

UNIVERSIDADE FEDERAL DE PERNAMBUCO
CENTRO DE TECNOLOGIA E GEOCIÊNCIAS
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA CIVIL E AMBIENTAL
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA CIVIL

PAULO FERNANDO SILVA SOUSA

**LAJES MISTAS COM FÔRMA DE AÇO INCORPORADA EM
SITUAÇÃO DE INCÊNDIO - ANÁLISES EXPERIMENTAL E
NUMÉRICA**

Recife

2018

PAULO FERNANDO SILVA SOUSA

**LAJES MISTAS COM FÔRMA DE AÇO INCORPORADA EM
SITUAÇÃO DE INCÊNDIO - ANÁLISES EXPERIMENTAL E
NUMÉRICA**

Dissertação apresentada à Universidade Federal de Pernambuco, como parte dos requisitos para obtenção do título de Mestre em Engenharia Civil.

Área de Concentração: Estruturas

Orientador: Prof.º Dr. Tiago Ancelmo de Carvalho Pires de Oliveira

Recife

2018

Catálogo na fonte
Bibliotecária Valdicéa Alves, CRB-4 / 1260

S7251 Sousa, Paulo Fernando Silva.--
Lajes mistas com fôrma de aço incorporada em situação de incêndio - análises experimental e numérica. Paulo Fernando Silva Sousa - 2018.
79folhas, Il., e Tab.

Orientador: Prof. Dr. Tiago Ancelmo de Carvalho Pires de Oliveira.

Dissertação (Mestrado) – Universidade Federal de Pernambuco. CTG. Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil e Ambiental, 2018.
Inclui Referências.

1. Engenharia Civil. 2. Lajes mistas. 3. Análise numérica. 4. Análise experimental. 5. Resistência ao fogo. I. Oliveira, Tiago Ancelmo de Carvalho Pires de (Orientador). II. Título.

UFPE

624 CDD (22. ed.) BCTG/2018-52



UNIVERSIDADE FEDERAL DE PERNAMBUCO
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA CIVIL

A comissão examinadora da Defesa de Dissertação de Mestrado

**LAJES MISTAS COM FÔRMA DE AÇO INCORPORADA EM SITUAÇÃO DE
INCÊNDIO –
ANÁLISES EXPERIMENTAL E NUMÉRICA**

defendida por

Paulo Fernando Silva Sousa

Considera o candidato APROVADO

Recife, 29 de janeiro de 2018

Banca Examinadora:

Prof. Dr. Tiago Ancelmo de Carvalho Pires de Oliveira – UFPE
(orientador)

Prof. Dr. Ricardo Hallal Fakury – UFMG
(examinador externo)

Prof. Dr. José Jéferson do Rêgo Silva – UFPE
(examinador externo)

AGRADECIMENTOS

Agradeço primeiramente a Deus, pelo dom da vida. Agradeço também bastante aos meus pais, Emanuel Sousa e Creusélia Sousa, por sempre serem os meus maiores apoiadores e incentivadores. Aproveito para agradecer também a toda a minha família e amigos, e em especial a Marina Machado, Roberta Tabaczinski, Iago Borges e Cristóvão José, pelo apoio mais direto na pesquisa e na montagem dos experimentos. Agradeço também: ao professor Ricardo Fakury, da UFMG, por aceitar fazer parte da minha banca, ao meu orientador, professor Tiago Ancelmo, ao professor José Jéferson, e a todos os demais professores e funcionários do Programa de Pós-graduação em Engenharia Civil da UFPE. Não posso esquecer também de agradecer a alguns servidores da UFPE, como os técnicos de laboratório Cazuzá, Ezequiel e Nadinho, que ajudaram e contribuíram bastante no desenvolvimento da fase experimental, e Andréa, Claudiana e Cleide, da Pós, que tiveram toda a paciência para me ajudar nas questões burocráticas. Agradeço também ao CNPq, pelo auxílio financeiro que tornou esta pesquisa viável.

RESUMO

Nos últimos anos, a indústria da construção civil vem cada vez adotando a solução de lajes mistas de concreto com forma incorporada. Essa escolha pode ser justificada por diversos motivos, tais como: a forma de aço serve ao mesmo tempo, como forma e armação longitudinal positiva para a laje, o que pode dispensar os escoramentos e armações positivas. Contudo, a baixa espessura da forma (que varia de 0,8 mm a 1,25 mm), associada a sua elevada condutividade térmica, potencializa o efeito do calor do incêndio nas propriedades mecânicas e térmicas, tanto do aço quanto do concreto, o que pode comprometer o desempenho da estrutura. Dessa forma, este trabalho propõe um estudo desse comportamento ao fogo das lajes mistas com forma incorporada a partir de duas análises: uma experimental, desenvolvida no laboratório de estruturas da Universidade Federal de Pernambuco, e outra numérica, implementada com auxílio do software de elementos finitos Abaqus. Os resultados das análises são comparados entre si, e com a metodologia normativa, proposta na norma ABNT NBR 14323 (2013). Os resultados experimentais indicam que as lajes apresentam mais resistência ao fogo do que o previsto pela norma e pelo modelo numérico.

Palavras-chave: Lajes mistas. Análise numérica. Análise experimental. Resistência ao fogo.

ABSTRACT

In recent years, civil construction industry has been increasingly adopting the composite concrete and steel slab solution, from steel deck type. It can be justified for a number of reasons, such as: the steel sheet serves at the same time as shape and longitudinal frame for the slab, which may exclude longitudinal positive frames and shoring. However, the low thickness of the steel sheet (ranging from 0,8 mm to 1,25 mm), associated with its high thermal conductivity, potentiates the effect of fire heat on mechanical and thermal properties of both concrete and steel, thus compromising the structure's performance. In this way, this work proposes a study of the fire behaviour of steel deck slabs, from two different analyzes: one experimental, developed in Federal University of Pernambuco, and another numerical, implemented with the finite elements analysis software Abaqus. The results of the analyzes are compared with each other, and with the normative methodology, proposed in ABNT NBR 14323 (2013). The experimental results indicate that the slabs have more fire resistance than the standard and numerical model propose.

Keywords: Composite slabs. Numerical analysis. Experimental analysis. Fire resistance.

LISTA DE ILUSTRAÇÕES

Figura 1 - Estruturas mistas de aço e concreto em recentes construções brasileiras: a) edifício-garagem em São Paulo; b) Salvador Shopping, em Salvador, Bahia; c) Edifício comercial em São Paulo.....	12
Figura 2 - Tipos de incêndios no mundo.	14
Figura 3 - Distribuição de tensões na seção da nervura.	17
Figura 4 - Seção transversal de laje steel deck ensaiada, com cotas em mm	19
Figura 5 - Fotos mostrando o edifício de 8 pavimentos, no laboratório de Cardington.	20
Figura 6 - Esquema geral dos ensaios realizados, com cotas em mm.	24
Figura 7 - Esquema geral dos ensaios realizados, com cotas em mm.	26
Figura 8 - Seção transversal das lajes ensaiadas, com cotas em mm.....	27
Figura 9 - Esquema de transferência de carga mecânica nos ensaios.	27
Figura 10 - Uso de 1/4 da laje e condições de simetria.....	30
Figura 11 - Modelo bidimensional, usado na análise térmica.....	31
Figura 12 - Modelo tridimensional, usado na análise termoestrutural.	32
Figura 13 - Modelos bidimensionais no TNO DIANA, usado na análise térmica.....	34
Figura 14 - Seção transversal de laje steel deck, com destaque para as armações longitudinais adicionais.	37
Figura 15 - Esquema cotado da forma de aço steel deck utilizada.	39
Figura 16 - Laje de 16 cm, posicionada acima do forno e com o carregamento mecânico.....	39
Figura 17 - Esquema geral, mostrando o posicionamento dos termopares ao longo da seção transversal da laje.....	40
Figura 18 - Foto do ensaio da laje de 19 cm, mostrando o posicionamento dos termopares ao longo da seção transversal da laje.	41
Figura 19 - Foto do detalhe do posicionamento dos transdutores potenciométricos, no meio da laje.	41
Figura 20 - Comparação entre evolução de temperaturas do forno elétrico e a curva do incêndio-padrão.....	43
Figura 21 - Curvas de temperatura (°C) x tempo (min) dos termopares T1, T2 e T3, ensaio 1.....	43
Figura 22 - Curvas de temperatura (°C) x tempo (min) dos termopares T4, T5 e T6, ensaio 1.....	44
Figura 23 - Curva de deslocamento (mm) x tempo (min) para o meio do vão, ensaio 1.	44
Figura 24 - Descolamento entre a forma de aço e o concreto, ensaio 1.	45
Figura 25 - Situação da forma de aço após o total resfriamento da laje, ensaio 1. ...	45

Figura 26 - Curvas de temperatura (°C) x tempo (min) dos termopares T1, T2 e T3, ensaio 2.....	46
Figura 27 - Curvas de temperatura (°C) x tempo (min) dos termopares T4, T5 e T6, ensaio 2.....	47
Figura 28 - Curva de deslocamento (mm) x tempo (min) para o meio do vão, ensaio 2.	47
Figura 29 - Curvas de temperatura (°C) x tempo (min) dos termopares T1, T2 e T3, ensaio 3.....	48
Figura 30 - Curvas de temperatura (°C) x tempo (min) dos termopares T5 e T6, ensaio 3.....	48
Figura 31 - Curva de deslocamento (mm) x tempo (min) para o meio do vão, ensaio 3.	49
Figura 32 - Resistência ao fogo dos 3 ensaios pelo critério da ISO-834, isolamento térmico.	52
Figura 33 - Carga (kN/m ²) x tempo (min), para o ensaio 2 (laje de 16 cm).	55
Figura 34 - Curva de deslocamento (mm) x tempo (min), para o ensaio 2 (laje de 16 cm).	55
Figura 35 - Condições de contorno utilizadas no modelo de meia nervura.....	58
Figura 36 - Comparação das curvas de aquecimento utilizadas (curvas 1 e 2) com a curva de incêndio-padrão da ISO-834.....	59
Figura 37 - Seção transversal das lajes ensaiadas.	59
Figura 38 - Esquema do ensaio realizado.....	59
Figura 39 - Localização dos termopares no ensaio de Guo e Bailey (2011).	60
Figura 40 - Temperaturas na seção transversal, numérico x experimental, para os termopares T15, T16 e T19.....	61
Figura 41 - Temperaturas na seção transversal, numérico x experimental, para os termopares T20, T21 e T22.....	61
Figura 42 - Resultados da comparação entre os deslocamentos no meio do vão, desenvolvidos no modelo numérico e experimental, para as lajes F1, F2 e F3.	62
Figura 43 - Resultados da comparação entre os deslocamentos no meio do vão, desenvolvidos no modelo numérico e experimental, para as lajes F4, F5 e F6.	63
Figura 44 - Comparação numérico x experimental, para os termopares T1 e T4 - ensaio 1.....	64
Figura 45 - Comparação numérico x experimental, para os termopares T2 e T5 - ensaio 1.....	64
Figura 46 - Comparação numérico x experimental, para os termopares T3 e T6 - ensaio 1.....	65
Figura 47 - Comparação numérico x experimental, para os deslocamentos no meio do vão - ensaio 2.....	65
Figura 48 - Resultados numéricos - temperatura x tempo, para lajes com diferentes espessuras e altura fixa em 13 cm.....	68

Figura 49 - Resultados numéricos - temperatura x tempo, para lajes com diferentes espessuras e altura fixa em 13 cm.....	68
Figura 50 - Curvas de carga resistente x tempo, usando o método normativo, para diferentes espessuras da forma de aço.	71
Figura 51 - Curvas de deslocamentos x tempo, para o meio do vão de uma laje com 16 cm de altura e diferentes espessuras da forma de aço.....	71
Figura 52 - Comparação numérico x experimental, para os deslocamentos no meio do vão - ensaio 3.....	74

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Método tabular da ABNT NBR 14323 (2013)	16
Tabela 2 - Resumo de pesquisas no âmbito experimental abordadas neste trabalho.	18
Tabela 3 - Resumo das pesquisas no âmbito numérico abordadas neste trabalho. .	29
Tabela 4 - Resumo dos ensaios realizados.....	38
Tabela 5 - Resistência ao fogo dos 3 ensaios, pelo critério do isolamento térmico. .	51
Tabela 6 - Resistência ao fogo, deslocamento e taxa de deslocamento para os ensaios.....	54
Tabela 7 - Resistência ao fogo de 2 ensaios, pelo critério da capacidade resistente.	54
Tabela 8 - Resistências ao fogo, pelos métodos normativo e numérico, para lajes com diferentes alturas - critério do isolamento térmico.	69
Tabela 9 - Resistências ao fogo, pelos métodos normativo e numérico, para lajes com diferentes alturas - critério da capacidade resistente.	72
Tabela 10 - Resistências ao fogo, pelos métodos normativo e numérico, para lajes com diferentes espessuras - critério da capacidade resistente.....	72
Tabela 11 - Resistência ao fogo pelo critério da capacidade resistente.....	73

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	12
1.1	JUSTIFICATIVA.....	12
1.2	OBJETIVOS	15
1.3	ESCOPO	15
2	REVISÃO DE LITERATURA.....	16
2.1	NORMATIZAÇÃO EXISTENTE.....	16
2.2	ESTUDOS EXPERIMENTAIS	18
2.3	ESTUDOS NUMÉRICOS	29
3	ANÁLISE EXPERIMENTAL.....	38
3.1	PROGRAMA EXPERIMENTAL	38
3.2	RESULTADOS	42
3.2.1	Ensaio 1.....	42
3.2.2	Ensaio 2.....	46
3.2.3	Ensaio 3.....	48
3.3	COMPARAÇÃO COM O MÉTODO NORMATIVO	50
3.3.1	Critério do isolamento térmico.....	50
3.3.2	Critério da capacidade resistente	52
4	ANÁLISE NUMÉRICA.....	57
4.1	APRESENTAÇÃO	57
4.2	VALIDAÇÃO	58
4.3	COMPARAÇÃO COM O MÉTODO NORMATIVO	66
4.3.1	Apresentação do estudo de caso.....	66
4.3.2	Critério do isolamento térmico.....	67
4.3.3	Critério da capacidade resistente	70
5	CONCLUSÕES E SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS	75
	REFERÊNCIAS	77

1 INTRODUÇÃO

1.1 JUSTIFICATIVA

As estruturas mistas de aço e concreto estão sendo cada vez mais utilizadas no Brasil nos últimos anos, como mostram De Nardin e El Debs (2013, p.20). As autoras destacam essa importância mostrando exemplos de obras recentes que utilizaram esse tipo de sistema construtivo, como mostrado na Figura 1: são centros e edifícios comerciais de grande porte, em geral. As autoras também reforçam a importância do sistema de construção mista em aço e concreto destacando que conceituadas universidades brasileiras, como a Universidade de São Paulo e a Universidade Federal de Minas Gerais, desenvolveram grupos de pesquisa específicos para estudar o comportamento dessas estruturas mistas.

Figura 1 - Estruturas mistas de aço e concreto em recentes construções brasileiras: a) edifício-garagem em São Paulo; b) Salvador Shopping, em Salvador, Bahia; c) Edifício comercial em São Paulo.



Fonte: De Nardin e El Debs (2013).

Assim, as lajes mistas surgiram como soluções para acelerar e racionalizar mais o processo construtivo, assim como deixar as obras mais limpas e seguras. (DE NARDIN; EL DEBS, 2013). De acordo com Saúde et al. (2006), as lajes mistas são formadas basicamente por chapas perfiladas de aço, sobre as quais é lançado o concreto fresco. Depois do endurecimento, forma-se um elemento estrutural único, que se comporta como uma laje unidirecional.

É nesse contexto que se inserem as lajes do tipo steel deck, ou seja, como lajes mistas de aço e concreto. De acordo com o relatório técnico anual "Cenário dos Fabricantes de telhas de aço e steel deck" (CBCA, 2017, p.16), a produção de steel deck nas empresas brasileiras pesquisadas foi da ordem de 12,8 mil toneladas, somente no ano de 2016.

Essa escolha pode ser justificada por diversos fatores, como mostra Ramos (2010, p.24):

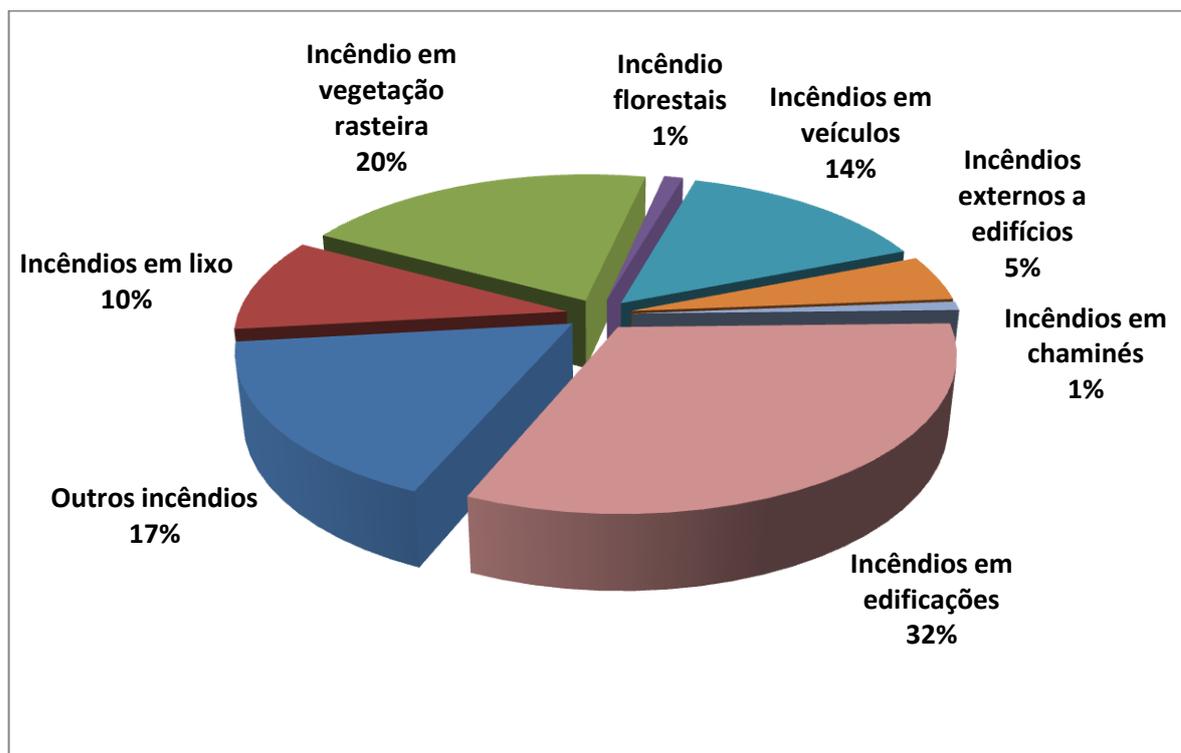
- na fase de construção, a forma de aço funciona como plataforma de trabalho e ainda suporta os carregamentos, podendo inclusive dispensar o uso de escoramentos;
- após a construção, o concreto passa a trabalhar em conjunto com a forma, que pode inclusive substituir parcial ou totalmente a armação longitudinal positiva da laje;
- além disso, as formas de aço também atuam contraventando a estrutura, como diafragmas horizontais;
- proporciona facilidade à passagem de dutos e instalações.

Saúde et al. (2006) complementam essas vantagens, destacando a facilidade de transporte da forma de aço, que é bastante leve, e a qualidade dessa chapa, que é controlada por rígidas tolerâncias e procedimentos de qualidade nas fábricas. Entretanto, os autores também discutem algumas desvantagens, como a necessidade de mão de obra mais especializada, demanda por planos de montagem específicos e a resistência ao fogo.

Nesse sentido, o comportamento dessa laje em situação de incêndio ainda precisa ser melhor estudado. Nesse sistema, a forma de aço costuma ficar exposta (sem revestimento), ou seja, em contato direto com o calor quando exposta ao fogo. Devido a pequena espessura da forma (que varia de 0,8 mm a 1,25 mm) e ao fato de o aço ser um excelente condutor de calor, as temperaturas rapidamente se elevam em situação de incêndio, o que causa alterações imediatas e consideráveis nas propriedades térmicas e mecânicas do aço e também do concreto, uma vez que o calor também se propaga por condução. Assim, o desempenho mecânico da estrutura é comprometido com o tempo de incêndio.

Sendo assim, essa preocupação com o desempenho ao fogo das estruturas é bastante válida, porque os incêndios em edificações (sejam residenciais, comerciais, industriais ou de prestação de serviços) são bastante comuns em todo o mundo, como ilustra bem a Figura 2. Nessa figura, existem dados de 32 países de todo o mundo, e sua análise demonstra que cerca de 1/3 de todos os incêndios são em edificações. (CORRÊA et al, 2015). Os autores mostra resultados muito similares para o Estado de Pernambuco, no triênio 2011-2013 e para a Região Metropolitana da cidade do Recife, no ano de 2013.

Figura 2 - Tipos de incêndios no mundo.



Fonte: Adaptada de IAFRS/CTIF (2012 apud Corrêa et al., 2015).

Essa pronunciada ocorrência de incêndios em edificações no mundo e na região é um dos motivos pelos quais a Universidade Federal de Pernambuco, em seu Programa de Pós-graduação em Engenharia Civil, vem desenvolvendo pesquisas ao longo dos últimos anos nessa área de Segurança contra Incêndios em edificações e estruturas. Ao longo da última década, trabalhos diversos nessa área vêm sendo publicados, como os de Costa (2013) e Abreu (2016), por exemplo, que apresentaram pesquisas nos âmbitos experimental e numéricos, respectivamente, sobre pilares de aço e pilares mistos de aço e concreto em situação de incêndio.

Dessa forma, o presente trabalho se insere nesse grupo de pesquisas, e pode ser justificado também como uma continuidade natural dos trabalhos de pesquisa nessa área na Universidade. Além disso, como será mostrado na revisão bibliográfica, outra motivação forte deste trabalho de pesquisa é a escassez de trabalhos similares no Brasil, onde não há ainda nenhum trabalho publicado que tenha desenvolvido uma análise experimental de lajes mistas com fôrma incorporada em situação de incêndio.

1.2 OBJETIVOS

Este trabalho tem como objetivo geral a avaliação do comportamento ao fogo das lajes mistas com fôrma de aço incorporada (steel deck), através de análises experimentais e numéricas. Como objetivos específicos, destacam-se:

- sistematizar uma revisão bibliográfica sobre lajes steel deck em situação de incêndio, destacando algumas das principais contribuições nos âmbitos experimental e numérico;
- apresentar e analisar modelos experimentais desenvolvidos, no próprio laboratório de estruturas e construção civil da Universidade Federal de Pernambuco, para simular lajes steel deck quando expostas ao fogo;
- apresentar e analisar modelos numéricos desenvolvidos (validados com experimentos da literatura e com os deste trabalho), com auxílio do software de elementos finitos Abaqus, para simular lajes steel deck quando expostas ao fogo;
- comparar os resultados experimentais e numéricos com os resultados obtidos pela metodologia proposta pela ABNT NBR 14323 (2013).

1.3 ESCOPO

O trabalho está estruturado em 5 capítulos:

- no capítulo 1, são apresentados a justificativa e objetivos da pesquisa, bem como o escopo do trabalho;
- no capítulo 2, apresenta-se a revisão bibliográfica, que é dividida em: normatização existente, estudos experimentais e estudos numéricos;
- no capítulo 3, apresenta-se a análise experimental desenvolvida, com a apresentação do experimento, os resultados e comparação com o método normativo;
- no capítulo 4, apresenta-se a análise numérica desenvolvida, com a apresentação do modelo, validação e comparação com o método normativo;
- no capítulo 5, apresentam-se as principais conclusões e sugestões para trabalhos futuros, após todas as análises e estudos realizados no trabalho;
- Por fim, apresentam-se as referências bibliográficas utilizadas na pesquisa.

2 REVISÃO DE LITERATURA

2.1 NORMATIZAÇÃO EXISTENTE

Em seu anexo C, a norma brasileira de projeto de estruturas de aço e de estruturas mistas de aço e concreto de edifícios em situação de incêndio, a ABNT NBR 14323 (2013), propõe um método simplificado para o cálculo da resistência ao fogo, que está associado a variáveis de projeto das lajes, como a altura do capeamento de concreto e a própria geometria da forma de aço, por exemplo. Os parâmetros da forma de aço podem ser obtidos através do catálogo do fabricante, enquanto que o capeamento e as características do concreto são especificados pelo próprio projetista.

A metodologia normativa avalia a resistência ao fogo de três maneiras: estanqueidade, isolamento térmico e capacidade resistente. Pelo item C.2.1.1.2, a estanqueidade é garantida pela simples presença da forma de aço, seu tempo de resistência não precisa ser calculado. Já para o isolamento térmico, a norma propõe um método tabular. Determina-se a espessura efetiva da laje, conforme o item C.2.1.2.2, que leva em conta apenas parâmetros de geometria da própria laje e altura de capeamento de concreto.

Ressalta-se que parâmetros como resistência ou tipo do concreto e aço não são levados em conta. Calculada a espessura efetiva, consulta-se a tabela C.1, contida no item C.2.1.2.1, e obtém-se a resistência ao fogo para o critério de isolamento térmico, conforme a Tabela 1.

Tabela 1 - Método tabular da ABNT NBR 14323 (2013)

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

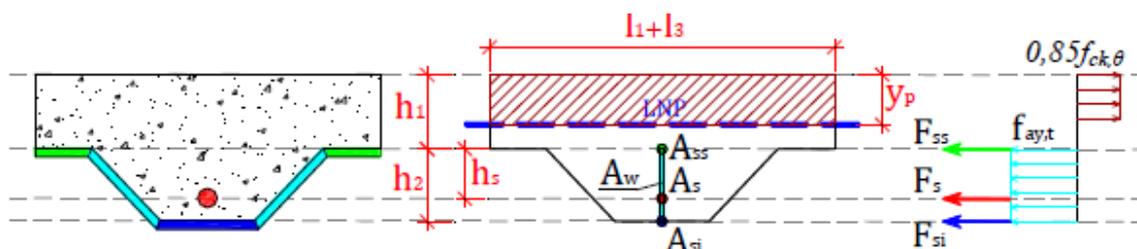
Fonte: Adaptado de ABNT NBR 14323 (2013)

Já para avaliar o desempenho mecânico, a norma propõe um método para determinação do momento fletor plástico, que é o momento resistente da seção transversal, e para garantir a estabilidade, esse valor deve ser superior ao momento solicitante. Para calcular o momento resistente, é preciso estabelecer a posição da linha neutra da seção da nervura, o que pode ser determinado de forma iterativa, a partir das resultantes de forças e respectivas temperaturas atuantes nas partes (forma de aço, concreto comprimido, armação adicional), conforme mostra a Figura 3.

Para estimar as temperaturas em cada uma dessas partes em função do tempo, a norma estabelece equações empíricas e tabelas de coeficientes para justamente representar essa variação conforme o tempo; conhecida a posição da linha neutra, calcula-se os momentos de cada componente da laje, e a soma desses momentos corresponde ao momento fletor plástico resistente da seção. Com esse momento e em função das condições de apoio da laje, determina-se a carga resistente, cujo valor cai com o tempo, pois devido ao aumento de temperatura as resistências dos materiais caem.

Assim, a resistência ao fogo corresponde basicamente ao tempo para o qual a carga solicitante atuante na laje se torna maior do que a carga resistente. Esse método também afirma, no item C.2.1.3.2, que, opcionalmente, a contribuição da forma de aço pode ser desprezada, de modo a considerar que apenas as eventuais armaduras adicionais positivas. Contudo, como muitos projetos não estão considerando armação adicional positiva (apenas a negativa nas regiões de apoios intermediários de lajes contínuas), optou-se aqui por considerar apenas a forma de aço para o cálculo do momento resistente positivo.

Figura 3 - Distribuição de tensões na seção da nervura.



Fonte: Santos (2014).

2.2 ESTUDOS EXPERIMENTAIS

Nesta parte do trabalho, são apresentados alguns dos principais trabalhos no campo experimental que orientaram esta pesquisa. Inicialmente, ressalta-se que a divisão entre estudos experimentais e numéricos não significa que os trabalhos apresentados como experimentais não tenham apresentado contribuições no âmbito numérico nem vice-versa. Na verdade, essa divisão entre os campos de trabalho é muito mais didática, já que muitos dos autores aqui citados desenvolveram, em conjunto, também análises numéricas.

Como já foi dito na justificativa, não há, no Brasil, trabalhos experimentais sobre lajes steel deck em situação de incêndio publicados. Contudo, na literatura internacional há diversos exemplos ao longo dos anos, de experimentos realizados em diferentes dimensões e também com diferentes finalidades. A seguir, na Tabela 2, apresenta-se um resumo dos principais trabalhos experimentais que nortearam o desenvolvimento deste trabalho, com seus respectivos autores e dimensões das lajes ensaiadas. Na tabela, pode-se perceber ordem cronológica, em que os experimentos realizados (desde a década de 90) vêm avançando bastante ao longo dos anos, com vários autores desenvolvendo propostas e sugestões de trabalhos anteriores. Assim, será destacado basicamente o que cada um deles mostrou e como foram desenvolvidos.

Tabela 2 - Resumo de pesquisas no âmbito experimental abordadas neste trabalho.

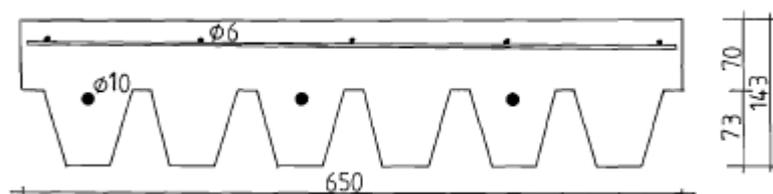
Referência	Tamanho da laje	Curva de incêndio
Hamerlinck, Twilt e Stark (1990)	3,2m x 0,9m	ISO-834
Foster et al (2007)	9,5m x 6,5m/ 9m x 6m/ 11m x 7m	Incêndio natural (queima de peças de madeira)
Wellman et al (2011)	4,6m x 4m	ASTM E119
Guo e Bailey (2011)	6,45m x 1,2m	Curvas paramétricas
Bednar et al (2013)	4,5m x 3m	ISO-834
Li, Zhang e Jiang (2017)	9m x 6,7m	ISO-834

Fonte: Elaborado pelo autor.

Apesar de apresentarem prioritariamente um modelo numérico em seu trabalho, Hamerlinck, Twilt e Stark (1990) utilizaram experimentos em escala real para avaliar e validar sua modelagem. Ainda na década de 80, muito antes dos ensaios de Cardington (FOSTER et al., 2007), por exemplo, já eram desenvolvidos na Europa experimentos com lajes mistas de aço e concreto do tipo steel deck em situação de incêndio. Foram propostos testes com diferentes condições de contorno, mas os autores avaliaram para a modelagem numérica resultados de um ensaio, com uma laje simplesmente apoiada em duas extremidades, ou seja, sujeita então a carregamento vertical e momento fletor positivo, apenas.

O aquecimento utilizado pelo forno seguiu a curva do incêndio-padrão da ISO-834, e a laje foi colocada acima dos apoios, de modo que não houve restrição axial. A seção transversal da laje ensaiada encontra-se na Figura 4 abaixo, com dimensões em mm, com destaque para a armação adicional utilizada (de 10 mm de bitola) e para a armação antirretração (6 mm de bitola, com espaçamento de 150 mm na malha). A altura do steel deck foi de 73 mm, a de concreto foi 70 mm e a total foi 143 mm. O vão apoiado foi de 3,2 m, e a carga aplicada foi uniformemente distribuída, de 5,8 kN/m². Através da comparação entre as temperaturas e deslocamentos medidos experimentalmente e aqueles calculados pelo modelo numérico, os autores concluíram que o modelo conseguiu representar bem o comportamento da laje ao fogo.

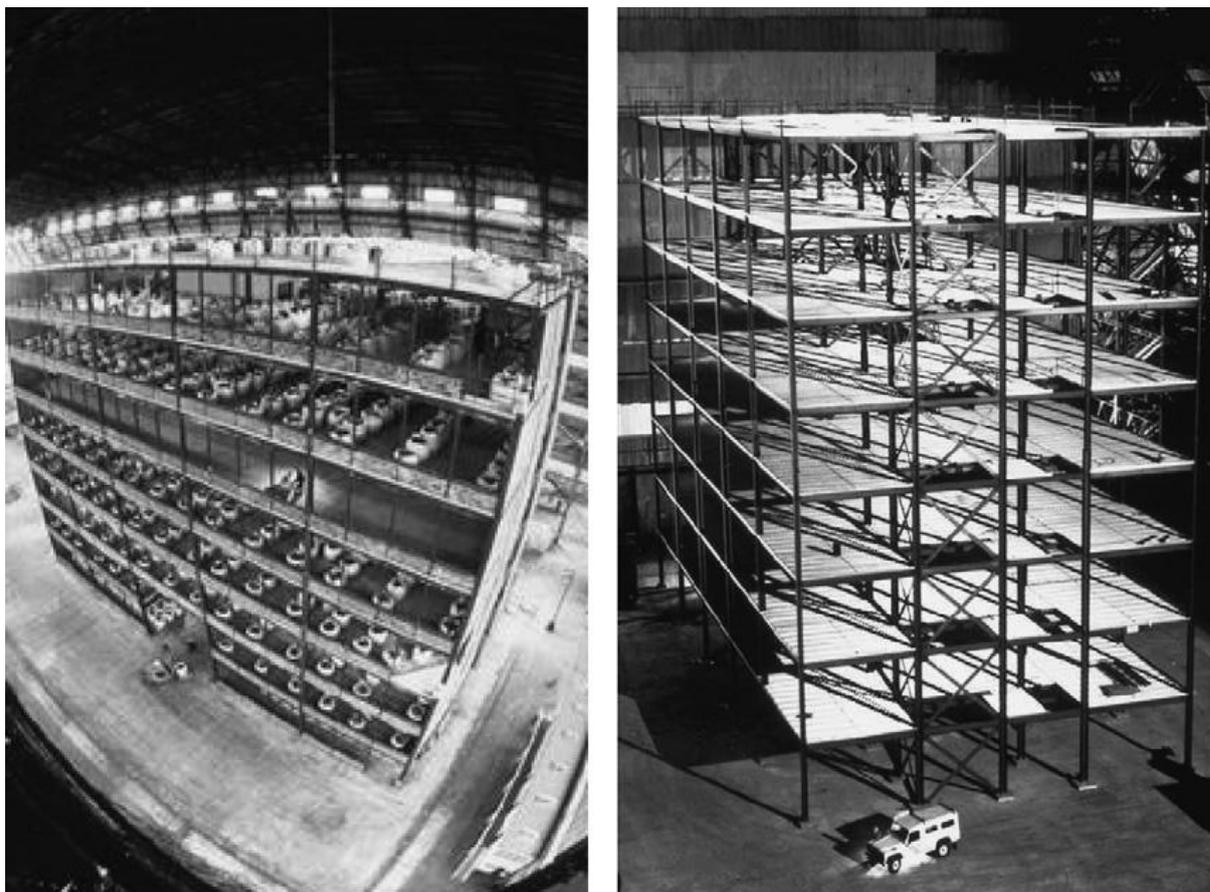
Figura 4 - Seção transversal de laje steel deck ensaiada, com cotas em mm



Fonte: Extraída de Hamerlinck, Twilt e Stark (1990).

Entre os anos de 1995 e 1996, foram conduzidos 6 testes em escala real, em um edifício de 8 pavimentos, construído para a finalidade de realização de ensaios ao fogo (FOSTER et al., 2007). A Figura 5 mostra bem o porte do edifício, todo construído com estruturas metálicas e lajes mistas de aço e concreto do tipo steel deck. Tudo isso foi feito em um laboratório em Cardington, no Reino Unido. Os ensaios foram muito bem documentados, e os resultados são usados até hoje.

Figura 5 - Fotos mostrando o edifício de 8 pavimentos, no laboratório de Cardington.



Fonte: Extraída de Foster et al. (2007).

A motivação desses ensaios na década de 90 foram dois grandes incêndios em grandes edifícios, ocorridos também no começo dessa mesma década, que foram os de Broadgate e o de Churchill Plaza, ambos no Reino Unido. Esses incêndios deram fortes indícios de que o comportamento em conjunto da estrutura era bem melhor do que o dos elementos isolados.

Esses 6 primeiros ensaios consistiram em incêndios naturais, com carga-incêndio de 40 kg/m^2 de madeira, e carga mecânica aplicada às lajes (com sacos de areia) de $5,48 \text{ kN/m}^2$. Assim, a grande finalidade foi avaliar o comportamento termoestrutural dos elementos estruturais do edifício, e uma das maiores inovações envolvidas foi o fato de, por ser um edifício real, os elementos não estavam isolados, e sim trabalhando em conjunto, diferentemente de muitos ensaios realizados anteriormente, como aqueles descritos em Hamerlinck, Twilt e Stark (1990). Além disso, a curva de aquecimento não foi a curva de incêndio-padrão, e sim uma curva de incêndio natural, causada pela ignição de componentes de madeira.

Nesse contexto, Foster et al (2007, p. 183) destacaram alguns dos principais problemas dos ensaios realizados em elementos estruturais isolados com a curva do incêndio-padrão:

- consideram apenas a fase de aquecimento, mas não consideram, por exemplo, o resfriamento ou a ventilação;
- não consideram a interação entre os diferentes elementos estruturais e a consequente redistribuição de esforços.

Assim, os resultados de ensaios em elementos isolados podem gerar dimensionamentos antieconômicos, pois subestimam a capacidade da estrutura, indicando um comportamento pior do que de fato ocorrerá. Após os ensaios, algumas conclusões foram desenvolvidas, tais como:

- foi previsto, considerando o elemento isolado, que as vigas secundárias (que não foram protegidas) poderiam suportar até uma temperatura crítica de 670 °C (de acordo também com o carregamento atuante), e na verdade em todos os ensaios essa temperatura nas vigas foi ultrapassada e não houve colapso.
- os pisos mistos, na maior parte dos casos, apresentaram deslocamentos verticais bem maiores do que o 1/30 do vão, que é um limite clássico de deslocamento.

Os pisos mostraram uma resistência maior do que o previsto inicialmente pelo cálculo do elemento isolado porque, quando inserido no conjunto estrutural, houve a ocorrência de alguns fenômenos, como o efeito de membrana (WANG, 1996). Esse efeito corresponde ao surgimento de um campo de tensões multidirecional na região central, que é resistido por uma anel de compressão, que ocorre nas bordas da laje. Esse comportamento é observado quando a laje sofre grandes deslocamentos verticais, e sua ocorrência está condicionada também ao fato de a laje estar apoiada verticalmente nas suas bordas.

Contudo, o grande objetivo do trabalho de Foster et al. (2007) foi na verdade desenvolver uma investigação numérica, termoestrutural, em elementos finitos, usando o software Vulcan, que foi desenvolvido pela Universidade de Sheffield, para avaliar o comportamento de estruturas de aço e mistas de aço e concreto em situação de incêndio, muito a partir dos resultados dos ensaios de Cardington.

Os resultados experimentais usados para validação da modelagem numérica são do 7º ensaio de Cardington, realizado em Janeiro de 2003, fortemente motivado também pelos acontecimentos do 11 de setembro de 2001. Um dos principais

objetivos desse novo ensaio foi avaliar o comportamento ao fogo das conexões viga-viga e viga-pilar.

Partindo desses resultados dos ensaios de Cardington, diversas outras pesquisas passaram a ser desenvolvidas, buscando avaliar não somente o efeito de membrana, mas também o comportamento do sistema de piso misto como um conjunto. Uma dessas pesquisas foi a apresentado em Wellman et al (2011), em que foram ensaiadas 3 lajes mistas, com dimensões de 3,96 m x 4,57 m. A pesquisa foi feita com pisos "finos", ou seja, de baixa espessura (da ordem de 10 cm), e também com concreto leve (baixa densidade).

Wellman et al (2011, p.1002) também destacam que uma das principais vantagens do sistema com o uso de laje mista poderia ser a dispensa no uso de proteção passiva contra o fogo nas vigas que apoiam as lajes, supondo que a redistribuição e também o efeito de membrana nas lajes garantiriam a estabilidade do conjunto, e que os resultados dos ensaios de Cardington (em que as vigas não foram protegidas contra incêndio) apenas ratificam isso. Assim, uma das hipóteses desse trabalho foi mostrar que, com a ocorrência do efeito de membrana, o uso de proteção passiva nas vigas internas pode ser reduzido ou eliminado, inclusive, o que geraria grandes economias no projeto.

Além disso, essa pesquisa também teve interesse em estudar a interação entre os elementos, por meio da avaliação das conexões entre as vigas metálicas, e também avaliar as diferentes respostas da estrutura sob diferentes condições de resfriamento: controlado e natural. Adicionalmente, para avaliar o uso de proteção, foram feitos testes com vigas protegidas e com vigas sem proteção, a fim de comparar os resultados e provar a hipótese inicial.

Algumas das conclusões mais importantes obtidas pelos autores podem ser destacadas, como mostram Wellman et al (2011, p. 1015):

- não foi verificada falha ou fratura de nenhum dos conectores, em nenhum dos ensaios, nem no aquecimento nem durante o resfriamento;
- de fato a laje mista consegue redistribuir grande parte da carga que algumas vigas não conseguem, mas nos casos avaliados nesse trabalho, a laje não conseguiu estabilizar o sistema e nem impedir a falha;
- nos casos com e sem proteção nas vigas foi verificada a falha do sistema, mas nos casos com as vigas internas protegidas a falha foi mais demorada. Independente da proteção, o mecanismo de falha foi o mesmo, com falha

repentina das vigas internas e depois externas (de bordo), levando a falha do sistema como um todo;

- como conclusão, a hipótese inicial foi invalidada, ou seja, para esse tipo de laje, com essa espessura (apenas 10 cm, aproximadamente) a retirada da proteção não é recomendada;
- os autores também reforçam que no experimento o piso (sistema laje + vigas internas e de bordo) estava isolado, e que estudos futuros considerando o efeito de conjunto (interação com as outras lajes, por exemplo) podem apresentar melhores resultados;
- além disso, também como sugestões para trabalhos futuros, recomenda-se novos testes com diferentes (maiores) espessuras de concreto, o que também deve levar a melhores resultados.

Uma das pesquisas de grande destaque nessa área experimental é o trabalho de Guo e Bailey (2011), cujos resultados serviram como validação de modelos numéricos diversos, como os deste trabalho e o de Santos (2014). Em Guo e Bailey (2011), apresentam-se os resultados experimentais de 9 ensaios, realizados em 9 amostras de lajes steel deck, sendo 2 ensaiadas à temperatura ambiente (a fim de conhecer e validar o comportamento mecânico), e as outras 7 ensaiadas em incêndio, a fim de avaliar o comportamento termoestrutural.

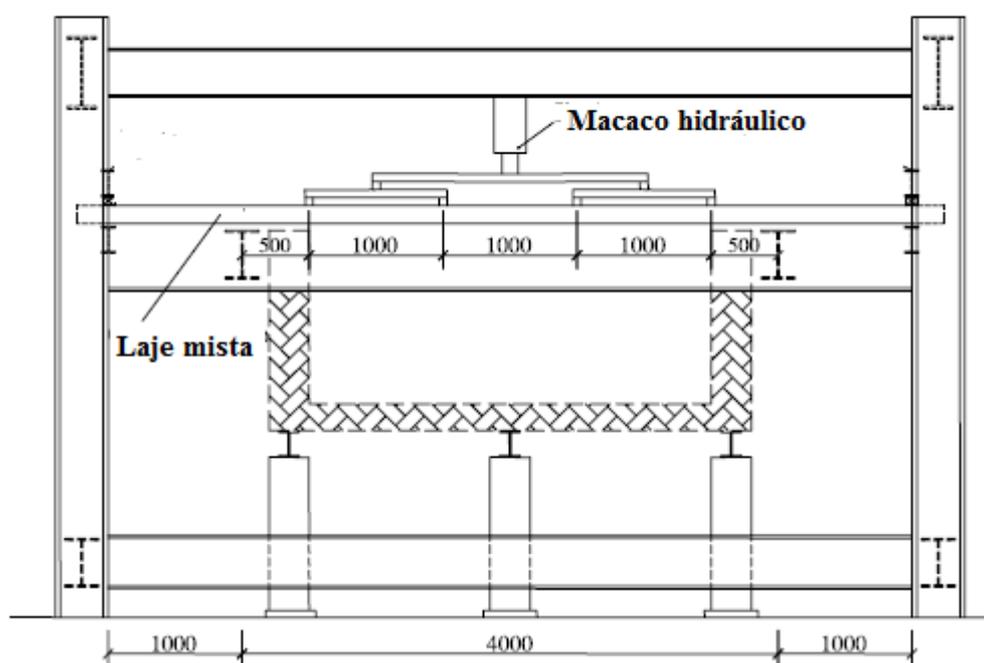
O esquema geral dos ensaios é apresentado na Figura 6 abaixo. Mais detalhes sobre como foram os ensaios são apresentados no capítulo 4, no item 4.2 (validação). Uma das principais motivações desse trabalho foi demonstrar a importância da fase de resfriamento no comportamento das lajes mistas, o que é ratificado por diversos autores, como Foster et al. (2007, p.183). Nesse sentido, algumas das conclusões de Guo e Bailey (2011, p.570) foram:

- em todos os casos ensaiados, as temperaturas na face não-exposta ao fogo das lajes e em pontos 40 mm abaixo (posição da malha antirretração no concreto) continuaram aumentando mesmo após o fim do aquecimento, ou seja, atingiram seus valores máximos durante a fase de resfriamento da estrutura;
- a taxa de resfriamento também tem grande influência nesse processo. Duas das lajes ensaiadas foram exatamente idênticas, incluindo a fase de aquecimento, mas em uma delas a taxa de resfriamento foi menor. Na

amostra sujeita à menor taxa verificou-se maiores temperaturas, tanto na face não-exposta quanto na malha antirretração;

- as maiores temperaturas na face não-exposta ao fogo das lajes foram observadas na fase de resfriamento após os aquecimentos mais longos, e os autores atribuem isso ao fato de o aquecimento mais longo ter possibilitado um tempo maior para ocorrência de condução ao longo do concreto da seção transversal;

Figura 6 - Esquema geral dos ensaios realizados, com cotas em mm.



Fonte: Adaptado de Guo e Bailey (2011).

Outra pesquisa que merece destaque é o trabalho apresentado por Bednar et al. (2013), no qual foi desenvolvida uma análise experimental para mostrar o efeito de membrana em concretos com fibras de aço atuando em substituição às barras de aço tradicionais, no sistema conhecido como Steel Fibre Reinforced Concrete (SFRC), que em uma tradução livre corresponde a concreto reforçado com fibras de aço. Esse é um dos poucos trabalhos que apresentam esse tipo de sistema, e teve o objetivo principal de validar o comportamento ao fogo das fibras.

Assim como Foster et al. (2007) e Wellman et al. (2011), Bednar et al. (2013, p. 111) também apresentam críticas aos ensaios de elementos estruturais isolados,

reforçando que o conjunto deve ter um comportamento significativamente melhor. Esses autores também questionam as prescrições normativas, que se baseiam por sua vez em testes em elementos isolados e que, portanto, podem levar a projetos antieconômicos.

Além disso, nesse trabalho, Bednar et al. (2013, p.112) apresentam uma das principais hipóteses que querem mostrar com os experimentos: que o uso de fibras em substituição às barras de aço convencionais em situação de incêndio deve trazer inclusive resultados tão bons quanto ou ainda melhores do que com o uso de armação clássica. Os autores defendem a hipótese, afirmando que as fibras de aço apresentam mais ductilidade; o material das fibras foi bem caracterizado, através de diversos ensaios realizados a temperatura ambiente e também a temperaturas elevadas, a fim de determinar tanto as resistências a temperatura ambiente quanto os fatores de redução de resistências e características mecânicas a altas temperaturas.

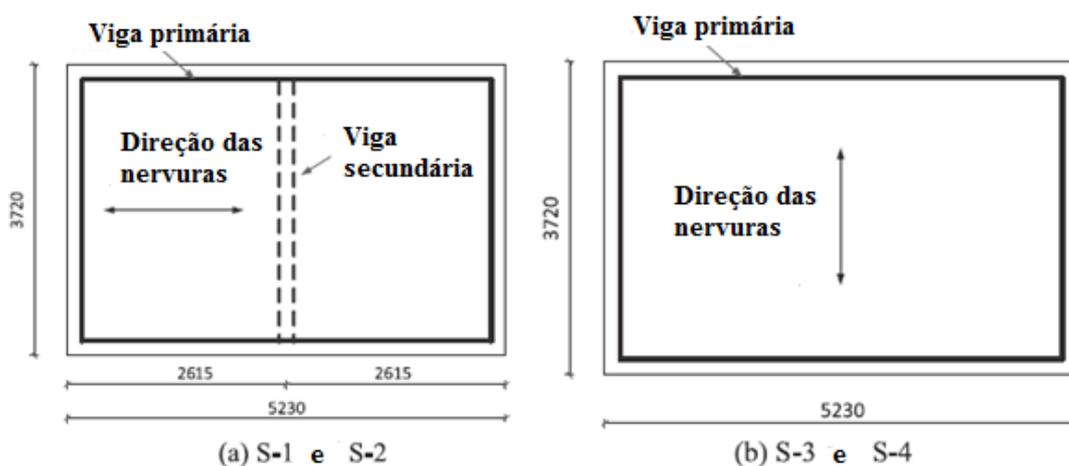
Foram realizados 2 ensaios de lajes mistas com concreto reforçado com fibras em situação de incêndio, e ambos os ensaios a resistência foi superior ao previsto pelo modelo de cálculo. No primeiro teste, a laje foi prevista para resistir 120 minutos, mas o colapso só foi observado após 195 minutos do início do teste, enquanto que o segundo teste foi encerrado aos 125 minutos, mas a falha não foi observada. O efeito de membrana foi observado, tanto pelo padrão de fissuras quanto pelas tensões medidas, e essa ação foi provavelmente um dos principais responsáveis pelo ganho de resistência em comparação ao proposto pela metodologia normativa.

Assim, as fibras de aço se mostraram dúcteis o bastante para possibilitar a ocorrência do efeito de membrana, e como conclusão geral os autores avaliaram que ela teve um desempenho muito bom em situação de incêndio. Um dos parâmetros que podem ser utilizados para comprovar essa ação das fibras é uma simples comparação entre os coeficientes de redução da resistência à tração. Para o concreto simples, os coeficientes de redução (tendo como base a temperatura de 20°C) para as temperaturas de 500°C e 600°C valem, respectivamente, 0,20 e 0,00, enquanto que para as fibras esses mesmos coeficientes valem, respectivamente, 0,59 e 0,26, ou seja, as fibras conservam melhor as propriedades por mais tempo.

Em um dos estudos experimentais mais recentes sobre o comportamento ao fogo das lajes mistas de aço e concreto do tipo steel deck, Li, Zhang e Jiang (2017)

apresentam os resultados de 4 experimentos realizados em escala real, com 4 diferentes lajes, a fim de avaliar como a direção das nervuras, a presença de viga secundária e a posição da armação antirretração podem influenciar no desempenho da estrutura. As amostras ensaiadas tinham 3,72 m x 5,23 m, e foram chamadas de S1, S2, S3 e S4. S1 e S2 foram ensaiadas com as nervuras paralelas ao maior vão, e com uma viga secundária não protegida localizada no meio do vão, conforme mostra a Figura 7. Já as lajes chamadas de S3 e S4 foram feitas com as nervuras paralelas a direção do menor vão, e sem a presença de vigas secundárias. Em todos os casos, foram colocadas vigas primárias protegidas contra fogo nas 4 bordas.

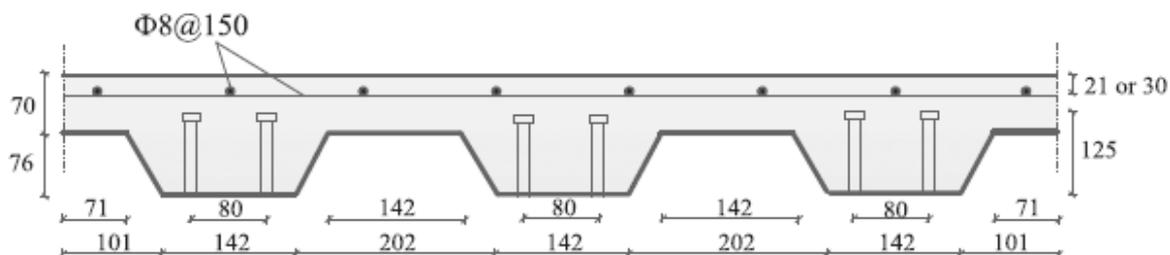
Figura 7 - Esquema geral dos ensaios realizados, com cotas em mm.



Fonte: Adaptado de Li, Zhang e Jiang (2017).

A seção transversal das lajes ensaiadas foi igual para todos os ensaios, e está indicada na Figura 8. A forma de aço tinha 76 mm de altura, enquanto que o capeamento de concreto foi de 70 mm, totalizando 146 mm de altura na laje completa. Não foi usada armação adicional, apenas a malha antirretração, na parte superior, com 8 mm de bitola e espaçamento de 150 mm, nas duas direções. A Figura 8 também destaca a presença dos conectores (é uma seção na região do apoio com as vigas), fundamentais para garantir o comportamento conjunto associado entre a laje e as vigas.

Figura 8 - Seção transversal das lajes ensaiadas, com cotas em mm.



Fonte: Adaptado de Li, Zhang e Jiang (2017).

As 4 lajes foram sujeitas ao aquecimento no forno pela curva do incêndio-padrão da ISO-834, mas durante tempos distintos: 75 min, 90 min, 90 min e 100 min, para as amostras S1, S2, S3 e S4, respectivamente. O carregamento mecânico foi feito por um macaco hidráulico, que transferiu as cargas para vigas de transferência, que por sua vez transferiram para placas triangulares, e essas placas para as lajes, conforme Figura 9.

Primeiro foi aplicado o carregamento, depois foi feito o aquecimento, e por fim, a fase de resfriamento, que foi natural, consistindo na circulação natural do ar para dentro do forno após o término do aquecimento. Ressalta-se que toda a investigação de temperaturas na seção transversal, deslocamentos, deformações e tensões foi mantida durante todo o ensaio, inclusive na fase de resfriamento, tal como fizeram Guo e Bailey (2011) e Wellman et al. (2011), que concluíram a importância dessa fase no comportamento da estrutura.

Figura 9 - Esquema de transferência de carga mecânica nos ensaios.



Fonte: Adaptado de Li, Zhang e Jiang (2017).

Algumas das conclusões mais significativas obtidas com os experimentos são apresentadas em Li, Zhang e Jiang (2017, p. 75):

- as maiores temperaturas, tanto na forma de aço quanto na armação antirretração, ocorreram durante a fase de resfriamento, ou seja, mesmo após o fim do aquecimento as temperaturas continuaram a crescer. No caso da armação antirretração, a temperatura chegou a subir em torno de 40 °C mesmo após cerca de 10 minutos do fim do aquecimento;
- quando o efeito de membrana não é considerado, ou seja, pelos cálculos propostos em Eurocode 4 (2005), a resistência ao fogo pelo critério da capacidade resistente é da ordem de 40 minutos, mas nos ensaios após 100 minutos não foi verificada falha. Isso sugere que a metodologia proposta pelo Eurocode 4 (2005) é conservadora;
- ainda avaliando o Eurocode 4 (2005), pelo critério de isolamento térmico a resistência ao fogo seria da ordem de 90 minutos, mas mesmo após os 100 minutos de ensaio a temperatura na face não-exposta foi da ordem de 100 °C, ou seja, ainda longe dos critérios de falha da ISO-834 para isolamento térmico, por exemplo. Isso também indica que a metodologia proposta pelo Eurocode 4 (2005) é conservadora;
- nas lajes com a viga secundária no meio (S1 e S2), as primeiras fissuras no concreto surgiram justamente no meio, devido ao momento fletor negativo; isso elevou bastante as temperaturas na face não-exposta nessa região;
- a ocorrência do efeito de membrana foi confirmada pelas medidas de tensões realizadas por extensômetros ao longo dos ensaios, que confirmaram as tensões de tração na região central, na malha antirretração e tensões de compressão nas bordas;
- foram medidos e observados nas lajes grandes deslocamentos verticais, da ordem de 1/20 do vão, sem contudo ocorrer colapso em nenhum momento, o que indicou um bom desempenho ao fogo das lajes ensaiadas;
- em comparação com os resultados previstos pelo Eurocode 4 (2005), foi verificado pelo cálculo de temperaturas, por exemplo, que essa metodologia normativa pode ser aplicada a diferentes geometrias de lajes, e que é bastante conservadora.

2.3 ESTUDOS NUMÉRICOS

No âmbito da modelagem numérica, há mais trabalhos publicados, e alguns no Brasil, inclusive. Percebe-se uma variedade de softwares usados na análise, bem como diferentes estratégias de otimização utilizadas, como uso de simetria ou diferentes tipos de elementos finitos, por exemplo. Assim, apresenta-se na Tabela 3 abaixo um resumo das principais pesquisas abordadas neste trabalho.

Tabela 3 - Resumo das pesquisas no âmbito numérico abordadas neste trabalho.

Referência	Software utilizado
Lim et al. (2004)	SAFIR
Guo (2012)	ABAQUS
Santos e Munaiar Neto (2013)	TNO DIANA
Cordeiro (2016)	VULCAN e MACS+

Fonte: Elaborado pelo autor.

Lim et al. (2004, p. 1081) apresentam em seu trabalho uma discussão sobre o uso de elementos do tipo shell (ou casca, em português) na modelagem tridimensional em elementos finitos de lajes de concreto armado ou mistas. Os autores afirmam que softwares comerciais, tais como VULCAN, ADAPTIC e ABAQUS possuem elementos do tipo casca que podem ser bem utilizados para representar o concreto armado.

Assim, um dos principais objetivos desse trabalho é apresentar a validação do elemento tipo casca para um outro software: O SAFIR, um programa de elementos finitos desenvolvido na Universidade de Liège, na Bélgica, para desenvolver análises térmica e termoestruturais de estruturas de aço, concreto e mistas em situação de incêndio. Para tanto, foi conduzida uma modelagem numérica no referido software, apenas de lajes isoladas, simplesmente apoiadas, sem interação com outras estruturas, assim como foram os experimentos conduzidos e usados para a validação dos resultados numéricos desse trabalho.

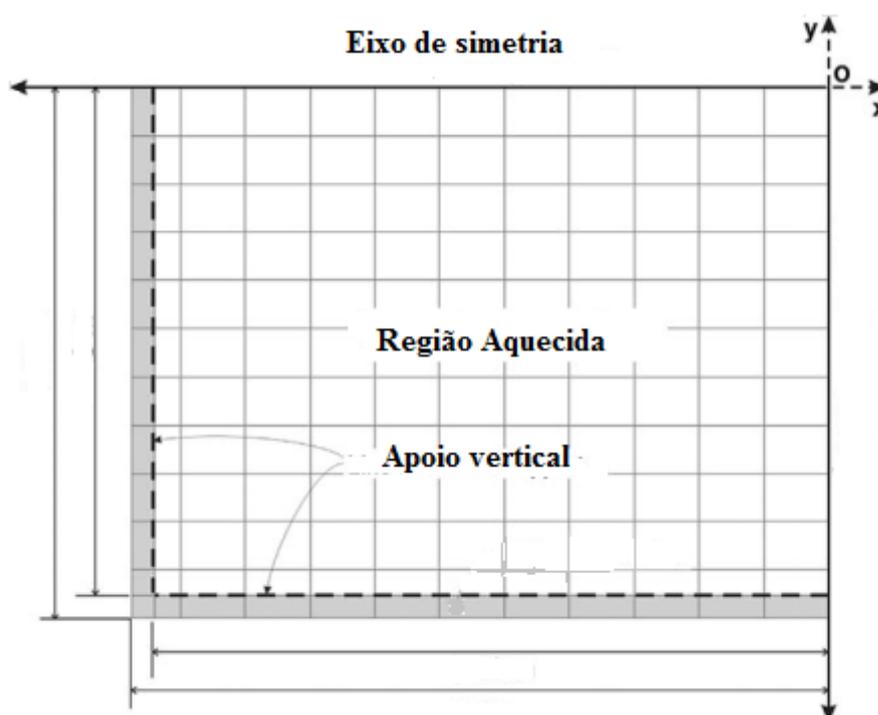
Alguns dos pressupostos da análise no SAFIR são listados por Lim et al. (2004, p. 1083):

- o spalling (ou lascamento, em português) no concreto não é modelado;
- não há escorregamento relativo entre as barras de aço e o concreto;

- a umidade do concreto não é considerada, mas a influência dela na transferência de calor é considerada a partir da adequação das propriedades térmicas.

As lajes ensaiadas (e as modeladas, portanto) tinham dimensões de 3,3 m por 4,3 m, com espessura total de 130 mm, sendo 55 mm a altura da forma de aço e 75 mm o capeamento de concreto. A fim de aproveitar a simetria do problema, usou-se uma estratégia bastante comum nas modelagens de estruturas: modelou-se apenas um quarto da laje, como mostrado na Figura 10 abaixo. As bordas destacadas de escuro na figura representam as vigas de borda.

Figura 10 - Uso de 1/4 da laje e condições de simetria.



Fonte: Lim et al (2004).

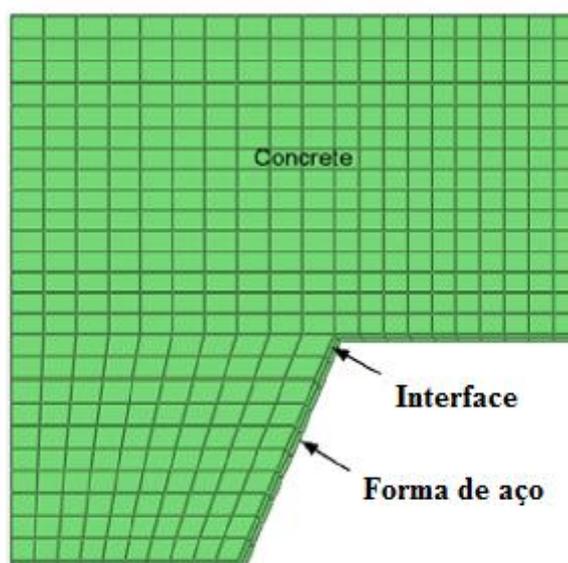
Como conclusões, Lim et al. (2004, p. 1090) apontam que o modelo numérico com uso de elementos finitos do tipo casca mostrou uma boa correlação com os resultados experimentais, tanto avaliando a distribuição de temperaturas quanto os deslocamentos verticais. Além disso, chama-se a atenção também para uma das maiores dificuldades na modelagem da laje mista: o descolamento da forma de aço do concreto. Autores como Li, Zhang e Jiang (2017) mostraram o quanto esse

fenômeno influencia na distribuição de temperaturas e, conseqüentemente, também pode provocar mudanças no comportamento mecânico.

A partir dos resultados experimentais de Guo e Bailey (2011), Guo (2012) desenvolveu e apresentou análises termoestruturais no software ABAQUS. Inicialmente, foi feita a validação do modelo numérico, e posteriormente foram desenvolvidas análises paramétricas, variando, por exemplo, resistência do concreto, espessura da forma de aço e tipo de malha antirretração utilizada.

As análises térmica e termoestrutural foram conduzidas separadamente. Para análise térmica, a distribuição longitudinal de temperaturas foi assumida como uniforme, de modo que o modelo utilizado foi bidimensional, como mostrado na Figura 11 abaixo. Nesse modelo, foi criada uma interface, para simular a interação aço-concreto, com espessura de 1 mm e condutividade de 0,8 W/mK.

Figura 11 - Modelo bidimensional, usado na análise térmica.



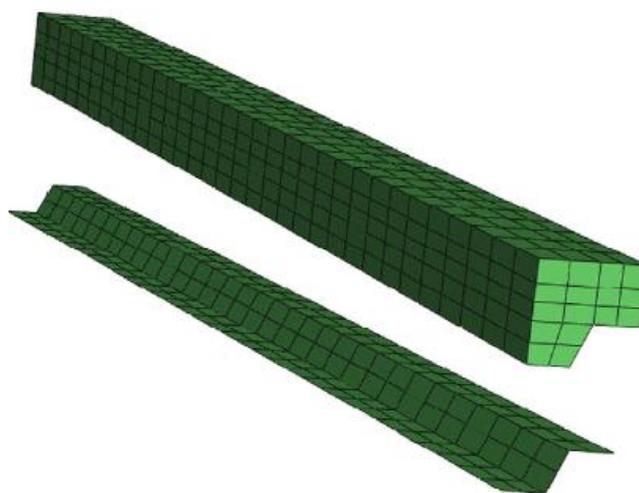
Fonte: Adaptado de Guo (2012).

As propriedades térmicas para a forma de aço steel deck foram definidas de acordo com o proposto no Eurocode 4 (2005). Para as propriedades do concreto, no entanto, o autor optou por uma abordagem diferente, para tentar representar melhor a complexa transferência de calor no concreto, diretamente influenciada pela umidade presente nesse material. A água livre por um lado melhora a condutividade, mas a partir dos 100 °C começa a evaporar, o que representa perda de calor e desacelera a transferência de energia ao longo da seção transversal.

Assim, Guo (2012, p. 98) calcula a condutividade de forma distinta para as fases de aquecimento e resfriamento, supondo que durante a segunda etapa o concreto já tem muito pouco ou praticamente nenhuma água livre interna. Dessa maneira, é possível levar em consideração a umidade do concreto. Essa maneira de calcular as diferentes condutividades resulta em valores maiores do que os propostos no Eurocode 4 (2005), e é discutida em um outro trabalho. Além dessas características, a emissividade do aço é adotada como sendo constante e igual a 0,7, e os coeficientes de convecção para a forma de aço e para o topo da laje valem, respectivamente, $25 \text{ W/m}^2 \text{ K}$ e $10 \text{ W/m}^2 \text{ K}$, conforme recomendação do Eurocode 4 (2005).

Já para a análise termoestrutural, foi adotado um modelo tridimensional, conforme Figura 12 abaixo. Foram usados elementos sólidos para representar o concreto, elementos do tipo casca para representar o steel deck, elementos do tipo treliça para representar a armação antirretração e molas não-lineares para simular o comportamento na interface entre os materiais aço e concreto. Nesse modelo, percebe-se a modelagem separada da forma de aço steel deck e do concreto da laje, e também é possível perceber o uso de mais uma estratégia, que hoje já está consagrada na literatura, para diminuição do tempo de processamento computacional: o uso de parte da estrutura e simetria. No caso apresentado, o modelo utilizado foi meia nervura, ou seja, metade de uma nervura de uma laje.

Figura 12 - Modelo tridimensional, usado na análise termoestrutural.



Fonte: Guo (2012).

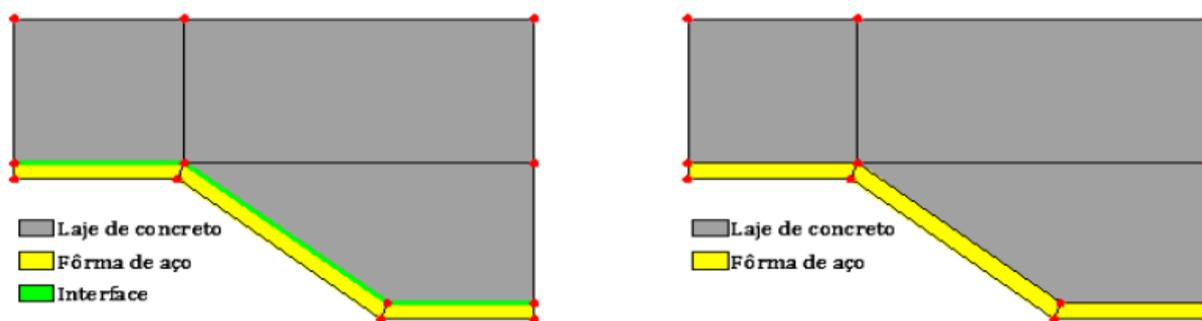
Como algumas das principais conclusões apresentadas por Guo (2012, p.104), destacam-se:

- houve uma boa correlação entre os resultados numéricos e os experimentais, tanto para as temperaturas quanto para os deslocamentos;
- assim, após a validação, análises paramétricas foram desenvolvidas. Observou-se, por exemplo, que a variação da resistência característica à compressão do concreto tem pouca influência no campo de deslocamentos. Um aumento de cerca de 40% na resistência do concreto não causou mudanças visíveis nos deslocamentos;
- ainda na análise paramétrica, o tamanho da malha antirretração no começo do aquecimento não teve muita influência, mas com o aquecimento esse efeito se acentuou, e quanto maior a bitola da malha menores os deslocamentos e deformações;
- por fim, com relação a espessura da forma de aço, a influência foi bem mais considerável do que os outros fatores. Um aumento na espessura, de 0,9 mm para 1,2 mm causa diminuições bastante consideráveis nos deslocamentos verticais.

Outra pesquisa que merece destaque é a primeira brasileira citada neste trabalho: o trabalho de Santos e Munaiar Neto (2013). Nesse trabalho, apresenta-se uma modelagem numérica bidimensional no pacote computacional TNO DIANA, para obtenção dos campos térmicos para a seção transversal da laje, inicialmente. A estratégia utilizada foi o uso do modelo em meia nervura, assim como em Guo (2012), mas em contraponto os autores utilizaram modelos com e sem interface entre os materiais aço e concreto, a fim de estabelecer um comparativo, como mostrado na Figura 13 abaixo. As laterais são consideradas como adiabáticas, e foram utilizados elementos finitos bidimensionais.

Além da presença ou não da interface, Santos e Munaiar Neto (2013) também avaliaram outras variáveis, como a emissividade do aço (variável e constante), umidade e condutividade do concreto, resistência térmica na interface aço-concreto. Assim, a primeira parte desse trabalho correspondeu a uma calibração do modelo numérico, a partir dos resultados experimentais da literatura internacional, como os apresentados em Guo e Bailey (2011).

Figura 13 - Modelos bidimensionais no TNO DIANA, usado na análise térmica.



Fonte: Extraído de Santos e Munaiar Neto (2013).

No modelo numérico, foram utilizados diversos coeficientes propostos no Eurocode 4 (2005), como, por exemplo, o coeficiente de convecção para a forma de aço: $25 \text{ W/m}^2 \text{ K}$. Contudo, para a emissividade do aço na forma steel deck, em que é proposto pelo Eurocode 4 (2005) um valor constante igual a 0,70, os autores testam também na modelagem numérica variações desse valor com a temperatura. Assim como Hamerlinck, Twilt e Stark (1990, p. 119) já haviam usado em seu trabalho essa mesma emissividade variando com a temperatura, com a justificativa de que com o fogo a camada de zinco vai derretendo, o que muda o valor da emissividade.

Além da emissividade, os autores também acrescentam um pico no valor do calor específico do concreto, entre as temperaturas de $100 \text{ }^\circ\text{C}$ a $200 \text{ }^\circ\text{C}$, para considerar a perda de calor para a evaporação da água interna do concreto. Esse pico é tanto maior quanto mais umidade o concreto tiver. As demais propriedades foram determinadas seguindo o recomendado pelo Eurocode 4 (2005). Por fim, a resistência térmica na região da interface foi um valor que os autores discutiram não ter encontrado na literatura, mas adotaram para a calibração 3 valores: 25 , 50 e $100 \text{ W/m}^2 \text{ }^\circ\text{C}$, como coeficientes de condução térmica na interface.

Após essa fase inicial de calibração do modelo numérico, Santos e Munaiar Neto (2013) utilizaram os campos térmicos do TNO DIANA para implementar uma metodologia de cálculo do Momento Fletor Plástico, explicado neste trabalho no item 2.1, que corresponde ao método indicado tanto pelo Eurocode 4 (2005) quanto pela ABNT NBR 14323 (2013) para o cálculo da capacidade resistente das lajes mistas do tipo steel deck em situação de incêndio. As saídas térmicas foram necessárias para levar em consideração a variação das características mecânicas dos materiais aço e concreto, e assim calcular o valor do momento em função do tempo. Todo esse procedimento foi implementado usando o Visual Basic 11.0, da Microsoft.

Assim, Santos e Munaiar Neto (2013) desenvolveram também análises termoestruturais, construindo as curvas de Momento Resistente em função do tempo, para 4 casos distintos:

- emissividade igual a 0,70 e ausência de interface entre aço e concreto;
- emissividade variável, de 0,09 a 0,40 e ausência de interface entre aço e concreto;
- emissividade igual a 0,70 e modelo com interface entre aço e concreto, com coeficiente de condução térmica de $50 \text{ W/m}^2 \text{ }^\circ\text{C}$;
- emissividade variável, de 0,09 a 0,40 e modelo com interface entre aço e concreto, com coeficiente de condução térmica de $50 \text{ W/m}^2 \text{ }^\circ\text{C}$;

Ressalta-se que, para todos os casos, foi utilizada a mesma resistência térmica na interface (quando foi considerada), porque esse valor foi o que apresentou as melhores correlações nas análises térmicas. Além desses 4 casos, também foram calculados os valores considerando as prescrições do Eurocode 4 (2005) e também da ABNT NBR 14323 (2013), que são praticamente as mesmas nesse exemplo. O aquecimento foi por meio da curva de incêndio-padrão.

A geometria e as características do estudo de caso foram definidas de acordo com fabricantes brasileiros e usos clássicos na construção civil. Para o concreto, a resistência característica à compressão adotada foi de 20 MPa e umidade de 2%. Já para o aço, resistência ao escoamento foi de 280 MPa para a forma, 500 MPa para as barras da armação longitudinal adicional (que teve diâmetro de 16 mm), 600 MPa para a malha da armação antirretração (que consistiu em barras de 5 mm de diâmetro, espaçadas de 100 mm nas duas direções). Foram analisados também dois tipos diferentes de steel deck, um com 50 mm de altura e o outro com 75 mm, mas em ambos a altura total da laje (já com o concreto) foi a mesma: 140 mm.

Além de avaliar todos os 4 casos já citados e as prescrições normativas, os autores também desenvolveram análises paramétricas, para avaliar a contribuição apenas da forma de aço steel deck, apenas da armação longitudinal adicional e a do conjunto, bem como o posicionamento da armação adicional. Quanto mais próxima da forma de aço a armação adicional estiver, em princípio é pior para a resistência porque mais perto da forma significa que as temperaturas se elevam mais rapidamente, diminuindo a contribuição dessa armação para a resistência. Por outro lado, mais próxima da base indica um maior braço de alavanca no cálculo do momento, o que aumenta a resistência. Assim, buscou-se uma otimização do local.

Então, após todas essas validações e análises térmicas e termoestruturais, Santos e Munaiar Neto (2013) obtiveram uma série de conclusões interessantes, que podem ser resumidas e destacadas abaixo:

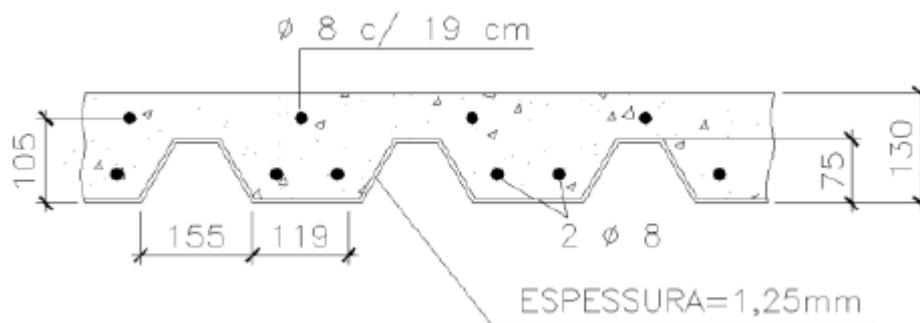
- o modelo numérico com interface (com coeficiente de condução térmica de $50 \text{ W/m}^2 \text{ }^\circ\text{C}$) e emissividade constante igual a 0,70 foi o que melhor representou as temperaturas no concreto, em comparação com os valores experimentais;
- as temperaturas obtidas com os modelos numéricos na forma de aço foram, para todos os casos, maiores do que as medidas experimentalmente. Isso ocorreu provavelmente devido a movimentação de água livre no concreto, um fenômeno que ocorre nos experimentos e que é de difícil modelagem numérica. Na prática, considerar essas temperaturas é estar a favor da segurança, pois se considera resistências menores para o steel deck, já que este está sujeito a maiores temperaturas;
- considerando somente a contribuição da forma de aço, aos 30 minutos de incêndio-padrão, a resistência cai para cerca de 15 a 20% do valor à temperatura ambiente, o que sugere a necessidade o uso de armação adicional, para suportar o momento fletor positivo;
- existe uma posição ótima para armação adicional, que pode ser calculada, e depende basicamente do tempo de resistência ao fogo e da altura total da laje. Os autores apresentam um método para esse cálculo e gráficos para obtenção desses valores.

Cordeiro e Silva (2016) analisam um caso real, que foi executado com armação adicional: o mezanino da estação de metrô Butantã, em São Paulo. Nesse trabalho, os autores apresentaram 3 maneiras de dimensionar a laje mista de aço e concreto: pelo método simplificado da ABNT NBR 14323 (2013), pelo método simplificado de Bailey (2000), que inclui o efeito de membrana, e pela modelagem no software de elementos finitos Vulcan, já apresentado por Foster et al. (2007).

Nesse sentido, o grande objetivo desse trabalho foi também, além de avaliar as 3 diferentes abordagens, verificar se havia necessidade de intervenção ou se o projeto foi econômico, considerando que já havia sido executado (o mezanino já estava pronto, e circulavam diariamente cerca de 20 mil pessoas). O piso misto avaliado tem dimensões de 21,46 m por 6,20 m, com vigas transversais distanciadas de 2,68 m; a laje mista tinha 130 mm de altura total, sendo 75 mm de steel deck (com espessura de 1,25 mm e resistência ao escoamento de 280 MPa, como

mostrado na Figura 14). A resistência característica a compressão do concreto foi de 35 MPa, e as armações adicionais de 8 mm de bitola, conforme mostrado abaixo.

Figura 14 - Seção transversal de laje steel deck, com destaque para as armações longitudinais adicionais.



Fonte: Adaptado de Cordeiro e Silva (2016).

O tempo requerido de resistência ao fogo especificado em projeto foi de 90 minutos. Usando o método normativo, concluiu-se que esse tempo mínimo foi atendido, indicando um projeto seguro, mas sem muita folga, ou seja, sem a armação adicional esse tempo dificilmente seria atingido. A seção transversal utilizada para a modelagem é apresentada na Figura 14, com destaque para as armações longitudinais adicionais (tanto positivas quanto negativas), já que a laje é contínua, ou seja, apoiada em várias vigas.

Pelo método de Bailey, os autores concluíram inclusive que poderia ter sido utilizada uma solução ainda mais econômica, com menos armação, devido a resistência adicional causada pelo efeito de membrana. Cordeiro e Silva (2016, p.41) também destacam que uma das principais vantagens associadas a essa metodologia é justamente dar mais flexibilidade ao projetista, que pode substituir o uso de proteção passiva nas vigas pelo aumento da altura da laje ou mesmo por um aumento nas seções dos perfis utilizados.

3 ANÁLISE EXPERIMENTAL

3.1 PROGRAMA EXPERIMENTAL

O programa consistiu no desenvolvimento de três ensaios de resistência ao fogo, sendo um ensaio para cada amostra. As amostras foram lajes mistas com fôrma de aço incorporada, cada uma com 2,30m de comprimento. Nos três casos, a forma de aço utilizada foi a mesma: 840mm de largura, 71mm de altura e 0,8 mm de espessura, e demais dimensões mostradas na Figura 15. As características físicas desse aço foram obtidas diretamente pelo catálogo do fabricante: aço do tipo ASTM A 653, com resistência ao escoamento $f_y = 280$ MPa.

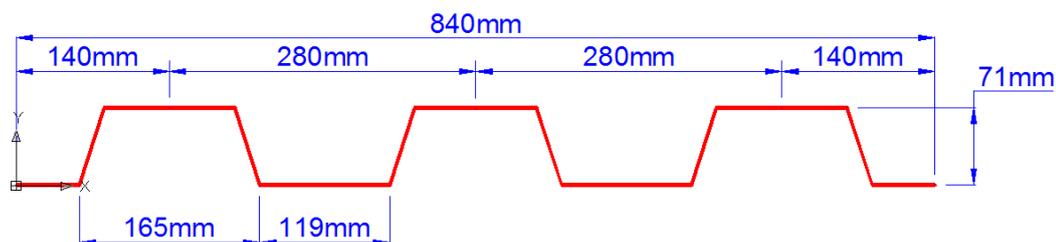
O capeamento de concreto foi o que variou em cada ensaio: a primeira amostra teve 13 cm de altura total, a segunda, 16 cm e a terceira 19 cm, como resumido na Tabela 4. O concreto utilizado foi feito no próprio laboratório de estruturas da Universidade Federal de Pernambuco, com uma resistência à compressão aproximada (medida a partir de corpos de prova moldados na concretagem das lajes), aos 30 dias, de 20 MPa para o concreto das duas primeiras lajes e 30 MPa para a laje do terceiro ensaio. Além do concreto e da forma de aço, foram utilizadas armaduras de retração do concreto (as chamadas malhas antifissuração), cujas dimensões variaram de acordo com a altura de concreto usada, e seguiram a recomendação do próprio fabricante. Para a laje de 13 cm de altura, a malha usada foi Q - 75, enquanto que para as demais lajes foi usada a malha Q - 138.

Tabela 4 - Resumo dos ensaios realizados.

Ensaio	Altura da laje (cm)	Peso Próprio (kgf/m²)	Sobrecarga (kgf/m²)	Carga Total (kgf/m²)
1	13	234	450	684
2	16	303	450	753
3	19	372	450	822

Fonte: Elaborado pelo autor.

Figura 15 - Esquema cotado da forma de aço steel deck utilizada.



Fonte: Elaborado pelo autor.

O objetivo primordial dos experimentos foi avaliar o comportamento ao fogo das lajes steel deck. Para isso, foi utilizado um módulo do forno elétrico do laboratório, na posição horizontal, e foram criados aparelhos de apoio, para que a laje ficasse suspensa por cima do forno, simulando uma situação de incêndio real, em que a forma de aço recebe diretamente o calor do fogo. Além do forno, foi colocado também um carregamento sobre a laje, na forma de blocos de vedação de concreto simples. A sobrecarga gerada por esses blocos foi da ordem de 450 kgf/m^2 , além do peso próprio da laje, a fim de simular um carregamento uniformemente distribuído, somado com os revestimentos e piso. A Figura 16 abaixo mostra a foto da amostra de 16 cm posicionada sobre os aparelhos de apoio, e com todo o carregamento colocado. O vão do ensaio foi de 2,20 m.

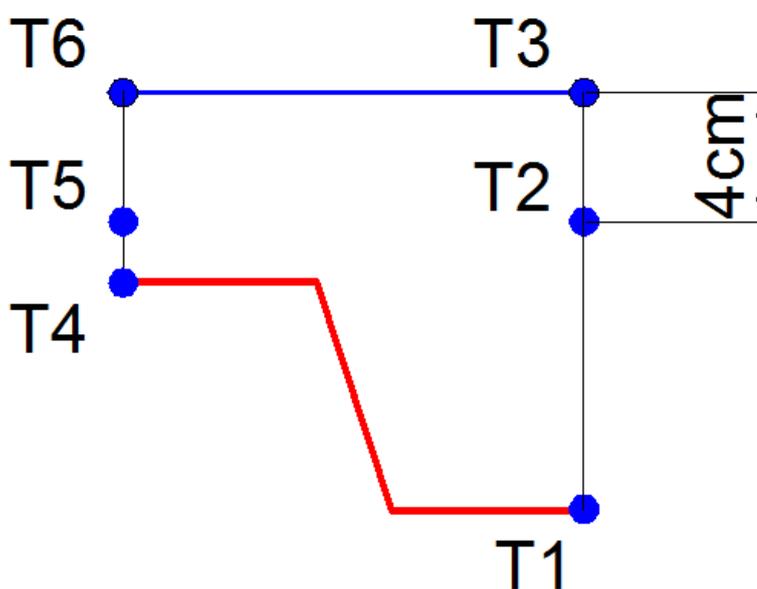
Figura 16 - Laje de 16 cm, posicionada acima do forno e com o carregamento mecânico.



Fonte: O autor.

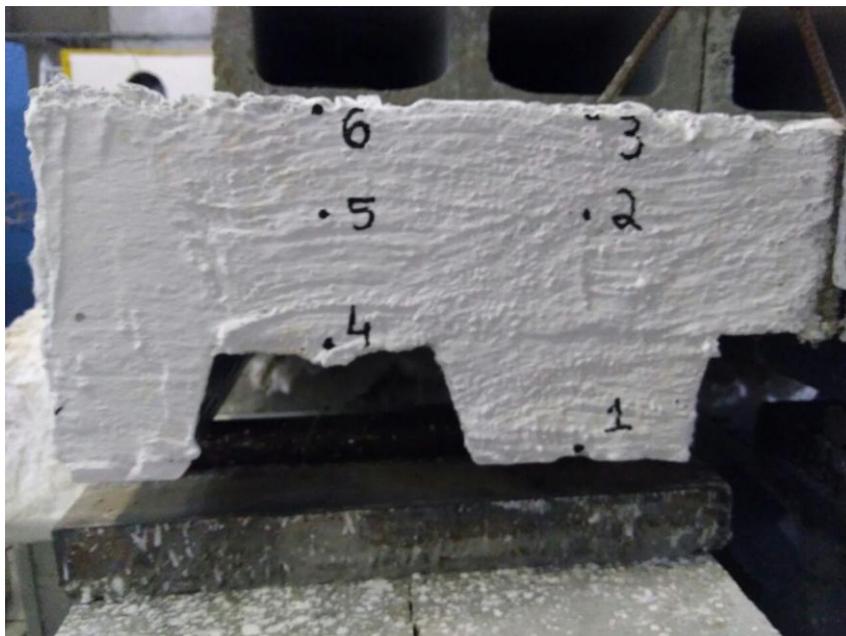
Como objetivos específicos dos ensaios, destacam-se: avaliar a distribuição de temperaturas ao longo da seção transversal e os deslocamentos no meio da laje. Para tanto, foram colocados termopares do tipo K ao longo de pontos da seção transversal, conforme Figura 17 e Figura 18. Cada amostra foi instrumentada com 6 termopares: 2 soldados na forma de aço (T1 e T4), 2 soltos no concreto (T2 e T5) a 4 cm da face não-exposta, e 2 na face não-exposta (T3 e T6). Os termopares T1, T2, T4 e T5 foram posicionados antes da concretagem, enquanto que T3 e T6 foram posicionados no momento do ensaio. Além desses, foram utilizados também mais 2 outros termopares, sendo um dentro do forno (para controlar a temperatura interna) e outro acima da face não-exposta, próximo aos transdutores, a fim de garantir que a temperatura nesses equipamentos não excedesse o máximo recomendado pelo fabricante.

Figura 17 - Esquema geral, mostrando o posicionamento dos termopares ao longo da seção transversal da laje.



Fonte: Elaborado pelo autor.

Figura 18 - Foto do ensaio da laje de 19 cm, mostrando o posicionamento dos termopares ao longo da seção transversal da laje.



Fonte: O autor.

Figura 19 - Foto do detalhe do posicionamento dos transdutores potenciométricos, no meio da laje.



Fonte: O autor.

Além da instrumentação para avaliar temperaturas, foram também foram posicionados transdutores potenciométricos de deslocamentos no meio, como mostra a Figura 19, para avaliar os deslocamentos na região central da laje. Nessa última figura, é possível ver também o detalhe da ancoragem utilizada, ou seja, os transdutores estavam ligados a uma estrutura separada da laje e indeformável, para não falsear o resultado.

3.2 RESULTADOS

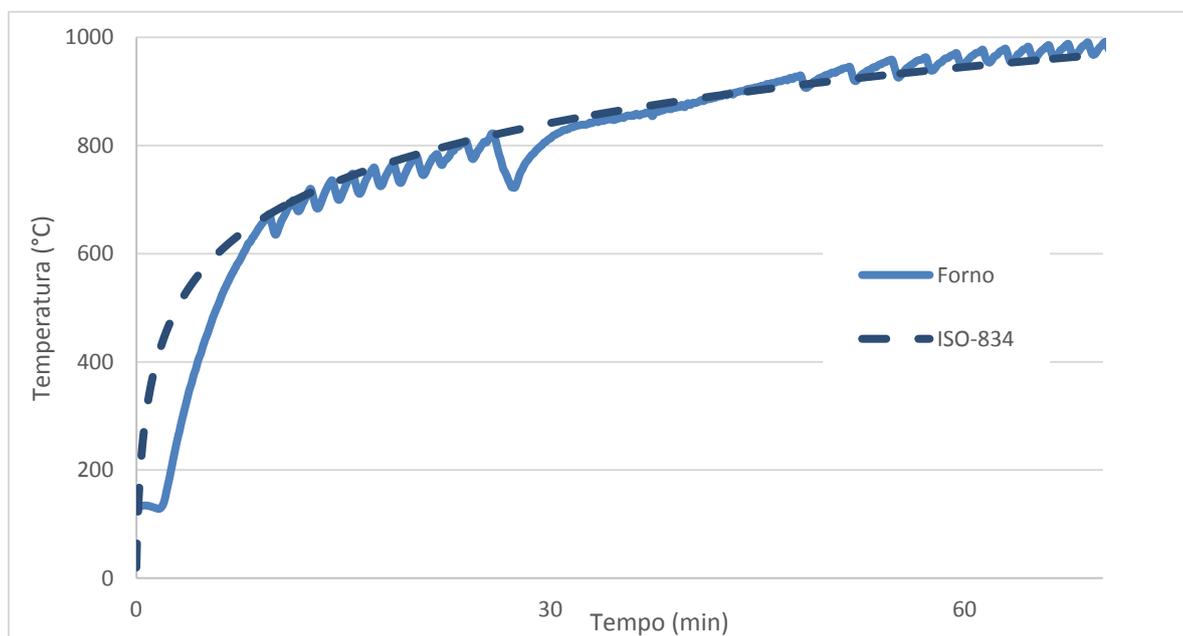
3.2.1 Ensaio 1

Nesta seção, são apresentados os resultados dos três ensaios, tanto de temperaturas quanto deslocamentos. Esse primeiro ensaio foi, muito provavelmente, um dos primeiros experimentos realizados com lajes steel deck em situação de incêndio no Brasil. Para esse ensaio, os transdutores de deslocamentos foram escolhidos de forma inadequada, pois a medida máxima deles foi atingida aos 20 minutos de ensaio; assim, aos 30 minutos de ensaio, a carga mecânica e os transdutores foram retirados. Contudo, as medidas de temperaturas foram realizadas até o final do ensaio, aos 70 minutos. O ensaio foi interrompido nesse momento porque a falha de acordo com os critérios da ISO-834 (tanto de isolamento térmico quanto de capacidade resistente) foram atingidos.

A Figura 20 mostra a comparação entre as temperaturas desenvolvidas no forno elétrico e as temperaturas dos gases segundo a curva do incêndio-padrão, da norma internacional ISO-834 (1999). Assim, fica claro que a correspondência foi alcançada, pois o forno conseguiu seguir a curva do incêndio-padrão, e esse comportamento foi verificado também para os demais ensaios.

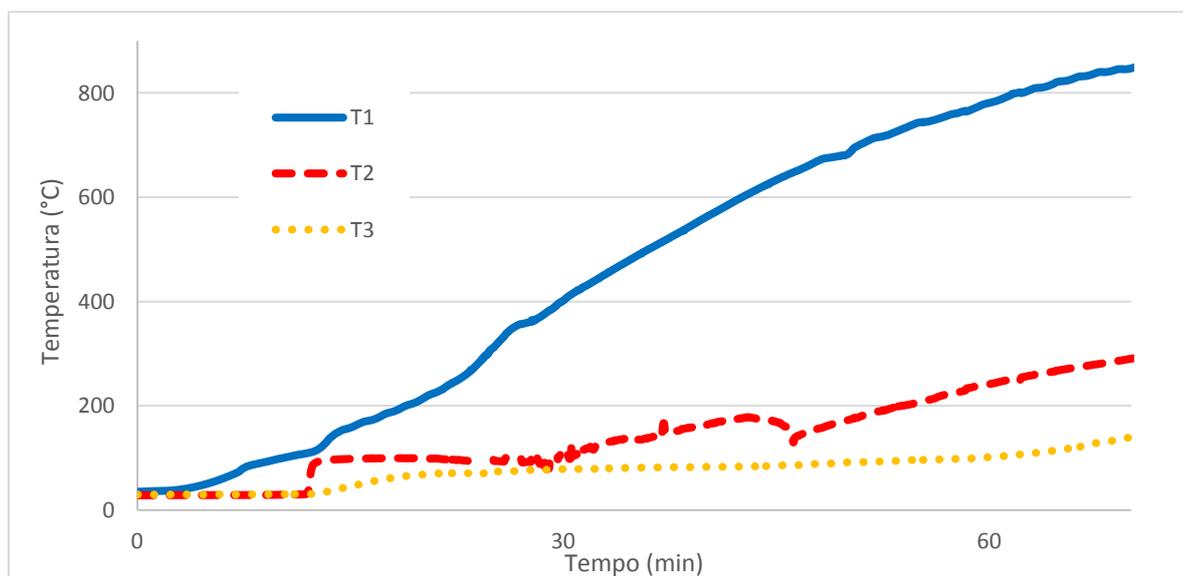
As Figura 21 e Figura 22 mostram a evolução de temperaturas ao longo do tempo, para os 6 pontos de medição na seção transversal. Pode-se perceber que os 3 pontos na reentrância (T4, T5 e T6) tiveram uma evolução mais rápida e pronunciada nas temperaturas. Nessas mesmas figuras, pode-se observar também que as temperaturas na forma de aço steel deck (T1 e T4) tiveram aumentos muito rápidos de temperaturas, enquanto os demais pontos, bastante acima da forma, tiveram aumentos bem menos pronunciados.

Figura 20 - Comparação entre evolução de temperaturas do forno elétrico e a curva do incêndio-padrão.



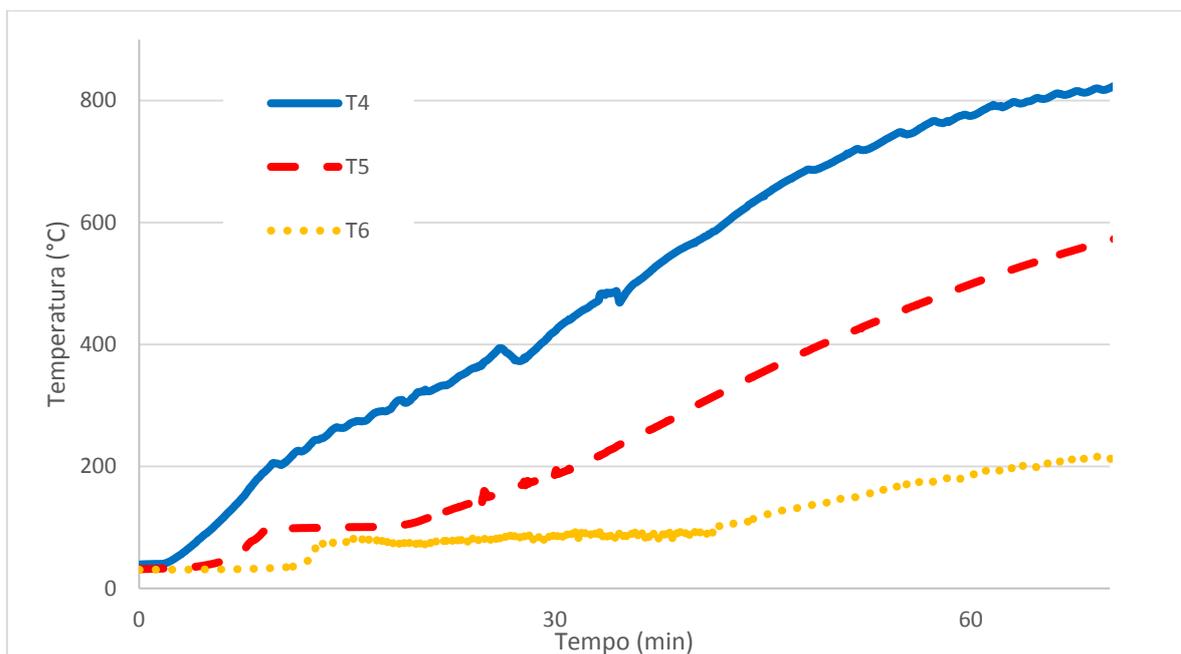
Fonte: Elaborado pelo autor.

Figura 21 - Curvas de temperatura (°C) x tempo (min) dos termopares T1, T2 e T3, ensaio 1.



Fonte: Elaborado pelo autor.

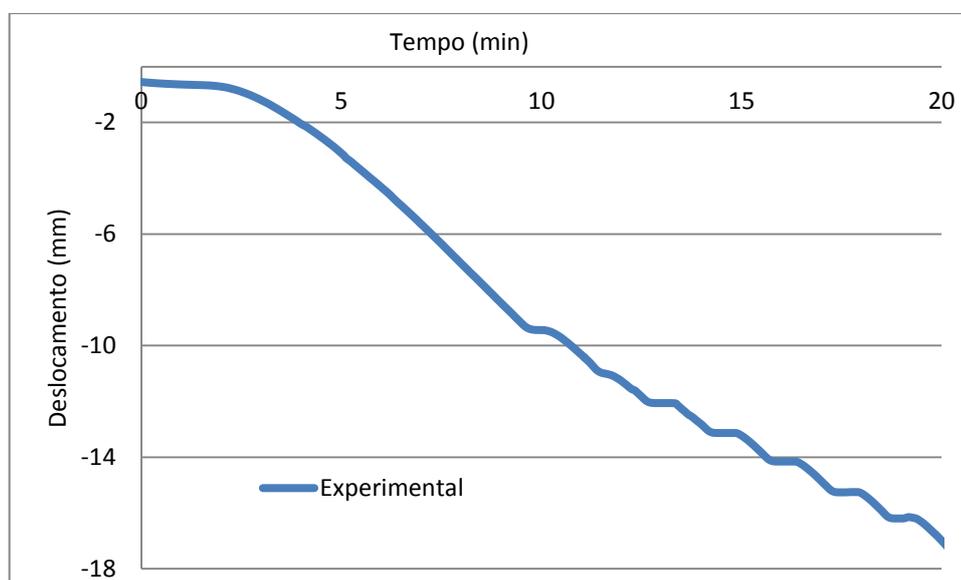
Figura 22 - Curvas de temperatura (°C) x tempo (min) dos termopares T4, T5 e T6, ensaio 1.



Fonte: Elaborado pelo autor.

Já a Figura 23 mostra a curva de deslocamento em função do tempo. Como já foi dito, essa curva contém apenas os 20 primeiros minutos de ensaio, porque foi o tempo que levou para os transdutores atingirem a sua capacidade máxima. Utilizou-se 2 transdutores, no meio da laje, mas a correlação entre os dois foi bastante boa, originando uma superposição no gráfico; portanto, preferiu-se adotar apenas os resultados apenas de um deles, já que o outro apenas ficaria superposto.

Figura 23 - Curva de deslocamento (mm) x tempo (min) para o meio do vão, ensaio 1.



Fonte: Elaborado pelo autor.

Ainda no ensaio 1, merecem destaque algumas observações, também pontuadas em outras pesquisas experimentais. A Figura 24 destaca o fenômeno do descolamento entre a forma de aço e o concreto, também observado e pontuado por autores como Li, Zhang e Jiang (2017), como sendo um fenômeno que pode trazer grande influência na distribuição de temperaturas na seção transversal.

Figura 24 - Descolamento entre a forma de aço e o concreto, ensaio 1.



Fonte: Foto tirada pelo autor.

Também foi verificado um fenômeno de destaque pontuado por Hamerlinck, Twilt e Stark (1990) e por Santos e Munaiar Neto (2013), que corresponde ao derretimento da camada mais superficial da galvanização da forma, ocasionando o aspecto indicado na Figura 25.

Figura 25 - Situação da forma de aço após o total resfriamento da laje, ensaio 1.



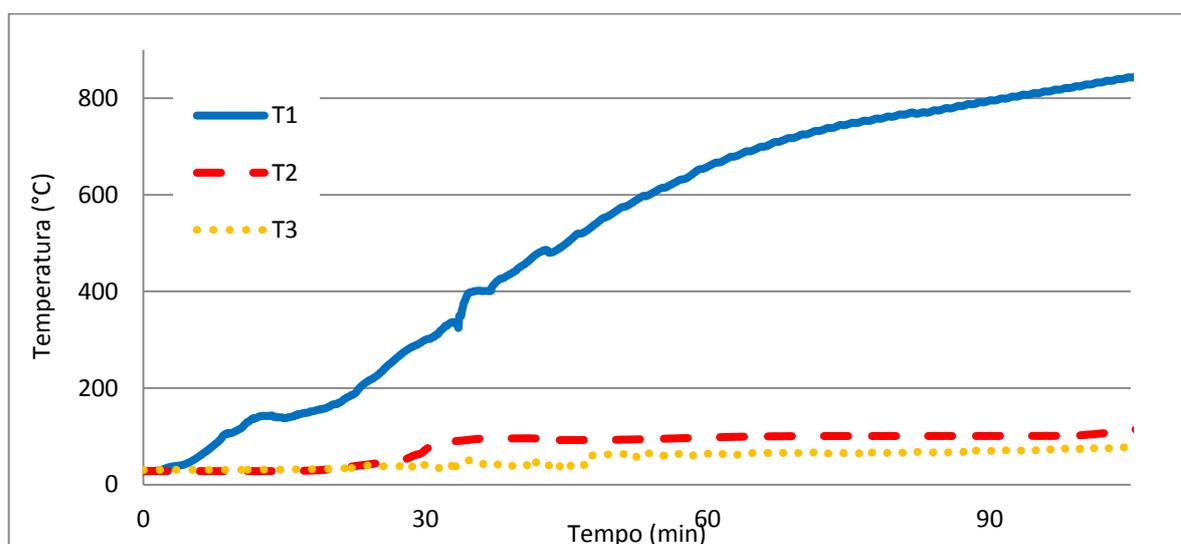
Fonte: O autor.

3.2.2 Ensaio 2

Para o ensaio 2, com a laje de altura 16 cm, esperava-se um tempo maior de ensaio, bem como evolução temporal de temperaturas e deslocamentos menos pronunciada do que na primeira laje, de 13 cm de altura total. Dessa forma, corrigiu-se grande parte dos problemas relativos ao ensaio 1, o que tornou possível obter todas as medidas de temperaturas e deslocamentos durante todo o tempo desse experimento. As Figura 26 e Figura 27 mostram a evolução de temperaturas ao longo do tempo, para os 6 pontos de medição na seção transversal. Pode-se perceber que ao comparar as temperaturas no steel deck, tem-se um comportamento bastante similar ao primeiro ensaio; contudo, ao comparar as temperaturas no concreto e principalmente na face não-exposta, as diferenças são consideráveis: para os pontos no concreto (T2 e T5), as diferenças entre os dois ensaios são da ordem de 200 °C, enquanto que para os pontos na face não-exposta (T3 e T6), as diferenças chegam a ordem dos 100 °C, com as maiores temperaturas medidas no ensaio 1.

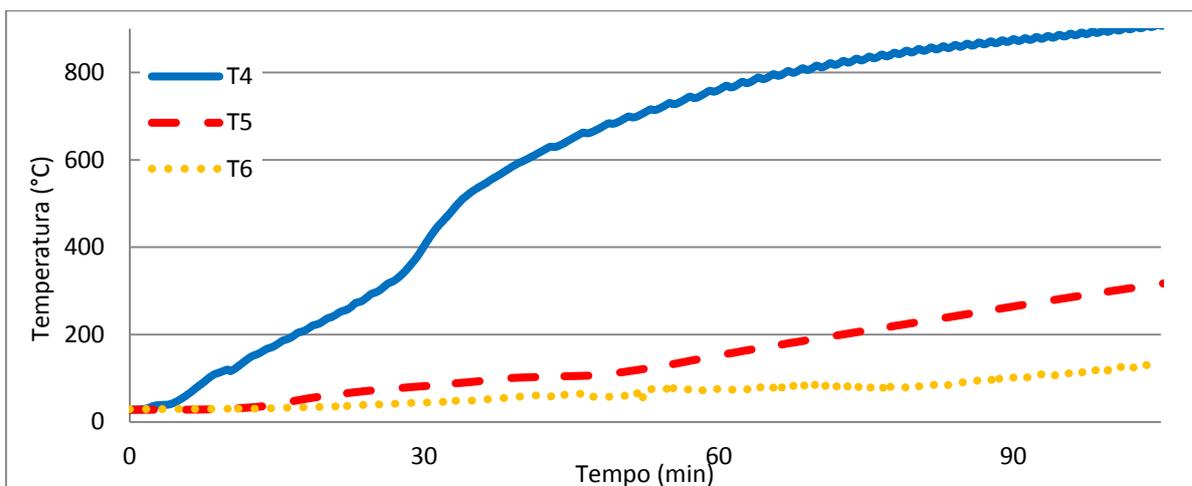
Já a Figura 28 mostra a curva do deslocamento em função do tempo. Ainda no começo do aquecimento, é possível perceber diferenças em relação aos resultados do ensaio 1, onde no começo do aquecimento era possível estimar uma taxa de deslocamentos aproximadamente constante e da ordem de 1 mm/min. Contudo, para o ensaio 2, essa taxa é bem menor, da ordem 0,5 mm/min.

Figura 26 - Curvas de temperatura (°C) x tempo (min) dos termopares T1, T2 e T3, ensaio 2.



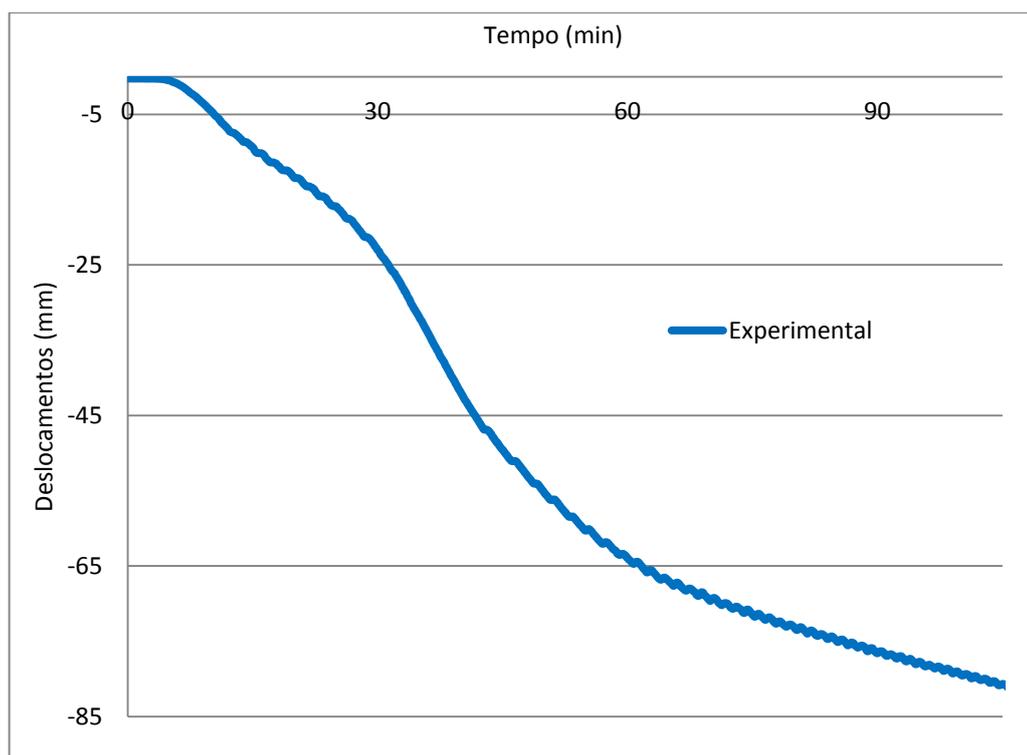
Fonte: Elaborado pelo autor.

Figura 27 - Curvas de temperatura (°C) x tempo (min) dos termopares T4, T5 e T6, ensaio 2.



Fonte: Elaborado pelo autor.

Figura 28 - Curva de deslocamento (mm) x tempo (min) para o meio do vão, ensaio 2.

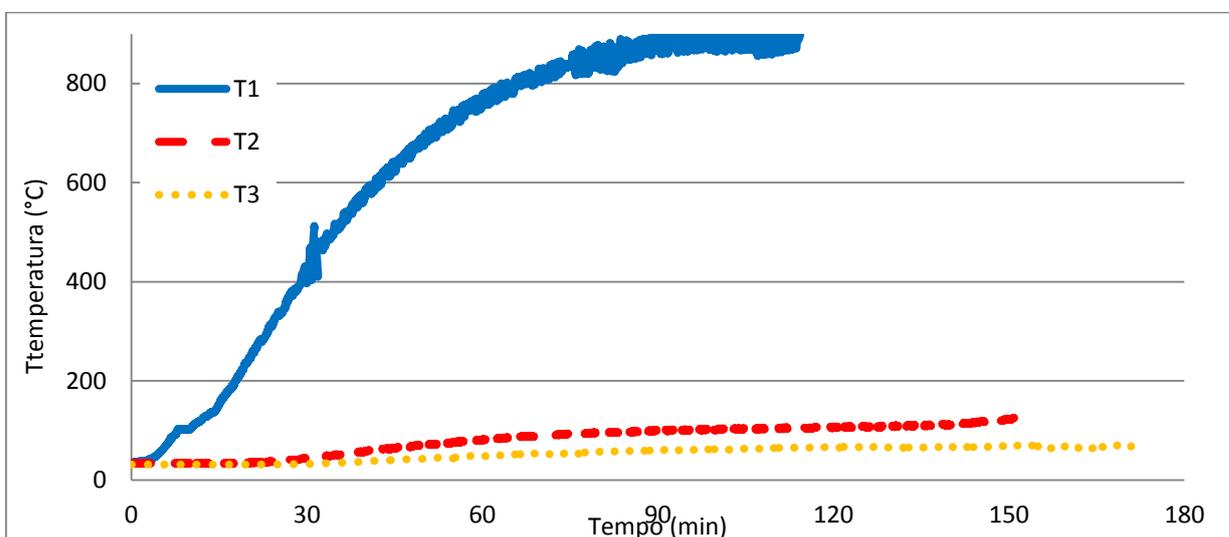


Fonte: Elaborado pelo autor.

3.2.3 Ensaio 3

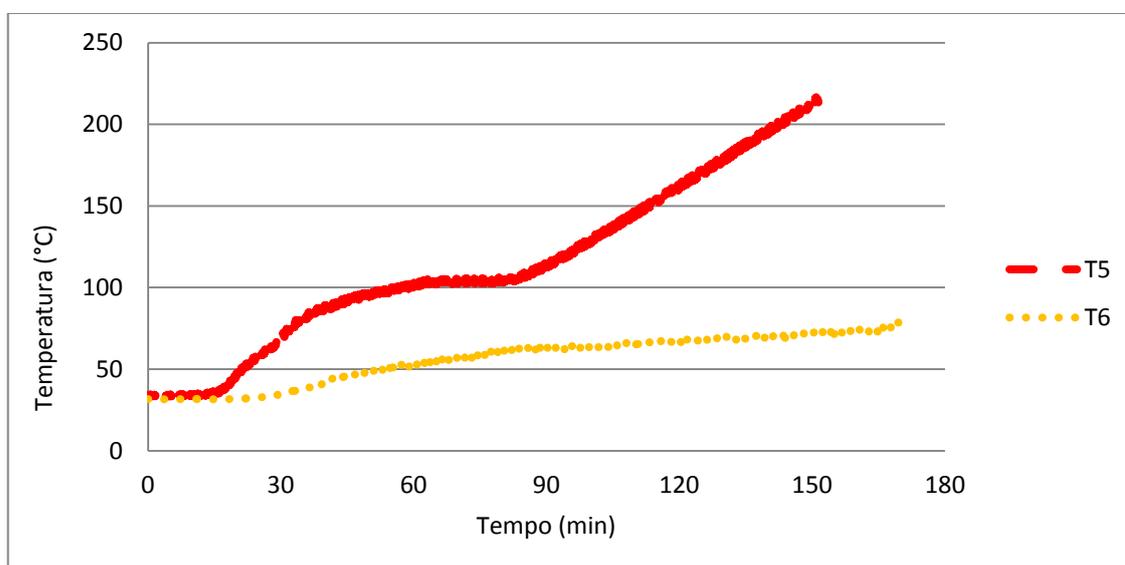
Para o ensaio 3, com a laje de altura 19 cm, o ensaio foi desenvolvido por mais tempo. Houve, entretanto, problemas com leituras em alguns termopares. O termopar T4, por exemplo, que estava soldado no steel deck, apresentou problemas na hora do ensaio, e não pode ser trocado por estar dentro da laje. Contudo, pelos resultados dos outros ensaios, percebe-se que as temperaturas em T1 (também na forma de aço) são bastante similares a T4, de modo que não houve prejuízo significativo.

Figura 29 - Curvas de temperatura (°C) x tempo (min) dos termopares T1, T2 e T3, ensaio 3.



Fonte: Elaborado pelo autor.

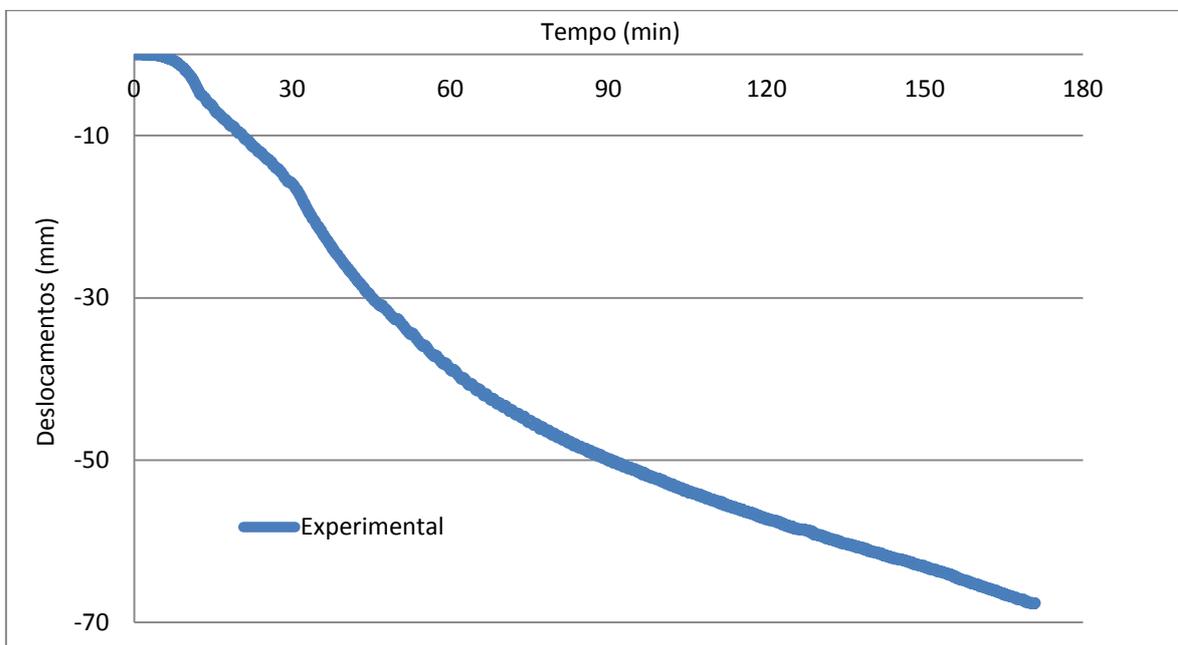
Figura 30 - Curvas de temperatura (°C) x tempo (min) dos termopares T5 e T6, ensaio 3.



Fonte: Elaborado pelo autor.

Os termopares posicionados em T2 e T5 (ambos no concreto, dentro da laje) apresentaram problemas apenas ao final da medição, e não conseguiram medir satisfatoriamente os 20 minutos finais de ensaios. Os termopares colocados na face não-exposta T3 e T6 não apresentaram problemas, e mediram satisfatoriamente durante os 170 minutos de ensaio, assim como os dois transdutores posicionados no meio do vão. As Figura 29 e Figura 30 mostram a evolução de temperaturas ao longo do tempo, para os 5 pontos de medição na seção transversal. À exceção do steel deck (cujas temperaturas se comportaram semelhantemente aos dois primeiros ensaios), as temperaturas no concreto da laje e também na face não-exposta apresentaram valores bem menores do que nos dois primeiros ensaios. Com relação a curva de deslocamentos, mostrada na Figura 31 observa-se taxas menores do que as observadas no ensaio 2, inclusive. O deslocamento na laje do ensaio 3 ao final dos 170 minutos de ensaio ainda foi menor do que o valor correspondente aos 105 minutos na laje do ensaio 2, o que sugere um ganho de resistência significativo na laje com a maior altura.

Figura 31 - Curva de deslocamento (mm) x tempo (min) para o meio do vão, ensaio 3.



Fonte: Elaborado pelo autor.

3.3 COMPARAÇÃO COM O MÉTODO NORMATIVO

3.3.1 Critério do isolamento térmico

Neste item, aplica-se a metodologia descrita no item 2.1, para o cálculo da resistência ao fogo pelo critério do isolamento térmico. Como já foi descrito, a ABNT NBR 14323 (2013) propõe um método tabular, aqui chamado de método simplificado, que consiste basicamente em utilizar a geometria da laje e calcular uma altura efetiva ou espessura equivalente, e a partir desse valor consultar uma tabela. Esse valor será, então, obtido e comparado com o valor obtido pelo método experimental, que aqui será chamado de método avançado, que é como a referida norma trata as abordagens experimentais e numéricas. Esse procedimento foi realizado, e os resultados encontram-se resumidos na Tabela 5.

Contudo, para descobrir a resistência ao fogo pelo método avançado, é preciso uma avaliação da curva de temperatura em função do tempo. Essa avaliação foi feita conforme os critérios da ISO 834 (1999). Para o isolamento térmico, o critério está associado às temperaturas na face não exposta da laje. Quando a média de temperatura de todos os pontos dessa face ultrapassar em mais de 140°C a temperatura inicial ou se pelo menos um ponto qualquer ultrapassar a temperatura inicial em mais de 180°C, é considerado que nesse momento houve a falha. Para o experimento, a temperatura inicial (ou ambiente) foi de 30 °C. No caso das lajes mistas com fôrma incorporada, fica evidente a partir dos resultados dos ensaios que o critério de falha será o segundo, ou seja, a temperatura em um ponto isolado e não a média. Isso ocorre porque como a forma de aço é formada por nervuras e reentrâncias, nesses pontos a temperatura aumenta muito mais rapidamente, porque há bem menos concreto entre a face não-exposta e o steel deck nesses locais.

Assim, essa diferença entre os resultados pode ser observada a partir da comparação entre os termopares chamados de T3 e T6, em qualquer um dos ensaios realizados. Esses dois estão localizados na face não-exposta, mas o T6 logo acima da reentrância e o T3 na região com mais concreto (ver Figura 17 no capítulo 2). Então, utilizando os resultados dos termopares T6 para todos ensaios, pode-se descobrir o tempo exato em que essa temperatura ultrapassa em mais de 180 °C a temperatura inicial, e esse tempo corresponde a resistência ao fogo pelo

método avançado. Esse procedimento está descrito na Figura 32, e os resultados estão resumidos na Tabela 5.

Tabela 5 - Resistência ao fogo dos 3 ensaios, pelo critério do isolamento térmico.

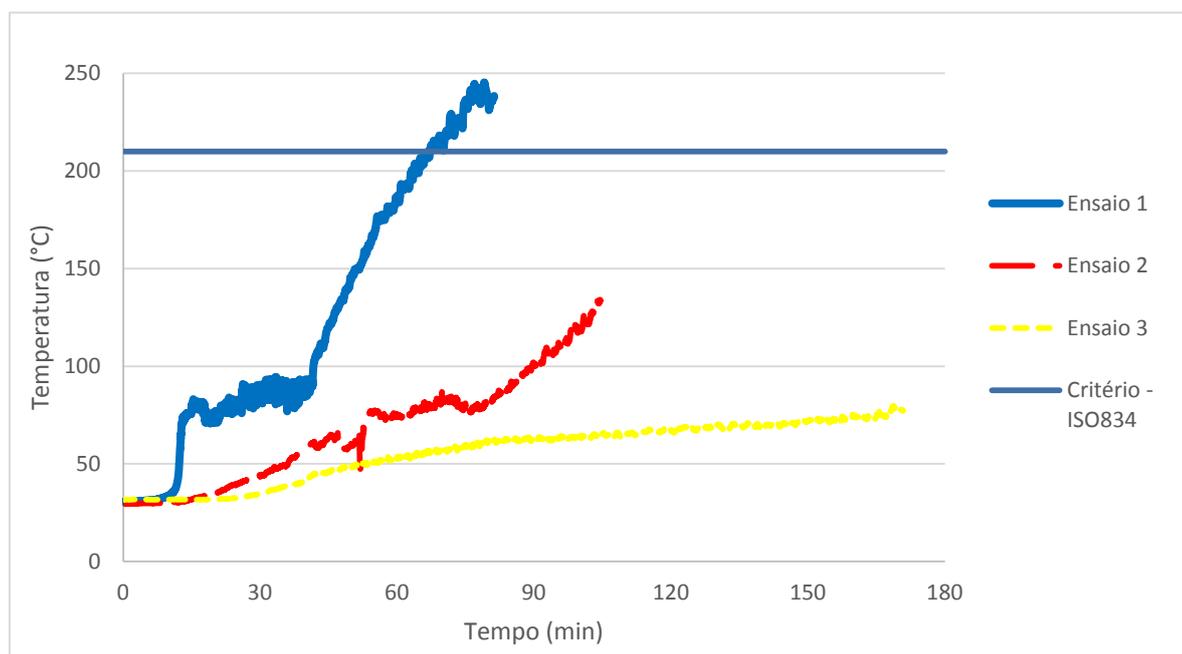
h (cm)	Altura Efetiva (mm)	RF Método Simplificado (min)	RF Experimento (min)
13	94,5	60	66
16	124,5	120	Não atingiu a falha
19	154,5	180	Não atingiu a falha

Fonte: Elaborado pelo autor.

Sendo assim, pela análise da Figura 32 e da Tabela 5, percebe-se a laje de 13 cm, do ensaio 1, teve uma resistência ao fogo superior ao previsto pela método normativo. Para as lajes dos ensaios 2 e 3, não é possível afirmar com certeza, pois os ensaios foram encerrados antes do valor indicado (por conta do critério de capacidade resistente, como será mostrado no próximo item), mas a Figura 32 mostra claramente a tendência de crescimento das temperaturas dos ensaios 2 e 3, e por essa tendência as resistências seriam ainda maiores do que os valores normativos.

Ainda avaliando essa figura, é possível destacar o bom isolamento térmico promovido pelas lajes dos ensaios 2 e 3. Na laje de 16 cm, por exemplo, os 100°C só são ultrapassados na face não-exposta após cerca de 90 minutos do início do aquecimento, enquanto que para a laje de 19 cm após quase 3 horas de incêndio-padrão os 100°C não são sequer atingidos. Esses resultados sugerem ganhos de resistência não lineares, ou seja, o isolamento térmico aumentou consideravelmente mais de 16 cm para 19 cm do que de 13 cm para 16 cm. Ressalta-se também que a laje de 13 cm, do ensaio 1, apresentou na face não-exposta uma evolução bastante rápida de temperaturas, mas ainda assim foi um resultado de resistência maior do que o proposto pela norma, e essa espessura de 13 cm é o mínimo recomendado pelo catálogo do fabricante dessa fôrma de aço utilizada no ensaio.

Figura 32 - Resistência ao fogo dos 3 ensaios pelo critério da ISO-834, isolamento térmico.



Fonte: Elaborado pelo autor.

3.3.2 Critério da capacidade resistente

Já para o critério de capacidade resistente, a avaliação da resistência ao fogo pelo método normativo é através do método do momento fletor plástico resistente, como mostrado no item 2.1 do presente trabalho. Para tanto, utilizou-se as equações previstas na ABNT NBR 14323 (2013), junto com as características geométricas e dos materiais das lajes dos ensaios para construir os gráficos de carga resistente (kN/m^2) em função do tempo. Essa metodologia corresponde ao chamado método simplificado da referida norma, e na realidade o cálculo é do momento fletor resistente; mas como as lajes ensaiadas foram simplesmente apoiadas nas extremidades, pode-se estabelecer uma relação, por meio dessa condição de contorno, entre a carga resistente e o momento resistente. Como se sabe a carga atuante no ensaio, o ponto em que a curva decrescente de carga atinge o valor dessa carga atuante representa a resistência ao fogo pelo critério de capacidade resistente, pelo método simplificado normativo (conforme Figura 33). Para avaliar esse mesmo critério pelo método avançado (que corresponde à análise experimental), a avaliação da resistência ao fogo é a partir dos deslocamentos e da taxa de deslocamento.

Inicialmente, esse critério só deve ser avaliado depois que os deslocamentos ultrapassarem um trigésimo do vão da laje, porque taxas de deslocamento excessivas podem ocorrer no começo do carregamento. Assim, os valores máximos de deslocamento para que ocorra a falha não são fixos, mas dependem da geometria da laje, e podem ser calculados pelas equações 1 e 2 mostradas a seguir, aonde L é o vão da laje e d corresponde a altura total da laje, ambos em milímetros. A equação 1 mostra o cálculo do deslocamento máximo, também em milímetros, enquanto que a equação 2 indica o cálculo da taxa de deslocamento máximo, em milímetros por minuto. Esses critérios da ISO 834 (1999) também foram adotados em outros estudos semelhantes na literatura, como, por exemplo, Santos e Munaiar Neto (2013), e sua aplicação é mostrada na Figura 34.

$$D = \frac{L^2}{400d} \quad (\text{Equação 1})$$

$$\frac{dD}{dt} = \frac{L^2}{9000d} \quad (\text{Equação 2})$$

Assim, os resultados da comparação entre os métodos simplificado e experimental estão resumidos na Tabela 7. Para a laje do ensaio 1, como o ensaio teve de ser removido durante o ensaio, não foi possível obter a resistência ao fogo. Além disso, o critério de falha prevalecente para a avaliação do modelo experimental foi apenas o do deslocamento máximo (calculado conforme equação 1), pois as taxas correspondentes (pela equação 2) não foram atingidas em nenhum dos ensaios. Dessa forma, mesmo atingindo grandes e visíveis deslocamentos, as lajes ensaiadas mantiveram a estabilidade e não entraram em colapso, o que apenas ratifica o que Foster et al. (2007) e outros pesquisadores já afirmaram.

A Tabela 6 apresenta a resistência ao fogo obtida através dos ensaios, assim como o deslocamento máximo e a taxa de deslocamento máxima. Em todos os ensaios, a falha ocorreu pelo critério de deslocamento máximo e não pelo critério da taxa, de acordo com os critérios de falha da ISO-834 (1999).

Tabela 6 - Resistência ao fogo, deslocamento e taxa de deslocamento para os ensaios.

Ensaio	Resistência ao fogo (min)	Deslocamento máximo (mm)	Taxa de deslocamento máxima (mm/min)
2	87	76	3
3	150	64	2

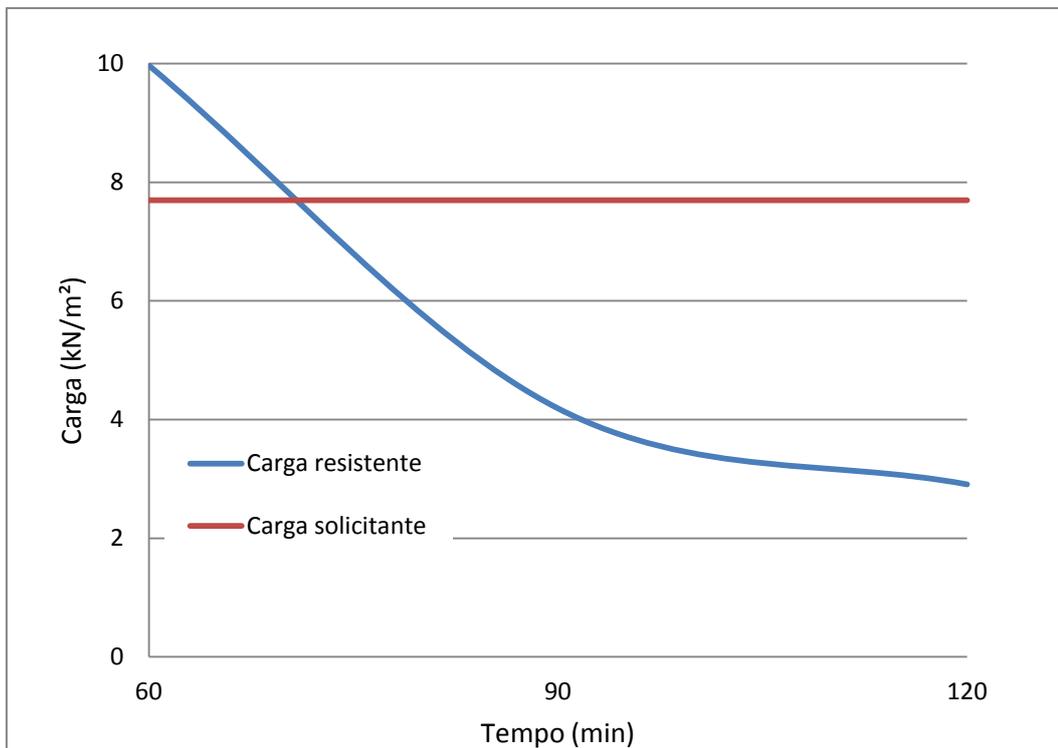
Fonte: Elaborado pelo autor.

A Tabela 7 faz uma comparação entre as resistências ao fogo obtidas nos experimentos e através do método simplificado da norma.

Tabela 7 - Resistência ao fogo de 2 ensaios, pelo critério da capacidade resistente.

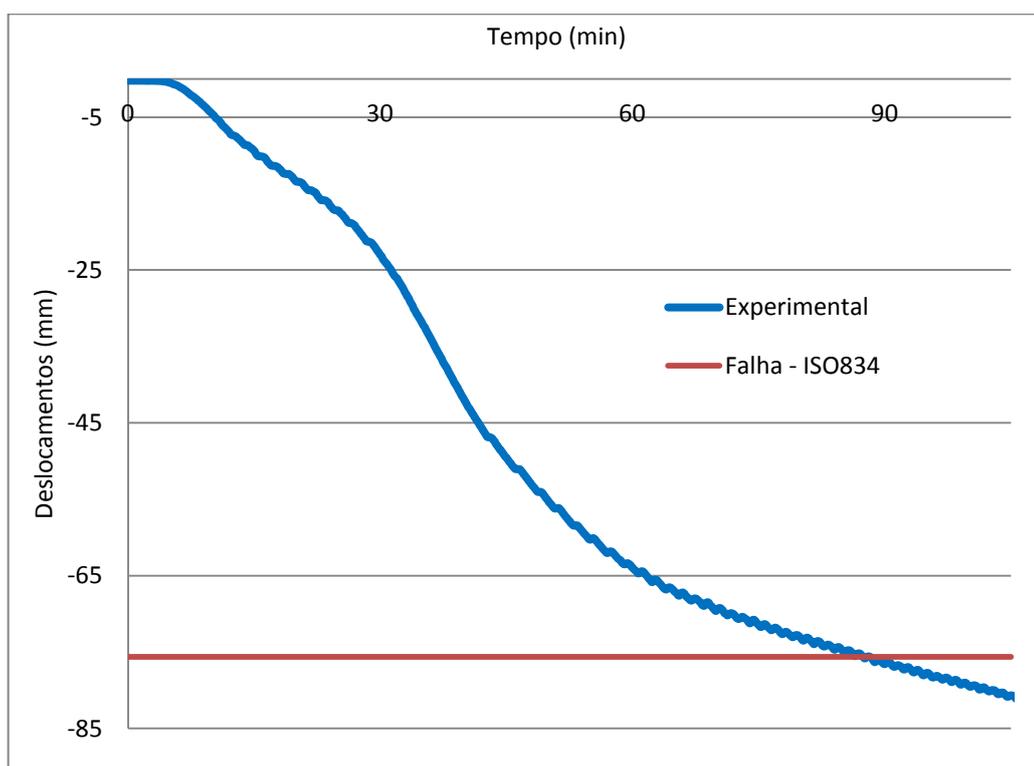
Altura Total (cm)	RF Método Simplificado (min)	RF Experimento (min)
16	71	87
19	76	150

Fonte: Elaborado pelo autor.

Figura 33 - Carga (kN/m²) x tempo (min), para o ensaio 2 (laje de 16 cm).

Fonte: Elaborado pelo autor.

Figura 34 - Curva de deslocamento (mm) x tempo (min), para o ensaio 2 (laje de 16 cm).



Fonte: Elaborado pelo autor.

Ressalta-se que o comportamento da laje mista com fôrma de aço incorporada é função de diversos parâmetros; além da quantidade de concreto, há alguns parâmetros mais diretamente ligados à fôrma de aço, como a sua geometria (largura, altura, dimensão da reentrância) e a aderência entre o concreto e a fôrma de aço, garantida pelas ranhuras existentes na fôrma. Como cada fabricante utiliza processos diferentes de montagem, é de se esperar que o desempenho de cada tipo de fôrma (ou cada fabricante) seja distinto, ou seja, não é possível em princípio generalizar ideias sobre o comportamento das lajes mistas com fôrma de aço incorporada em situação de incêndio a partir de ensaios com um único tipo de fôrma, de um único fabricante. Assim, esse fato traz um aspecto interessante da pesquisa: a necessidade de, em trabalhos futuros, desenvolver mais testes, com diferentes fôrmas de diferentes fabricantes, a fim de avaliar a importância de parâmetros como a altura, largura e as ranhuras presentes na fôrma.

4 ANÁLISE NUMÉRICA

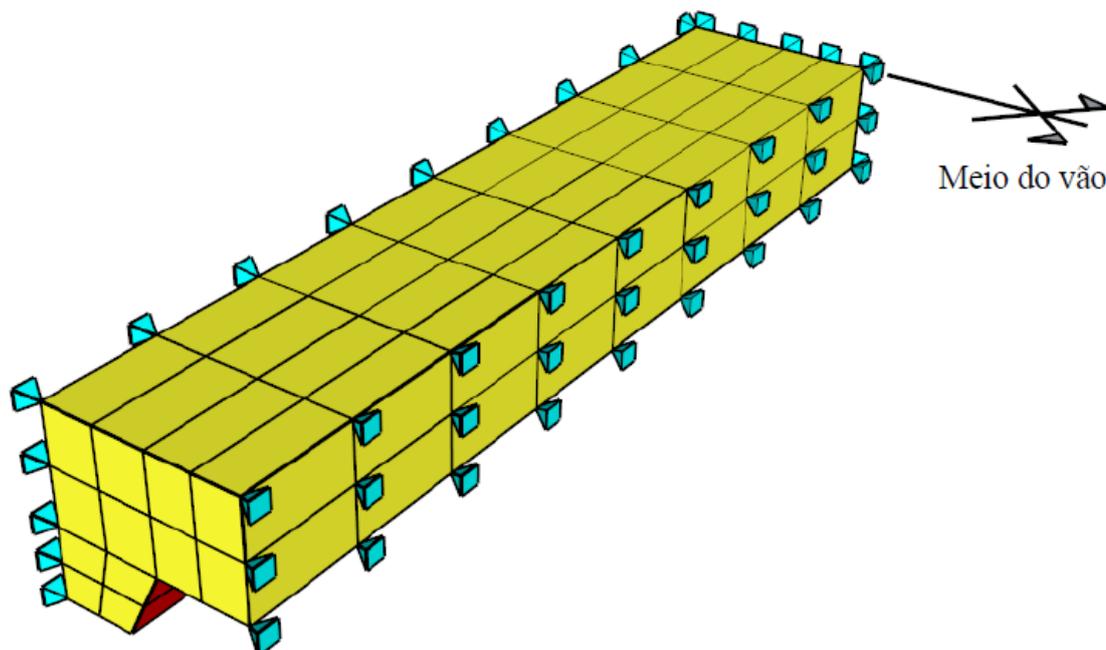
4.1 APRESENTAÇÃO

Desenvolveu-se no Abaqus um modelo numérico tridimensional, não linear, em elementos finitos. À exceção da densidade, as demais propriedades térmicas e mecânicas tanto do aço quanto do concreto são variáveis com a temperatura, e podem ser obtidas por meio das equações indicadas na ABNT NBR 14323:2013 e Eurocode 4 (2005). São elas: calor específico, coeficiente de expansão térmica, condutividade térmica, módulo de elasticidade, resistência ao escoamento e deformação plástica. A emissividade do aço foi adotada como 0,7 e o coeficiente de troca de calor por convecção igual a $25 \text{ W/m}^2 \text{ }^\circ\text{C}$, de acordo com as recomendações das normas supracitadas.

Como a análise do painel completo demanda um elevado custo computacional e grande tempo de processamento, segue-se a estratégia adotada em [5] de trabalhar apenas com meia nervura, ou seja, uma parte do painel e, com uso de simetria, seguindo a estratégia adotada por Santos (2014, p.84), para representar o comportamento global (ver Figura 35). Contudo, diferentemente do que fizeram Guo (2012) e Santos (2014), não foi adotada uma interface entre aço e concreto, e sim uma aderência perfeita, que não é a representação mais fiel a realidade, mas já apresentou boa proximidade com os resultados experimentais, conforme será mostrado mais adiante. Optou-se por uma análise sequencial, ou seja, térmica seguida da mecânica, ao invés da análise acoplada, a fim de reduzir o tempo computacional. Em ambos os modelos foram utilizados elementos finitos tridimensionais de ordem quadrática (20 nós).

Depois, com os resultados de temperaturas, foi conduzido o modelo mecânico, com a laje sujeita também a ação do carregamento. Em ambos os modelos, os elementos usados foram do tipo sólido e tridimensionais, mas a malha do modelo térmico foi bem mais refinada (1 cm) do que para o mecânico (5 cm), por conta da análise de convergência.

Figura 35 - Condições de contorno utilizadas no modelo de meia nervura.

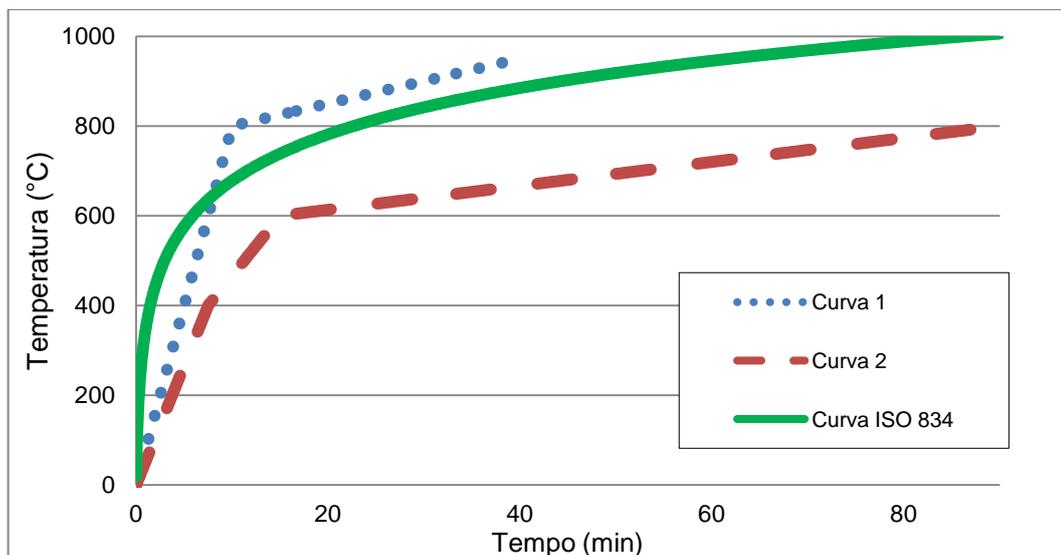


Fonte: Adaptada de Santos (2014).

4.2 VALIDAÇÃO

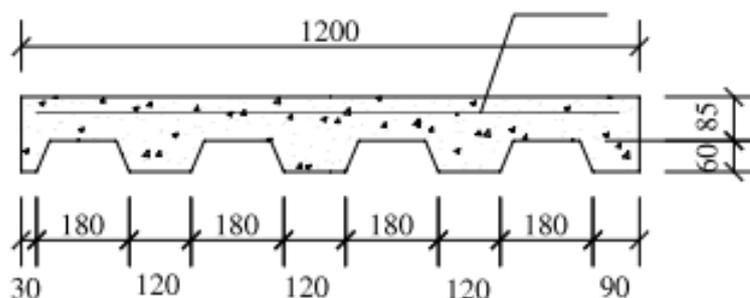
A validação do modelo numérico foi feita através da comparação com os resultados experimentais apresentados em Guo e Bailey (2011). As lajes testadas possuíam 1200 mm de largura, 6200 mm de comprimento e altura de 145 mm, conforme detalhado nas Figura 37 e Figura 38 abaixo. As lajes estavam simplesmente apoiadas em quatro pontos, e somente um trecho de 3000mm delas foi aquecido, conforme as curvas mostradas na Figura 36. O carregamento se deu por meio de uma carga pontual bem no meio, aplicada por meio de macaco hidráulico, que foi distribuída igualmente para duas placas localizadas na face não-exposta da laje mista, como ilustrado na Figura 38.

Figura 36 - Comparação das curvas de aquecimento utilizadas (curvas 1 e 2) com a curva de incêndio-padrão da ISO-834.



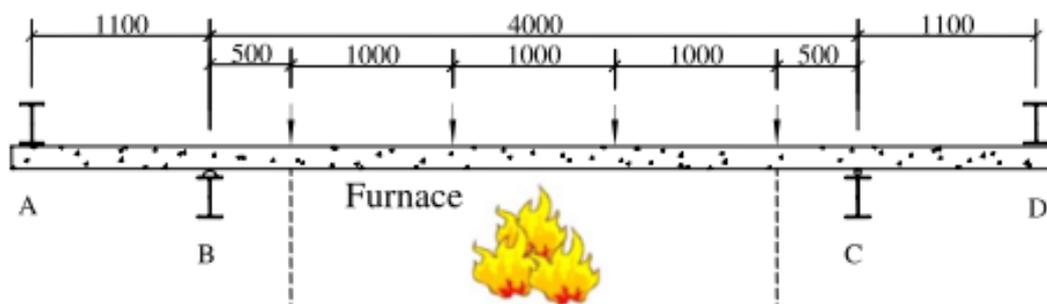
Fonte: Elaborado pelo autor.

Figura 37 - Seção transversal das lajes ensaiadas.



Fonte: Adaptado de Guo e Bailey (2011).

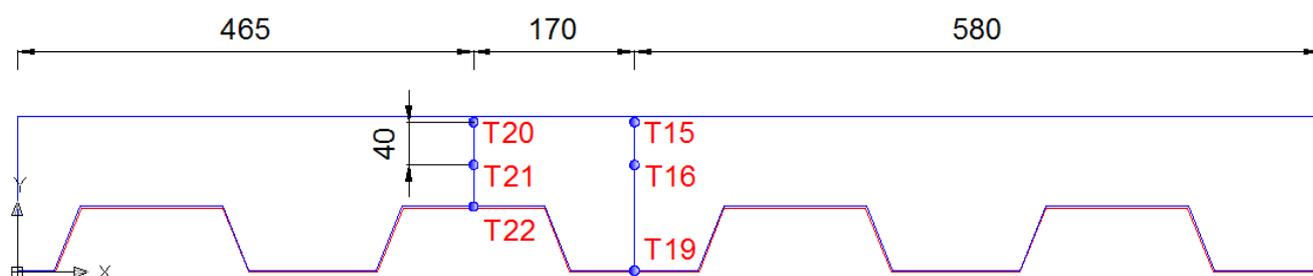
Figura 38 - Esquema do ensaio realizado.



Fonte: Adaptado de Guo e Bailey (2011).

A Figura 39 abaixo mostra os pontos da seção transversal da laje onde foram analisadas as temperaturas. Estes pontos coincidem com pontos de medição do experimento realizado por Guo e Bailey (2011), para fins de comparação entre os resultados numéricos e experimentais.

Figura 39 - Localização dos termopares no ensaio de Guo e Bailey (2011).

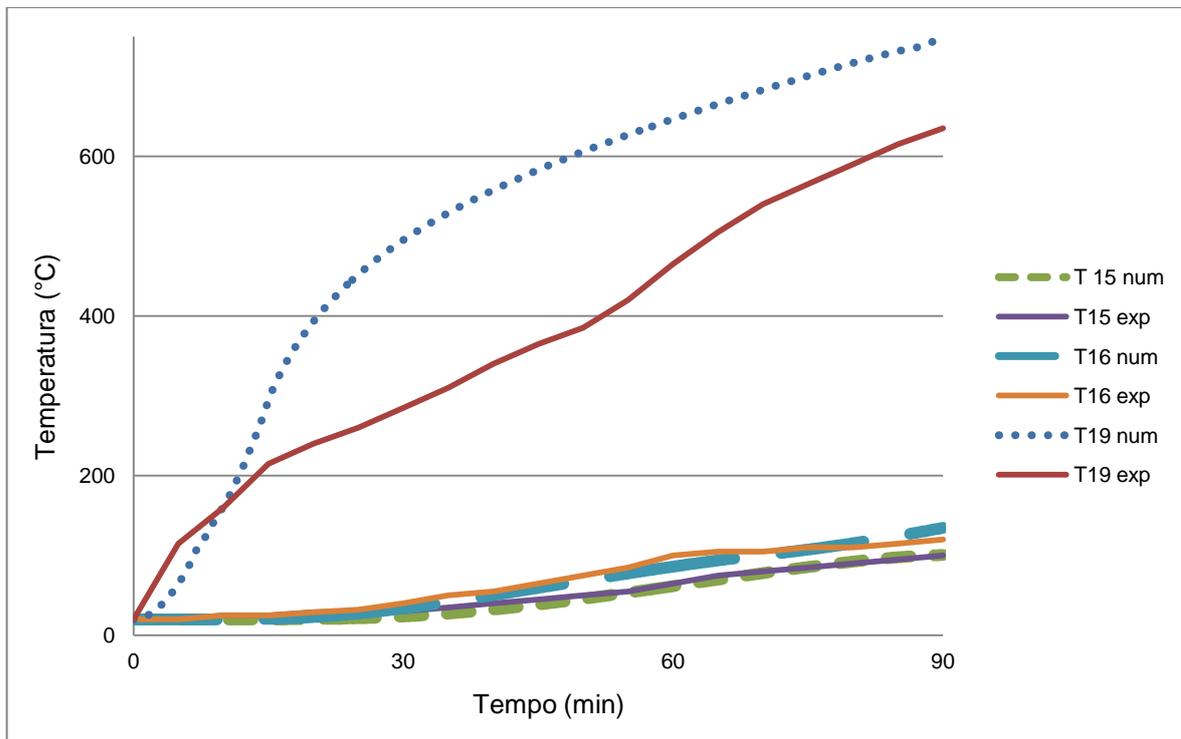


Fonte: Elaborado pelo autor.

As Figura 40 e Figura 41 mostram a evolução de temperatura em função do tempo para estes pontos. Em todos os pontos de medição, as temperaturas ao final dos 90 minutos de aquecimento no modelo numérico foram maiores do que aquelas medidas no modelo experimental. Contudo, para os pontos T15 e T16, que correspondem, respectivamente, a superfície não-exposta ao fogo da laje e a um ponto interno do concreto 40 mm abaixo desta superfície, verifica-se uma boa correlação entre os resultados numéricos e experimentais, e ao final do aquecimento a diferença entre as medições não ultrapassa os 15 °C.

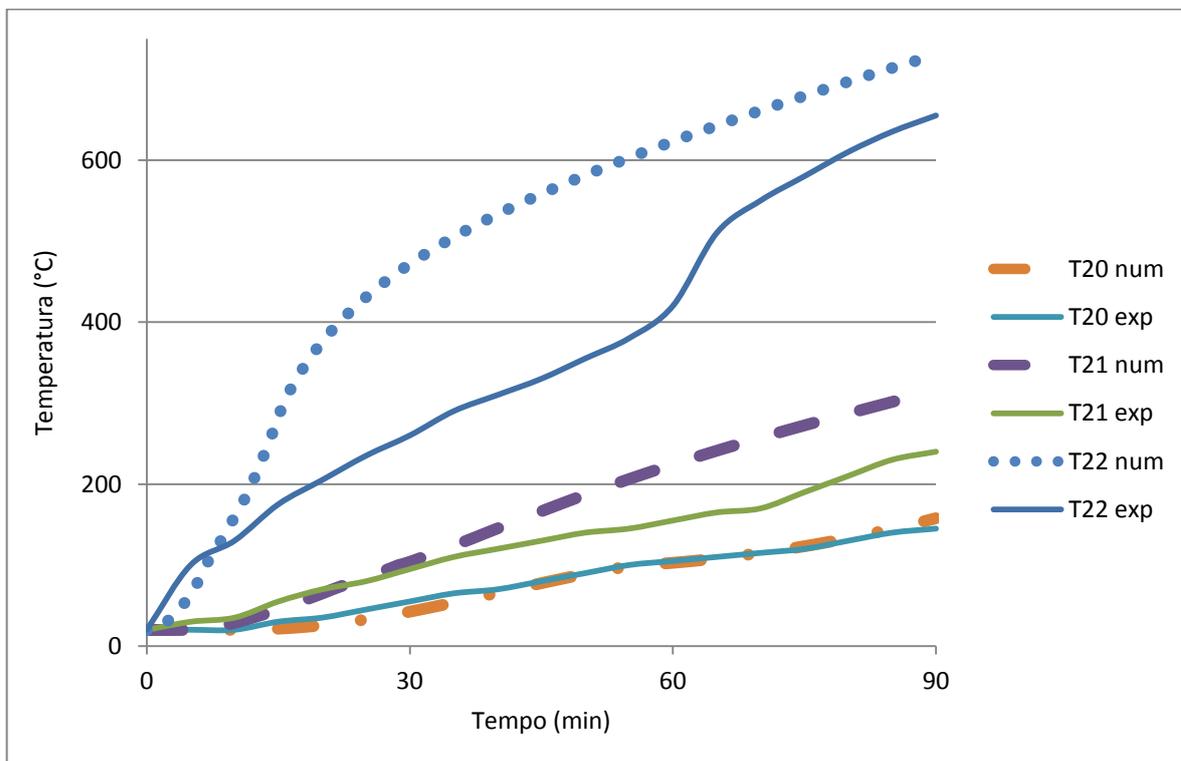
Já para o ponto de medição T19, localizado na forma de aço, também se verifica correlação boa, mas as diferenças entre as temperaturas ultrapassam um pouco os 200 °C. Os resultados aqui apresentados correspondem apenas a três pontos de medição para o aquecimento pela curva 1 mas os demais resultados dos outros pontos e também com o aquecimento pela curva 2 foram bastante semelhantes, apresentando boa correlação entre os resultados numéricos e experimentais, com uma diferença maior na forma de aço (T22) e resultados bem mais próximos (com diferenças de cerca de 15 °C) para os pontos de medição mais próximos da superfície não-exposta (T20 e 21).

Figura 40 - Temperaturas na seção transversal, numérico x experimental, para os termopares T15, T16 e T19.



Fonte: Elaborado pelo autor.

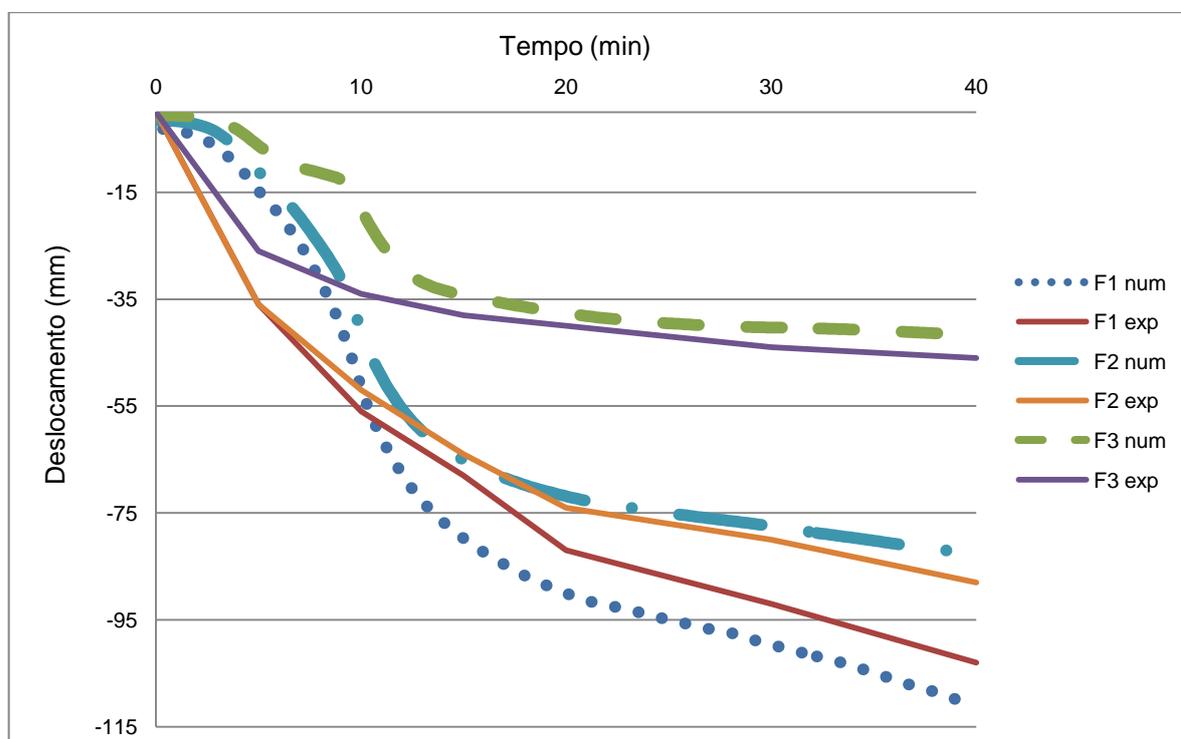
Figura 41 - Temperaturas na seção transversal, numérico x experimental, para os termopares T20, T21 e T22.



Fonte: Elaborado pelo autor.

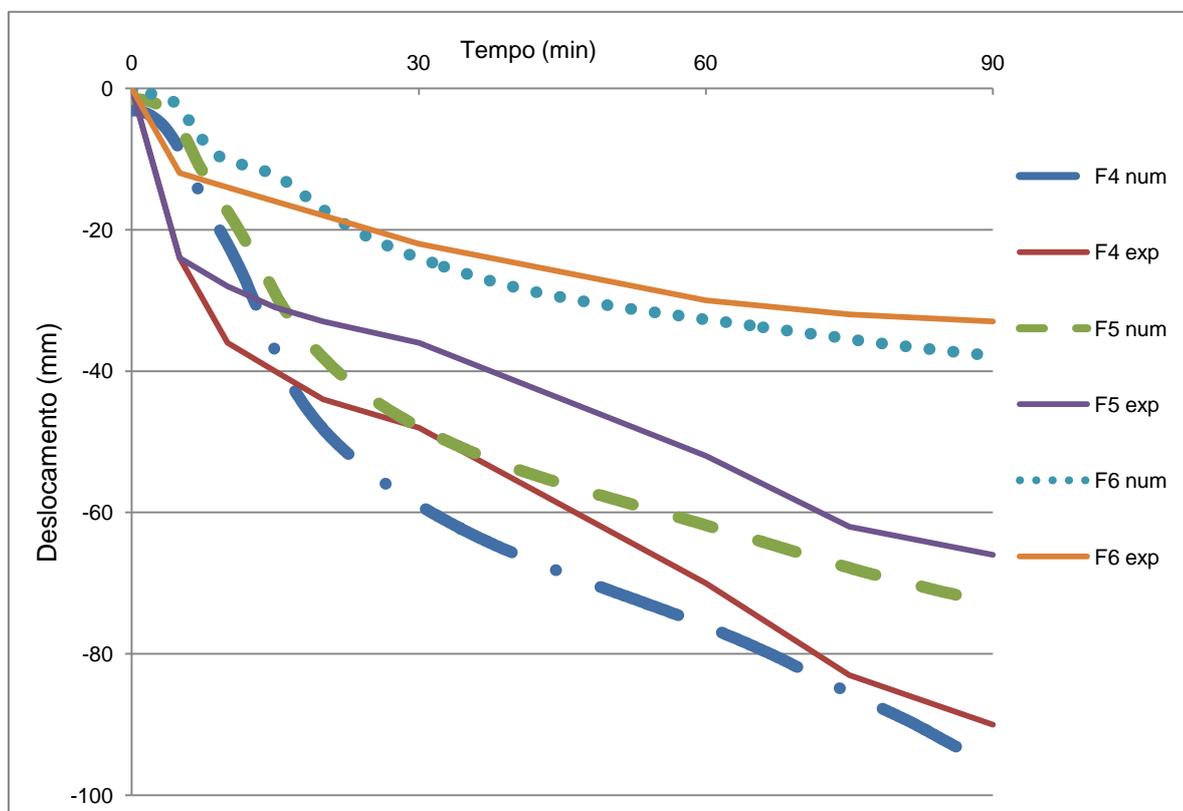
As Figura 42 e Figura 43 a seguir mostram a evolução dos deslocamentos máximos (no meio do vão) no tempo, para lajes carregadas com, respectivamente, 72 kN (F1 e F4), 44 kN (F2 e F5) e 12 kN (F3 e F6). Os resultados experimentais obtidos por Guo e Bailey (2011) são comparados com os resultados do modelo numérico, e percebe-se boa correlação ao longo do tempo, e diferenças entre os valores máximos (ao final dos 40 minutos) da ordem de 10%. Para o caso da laje F1, os deslocamentos do modelo numérico ultrapassam os experimentais com pouco mais de 10 minutos, e acabam sendo maiores no final da análise. Já para os casos F2 e F3, os valores experimentais desde o começo do carregamento até o final da análise se mostraram maiores do que os valores numéricos. Os casos mostrados F1, F2 e F3 correspondem às lajes que sofreram aquecimento pela curva 2, mas os casos de carregamento de lajes que foram aquecidas pela curva 1 apresentaram resultados também bastante semelhantes.

Figura 42 - Resultados da comparação entre os deslocamentos no meio do vão, desenvolvidos no modelo numérico e experimental, para as lajes F1, F2 e F3.



Fonte: Elaborado pelo autor.

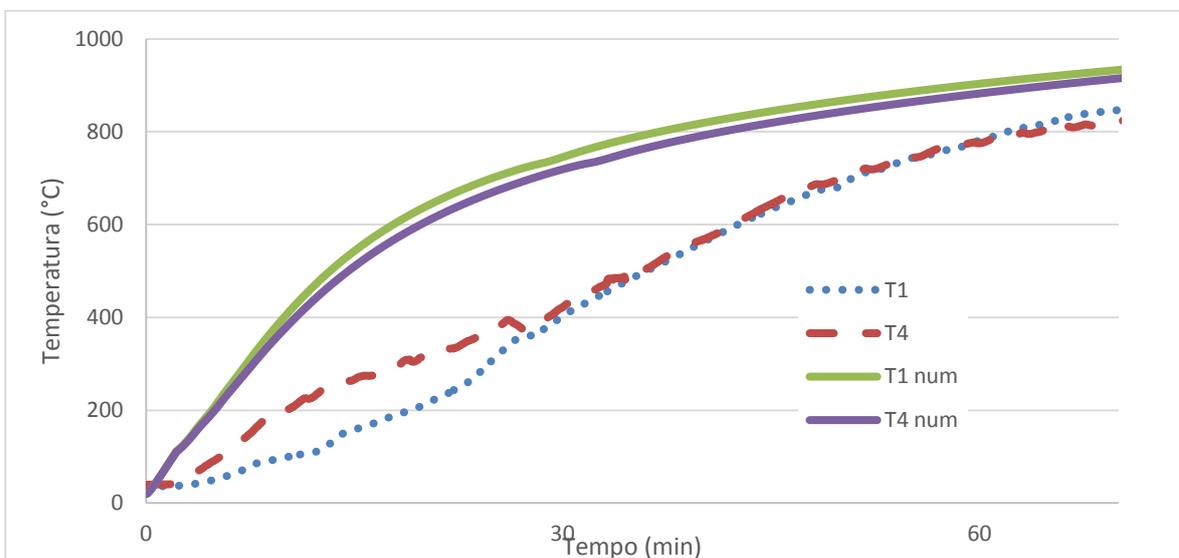
Figura 43 - Resultados da comparação entre os deslocamentos no meio do vão, desenvolvidos no modelo numérico e experimental, para as lajes F4, F5 e F6.



Fonte: Elaborado pelo autor.

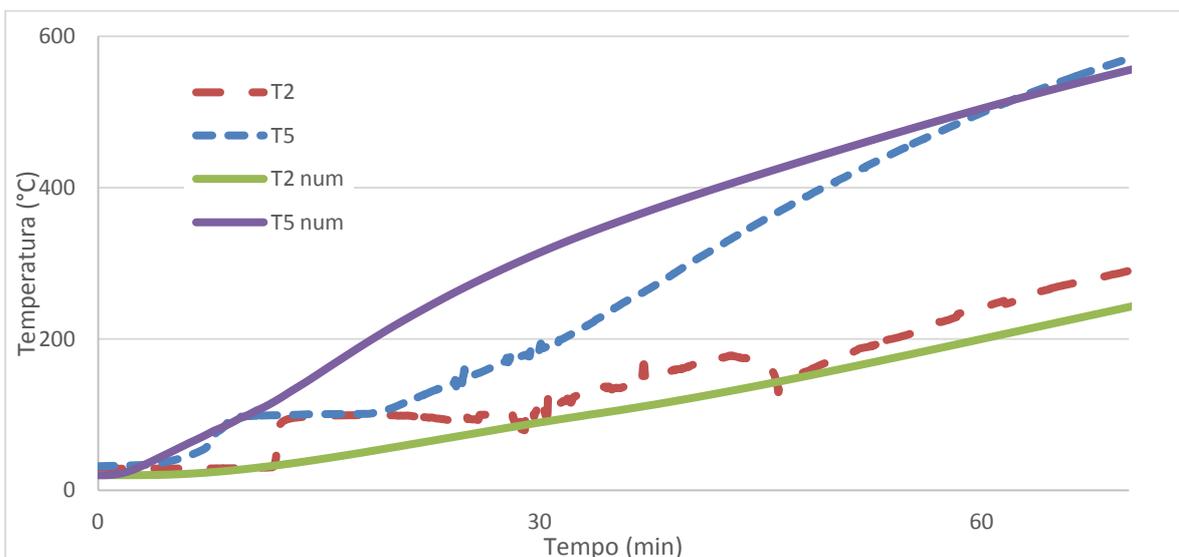
Adicionalmente, a validação do modelo numérico também foi feita com os resultados experimentais descritos neste trabalho, no capítulo 3. As Figura 44, Figura 45 e Figura 46 mostram a comparação entre os modelos numérico e experimental para a evolução de temperaturas em função do tempo para o ensaio 1. Ainda avaliando a distribuição de temperaturas, para as temperaturas na forma de aço (termopares T1 e T4, mostrados na Figura 44) percebe-se que o modelo numérico resulta em temperaturas superiores, e não consegue representar bem o comportamento nessa parte da laje; resultados bastante similares foram obtidos por Santos e Munaiar Neto (2013), mesmo utilizando outro software. Para os pontos no concreto (T2 e T5, mostrados na Figura 45), verifica-se uma melhor correlação entre os resultados numéricos e experimentais. A validação também foi realizada para os demais ensaios, mas estão sendo apresentados apenas alguns resultados.

Figura 44 - Comparação numérico x experimental, para os termopares T1 e T4 - ensaio 1.



Fonte: Elaborado pelo autor.

Figura 45 - Comparação numérico x experimental, para os termopares T2 e T5 - ensaio 1.

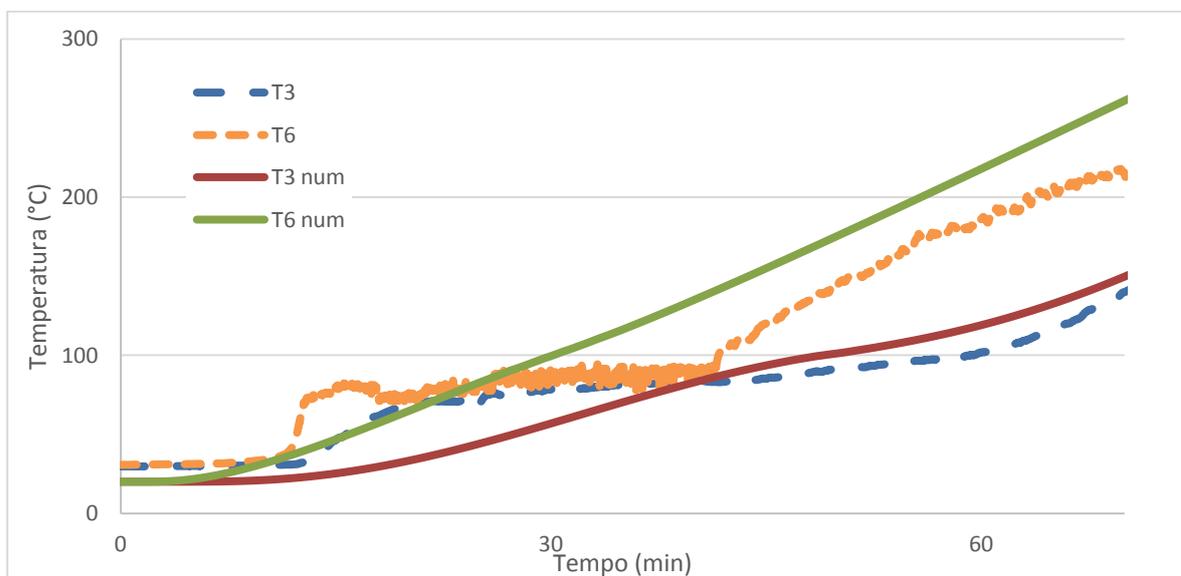


Fonte: Elaborado pelo autor.

Na Figura 46, é possível observar que as temperaturas na face não-exposta acabam sendo maiores no modelo numérico do que aquelas medidas experimentalmente; uma explicação é o fato de o modelo numérico não ter conseguido prever a perda de energia na transferência de calor ocorrida quando o concreto atinge em torno de 100 °C, correspondente a evaporação da água. Como

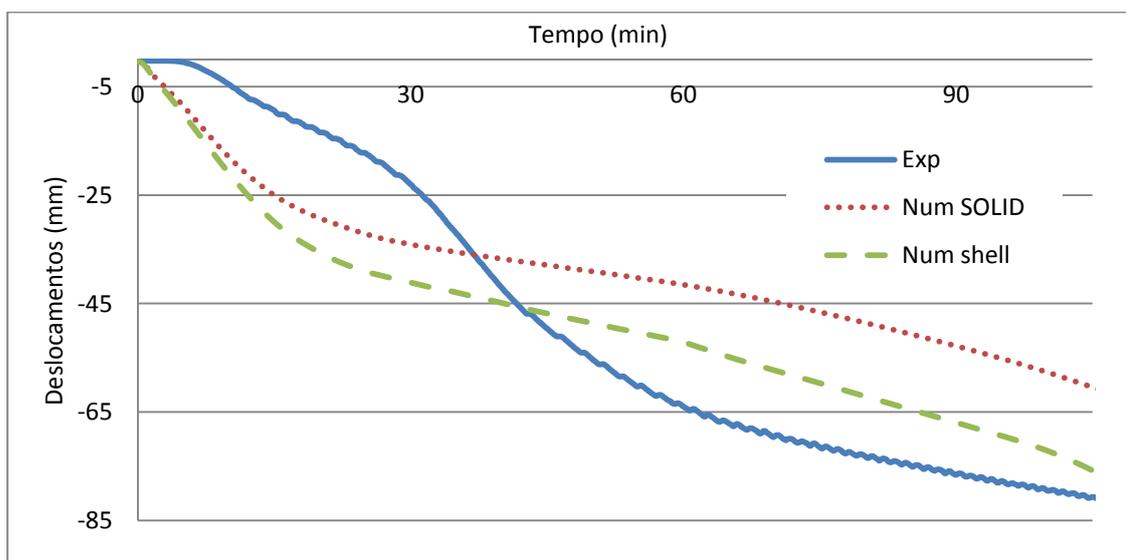
destacam Santos e Munaiar Neto (2013), essa perda diminui a taxa de transferência de calor.

Figura 46 - Comparação numérico x experimental, para os termopares T3 e T6 - ensaio 1.



Fonte: Elaborado pelo autor.

Figura 47 - Comparação numérico x experimental, para os deslocamentos no meio do vão - ensaio 2.



Fonte: Elaborado pelo autor.

Já a Figura 47 mostra a comparação numérico x experimental para os deslocamentos verticais no meio do vão, para o ensaio 2; nessa mesma figura, mostra-se também a comparação entre 2 modelos numéricos distintos, sendo um

deles com o uso do elemento do tipo shell (casca) para representar a forma de aço, enquanto que no outro foi usado elemento do tipo sólido, o mesmo usado para modelar o concreto em ambos. Assim, é possível perceber que o uso do elemento casca propicia melhores resultados, tal como já havia mostrado Guo (2012).

4.3 COMPARAÇÃO COM O MÉTODO NORMATIVO

4.3.1 Apresentação do estudo de caso

A fim de comparar o modelo numérico com o método normativo, a partir da validação mostrada no anterior, foi conduzido um estudo de caso: a avaliação da resistência ao fogo de uma laje biapoiada, com vão total de 2,20m, valor bastante usual nas aplicações do steel deck na região de Recife. Para o incêndio, foi usada a curva do incêndio-padrão, da ISO 834 (1999), seguindo a orientação do item C.1 da NBR 14323 (2013). A forma de aço tem 840 mm de largura, 71 mm de altura, 280 MPa de resistência ao escoamento, e o concreto adotado tem fck de 25 MPa, ou seja, tudo foi baseado nos experimentos realizados, que por sua vez seguiram o que está sendo projetado atualmente na cidade.

De acordo com a literatura, nem todos os parâmetros da laje mista com fôrma incorporada tem a mesma relevância na resistência ao fogo. Guo (2012) desenvolveu estudos paramétricos, a partir dos resultados experimentais de Guo e Bailey (2011), e concluiu que a espessura da forma de aço tem mais importância na resistência da laje steel deck do que o fck do concreto, por exemplo. Contudo, pelo método simplificado proposto pela norma brasileira, a altura do capeamento de concreto e, conseqüentemente, a altura total da laje, é um dos fatores mais determinantes na resistência ao fogo.

Dessa forma, a fim de avaliar essas considerações, foram conduzidos modelos com altura fixa e a espessura da forma variando entre 0,80 mm, 0,95 mm ou 1,25 mm, e modelos com espessura fixa em 0,8 mm e a altura variando entre 13 cm a 20 cm. Tanto os valores de espessuras quanto os de altura foram escolhidos por serem usuais nos projetos de laje steel deck na região de Recife. Além da carga térmica, da curva do incêndio-padrão, as lajes dos modelos foram calculadas como sujeitas às suas usuais máximas, a fim de avaliar a resistência ao fogo no pior cenário. As lajes do experimento foram submetidas a carga referente ao ensaio, a fim de obter resultados comparáveis a análise experimental descrita no item 3.3.

Ressalta-se que a própria norma brasileira, para os casos em que é usada armação adicional, sugere que, opcionalmente, a resistência da forma de aço em situação de incêndio pode ser desprezada. Contudo, para tentar representar mais a realidade atual dos projetos e como usualmente não estão usadas armaduras adicionais positivas nos projetos da região de Recife, optou-se por considerar apenas a resistência à tração por parte da forma de aço. A seguir, são apresentados os resultados. Apesar de os critérios de isolamento térmico e capacidade resistente serem apresentados separadamente, a resistência ao fogo é o menor desses tempos.

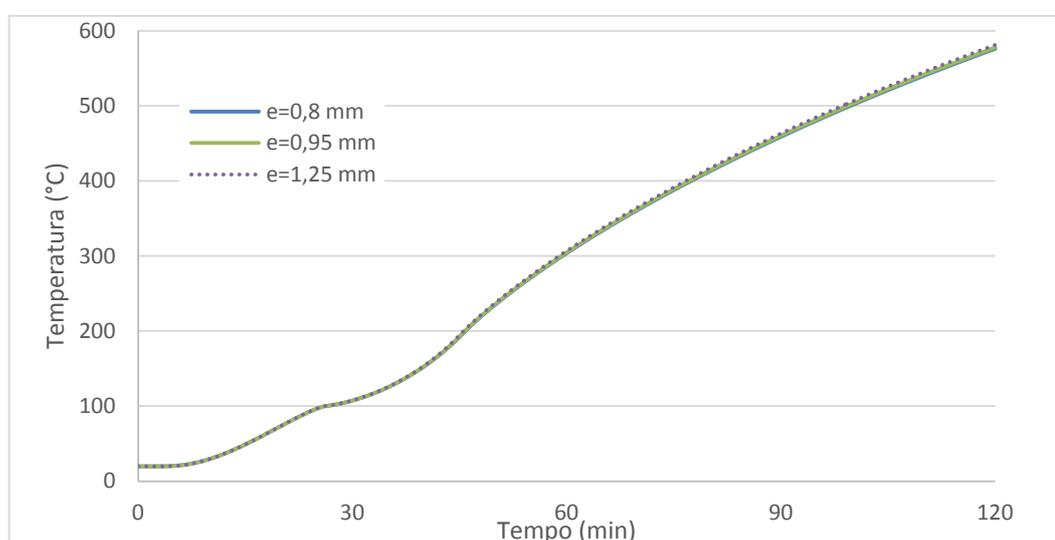
4.3.2 Critério do isolamento térmico

Inicialmente, a influência da espessura da forma de aço e da altura total da laje nas temperaturas são avaliadas. A Figura 48 abaixo mostra três diferentes curvas de temperatura em função do tempo, obtidas com o modelo numérico, para uma altura de laje fixa em 13 cm e as espessuras variando em 0,8 mm, 0,95 mm e 1,25 mm. Como pode ser observado na figura, ocorre superposição entre as três curvas, de modo que é bastante difícil diferenciá-las. Isso significa que, avaliando apenas as temperaturas na face não-exposta da laje, a espessura da forma tem pouca ou praticamente nenhuma influência. Essa conclusão do método avançado também pode ser obtida pelo próprio método normativo, que considera parâmetros de geometria da laje (largura e altura, por exemplo), mas não leva em conta a espessura da forma de aço.

Já na Figura 49, também obtida com o modelo numérico, a espessura é fixa em 0,8 mm e são mostradas diferentes curvas de temperatura em função do tempo, cada uma para uma altura distinta. É possível destacar a grande influência da altura da laje no desempenho térmico da estrutura. Com um aumento de apenas 1 cm de concreto, a temperatura máxima na face não exposta, da laje de 13 cm para a de 14 cm de altura, por exemplo, cai mais de 100°C. Nessa mesma figura, destaca-se a reta horizontal de 200°C, que corresponde ao critério de isolamento térmico da ISO 834 (1999): um aumento de mais de 180°C em um ponto qualquer da face não exposta. Verificou-se que em todos casos estudados em que houve falha, esta ocorreu por esse critério, e não pelo critério da média, o que se deve ao fato de a laje steel deck não apresentar espessura uniforme, de modo que nos pontos menos espessos (as reentrâncias), as temperaturas são maiores.

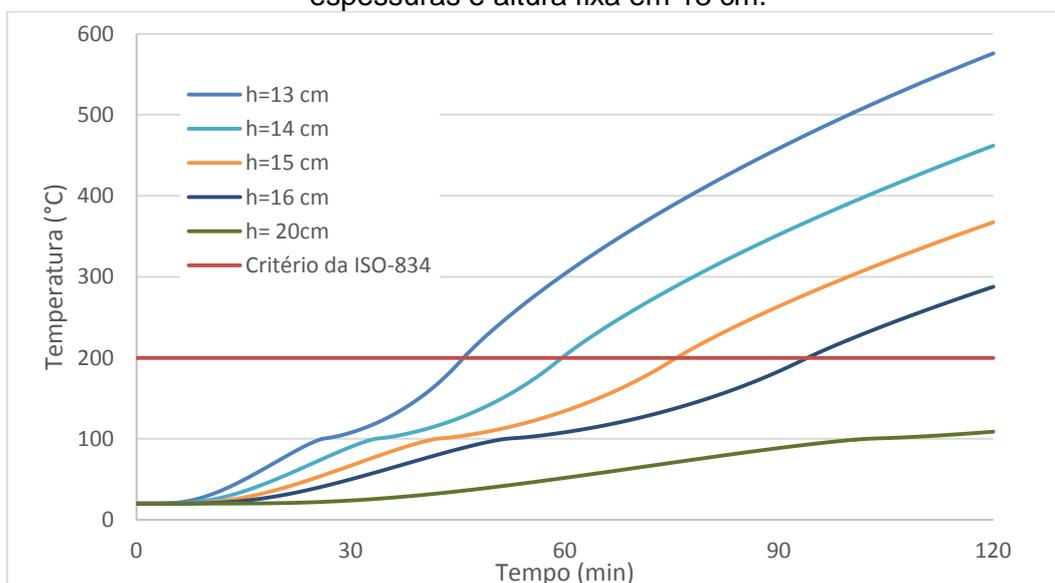
O método simplificado da ABNT NBR 14323:2013 não permite o cálculo das temperaturas em todos os pontos da laje steel deck ao longo do aquecimento. Na verdade, o método da capacidade resistente da referida norma precisa estimar a temperatura em alguns pontos da forma de aço e do concreto, a fim de ser possível calcular as contribuições de cada parte da laje para o momento resistente. Assim, o método normativo é basicamente tabular, pois consiste no cálculo da espessura efetiva e na obtenção da correspondente resistência ao fogo na tabela C.1 da norma.

Figura 48 - Resultados numéricos - temperatura x tempo, para lajes com diferentes espessuras e altura fixa em 13 cm.



Fonte: Elaborado pelo autor.

Figura 49 - Resultados numéricos - temperatura x tempo, para lajes com diferentes espessuras e altura fixa em 13 cm.



Fonte: Elaborado pelo autor.

Já o método avançado, por meio do modelo numérico, permite a obtenção direta da temperatura em todos os pontos da laje, seja no concreto ou na forma de aço, e a avaliação da resistência pelo isolamento térmico é feita da forma mostrada na Figura 49: o tempo que a curva se encontra com a reta horizontal do critério normativo é o tempo de falha. Assim, os resultados foram resumidos e são apresentados na Tabela 8 abaixo:

Tabela 8 - Resistências ao fogo, pelos métodos normativo e numérico, para lajes com diferentes alturas - critério do isolamento térmico.

h (cm)	RF Método Simplificado (min)	RF Método Avançado (min)
13	60	46
14	90	60
15	90	76
16	120	94
17	120	115
18	120	120
19	120	120
20	120	120

Fonte: Elaborado pelo autor.

Os resultados do método simplificado normativo, assim como os do modelo numérico e da análise experimental apontam para ganhos de resistência bastante significativos com o aumento da altura total da laje. Pelos resultados experimentais, o ganho de resistência é bem mais significativo e pronunciado, pois as temperaturas na face não-exposta obtidas experimentalmente são menores do que aquelas calculadas pelo modelo numérico, e a resistência ao fogo é maior do que o previsto tanto pela norma quanto pela análise numérica.

4.3.3 Critério da capacidade resistente

Ao avaliar o critério de resistência mecânica ou capacidade resistente, o método simplificado normativo permite o cálculo de cargas resistentes para os tempos de 60 minutos, 90 minutos e 120 minutos, e para a temperatura ambiente, que seria 0 minutos de incêndio. Assim, entre 0 e 60 minutos foi estimada uma reta, a fim de poder estimar uma curva de carga resistente em função do tempo, como a mostrada na Figura 50, para uma laje com 13 cm de altura e espessuras variando entre 0,8 mm, 0,95 mm e 1,25 mm.

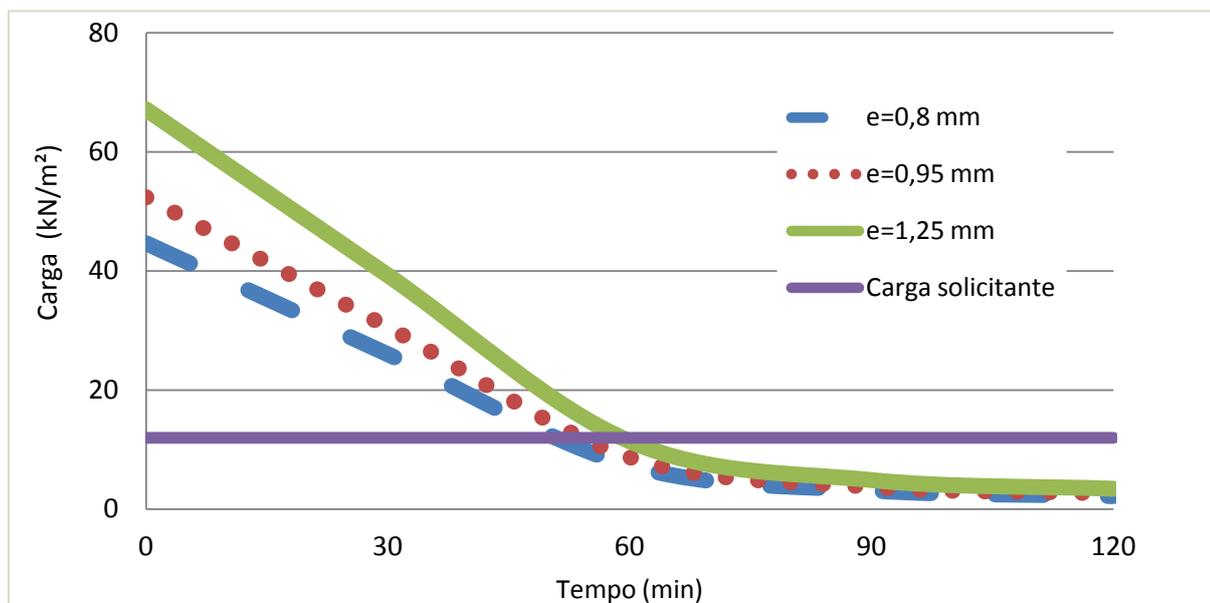
Nessa mesma Figura 50, é possível entender como a espessura influencia a carga resistente. Espessuras maiores apontam para resistências bem maiores no começo do incêndio, mas depois, com o passar do tempo e o aquecimento, observa-se que as três espessuras acabam convergindo para os mesmos valores de resistência, e a partir dos 60 minutos as curvas começam a se confundir. Assim, o tempo de falha corresponde simplesmente ao tempo de encontro da reta horizontal, com o valor da carga solicitante, com a respectiva curva de decaimento da carga resistente; assim, quando a carga solicitante ultrapassa a resistente, tem-se a falha. Com relação aos valores de resistência, estes ficam mais próximo a 60 minutos do que a 30 minutos, para a altura de 13 cm.

Já a Figura 51 mostra os resultados obtidos pelo modelo numérico; a carga resistente não é obtida diretamente, e na verdade a carga solicitante é aplicada ao modelo, e são obtidos os deslocamentos máximos (no meio do vão, no caso em questão, de laje simplesmente apoiada) em função do tempo, e a falha ocorre quando esse deslocamento ultrapassa o valor calculado na equação 1 e, simultaneamente, a taxa de deslocamento ultrapassa a calculada pela equação 2, ambos critérios da ISO 834 (1999).

Nesse sentido, a falha pode ser observada graficamente tanto pela interseção com a reta horizontal com o valor de deslocamento limite da equação 1, mas também pelo acentuado e brusco aumento de deslocamentos, caracterizando um pico vertical na região próxima a interseção com a reta. Na Figura 51 são mostradas as curvas de deslocamentos para a altura fixa em 16 cm e as três espessuras, de 0,8 mm, 0,95 mm e 1,25mm. Observa-se, em comparação a Figura 50, que as resistências são maiores e ainda mais próximas dos 60 minutos, apesar de não

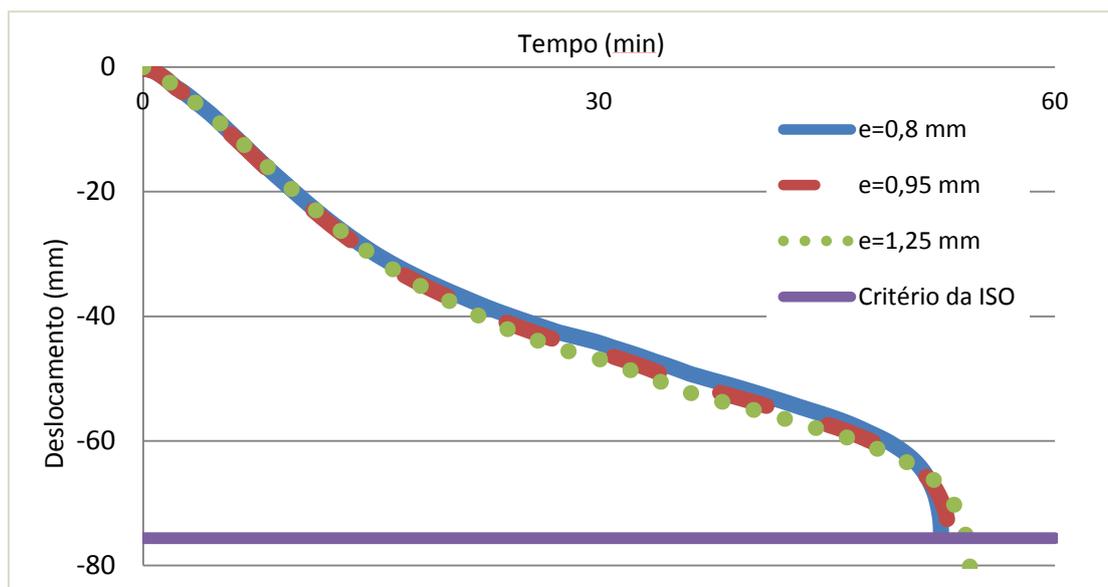
ultrapassar esse tempo. A comparação entre as Figura 50 e Figura 51, em termos de tempo, está resumida na Tabela 10 abaixo.

Figura 50 - Curvas de carga resistente x tempo, usando o método normativo, para diferentes espessuras da forma de aço.



Fonte: Elaborado pelo autor.

Figura 51 - Curvas de deslocamentos x tempo, para o meio do vão de uma laje com 16 cm de altura e diferentes espessuras da forma de aço.



Fonte: Elaborado pelo autor.

Tabela 9 - Resistências ao fogo, pelos métodos normativo e numérico, para lajes com diferentes alturas - critério da capacidade resistente.

h (cm)	Carga Total (kN/m²)	RF Método	RF Método
		Simplificado (min)	Avançado (min)
13	11,14	53	46
14	13,47	52	44
15	16,1	50	52
16	19,03	49	52

Fonte: Elaborado pelo autor.

Tabela 10 - Resistências ao fogo, pelos métodos normativo e numérico, para lajes com diferentes espessuras - critério da capacidade resistente.

Altura Total (cm)	Espessura da fôrma (mm)	Carga Total (kN/m²)	RF Método Simplificado (min)	RF Método Avançado (min)
13	0,8	11,14	53	46
13	0,95	11,75	55	47
13	1,25	12,88	59	52
16	0,8	19,03	49	52
16	0,95	20,04	51	53
16	1,25	21,97	54	54

Fonte: Elaborado pelo autor.

Na Tabela 9, é possível observar que de fato o aumento da espessura promove uma maior resistência, pois mesmo com o aumento das cargas aplicadas, verificou-se que o aumento da espessura levou a maiores resistências. Para a altura de 13 cm e suas espessuras, os tempos calculados pelo método simplificado foram maiores do que aqueles obtidos pelo método avançado, enquanto que para a altura

de 16 cm foi verificado exatamente o contrário. A Tabela 10 mostra, então, o comportamento dos tempos quando a espessura é fixa em 0,8 mm, e as alturas variam entre 13 cm, 14 cm, 15 cm e 16 cm: para as alturas menores (13 cm e 14 cm), o método simplificado apresenta tempos maiores, e a norma nesse ponto estaria, então, não-conservadora por sugerir valores mais elevados de resistência, ainda que por pouco. Para as alturas de 15 cm e 16 cm, observa-se que os valores são praticamente iguais pela norma e pelo método avançado.

Além das comparações entre espessuras, alturas e métodos, é importante ressaltar que em nenhum método, ou com nenhuma espessura ou altura apresentadas a resistência ao fogo pelo critério de capacidade resistente ultrapassou os 60 minutos. Sendo assim, para que as lajes steel deck possam resistir mais de 60 minutos em situação de incêndio, é preciso o uso de estratégias adicionais. Como já foi dito para o critério do isolamento térmico, o uso de proteção passiva deve diminuir as temperaturas na laje como um todo, e isso também deve melhorar o desempenho mecânico. Além disso, pode-se também optar pela solução abordada em Santos (2014) e Cordeiro (2014), que é o uso de armação adicional, o que aumenta bastante a resistência. Pode-se também sugerir que sejam utilizadas sobrecargas menores em situação de incêndio, pois com a diminuição da carga solicitante, o tempo também aumenta.

Adicionalmente, apresenta-se também as resistências ao fogo dos experimentos realizados. Os procedimentos seguem o que já foi mostrado neste item, e os resultados estão resumidos na Tabela 11. Verifica-se que para as cargas relativamente baixas (em comparação com as do estudo de caso), a análise numérica propôs resistências maiores do que a própria análise experimental.

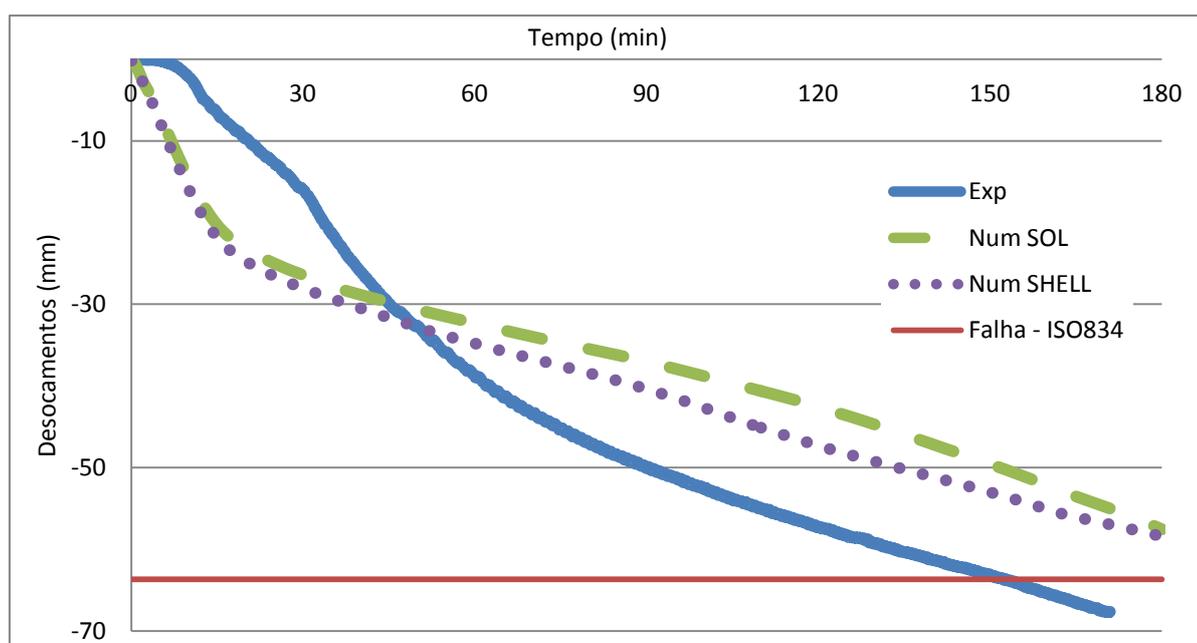
Tabela 11 - Resistência ao fogo pelo critério da capacidade resistente.

Altura Total (cm)	RF Método Simplificado (min)	RF Método Avançado (min)	Deslocamento máximo ISO- 834 (mm)
16	71	105	75,6
19	76	Não atingiu	63,7

Fonte: Elaborado pelo autor.

A Figura 52 mostra a comparação entre o numérico e o experimental para os modelos usando elementos do tipo sólido e do tipo shell para representar a forma de aço; assim como no caso da laje de 16 cm do ensaio 2, o uso de elementos do tipo casca apontou para melhores resultados. Além disso, o comportamento da curva resultante também foi bastante similar nas lajes dos ensaios, e uma diferença fundamental pode ser observada nestes casos e no estudo de caso apresentado no item anterior: nas lajes do estudo de caso, as cargas utilizadas foram as máximas propostas para temperatura ambiente, e as lajes apresentaram falhas bastante visíveis graficamente, por conta da elevação característica da taxa de deslocamento nesse momento.

Figura 52 - Comparação numérico x experimental, para os deslocamentos no meio do vão - ensaio 3.



Fonte: Elaborado pelo autor.

Nas lajes ensaiadas, contudo, não foi possível verificar esse aumento na taxa, nem na avaliação experimental e nem na numérica, e assim foi considerada falha simplesmente quando o deslocamento atinge o valor proposto pela ISO834 (1999), da equação 1. Além disso, foi possível observar também na modelagem numérica, assim como foi nos experimentos, o aumento de resistência ao fogo proporcionado pelo aumento da altura total; a laje de 19 cm, do ensaio 3, após quase 170 minutos não atingiu o deslocamento que a laje de 16 cm, do ensaio 2, atingiu em pouco mais de 100 minutos.

5 CONCLUSÕES E SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS

- na análise experimental, as lajes demonstraram um comportamento acima do esperado no âmbito do isolamento térmico, com resistências ao fogo bastante similares ou ainda maiores do que o calculado pelo método tabular proposto pela ABNT NBR 14.323 (2013);
- na análise experimental, as lajes apresentaram deslocamentos visíveis (acima de $L/30$), mas ainda assim, pelos critérios da ISO-834 (1999), com resistências ao fogo (pelo critério da capacidade resistente) bastante similares ou ainda maiores do que o calculado pelo método simplificado proposto pela ABNT NBR 14.323 (2013);
- na análise numérica, os modelos sem interface não foram capazes de representar bem as temperaturas na forma de aço, e para os pontos no concreto e na face não-exposta os valores previstos numericamente foram maiores do que os experimentalmente observados. Uma explicação é o fato de o modelo não ter conseguido representar a movimentação d' água no concreto com o aquecimento, e a consideração desse fenômeno precisa ser melhor compreendida; apesar disso, as temperaturas nos demais pontos e também os deslocamentos apresentaram boas correlações com os resultados experimentais;
- em ambas as análises, ficou claro que, ainda que sem armação longitudinal adicional, as lajes steel deck resistiram relativamente bem ao incêndio-padrão; quando sujeitas a cargas mais convencionais (da ordem de 700 kgf/m^2 , peso próprio mais sobrecargas), as lajes apresentaram resistências ao fogo maiores do que o previsto pelo método normativo da ABNT NBR 14323 (2013), resistindo mais do que 60 minutos de incêndio-padrão, mesmo as menores espessuras (13 cm, por exemplo);
- contudo, quando sujeitas as cargas máximas recomendadas pelo fabricante para situação ambiente, as lajes mistas suportam cerca de 60 minutos, ou até menos, para as menores espessuras, indicando que nesses casos estratégias devem ser utilizadas para aumentar a resistência ao fogo, como uso de proteção passiva nas lajes ou nas vigas secundárias.

Para a continuidade desta pesquisa sugere-se que sejam desenvolvidos os seguintes tópicos:

- desenvolver mais ensaios experimentais em lajes steel deck em situação de incêndio, considerando situações desenvolvidas em projeto, como a ausência de armação adicional longitudinal;
- desenvolver mais ensaios experimentais em lajes steel deck em situação de incêndio, avaliando estratégias diversas para aumento da resistência ao fogo, como o uso de proteção passiva (uso de tinta intumescente, argamassa projetada, placas de gesso) e armação longitudinal adicional. Esse tipo de análise é praticamente inexistente na literatura, pois como foi mostrado na revisão bibliográfica a proteção passiva é mais utilizada nas vigas e pilares;
- investir mais na modelagem numérica, avaliando outros tipos de elementos e interfaces entre os materiais aço-concreto; Além disso, investir mais também em estratégias para modelar melhor a questão da umidade no concreto, ou seja, como essa presença de água influencia na distribuição de temperaturas na seção transversal;
- avaliar, experimental e numericamente, a interação das lajes mistas com as vigas, a fim de estudar melhor o efeito de membrana e como ele influencia na resistência ao fogo;
- avaliar experimentalmente diferentes tipos de fôrma de aço, de diferentes fabricantes, a fim de discutir a importância de parâmetros como a altura e a largura da fôrma no comportamento da laje mista em situação de incêndio.

REFERÊNCIAS

ABAQUS. **ABAQUS User's Manual**. ABAQUS© vs. 6.10. Providence, Rhode Island, USA. 2010

ABDEL-HALIM, M.A.H *et al.* Fire resistance of composite floor slabs using a model fire test facility. **Engineering Structures**, vol. 21, 1999, p. 176-182.

ABREU, M.S.D. **Pilar tubular em aço em situação de incêndio: Uma análise com o abaqus e com o ansys**. Dissertação de mestrado, 119 p., Universidade Federal de Pernambuco, Recife, 2016.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **Projeto de estruturas de aço e de estruturas mistas de aço e concreto em situação de incêndio: NBR 14323**, Rio de Janeiro, 2013.

BAILEY, C.C.; WHITE, D.S.; MOORE, D.B. The tensile membrane action of unrestrained composite slabs simulated under fire conditions. **Engineering Structures**, vol.22, 2000.

BEDNAR, J.; FRANTISEK, W.; VODICKA, J.; KOHOUTKOVA, A. Experiments on membrane action of composite floor with steel fibre reinforced concrete slab exposed to fire. **Fire Safety Journal**, vol.59, p.111-121, 2013.

CORDEIRO, L.C.S. **Sobre lajes mistas de aço e concreto em situação de incêndio**. Dissertação de mestrado, 262 p., Universidade de São Paulo, São Paulo, 2014.

CORDEIRO, L.C.S.; SILVA, V.P. Sobre o dimensionamento de laje mista de aço e concreto em situação de incêndio. **Revista da Estrutura de Aço**, vol.5, p.39-58, 2016.

CORRÊA, C.; SILVA, J.J.R.; PIRES, T.A.C; BRAGA, G.C. Mapeamento de incêndios em edificações: Um estudo de caso na cidade do Recife. **Revista da Engenharia Civil IMED**, vol.2, p.15-34, 2015.

COSTA, L.M.D. **Análise experimental de pilares em aço com perfis formados a frio submetidos a altas temperaturas com dilatação axial livre e restringida**. Dissertação de mestrado, 190 p., Universidade Federal de Pernambuco, Recife, 2013.

DE NARDIN, S.; EL DEBS, A.L.H.C. Experiments on membrane action of composite floor with steel fibre reinforced concrete slab exposed to fire. **Proceedings of The Institution of Civil Engineers - Civil Engineering**. vol.166, p.20-27, 2013.

EUROPEAN COMMITTEE FOR STANDARDIZATION. **Eurocode 4 - Design of composite steel and concrete structures. Part 1-2: General rules - Structural Fire Design**. Brussels, 2005.

FOSTER, S.; CHLADNÁ, M.; HSIEH, C.; BURGESS, I.; PLANK, R. Thermal and structural behaviour of a full-scale composite building subject to a severe fire. **Fire Safety Journal**. vol.42, p.183-189, 2007.

GUO, S.;BAILEY, C.G.. Experimental behaviour of composite slabs during heating and cooling fire stages. **Engineering Structures**, vol.33, p.563-571, 2011.

GUO, S. Experimental and numerical study on restrained composite slabs during heating and cooling. **Journal of Constructional Steel Research**, vol.69, p.95-105, 2012.

HAMERLINCK, R.; TWILT, L.; STARK, J.W.B. A numerical model for fire-exposed composite steel/concrete slabs. **10th International Specialty Conference on Cold-Formed Steel Structures**, 1990, p.115 - 130.

INTERNATIONAL STANDARD. **Fire resistance tests - elements of building construction - Part 1: General requirements**.: ISO 834-1, Genève, 1999.

LI, G.Q.;ZHANG, N.;JIANG, J. Experimental investigation on thermal and mechanical behaviour of composite floors exposed to standard fire. **Fire Safety Journal**, vol.89, p.63-76, 2017.

LIM, L.; BUCHANAN, A.; MOSS, P.; FRANSSSEN, J. Numerical modelling of two-way reinforced concrete slabs in fire. **Engineering Structures**, vol.26, p.1081-1091, 2004.

PIRES, T.A.C. Fire resistance of composite columns made of concrete filled circular hollow sections and restrained thermal elongation. **8th International Conference on Structures in Fire**, 2014, p.745 - 752.

RAMOS, A.L. **Análise numérica de pisos mistos de aço-concreto de pequena altura**. Dissertação de mestrado, 138 p., Universidade de São Paulo, São Paulo, 2010.

SANTOS, D.B.R. **Modelagem numérica de lajes mistas de aço e concreto em situação de incêndio**. Dissertação de mestrado, 243 p., Universidade de São Paulo, São Paulo, 2014.

SANTOS, M.M.L. **Considerações iniciais sobre o comportamento de lajes mistas "steel deck" em situação de incêndio**. Trabalho de Conclusão de Curso, 52 p., Universidade Federal de Pernambuco, 2016.

SANTOS, D.B.R.; MUNAIAR NETO, J. Análise numérica de lajes mistas de aço e concreto em situação de incêndio: influência dos campos térmicos no método do momento fletor plástico. **XXXIV Iberian-Latin-American Congress on Computational Methods in Engineering**, 2013.

WELLMAN, E.I.; VARMA, A.H.; FIKE, R.; KODUR, V. Experimental evaluation of thin composite floors assemblies under fire loading. **Journal of Structural Engineering**, vol.137, p.1002-1016, 2011.