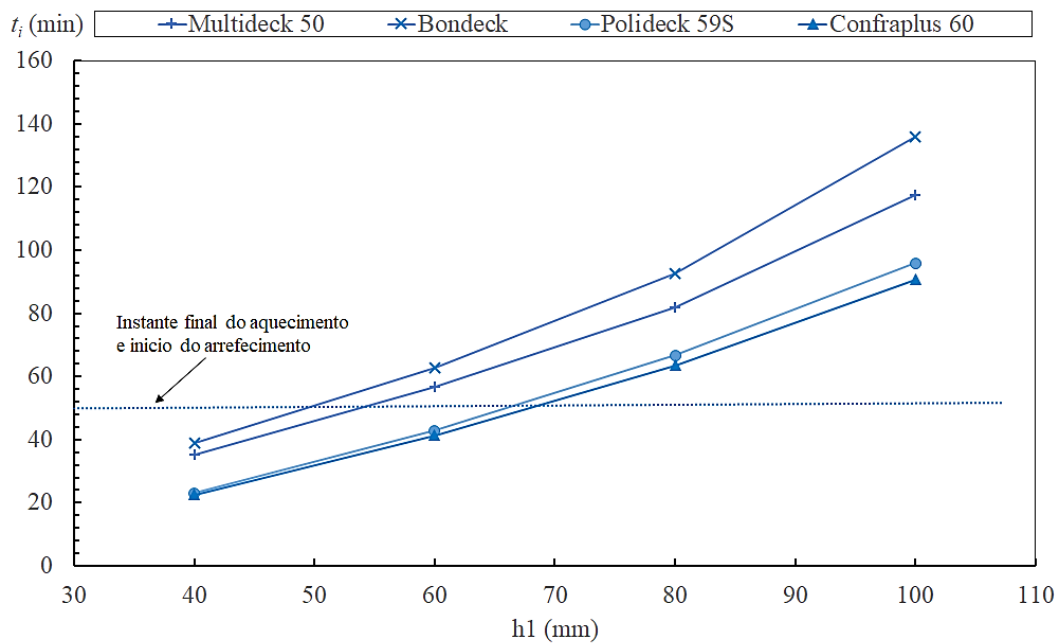


Figura 55: Curvas de resistência ao fogo segundo o critério (I) em razão da altura h_1 para as lajes submetidas a curva de incêndio Paramétrica 2.

Para a situação da curva de incêndio Paramétrica 2, que possui uma fase de aquecimento de pouco mais de 50 minutos, todos os modelos atingem o critério de resistência (I). A maioria das lajes atingiram o tempo de resistência t_i durante a fase de arrefecimento, de modo que apenas 37,5% ocorreu durante a fase de aquecimento.

Destaca-se o fato de que, em uma situação em que os modelos fossem analisados considerando um incêndio de 50 minutos seguindo a curva de incêndio ISO 834, 62,5% das lajes não atingiria o critério de resistência ao isolamento (I). No entanto, uma vez considerada a fase de arrefecimento seguindo as curvas paramétricas do Eurocódigo, nota-se que essas lajes atingem o critério de isolamento durante essa fase.

Considerando a curva de incêndio Paramétrica 2, também são apresentados na Tabela 13 novos coeficientes a_i para obtenção do tempo de resistência ao isolamento.

Tabela 13: Coeficientes propostos para determinação da resistência ao fogo em relação ao critério de isolamento (I) em lajes submetidas a curva de incêndio Paramétrica 2.

Tipo de concreto	a_0 (min)	a_1 (min/mm)	a_2 (min)	a_3 (min/mm)	a_4 (mm,min)	a_5 (min)
Concreto convencional	-30,88	1,21	-12,79	0,32	-759,76	45,08

O Quadro 9 apresenta os resultados de tempo de resistência (t_i) obtido nos programas ANSYS e MATLAB, além de apresentar as diferenças relativas entre os métodos simplificados e o modelo numérico.

Quadro 9: Comparação entre MATLAB, ANSYS, método proposto e método simplificado dos tempos de resistência ao fogo segundo o critério (I), para lajes submetidas a curva de incêndio Paramétrica 2.

Curva de incêndio	Perfil	h1 (mm)	TEMPO DE RESISTÊNCIA (min)				Erro entre o ANSYS e o método proposto (%)	Erro entre o ANSYS e o método do eurocódigo (%)
			MATLAB	ANSYS	Método Simplificado (PROPOSTO)	Método Simplificado (EUROCÓDIGO)		
Paramétrica 2	Multideck 50	40	45.119	35.334	33.863	52.447	4.16%	48.43%
		60	66.841	56.549	57.965	83.447	2.50%	47.57%
		80	94.625	81.895	82.067	114.447	0.21%	39.75%
		100	129.871	117.389	106.168	145.447	9.56%	23.90%
	Bondeck	40	51.500	38.959	46.662	66.439	19.77%	70.54%
		60	76.621	62.914	70.764	97.439	12.48%	54.88%
		80	108.467	92.618	94.866	128.439	2.43%	38.67%
		100	154.919	136.044	118.968	159.439	12.55%	17.20%
	Polideck 59S	40	30.813	23.026	21.879	39.343	4.98%	70.86%
		60	53.631	42.836	45.981	70.343	7.34%	64.22%
		80	78.527	66.723	70.083	101.343	5.04%	51.89%
		100	110.757	95.805	94.185	132.343	1.69%	38.14%
	Confraplus 60	40	29.768	22.513	20.039	37.175	10.99%	65.13%
		60	51.070	41.393	44.141	68.175	6.64%	64.70%
		80	74.868	63.453	68.243	99.175	7.55%	56.30%
		100	105.189	90.767	92.345	130.175	1.74%	43.42%

Mais uma vez se demonstra que o método do eurocódigo mostra-se pouco preciso, uma vez que a menor e o maior erro relativo entre seus valores e os do ANSYS são

17,20% e 70,86% respectivamente. Por outro lado, os erros relativos utilizando os novos coeficientes propostos apresentam uma redução considerável na diferença prevista, tendo valores de mínimos e máximos de 0,21% e 19,77%.

Continuando o estudo de curvas paramétricas que seguem a taxa de aquecimento equivalente à curva ISO 834, a Figura 56 apresenta a relação entre o tempo de resistência ao isolamento e a espessura de enchimento h_1 para a curva de incêndio Paramétrica 3.

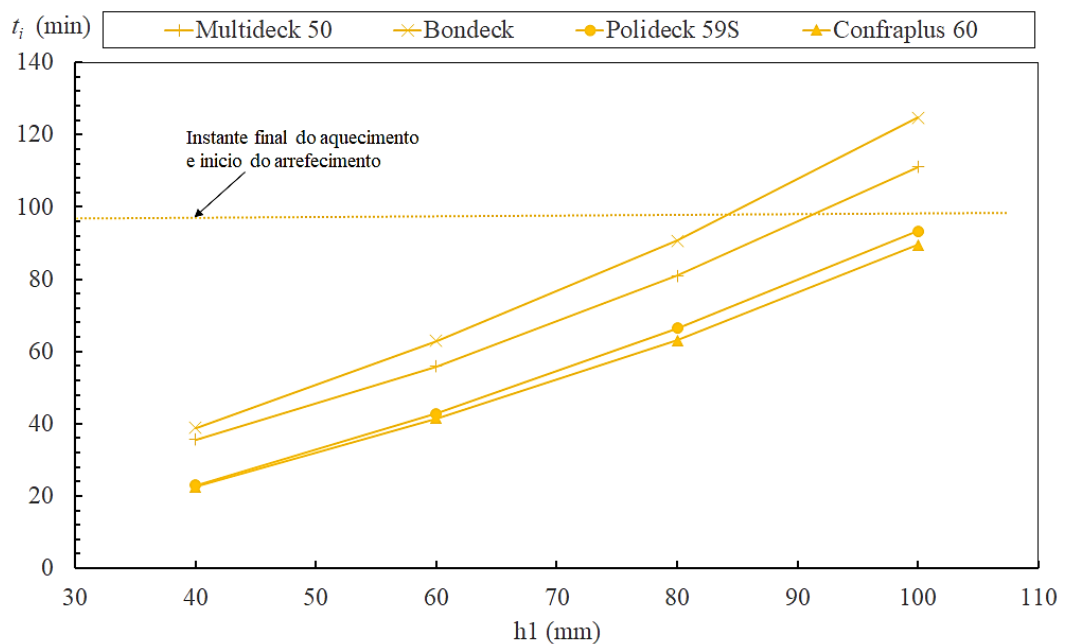


Figura 56: Curvas de resistência ao fogo segundo o critério (I) em razão da altura h_1 para as lajes submetidas a curva de incêndio Paramétrica 3.

Nessa situação, em que a fase de aquecimento é de aproximadamente 98 minutos, temos que durante os instantes de tempo de 60 minutos, e 90 minutos, a curva de incêndio é idêntica a ISO 834, sendo assim, os efeitos nas lajes mistas durante esses intervalos de tempo também são idênticos.

Para esse cenário de incêndio, a maioria das lajes atingiram o critério durante a fase de aquecimento, de modo que apenas 12,50% das lajes atingiu o critério de resistência (I) durante a fase de arrefecimento.

Destaca-se o fato de que 68,80% das lajes que atingiram o critério de resistência ao isolamento durante a fase de aquecimento na curva Paramétrica 3, também atingiram o critério na situação em que foram submetidas a curva Paramétrica 1. Ressaltando o fato de que a curva 1, que possui tempo de fase de aquecimento muito inferior e temperatura

máxima no gás 18,65% menor que da curva 3, também compromete a segurança dos elementos.

Dito isto, mostra-se evidente que não é possível assegurar a resistência e integridade das lajes mistas em situação de incêndio apenas ao considerar os efeitos do aquecimento, pois a fase de arrefecimento pode ser tão significativa e danosa à integridade da estrutura quanto o aquecimento.

A Tabela 14 apresenta os coeficientes a_i alternativos para obtenção do tempo de resistência ao isolamento em lajes mistas submetidas a curva de incêndio Paramétrica 3.

Tabela 14: Coeficientes propostos para determinação da resistência ao fogo em relação ao critério de isolamento (I) em lajes submetidas a curva de incêndio Paramétrica 3.

Tipo de concreto	a_0 (min)	a_1 (min/mm)	a_2 (min)	a_3 (min/mm)	a_4 (mm,min)	a_5 (min)
Concreto convencional	-31,04	1,19	-12,80	0,32	-761,71	44,89

Utilizando os novos coeficientes propostos pelo presente trabalho, e pelo eurocódigo, o Quadro 10 apresenta as diferenças relativas entre os métodos simplificados e o modelo numérico.

Quadro 10: Comparação entre MATLAB, ANSYS, método proposto e método simplificado dos tempos de resistência ao fogo segundo o critério (I), para lajes submetidas a curva de incêndio Paramétrica 3.

Curva de incêndio	Perfil	h1 (mm)	TEMPO DE RESISTÊNCIA (min)				Erro entre o ANSYS e o método proposto (%)	Erro entre o ANSYS e o método do eurocódigo (%)
			MATLAB	ANSYS	Método Simplificado (PROPOSTO)	Método Simplificado (EUROCÓDIGO)		
Paramétrica 3	Multideck 50	40	45.119	35.634	32.789	52.447	7.98%	47.18%
		60	66.771	55.828	56.531	83.447	1.26%	49.47%
		80	93.373	80.968	80.273	114.447	0.86%	41.35%
		100	123.423	111.108	104.016	145.447	6.38%	30.91%
	Bondeck	40	51.245	38.861	45.507	66.439	17.10%	70.97%
		60	76.201	62.962	69.249	97.439	9.99%	54.76%
		80	105.161	90.595	92.991	128.439	2.64%	41.77%
		100	138.724	124.689	116.733	159.439	6.38%	27.87%
	Polideck 59S	40	30.815	23.026	20.884	39.343	9.30%	70.86%
		60	53.660	42.836	44.626	70.343	4.18%	64.22%
		80	78.460	66.427	68.368	101.343	2.92%	52.56%
		100	108.112	93.312	92.111	132.343	1.29%	41.83%
	Confraplus 60	40	29.771	22.513	19.067	37.175	15.30%	65.13%
		60	51.052	41.515	42.809	68.175	3.12%	64.22%
		80	74.908	63.039	66.551	99.175	5.57%	57.32%
		100	103.634	89.487	90.294	130.175	0.90%	45.47%

Como observado na Figura 56, todos os modelos com enchimento de 40 e 60 mm atingiram o tempo de resistência t_i durante a fase em que o incêndio se comporta como a curva incêndio padrão ISO 834.

Sendo assim, foram determinados erros relativos de 70,97% para os modelos com enchimento de 40 mm e 64,22% para os modelos com enchimento de 60 mm, entre os resultados obtidos utilizando o método do eurocódigo e os valores obtidos no ANSYS. Com isso, torna-se evidente que o modelo numérico acaba por superestimar as temperaturas na superfície não exposta da laje, e que tais efeitos reduzem à medida que há um aumento da espessura do enchimento h1.

Por outro lado, quando comparado com o tempo de resistência t_i obtido no MATLAB, esse valor de maior erro relativo cai para 31,09%, evidenciando a melhor representatividade do modelo numérico, e a diferença em considerar a camada de “*air-gap*” com elementos sólidos e elementos de casca.

No entanto, apesar dos problemas constatados, os efeitos da fase de arrefecimento observados permanecem relevantes, sendo necessário apenas reconsiderar a magnitude das temperaturas constatadas durante toda a situação de incêndio.

Por fim, a curva Paramétrica 4 foi avaliada, a fim de entender os efeitos causados por uma curva de incêndio com taxa de aquecimento superior à representada pela curva ISO 834, seguida de uma fase de arrefecimento. Sendo assim, a Figura 57 apresenta a relação entre o tempo de resistência ao isolamento e a espessura de enchimento h_1 da laje mista.

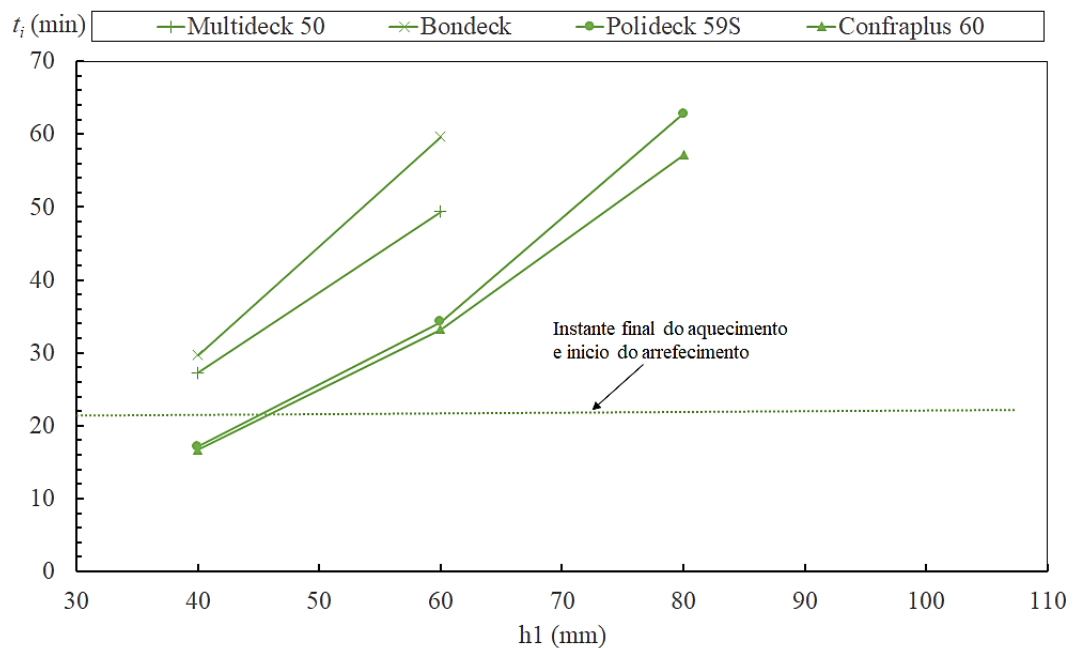


Figura 57: Curvas de resistência ao fogo segundo o critério (I) em razão da altura h_1 para as lajes submetidas a curva de incêndio Paramétrica 4.

Para essa situação atípica, que possui uma curta fase de aquecimento com elevada temperatura máxima, 37,50% das lajes não atingiram o critério de isolamento, sendo todas de perfis reentrantes, e 25,00% das lajes, todos os modelos com enchimento de 40 mm, não atingiram o mínimo desempenho de 30 minutos exigido pela EN 1994-1-2 [36].

Além disso, 50% das lajes, maioria das que atingiram o critério de resistência (I), atingiram o critério durante a fase de arrefecimento, evidenciando mais uma vez, que ao

analisar apenas a fase de aquecimento, a influência do arrefecimento é subestimada e a resistência da laje superestimada.

Os novos coeficientes a_i alternativos para obtenção do tempo de resistência ao isolamento em lajes mistas, submetidas a curva de incêndio Paramétrica 4, são apresentados na Tabela 15.

Tabela 15: Coeficientes propostos para determinação da resistência ao fogo em relação ao critério de isolamento (I) em lajes submetidas a curva de incêndio Paramétrica 4.

Tipo de concreto	a_0 (min)	a_1 (min/mm)	a_2 (min)	a_3 (min/mm)	a_4 (mm,min)	a_5 (min)
Concreto convencional	-33,18	1,13	-13,47	0,32	45,93	12,60

Com a utilização dos novos coeficientes propostos, o Quadro 11 apresenta as diferenças relativas entre os resultados dos métodos simplificados e o resultado numérico do ANSYS.

Quadro 11: Comparação entre MATLAB, ANSYS, método proposto e método simplificado dos tempos de resistência ao fogo segundo o critério (I), para lajes submetidas a curva de incêndio Paramétrica 4.

Curva de incêndio	Perfil	h1 (mm)	TEMPO DE RESISTÊNCIA (min)				Erro entre o ANSYS e o método proposto (%)	Erro entre o ANSYS e o método do eurocódigo (%)
			MATLAB	ANSYS	Método Simplificado (PROPOSTO)	Método Simplificado (EUROCÓDIGO)		
Paramétrica 4	Multideck 50	40	36.864	27.238	27.446	52.447	0.77%	92.55%
		60	60.702	49.391	49.967	83.447	1.17%	68.95%
		80	-	-	-	-	-	-
		100	-	-	-	-	-	-
	Bondeck	40	42.796	29.668	34.155	66.439	15.12%	123.94%
		60	77.459	59.675	56.675	97.439	5.03%	63.28%
		80	-	-	-	-	-	-
		100	-	-	-	-	-	-
	Polideck 59S	40	22.610	17.114	14.777	39.343	13.65%	129.88%
		60	42.686	34.239	37.298	70.343	8.94%	105.45%
		80	76.310	62.819	59.819	101.343	4.78%	61.32%
		100	-	-	-	-	-	-
	Confraplus 60	40	21.863	16.713	13.713	37.175	17.95%	122.43%
		60	41.117	33.234	36.234	68.175	9.03%	105.14%
		80	69.163	57.179	58.755	99.175	2.76%	73.45%
		100	-	-	-	-	-	-

Nota-se que os coeficientes propostos para a curva de incêndio Paramétrica 4, apresentam a melhor convergência, tendo como menor valor de erro relativo de 0,77% e maior valor de 17,95%. Em contrapartida, para esse cenário, os valores propostos pelo eurocódigo apresentam o pior desempenho, chegando a atingir o maior valor de erro relativo de 129,88%. Tal desempenho é esperado, pois o método proposto do Eurocódigo foi desenvolvido considerando apenas o efeito da fase de aquecimento seguindo a taxa de aquecimento da curva ISO 834. No entanto, os resultados evidenciam a falta de conhecimento e a necessidade de um estudo intenso e célere acerca dos efeitos do incêndio natural na resistência das lajes mistas.

A fim de melhor exemplificar o efeito da consideração do arrefecimento na resistência de lajes mistas ao critério de isolamento, a Figura 58 apresenta o valor da

resistência ao fogo da laje com perfil de chapa de aço Bondeck com enchimento de 60 mm, submetido as 4 diferentes curvas de incêndio.

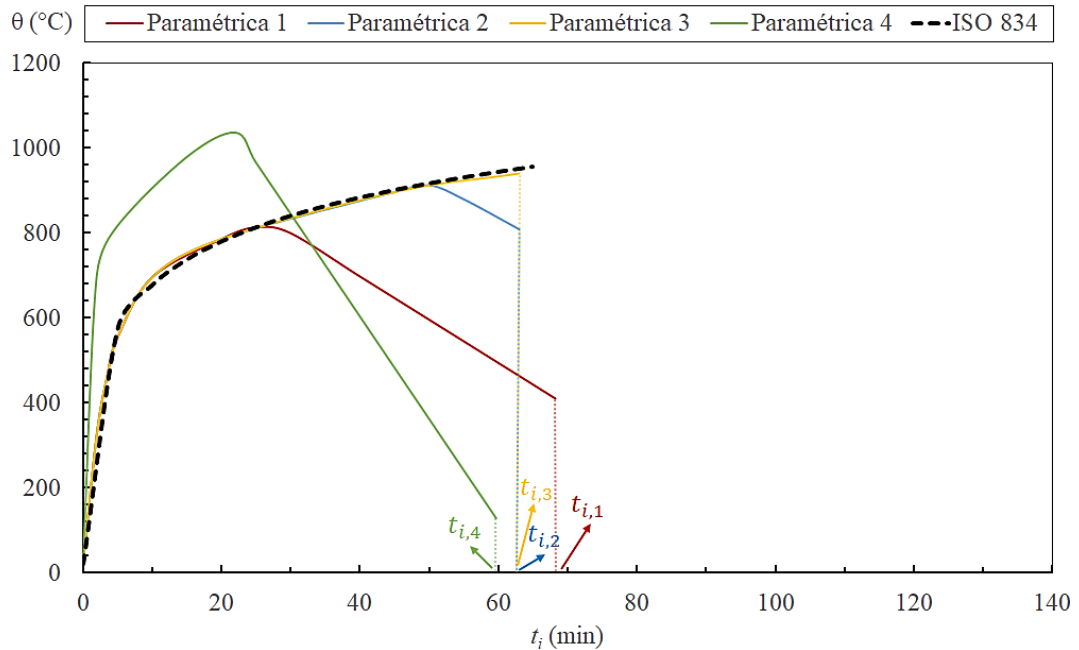


Figura 58: Comparação entre os tempos de resistência ao fogo segundo o critério (I) para laje Bondeck com cobertura de 60 mm, submetida a 4 curvas de incêndio paramétricas.

Como pode-se observar, a curva Paramétrica 4 apresenta um comportamento totalmente diferente das demais, chegando a atingir, durante a fase de arrefecimento, o menor tempo de resistência ao isolamento.

As demais curvas Paramétrica 1, 2 e 3, apresentam comportamento idêntico a curva padrão ISO 834 durante a fase de aquecimento. Para as curvas 1 e 2, o critério de isolamento é atingido durante a fase de arrefecimento, já na curva 3, o critério é atingido durante a fase de aquecimento.

Uma vez que a curva 3, durante sua fase de aquecimento é equiparada a curva ISO 834, podemos assumir que o tempo de resistência obtido para essa situação de incêndio, seria o valor obtido utilizando as prescrições do Eurocódigo. Dito isto, tomaria como verdade o pressuposto de que lajes mistas submetidas a incêndio com taxa de aquecimento semelhante a curva ISO 834, por uma duração de tempo inferior a 62,962 minutos, não atingiriam os limites impostos pelo critério (I).

Porém, como observado, um incêndio com fase de aquecimento de aproximadamente 27 minutos, levou o modelo a atingir o critério (I) durante a fase seguinte de arrefecimento.

Tais constatações evidenciam a influência da fase de arrefecimento no comportamento de lajes mistas em situação de incêndio, mesmo após a fase de aquecimento, o fluxo de calor no interior do elemento continua a progredir, de modo que os valores máximos de temperatura na superfície não exposta da laje mista sempre acontece durante essa fase.

10.2 CAPACIDADE DE CARGA (R)

O Eurocódigo 4 Parte 1-2 [36], fornece também um método simplificado de cálculo para o critério de capacidade de carga (R), no entanto, as regras aplicáveis apenas para lajes simplesmente apoiadas submetidas a incêndio padrão.

Sendo assim, realizou-se um estudo a fim de fornecer novos coeficientes b_i e c_i para a determinação das temperaturas na chapa de aço e nos varões de reforço respectivamente, considerando as curvas de incêndio natural descritas na Tabela 9.

Deste modo, foram desenvolvidos novos coeficientes b_i para a obtenção das temperaturas na chapa de aço, considerando as curvas de incêndio paramétricas estudadas, de modo que os novos coeficientes poderão ser aplicados na equação (55).

O Quadro 12 apresenta os coeficientes obtidos para a curva de incêndio Paramétrica 1, para o tempo de resistência ao fogo em que ocorre a temperatura máxima do gás (27,43 min), e os tempos de 60, 90 e 120 minutos.

Quadro 12: Coeficientes propostos para determinação da temperatura na chapa de aço em lajes mistas submetidas a curva de incêndio Paramétrica 1.

Paramétrica 1									
Concreto	Fase do incêndio	Resistência ao fogo (min)	Região da chapa de aço	h1 (mm)	b ₀ (°C)	b ₁ (°C,mm)	b ₂ (°C,mm)	b ₃ (°C)	b ₄ (°C)
Concreto convencional	Aquecimento	27.43	Flange inferior	40	947.19	-626.25	-0.66	83.00	-249.80
				60	973.36	-657.09	-0.52	91.34	-287.77
				80	985.13	-690.06	-0.37	91.52	-303.51
				100	985.13	-690.06	-0.37	91.52	-303.51
			Alma	40	619.20	-760.64	-1.31	314.25	-192.88
				60	624.72	-780.20	-1.45	293.26	-165.06
				80	613.36	-412.02	-1.66	371.01	-264.20
				100	613.30	-411.92	-1.66	370.89	-264.05
			Flange superior	40	379.84	7.37	-1.24	822.02	-481.51
				60	376.97	7.37	-1.18	797.39	-453.67
				80	378.04	7.38	-1.14	762.84	-416.31
				100	377.99	7.38	-1.14	761.73	-415.08
	Arrefecimento	60	Flange inferior	40	794.35	-732.29	-0.68	49.45	-299.42
				60	790.75	-806.82	-0.55	49.44	-299.56
				80	789.47	-789.60	-0.48	49.36	-300.95
				100	754.61	-786.63	-0.47	49.47	-266.63
			Alma	40	507.36	-905.14	-0.11	88.50	-103.66
				60	495.24	-807.39	-0.11	94.42	-105.79
				80	487.26	-625.48	-0.11	107.43	-118.17
				100	486.12	-610.94	-0.11	108.85	-119.72
			Flange superior	40	432.93	-67.71	-1.18	262.81	-184.00
				60	405.75	-517.73	-0.33	222.43	-147.80
				80	390.61	-287.70	-0.23	228.85	-152.79
				100	388.39	-269.48	-0.22	225.75	-149.05
		90	Flange inferior	40	310.58	-956.28	0.17	-32.27	25.38
				60	277.77	-655.09	-0.22	-15.15	38.23
				80	301.71	-593.59	-0.14	-32.36	25.33
				100	310.28	-576.35	-0.14	-82.90	65.91
			Alma	40	312.70	-375.81	-0.52	57.33	-70.04
				60	300.05	-369.15	-0.51	69.22	-83.59
				80	287.47	-277.09	-0.35	73.63	-90.30
				100	286.16	-473.87	-0.11	53.40	-72.01
			Flange superior	40	334.89	-212.74	-1.22	4.53	-14.53
				60	313.55	-518.05	-0.89	6.04	-15.92
				80	288.43	-548.74	-0.33	5.65	-21.20
				100	282.76	-246.48	-0.55	4.66	-15.49
	120	Flange inferior	40	210.65	-976.73	1.74	75.13	-174.52	
			60	131.19	-408.98	0.91	53.51	-70.78	
			80	180.71	-355.38	0.85	44.47	-115.00	
			100	178.40	-297.89	0.83	44.41	-115.35	
		Alma	40	153.32	-1.49	-0.51	15.88	8.97	
			60	141.73	-1.53	-0.44	52.45	-38.39	
			80	134.58	-1.53	-0.40	51.19	-39.80	
			100	130.23	-1.53	-0.31	42.89	-32.78	
		Flange superior	40	206.21	-67.14	-1.00	-95.53	84.65	
			60	186.01	31.97	-1.09	-4.34	-0.19	
			80	168.15	-117.67	-0.67	-0.17	-9.31	
			100	158.31	154.51	-0.75	-0.19	-6.71	

Os coeficientes propostos pelo Eurocódigo apresentados no Quadro 5, não levam em consideração a espessura do enchimento do concreto, de modo que as temperaturas na chapa de aço são constantes independente do cobrimento.

Entretanto, durante o estudo paramétrico, notou-se que as temperaturas na chapa de aço são inferiores à medida que há um aumento na espessura do cobrimento. Sendo assim, os coeficientes foram elaborados de acordo com o tempo de resistência ao fogo (min), a região na chapa de aço e a espessura do cobrimento (mm).

A Figura 59 apresenta a relação entre a espessura do enchimento (mm) e a temperatura na chapa de aço ($^{\circ}\text{C}$), para a chapa de aço Bondeck na situação de incêndio Paramétrica 1 no instante de tempo de 120 minutos.

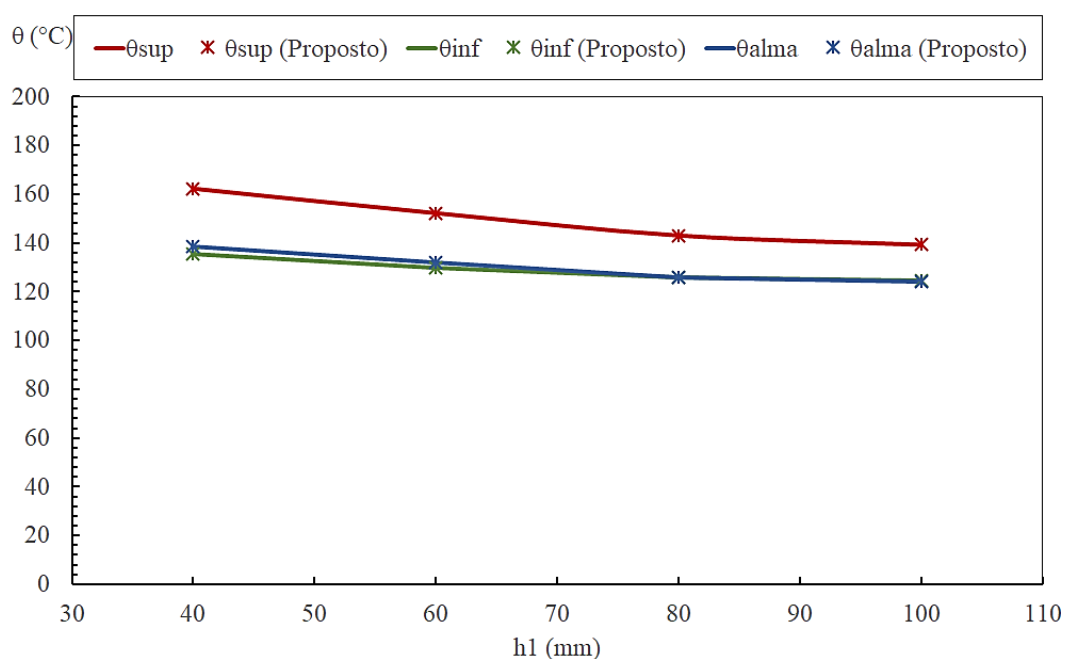


Figura 59: Comparação das temperaturas na chapa de aço para o perfil Bondeck submetida à curva de incêndio Paramétrica 1 com o tempo de resistência ao fogo de 120 min.

É possível observar que as temperaturas nos flanges inferior e superior, e na alma reduzem na medida em que há incremento da espessura no enchimento, chegando a tornar-se mais constantes nas espessuras de 80 e 100 mm. Além disso, nota-se a excelente convergência entre os resultados obtidos no modelo numérico e no método proposto.

O mesmo estudo foi realizado para a curva Paramétrica 2, o Quadro 13 apresenta os coeficientes são apresentados para o tempo de resistência em que ocorre a temperatura máxima do gás (50,93 min), e os tempos de 60, 90 e 120 minutos.

Quadro 13: Coeficientes b_i propostos para determinação da temperatura na chapa de aço em lajes mistas submetidas a curva de incêndio Paramétrica 2.

Paramétrica 2									
Concreto	Fase do incêndio	Resistência ao fogo (min)	Região da chapa de aço	h1 (mm)	b_0 (°C)	b_1 (°C,mm)	b_2 (°C,mm)	b_3 (°C)	b_4 (°C)
Concreto convencional	Aquecimento	50.93	Flange inferior	40	935.31	-517.81	-0.33	91.35	-127.48
				60	983.93	-502.09	-0.32	83.37	-169.14
				80	968.36	-475.33	-0.33	80.83	-151.48
				100	913.71	-479.56	-0.33	108.82	-124.89
			Alma	40	795.34	-859.30	-1.38	295.52	-204.78
				60	785.50	-827.84	-1.30	306.86	-213.33
				80	776.72	-450.55	-1.65	390.88	-322.46
				100	776.37	-450.21	-1.65	391.19	-322.40
			Flange superior	40	664.47	-1558.71	-1.77	513.19	-240.74
				60	618.68	-1344.20	-1.23	578.47	-294.57
				80	608.02	-1196.34	-1.23	601.39	-314.49
				100	606.00	-1185.69	-1.22	602.66	-314.60
	Arrefecimento	60	Flange inferior	40	935.49	-590.86	-0.32	69.15	-157.91
				60	893.11	-598.19	-0.28	92.79	-141.02
				80	910.07	-595.98	-0.26	85.35	-151.19
				100	939.12	-596.19	-0.27	76.14	-170.80
			Alma	40	787.88	-1116.63	-0.70	170.86	-128.47
				60	770.11	-1109.25	-0.43	192.56	-146.92
				80	767.09	-1096.04	-0.41	195.60	-149.13
				100	765.96	-1084.16	-0.42	200.14	-154.48
			Flange superior	40	686.21	-1282.61	-1.79	354.38	-155.33
				60	625.71	-657.82	-1.51	478.47	-257.45
				80	615.72	-633.64	-1.39	480.83	-256.67
				100	611.92	-557.41	-1.43	490.55	-264.15
		90	Flange inferior	40	662.13	-594.18	-0.53	71.09	-114.31
				60	652.67	-634.35	-0.45	67.34	-105.23
				80	653.70	-635.51	-0.44	75.38	-115.51
				100	641.42	-620.30	-0.47	75.32	-102.87
			Alma	40	613.04	-740.10	-0.44	42.56	-59.82
				60	597.42	-750.24	-0.33	63.47	-77.82
				80	588.60	-750.81	-0.22	69.40	-83.01
				100	586.43	-747.09	-0.20	69.49	-82.68
			Flange superior	40	583.86	-230.54	-1.77	107.66	-58.55
				60	542.75	-235.12	-1.37	162.97	-101.16
				80	517.83	-221.90	-1.03	184.53	-119.10
				100	512.92	-173.34	-1.01	177.38	-109.67
		120	Flange inferior	40	498.43	-441.90	-0.33	15.82	-114.99
				60	494.10	-520.00	-0.27	15.82	-115.24
				80	531.82	-520.06	-0.15	15.33	-158.62
				100	569.67	-530.90	-0.12	14.81	-198.25
			Alma	40	417.92	-434.58	-0.43	11.04	-30.39
				60	407.05	-469.50	-0.43	29.65	-48.71
				80	396.72	-316.35	-0.52	48.61	-66.68
				100	391.37	-306.00	-0.46	48.18	-66.62
			Flange superior	40	455.63	-284.92	-1.42	-85.87	61.76
				60	429.42	-374.52	-1.26	-29.76	13.40
				80	407.94	-395.72	-1.05	-11.99	-1.80
				100	396.30	-376.36	-0.88	-18.05	4.67

Como mencionado anteriormente, as temperaturas na chapa de aço diminuem na medida que há um aumento na espessura do revestimento, por essa razão, todos os coeficientes propostos levam em consideração a espessura do revestimento.

Para a última curva paramétrica que segue a taxa de aquecimento semelhante à curva ISO 834, o Quadro 14 apresenta os coeficientes para o tempo de resistência em que ocorre a temperatura máxima do gás (98 min), e os tempos de 60, 90 e 120 minutos.

Quadro 14: Coeficientes b_i propostos para determinação da temperatura na chapa de aço em lajes mistas submetidas a curva de incêndio Paramétrica 3.

Paramétrica 3									
Concreto	Fase do incêndio	Resistência ao fogo (min)	Região da chapa de aço	h1 (mm)	b_0 (°C)	b_1 (°C,mm)	b_2 (°C,mm)	b_3 (°C)	b_4 (°C)
Concreto convencional	Aquecimento	60	Flange inferior	40	990.00	-427.11	-0.41	87.23	-148.19
				60	988.70	-436.15	-0.38	87.22	-148.20
				80	988.24	-435.17	-0.37	87.22	-148.21
				100	988.17	-435.86	-0.36	87.22	-148.21
			Alma	40	846.94	-653.56	-1.81	267.92	-184.13
				60	840.09	-673.04	-1.89	281.29	-191.57
				80	825.93	-503.83	-1.83	357.64	-298.57
				100	824.88	-502.95	-1.82	358.92	-299.44
			Flange superior	40	743.33	-1831.95	-2.00	399.00	-152.75
				60	701.41	-1660.41	-1.71	466.04	-201.70
				80	681.57	-1484.38	-1.48	496.05	-227.46
				100	679.05	-1473.50	-1.47	497.49	-227.18
		90	Flange inferior	40	1062.30	-298.13	-0.37	87.84	-146.32
				60	1040.36	-321.50	-0.37	92.31	-129.29
				80	1019.82	-322.47	-0.33	97.35	-115.12
				100	1003.09	-323.72	-0.33	95.63	-96.77
			Alma	40	959.00	-708.69	-1.58	173.06	-112.57
				60	951.45	-763.19	-1.67	193.79	-126.92
				80	941.40	-739.45	-1.52	209.36	-141.03
				100	939.97	-741.70	-1.52	211.40	-142.11
			Flange superior	40	938.73	-2573.56	-2.28	105.52	70.27
				60	916.94	-3060.16	-1.95	119.10	73.08
				80	891.88	-3468.85	-1.13	131.97	62.19
				100	885.88	-3464.29	-1.08	136.61	61.15
	98	Flange inferior	40	1046.73	-411.18	-0.21	92.37	-129.16	
			60	1046.15	-322.16	-0.30	92.36	-129.18	
			80	1026.81	-328.12	-0.31	97.42	-115.02	
			100	981.11	-132.11	1.27	97.42	-115.03	
		Alma	40	972.20	-649.66	-1.45	156.44	-103.90	
			60	971.36	-746.09	-1.71	169.69	-109.85	
			80	955.17	-684.28	-1.40	192.53	-132.15	
			100	953.04	-684.44	-1.39	195.68	-134.35	
		Flange superior	40	956.57	-2228.26	-2.40	95.77	66.66	
			60	943.99	-2591.92	-2.46	104.57	76.96	
			80	914.10	-3169.92	-1.29	115.12	64.80	
			100	906.84	-3189.26	-1.20	120.70	62.77	
	Arrefecimento	120	Flange inferior	40	894.12	-319.67	-0.34	75.14	-63.50
				60	871.82	-348.84	-0.35	93.26	-59.76
				80	925.36	-360.06	-0.32	52.94	-74.14
				100	961.72	-362.77	-0.31	44.88	-102.84
			Alma	40	894.11	-399.86	-0.96	75.02	-63.59
				60	886.67	-467.75	-0.98	92.83	-76.94
				80	878.48	-469.73	-0.92	107.71	-89.39
				100	874.48	-468.63	-0.88	114.41	-95.52
			Flange superior	40	883.40	-1489.24	-1.69	24.48	62.68
				60	866.44	-2057.09	-1.23	26.32	70.30
				80	848.77	-2480.72	-0.68	29.40	71.32
				100	837.05	-2619.92	-0.38	35.21	67.88

A Figura 60 apresenta a relação entre a espessura do enchimento (mm) e a temperatura na chapa de aço ($^{\circ}\text{C}$), para a chapa de aço Polideck 59S na situação de incêndio Paramétrica 3 no instante de tempo de 90 minutos. Novamente, destaca-se o fato de que durante os instantes de tempo de 60 minutos, e 90 minutos, a curva de incêndio é idêntica a ISO 834, sendo assim, os efeitos nas lajes mistas durante esses intervalos de tempo também são idênticos.

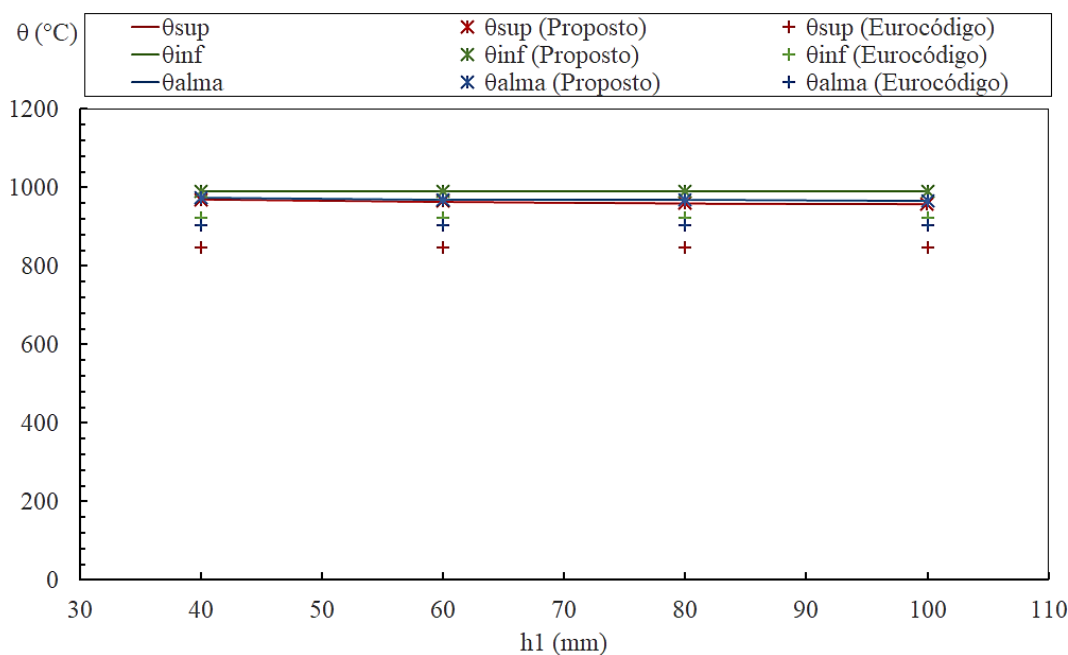


Figura 60: Comparação das temperaturas na chapa de aço para o perfil Polideck 59S submetida a curva de incêndio Paramétrica 3 com o tempo de resistência ao fogo de 90 min.

Verifica-se que, ao contrário do que ocorreu com as temperaturas na superfície não exposta da laje, para o estudo paramétrico das temperaturas na chapa de aço, a convergência entre os modelos numéricos e os valores obtidos utilizando o método simplificado do eurocódigo são consideravelmente melhores nos instantes em que os cenários de incêndio se comportam semelhante a curva ISO 834.

As temperaturas na região da alma obtidas no modelo numérico e no método proposto são idênticas, atingindo um erro relativo de 0%, quanto aos valores obtidos no método do eurocódigo, os valores são próximos, chegando a um erro relativo máximo de 6,82%.

Na região da flange superior, os valores no modelo numérico e no método proposto são idênticas, atingindo um erro relativo de 0%. Por outro lado, apresenta a maior diferença entre os valores obtidos no estudo e através do método fornecido pelo

eurocódigo. Observa-se também uma maior variação na temperatura de acordo com a espessura do enchimento, para a espessura de $h_1=40$ mm, o erro relativo entre o modelo numérico e o método do eurocódigo é de 12,61%, e para a espessura de $h_1=60$ mm, o erro relativo é de 11,52%.

Por fim, na região da flange inferior, os valores no modelo numérico e no método proposto também são idênticas, atingindo um erro relativo de 0%. Já no que diz respeito aos valores obtidos no método do eurocódigo, os valores chegam a um erro relativo máximo de 7.18%.

Como foi mencionado e relatado na Figura 44 que demonstra a validação do modelo, as temperaturas na região da chapa de aço apresentam uma convergência substancialmente melhor que na região da superfície não exposta. Entretanto, devido à escassez de ensaios de lajes mistas em situação de incêndio natural, para uma melhor calibração o modelo numérico, torna-se impreciso afirmar que os resultados obtidos no estudo estejam mais condizentes com a realidade, apesar de mostrar coerência com os resultados e constatações aqui apresentadas.

O mesmo estudo foi realizado para o último cenário de incêndio, a curva Paramétrica 4. O Quadro 15 a seguir apresenta os coeficientes para o tempo de resistência em que ocorre a temperatura máxima do gás (98 min), e os tempos de 60, 90 e 120 minutos.

Destaca-se o fato de que esse cenário apresenta uma taxa de aquecimento superior à curva de incêndio padrão ISO 834, com uma rápida fase de aquecimento e arrefecimento.

Quadro 15: Coeficientes propostos para determinação da temperatura na chapa de aço em lajes mistas submetidas a curva de incêndio Paramétrica 4.

Paramétrica 4										
Concreto	Fase do incêndio	Resistência ao fogo (min)	Região da chapa de aço	h1 (mm)	b ₀ (°C)	b ₁ (°C,mm)	b ₂ (°C,mm)	b ₃ (°C)	b ₄ (°C)	
Concreto convencional	Aquecimento	22	Flange inferior	40	1085.02	128.21	-1.61	87.79	-146.47	
				60	1076.41	-498.17	0.23	80.32	-173.19	
				80	1038.13	-506.90	0.16	84.54	-137.50	
				100	1043.04	-495.47	0.15	82.58	-140.43	
			Alma	40	818.94	-838.78	-2.86	564.42	-383.35	
				60	794.29	-793.62	-2.32	602.98	-420.51	
				80	792.16	-769.26	-2.53	686.40	-549.24	
				100	792.09	-769.03	-2.53	687.73	-551.32	
			Flange superior	40	567.05	-1999.40	-1.79	1036.19	-599.74	
				60	537.11	-1656.47	-1.49	1069.55	-615.55	
				80	534.64	-1641.99	-1.49	1081.22	-631.12	
				100	532.87	-1623.91	-1.48	1090.25	-640.88	
		Arrefecimento	60	Flange inferior	40	417.49	-919.60	-0.44	82.58	-162.31
					60	277.50	-894.68	-0.29	117.52	-66.23
					80	287.26	-862.63	-0.30	104.91	-64.79
					100	366.69	-859.17	-0.30	59.66	-99.15
				Alma	40	319.79	-461.57	0.07	109.57	-145.35
					60	303.15	-311.20	0.08	123.14	-158.80
					80	296.47	-184.24	0.08	125.76	-161.77
					100	295.63	-179.00	0.09	123.51	-159.15
				Flange superior	40	333.36	-832.67	-0.03	37.84	-56.32
					60	294.20	-402.71	-0.02	66.74	-78.82
					80	275.97	-18.78	-0.02	75.34	-87.19
					100	275.90	-17.50	-0.02	57.11	-68.48
	90		Flange inferior	40	146.41	-573.66	0.77	50.88	-68.97	
				60	29.36	-537.26	1.01	97.12	-12.97	
				80	29.11	-446.44	0.85	96.18	-13.02	
				100	3.93	-403.97	0.83	122.63	-15.94	
			Alma	40	160.02	-378.97	-0.45	39.39	-26.03	
				60	141.05	-402.77	-0.12	53.44	-45.75	
				80	136.52	-400.38	-0.12	41.37	-35.78	
				100	133.85	-348.41	-0.12	36.13	-30.50	
			Flange superior	40	210.99	-205.75	-1.21	-47.01	38.90	
				60	180.21	-348.43	-0.74	17.86	-26.77	
				80	163.46	-247.00	-0.58	14.38	-26.49	
				100	158.98	48.34	-0.78	3.01	-11.20	
	120		Flange inferior	40	158.22	-358.14	1.16	81.01	-167.09	
				60	156.85	-469.58	1.26	80.65	-170.02	
				80	344.06	-430.11	1.30	20.35	-303.59	
				100	387.86	-352.01	1.29	20.19	-350.96	
			Alma	40	103.27	-371.51	0.26	-16.60	33.59	
				60	98.03	-529.29	0.41	-3.48	17.38	
				80	93.16	-527.41	0.39	-3.57	15.72	
				100	88.01	-422.24	0.38	-3.63	16.27	
			Flange superior	40	159.99	-1263.21	0.55	-193.61	170.13	
				60	164.31	-1499.14	0.52	-194.17	168.50	
				80	138.70	-1278.65	0.56	-97.09	76.53	
				100	131.64	-1140.02	0.56	-102.17	82.37	

A fim de apresentar visualmente a eficiência dos coeficientes propostos e para demonstrar o comportamento da temperatura nas componentes, a Figura 61 apresenta a relação entre a espessura do enchimento (mm) e a temperatura na chapa de aço ($^{\circ}\text{C}$), para a chapa de aço Confraplus 60 na situação de incêndio Paramétrica 4.

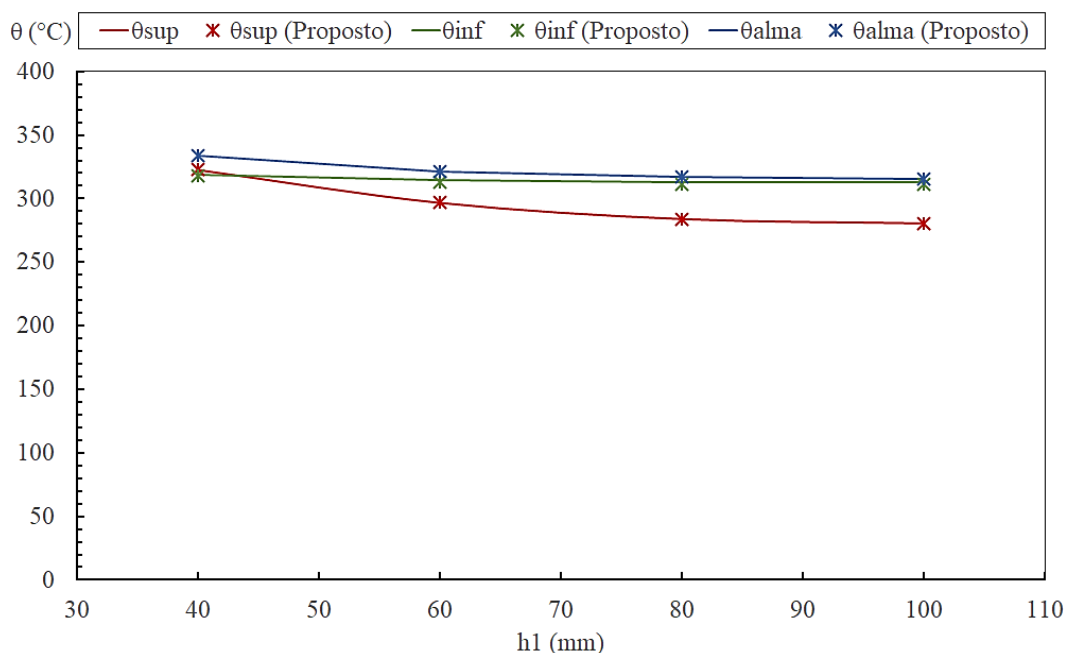


Figura 61: Comparação das temperaturas na chapa de aço para o perfil Confraplus 60 submetida a curva de incêndio Paramétrica 4 com o tempo de resistência ao fogo de 60 min.

É importante ressaltar que o tempo de incêndio da curva Paramétrica 4 é de 64 minutos, em outras palavras, a partir de 64 minutos a temperatura do gás é de 20°C . Sendo assim, observa-se que no fim do incêndio, aos 60 minutos, as componentes da chapa de aço colaborante ainda possuem temperaturas superiores a 250°C .

Outro aspecto que pode ser destacado é que as temperaturas na alma e na flange superior reduzem com o aumento da espessura de cobrimento, chegando a um erro relativo de 13,04% entre as temperaturas na flange superior para os enchimentos de 40 e 100mm. No entanto, a temperatura na flange inferior permanece aproximadamente a mesma em todas as espessuras de cobrimento.

Finalizando a determinação da temperatura nos componentes das lajes mistas submetidas a incêndio natural, a seguir serão apresentados os coeficientes c_i propostos para a obtenção das temperaturas no varão de aço, de modo a serem utilizados na equação (56).

Para o primeiro cenário de incêndio - Curva Paramétrica 1 - o Quadro 16 apresenta os coeficientes para os seguintes tempos de resistência ao fogo: 27,43 (tempo em que a temperatura no gás é máxima), 60, 90 e 120 minutos.

Quadro 16: Coeficientes c_i propostos para determinação da temperatura no varão de aço em lajes mistas submetidas a curva de incêndio Paramétrica 1.

Paramétrica 1										
Concreto	Fase do incêndio	Resistência ao fogo (min)	h1 (mm)	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	Aquecimento	27.43	40	321.27	-253.09	77.08	-4.64	0.66	-3611.10	
			60	306.28	-253.23	79.58	-4.50	0.66	-3523.47	
			80	301.39	-253.31	81.39	-4.57	0.70	-3597.81	
			100	298.39	-253.32	82.21	-4.53	0.70	-3626.96	
	Arrefecimento	60	60	40	740.52	-249.31	4.40	-4.32	0.89	-6005.74
				60	698.00	-251.02	4.42	-4.01	0.87	-5403.43
				80	679.20	-251.41	4.43	-3.78	0.88	-5176.45
				100	675.72	-251.57	4.43	-3.77	0.89	-5132.96
		90	90	40	747.31	-257.52	17.29	-5.03	0.21	-2999.38
				60	718.51	-260.59	17.31	-4.99	0.21	-3002.19
				80	669.83	-261.63	18.61	-4.23	0.29	-2840.69
				100	664.52	-262.11	18.56	-4.32	0.27	-2633.24
		120	120	40	534.01	-243.56	43.78	-3.90	-0.39	120.33
				60	509.00	-245.44	73.65	-5.92	-0.37	-510.11
				80	461.17	-247.67	80.00	-5.53	-0.26	-668.85
				100	444.45	-248.76	85.91	-5.91	-0.27	-419.79

Assim como observado na chapa de aço colaborante, a temperatura no varão de aço varia de acordo com a espessura de enchimento, sendo assim, os coeficientes são apresentados em função do parâmetro h1 indicado na Figura 12.

Utilizando os coeficientes propostos, foi obtido um erro relativo de 0% entre a temperatura obtida no modelo numérico e no método simplificado, para todos os modelos do estudo paramétrico. A Figura 62 mostra a relação entre a temperatura no varão de aço em função da espessura de cobertura do modelo Bondeck nos instantes de tempo de 27, 43 e 120 minutos.

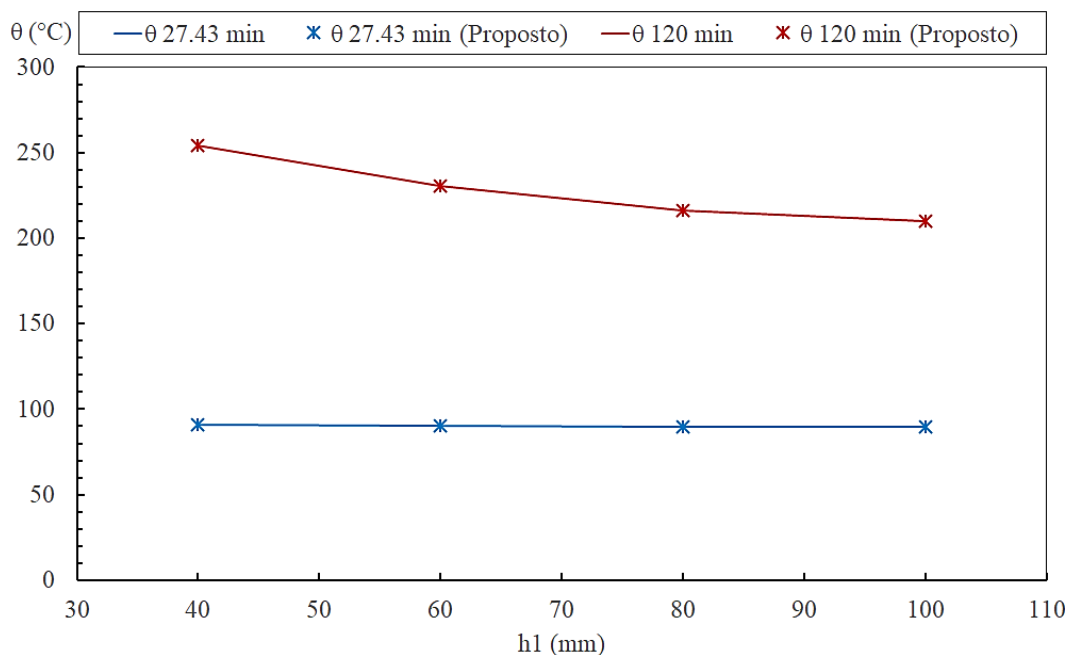


Figura 62: Comparação das temperaturas no varão de aço para o perfil Bondeck submetido a curva de incêndio Paramétrica 1 com os tempos de resistência ao fogo de 27,43 e 120 min.

É importante ressaltar que a temperatura máxima do tempo de aquecimento da curva de incêndio Paramétrica 1, ocorre no instante de 27,43 minutos, e durante o tempo de 120 minutos o incêndio encontra-se em avançado estágio de arrefecimento.

Sendo assim, como é possível observar, a temperatura no varão aço no tempo de 27,43 minutos para todas as espessuras de enchimento é aproximadamente constante. Já no instante de tempo de 120 minutos, a temperatura reduz à medida em que há incremento na espessura da camada de cobrimento. Além disso, a temperatura no varão de aço no instante final do aquecimento, é consideravelmente inferior a temperatura observada no minuto 120, chegando a um erro relativo de 64,25% para o modelo com espessura de 40 mm. Podemos atribuir esse efeito à “bolha de calor” gerada na região do varão de aço durante a fase do arrefecimento, como demonstrado na Figura 52. Ressalta-se o fato de que o efeito de zona de calor na região do varão de aço foi observado para todos os modelos durante a fase de arrefecimento, bem como o fato de que as maiores temperaturas no varão de aço foram observadas durante essa fase do incêndio.

A curva de incêndio Paramétrica 2, é semelhante ao caso anterior, mudando apenas o fato de que o tempo de aquecimento e o tempo de incêndio ser superior. A seguir, o Quadro 17 apresenta os coeficientes para os tempos de resistência de 50,93 (tempo em que a temperatura no gás é máxima), 60, 90 e 120 minutos.

Quadro 17: Coeficientes c_i propostos para determinação da temperatura no varão de aço em lajes mistas submetidas a curva de incêndio Paramétrica 2.

Paramétrica 2										
Concreto	Fase do incêndio	Resistência ao fogo (min)	h1 (mm)	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	Aquecimento	50.93	40	687.27	-249.90	24.64	-4.59	1.15	-7307.43	
			60	637.08	-251.11	25.69	-4.03	1.19	-6819.52	
			80	631.42	-251.52	25.54	-4.09	1.18	-6635.10	
			100	630.37	-251.63	25.48	-4.12	1.18	-6592.15	
	Arrefecimento	60	60	40	770.19	-248.13	14.94	-4.73	1.19	-7623.37
				60	709.29	-249.65	15.47	-3.92	1.25	-7262.92
				80	700.74	-250.14	15.36	-4.03	1.23	-6967.87
				100	698.49	-250.30	15.34	-4.04	1.23	-6922.00
		90	90	40	938.36	-254.91	-1.89	-5.40	0.85	-6203.09
				60	879.91	-257.01	-1.88	-4.68	0.91	-6244.49
				80	845.29	-257.97	-1.88	-4.31	0.95	-5995.62
				100	839.69	-258.29	-1.88	-4.42	0.94	-5795.49
		120	120	40	892.49	-239.35	-7.29	-4.71	0.16	-2739.13
				60	846.14	-241.11	-6.84	-4.00	0.26	-3318.51
				80	810.11	-242.60	-6.74	-3.62	0.31	-3325.34
				100	790.13	-243.26	-6.70	-3.47	0.33	-3151.96

Mais uma vez se verifica que as temperaturas no varão de aço são maiores na fase de arrefecimento que na fase de aquecimento, a fim de melhor mostrar a evolução da temperatura no varão de aço ao longo do incêndio, e como a espessura de enchimento influencia nessas temperaturas, a Figura 63 apresenta esses resultados para o perfil Polideck 59S.

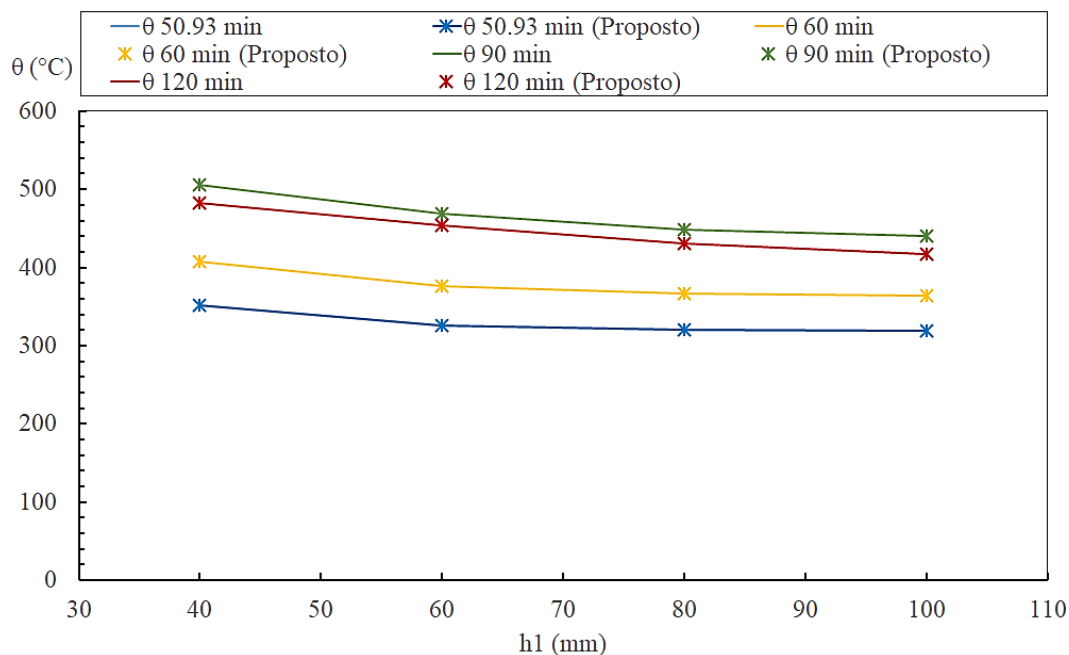


Figura 63: Comparação das temperaturas no varão de aço para o perfil Polideck 59S submetida a curva de incêndio Paramétrica 2.

Percebe-se que a maior temperatura ocorre no instante de tempo de 90 minutos, além disso nota-se que nos instantes iniciais de arrefecimento, entre os instantes de 60 e 90 minutos, ocorre um grande aumento na temperatura desta componente (varões). Porém, entre os instantes de 90 e 120 minutos, que há mesma taxa de arrefecimento, e mesmo intervalo de tempo, a variação de temperatura é consideravelmente menor, havendo uma pequena redução na temperatura.

Outro aspecto que pode ser mencionado, é o fato de que as diferenças relativas entre as temperaturas nos modelos com $h1=40$ mm e $h1=100$ mm de espessura aumentam no decorrer do cenário de incêndio, evidenciando a influência da espessura de enchimento não só na temperatura da superfície não exposta, mas nesta componente da laje mista, também como demonstrado na Tabela 16 a seguir.

Tabela 16: Comparação entre as temperaturas no varão de aço dos modelos Polideck 59S com espessuras de cobertura de 40 e 100mm, submetida a curva de incêndio Paramétrica 2.

t (min)	θ (°C) do modelo	θ (°C) do modelo	Erro relativo (%)
	h1=40mm	h1=100mm	
50.93	351.84	318.43	9.50%
60	406.93	363.95	10.56%
90	505.90	440.74	12.88%
120	482.55	417.05	13.57%

Encerrando o estudo do efeito das curvas paramétricas que seguem a taxa de aquecimento equivalente a curva ISO 834, o Quadro 18 apresenta os coeficientes para a determinação da temperatura no varão de aço nos tempos de resistência de 60, 90, 98 (tempo em que a temperatura no gás é máxima) e 120 minutos.

Quadro 18: Coeficientes c_i propostos para determinação da temperatura no varão de aço em lajes mistas submetidas a curva de incêndio Paramétrica 3.

Paramétrica 3									
Concreto	Fase do incêndio	Resistência ao fogo (min)	h1 (mm)	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	Aquecimento	60	40	767.98	-248.10	16.81	-4.76	1.20	-7721.84
			60	715.42	-249.72	17.26	-4.20	1.24	-7317.85
			80	698.50	-250.09	17.42	-4.06	1.24	-7075.23
			100	696.33	-250.25	17.39	-4.08	1.24	-7024.63
		90	40	975.25	-255.43	-5.63	-4.69	1.23	-8131.27
			60	922.77	-257.43	-5.58	-4.20	1.28	-8109.41
			80	882.37	-258.24	-5.52	-3.63	1.34	-7955.37
			100	875.90	-258.54	-5.53	-3.70	1.34	-7785.69
		98	40	1017.93	-254.56	-10.74	-4.71	1.21	-8070.95
			60	965.05	-256.47	-10.57	-4.21	1.27	-8148.03
			80	921.54	-257.38	-10.33	-3.60	1.35	-8076.46
			100	911.75	-257.72	-10.35	-3.62	1.35	-7890.52
	Arrefecimento	120	40	1113.95	-238.19	-35.51	-4.34	1.07	-7286.50
			60	1059.87	-239.67	-33.88	-3.82	1.17	-7675.97
			80	1014.32	-240.60	-31.77	-3.36	1.25	-7735.01
			100	994.27	-241.03	-31.14	-3.25	1.28	-7597.36

Mais uma vez se observa que as temperaturas no varão de aço são superiores durante a fase de arrefecimento, além disso, nos instantes de tempo de 60 e 90 minutos, a curva Paramétrica 3 é idêntica a curva de incêndio padrão ISO 834.

Sendo assim, o comportamento observado no varão de aço nesses intervalos de tempo no modelo numérico, deve ser semelhante aos resultados obtidos com o modelo simplificado do Eurocódigo, a fim de exibir essa convergência de resultados, a Figura 64 apresenta os resultados obtidos para o modelo Multideck 50.

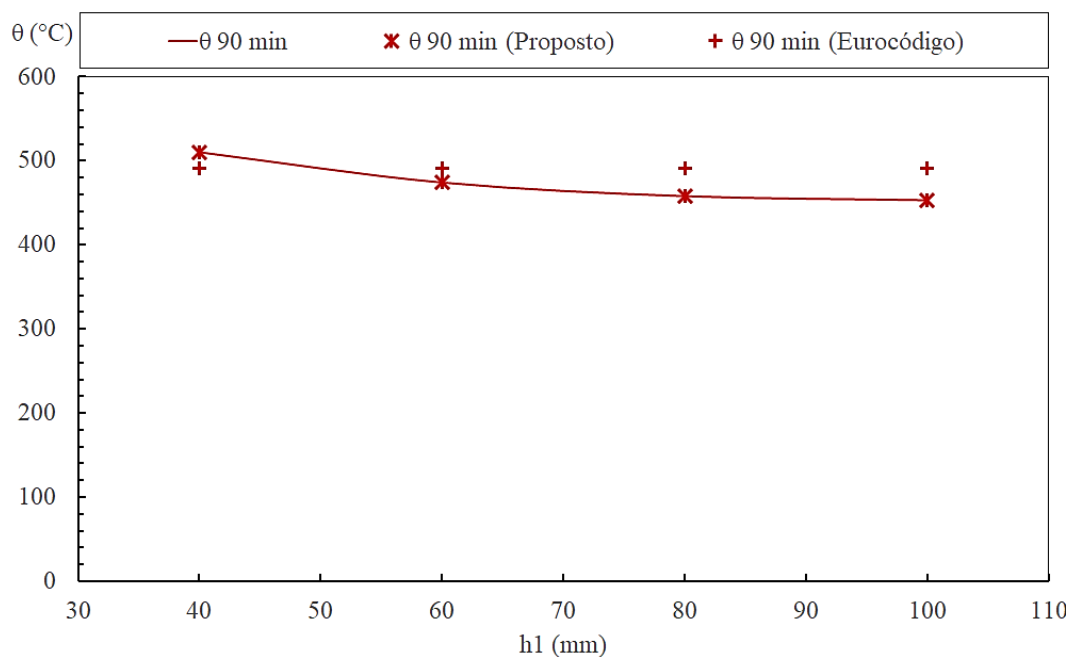


Figura 64: Comparação das temperaturas no varão de aço para o perfil Multideck 50 submetido a curva de incêndio Paramétrica 3 com o tempo de resistência ao fogo de 90 minutos.

Nota-se que os resultados são aproximados, uma vez que o eurocódigo considera a temperatura constante independente da espessura de cobrimento, a temperatura obtida no eurocódigo é ligeiramente inferior à temperatura obtida para o modelo com 40mm de espessura, e ligeiramente superior à temperatura obtida para os modelos com espessura de cobrimento de 60, 80 e 100mm. As diferenças relativas entre os resultados apresentados podem ser observadas na Tabela 17.

Tabela 17: Erro relativo entre as temperaturas no varão de aço obtidas no ANSYS e no método do eurocódigo, para modelo Multideck 50 submetido a curva de incêndio Paramétrica 3 aos 90 minutos.

h1 (mm)	θ (°C) do modelo numérico	θ (°C) do modelo simplificado do eurocódigo	Erro relativo (%)
40	510.27	490.95	3.79%
60	474.23	490.95	-3.52%
80	458.01	490.95	-7.19%
100	453.18	490.95	-8.33%

Para finalizar os estudos envolvendo o varão de aço, são apresentados os coeficientes propostos para a curva Paramétrica 4. Nesta curva há uma rápida fase de aquecimento e arrefecimento, com taxa de aquecimento superior à curva de incêndio

padrão ISO 834, o Quadro 19 apresenta os coeficientes para o tempo de resistência em que ocorre a temperatura máxima do gás - 22 minutos - e os tempos de 60, 90 e 120 minutos.

Quadro 19: Coeficientes c_i propostos para determinação da temperatura no varão de aço em lajes mistas submetidas a curva de incêndio Paramétrica 4.

Paramétrica 4										
Concreto	Fase do incêndio	Resistência ao fogo (min)	h1 (mm)	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	Aquecimento	22	40	311.48	-252.26	113.97	-5.66	1.06	-6083.43	
			60	326.65	-253.76	104.67	-5.61	0.98	-5593.72	
			80	312.01	-253.82	109.15	-5.53	1.01	-5663.97	
			100	310.77	-253.82	109.58	-5.53	1.02	-5681.69	
	Arrefecimento	60	60	40	799.68	-248.38	-10.83	-4.30	0.84	-5589.47
				60	761.01	-250.51	-10.75	-4.20	0.77	-4981.33
				80	734.10	-250.87	-10.60	-3.87	0.78	-4627.45
				100	728.74	-251.04	-10.58	-3.81	0.79	-4579.70
		90	90	40	573.62	-259.05	46.04	-4.22	-0.22	-1125.26
				60	544.05	-263.02	48.31	-4.13	-0.16	-1464.13
				80	496.17	-265.10	58.72	-4.21	-0.11	-1264.75
				100	492.90	-265.94	53.46	-4.00	-0.13	-970.00
		120	120	40	374.98	-245.23	70.98	-3.68	-0.43	437.07
				60	362.59	-245.30	87.33	-4.69	-0.35	-213.37
				80	343.53	-247.75	94.39	-5.05	-0.31	-285.12
				100	337.98	-248.85	90.66	-4.86	-0.30	-106.58

A Figura 65 apresenta os resultados numéricos e os resultados utilizando os coeficientes propostos, para o modelo Confraplus 60, no instante em que ocorre a temperatura máxima, no instante de tempo de 60 minutos e no instante de 90 minutos. Salienta-se o fato de que este cenário de incêndio tem duração de 64 minutos, instante de tempo em que o gás atinge a temperatura de 20°C.

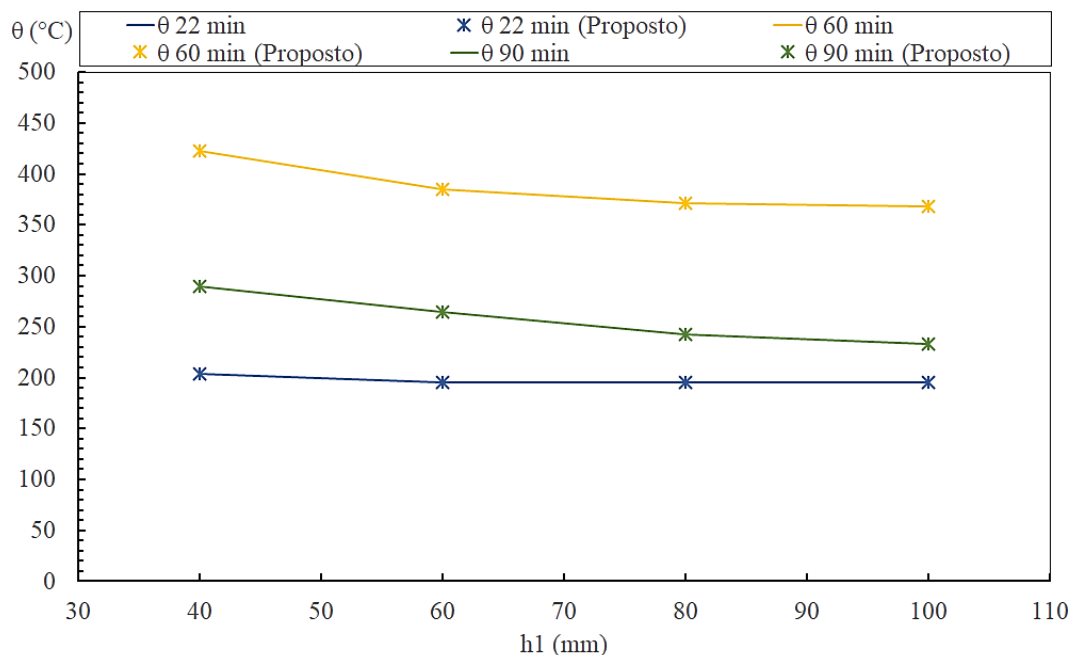


Figura 65: Comparação das temperaturas no varão de aço para o perfil Confraplus 60 submetida a curva de incêndio Paramétrica 4 com os tempos de resistência ao fogo de 22, 60 e 90 minutos.

Como observado em todos os 4 cenários de incêndio, as temperaturas no varão de aço são superiores durante a fase do arrefecimento. Contudo, nesse caso atípico com grande taxa de aquecimento, a temperatura no varão de aço é consideravelmente maior no fim do arrefecimento que no instante final do aquecimento.

Além disso, a temperatura na componente em questão é menor no instante em que o gás atinge temperatura máxima de $1036,60^{\circ}\text{C}$, que no instante de tempo de 90 minutos, que corresponde a 26 minutos após o fim do incêndio, momento que o gás atinge a temperatura de 20°C .

Para a obtenção nas temperaturas nas componentes da chapa de aço e no varão de aço em lajes mistas com diferentes espessuras de concreto h_1 , é possível realizar interpolação linear entre as temperaturas obtidas para as lajes mistas com espessura h_1 de 40, 60, 80 e 100mm.

Utilizando os novos coeficientes propostos, para a determinação da temperatura nos componentes da laje mista submetida a incêndio natural, através das equações (58) e (59), foram determinados a altura da linha neutra e as cargas máximas nos instantes de tempo em que ocorre a temperatura máxima do gás, e nos instantes de 60, 90 e 120 minutos.

Os coeficientes de redução da resistência dos componentes de aço ($k_{y,\theta}$) foram determinados através de interpolação linear utilizando os valores apresentados no Quadro 3.

Como abordado anteriormente, a espessura da enchimento h_1 exerce influência na temperatura das componentes de aço, sendo assim, a posição do eixo neutro varia sutilmente para perfis com diferentes espessuras h_1 em um mesmo instante de tempo. A posição do eixo neutro é medida a partir da superfície não exposta.

Sendo a variação pequena, e o comportamento do deslocamento da linha neutra semelhante, serão apresentados os deslocamentos da linha neutra para perfis com espessura $h_1=100\text{mm}$.

A Figura 66 apresenta a variação na posição da linha neutra em função do tempo, para as lajes mistas com os 4 perfis de chapa de aço estudados, submetidas a curva de incêndio Paramétrica 1.

Nota-se que o comportamento da posição da linha neutra ao longo do incêndio é semelhante para todos os perfis analisados. Durante a fase de aquecimento, há o deslocamento do eixo neutro para a parte superior do elemento da estrutura, retornando à posição inicial ao longo do arrefecimento.

Destaca-se ainda que durante o arrefecimento, a componente que dita a posição da linha neutra é o varão de aço, pois como abordado anteriormente, após o fim do aquecimento, as temperaturas na chapa de aço acompanham o arrefecimento do gás. No entanto, o varão de aço continua a sofrer aumento na sua temperatura devido o efeito “bolha de calor”.

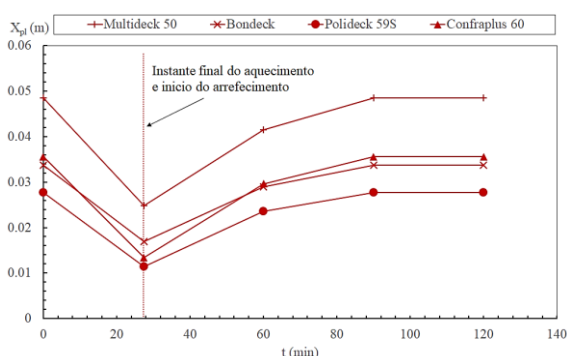


Figura 66: Posição da linha neutra para as lajes mistas com espessura $h_1=100\text{mm}$ submetidas a curva de incêndio Paramétrica 1

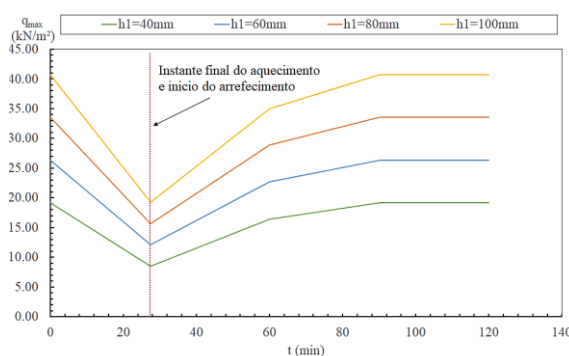


Figura 67: Curvas de capacidade de carga das lajes com geometria reentrante Bondeck submetidas a curva de incêndio Paramétrica 1

A Figura 67 apresenta, as curvas de capacidade de carga das lajes mistas com chapa de aço colaborante Bondeck, com diferentes espessuras de enchimento h_1 submetidas

a curva de incêndio Paramétrica 1, no pressuposto da reversibilidade da capacidade resistente do aço e do concreto. Nota-se que as curvas comportam-se de modo semelhante a posição da linha neutra, sendo a capacidade de carga reduzida ao longo do aquecimento, e aumentando gradativamente ao longo do arrefecimento.

Destaca-se que todos os modelos estudados apresentaram o mesmo comportamento quando submetidos a curva de incêndio Paramétrico 1, variando apenas o valor de carga máximo resistido por cada perfil.

Para a curva de incêndio Paramétrica 2, a posição da linha neutra apresentou um comportamento diferente do observado anteriormente. A Figura 68 apresenta a variação na posição da linha neutra em função do tempo, para as lajes mistas com os 4 perfis de chapa de aço estudados com espessura $h_1=100\text{mm}$.

Nota-se que no instante inicial do arrefecimento, a posição da linha neutra permanece praticamente constante para todos os perfis. Além disso, a posição da linha neutra aproxima-se do valor inicial apenas aos 120 minutos, diferente do caso anterior que atingia esse valor aos 60 minutos.

A Figura 69 apresenta, as curvas de capacidade de carga das lajes mistas com perfil Confraplus 60, para diferentes espessuras de cobertura h_1 submetidas a curva de incêndio Paramétrica 2.

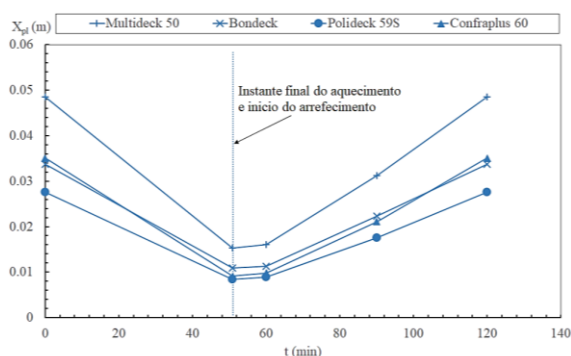


Figura 68: Posição da linha neutra para as lajes mistas com espessura $h_1=100\text{mm}$ submetidas a curva de incêndio Paramétrica 2.

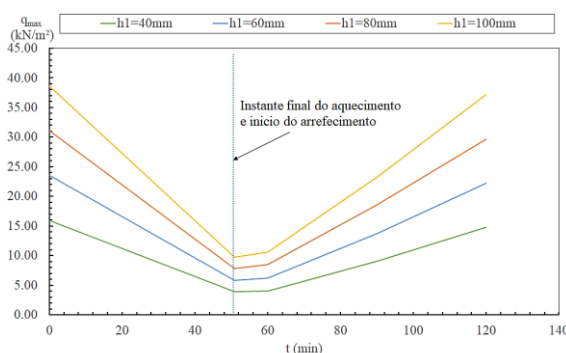


Figura 69: Curvas de capacidade de carga das lajes mistas com geometria trapezoidal Confraplus 60 submetidas a curva de incêndio Paramétrica 2.

Assim como observado anteriormente, as curvas de capacidade de carga seguem o comportamento apresentado pela posição da linha neutra. Observa-se que a capacidade de carga reduz ao longo do aquecimento, e aumenta durante o arrefecimento, sendo o aumento bastante suave nos instantes iniciais dessa fase do incêndio.

Para a curva de incêndio Paramétrica 3, que se comporta semelhante à curva de incêndio padrão ISO 834, durante os primeiros 98 minutos, a posição da linha neutra

apresentou um comportamento diferente do observado anteriormente. A Figura 70 apresenta a variação na posição da linha neutra em função do tempo, para as lajes mistas com os 4 perfis de chapa de aço estudados com espessura $h_1=100\text{mm}$.

Novamente observa-se que a maior variação na posição da linha neutra ocorre durante os instantes iniciais do aquecimento, e permanecendo praticamente constante nos instantes iniciais do arrefecimento.

No entanto, percebe-se que para a curva de incêndio Paramétrica 2, há uma leve recuperação da posição da linha neutra nos instantes iniciais do arrefecimento, já para a curva Paramétrica 3, a posição da linha neutra continua levemente a aproximar-se da parte superior da laje. Esse efeito indica que quanto maior a fase de aquecimento, pior será os efeitos térmicos na capacidade mecânica das lajes durante os estágios iniciais do arrefecimento.

Assim como observado anteriormente, as curvas de capacidade de carga dos modelos seguem o comportamento da linha neutra ao longo do incêndio. A Figura 71 apresenta, as curvas de capacidade de carga das lajes mistas com perfil trapezoidal Polideck 59S, para diferentes espessuras de cobertura h_1 submetidas a curva de incêndio Paramétrica 3.

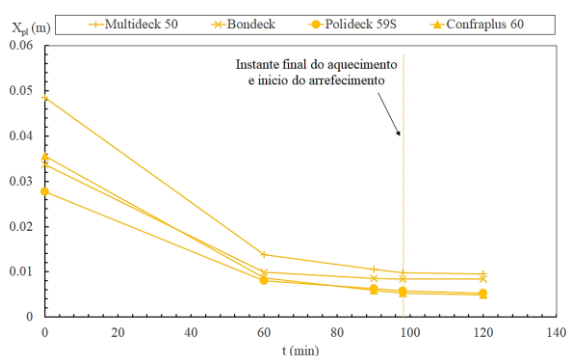


Figura 70: Posição da linha neutra para as lajes mistas com espessura $h_1=100\text{mm}$ submetidas a curva de incêndio Paramétrica 3.

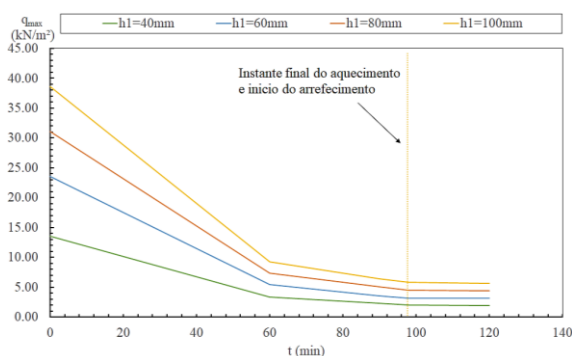


Figura 71: Curvas de capacidade de carga das lajes com geometria trapezoidal Polideck 59S submetidas a curva de incêndio Paramétrica 3.

Nota-se que a maior redução na capacidade de carga ocorre no início do aquecimento, com uma ligeira redução nos instantes finais do aquecimento, e mantendo-se constante nos 22 minutos iniciais de arrefecimento.

O último cenário de incêndio estudado (Paramétrica 4) é composto por uma fase de arrefecimento de 22 minutos e apresenta uma taxa de aquecimento superior à observada na curva de incêndio padrão ISO 834. A Figura 72 apresenta a variação na posição da linha neutra em função do tempo, para as lajes mistas com os 4 perfis de chapa

de aço estudados com espessura $h_1=100\text{mm}$ e submetidas a curva de incêndio Paramétrica 4.

Nota-se que o comportamento da linha neutra se apresenta semelhante ao observado na Figura 66, em ambos os casos os cenários de incêndio possuem fase de arrefecimento com duração de 20-30 minutos.

No entanto, sendo o cenário de incêndio Paramétrica 4, um caso mais extremo, com rápido aquecimento e rápido arrefecimento, percebe-se que o comportamento da linha neutra é mais brusco, deslocando-se durante o arrefecimento, e atingindo o valor inicial aos 60 minutos, pouco antes do gás atingir 20°C .

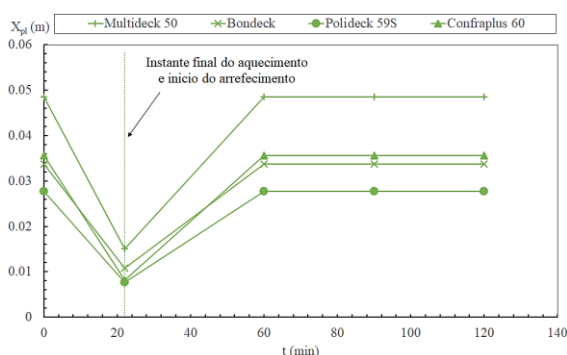


Figura 72: Posição da linha neutra para as lajes mistas com espessura $h_1=100\text{mm}$ submetidas a curva de incêndio Paramétrica 4.

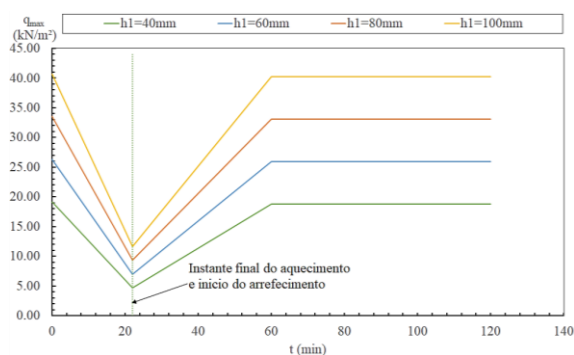


Figura 73: Curvas de capacidade de carga das lajes com geometria reentrante Bondeck submetidas a curva de incêndio Paramétrica 4.

A Figura 73 apresenta, as curvas de capacidade de carga das lajes mistas com perfil reentrante Bondeck, para diferentes espessuras de cobertura h_1 submetidas a curva de incêndio Paramétrica 4.

Novamente observa-se que a capacidade de carga segue o comportamento da linha neutra, reduzindo rapidamente durante o aquecimento, e recuperando seu valor inicial ao fim do arrefecimento.

11 CONCLUSÃO

No estudo das curvas paramétricas propostas pelo Eurocódigo, tornou-se evidente que o fator de abertura é diretamente proporcional à temperatura máxima do gás, e inversamente proporcional à duração do incêndio. Por outro lado, a medida em que há aumento na densidade de carga de incêndio, há aumento na temperatura máxima do gás, no entanto, com o aumento da densidade de carga de incêndio há redução no tempo de duração do incêndio.

Com os resultados obtidos nos modelos de validação, constatou-se que o modelo numérico que considerava a camada “*air-gap*” com 0,5 mm de espessura alcançou uma melhor representatividade para as situações de ensaios experimentais testadas.

Apesar de descrever com boa aproximação o comportamento das curvas de temperaturas nas lajes mistas, ao utilizar diferentes curvas naturais de incêndio, os modelos desenvolvidos no ANSYS e no MATLAB superestimam as temperaturas. As diferenças apresentadas entre os modelos numéricos elaborados nos dois programas são atribuídas a alguns fatores: diferença nos tipos de elementos finitos utilizados; diferença na geometria dos elementos finitos utilizados; diferença nos parâmetros de convergência.

Uma vez que as curvas de temperatura obtidas nos modelos numéricos do MATLAB, apresentam-se mais próximas das curvas experimentais, obtendo uma maior convergência, constata-se que o modelo do MATLAB oferece uma melhor fidelidade do comportamento real das lajes mistas em situação de incêndio natural.

No entanto, mais testes experimentais serão necessários para melhor calibrar os modelos e reduzir a diferença dos valores de temperatura observados nos modelos numéricos. No entanto, vale ressaltar a escassez de resultados de ensaios experimentais com lajes mistas sob condições de incêndio natural, uma vez que os ensaios são muito caros e a maioria dos estudos existentes são baseados na curva de fogo padrão ISO 834.

Foram propostos novos coeficientes para a determinação do tempo de resistência ao isolamento (I), e para a determinação das temperaturas nos componentes de aço das lajes mistas em situação de incêndio natural, a fim de serem aplicados nas equações (53), (55) e (56). Para as componentes de aço, foram propostos diferentes coeficientes para cada espessura do concreto h_1 , pois foi observado em todos os modelos que este parâmetro, além de exercer influência nas temperaturas da face não exposta, também influencia nos componentes, efeito que não é considerado pelo Eurocódigo.

Além disso, foi observada a geração da "bolha de calor" nas nervuras de todos os modelos testados durante a fase de arrefecimento, com temperaturas nesta região superiores às observadas em superfícies expostas e não expostas. A alta temperatura nas armaduras durante a fase de arrefecimento pode comprometer seu comportamento mecânico, colocando em risco a segurança contra o incêndio, visto que os efeitos térmicos na estrutura após o término do aquecimento geralmente são negligenciados pelas normas e projetistas.

Durante as análises de capacidade de carga, notou-se que a espessura de concreto influencia ligeiramente na posição da linha neutra, uma vez que esse parâmetro exerce influência nas temperaturas das componentes de aço.

Além disso, constatou-se que as curvas de capacidade de carga seguem o comportamento da curva formada pela posição da linha neutra ao longo do incêndio, em outras palavras, a capacidade de carga reduz rapidamente durante a fase de aquecimento, atingindo seu menor valor durante o estágio inicial de arrefecimento, e recuperando sua resistência ao longo do arrefecimento, no pressuposto da reversibilidade da capacidade resistente do aço e do concreto.

A contínua perda de resistência das lajes mistas no início do arrefecimento ocorre em razão do efeito "bolha de calor", pois apesar das temperaturas na chapa de aço começarem a reduzir lentamente durante essa fase, as temperaturas nos varões de aço continuam a aumentar.

Esses resultados destacam a importância de se considerar diferentes cenários de incêndio natural, no desempenho estrutural e na segurança de lajes mistas, uma vez que durante a fase de resfriamento ainda há transferência de calor entre os elementos, o que pode levar ao colapso da laje.

11.1 RECOMENDAÇÕES PARA TRABALHOS FUTUROS

É importante estudar com detalhe o fenômeno "bolha de calor" presente nas nervuras durante o arrefecimento, buscando analisar quais parâmetros exercem influência nesse efeito, e quais são as consequências nas propriedades mecânicas dos varões de aço após o fim do incêndio.

Além disso, será necessário fazer a validação do modelo através de mais ensaios experimentais, afim de melhor representar o a evolução da temperatura nas lajes mistas durante o incêndio natural. Sugere-se ainda a realização de mais simulações térmicas e mecânicas, com diferentes parâmetros geométricos, níveis de carregamento e cenários

variados de incêndio natural a fim de entender a influência desses elementos no comportamento das lajes mistas em situação de incêndio.

12 REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- [1] M. Crisinel and D. O’Leary, “Composite floor slab design and construction,” *Struct. Eng. Int.*, vol. 6, no. 1, pp. 41–46, 1996.
- [2] J. Jiang, J. A. Main, J. M. Weigand, and F. H. Sadek, “Thermal performance of composite slabs with profiled steel decking exposed to fire effects,” *Fire Saf. J.*, vol. 95, pp. 25–41, 2018.
- [3] X. Yu, Z. Huang, I. Burgess, and R. Plank, “Nonlinear analysis of orthotropic composite slabs in fire,” *Eng. Struct.*, vol. 30, no. 1, pp. 67–80, 2008.
- [4] D. Pantousa and E. Mistakidis, “Advanced Modeling of Composite Slabs with Thin-Walled Steel Sheeting Submitted to Fire,” *Fire Technol.*, vol. 49, no. 2, pp. 293–327, 2013.
- [5] M. Gillie, A. Usmani, M. Rotter, and M. O’Connor, “Modelling of heated composite floor slabs with reference to the Cardington experiments,” *Fire Saf. J.*, vol. 36, no. 8, pp. 745–767, 2001.
- [6] M. A. H. Abdel-Halim, M. R. Hakmi, and D. C. O’Leary, “Fire resistance of composite floor slabs using a model fire test facility,” *Eng. Struct.*, vol. 21, no. 2, pp. 176–182, 1999.
- [7] J. Jiang, J. A. Main, F. Sadek, and J. M. Weigand, “Numerical Modeling and Analysis of Heat Transfer in Composite Slabs with Profiled Steel Decking,” *Natl. Inst. Stand. Technol.*, no. April, pp. 1–56, 2017.
- [8] J. Jiang, A. Pintar, J. M. Weigand, J. A. Main, and F. Sadek, “Improved calculation method for insulation-based fire resistance of composite slabs,” *Fire Saf. J.*, vol. 105, no. November 2018, pp. 144–153, 2019.
- [9] C. Both, J. H. H. Fellingner, and L. Twilt, “Shallow floor construction with deep composite deck: From fire tests to simple calculation rules,” *Heron*, vol. 42, no. 3, pp. 145–158, 1997.
- [10] International Organization of Standardization, *ISO 834: Fire Resistance Tests - Elements of Building Construction*. Genova: ISO, 1999.
- [11] British Steel, “The behaviour of multi-storey steel frame buildings in fire.” British Steel, Rotherham, 1999.
- [12] F. Wald *et al.*, “Experimental behaviour of a steel structure under natural fire,” *Fire Saf. J.*, vol. 41, no. 7, pp. 509–522, 2006.
- [13] G. M. E. Cooke, R. M. LKawson, and G. M. Newman, “Fire Resistance of Composite Deck Slabs,” *Structural Engineer*, vol. 66, no. 16, pp. 253–261, 267, 1988.
- [14] C. G. Bailey, D. S. White, and D. B. Moore, “The tensile membrane action of unrestrained composite slabs simulated under fire conditions,” *Eng. Struct.*, vol. 22, no. 12, pp. 1583–1595, 2000.
- [15] S. Lamont, A. S. Usmani, and D. D. Drysdale, “Heat transfer analysis of the composite slab in the Cardington frame fire tests,” *Fire Saf. J.*, vol. 36, no. 8, pp. 815–839, 2001.

- [16] T. Lennon and D. Moore, "The natural fire safety concept - Full-scale tests at Cardington," *Fire Saf. J.*, vol. 38, no. 7, pp. 623–643, 2003.
- [17] CEN - European Committee for Standardization, *EN 1991-1-2: Actions on structures - Actions on structures exposed to fire*. Brussels, 2002.
- [18] S. Lamont, A. S. Usmani, and M. Gillie, "Behaviour of a small composite steel frame structure in a 'long-cool' and a 'short-hot' fire," *Fire Saf. J.*, vol. 39, no. 5, pp. 327–357, 2004.
- [19] N. D. Pope and C. G. Bailey, "Quantitative comparison of FDS and parametric fire curves with post-flashover compartment fire test data," *Fire Saf. J.*, vol. 41, no. 2, pp. 99–110, 2006.
- [20] C. R. Barnett, "BFD curve: A new empirical model for fire compartment temperatures," *Fire Saf. J.*, vol. 37, no. 5, pp. 437–463, 2002.
- [21] F. Wald and P. Kallerova, "Fire test on experimental building in Mokrsko," Prague, 2010.
- [22] S. Guo and C. G. Bailey, "Experimental behaviour of composite slabs during the heating and cooling fire stages," *Eng. Struct.*, vol. 33, no. 2, pp. 563–571, 2011.
- [23] S. Guo, "Experimental and numerical study on restrained composite slab during heating and cooling," *J. Constr. Steel Res.*, vol. 69, no. 1, pp. 95–105, 2012.
- [24] V. K. R. Kodur, M. Naser, P. Pakala, and A. Varma, "Modeling the response of composite beam-slab assemblies exposed to fire," *J. Constr. Steel Res.*, vol. 80, pp. 163–173, 2013.
- [25] T. Gernay and J. Franssen, "A performance indicator for structures under natural fire," *Eng. Struct.*, vol. 100, pp. 94–103, 2015.
- [26] P. A. G. Piloto, C. Balsa, F. F. Ribeiro, and R. Rigobello, "Numerical simulation of composite slabs with steel deck under fire conditions," in *5th Iberian-Latin-American Congress on Fire Safety - V CILASCI*, 2019.
- [27] P. A. G. Piloto, C. Balsa, F. Ribeiro, L. Santos, R. Rigobello, and É. Kimura, "Three-Dimensional Numerical Modelling of Fire Exposed Composite Slabs With Steel Deck," *MATTER Int. J. Sci. Technol.*, vol. 5, no. 2, pp. 48–67, 2019.
- [28] S. Sharma, V. T. Vaddamani, and A. Agarwal, "Insulation effect of the concrete slab-steel deck interface in fire conditions and its influence on the structural fire behavior of composite floor systems," *Fire Saf. J.*, vol. 105, no. September 2018, pp. 79–91, 2019.
- [29] ANSYS Inc., "Mechanical APDL 18.2 - Academic version." SAS IP, Canonsburg, 2018.
- [30] CEN, *EN 1994-1-1: Design of Composite Steel and Concrete Structures - General Rules and Rules for Buildings*. Brussels: European Committee of Standardization, 2004.
- [31] R. Rigobello and J. M. Neto, "Análise Numérica De Seções Transversais E De Elementos Estruturais De Aço E Mistos De Aço E Concreto Em Situação De Incêndio," *Cad. Eng. Estruturas*, vol. 10, no. 47, pp. 97–116, 2008.
- [32] CEN, *EN 13501-2: Fire classification of construction products and building elements - Classification using data from fire resistance tests, excluding ventilation*

- services*. Brussels: European Committee of Standardization, 2009.
- [33] R. Hamerlinck, *The behaviour of fire-exposed composite steel/concrete slabs*. Eindhoven University of Technology, 1991.
- [34] Bsi, “BSI Standards Publication Fire resistance tests Part 1: General Requirements,” 2012.
- [35] ABNT, *NBR 14323: Projeto de estruturas de aço e de estruturas mistas de aço e concreto de edifícios em situação de incêndio*. Brasil: ABNT/CB-002, 2013.
- [36] CEN - European Committee for Standardization, *EN 1994-1-2: Design of composite steel and concrete structures - Part 1 - 2: General rules - Structural fire design*. Brussels, 2005.
- [37] C. Both, “The fire resistance of composite steel-concrete slabs,” Delft University Press, 1998.
- [38] Y. A. Çengel and A. J. Ghajar, *Heat and mass transfer: fundamentals & applications*, Fifth edit. New York: McGraw-Hill Education, 2015.
- [39] F. P. Incropera, D. P. DeWitt, T. L. Bergman, and A. S. Lavine, *Fundamentals of Heat and Mass Transfer*, 6 edit. New York: J. Wiley., 2002.
- [40] J. H. Lienhard IV and J. H. Lienhard V, *A Heat Transfer Textbook*, Fifth edit. Cambridge, MA: Phlogiston Press, 2019.
- [41] CEN - European Committee for Standardization, *EN 1993-1-2: Design of steel structures - Part 1-2: General rules - Structural fire design*. Brussels, 2005.
- [42] CEN - European Committee for Standardization, *EN 1992-1-2: Design of concrete structures - Part 1-2: General rules - Structural fire design*. Brussels, 2005.
- [43] W. N. Dos Santos, “Experimental investigation of the effect of moisture on thermal conductivity and specific heat of porous ceramic materials,” *J. Mater. Sci.*, vol. 35, no. 16, pp. 3977–3982, 2000.
- [44] CEN, *EN 1993-1-1: Design of Steel Structures - General Rules and Rules for Buildings*. Brussels: European Committee of Standardization.
- [45] CEN, *EN 1992-1-1: Design of Concrete Structures - General Rules and Rules for Buildings*. Brussels: European Committee of Standardization, 2004.
- [46] V. Galizzi, “User Guide,” 2020.
- [47] L. M. S. Prates, “Simulação Numérica do Comportamento ao Fogo de Estruturas Mistas (Lajes),” *MSc thesis, Inst. Politécnico Bragança*, p. 524, 2018.

ANEXO A: FICHAS TÉCNICAS

O Anexo A apresenta as fichas técnicas das simulações realizadas para a validação, e das simulações térmicas realizadas no estudo paramétrico.

Validação

- Modelos de Validação (S. Guo, C.G. Bailey, 2010): Modelo 1 ao Modelo 3

Estudo paramétrico (Curva de incêndio Paramétrica 1)

- Laje Reentrante Multedick 50: Modelo 4 ao Modelo 7
- Laje Reentrante Bondeck: Modelo 8 ao Modelo 11
- Laje Trapezoidal Polideck 59S: Modelo 12 ao Modelo 15
- Laje Trapezoidal Confraplus 60: Modelo 16 ao Modelo 19

Estudo paramétrico (Curva de incêndio Paramétrica 2)

- Laje Reentrante Multedick 50: Modelo 20 ao Modelo 23
- Laje Reentrante Bondeck: Modelo 24 ao Modelo 27
- Laje Trapezoidal Polideck 59S: Modelo 28 ao Modelo 31
- Laje Trapezoidal Confraplus 60: Modelo 32 ao Modelo 35

Estudo paramétrico (Curva de incêndio Paramétrica 3)

- Laje Reentrante Multedick 50: Modelo 36 ao Modelo 39
- Laje Reentrante Bondeck: Modelo 40 ao Modelo 43
- Laje Trapezoidal Polideck 59S: Modelo 44 ao Modelo 47
- Laje Trapezoidal Confraplus 60: Modelo 48 ao Modelo 51

Estudo paramétrico (Curva de incêndio Paramétrica 4)

- Laje Reentrante Multedick 50: Modelo 52 ao Modelo 55
- Laje Reentrante Bondeck: Modelo 56 ao Modelo 59
- Laje Trapezoidal Polideck 59S: Modelo 60 ao Modelo 63
- Laje Trapezoidal Confraplus 60: Modelo 64 ao Modelo 67

FICHA TÉCNICA		
Modelo 1 – Validação Laje 1 – Bailey (0.5 mm de “air-gap”)		
Modelo 1 – Dados Básicos (1/1)		
Tipo de Experimento	Título: Experimental behaviour of composite slabs during the heating and cooling fire stages	
Validação	Autor(es): S. Guo, C. G. Bailey	Ano: 2010
Detalhamento		
Chapa de Aço	Concreto	Barras de Aço
Geometria: Trapezoidal	Densidade: Convencional	Varões
Espessura (mm): 1.2	Resistência (MPa): 36.4	Descrição: -
f_{yk} (MPa): 378	Umidade: 1.5%	Classe do aço: -
		Grelha de Reforço
		Descrição: Ø7//200
		Classe do aço: S600
Secção Transversal		
Secção Longitudinal		
Modelo de Elementos Finitos		

Modelo 1 – 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: 35 W/m ² K Sup. Ñ Exposta: 9 W/m ² K	Face não Exposta: 20°C Face Exposta: Fogo 1	Flange Superior: 0.78 Alma: 0.60 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: 18000 s Períodos de Gravação: 60 s Mínimo Incremento: 1 s Máximo Incremento: 120 s		Diferença: 1x10 ⁻³ Razão da Diferença: 1x10 ⁻⁶		θ_{MAX} ANSYS: - θ_{MAX} MATLAB: - θ_{MED} ANSYS: 77.88 min θ_{MED} MATLAB: -
Condições de Contorno			Elementos Finitos – Temperaturas no arrefecimento (t=10000s)	
Gráfico – Critério de Isolamento (I)			Gráfico de Temperaturas na Secção da Laje	

FICHA TÉCNICA		
Modelo 2 – Validação Laje 2 – Bailey (0.5 mm de “air-gap”)		
Modelo 2 – Dados Básicos (1/1)		
Tipo de Experimento	Título: Experimental behaviour of composite slabs during the heating and cooling fire stages	
Validação	Autor(es): S. Guo, C. G. Bailey	Ano: 2010
Detalhamento		
Chapa de Aço	Concreto	Barras de Aço
Geometria: Trapezoidal	Densidade: Convencional	Varões
Espessura (mm): 1.2	Resistência (MPa): 37.8	Descrição: -
f_{yk} (MPa): 378	Umidade: 2.0%	Classe do aço: -
		Grelha de Reforço
		Descrição: Ø7//200
		Classe do aço: S600
Secção Transversal		
Secção Longitudinal		
Modelo de Elementos Finitos		

Modelo 2 – 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: 35 W/m ² K Sup. Ñ Exposta: 9 W/m ² K	Face não Exposta: 20°C Face Exposta: Fogo 2	Flange Superior: 0.78 Alma: 0.60 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: 18000 s Períodos de Gravação: 60 s Mínimo Incremento: 1 s Máximo Incremento: 120 s		Diferença: 1x10 ⁻³ Razão da Diferença: 1x10 ⁻⁶		θ_{MAX} ANSYS: 91.62 min θ_{MAX} MATLAB: 108.62 min θ_{MED} ANSYS: 90.69 min θ_{MED} MATLAB: 110.34 min
Condições de Contorno			Elementos Finitos – Temperaturas no arrefecimento (t=10000s)	
Gráfico – Critério de Isolamento (I)			Gráfico de Temperaturas na Secção da Laje	

FICHA TÉCNICA		
Modelo 3 – Validação Laje 3 – Bailey (0.5 mm de “air-gap”)		
Modelo 3 – Dados Básicos (1/1)		
Tipo de Experimento	Título: Experimental behaviour of composite slabs during the heating and cooling fire stages	
Validação	Autor(es): S. Guo, C. G. Bailey	Ano: 2010
Detalhamento		
Chapa de Aço	Concreto	Barras de Aço
Geometria: Trapezoidal	Densidade: Convencional	Varões
Espessura (mm): 1.2	Resistência (MPa): 21.1	Descrição: -
f_{yk} (MPa): 378	Umidade: 1.86%	Classe do aço: -
		Grelha de Reforço
		Descrição: Ø7//200
		Classe do aço: S600
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: SHEL131 Concreto: SOLID70 Barras de Aço: LINK33 Ar: SHEL131	Sup. Exposta: 35 W/m ² K Sup. Ñ Exposta: 9 W/m ² K	Face não Exposta: 20°C Face Exposta: Fogo 3	Flange Superior: 0.78 Alma: 0.60 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: 18000 s Períodos de Gravação: 60 s Mínimo Incremento: 1 s Máximo Incremento: 120 s		Diferença: 1x10 ⁻³ Razão da Diferença: 1x10 ⁻⁶		θ_{MAX} ANSYS: 70.83 min θ_{MAX} MATLAB: 92.42 min θ_{MED} ANSYS: 72.35 min θ_{MED} MATLAB: 92.58 min
Condições de Contorno			Elementos Finitos – Temperaturas no arrefecimento (t=10000s)	
Gráfico – Critério de Isolamento (I)			Gráfico de Temperaturas na Secção da Laje	

FICHA TÉCNICA			
Modelo 4 – Multideck 50 – 40 mm			
Modelo 4 – Dados Básicos (1/1)			
Tipo de Experimento	Título: Multideck 50 (UK) / $h_1=40$ mm		
Estudo Paramétrico	Autor(es): Filho, M. M. A.	Ano: 2020	
Detalhamento			
Chapa de Aço	Concreto	Barras de Aço	
Geometria: Reentrante	Densidade: Convencional	Varões	Grelha de Reforço
Espessura (mm): 1.00	Classe: C25/30	Descrição: Ø6//150	Descrição: 3Ø10
Classe do aço: S450	Umidade: 2.0%	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	Sup. Exposta: 35 W/m ² K	Face não Exposta: 20°C	Flange Superior: 0.14	Chapa de Aço: 0.7
Concreto: SOLID70	Sup. Ñ Exposta: 9 W/m ² K	Face Exposta: Paramétrica 1	Alma: 0.09	Concreto: 0.7
Barras de Aço: LINK33			Flange Inferior: 1.00	Barras de Aço: 0.7
Parâmetros de Convergência		Critérios de Convergência – Heat Flux		Resultados - Critério Isolamento (I)
Duração Total da Simulação: 10800 s		Diferença: 1x10 ⁻³		θ_{MAX} ANSYS: 36.09 min
Períodos de Gravação: 60 s		Razão da Diferença: 1x10 ⁻⁶		θ_{MAX} MATLAB: 48.79 min
Mínimo Incremento: 1 s				θ_{MED} ANSYS: 35.64 min
Máximo Incremento: 120 s				θ_{MED} MATLAB: 46.09 min
Condições de Contorno			Elementos Finitos – Temperaturas no arrefecimento (t=6000s)	
Gráfico – Critério de Isolamento (I)			Gráfico de Temperaturas na Seção da Laje	

FICHA TÉCNICA			
Modelo 5 – Multideck 50 – 60 mm			
Modelo 5 – Dados Básicos (1/1)			
Tipo de Experimento	Título: Multideck 50 (UK) / $h_1=60$ mm		
Estudo Paramétrico	Autor(es): Filho, M. M. A.	Ano: 2020	
Detalhamento			
Chapa de Aço	Concreto	Barras de Aço	
Geometria: Reentrante	Densidade: Convencional	Varões	Grelha de Reforço
Espessura (mm): 1.00	Classe: C25/30	Descrição: Ø6//150	Descrição: 3Ø10
Classe do aço: S450	Umidade: 2.0%	Classe do aço: S500	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: 35 W/m ² K Sup. Ñ Exposta: 9 W/m ² K	Face não Exposta: 20°C Face Exposta: Paramétrica 1	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: 10800 s Períodos de Gravação: 60 s Mínimo Incremento: 1 s Máximo Incremento: 120 s		Diferença: 1x10 ⁻³ Razão da Diferença: 1x10 ⁻⁶		θ_{MAX} ANSYS: 70.64 min θ_{MAX} MATLAB: 99.17 min θ_{MED} ANSYS: 58.93 min θ_{MED} MATLAB: 72.25 min
Condições de Contorno			Elementos Finitos – Temperaturas no arrefecimento (t=6000s)	
Gráfico – Critério de Isolamento (I)			Gráfico de Temperaturas na Secção da Laje	

FICHA TÉCNICA			
Modelo 6 – Multideck 50 – 80 mm			
Modelo 6 – Dados Básicos (1/1)			
Tipo de Experimento	Título: Multideck 50 (UK) / $h_1=80$ mm		
Estudo Paramétrico	Autor(es): Filho, M. M. A	Ano: 2020	
Detalhamento			
Chapa de Aço	Concreto	Barras de Aço	
Geometria: Reentrante	Densidade: Convencional	Varões	Grelha de Reforço
Espessura (mm): 1.00	Classe: C25/30	Descrição: Ø6//150	Descrição: 3Ø10
Classe do aço: S450	Umidade: 2.0%	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	Sup. Exposta: 35 W/m ² K	Face não Exposta: 20°C	Flange Superior: 0.14	Chapa de Aço: 0.7
Concreto: SOLID70	Sup. Ñ Exposta: 9 W/m ² K	Face Exposta: Paramétrica 1	Alma: 0.09	Concreto: 0.7
Barras de Aço: LINK33			Flange Inferior: 1.00	Barras de Aço: 0.7
Parâmetros de Convergência		Critérios de Convergência – Heat Flux		Resultados - Critério Isolamento (I)
Duração Total da Simulação: 10800 s		Diferença: 1x10 ⁻³		θ_{MAX} ANSYS: -
Períodos de Gravação: 60 s		Razão da Diferença: 1x10 ⁻⁶		θ_{MAX} MATLAB: -
Mínimo Incremento: 1 s				θ_{MED} ANSYS: 97.07 min
Máximo Incremento: 120 s				θ_{MED} MATLAB: -
Condições de Contorno			Elementos Finitos – Temperaturas no arrefecimento (t=6000s)	
Gráfico – Critério de Isolamento (I)			Gráfico de Temperaturas na Seção da Laje	

FICHA TÉCNICA			
Modelo 7 – Multideck 50 – 100 mm			
Modelo 7 – Dados Básicos (1/1)			
Tipo de Experimento	Título: Multideck 50 (UK) / $h_1=100$ mm		
Estudo Paramétrico	Autor(es): Filho, M. M. A	Ano: 2020	
Detalhamento			
Chapa de Aço	Concreto	Barras de Aço	
Geometria: Reentrante	Densidade: Convencional	Varões	Grelha de Reforço
Espessura (mm): 1.00	Classe: C25/30	Descrição: Ø6//150	Descrição: 3Ø10
Classe do aço: S450	Umidade: 2.0%	Classe do aço: S500	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	Sup. Exposta: 35 W/m ² K	Face não Exposta: 20°C	Flange Superior: 0.14	Chapa de Aço: 0.7
Concreto: SOLID70	Sup. Ñ Exposta: 9 W/m ² K	Face Exposta: Paramétrica 1	Alma: 0.09	Concreto: 0.7
Barras de Aço: LINK33			Flange Inferior: 1.00	Barras de Aço: 0.7
Parâmetros de Convergência		Critérios de Convergência – Heat Flux		Resultados - Critério Isolamento (I)
Duração Total da Simulação: 10800 s		Diferença: 1x10 ⁻³		θ_{MAX} ANSYS: -
Períodos de Gravação: 60 s		Razão da Diferença: 1x10 ⁻⁶		θ_{MAX} MATLAB: -
Mínimo Incremento: 1 s				θ_{MED} ANSYS: -
Máximo Incremento: 120 s				θ_{MED} MATLAB: -
Condições de Contorno			Elementos Finitos – Temperaturas no arrefecimento (t=6000s)	
Gráfico – Critério de Isolamento (I)			Gráfico de Temperaturas na Seção da Laje	

FICHA TÉCNICA			
Modelo 8 – Bondeck – 40 mm			
Modelo 8 – Dados Básicos (1/1)			
Tipo de Experimento	Título: Bondeck (AUS) / $h_1=40$ mm		
Estudo Paramétrico	Autor(es): Filho, M. M. A	Ano: 2020	
Detalhamento			
Chapa de Aço	Concreto	Barras de Aço	
Geometria: Reentrante	Densidade: Convencional	Varões	Grelha de Reforço
Espessura (mm): 1.00	Classe: C25/30	Descrição: Ø6//150	Descrição: 3Ø10
Classe do aço: S350	Umidade: 2.0%	Classe do aço: S500	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: 35 W/m ² K Sup. Ñ Exposta: 9 W/m ² K	Face não Exposta: 20°C Face Exposta: Paramétrica 1	Flange Superior: 0.12 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: 10800 s Períodos de Gravação: 60 s Mínimo Incremento: 1 s Máximo Incremento: 120 s		Diferença: 1x10 ⁻³ Razão da Diferença: 1x10 ⁻⁶		θ_{MAX} ANSYS: 39.24 min θ_{MAX} MATLAB: 55.68 min θ_{MED} ANSYS: 40.23 min θ_{MED} MATLAB: 54.76 min
Condições de Contorno			Elementos Finitos – Temperaturas no arrefecimento (t=6000 s)	
Gráfico – Critério de Isolamento (I)			Gráfico de Temperaturas na Secção da Laje	

FICHA TÉCNICA			
Modelo 9 – Bondeck – 60 mm			
Modelo 9 – Dados Básicos (1/1)			
Tipo de Experimento	Título: Bondeck (AUS) / $h_1=60$ mm		
Estudo Paramétrico	Autor(es): Filho, M. M. A	Ano: 2020	
Detalhamento			
Chapa de Aço	Concreto	Barras de Aço	
Geometria: Reentrante	Densidade: Convencional	Varões	Grelha de Reforço
Espessura (mm): 1.00	Classe: C25/30	Descrição: Ø6//150	Descrição: 3Ø10
Classe do aço: S350	Umidade: 2.0%	Classe do aço: S500	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	Sup. Exposta: 35 W/m ² K	Face não Exposta: 20°C	Flange Superior: 0.12	Chapa de Aço: 0.7
Concreto: SOLID70	Sup. Ñ Exposta: 9 W/m ² K	Face Exposta: Paramétrica 1	Alma: 0.09	Concreto: 0.7
Barras de Aço: LINK33			Flange Inferior: 1.00	Barras de Aço: 0.7
Parâmetros de Convergência		Critérios de Convergência – Heat Flux		Resultados - Critério Isolamento (I)
Duração Total da Simulação: 10800 s		Diferença: 1x10 ⁻³		θ_{MAX} ANSYS: 87.06 min
Períodos de Gravação: 60 s		Razão da Diferença: 1x10 ⁻⁶		θ_{MAX} MATLAB: -
Mínimo Incremento: 1 s				θ_{MED} ANSYS: 68.23 min
Máximo Incremento: 120 s				θ_{MED} MATLAB: 87.56 min
Condições de Contorno			Elementos Finitos – Temperaturas no arrefecimento (t=6000 s)	
Gráfico – Critério de Isolamento (I)			Gráfico de Temperaturas na Seção da Laje	

FICHA TÉCNICA			
Modelo 10 – Bondeck – 80 mm			
Modelo 10 – Dados Básicos (1/1)			
Tipo de Experimento	Título: Bondeck (AUS) / $h_1=80$ mm		
Estudo Paramétrico	Autor(es): Filho, M. M. A	Ano: 2020	
Detalhamento			
Chapa de Aço	Concreto	Barras de Aço	
Geometria: Reentrante	Densidade: Convencional	Varões	Grelha de Reforço
Espessura (mm): 1.00	Classe: C25/30	Descrição: Ø6//150	Descrição: 3Ø10
Classe do aço: S350	Umidade: 2.0%	Classe do aço: S500	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: 35 W/m ² K Sup. Ñ Exposta: 9 W/m ² K	Face não Exposta: 20°C Face Exposta: Paramétrica 1	Flange Superior: 0.12 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: 10800 s Períodos de Gravação: 60 s Mínimo Incremento: 1 s Máximo Incremento: 120 s		Diferença: 1x10 ⁻³ Razão da Diferença: 1x10 ⁻⁶		θ_{MAX} ANSYS: - θ_{MAX} MATLAB: - θ_{MED} ANSYS: - θ_{MED} MATLAB: -
Condições de Contorno			Elementos Finito – Temperaturas no arrefecimento (t=6000 s)	
Gráfico – Critério de Isolamento (I)			Gráfico de Temperaturas na Seção da Laje	

FICHA TÉCNICA		
Modelo 11 – Bondeck – 100 mm		
Modelo 11 – Dados Básicos (1/1)		
Tipo de Experimento	Título: Bondeck (AUS) / $h_1=100$ mm	
Estudo Paramétrico	Autor(es): Filho, M. M. A	Ano: 2020
Detalhamento		
Chapa de Aço	Concreto	Barras de Aço
Geometria: Reentrante	Densidade: Convencional	Varões
Espessura (mm): 1.00	Classe: C25/30	Descrição: Ø6//150
Classe do aço: S350	Umidade: 2.0%	Classe do aço: S500
		Grelha de Reforço
		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	Sup. Exposta: 35 W/m ² K	Face não Exposta: 20°C	Flange Superior: 0.12	Chapa de Aço: 0.7
Concreto: SOLID70	Sup. Ñ Exposta: 9 W/m ² K	Face Exposta: Paramétrica 1	Alma: 0.09	Concreto: 0.7
Barras de Aço: LINK33			Flange Inferior: 1.00	Barras de Aço: 0.7
Parâmetros de Convergência		Critérios de Convergência – Heat Flux		Resultados - Critério Isolamento (I)
Duração Total da Simulação: 10800 s		Diferença: 1x10 ⁻³		θ_{MAX} ANSYS: -
Períodos de Gravação: 60 s		Razão da Diferença: 1x10 ⁻⁶		θ_{MAX} MATLAB: -
Mínimo Incremento: 1 s				θ_{MED} ANSYS: -
Máximo Incremento: 120 s				θ_{MED} MATLAB: -
Condições de Contorno			Elementos Finitos – Temperaturas no arrefecimento (t=6000 s)	
Gráfico – Critério de Isolamento (I)			Gráfico de Temperaturas na Seção da Laje	

FICHA TÉCNICA			
Modelo 12 – Polideck 59S – 40 mm			
Modelo 12 – Dados Básicos (1/1)			
Tipo de Experimento	Título: Polideck 59S (BRA) / $h_1=40$ mm		
Estudo Paramétrico	Autor(es): Filho, M. M. A	Ano: 2020	
Detalhamento			
Chapa de Aço	Concreto	Barras de Aço	
Geometria: Trapezoidal	Densidade: Convencional	Varões	Grelha de Reforço
Espessura (mm): 1.25	Classe: C25/30	Descrição: Ø6//150	Descrição: 3Ø10
Classe do aço: S275	Umidade: 2.0%	Classe do aço: S500	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: 35 W/m ² K Sup. Ñ Exposta: 9 W/m ² K	Face não Exposta: 20°C Face Exposta: Paramétrica 1	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: 10800 s Períodos de Gravação: 60 s Mínimo Incremento: 1 s Máximo Incremento: 120 s		Diferença: 1x10 ⁻³ Razão da Diferença: 1x10 ⁻⁶		θ_{MAX} ANSYS: 23.02 min θ_{MAX} MATLAB: 30.82 min θ_{MED} ANSYS: 24.99 min θ_{MED} MATLAB: 33.60 min
Condições de Contorno			Elementos Finitos – Temperaturas no arrefecimento (t=6000 s)	
Gráfico – Critério de Isolamento (I)			Gráfico de Temperaturas na Secção da Laje	

FICHA TÉCNICA		
Modelo 13 – Polideck 59S – 60 mm		
Modelo 13 – Dados Básicos (1/1)		
Tipo de Experimento	Título: Polideck 59S (BRA) / $h_1=60$ mm	
Estudo Paramétrico	Autor(es): Filho, M. M. A	Ano: 2020
Detalhamento		
Chapa de Aço	Concreto	Barras de Aço
Geometria: Trapezoidal	Densidade: Convencional	Varões
Espessura (mm): 1.25	Classe: C25/30	Descrição: $\varnothing 6//150$
Classe do aço: S275	Umidade: 2.0%	Classe do aço: S500
		Grelha de Reforço
		Descrição: 3 $\varnothing 10$
		Classe do aço: S500
Secção Transversal		
Secção Longitudinal		
Modelo de Elementos Finitos		

Modelo 13 – Teste térmico (I/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: 35 W/m ² K Sup. Ñ Exposta: 9 W/m ² K	Face não Exposta: 20°C Face Exposta: Paramétrica 1	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: 10800 s Períodos de Gravação: 60 s Mínimo Incremento: 1 s Máximo Incremento: 120 s		Diferença: 1x10 ⁻³ Razão da Diferença: 1x10 ⁻⁶		θ_{MAX} ANSYS: 43.66 min θ_{MAX} MATLAB: 57.79 min θ_{MED} ANSYS: 45.13 min θ_{MED} MATLAB: 55.92 min
Condições de Contorno			Elementos Finitos – Temperaturas no arrefecimento (t=6000 s)	
<p>$\alpha_c = 9 \text{ W/m}^2\text{K}$ $\theta = 20^\circ\text{C}$ $\alpha_c = 35 \text{ W/m}^2\text{K}$ $\Phi_{f,sup}$ $\Phi_{f,inf}$ $\theta = \text{Paramétrica 1}$ Φ_{alma}</p>			<p>217.168 228.87 240.572 252.274 263.975 275.677 287.379 299.08 310.782 322.484</p>	
Gráfico – Critério de Isolamento (I)			Gráfico de Temperaturas na Secção da Laje	
<p>$\theta_{max} = \bar{\theta}_0 + 180^\circ\text{C}$ $\bar{\theta} = \bar{\theta}_0 + 140^\circ\text{C}$ Instante final do aquecimento e início do arrefecimento</p>			<p>Instante final do aquecimento e início do arrefecimento</p>	

FICHA TÉCNICA		
Modelo 14 – Polideck 59S – 80 mm		
Modelo 14 – Dados Básicos (1/1)		
Tipo de Experimento	Título: Polideck 59S (BRA) / $h_1=80$ mm	
Estudo Paramétrico	Autor(es): Filho, M. M. A	Ano: 2020
Detalhamento		
Chapa de Aço	Concreto	Barras de Aço
Geometria: Trapezoidal	Densidade: Convencional	Varões
Espessura (mm): 1.25	Classe: C25/30	Descrição: $\varnothing 6//150$
Classe do aço: S275	Umidade: 2.0%	Classe do aço: S500
		Grelha de Reforço
		Descrição: $3\varnothing 10$
		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: 35 W/m ² K Sup. Ñ Exposta: 9 W/m ² K	Face não Exposta: 20°C Face Exposta: Paramétrica 1	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: 10800 s Períodos de Gravação: 60 s Mínimo Incremento: 1 s Máximo Incremento: 120 s		Diferença: 1x10 ⁻³ Razão da Diferença: 1x10 ⁻⁶		θ_{MAX} ANSYS: - θ_{MAX} MATLAB: - θ_{MED} ANSYS: 71.86 min θ_{MED} MATLAB: 91.05 min
Condições de Contorno			Elementos Finitos – Temperaturas no arrefecimento (t=6000 s)	
<p>$\alpha_c = 9 \text{ W/m}^2\text{K}$ $\theta = 20^\circ\text{C}$ $\alpha_c = 35 \text{ W/m}^2\text{K}$ $\Phi_{f,sup}$ $\Phi_{f,inf}$ $\theta = \text{Paramétrica 1}$ Φ_{alma}</p>			<p>188.064 201.173 214.283 227.393 240.503 253.613 266.722 279.832 292.942 306.052</p>	
Gráfico – Critério de Isolamento (I)			Gráfico de Temperaturas na Secção da Laje	
<p>$\theta_{max} = \bar{\theta}_0 + 180^\circ\text{C}$ $\bar{\theta} = \bar{\theta}_0 + 140^\circ\text{C}$</p>			<p>Instante final do aquecimento e início do arrefecimento</p>	

FICHA TÉCNICA		
Modelo 15 – Polideck 59S – 100 mm		
Modelo 15 – Dados Básicos (1/1)		
Tipo de Experimento	Título: Polideck 59S (BRA) / $h_1=100$ mm	
Estudo Paramétrico	Autor(es): Filho, M. M. A	Ano: 2020
Detalhamento		
Chapa de Aço	Concreto	Barras de Aço
Geometria: Trapezoidal	Densidade: Convencional	Varões
Espessura (mm): 1.25	Classe: C25/30	Descrição: Ø6//150
Classe do aço: S275	Umidade: 2.0%	Classe do aço: S500
		Grelha de Reforço
		Descrição: 3Ø10
		Classe do aço: S500
Secção Transversal		
Secção Longitudinal		
Modelo de Elementos Finitos		

Modelo 15 – Teste térmico (I/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: 35 W/m ² K Sup. Ñ Exposta: 9 W/m ² K	Face não Exposta: 20°C Face Exposta: Paramétrica 1	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: 10800 s Períodos de Gravação: 60 s Mínimo Incremento: 1 s Máximo Incremento: 120 s		Diferença: 1x10 ⁻³ Razão da Diferença: 1x10 ⁻⁶		θ_{MAX} ANSYS: - θ_{MAX} MATLAB: - θ_{MED} ANSYS: - θ_{MED} MATLAB: -
Condições de Contorno			Elementos Finitos – Temperaturas no arrefecimento (t=6000 s)	
Gráfico – Critério de Isolamento (I)			Gráfico de Temperaturas na Secção da Laje	

FICHA TÉCNICA		
Modelo 16 – Confraplus 60 – 40 mm		
Modelo 16 – Dados Básicos (1/1)		
Tipo de Experimento	Título: Confraplus 60 (POL) / $h_1=40$ mm	
Estudo Paramétrico	Autor(es): Filho, M. M. A	Ano: 2020
Detalhamento		
Chapa de Aço	Concreto	Barras de Aço
Geometria: Trapezoidal	Densidade: Convencional	Varões
Espessura (mm): 1.25	Classe: C25/30	Descrição: Ø6//150
Classe do aço: S350	Umidade: 2.0%	Classe do aço: S500
		Grelha de Reforço
		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: 35 W/m ² K Sup. Ñ Exposta: 9 W/m ² K	Face não Exposta: 20°C Face Exposta: Paramétrica 1	Flange Superior: 0.73 Alma: 0.55 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: 10800 s Períodos de Gravação: 60 s Mínimo Incremento: 1 s Máximo Incremento: 120 s		Diferença: 1x10 ⁻³ Razão da Diferença: 1x10 ⁻⁶		θ_{MAX} ANSYS: 22.51 min θ_{MAX} MATLAB: 29.76 min θ_{MED} ANSYS: 24.70 min θ_{MED} MATLAB: 31.58 min
Condições de Contorno			Elementos Finitos – Temperaturas no arrefecimento (t=6000 s)	
Gráfico – Critério de Isolamento (I)			Gráfico de Temperaturas na Secção da Laje	

FICHA TÉCNICA		
Modelo 17 – Confraplus 60 – 60 mm		
Modelo 17 – Dados Básicos (1/1)		
Tipo de Experimento	Título: Confraplus 60 (POL) / $h_1=60$ mm	
Estudo Paramétrico	Autor(es): Filho, M. M. A	Ano: 2020
Detalhamento		
Chapa de Aço	Concreto	Barras de Aço
Geometria: Trapezoidal	Densidade: Convencional	Varões
Espessura (mm): 1.25	Classe: C25/30	Descrição: Ø6//150
Classe do aço: S350	Umidade: 2.0%	Classe do aço: S500
		Grelha de Reforço
		Descrição: 3Ø10
		Classe do aço: S500
Secção Transversal		
Secção Longitudinal		
Modelo de Elementos Finitos		

Modelo 17 – Teste térmico (I/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: 35 W/m ² K Sup. Ñ Exposta: 9 W/m ² K	Face não Exposta: 20°C Face Exposta: Paramétrica 1	Flange Superior: 0.73 Alma: 0.55 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: 10800 s Períodos de Gravação: 60 s Mínimo Incremento: 1 s Máximo Incremento: 120 s		Diferença: 1x10 ⁻³ Razão da Diferença: 1x10 ⁻⁶		θ_{MAX} ANSYS: 42.13 min θ_{MAX} MATLAB: 54.86 min θ_{MED} ANSYS: 41.86 min θ_{MED} MATLAB: 52.37 min
Condições de Contorno			Elementos Finitos – Temperaturas no arrefecimento (t=6000 s)	
Gráfico – Critério de Isolamento (I)			Gráfico de Temperaturas na Secção da Laje	

FICHA TÉCNICA			
Modelo 18 – Confraplus 60 – 80 mm			
Modelo 18 – Dados Básicos (1/1)			
Tipo de Experimento	Título: Confraplus 60 (POL) / $h_1=80$ mm		
Estudo Paramétrico	Autor(es): Filho, M. M. A	Ano: 2020	
Detalhamento			
Chapa de Aço	Concreto	Barras de Aço	
Geometria: Trapezoidal	Densidade: Convencional	Varões	Grelha de Reforço
Espessura (mm): 1.25	Classe: C25/30	Descrição: Ø6//150	Descrição: 3Ø10
Classe do aço: S350	Umidade: 2.0%	Classe do aço: S500	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: 35 W/m ² K Sup. Ñ Exposta: 9 W/m ² K	Face não Exposta: 20°C Face Exposta: Paramétrica 1	Flange Superior: 0.73 Alma: 0.55 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: 10800 s Períodos de Gravação: 60 s Mínimo Incremento: 1 s Máximo Incremento: 120 s		Diferença: 1x10 ⁻³ Razão da Diferença: 1x10 ⁻⁶		θ_{MAX} ANSYS: 81.78 min θ_{MAX} MATLAB: - θ_{MED} ANSYS: 67.35 min θ_{MED} MATLAB: 83.83 min
Condições de Contorno			Elementos Finitos – Temperaturas no arrefecimento (t=6000 s)	
Gráfico – Critério de Isolamento (I)			Gráfico de Temperaturas na Secção da Laje	

FICHA TÉCNICA			
Modelo 19 – Confraplus 60 – 100 mm			
Modelo 19 – Dados Básicos (1/1)			
Tipo de Experimento	Título: Confraplus 60 (POL) / $h_1=100$ mm		
Estudo Paramétrico	Autor(es): Filho, M. M. A	Ano: 2020	
Detalhamento			
Chapa de Aço	Concreto	Barras de Aço	
Geometria: Trapezoidal	Densidade: Convencional	Varões	Grelha de Reforço
Espessura (mm): 1.25	Classe: C25/30	Descrição: Ø6//150	Descrição: 3Ø10
Classe do aço: S350	Umidade: 2.0%	Classe do aço: S500	Classe do aço: S500
Secção Transversal			
Secção Longitudinal			
Modelo de Elementos Finitos			

Modelo 19 – Teste térmico (I/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: 35 W/m ² K Sup. Ñ Exposta: 9 W/m ² K	Face não Exposta: 20°C Face Exposta: Paramétrica 1	Flange Superior: 0.73 Alma: 0.55 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: 10800 s Períodos de Gravação: 60 s Mínimo Incremento: 1 s Máximo Incremento: 120 s		Diferença: 1x10 ⁻³ Razão da Diferença: 1x10 ⁻⁶		θ_{MAX} ANSYS: - θ_{MAX} MATLAB: - θ_{MED} ANSYS: - θ_{MED} MATLAB: -
Condições de Contorno			Elementos Finitos – Temperaturas no arrefecimento (t=6000 s)	
Gráfico – Critério de Isolamento (I)			Gráfico de Temperaturas na Secção da Laje	

FICHA TÉCNICA			
Modelo 20 – Multideck 50 – 40 mm			
Modelo 20 – Dados Básicos (1/1)			
Tipo de Experimento	Título: Multideck 50 (UK) / $h_1=40$ mm		
Estudo Paramétrico	Autor(es): Filho, M. M. A.	Ano: 2020	
Detalhamento			
Chapa de Aço	Concreto	Barras de Aço	
Geometria: Reentrante	Densidade: Convencional	Varões	Grelha de Reforço
Espessura (mm): 1.00	Classe: C25/30	Descrição: Ø6//150	Descrição: 3Ø10
Classe do aço: S450	Umidade: 2.0%	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	Sup. Exposta: 35 W/m ² K	Face não Exposta: 20°C	Flange Superior: 0.14	Chapa de Aço: 0.7
Concreto: SOLID70	Sup. Ñ Exposta: 9 W/m ² K	Face Exposta: Paramétrica 2	Alma: 0.09	Concreto: 0.7
Barras de Aço: LINK33			Flange Inferior: 1.00	Barras de Aço: 0.7
Parâmetros de Convergência		Critérios de Convergência – Heat Flux		Resultados - Critério Isolamento (I)
Duração Total da Simulação: 14400 s		Diferença: 1x10 ⁻³		θ_{MAX} ANSYS: 36.30 min
Períodos de Gravação: 60 s		Razão da Diferença: 1x10 ⁻⁶		θ_{MAX} MATLAB: 46.40 min
Mínimo Incremento: 1 s				θ_{MED} ANSYS: 35.33 min
Máximo Incremento: 120 s				θ_{MED} MATLAB: 45.11 min
Condições de Contorno			Elementos Finitos – Temperaturas no arrefecimento (t=9000s)	
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): Filho, M. M. A.	Ano: 2020	
Detalhamento			
Chapa de Aço	Concreto	Barras de Aço	
Geometria: Reentrante	Densidade: Convencional	Varões	Grelha de Reforço
Espessura (mm): 1.00	Classe: C25/30	Descrição: $\varnothing 6//150$	Descrição: $3\varnothing 10$
Classe do aço: S450	Umidade: 2.0%	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: 35 W/m ² K Sup. Ñ Exposta: 9 W/m ² K	Face não Exposta: 20°C Face Exposta: Paramétrica 2	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: 14400 s Períodos de Gravação: 60 s Mínimo Incremento: 1 s Máximo Incremento: 120 s		Diferença: 1x10 ⁻³ Razão da Diferença: 1x10 ⁻⁶		θ_{MAX} ANSYS: 62.08 min θ_{MAX} MATLAB: 73.76 min θ_{MED} ANSYS: 56.55 min θ_{MED} MATLAB: 66.84 min
Condições de Contorno			Elementos Finitos – Temperaturas no arrefecimento (t=9000s)	
Gráfico – Critério de Isolamento (I)			Gráfico de Temperaturas na Secção da Laje	

FICHA TÉCNICA			
Modelo 22 – Multideck 50 – 80 mm			
Modelo 22 – Dados Básicos (1/1)			
Tipo de Experimento	Título: Multideck 50 (UK) / $h_1=80$ mm		
Estudo Paramétrico	Autor(es): Filho, M. M. A	Ano: 2020	
Detalhamento			
Chapa de Aço	Concreto	Barras de Aço	
Geometria: Reentrante	Densidade: Convencional	Varões	Grelha de Reforço
Espessura (mm): 1.00	Classe: C25/30	Descrição: Ø6//150	Descrição: 3Ø10
Classe do aço: S450	Umidade: 2.0%	Classe do aço: S500	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	Sup. Exposta: 35 W/m ² K	Face não Exposta: 20°C	Flange Superior: 0.14	Chapa de Aço: 0.7
Concreto: SOLID70	Sup. Ñ Exposta: 9 W/m ² K	Face Exposta: Paramétrica 2	Alma: 0.09	Concreto: 0.7
Barras de Aço: LINK33			Flange Inferior: 1.00	Barras de Aço: 0.7
Parâmetros de Convergência		Critérios de Convergência – Heat Flux		Resultados - Critério Isolamento (I)
Duração Total da Simulação: 14400 s		Diferença: 1x10 ⁻³		θ_{MAX} ANSYS: 97.21 min
Períodos de Gravação: 60 s		Razão da Diferença: 1x10 ⁻⁶		θ_{MAX} MATLAB: 113.22 min
Mínimo Incremento: 1 s				θ_{MED} ANSYS: 81.89 min
Máximo Incremento: 120 s				θ_{MED} MATLAB: 94.62 min
Condições de Contorno			Elementos Finitos – Temperaturas no arrefecimento (t=9000s)	
Gráfico – Critério de Isolamento (I)			Gráfico de Temperaturas na Secção da Laje	

FICHA TÉCNICA			
Modelo 23 – Multideck 50 – 100 mm			
Modelo 23 – Dados Básicos (1/1)			
Tipo de Experimento	Título: Multideck 50 (UK) / $h_1=100$ mm		
Estudo Paramétrico	Autor(es): Filho, M. M. A	Ano: 2020	
Detalhamento			
Chapa de Aço	Concreto	Barras de Aço	
Geometria: Reentrante	Densidade: Convencional	Varões	Grelha de Reforço
Espessura (mm): 1.00	Classe: C25/30	Descrição: Ø6//150	Descrição: 3Ø10
Classe do aço: S450	Umidade: 2.0%	Classe do aço: S500	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	Sup. Exposta: 35 W/m ² K	Face não Exposta: 20°C	Flange Superior: 0.14	Chapa de Aço: 0.7
Concreto: SOLID70	Sup. Ñ Exposta: 9 W/m ² K	Face Exposta: Paramétrica 2	Alma: 0.09	Concreto: 0.7
Barras de Aço: LINK33			Flange Inferior: 1.00	Barras de Aço: 0.7
Parâmetros de Convergência		Critérios de Convergência – Heat Flux		Resultados - Critério Isolamento (I)
Duração Total da Simulação: 14400 s		Diferença: 1x10 ⁻³		θ_{MAX} ANSYS: -
Períodos de Gravação: 60 s		Razão da Diferença: 1x10 ⁻⁶		θ_{MAX} MATLAB: -
Mínimo Incremento: 1 s				θ_{MED} ANSYS: 117.39 min
Máximo Incremento: 120 s				θ_{MED} MATLAB: 129.87 min
Condições de Contorno			Elementos Finitos – Temperaturas no arrefecimento (t=9000s)	
Gráfico – Critério de Isolamento (I)			Gráfico de Temperaturas na Seção da Laje	

FICHA TÉCNICA			
Modelo 24 – Bondeck – 40 mm			
Modelo 24 – Dados Básicos (1/1)			
Tipo de Experimento	Título: Bondeck (AUS) / $h_1=40$ mm		
Estudo Paramétrico	Autor(es): Filho, M. M. A	Ano: 2020	
Detalhamento			
Chapa de Aço	Concreto	Barras de Aço	
Geometria: Reentrante	Densidade: Convencional	Varões	Grelha de Reforço
Espessura (mm): 1.00	Classe: C25/30	Descrição: $\varnothing 6//150$	Descrição: $3\varnothing 10$
Classe do aço: S350	Umidade: 2.0%	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: 35 W/m ² K Sup. Ñ Exposta: 9 W/m ² K	Face não Exposta: 20°C Face Exposta: Paramétrica 2	Flange Superior: 0.12 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: 14400 s Períodos de Gravação: 60 s Mínimo Incremento: 1 s Máximo Incremento: 120 s		Diferença: 1x10 ⁻³ Razão da Diferença: 1x10 ⁻⁶		θ_{MAX} ANSYS: 38.96 min θ_{MAX} MATLAB: 51.50 min θ_{MED} ANSYS: 40.79 min θ_{MED} MATLAB: 52.50 min
Condições de Contorno			Elementos Finitos – Temperaturas no arrefecimento (t=9000 s)	
Gráfico – Critério de Isolamento (I)			Gráfico de Temperaturas na Secção da Laje	

FICHA TÉCNICA		
Modelo 25 – Bondeck – 60 mm		
Modelo 25 – Dados Básicos (1/1)		
Tipo de Experimento	Título: Bondeck (AUS) / $h_1=60$ mm	
Estudo Paramétrico	Autor(es): Filho, M. M. A	Ano: 2020
Detalhamento		
Chapa de Aço	Concreto	Barras de Aço
Geometria: Reentrante	Densidade: Convencional	Varões
Espessura (mm): 1.00	Classe: C25/30	Descrição: Ø6//150
Classe do aço: S350	Umidade: 2.0%	Classe do aço: S500
		Grelha de Reforço
		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: 35 W/m ² K Sup. Ñ Exposta: 9 W/m ² K	Face não Exposta: 20°C Face Exposta: Paramétrica 2	Flange Superior: 0.12 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: 14400 s Períodos de Gravação: 60 s Mínimo Incremento: 1 s Máximo Incremento: 120 s		Diferença: 1x10 ⁻³ Razão da Diferença: 1x10 ⁻⁶		θ_{MAX} ANSYS: 66.86 min θ_{MAX} MATLAB: 82.11 min θ_{MED} ANSYS: 62.91 min θ_{MED} MATLAB: 76.62 min
Condições de Contorno			Elementos Finitos – Temperaturas no arrefecimento (t=9000 s)	
Gráfico – Critério de Isolamento (I)			Gráfico de Temperaturas na Secção da Laje	

FICHA TÉCNICA			
Modelo 26 – Bondeck – 80 mm			
Modelo 26 – Dados Básicos (1/1)			
Tipo de Experimento	Título: Bondeck (AUS) / $h_1=80$ mm		
Estudo Paramétrico	Autor(es): Filho, M. M. A	Ano: 2020	
Detalhamento			
Chapa de Aço	Concreto	Barras de Aço	
Geometria: Reentrante	Densidade: Convencional	Varões	Grelha de Reforço
Espessura (mm): 1.00	Classe: C25/30	Descrição: Ø6//150	Descrição: 3Ø10
Classe do aço: S350	Umidade: 2.0%	Classe do aço: S500	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: 35 W/m ² K Sup. Ñ Exposta: 9 W/m ² K	Face não Exposta: 20°C Face Exposta: Paramétrica 2	Flange Superior: 0.12 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: 14400 s Períodos de Gravação: 60 s Mínimo Incremento: 1 s Máximo Incremento: 120 s		Diferença: 1x10 ⁻³ Razão da Diferença: 1x10 ⁻⁶		θ_{MAX} ANSYS: 110.64 min θ_{MAX} MATLAB: 134.85 min θ_{MED} ANSYS: 92.62 min θ_{MED} MATLAB: 108.46 min
Condições de Contorno			Elementos Finitos – Temperaturas no arrefecimento (t=9000 s)	
Gráfico – Critério de Isolamento (I)			Gráfico de Temperaturas na Secção da Laje	

FICHA TÉCNICA			
Modelo 27 – Bondeck – 100 mm			
Modelo 27 – Dados Básicos (1/1)			
Tipo de Experimento	Título: Bondeck (AUS) / $h_1=100$ mm		
Estudo Paramétrico	Autor(es): Filho, M. M. A	Ano: 2020	
Detalhamento			
Chapa de Aço	Concreto	Barras de Aço	
Geometria: Reentrante	Densidade: Convencional	Varões	Grelha de Reforço
Espessura (mm): 1.00	Classe: C25/30	Descrição: $\varnothing 6//150$	Descrição: $3\varnothing 10$
Classe do aço: S350	Umidade: 2.0%	Classe do aço: S500	Classe do aço: S500
Seção Transversal			
Seção 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: 35 W/m ² K Sup. Ñ Exposta: 9 W/m ² K	Face não Exposta: 20°C Face Exposta: Paramétrica 2	Flange Superior: 0.12 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: 14400 s Períodos de Gravação: 60 s Mínimo Incremento: 1 s Máximo Incremento: 120 s		Diferença: 1x10 ⁻³ Razão da Diferença: 1x10 ⁻⁶		θ_{MAX} ANSYS: - θ_{MAX} MATLAB: - θ_{MED} ANSYS: 136.04 min θ_{MED} MATLAB: 154.92 min
Condições de Contorno			Elementos Finitos – Temperaturas no arrefecimento (t=9000 s)	
Gráfico – Critério de Isolamento (I)			Gráfico de Temperaturas na Secção da Laje	

FICHA TÉCNICA			
Modelo 28 – Polideck 59S – 40 mm			
Modelo 28 – Dados Básicos (1/1)			
Tipo de Experimento	Título: Polideck 59S (BRA) / $h_1=40$ mm		
Estudo Paramétrico	Autor(es): Filho, M. M. A	Ano: 2020	
Detalhamento			
Chapa de Aço	Concreto	Barras de Aço	
Geometria: Trapezoidal	Densidade: Convencional	Varões	Grelha de Reforço
Espessura (mm): 1.25	Classe: C25/30	Descrição: Ø6//150	Descrição: 3Ø10
Classe do aço: S275	Umidade: 2.0%	Classe do aço: S500	Classe do aço: S500
Secção Transversal			
Secção Longitudinal			
Modelo de Elementos Finitos			

Modelo 28 – Teste térmico (I/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: 35 W/m ² K Sup. Ñ Exposta: 9 W/m ² K	Face não Exposta: 20°C Face Exposta: Paramétrica 2	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: 14400 s Períodos de Gravação: 60 s Mínimo Incremento: 1 s Máximo Incremento: 120 s		Diferença: 1x10 ⁻³ Razão da Diferença: 1x10 ⁻⁶		θ_{MAX} ANSYS: 23.02 min θ_{MAX} MATLAB: 30.81 min θ_{MED} ANSYS: 26.15 min θ_{MED} MATLAB: 33.55 min
Condições de Contorno			Elementos Finitos – Temperaturas no arrefecimento (t=9000 s)	
Gráfico – Critério de Isolamento (I)			Gráfico de Temperaturas na Secção da Laje	

FICHA TÉCNICA		
Modelo 29 – Polideck 59S – 60 mm		
Modelo 29 – Dados Básicos (1/1)		
Tipo de Experimento	Título: Polideck 59S (BRA) / $h_1=60$ mm	
Estudo Paramétrico	Autor(es): Filho, M. M. A	Ano: 2020
Detalhamento		
Chapa de Aço	Concreto	Barras de Aço
Geometria: Trapezoidal	Densidade: Convencional	Varões
Espessura (mm): 1.25	Classe: C25/30	Descrição: $\varnothing 6//150$
Classe do aço: S275	Umidade: 2.0%	Classe do aço: S500
		Grelha de Reforço
		Descrição: 3 $\varnothing 10$
		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: 35 W/m ² K Sup. Ñ Exposta: 9 W/m ² K	Face não Exposta: 20°C Face Exposta: Paramétrica 2	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: 14400 s Períodos de Gravação: 60 s Mínimo Incremento: 1 s Máximo Incremento: 120 s		Diferença: 1x10 ⁻³ Razão da Diferença: 1x10 ⁻⁶		θ_{MAX} ANSYS: 42.83 min θ_{MAX} MATLAB: 53.63 min θ_{MED} ANSYS: 43.93 min θ_{MED} MATLAB: 53.93 min
Condições de Contorno			Elementos Finitos – Temperaturas no arrefecimento (t=9000 s)	
Gráfico – Critério de Isolamento (I)			Gráfico de Temperaturas na Secção da Laje	

FICHA TÉCNICA		
Modelo 30 – Polideck 59S – 80 mm		
Modelo 30 – Dados Básicos (1/1)		
Tipo de Experimento	Título: Polideck 59S (BRA) / $h_1=80$ mm	
Estudo Paramétrico	Autor(es): Filho, M. M. A	Ano: 2020
Detalhamento		
Chapa de Aço	Concreto	Barras de Aço
Geometria: Trapezoidal	Densidade: Convencional	Varões
Espessura (mm): 1.25	Classe: C25/30	Descrição: Ø6//150
Classe do aço: S275	Umidade: 2.0%	Classe do aço: S500
		Grelha de Reforço
		Descrição: 3Ø10
		Classe do aço: S500
Secção Transversal		
Secção Longitudinal		
Modelo de Elementos Finitos		

Modelo 30 – Teste térmico (I/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: 35 W/m ² K Sup. Ñ Exposta: 9 W/m ² K	Face não Exposta: 20°C Face Exposta: Paramétrica 2	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: 14400 s Períodos de Gravação: 60 s Mínimo Incremento: 1 s Máximo Incremento: 120 s		Diferença: 1x10 ⁻³ Razão da Diferença: 1x10 ⁻⁶		θ_{MAX} ANSYS: 71.40 min θ_{MAX} MATLAB: 85.26 min θ_{MED} ANSYS: 66.72 min θ_{MED} MATLAB: 78.53 min
Condições de Contorno			Elementos Finitos – Temperaturas no arrefecimento (t=9000 s)	
Gráfico – Critério de Isolamento (I)			Gráfico de Temperaturas na Secção da Laje	

FICHA TÉCNICA		
Modelo 31 – Polideck 59S – 100 mm		
Modelo 31 – Dados Básicos (1/1)		
Tipo de Experimento	Título: Polideck 59S (BRA) / $h_1=100$ mm	
Estudo Paramétrico	Autor(es): Filho, M. M. A	Ano: 2020
Detalhamento		
Chapa de Aço	Concreto	Barras de Aço
Geometria: Trapezoidal	Densidade: Convencional	Varões
Espessura (mm): 1.25	Classe: C25/30	Descrição: Ø6//150
Classe do aço: S275	Umidade: 2.0%	Classe do aço: S500
		Grelha de Reforço
		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	Sup. Exposta: 35 W/m ² K	Face não Exposta: 20°C	Flange Superior: 0.78	Chapa de Aço: 0.7
Concreto: SOLID70	Sup. Ñ Exposta: 9 W/m ² K	Face Exposta: Paramétrica 2	Alma: 0.67	Concreto: 0.7
Barras de Aço: LINK33			Flange Inferior: 1.00	Barras de Aço: 0.7
Parâmetros de Convergência		Critérios de Convergência – Heat Flux		Resultados - Critério Isolamento (I)
Duração Total da Simulação: 14400 s		Diferença: 1x10 ⁻³		θ_{MAX} ANSYS: 114.77 min
Períodos de Gravação: 60 s		Razão da Diferença: 1x10 ⁻⁶		θ_{MAX} MATLAB: 141.33 min
Mínimo Incremento: 1 s				θ_{MED} ANSYS: 85.80 min
Máximo Incremento: 120 s				θ_{MED} MATLAB: 110.76 min
Condições de Contorno			Elementos Finitos – Temperaturas no arrefecimento (t=9000 s)	
Gráfico – Critério de Isolamento (I)			Gráfico de Temperaturas na Secção da Laje	

FICHA TÉCNICA		
Modelo 32 – Confraplus 60 – 40 mm		
Modelo 32 – Dados Básicos (1/1)		
Tipo de Experimento	Título: Confraplus 60 (POL) / $h_1=40$ mm	
Estudo Paramétrico	Autor(es): Filho, M. M. A	Ano: 2020
Detalhamento		
Chapa de Aço	Concreto	Barras de Aço
Geometria: Trapezoidal	Densidade: Convencional	Varões
Espessura (mm): 1.25	Classe: C25/30	Descrição: Ø6//150
Classe do aço: S350	Umidade: 2.0%	Classe do aço: S500
		Grelha de Reforço
		Descrição: 3Ø10
		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: 35 W/m ² K Sup. Ñ Exposta: 9 W/m ² K	Face não Exposta: 20°C Face Exposta: Paramétrica 2	Flange Superior: 0.73 Alma: 0.55 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: 14400 s Períodos de Gravação: 60 s Mínimo Incremento: 1 s Máximo Incremento: 120 s		Diferença: 1x10 ⁻³ Razão da Diferença: 1x10 ⁻⁶		θ_{MAX} ANSYS: 22.52 min θ_{MAX} MATLAB: 29.77 min θ_{MED} ANSYS: 24.14 min θ_{MED} MATLAB: 31.58 min
Condições de Contorno			Elementos Finitos – Temperaturas no arrefecimento (t=9000 s)	
<p>$\alpha_c = 9 \text{ W/m}^2\text{K}$ $\theta = 20^\circ\text{C}$ $\alpha_c = 35 \text{ W/m}^2\text{K}$ $\theta = \text{Paramétrica 2}$ $\Phi_{f,sup}$ $\Phi_{f,inf}$ Φ_{alma}</p>			<p>197.225 217.825 238.425 259.025 279.625 300.225 320.825 341.425 362.025 382.624</p>	
Gráfico – Critério de Isolamento (I)			Gráfico de Temperaturas na Secção da Laje	
<p>$\theta_{max} = \theta_0 + 180^\circ\text{C}$ $\theta = \theta_0 + 140^\circ\text{C}$ Instante final do aquecimento e início do arrefecimento</p>			<p>Instante final do aquecimento e início do arrefecimento</p>	

FICHA TÉCNICA		
Modelo 33 – Confraplus 60 – 60 mm		
Modelo 33 – Dados Básicos (1/1)		
Tipo de Experimento	Título: Confraplus 60 (POL) / $h_1=60$ mm	
Estudo Paramétrico	Autor(es): Filho, M. M. A	Ano: 2020
Detalhamento		
Chapa de Aço	Concreto	Barras de Aço
Geometria: Trapezoidal	Densidade: Convencional	Varões
Espessura (mm): 1.25	Classe: C25/30	Descrição: Ø6//150
Classe do aço: S350	Umidade: 2.0%	Classe do aço: S500
		Grelha de Reforço
		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	Sup. Exposta: 35 W/m ² K	Face não Exposta: 20°C	Flange Superior: 0.73	Chapa de Aço: 0.7
Concreto: SOLID70	Sup. Ñ Exposta: 9 W/m ² K	Face Exposta: Paramétrica 2	Alma: 0.55	Concreto: 0.7
Barras de Aço: LINK33			Flange Inferior: 1.00	Barras de Aço: 0.7
Parâmetros de Convergência		Critérios de Convergência – Heat Flux		Resultados - Critério Isolamento (I)
Duração Total da Simulação: 14400 s		Diferença: 1x10 ⁻³		θ_{MAX} ANSYS: 41.51 min
Períodos de Gravação: 60 s		Razão da Diferença: 1x10 ⁻⁶		θ_{MAX} MATLAB: 51.99 min
Mínimo Incremento: 1 s				θ_{MED} ANSYS: 41.39 min
Máximo Incremento: 120 s				θ_{MED} MATLAB: 51.07 min
Condições de Contorno			Elementos Finitos – Temperaturas no arrefecimento (t=9000 s)	
Gráfico – Critério de Isolamento (I)			Gráfico de Temperaturas na Secção da Laje	

FICHA TÉCNICA			
Modelo 34 – Confraplus 60 – 80 mm			
Modelo 34 – Dados Básicos (1/1)			
Tipo de Experimento	Título: Confraplus 60 (POL) / $h_1=80$ mm		
Estudo Paramétrico	Autor(es): Filho, M. M. A	Ano: 2020	
Detalhamento			
Chapa de Aço	Concreto	Barras de Aço	
Geometria: Trapezoidal	Densidade: Convencional	Varões	Grelha de Reforço
Espessura (mm): 1.25	Classe: C25/30	Descrição: Ø6//150	Descrição: 3Ø10
Classe do aço: S350	Umidade: 2.0%	Classe do aço: S500	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: 35 W/m ² K Sup. Ñ Exposta: 9 W/m ² K	Face não Exposta: 20°C Face Exposta: Paramétrica 2	Flange Superior: 0.73 Alma: 0.55 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: 14400 s Períodos de Gravação: 60 s Mínimo Incremento: 1 s Máximo Incremento: 120 s		Diferença: 1x10 ⁻³ Razão da Diferença: 1x10 ⁻⁶		θ_{MAX} ANSYS: 68.23 min θ_{MAX} MATLAB: 81.57 min θ_{MED} ANSYS: 63.45 min θ_{MED} MATLAB: 74.87 min
Condições de Contorno			Elementos Finitos – Temperaturas no arrefecimento (t=9000 s)	
Gráfico – Critério de Isolamento (I)			Gráfico de Temperaturas na Secção da Laje	

FICHA TÉCNICA			
Modelo 35 – Confraplus 60 – 100 mm			
Modelo 35 – Dados Básicos (1/1)			
Tipo de Experimento	Título: Confraplus 60 (POL) / $h_1=100$ mm		
Estudo Paramétrico	Autor(es): Filho, M. M. A	Ano: 2020	
Detalhamento			
Chapa de Aço	Concreto	Barras de Aço	
Geometria: Trapezoidal	Densidade: Convencional	Varões	Grelha de Reforço
Espessura (mm): 1.25	Classe: C25/30	Descrição: Ø6//150	Descrição: 3Ø10
Classe do aço: S350	Umidade: 2.0%	Classe do aço: S500	Classe do aço: S500
Secção Transversal			
Secção Longitudinal			
Modelo de Elementos Finitos			

Modelo 35 – 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: 35 W/m ² K Sup. Ñ Exposta: 9 W/m ² K	Face não Exposta: 20°C Face Exposta: Paramétrica 2	Flange Superior: 0.73 Alma: 0.55 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: 14400 s Períodos de Gravação: 60 s Mínimo Incremento: 1 s Máximo Incremento: 120 s		Diferença: 1x10 ⁻³ Razão da Diferença: 1x10 ⁻⁶		θ_{MAX} ANSYS: 108.68 min θ_{MAX} MATLAB: 128.69 min θ_{MED} ANSYS: 90.77 min θ_{MED} MATLAB: 105.19 min
Condições de Contorno			Elementos Finitos – Temperaturas no arrefecimento (t=9000 s)	
Gráfico – Critério de Isolamento (I)			Gráfico de Temperaturas na Seção da Laje	

FICHA TÉCNICA		
Modelo 36 – Multideck 50 – 40 mm		
Modelo 36 – Dados Básicos (1/1)		
Tipo de Experimento	Título: Multideck 50 (UK) / $h_1=40$ mm	
Estudo Paramétrico	Autor(es): Filho, M. M. A.	Ano: 2020
Detalhamento		
Chapa de Aço	Concreto	Barras de Aço
Geometria: Reentrante	Densidade: Convencional	Varões
Espessura (mm): 1.00	Classe: C25/30	Descrição: Ø6//150
Classe do aço: S450	Umidade: 2.0%	Classe do aço: S500
		Grelha de Reforço
		Descrição: 3Ø10
		Classe do aço: S500
Secção Transversal		
Secção Longitudinal		
Modelo de Elementos Finitos		

Modelo 36 – 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: 35 W/m ² K Sup. Ñ Exposta: 9 W/m ² K	Face não Exposta: 20°C Face Exposta: Paramétrica 3	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: 19800 s Períodos de Gravação: 60 s Mínimo Incremento: 1 s Máximo Incremento: 120 s		Diferença: 1x10 ⁻³ Razão da Diferença: 1x10 ⁻⁶		θ_{MAX} ANSYS: 35.72 min θ_{MAX} MATLAB: 46.40 min θ_{MED} ANSYS: 35.63 min θ_{MED} MATLAB: 45.12 min
Condições de Contorno			Elementos Finitos – Temperaturas no arrefecimento (t=15000s)	
Gráfico – Critério de Isolamento (I)			Gráfico de Temperaturas na Seção da Laje	

FICHA TÉCNICA			
Modelo 37 – Multideck 50 – 60 mm			
Modelo 37 – Dados Básicos (1/1)			
Tipo de Experimento	Título: Multideck 50 (UK) / $h_1=60$ mm		
Estudo Paramétrico	Autor(es): Filho, M. M. A.	Ano: 2020	
Detalhamento			
Chapa de Aço	Concreto	Barras de Aço	
Geometria: Reentrante	Densidade: Convencional	Varões	Grelha de Reforço
Espessura (mm): 1.00	Classe: C25/30	Descrição: Ø6//150	Descrição: 3Ø10
Classe do aço: S450	Umidade: 2.0%	Classe do aço: S500	Classe do aço: S500
Secção Transversal			
Secção Longitudinal			
Modelo de Elementos Finitos			

Modelo 37 – 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: 35 W/m ² K Sup. Ñ Exposta: 9 W/m ² K	Face não Exposta: 20°C Face Exposta: Paramétrica 3	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: 19800 s Períodos de Gravação: 60 s Mínimo Incremento: 1 s Máximo Incremento: 120 s		Diferença: 1x10 ⁻³ Razão da Diferença: 1x10 ⁻⁶		θ_{MAX} ANSYS: 61.59 min θ_{MAX} MATLAB: 73.09 min θ_{MED} ANSYS: 55.83 min θ_{MED} MATLAB: 66.77 min
Condições de Contorno			Elementos Finitos – Temperaturas no arrefecimento (t=15000s)	
Gráfico – Critério de Isolamento (I)			Gráfico de Temperaturas na Secção da Laje	

FICHA TÉCNICA			
Modelo 38 – Multideck 50 – 80 mm			
Modelo 38 – Dados Básicos (1/1)			
Tipo de Experimento	Título: Multideck 50 (UK) / $h_1=80$ mm		
Estudo Paramétrico	Autor(es): Filho, M. M. A	Ano: 2020	
Detalhamento			
Chapa de Aço	Concreto	Barras de Aço	
Geometria: Reentrante	Densidade: Convencional	Varões	Grelha de Reforço
Espessura (mm): 1.00	Classe: C25/30	Descrição: Ø6//150	Descrição: 3Ø10
Classe do aço: S450	Umidade: 2.0%	Classe do aço: S500	Classe do aço: S500
Secção Transversal			
Secção Longitudinal			
Modelo de Elementos Finitos			

Modelo 38 – Teste térmico (1/1)				
Elementos ANSYS	Coef. de Convecção (α_c)	Curvas de Temperatura	Fator de Vista (Φ)	Emissividade (ϵ)
Chapa de Aço: SHELL131	Sup. Exposta: 35 W/m ² K	Face não Exposta: 20°C	Flange Superior: 0.14	Chapa de Aço: 0.7
Concreto: SOLID70	Sup. Ñ Exposta: 9 W/m ² K	Face Exposta: Paramétrica 3	Alma: 0.09	Concreto: 0.7
Barras de Aço: LINK33			Flange Inferior: 1.00	Barras de Aço: 0.7
Parâmetros de Convergência		Critérios de Convergência – Heat Flux		Resultados - Critério Isolamento (I)
Duração Total da Simulação: 19800 s		Diferença: 1x10 ⁻³		θ_{MAX} ANSYS: 92.85 min
Períodos de Gravação: 60 s		Razão da Diferença: 1x10 ⁻⁶		θ_{MAX} MATLAB: 105.57 min
Mínimo Incremento: 1 s				θ_{MED} ANSYS: 80.97 min
Máximo Incremento: 120 s				θ_{MED} MATLAB: 93.37 min
Condições de Contorno			Elementos Finitos – Temperaturas no arrefecimento (t=15000s)	
Gráfico – Critério de Isolamento (I)			Gráfico de Temperaturas na Seção da Laje	

FICHA TÉCNICA			
Modelo 39 – Multideck 50 – 100 mm			
Modelo 39 – Dados Básicos (1/1)			
Tipo de Experimento	Título: Multideck 50 (UK) / $h_1=100$ mm		
Estudo Paramétrico	Autor(es): Filho, M. M. A	Ano: 2020	
Detalhamento			
Chapa de Aço	Concreto	Barras de Aço	
Geometria: Reentrante	Densidade: Convencional	Varões	Grelha de Reforço
Espessura (mm): 1.00	Classe: C25/30	Descrição: Ø6//150	Descrição: 3Ø10
Classe do aço: S450	Umidade: 2.0%	Classe do aço: S500	Classe do aço: S500
Secção Transversal			
Secção Longitudinal			
Modelo de Elementos Finitos			

Modelo 39 – Teste térmico (1/1)				
Elementos ANSYS	Coef. de Convecção (α_c)	Curvas de Temperatura	Fator de Vista (Φ)	Emissividade (ϵ)
Chapa de Aço: SHELL131	Sup. Exposta: 35 W/m ² K	Face não Exposta: 20°C	Flange Superior: 0.14	Chapa de Aço: 0.7
Concreto: SOLID70	Sup. Ñ Exposta: 9 W/m ² K	Face Exposta: Paramétrica 3	Alma: 0.09	Concreto: 0.7
Barras de Aço: LINK33			Flange Inferior: 1.00	Barras de Aço: 0.7
Parâmetros de Convergência		Critérios de Convergência – Heat Flux		Resultados - Critério Isolamento (I)
Duração Total da Simulação: 19800 s		Diferença: 1x10 ⁻³		θ_{MAX} ANSYS: 131.42 min
Períodos de Gravação: 60 s		Razão da Diferença: 1x10 ⁻⁶		θ_{MAX} MATLAB: 140.89 min
Mínimo Incremento: 1 s				θ_{MED} ANSYS: 111.11 min
Máximo Incremento: 120 s				θ_{MED} MATLAB: 123.42 min
Condições de Contorno			Elementos Finitos – Temperaturas no arrefecimento (t=15000s)	
Gráfico – Critério de Isolamento (I)			Gráfico de Temperaturas na Seção da Laje	

FICHA TÉCNICA			
Modelo 40 – Bondeck – 40 mm			
Modelo 40 – Dados Básicos (1/1)			
Tipo de Experimento	Título: Bondeck (AUS) / $h_1=40$ mm		
Estudo Paramétrico	Autor(es): Filho, M. M. A	Ano: 2020	
Detalhamento			
Chapa de Aço	Concreto	Barras de Aço	
Geometria: Reentrante	Densidade: Convencional	Varões	Grelha de Reforço
Espessura (mm): 1.00	Classe: C25/30	Descrição: $\varnothing 6//150$	Descrição: 3 $\varnothing 10$
Classe do aço: S350	Umidade: 2.0%	Classe do aço: S500	Classe do aço: S500
Secção Transversal			
Secção Longitudinal			
Modelo de Elementos Finitos			

Modelo 40 – Teste térmico (1/1)				
Elementos ANSYS	Coef. de Convecção (α_c)	Curvas de Temperatura	Fator de Vista (Φ)	Emissividade (ϵ)
Chapa de Aço: SHELL131	Sup. Exposta: 35 W/m ² K	Face não Exposta: 20°C	Flange Superior: 0.12	Chapa de Aço: 0.7
Concreto: SOLID70	Sup. Ñ Exposta: 9 W/m ² K	Face Exposta: Paramétrica 3	Alma: 0.09	Concreto: 0.7
Barras de Aço: LINK33			Flange Inferior: 1.00	Barras de Aço: 0.7
Parâmetros de Convergência		Critérios de Convergência – Heat Flux		Resultados - Critério Isolamento (I)
Duração Total da Simulação: 19800 s		Diferença: 1x10 ⁻³		θ_{MAX} ANSYS: 38.86 min
Períodos de Gravação: 60 s		Razão da Diferença: 1x10 ⁻⁶		θ_{MAX} MATLAB: 51.24 min
Mínimo Incremento: 1 s				θ_{MED} ANSYS: 40.25 min
Máximo Incremento: 120 s				θ_{MED} MATLAB: 52.47 min
Condições de Contorno			Elementos Finitos – Temperaturas no arrefecimento (t=15000 s)	
Gráfico – Critério de Isolamento (I)			Gráfico de Temperaturas na Seção da Laje	

FICHA TÉCNICA		
Modelo 41 – Bondeck – 60 mm		
Modelo 41 – Dados Básicos (1/1)		
Tipo de Experimento	Título: Bondeck (AUS) / $h_1=60$ mm	
Estudo Paramétrico	Autor(es): Filho, M. M. A	Ano: 2020
Detalhamento		
Chapa de Aço	Concreto	Barras de Aço
Geometria: Reentrante	Densidade: Convencional	Varões
Espessura (mm): 1.00	Classe: C25/30	Descrição: Ø6//150
Classe do aço: S350	Umidade: 2.0%	Classe do aço: S500
		Grelha de Reforço
		Descrição: 3Ø10
		Classe do aço: S500
Secção Transversal		
Secção Longitudinal		
Modelo de Elementos Finitos		

Modelo 41 – Teste térmico (I/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: 35 W/m ² K Sup. Ñ Exposta: 9 W/m ² K	Face não Exposta: 20°C Face Exposta: Paramétrica 3	Flange Superior: 0.12 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: 19800 s Períodos de Gravação: 60 s Mínimo Incremento: 1 s Máximo Incremento: 120 s		Diferença: 1x10 ⁻³ Razão da Diferença: 1x10 ⁻⁶		θ_{MAX} ANSYS: 66.97 min θ_{MAX} MATLAB: 80.16 min θ_{MED} ANSYS: 62.96 min θ_{MED} MATLAB: 76.20 min
Condições de Contorno			Elementos Finitos – Temperaturas no arrefecimento (t=15000 s)	
Gráfico – Critério de Isolamento (I)			Gráfico de Temperaturas na Secção da Laje	

FICHA TÉCNICA			
Modelo 42 – Bondeck – 80 mm			
Modelo 42 – Dados Básicos (1/1)			
Tipo de Experimento	Título: Bondeck (AUS) / $h_1=80$ mm		
Estudo Paramétrico	Autor(es): Filho, M. M. A	Ano: 2020	
Detalhamento			
Chapa de Aço	Concreto	Barras de Aço	
Geometria: Reentrante	Densidade: Convencional	Varões	Grelha de Reforço
Espessura (mm): 1.00	Classe: C25/30	Descrição: Ø6//150	Descrição: 3Ø10
Classe do aço: S350	Umidade: 2.0%	Classe do aço: S500	Classe do aço: S500
Seção Transversal			
Seção Longitudinal			
Modelo de Elementos Finitos			

Modelo 42 – 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: 35 W/m ² K Sup. Ñ Exposta: 9 W/m ² K	Face não Exposta: 20°C Face Exposta: Paramétrica 3	Flange Superior: 0.12 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: 19800 s Períodos de Gravação: 60 s Mínimo Incremento: 1 s Máximo Incremento: 120 s		Diferença: 1x10 ⁻³ Razão da Diferença: 1x10 ⁻⁶		θ_{MAX} ANSYS: 101.17 min θ_{MAX} MATLAB: 116.25 min θ_{MED} ANSYS: 90.59 min θ_{MED} MATLAB: 105.16 min
Condições de Contorno			Elementos Finitos – Temperaturas no arrefecimento (t=15000 s)	
Gráfico – Critério de Isolamento (I)			Gráfico de Temperaturas na Seção da Laje	

FICHA TÉCNICA		
Modelo 43 – Bondeck – 100 mm		
Modelo 43 – Dados Básicos (1/1)		
Tipo de Experimento	Título: Bondeck (AUS) / $h_1=100$ mm	
Estudo Paramétrico	Autor(es): Filho, M. M. A	Ano: 2020
Detalhamento		
Chapa de Aço	Concreto	Barras de Aço
Geometria: Reentrante	Densidade: Convencional	Varões
Espessura (mm): 1.00	Classe: C25/30	Descrição: $\varnothing 6//150$
Classe do aço: S350	Umidade: 2.0%	Classe do aço: S500
		Grelha de Reforço
		Descrição: $3\varnothing 10$
		Classe do aço: S500
Seção Transversal		
Seção Longitudinal		
Modelo de Elementos Finitos		

Modelo 43 – 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: 35 W/m ² K Sup. Ñ Exposta: 9 W/m ² K	Face não Exposta: 20°C Face Exposta: Paramétrica 3	Flange Superior: 0.12 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: 19800 s Períodos de Gravação: 60 s Mínimo Incremento: 1 s Máximo Incremento: 120 s		Diferença: 1x10 ⁻³ Razão da Diferença: 1x10 ⁻⁶		θ_{MAX} ANSYS: 142.57 min θ_{MAX} MATLAB: 157.79 min θ_{MED} ANSYS: 124.69 min θ_{MED} MATLAB: 138.72 min
Condições de Contorno			Elementos Finitos – Temperaturas no arrefecimento (t=15000 s)	
Gráfico – Critério de Isolamento (I)			Gráfico de Temperaturas na Secção da Laje	

FICHA TÉCNICA			
Modelo 44 – Polideck 59S – 40 mm			
Modelo 44 – Dados Básicos (1/1)			
Tipo de Experimento	Título: Polideck 59S (BRA) / $h_1=40$ mm		
Estudo Paramétrico	Autor(es): Filho, M. M. A	Ano: 2020	
Detalhamento			
Chapa de Aço	Concreto	Barras de Aço	
Geometria: Trapezoidal	Densidade: Convencional	Varões	Grelha de Reforço
Espessura (mm): 1.25	Classe: C25/30	Descrição: $\varnothing 6//150$	Descrição: $3\varnothing 10$
Classe do aço: S275	Umidade: 2.0%	Classe do aço: S500	Classe do aço: S500
Secção Transversal			
Secção Longitudinal			
Modelo de Elementos Finitos			

Modelo 44 – 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: 35 W/m ² K Sup. Ñ Exposta: 9 W/m ² K	Face não Exposta: 20°C Face Exposta: Paramétrica 3	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: 19800 s Períodos de Gravação: 60 s Mínimo Incremento: 1 s Máximo Incremento: 120 s		Diferença: 1x10 ⁻³ Razão da Diferença: 1x10 ⁻⁶		θ_{MAX} ANSYS: 23.02 min θ_{MAX} MATLAB: 30.81 min θ_{MED} ANSYS: 25.57 min θ_{MED} MATLAB: 33.56 min
Condições de Contorno			Elementos Finitos – Temperaturas no arrefecimento (t=15000 s)	
<p>$\alpha_c = 9 \text{ W/m}^2\text{K}$ $\theta = 20^\circ\text{C}$ $\alpha_c = 35 \text{ W/m}^2\text{K}$ $\Phi_{f, \text{sup}}$ $\Phi_{f, \text{inf}}$ $\theta = \text{Paramétrica 3}$ Φ_{alma}</p>			<p>251.174 268.714 286.255 303.795 321.336 338.876 356.417 373.957 391.498 409.038</p>	
Gráfico – Critério de Isolamento (I)			Gráfico de Temperaturas na Secção da Laje	
<p>$\theta_{max} = \bar{\theta}_0 + 180^\circ\text{C}$ $\bar{\theta} = \bar{\theta}_0 + 140^\circ\text{C}$</p>				

Modelo 45 – 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: 35 W/m ² K Sup. Ñ Exposta: 9 W/m ² K	Face não Exposta: 20°C Face Exposta: Paramétrica 3	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: 19800 s Períodos de Gravação: 60 s Mínimo Incremento: 1 s Máximo Incremento: 120 s		Diferença: 1x10 ⁻³ Razão da Diferença: 1x10 ⁻⁶		θ_{MAX} ANSYS: 42.83 min θ_{MAX} MATLAB: 53.66 min θ_{MED} ANSYS: 43.60 min θ_{MED} MATLAB: 53.90 min
Condições de Contorno			Elementos Finitos – Temperaturas no arrefecimento (t=15000 s)	
<p>$\alpha_c = 9 \text{ W/m}^2\text{K}$ $\theta = 20^\circ\text{C}$ $\alpha_c = 35 \text{ W/m}^2\text{K}$ $\Phi_{f,sup}$ $\Phi_{f,inf}$ $\theta = \text{Paramétrica 3}$ Φ_{alma}</p>			<p>253.978 273.288 292.597 311.907 331.216 350.526 369.835 389.144 408.454 427.763</p>	
Gráfico – Critério de Isolamento (I)			Gráfico de Temperaturas na Secção da Laje	
<p>$\theta_{max} = \bar{\theta}_0 + 180^\circ\text{C}$ $\bar{\theta} = \bar{\theta}_0 + 140^\circ\text{C}$</p>				

FICHA TÉCNICA		
Modelo 46 – Polideck 59S – 80 mm		
Modelo 46 – Dados Básicos (1/1)		
Tipo de Experimento	Título: Polideck 59S (BRA) / $h_1=80$ mm	
Estudo Paramétrico	Autor(es): Filho, M. M. A	Ano: 2020
Detalhamento		
Chapa de Aço	Concreto	Barras de Aço
Geometria: Trapezoidal	Densidade: Convencional	Varões
Espessura (mm): 1.25	Classe: C25/30	Descrição: $\varnothing 6//150$
Classe do aço: S275	Umidade: 2.0%	Classe do aço: S500
		Grelha de Reforço
		Descrição: $3\varnothing 10$
		Classe do aço: S500
Secção Transversal		
Secção Longitudinal		
Modelo de Elementos Finitos		

Modelo 46 – Teste térmico (I/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: 35 W/m ² K Sup. Ñ Exposta: 9 W/m ² K	Face não Exposta: 20°C Face Exposta: Paramétrica 3	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: 19800 s Períodos de Gravação: 60 s Mínimo Incremento: 1 s Máximo Incremento: 120 s		Diferença: 1x10 ⁻³ Razão da Diferença: 1x10 ⁻⁶		θ_{MAX} ANSYS: 70.94 min θ_{MAX} MATLAB: 83.77 min θ_{MED} ANSYS: 66.43 min θ_{MED} MATLAB: 78.46 min
Condições de Contorno			Elementos Finitos – Temperaturas no arrefecimento (t=15000 s)	
Gráfico – Critério de Isolamento (I)			Gráfico de Temperaturas na Secção da Laje	

FICHA TÉCNICA		
Modelo 47 – Polideck 59S – 100 mm		
Modelo 47 – Dados Básicos (1/1)		
Tipo de Experimento	Título: Polideck 59S (BRA) / $h_1=100$ mm	
Estudo Paramétrico	Autor(es): Filho, M. M. A	Ano: 2020
Detalhamento		
Chapa de Aço	Concreto	Barras de Aço
Geometria: Trapezoidal	Densidade: Convencional	Varões
Espessura (mm): 1.25	Classe: C25/30	Descrição: Ø6//150
Classe do aço: S275	Umidade: 2.0%	Classe do aço: S500
		Grelha de Reforço
		Descrição: 3Ø10
		Classe do aço: S500
Secção Transversal		
Secção Longitudinal		
Modelo de Elementos Finitos		

Modelo 47 – Teste térmico (I/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: 35 W/m ² K Sup. Ñ Exposta: 9 W/m ² K	Face não Exposta: 20°C Face Exposta: Paramétrica 3	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: 19800 s Períodos de Gravação: 60 s θ Mínimo Incremento: 1 s Máximo Incremento: 120 s		Diferença: 1x10 ⁻³ Razão da Diferença: 1x10 ⁻⁶		θ_{MAX} ANSYS: 105.10 min θ_{MAX} MATLAB: 120.32 min θ_{MED} ANSYS: 93.31 min θ_{MED} MATLAB: 108.11 min
Condições de Contorno			Elementos Finitos – Temperaturas no arrefecimento (t=15000 s)	
Gráfico – Critério de Isolamento (I)			Gráfico de Temperaturas na Secção da Laje	

FICHA TÉCNICA			
Modelo 48 – Confraplus 60 – 40 mm			
Modelo 48 – Dados Básicos (1/1)			
Tipo de Experimento	Título: Confraplus 60 (POL) / $h_1=40$ mm		
Estudo Paramétrico	Autor(es): Filho, M. M. A	Ano: 2020	
Detalhamento			
Chapa de Aço	Concreto	Barras de Aço	
Geometria: Trapezoidal	Densidade: Convencional	Varões	Grelha de Reforço
Espessura (mm): 1.25	Classe: C25/30	Descrição: Ø6//150	Descrição: 3Ø10
Classe do aço: S350	Umidade: 2.0%	Classe do aço: S500	Classe do aço: S500
Secção Transversal			
Secção Longitudinal			
Modelo de Elementos Finitos			

Modelo 48 – 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: 35 W/m ² K Sup. Ñ Exposta: 9 W/m ² K	Face não Exposta: 20°C Face Exposta: Paramétrica 3	Flange Superior: 0.73 Alma: 0.55 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: 19800 s Períodos de Gravação: 60 s Mínimo Incremento: 1 s Máximo Incremento: 120 s		Diferença: 1x10 ⁻³ Razão da Diferença: 1x10 ⁻⁶		θ_{MAX} ANSYS: 22.51 min θ_{MAX} MATLAB: 29.77 min θ_{MED} ANSYS: 23.99 min θ_{MED} MATLAB: 31.58 min
Condições de Contorno			Elementos Finitos – Temperaturas no arrefecimento (t=15000 s)	
Gráfico – Critério de Isolamento (I)			Gráfico de Temperaturas na Secção da Laje	

FICHA TÉCNICA			
Modelo 49 – Confraplus 60 – 60 mm			
Modelo 49 – Dados Básicos (1/1)			
Tipo de Experimento	Título: Confraplus 60 (POL) / $h_1=60$ mm		
Estudo Paramétrico	Autor(es): Filho, M. M. A	Ano: 2020	
Detalhamento			
Chapa de Aço	Concreto	Barras de Aço	
Geometria: Trapezoidal	Densidade: Convencional	Varões	Grelha de Reforço
Espessura (mm): 1.25	Classe: C25/30	Descrição: Ø6//150	Descrição: 3Ø10
Classe do aço: S350	Umidade: 2.0%	Classe do aço: S500	Classe do aço: S500
Secção Transversal			
Secção Longitudinal			
Modelo de Elementos Finitos			

Modelo 49 – 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: 35 W/m ² K Sup. Ñ Exposta: 9 W/m ² K	Face não Exposta: 20°C Face Exposta: Paramétrica 3	Flange Superior: 0.73 Alma: 0.55 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: 19800 s Períodos de Gravação: 60 s Mínimo Incremento: 1 s Máximo Incremento: 120 s		Diferença: 1x10 ⁻³ Razão da Diferença: 1x10 ⁻⁶		θ_{MAX} ANSYS: 41.51 min θ_{MAX} MATLAB: 52.05 min θ_{MED} ANSYS: 41.57 min θ_{MED} MATLAB: 51.05 min
Condições de Contorno			Elementos Finitos – Temperaturas no arrefecimento (t=15000 s)	
Gráfico – Critério de Isolamento (I)			Gráfico de Temperaturas na Secção da Laje	

FICHA TÉCNICA		
Modelo 50 – Confraplus 60 – 80 mm		
Modelo 50 – Dados Básicos (1/1)		
Tipo de Experimento	Título: Confraplus 60 (POL) / $h_1=80$ mm	
Estudo Paramétrico	Autor(es): Filho, M. M. A	Ano: 2020
Detalhamento		
Chapa de Aço	Concreto	Barras de Aço
Geometria: Trapezoidal	Densidade: Convencional	Varões
Espessura (mm): 1.25	Classe: C25/30	Descrição: Ø6//150
Classe do aço: S350	Umidade: 2.0%	Classe do aço: S500
		Grelha de Reforço
		Descrição: 3Ø10
		Classe do aço: S500
Secção Transversal		
Secção Longitudinal		
Modelo de Elementos Finitos		

Modelo 50 – 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: 35 W/m ² K Sup. Ñ Exposta: 9 W/m ² K	Face não Exposta: 20°C Face Exposta: Paramétrica 3	Flange Superior: 0.73 Alma: 0.55 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: 19800 s Períodos de Gravação: 60 s Mínimo Incremento: 1 s Máximo Incremento: 120 s		Diferença: 1x10 ⁻³ Razão da Diferença: 1x10 ⁻⁶		θ_{MAX} ANSYS: 67.99 min θ_{MAX} MATLAB: 80.81 min θ_{MED} ANSYS: 63.04 min θ_{MED} MATLAB: 74.91 min
Condições de Contorno			Elementos Finitos – Temperaturas no arrefecimento (t=15000 s)	
Gráfico – Critério de Isolamento (I)			Gráfico de Temperaturas na Secção da Laje	

FICHA TÉCNICA		
Modelo 51- Confraplus 60 – 100 mm		
Modelo 51 – Dados Básicos (1/1)		
Tipo de Experimento	Título: Confraplus 60 (POL) / $h_1=100$ mm	
Estudo Paramétrico	Autor(es): Filho, M. M. A	Ano: 2020
Detalhamento		
Chapa de Aço	Concreto	Barras de Aço
Geometria: Trapezoidal	Densidade: Convencional	Varões
Espessura (mm): 1.25	Classe: C25/30	Descrição: Ø6//150
Classe do aço: S350	Umidade: 2.0%	Classe do aço: S500
		Grelha de Reforço
		Descrição: 3Ø10
		Classe do aço: S500
Secção Transversal		
Secção Longitudinal		
Modelo de Elementos Finitos		

Modelo 51 – 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: 35 W/m ² K Sup. Ñ Exposta: 9 W/m ² K	Face não Exposta: 20°C Face Exposta: Paramétrica 3	Flange Superior: 0.73 Alma: 0.55 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: 19800 s Períodos de Gravação: 60 s Mínimo Incremento: 1 s Máximo Incremento: 120 s		Diferença: 1x10 ⁻³ Razão da Diferença: 1x10 ⁻⁶		θ_{MAX} ANSYS: 101.16 min θ_{MAX} MATLAB: 115.40 min θ_{MED} ANSYS: 89.49 min θ_{MED} MATLAB: 103.63 min
Condições de Contorno			Elementos Finitos – Temperaturas no arrefecimento (t=15000 s)	
Gráfico – Critério de Isolamento (I)			Gráfico de Temperaturas na Secção da Laje	

FICHA TÉCNICA		
Modelo 52 – Multideck 50 – 40 mm		
Modelo 52 – Dados Básicos (1/1)		
Tipo de Experimento	Título: Multideck 50 (UK) / $h_1=40$ mm	
Estudo Paramétrico	Autor(es): Filho, M. M. A.	Ano: 2020
Detalhamento		
Chapa de Aço	Concreto	Barras de Aço
Geometria: Reentrante	Densidade: Convencional	Varões
Espessura (mm): 1.00	Classe: C25/30	Descrição: $\varnothing 6//150$
Classe do aço: S450	Umidade: 2.0%	Classe do aço: S500
		Grelha de Reforço
		Descrição: $3\varnothing 10$
		Classe do aço: S500
Secção Transversal		
Secção Longitudinal		
Modelo de Elementos Finitos		

Modelo 52 – 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: 35 W/m ² K Sup. Ñ Exposta: 9 W/m ² K	Face não Exposta: 20°C Face Exposta: Paramétrica 4	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: 7500 s Períodos de Gravação: 60 s Mínimo Incremento: 1 s Máximo Incremento: 120 s		Diferença: 1x10 ⁻³ Razão da Diferença: 1x10 ⁻⁶		θ_{MAX} ANSYS: 27.24 min θ_{MAX} MATLAB: 37.06 min θ_{MED} ANSYS: 27.79 min θ_{MED} MATLAB: 36.86 min
Condições de Contorno			Elementos Finitos – Temperaturas no arrefecimento (t=3600s)	
Gráfico – Critério de Isolamento (I)			Gráfico de Temperaturas na Secção da Laje	

FICHA TÉCNICA			
Modelo 53 – Multideck 50 – 60 mm			
Modelo 53 – Dados Básicos (1/1)			
Tipo de Experimento	Título: Multideck 50 (UK) / $h_1=60$ mm		
Estudo Paramétrico	Autor(es): Filho, M. M. A.	Ano: 2020	
Detalhamento			
Chapa de Aço	Concreto	Barras de Aço	
Geometria: Reentrante	Densidade: Convencional	Varões	Grelha de Reforço
Espessura (mm): 1.00	Classe: C25/30	Descrição: Ø6//150	Descrição: 3Ø10
Classe do aço: S450	Umidade: 2.0%	Classe do aço: S500	Classe do aço: S500
Secção Transversal			
Secção Longitudinal			
Modelo de Elementos Finitos			

Modelo 53 – 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: 35 W/m ² K Sup. Ñ Exposta: 9 W/m ² K	Face não Exposta: 20°C Face Exposta: Paramétrica 4	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: 7500 s Períodos de Gravação: 60 s Mínimo Incremento: 1 s Máximo Incremento: 120 s		Diferença: 1x10 ⁻³ Razão da Diferença: 1x10 ⁻⁶		θ_{MAX} ANSYS: 60.09 min θ_{MAX} MATLAB: - θ_{MED} ANSYS: 49.39 min θ_{MED} MATLAB: 60.70 min
Condições de Contorno			Elementos Finitos – Temperaturas no arrefecimento (t=3600s)	
Gráfico – Critério de Isolamento (I)			Gráfico de Temperaturas na Secção da Laje	

FICHA TÉCNICA		
Modelo 54 – Multideck 50 – 80 mm		
Modelo 54 – Dados Básicos (1/1)		
Tipo de Experimento	Título: Multideck 50 (UK) / $h_1=80$ mm	
Estudo Paramétrico	Autor(es): Filho, M. M. A	Ano: 2020
Detalhamento		
Chapa de Aço	Concreto	Barras de Aço
Geometria: Reentrante	Densidade: Convencional	Varões
Espessura (mm): 1.00	Classe: C25/30	Descrição: Ø6//150
Classe do aço: S450	Umidade: 2.0%	Classe do aço: S500
		Grelha de Reforço
		Descrição: 3Ø10
		Classe do aço: S500
Secção Transversal		
Secção Longitudinal		
Modelo de Elementos Finitos		

Modelo 54 – Teste térmico (1/1)				
Elementos ANSYS	Coef. de Convecção (α_c)	Curvas de Temperatura	Fator de Vista (Φ)	Emissividade (ϵ)
Chapa de Aço: SHELL131	Sup. Exposta: 35 W/m ² K	Face não Exposta: 20°C	Flange Superior: 0.14	Chapa de Aço: 0.7
Concreto: SOLID70	Sup. Ñ Exposta: 9 W/m ² K	Face Exposta: Paramétrica 4	Alma: 0.09	Concreto: 0.7
Barras de Aço: LINK33			Flange Inferior: 1.00	Barras de Aço: 0.7
Parâmetros de Convergência		Critérios de Convergência – Heat Flux		Resultados - Critério Isolamento (I)
Duração Total da Simulação: 7500 s		Diferença: 1x10 ⁻³		θ_{MAX} ANSYS: -
Períodos de Gravação: 60 s		Razão da Diferença: 1x10 ⁻⁶		θ_{MAX} MATLAB: -
Mínimo Incremento: 1 s				θ_{MED} ANSYS: -
Máximo Incremento: 120 s				θ_{MED} MATLAB: -
Condições de Contorno			Elementos Finitos – Temperaturas no arrefecimento (t=3600s)	
Gráfico – Critério de Isolamento (I)			Gráfico de Temperaturas na Secção da Laje	

Modelo 55 – Teste térmico (1/1)				
Elementos ANSYS	Coef. de Convecção (α_c)	Curvas de Temperatura	Fator de Vista (Φ)	Emissividade (ϵ)
Chapa de Aço: SHELL131	Sup. Exposta: 35 W/m ² K	Face não Exposta: 20°C	Flange Superior: 0.14	Chapa de Aço: 0.7
Concreto: SOLID70	Sup. Ñ Exposta: 9 W/m ² K	Face Exposta: Paramétrica 4	Alma: 0.09	Concreto: 0.7
Barras de Aço: LINK33			Flange Inferior: 1.00	Barras de Aço: 0.7
Parâmetros de Convergência		Critérios de Convergência – Heat Flux		Resultados - Critério Isolamento (I)
Duração Total da Simulação: 7500 s		Diferença: 1x10 ⁻³		θ_{MAX} ANSYS: -
Períodos de Gravação: 60 s		Razão da Diferença: 1x10 ⁻⁶		θ_{MAX} MATLAB: -
Mínimo Incremento: 1 s				θ_{MED} ANSYS: -
Máximo Incremento: 120 s				θ_{MED} MATLAB: -
Condições de Contorno			Elementos Finitos – Temperaturas no arrefecimento (t=3600s)	
Gráfico – Critério de Isolamento (I)			Gráfico de Temperaturas na Secção da Laje	

FICHA TÉCNICA			
Modelo 56 – Bondeck – 40 mm			
Modelo 56 - Dados Básicos (1/1)			
Tipo de Experimento	Título: Bondeck (AUS) / $h_1=40$ mm		
Estudo Paramétrico	Autor(es): Filho, M. M. A	Ano: 2020	
Detalhamento			
Chapa de Aço	Concreto	Barras de Aço	
Geometria: Reentrante	Densidade: Convencional	Varões	Grelha de Reforço
Espessura (mm): 1.00	Classe: C25/30	Descrição: Ø6//150	Descrição: 3Ø10
Classe do aço: S350	Umidade: 2.0%	Classe do aço: S500	Classe do aço: S500
Secção Transversal			
Secção Longitudinal			
Modelo de Elementos Finitos			

Modelo 56 – 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: 35 W/m ² K Sup. Ñ Exposta: 9 W/m ² K	Face não Exposta: 20°C Face Exposta: Paramétrica 4	Flange Superior: 0.12 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: 7500 s Períodos de Gravação: 60 s Mínimo Incremento: 1 s Máximo Incremento: 120 s		Diferença: 1x10 ⁻³ Razão da Diferença: 1x10 ⁻⁶		θ_{MAX} ANSYS: 29.67 min θ_{MAX} MATLAB: 42.80 min θ_{MED} ANSYS: 33.44 min θ_{MED} MATLAB: 44.52 min
Condições de Contorno			Elementos Finitos – Temperaturas no arrefecimento (t=3600 s)	
Gráfico – Critério de Isolamento (I)			Gráfico de Temperaturas na Secção da Laje	

FICHA TÉCNICA		
Modelo 57 – Bondeck – 60 mm		
Modelo 57 – Dados Básicos (1/1)		
Tipo de Experimento	Título: Bondeck (AUS) / $h_1=60$ mm	
Estudo Paramétrico	Autor(es): Filho, M. M. A	Ano: 2020
Detalhamento		
Chapa de Aço	Concreto	Barras de Aço
Geometria: Reentrante	Densidade: Convencional	Varões
Espessura (mm): 1.00	Classe: C25/30	Descrição: Ø6//150
Classe do aço: S350	Umidade: 2.0%	Classe do aço: S500
		Grelha de Reforço
		Descrição: 3Ø10
		Classe do aço: S500
Secção Transversal		
Secção Longitudinal		
Modelo de Elementos Finitos		

Modelo 57 – 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: 35 W/m ² K Sup. Ñ Exposta: 9 W/m ² K	Face não Exposta: 20°C Face Exposta: Paramétrica 4	Flange Superior: 0.12 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: 7500 s Períodos de Gravação: 60 s Mínimo Incremento: 1 s Máximo Incremento: 120 s		Diferença: 1x10 ⁻³ Razão da Diferença: 1x10 ⁻⁶		θ_{MAX} ANSYS: - θ_{MAX} MATLAB: - θ_{MED} ANSYS: 59.67 min θ_{MED} MATLAB: 77.46 min
Condições de Contorno			Elementos Finitos – Temperaturas no arrefecimento (t=3600 s)	
Gráfico – Critério de Isolamento (I)			Gráfico de Temperaturas na Secção da Laje	

FICHA TÉCNICA			
Modelo 58 – Bondeck – 80 mm			
Modelo 58 – Dados Básicos (1/1)			
Tipo de Experimento	Título: Bondeck (AUS) / $h_1=80$ mm		
Estudo Paramétrico	Autor(es): Filho, M. M. A	Ano: 2020	
Detalhamento			
Chapa de Aço	Concreto	Barras de Aço	
Geometria: Reentrante	Densidade: Convencional	Varões	Grelha de Reforço
Espessura (mm): 1.00	Classe: C25/30	Descrição: Ø6//150	Descrição: 3Ø10
Classe do aço: S350	Umidade: 2.0%	Classe do aço: S500	Classe do aço: S500
Seção Transversal			
Seção Longitudinal			
Modelo de Elementos Finitos			

Modelo 58 – 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: 35 W/m ² K Sup. Ñ Exposta: 9 W/m ² K	Face não Exposta: 20°C Face Exposta: Paramétrica 4	Flange Superior: 0.12 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: 7500 s Períodos de Gravação: 60 s Mínimo Incremento: 1 s Máximo Incremento: 120 s		Diferença: 1x10 ⁻³ Razão da Diferença: 1x10 ⁻⁶		θ_{MAX} ANSYS: - θ_{MAX} MATLAB: - θ_{MED} ANSYS: - θ_{MED} MATLAB: -
Condições de Contorno			Elementos Finitos – Temperaturas no arrefecimento (t=3600 s)	
Gráfico – Critério de Isolamento (I)			Gráfico de Temperaturas na Secção da Laje	

FICHA TÉCNICA			
Modelo 59 – Bondeck – 100 mm			
Modelo 59 – Dados Básicos (1/1)			
Tipo de Experimento	Título: Bondeck (AUS) / $h_1=100$ mm		
Estudo Paramétrico	Autor(es): Filho, M. M. A	Ano: 2020	
Detalhamento			
Chapa de Aço	Concreto	Barras de Aço	
Geometria: Reentrante	Densidade: Convencional	Varões	Grelha de Reforço
Espessura (mm): 1.00	Classe: C25/30	Descrição: $\varnothing 6//150$	Descrição: 3 $\varnothing 10$
Classe do aço: S350	Umidade: 2.0%	Classe do aço: S500	Classe do aço: S500
Secção Transversal			
Secção Longitudinal			
Modelo de Elementos Finitos			

Modelo 59 – 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: 35 W/m ² K Sup. Ñ Exposta: 9 W/m ² K	Face não Exposta: 20°C Face Exposta: Paramétrica 4	Flange Superior: 0.12 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: 7500 s Períodos de Gravação: 60 s Mínimo Incremento: 1 s Máximo Incremento: 120 s		Diferença: 1x10 ⁻³ Razão da Diferença: 1x10 ⁻⁶		θ_{MAX} ANSYS: - θ_{MAX} MATLAB: - θ_{MED} ANSYS: - θ_{MED} MATLAB: -
Condições de Contorno			Elementos Finitos – Temperaturas no arrefecimento (t=3600 s)	
Gráfico – Critério de Isolamento (I)			Gráfico de Temperaturas na Seção da Laje	

FICHA TÉCNICA		
Modelo 60 – Polideck 59S – 40 mm		
Modelo 60 – Dados Básicos (1/1)		
Tipo de Experimento	Título: Polideck 59S (BRA) / $h_1=40$ mm	
Estudo Paramétrico	Autor(es): Filho, M. M. A	Ano: 2020
Detalhamento		
Chapa de Aço	Concreto	Barras de Aço
Geometria: Trapezoidal	Densidade: Convencional	Varões
Espessura (mm): 1.25	Classe: C25/30	Descrição: $\varnothing 6//150$
Classe do aço: S275	Umidade: 2.0%	Classe do aço: S500
		Grelha de Reforço
		Descrição: $3\varnothing 10$
		Classe do aço: S500
Secção Transversal		
Secção Longitudinal		
Modelo de Elementos Finitos		

Modelo 60 – 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: 35 W/m ² K Sup. Ñ Exposta: 9 W/m ² K	Face não Exposta: 20°C Face Exposta: Paramétrica 4	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: 7500 s Períodos de Gravação: 60 s Mínimo Incremento: 1 s Máximo Incremento: 120 s		Diferença: 1x10 ⁻³ Razão da Diferença: 1x10 ⁻⁶		θ_{MAX} ANSYS: 17.11 min θ_{MAX} MATLAB: 22.61 min θ_{MED} ANSYS: 19.33 min θ_{MED} MATLAB: 25.46 min
Condições de Contorno			Elementos Finitos – Temperaturas no arrefecimento (t=3600 s)	
Gráfico – Critério de Isolamento (I)			Gráfico de Temperaturas na Secção da Laje	

FICHA TÉCNICA			
Modelo 61 – Polideck 59S – 60 mm			
Modelo 61 – Dados Básicos (1/1)			
Tipo de Experimento	Título: Polideck 59S (BRA) / $h_1=60$ mm		
Estudo Paramétrico	Autor(es): Filho, M. M. A	Ano: 2020	
Detalhamento			
Chapa de Aço	Concreto	Barras de Aço	
Geometria: Trapezoidal	Densidade: Convencional	Varões	Grelha de Reforço
Espessura (mm): 1.25	Classe: C25/30	Descrição: Ø6//150	Descrição: 3Ø10
Classe do aço: S275	Umidade: 2.0%	Classe do aço: S500	Classe do aço: S500
Secção Transversal			
Secção Longitudinal			
Modelo de Elementos Finitos			

Modelo 61 – 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: 35 W/m ² K Sup. Ñ Exposta: 9 W/m ² K	Face não Exposta: 20°C Face Exposta: Paramétrica 4	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: 7500 s Períodos de Gravação: 60 s Mínimo Incremento: 1 s Máximo Incremento: 120 s		Diferença: 1x10 ⁻³ Razão da Diferença: 1x10 ⁻⁶		θ_{MAX} ANSYS: 34.24 min θ_{MAX} MATLAB: 42.68 min θ_{MED} ANSYS: 35.66 min θ_{MED} MATLAB: 44.19 min
Condições de Contorno			Elementos Finitos – Temperaturas no arrefecimento (t=3600 s)	
Gráfico – Critério de Isolamento (I)			Gráfico de Temperaturas na Secção da Laje	

FICHA TÉCNICA		
Modelo 62 – Polideck 59S – 80 mm		
Modelo 62 – Dados Básicos (1/1)		
Tipo de Experimento	Título: Polideck 59S (BRA) / $h_1=80$ mm	
Estudo Paramétrico	Autor(es): Filho, M. M. A	Ano: 2020
Detalhamento		
Chapa de Aço	Concreto	Barras de Aço
Geometria: Trapezoidal	Densidade: Convencional	Varões
Espessura (mm): 1.25	Classe: C25/30	Descrição: $\varnothing 6//150$
Classe do aço: S275	Umidade: 2.0%	Classe do aço: S500
		Grelha de Reforço
		Descrição: $3\varnothing 10$
		Classe do aço: S500
Secção Transversal		
Secção Longitudinal		
Modelo de Elementos Finitos		

Modelo 62 – 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: 35 W/m ² K Sup. Ñ Exposta: 9 W/m ² K	Face não Exposta: 20°C Face Exposta: Paramétrica 4	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: 7500 s Períodos de Gravação: 60 s Mínimo Incremento: 1 s Máximo Incremento: 120 s		Diferença: 1x10 ⁻³ Razão da Diferença: 1x10 ⁻⁶		θ_{MAX} ANSYS: - θ_{MAX} MATLAB: - θ_{MED} ANSYS: 62.82 min θ_{MED} MATLAB: 76.31 min
Condições de Contorno			Elementos Finitos – Temperaturas no arrefecimento (t=3600 s)	
Gráfico – Critério de Isolamento (I)			Gráfico de Temperaturas na Secção da Laje	

FICHA TÉCNICA		
Modelo 63 – Polideck 59S – 100 mm		
Modelo 63 – Dados Básicos (1/1)		
Tipo de Experimento	Título: Polideck 59S (BRA) / $h_1=100$ mm	
Estudo Paramétrico	Autor(es): Filho, M. M. A	Ano: 2020
Detalhamento		
Chapa de Aço	Concreto	Barras de Aço
Geometria: Trapezoidal	Densidade: Convencional	Varões
Espessura (mm): 1.25	Classe: C25/30	Descrição: Ø6//150
Classe do aço: S275	Umidade: 2.0%	Classe do aço: S500
		Grelha de Reforço
		Descrição: 3Ø10
		Classe do aço: S500
Secção Transversal		
Secção Longitudinal		
Modelo de Elementos Finitos		

Modelo 63 – 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: 35 W/m ² K Sup. Ñ Exposta: 9 W/m ² K	Face não Exposta: 20°C Face Exposta: Paramétrica 4	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: 7500 s Períodos de Gravação: 60 s Mínimo Incremento: 1 s Máximo Incremento: 120 s		Diferença: 1x10 ⁻³ Razão da Diferença: 1x10 ⁻⁶		θ_{MAX} ANSYS: - θ_{MAX} MATLAB: - θ_{MED} ANSYS: - θ_{MED} MATLAB: -
Condições de Contorno			Elementos Finitos – Temperaturas no arrefecimento (t=3600 s)	
Gráfico – Critério de Isolamento (I)			Gráfico de Temperaturas na Secção da Laje	

FICHA TÉCNICA			
Modelo 64 – Confraplus 60 – 40 mm			
Modelo 64 – Dados Básicos (1/1)			
Tipo de Experimento	Título: Confraplus 60 (POL) / $h_1=40$ mm		
Estudo Paramétrico	Autor(es): Filho, M. M. A	Ano: 2020	
Detalhamento			
Chapa de Aço	Concreto	Barras de Aço	
Geometria: Trapezoidal	Densidade: Convencional	Varões	Grelha de Reforço
Espessura (mm): 1.25	Classe: C25/30	Descrição: Ø6//150	Descrição: 3Ø10
Classe do aço: S350	Umidade: 2.0%	Classe do aço: S500	Classe do aço: S500
Secção Transversal			
Secção Longitudinal			
Modelo de Elementos Finitos			

Modelo 64 – 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: 35 W/m ² K Sup. Ñ Exposta: 9 W/m ² K	Face não Exposta: 20°C Face Exposta: Paramétrica 4	Flange Superior: 0.73 Alma: 0.55 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: 7500 s Períodos de Gravação: 60 s Mínimo Incremento: 1 s Máximo Incremento: 120 s		Diferença: 1x10 ⁻³ Razão da Diferença: 1x10 ⁻⁶		θ_{MAX} ANSYS: 16.71 min θ_{MAX} MATLAB: 21.86 min θ_{MED} ANSYS: 18.20 min θ_{MED} MATLAB: 23.83 min
Condições de Contorno			Elementos Finitos – Temperaturas no arrefecimento (t=3600 s)	
Gráfico – Critério de Isolamento (I)			Gráfico de Temperaturas na Secção da Laje	

FICHA TÉCNICA		
Modelo 65 – Confraplus 60 – 60 mm		
Modelo 65 – Dados Básicos (1/1)		
Tipo de Experimento	Título: Confraplus 60 (POL) / $h_1=60$ mm	
Estudo Paramétrico	Autor(es): Filho, M. M. A	Ano: 2020
Detalhamento		
Chapa de Aço	Concreto	Barras de Aço
Geometria: Trapezoidal	Densidade: Convencional	Varões
Espessura (mm): 1.25	Classe: C25/30	Descrição: Ø6//150
Classe do aço: S350	Umidade: 2.0%	Classe do aço: S500
		Grelha de Reforço
		Descrição: 3Ø10
		Classe do aço: S500
Secção Transversal		
Secção Longitudinal		
Modelo de Elementos Finitos		

Modelo 65 – 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: 35 W/m ² K Sup. Ñ Exposta: 9 W/m ² K	Face não Exposta: 20°C Face Exposta: Paramétrica 4	Flange Superior: 0.73 Alma: 0.55 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: 7500 s Períodos de Gravação: 60 s Mínimo Incremento: 1 s Máximo Incremento: 120 s		Diferença: 1x10 ⁻³ Razão da Diferença: 1x10 ⁻⁶		θ_{MAX} ANSYS: 33.23 min θ_{MAX} MATLAB: 41.12 min θ_{MED} ANSYS: 34.10 min θ_{MED} MATLAB: 41.36 min
Condições de Contorno			Elementos Finitos – Temperaturas no arrefecimento (t=3600 s)	
Gráfico – Critério de Isolamento (I)			Gráfico de Temperaturas na Secção da Laje	

FICHA TÉCNICA		
Modelo 66 – Confraplus 60 – 80 mm		
Modelo 66 – Dados Básicos (1/1)		
Tipo de Experimento	Título: Confraplus 60 (POL) / $h_1=80$ mm	
Estudo Paramétrico	Autor(es): Filho, M. M. A	Ano: 2020
Detalhamento		
Chapa de Aço	Concreto	Barras de Aço
Geometria: Trapezoidal	Densidade: Convencional	Varões
Espessura (mm): 1.25	Classe: C25/30	Descrição: Ø6//150
Classe do aço: S350	Umidade: 2.0%	Classe do aço: S500
		Grelha de Reforço
		Descrição: 3Ø10
		Classe do aço: S500
Secção Transversal		
Secção Longitudinal		
Modelo de Elementos Finitos		

Modelo 66 – 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: 35 W/m ² K Sup. Ñ Exposta: 9 W/m ² K	Face não Exposta: 20°C Face Exposta: Paramétrica 4	Flange Superior: 0.73 Alma: 0.55 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: 7500 s Períodos de Gravação: 60 s Mínimo Incremento: 1 s Máximo Incremento: 120 s		Diferença: 1x10 ⁻³ Razão da Diferença: 1x10 ⁻⁶		θ_{MAX} ANSYS: - θ_{MAX} MATLAB: - θ_{MED} ANSYS: 57.18 min θ_{MED} MATLAB: 69.16 min
Condições de Contorno			Elementos Finitos – Temperaturas no arrefecimento (t=3600 s)	
Gráfico – Critério de Isolamento (I)			Gráfico de Temperaturas na Secção da Laje	

FICHA TÉCNICA			
Modelo 67 – Confraplus 60 – 100 mm			
Modelo 67 – Dados Básicos (1/1)			
Tipo de Experimento	Título: Confraplus 60 (POL) / $h_1=100$ mm		
Estudo Paramétrico	Autor(es): Filho, M. M. A	Ano: 2020	
Detalhamento			
Chapa de Aço	Concreto	Barras de Aço	
Geometria: Trapezoidal	Densidade: Convencional	Varões	Grelha de Reforço
Espessura (mm): 1.25	Classe: C25/30	Descrição: Ø6//150	Descrição: 3Ø10
Classe do aço: S350	Umidade: 2.0%	Classe do aço: S500	Classe do aço: S500
Secção Transversal			
Secção Longitudinal			
Modelo de Elementos Finitos			

Modelo 67 – Teste térmico (I/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: 35 W/m ² K Sup. Ñ Exposta: 9 W/m ² K	Face não Exposta: 20°C Face Exposta: Paramétrica 4	Flange Superior: 0.73 Alma: 0.55 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: 7500 s Períodos de Gravação: 60 s Mínimo Incremento: 1 s Máximo Incremento: 120 s		Diferença: 1x10 ⁻³ Razão da Diferença: 1x10 ⁻⁶		θ_{MAX} ANSYS: - θ_{MAX} MATLAB: - θ_{MED} ANSYS: - θ_{MED} MATLAB: -
Condições de Contorno			Elementos Finitos – Temperaturas no arrefecimento (t=3600 s)	
Gráfico – Critério de Isolamento (I)			Gráfico de Temperaturas na Secção da Laje	