

UNIVERSIDADE FEDERAL DE PERNAMBUCO

Marina Machado Leal dos Santos

**CONSIDERAÇÕES INICIAIS SOBRE O COMPORTAMENTO DE
LAJES MISTAS “STEEL DECK” EM SITUAÇÃO DE INCÊNDIO**

**Recife
2015**

Marina Machado Leal dos Santos

**CONSIDERAÇÕES INICIAIS SOBRE O COMPORTAMENTO DE
LAJES MISTAS “STEEL DECK” EM SITUAÇÃO DE INCÊNDIO**

Trabalho de Conclusão de Curso submetido ao Departamento de Engenharia Civil da Universidade Federal de Pernambuco como parte dos requisitos necessários para a obtenção do título de Engenheiro Civil.

Orientador:

Prof. Tiago Anselmo de Carvalho Pires, PhD

Universidade Federal de Pernambuco, Depto.Eng. Civil.

**Recife
2015**

Catalogação na fonte

Bibliotecária Valdicéa Alves, CRB-4 / 1260

S237c Santos. Marina Machado Leal dos

Considerações iniciais sobre o comportamento de lajes mistas “steel deck” em situação de incêndio / Marina Machado Leal dos Santos. - Recife: O Autor, 2015.

52folhas, Ils. e Tab.

Orientador: Prof. Dr.º Tiago Anselmo de Carvalho Pires.

TCC (Graduação) – Universidade Federal de Pernambuco. CTG. Programa de Graduação em Engenharia Civil, 2015.

Inclui Referências.

1. Engenharia Civil. 2. Lajes.. 3. Aço. 4. Concreto. 5. Steel-Deck
6. Resistência ao fogo. I. Pires, Tiago Anselmo de Carvalho (Orientador). II. Título.

UFPE

624 CDD (22. ed.)

BCTG/2016-03

Marina Machado Leal dos Santos

CONSIDERAÇÕES INICIAIS SOBRE O COMPORTAMENTO DE LAJES MISTAS
“STEEL DECK” EM SITUAÇÃO DE INCÊNDIO

Trabalho de conclusão de curso apresentado ao
Departamento de Engenharia Civil da Universidade
Federal de Pernambuco para obtenção do título de
Engenheiro Civil.

Área de Concentração: Cálculo Estrutural

Aprovado em: 15/12/2015

Banca examinadora:

Prof. Dr. Tiago Ancelmo de Carvalho Pires

Prof. Dr. José Jefferson do Rêgo Silva

Eng. Henrique Ferreira Dantas Cunha

Agradecimentos

A todos que contribuíram para o desenvolvimento deste trabalho.

Em especial ao prof. Tiago Ancelmo de Carvalho Pires, orientador deste trabalho, por sua disponibilidade, apoio e prestatividade.

A Diego Araújo pela co-orientação, carinho e companheirismo.

A Frederico Leal dos Santos por ter me mostrado o mundo da engenharia.

“Genialidade é esforço”. Johann Goethe

Resumo

Atualmente, lajes mistas em aço e concreto do tipo Steel Deck são largamente utilizadas na indústria da construção civil brasileira. Esta opção deve-se a uma série de vantagens deste elemento, cita-se, por exemplo, a simplicidade de construção e dimensionamento das mesmas, o fato do sistema construtivo já oferecer de uma só vez a forma, a armadura longitudinal e a dispensa de acabamento. Estes fatores contribuem para que a laje Steel Deck seja uma alternativa bastante interessante do ponto de vista construtivo e econômico.

No entanto, o comportamento deste tipo de laje em situação de incêndio ainda é pouco conhecido na literatura internacional. Sabe-se que, nesta situação, as propriedades mecânicas do aço e do concreto serão reduzidas com o aumento de temperatura, podendo comprometer o desempenho estrutural. Somado a isto, o fato da chapa metálica ser de pequena espessura e localizada na parte inferior da laje e, por muitas vezes sem proteção ao fogo, podem agravar ainda mais as consequências do incêndio.

A NBR 15575:2013, norma de desempenho para edificações habitacionais, traz consigo as exigências em relação a segurança estrutural, segurança contra o fogo e segurança no uso e na operação. Em se tratando de segurança contra o fogo esta norma prevê que os métodos de avaliação contra incêndio devem atender à NBR 14323 para estruturas de aço, à NBR 15200 para estruturas de concreto e ao Eurocode correspondente para as demais estruturas. O dimensionamento deste tipo de elemento nesta situação é previsto pela NBR 14323:2013 – Anexo C. A norma apresenta um método tabular para se determinar o Tempo de Resistência Requerido ao Fogo (TRRF) em função da altura equivalente da Laje.

Um modelo tridimensional em elementos finitos desenvolvido no software ABAQUS. Como estudo de caso será analisada uma laje de concreto de $f_{ck}20\text{MPa}$ com 1m de largura, 2,8m de comprimento e 14cm de altura conjuntamente à chapa de $f_y280\text{MPa}$ de mesmas altura e largura, com espessura de 0,95mm. Seus resultados serão comparados com o método tabular prescrito pela NBR14323:2013 e com outros resultados divulgados na revisão de literatura.

A chapa de aço da laje em estudo apresentou temperaturas muito elevadas para o tempo de resistência ao fogo recomendado pela norma 970°C em 90 min e por seu fabricante 677°C em 30 min. O tempo crítico determinado pela simulação foi de 20min, onde a chape de aço atingiu 500°C . Espera-se que estes resultados sirvam para desencadear uma discussão a sobre a resistência ao fogo das lajes Steel Deck utilizadas em nossa região.

Palavras-chave: Lajes. Aço. Concreto. Steel-Deck. Resistência ao fogo.

Abstract

On our days, Steel Deck slabs are largely utilized on the Brazilian's civil construction industry. This option is due to many advantages that this element can offer, for example, their construction and scaling simplicity the fact that the construction system offers at once the formwork, the longitudinal armor and the not needing of finishing details which can many time be a simple painter. Those facts contribute to make the Steel Deck system an interesting alternative in the constructive and economical points of view.

On the other hand, the behavior of this kind of slab on fire situation steel is much unknown by the international literature. On fire situation, the steel's and concrete's mechanical properties are reduced by a temperature enhancement. Such reduction can affect the structural performance of this element. Adding to this fact, the short dimension of the transversal section, the fact that the metallic plate is thick and located on the inferior surface of the slab, and for many times, which no fire protection, can aggravate the fire situation consequences. So it's necessary to the civil engineer the knowledge to scale those slabs on fire situation.

The NBR 15575: 2013 performance standard for residential buildings, brings the requirements regarding structural safety, fire safety and security in the use and operation. When it comes to fire safety this standard provides that the methods of evaluation on fire situation must be according to the NBR 14323 for steel structures, the NBR 15200 for concrete structures and the corresponding Eurocode to other structures. The Scaling of this category of slabs is previewed by NBR 14323:2013 – C Annex. The Brazilian standard presents a table method to determinate the Time Required for Fire Resistance (TRRF) accord to the slab equivalent height. The standard also allows the utilization of advanced methods for the element's fire resistance determination, but, those models requires a greater knowledge from the professional for its utilization.

A tridimensional model in finites elements developed on ABAQUS. As a practical case a concrete slab witch f_{ck} 20Mpa and 1m width, 2,80m length, and 14cm height concomitant to the steel witch f_y 280Mpa, 0,95mmheight and the same width and length as the concrete part. Their results will be compared with the tabular method prescribed by NBR 14323:2013 and others results other results present on the literature revision.

The Steel Deck developed high temperatures for the time required for fire resistance recommended by Brazilian standard 970°C in 90min and by its manufacturer 677°C in 30 min. It is expected that the results of this study serves to initiate a start a discussion about the fire resistance of the Steel Deck slabs utilized in our region.

Key-words: Slabs. Steel. Concrete. Fire resistance.

Lista de ilustrações

Figura 1: Laje Maciça	4
Figura 2: A última ceia - Leonardo Da Vinci.....	5
Figura 3: Esquema de uma Laje Nervurada	6
Figura 4: Foto de Laje Nervurada	6
Figura 5: Esquema de Laje Alveolar.....	7
Figura 6: Capa de concreto para Laje Alveolar.....	7
Figura 7: Diagrama de tesões para o momento positivo; Linha neutra plástica acima da forma de aço	13
Figura 8: Diagrama de tesões para o momento positivo - Linha neutra plástica na forma de aço.....	13
Figura 9: Largura plana dos elementos da forma.....	13
Figura 10: Distribuição das cargas concentradas ou lineares.....	17
Figura 11: Figura C.1 na NBR 14323:2013 para o cálculo da hef.....	29
Figura 12: Part Laje.....	34
Figura 13: Part Steel.....	34
Figura 14: Dimensões da chapa do Fornecedor	35
Figura 15: Parâmetros do Aço.....	35
Figura 16: Parâmetros do Concreto.....	35
Figura 17: União da Laje com o Steel Deck	36
Figura 18: Etapas de carregamento "STEP".....	36
Figura 19: Mecanismos de transferência de calor.....	37
Figura 20: Coeficientes da Radiação.....	38
Figura 21: Coeficientes da Convecção.....	38
Figura 22: Contato entre os elementos	39
Figura 23: Temperatura ambiente	40
Figura 24: Elemento DC3D20.....	40
Figura 25: Elemento finito adotado no modelo térmico	41
Figura 26: Discretização do Steel Deck	42
Figura 27: Discretização da laje de concreto.....	42
Figura 28: Nós escolhidos para conferência de temperatura.....	44
Figura 29: Temperatura da laje no tempo $t=120\text{min}$	45
Figura 30: Temperatura da laje no tempo $t=30\text{min}$	46
Figura 31: Temperatura da laje no tempo $t=90\text{min}$	47

Lista de tabelas

Tabela 1: Dimensões do catálogo da Fornecedora.....	9
Tabela 2: Alturas de Lajes Estudadas.....	19
Tabela 3: Temperaturas para a Laje de 10cm	20
Tabela 4: Redução das propriedades do concreto em função da temperatura.....	24
Tabela 5: Redução das propriedades do concreto em função da temperatura.....	25
Tabela 6: Exemplo do método tabular para lajes lisas ou cogumelo	28
Tabela 7: Tabela C1 da NBR 14323:2013	29
Tabela 8: Redução das propriedades mecânicas de elementos de aço	30
Tabela 9: Dados do processamento	41
Tabela 10: Temperatura em função do tempo para os nós selecionados	43
Tabela 11: Cálculo da altura efetiva da laje	47

Sumário

1. Introdução	1
1.1 Generalidades	1
1.2 Justificativa	1
1.3 Objetivos	2
1.4 Descrição Resumida dos Capítulos	3
2. Tipos de Laje	4
2.1 Lajes Maciças	4
2.2 Lajes Nervuradas	5
2.3 Lajes Alveolares	7
2.4 Lajes Mistas de Aço e Concreto “Steel Deck”	8
2.4.1 Dimensões Usuais	8
2.4.2 Vantagens da Laje Steel Deck	10
2.4.3 Desvantagens da Laje Steel Deck	10
2.4.4 Dimensionamento de Lajes Steel Deck em Situação Ambiente	11
3. Estado da Arte	18
3.1 Trabalhos Científicos	18
3.2 Normas	24
4. Modelo em Elementos Finitos	33
4.1 Características gerais do programa	33
4.2 Modelo térmico	33
5. Resultados	43
5.1 Modelo Térmico	43
6. Conclusões	48
7. Referências Bibliográficas	50

1. Introdução

1.1 Generalidades

O presente estudo, realizado como trabalho de conclusão de curso, por fim da obtenção do título de bacharel em engenharia civil pela Universidade Federal de Pernambuco, trata do tema de incêndio em lajes mistas. Tal assunto vem ganhando crescente importância no e dimensionamento estrutural e aspectos construtivos.

Segundo Del Carlo (2008), algumas edificações, tais como edifícios altos, grandes depósitos, centros de compras, instalações industriais e tantas outras necessitam de projetos diferenciados, pois envolvem grandes riscos, sendo que no Brasil essas construções NÃO têm obedecido todas as exigências, falhando em algum ponto do projeto, da construção ou da operação, colocando em risco, em caso de sinistro, ocupantes e bombeiros envolvidos.

Sabendo-se dos danos que podem ser causados, a estrutura deve ser dimensionada para os esforços atuantes em temperatura ambiente e para situações excepcionais, na qual se enquadra o incêndio. Deve-se considerar a redução das propriedades dos materiais bem como a redistribuição das tensões atuantes nos elementos e então verificar quanto tempo a peça resiste ao sofrer grandes aumentos de temperatura.

1.2 Justificativa

Dados do ano de 2005 do “Centre of Fire Statistics of the International Association of Fire and Rescue Service” (CTIF) mostram que a cada quarto segundos um incêndio é deflagrado em um estudo referente a 85 países. Brushlinsky et al. (2006);

Visto a frequência e a magnitude dos danos faz-se essencial a verificação dos elementos estruturais quando submetidos às elevadas temperaturas, justifica-se, portanto, o estudo do tema proposto com a limitação do risco à vida humana e redução de perdas de bens patrimoniais, como também com o cumprimento de aspectos legais e normativos aplicados à construção civil. Uma revolução causada pela NBR 15575:2013, norma de desempenho, foi a preocupação do atendimento às disposições exigidas pela mesma. Ela traz em si um capítulo que fala exclusivamente da segurança contra incêndio, destacando este critério nas boas práticas da engenharia.

No que se refere à escolha pelas lajes do tipo Steel Deck, estas vem sendo cada vez mais utilizadas e difundidas no Brasil por apresentarem diversas vantagens construtivas em relação às lajes convencionais.

“Leveza e velocidade de execução são as duas principais características citadas por especialistas quando o assunto é o Steel Deck. Seja em obras industriais, comerciais ou residenciais, essas lajes mistas, também conhecidas como lajes colaborantes, normalmente são aplicadas em obras nas quais a necessidade de racionalização dos processos construtivos e a entrega em prazos curtos está presente. Por conta desses benefícios, o uso do sistema se torna cada vez mais atrativo em obras que exigem tecnologias de ponta. Cichinelli G. (2009)”.

Oliveira (2010) apresenta uma análise de projeto e comparativos de custos entre lajes nervuradas e lajes Steel Deck. Os dois tipos de lajes têm características semelhantes no que diz respeito a empregabilidade. Oliveira concluiu seu trabalho, com custos muito aproximados, sendo a Steel Deck a mais vantajosa nesta análise financeira, somando-se ao posto, o autor disse ser mais vantajoso o emprego das lajes Steel Deck por sua facilidade de execução.

Adicionando-se aos fatos acima expostos, o presente trabalho buscou recomendações na NBR 14323:2013; norma brasileira de estruturas mistas em situações de incêndio, quanto ao dimensionamento do tipo de laje em estudo e observou carências no que se refere ao método tabular da mesma. Visto que a norma NBR 14323:2013, encaminha o leitor a utilizar a NBR 15200:2004, no que diz respeito aos fatores de redução das propriedades dos materiais, faz-se necessário o estudo desta segunda norma para o entendimento do processo de verificação das lajes Steel Deck.

1.3 Objetivos

Objetivo Geral

Verificar a resistência ao fogo de Lajes Mistas de Aço e Concreto do tipo Steel-Deck através de uma análise numérica tridimensional em elementos finitos.

Objetivos Específicos

- Apresentar uma revisão dos tipos de lajes comumente utilizados na indústria da construção civil e seu dimensionamento, em especial da Laje Steel Deck, objeto deste estudo;
- Desenvolver um modelo tridimensional, não linear, em elementos finitos, para análise do comportamento de Lajes Steel Deck;

- Analisar o desempenho deste tipo de elemento em situação de incêndio comparando com valores de resistência propostos por norma, pelos fabricantes e por trabalhos na literatura.

1.4 Descrição Resumida dos Capítulos

- Capítulo 1, Introdução:

Apresenta o tema do trabalho através das generalidades propostas pelo assunto. Justifica a elaboração do mesmo, apresenta os objetivos do trabalho e, por fim, descreve-se os 7 capítulos contidos do trabalho nos parágrafos seguintes.

- Capítulo 2, Tipos de Lajes:

Faz uma breve apresentação dos tipos de lajes usualmente utilizados na construção civil. Mostrando quando utilizá-las, suas vantagens e aplicabilidade geral.

-Capítulo 3, Estado da Arte:

Apresenta uma revisão das literaturas específicas utilizadas. Literaturas estas que tratam de peças de concreto e/ou de estruturas mistas em situação de incêndio. Ainda expõe comentários sobre essas referências que incluem Tese, Artigo e Normas.

-Capítulo 4, Modelo Computacional:

Demonstra a interface, o funcionamento do método utilizado pelo programa, o passo a passo utilizado na modelagem das lajes e os outputs do programa ABAQUS.

-Capítulo 5, Resultados:

Expõe as comparações obtidas na modelagem das lajes Steel Deck no programa ABAQUS com o método tabular da ABNT NBR 14323;2013.

-Capítulo 6, Conclusões:

Finaliza-se o trabalho por meio das conclusões e considerações constatadas pelo presente estudo. Faz-se as recomendações de futuros trabalhos com base nos resultados obtidos.

2. Tipos de Laje

Segundo o Di Pietro (2000) lajes ou placas são elementos planos das edificações (horizontais ou inclinados), de estrutura monolítica e de altura relativamente pequena e que são caracterizadas por 2 dimensões: largura e comprimento, predominantes em relação à sua altura e servem para separar os diversos pisos de um edifício.

Inicialmente será feita a apresentação dos tipos mais comuns de laje para justificar a escolha da laje Steel Deck como elemento de estudo do presente trabalho.

2.1 Lajes Maciças

Foi durante anos o sistema estrutural mais utilizado nas construções de concreto, por isso a mão-de-obra já é bastante treinada. A laje maciça não pode vencer grandes vãos, devido ao seu peso próprio. É prática usual adotar-se como vão médio econômico das lajes um valor entre 3,5m e 5m. Este sistema de laje maciça também apresenta um custo elevado se comparado a outros tipos de sistemas construtivos. Normalmente as lajes maciças de concreto têm espessuras que variam de 7 a 15cm, entretanto devem ser respeitados os seguintes limites mínimos para a espessura de acordo com a NBR 6118:2003:

- 5 cm para lajes de cobertura não em balanço;
- 7 cm para lajes de piso ou de cobertura em balanço;
- 10 cm para lajes que suportem veículos de peso total menor ou igual a 30 kN;
- 12 cm para lajes que suportem veículos de peso total maior que 30 kN.

A espessura econômica para lajes está associada ao tamanho dos vãos. Os vãos econômicos para lajes maciças de concreto armado ficam em torno de 4 a 7m, resultando áreas de 15 a 20 m².



Figura1: Laje Maciça

2.2 Lajes Nervuradas

Desde as antigas civilizações as estruturas horizontais reticuladas (semelhantes às lajes nervuradas) são empregadas por serem mais rígidas com menos material.

Gregos, romanos, bizantinos e otomanos mostram isto nos tetos de suas edificações, ainda hoje preservadas e encontradas após escavações que as descobriram. O mais famoso registro desta aplicação é encontrado no quadro Última Ceia de Leonardo da Vinci de 1498 que reproduz um ambiente do século I.



Figura 2: A última ceia - Leonardo Da Vinci

O emprego deste tipo estrutural em lajes acelerou-se no século XX após publicações técnicas como as de Leonard (1909/1999) visando orientar seu dimensionamento e seu detalhamento. O professor Montoya, famoso engenheiro espanhol, trata detalhadamente este assunto em suas obras bibliográficas.

Uma laje nervurada é constituída por um conjunto de vigas que se cruzam, solidarizadas pela mesa. Esse elemento estrutural terá comportamento intermediário entre o de laje maciça e o de grelha. Segundo a NBR 6118:2003, lajes nervuradas são "lajes moldadas no local ou com nervuras pré-moldadas, cuja zona de tração é constituída por nervuras entre as quais pode ser colocado material inerte". As evoluções arquitetônicas, que forçaram o aumento dos vãos, e o

alto custo das formas tornaram as lajes maciças desfavoráveis economicamente, na maioria dos casos. Surgem, como uma das alternativas, as lajes nervuradas.

As lajes pré-fabricadas são aquelas constituídas por vigas ou vigotas de concreto e blocos que podem ser de diversos materiais, sendo mais utilizados os de cerâmica e os de concreto. Dependendo do tipo de vigota utilizada, as lajes pré-fabricadas podem ser: protendidas, comuns ou treliçadas.

As lajes nervuradas têm duas partes principais, como mostra a figura 3:

- A mesa: É a pequena camada de concreto comprimida.
- Os nervos: São as regiões tracionadas onde é localizada armadura necessária de tração.

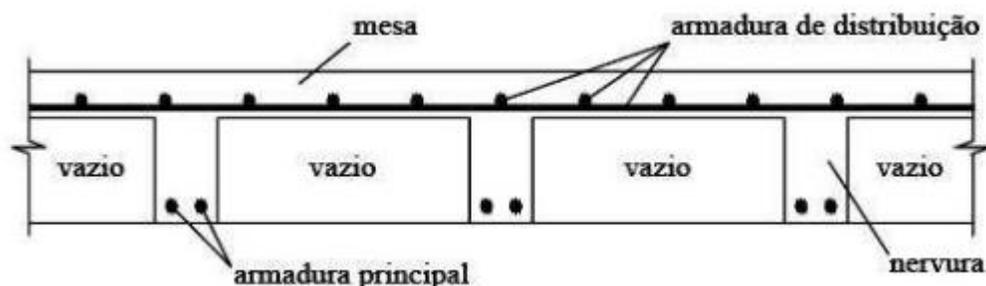


Figura 3: Esquema de uma Laje Nervurada



Figura 4: Foto de Laje Nervurada

2.3 Lajes Alveolares

Lajes alveolares são tipicamente painéis de concreto protendido com seção transversal constante e alvéolos longitudinais, responsáveis pela redução do peso da peça sem perda de capacidade resistente, proporcionando menores cargas na estrutura e nas fundações. São produzidas em pistas de protensão com largura fixa que varia de acordo com o fabricante e necessidade da obra. O concreto utilizado tem elevada resistência característica à compressão e aços especiais para protensão.

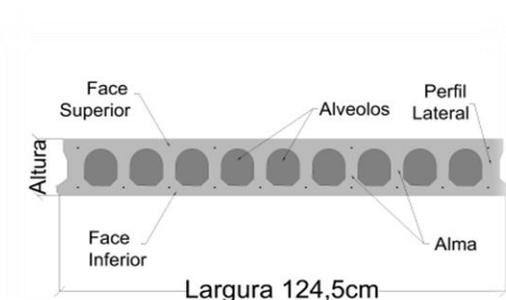


Figura 5: Esquema de Laje Alveolar

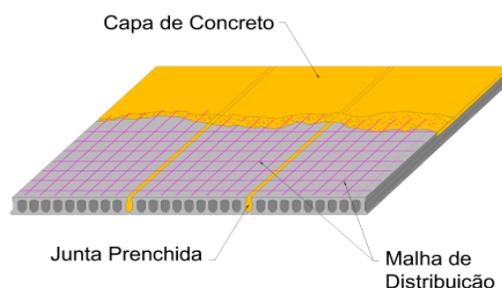


Figura 6: Capa de concreto para Laje Alveolar

Contam com a mais moderna tecnologia de produção e apresentam um conjunto de características que vão desde a capacidade de serem autoportantes para grandes vãos até perfeitos detalhes de acabamento e encaixe, podendo ainda ser utilizadas em qualquer tipo de sistema construtivo (estruturas pré-moldadas, alvenarias estruturais, moldadas in loco, estruturas metálicas). Para consolidar a capacidade de carga e uniformizar os deslocamentos, normalmente é especificada em projeto a complementação com uma fina capa de concreto de 5 a 8 cm. O fabricante “Alveolare” apresenta em seu site as seguintes vantagens para esse tipo e laje:

- Versatilidade: Pode ser utilizada em qualquer sistema construtivo, adequando-se facilmente a obras de todos os portes.

- Economia: Elimina desperdícios de material, dispensa o uso de formas e escoramento, diminuindo a complexidade e o prazo da obra, com redução dos custos indiretos.

- Agilidade: Acelera a execução da obra devido à rapidez e facilidade de montagem, sem a o uso de escoramento, proporcionando liberdade de trabalho nas partes superior e inferior da laje após execução e cura da capa.

- Sustentabilidade: Produção industrializada com baixo consumo de energia e com redução de perdas. Inexistência de resíduos na obra.

- Acabamento: A face inferior das lajes alveolares possui acabamento de alta qualidade dispensando, a critério do cliente, a aplicação de rebocos, texturas ou até mesmo pintura.

2.4 Lajes Mistas de Aço e Concreto “Steel Deck”

O Portal Metálica traz a seguinte definição para lajes Steel Deck: “É uma laje composta por uma telha de aço galvanizado e uma camada de concreto. O aço, excelente material para trabalhar tanto à tração quanto à compressão, é utilizado no formato de uma telha trapezoidal que serve como fôrma para concreto durante a concretagem e como armadura positiva para as cargas de serviço”.

Para os efeitos do Anexo Q da NBR 8800:2008 a laje mista de aço e concreto, também chamada de laje fôrma de aço incorporada ou Steel Deck, é aquela em que, na fase final, o concreto atua estruturalmente em conjunto com a fôrma de aço, funcionando como parte ou como toda a armadura de tração da laje. Na fase inicial, ou seja, antes de o concreto atingir 75 % da resistência à compressão especificada, a fôrma de aço suporta isoladamente as ações permanentes e a sobrecarga de construção.

2.4.1 Dimensões Usuais

Os Painéis para Lajes apresentam frequentemente as dimensões abaixo:

- Espessura: 0,80mm; 0,95mm; 1,25mm;
- Largura útil: 820mm, 840mm, 915mm;
- Comprimento: até 12m (varia conforme o projeto).

A chapa de aço do Steel Deck é conformada a frio e geralmente consegue cobrir uma largura útil de 820 a 915mm.

A Tabela 1 que segue reproduz catálogo da Fornecedora para a chapa de aço MF50.

Tabela 1: Dimensões do catálogo da Fornecedora

	Espessura da laje	Espessura Steel Deck	Peso Peso	M. Inércia Laje Mista	Vãos Máximos sem Escoramento				M. Inércia Laje Mista	Vãos máximos carga sobreposta sem escoramento (kN/m ²)																
					Simples	Duplos	Triplos	Balanço		1800	1900	2000	2100	2200	2300	2400	2500	2600	2650	2700	2800	2900	3000	3100	3200	
	(mm)	(mm)	(kN/m ²)	(106mm ⁴ /m)	(mm)	(mm)	(mm)	(mm)	(106mm ⁴ /m)																	
Lajes de forro	100	0,8	1,85	5,25	2.050	2.800	2.900	900	5,25	9,31	8,14	7,14	6,28	5,54	4,89	4,32	3,82	3,38	3,18	2,99	2,63	2,32	2,03	1,78	1,54	
		0,95	1,86	5,61	2.550	3.150	3.250	1.100	5,61	11,68	10,24	9,01	7,96	7,04	6,25	5,55	4,94	4,4	4,15	3,92	3,49	3,1	2,75	2,44	2,16	
		1,25	1,89	6,26	3.200	3.800	3.800	1.450	6,26	16,43	14,45	12,76	11,31	10,06	8,97	8,02	7,18	6,44	6,1	5,78	5,19	4,67	4,19	3,77	3,38	
Lajes de piso	110	0,8	2,08	6,89	1.800	2.700	2.800	900	6,89	10,56	9,23	8,1	7,13	6,29	5,55	4,91	4,34	3,84	3,61	3,39	3	2,64	2,32	2,02	1,76	
		0,95	2,1	7,35	2.400	3.050	3.150	1.050	7,35	13,25	11,62	10,23	9,03	8	7,1	6,31	5,61	5	4,72	4,45	3,96	3,53	3,13	2,78	2,46	
		1,25	2,13	8,19	3.050	3.650	3.650	1.400	8,19	18,64	16,39	14,18	12,84	11,42	10,18	9,1	8,15	7,31	6,93	6,57	5,9	5,31	4,77	4,29	3,85	
	120	0,8	2,32	8,85	1.650	2.600	2.700	850	8,85	11,81	10,33	9,06	7,98	7,03	6,21	5,5	4,86	4,3	4,05	3,8	3,36	2,96	2,6	2,27	1,98	
		0,95	2,33	9,43	2.250	2.900	3.000	1.050	9,43	14,82	13	11,44	10,1	8,95	7,94	7,06	6,28	5,6	5,28	4,99	4,44	3,95	3,51	3,12	2,76	
		1,25	2,36	10,49	2.950	3.550	3.550	1.350	10,49	20	18,33	16,2	14,36	12,77	11,4	10,19	9,13	8,19	7,76	7,36	6,61	5,95	5,35	4,81	4,32	
	130	0,8	2,55	11,16	1.490	2.500	2.600	850	11,16	13,06	11,42	10,02	8,82	7,78	6,88	6,08	5,38	4,76	4,48	4,21	3,72	3,28	2,88	2,52	2,19	
		0,95	2,57	11,87	2.050	2.800	2.900	1.000	11,87	16,39	14,37	12,65	11,18	9,9	8,79	7,81	6,96	6,2	5,85	5,52	4,92	4,38	3,89	3,46	3,06	
		1,25	2,6	13,19	2.800	3.400	3.400	1.350	13,19	20	20	17,91	15,89	14,13	12,61	11,28	10,1	9,06	8,59	8,14	7,32	6,59	5,92	5,33	4,79	
	140	0,8	2,79	13,85	1.350	2.450	2.500	800	13,85	14,31	12,52	10,99	9,67	8,53	7,54	6,67	5,9	5,23	4,91	4,62	4,08	3,6	3,16	2,77	2,41	
		0,95	2,8	14,72	1.850	2.750	2.800	1.000	14,72	17,96	15,75	13,87	12,25	10,85	9,63	8,57	7,63	6,8	6,42	6,06	5,4	4,81	4,27	3,79	3,36	
		1,25	2,83	16,32	2.700	3.300	3.300	1.300	16,32	20	20	19,63	17,41	15,49	13,82	12,36	11,08	9,94	9,42	8,93	8,03	7,23	6,5	5,85	5,26	
	150	0,8	3,02	16,93	1.250	2.300	2.450	800	16,93	15,57	13,61	11,95	10,52	9,28	8,2	7,26	6,42	5,69	5,35	5,03	4,44	3,92	3,44	3,02	2,63	
		0,95	3,04	17,98	1.700	2.650	2.750	950	17,98	19,54	17,13	15,08	13,33	11,8	10,48	9,32	8,3	7,4	6,98	6,59	5,88	5,23	4,66	4,13	3,66	
		1,25	3,07	19,9	2.600	3.200	3.250	1.250	19,9	20	20	20	18,94	16,85	15,04	13,45	12,05	10,82	10,25	9,72	8,74	7,86	7,08	6,37	5,72	
	160	0,8	3,26	20,45	1.150	2.200	2.300	800	20,45	16,82	14,71	12,91	11,37	10,03	8,87	7,84	6,95	6,15	5,78	5,44	4,81	4,24	3,73	3,26	2,84	
		0,95	3,27	21,69	1.600	2.550	2.650	950	21,69	20	18,51	16,3	14,4	12,76	11,33	10,07	8,97	8	7,55	7,13	6,35	5,66	5,04	4,47	3,96	
		1,25	3,3	23,97	2.550	3.100	3.150	1.250	23,97	20	20	20	20	18,21	16,25	14,53	13,03	11,69	11,08	10,51	9,45	8,5	7,65	6,89	6,19	
	170	0,8	3,49	24,43	1.050	2.050	2.150	750	24,43	18,07	15,81	13,88	12,22	10,78	9,53	8,43	7,47	6,61	6,22	5,85	5,17	4,56	4,01	3,51	3,06	
		0,95	3,51	25,87	1.500	2.500	2.600	900	25,87	20	19,89	17,51	15,47	13,71	12,17	10,83	9,64	8,6	8,12	7,66	6,83	6,09	5,42	4,81	4,26	
		1,25	3,54	28,55	2.450	3.050	3.050	1.200	28,55	20	20	20	20	19,57	17,46	15,62	14	12,57	11,91	11,29	10,16	9,14	8,23	7,41	6,66	

2.4.2 Vantagens da Laje Steel Deck

Dentre as muitas vantagens para a construção, destacam-se as seguintes: alta qualidade de acabamento da laje; dispensa escoramento e reduz os gastos com desperdício de material; facilidade de instalação e maior rapidez construtiva.

- O Steel Deck funciona como plataforma de serviço e proteção aos operários que trabalham nos andares inferiores, propiciando maior segurança.

- Apresenta facilidade para a passagem de dutos das diversas instalações, favorecendo também a fixação de forros. Todas essas vantagens resultam em praticidade, economia e maior retorno financeiro do empreendimento.

- Sua montagem é realizada independente das condições atmosféricas e permite incorporar facilmente canalizações, fios elétricos, bem como tirantes para sustentação de forro.

- O Steel Deck também pode ser pintado eletrostaticamente em sua face inferior, e constitui com a estrutura metálica um sistema construtivo de alta eficiência, com grande aplicação na construção de diferentes tipos de edificações.

2.4.3 Desvantagens da Laje Steel Deck

Brendolan (2007) apresenta como desvantagem das lajes Steel Deck em relação às lajes de concreto armado a necessidade de uma maior quantidade de vigas secundárias, caso não se utilize escoramentos ou formas de grande altura, devido à limitação dos vãos antes da cura do concreto.

Podem ser citadas ainda outras desvantagens como:

- Exigência de mão de obra especializada, que pode deflagrar um aumento de custo para o sistema e carência de trabalhadores para a execução.

- Os custos são, em geral, mais altos que o sistema de lajes convencional moldadas in loco – Deve-se fazer análise minuciosa para as situações onde o Steel Deck será empregado, levando em consideração suas vantagens executivas. Existe também o desconhecimento do real custo e o pequeno número de fabricantes de formas de aço no mercado brasileiro.

- Falta de literatura técnica e de normas específicas sobre o tema.

2.4.4 Dimensionamento de Lajes Steel Deck em Situação Ambiente

O dimensionamento de lajes mistas de aço e concreto é tratado pelo anexo Q da NBR 8800:2008. Neste trabalho apresenta-se uma síntese do procedimento a ser adotado.

Fase inicial

Para a verificação da fôrma de aço, antes da cura do concreto, ou seja, quando o concreto ainda não atingiu 75% da sua resistência, o anexo C da NBR 8800:2008 direciona o usuário para a NBR 14762:2010. Essa recomendação também é feita caso existam outras estruturas de aço de chapa fina conformadas à frio.

Fase final

1. Cálculo das ações:

A NBR 8800:2008 traz como ações que devem ser levadas em conta nas combinações dos estados limites últimos (ELU) e estados limites de serviço (ELS):

- Pesos próprios do concreto fresco, da forma de aço e da armadura;
- Sobrecarga de construção
- Efeito de empoçamento

2. Dimensionamento no ELU:

O anexo Q traz recomendações dos critérios a serem adotados no dimensionamento e verificação das lajes Steel Deck. A laje deve ser tal que suporte as seguintes solicitações de cálculo quando solicitada no estado último:

Do momento fletor

Para equilibrar o momento fletor positivo a norma permite que seja utilizada uma armadura adicional e traz os procedimentos a serem adotados caso exista ou não tal armadura. Para o momento fletor negativo no caso de lajes contínuas a forma de aço só pode ser levada em consideração se for contínua.

Caso não haja armadura adicional, o momento fletor positivo resistente de cálculo deve ser calculado pelas seguintes expressões, para linha neutra acima e abaixo da face superior da fôrma de aço, respectivamente:

$$M_{Rd} = N_{pa} (d_F - 0,5a) \quad (2.1)$$

$$M_{Rd} = N_{cf} y + M_{pr} \quad (2.2)$$

Onde:

$$N_{pa} = A_{F,ef} f_{fy} F_d \quad (2.3)$$

$A_{F,ef}$: É a área da seção efetiva da fôrma (correspondente a 1 000 mm), determinada desprezando-se a largura das mossas na seção transversal, a menos que se demonstre por meio de ensaios que uma área maior possa ser utilizada;

d_F : É a distância da face superior da laje de concreto ao centro geométrico da seção efetiva da fôrma;

a : É a altura do bloco de compressão do concreto

b : É a largura unitária da laje, tomada igual a 1 000 mm;

M_{pr} : É o momento de plastificação da fôrma de aço, reduzido pela presença da força axial;

As fórmulas para o cálculo de “a”, “b” e M_{pr} podem ser encontradas na referida norma.

$$N_{cf} = 0,85 b t_c f_{cd} \quad (2.4)$$

t_c : É a altura da laje de concreto acima do topo da fôrma de aço;

h_t : É a altura total da laje, incluindo a fôrma e o concreto;

e : É a distância do centro geométrico da área efetiva da fôrma à sua face inferior;

e_p : É a distância da linha neutra plástica da seção efetiva da fôrma à sua face inferior.

A norma traz as duas figuras a seguir para ilustrar o cálculo do equilíbrio de momentos:

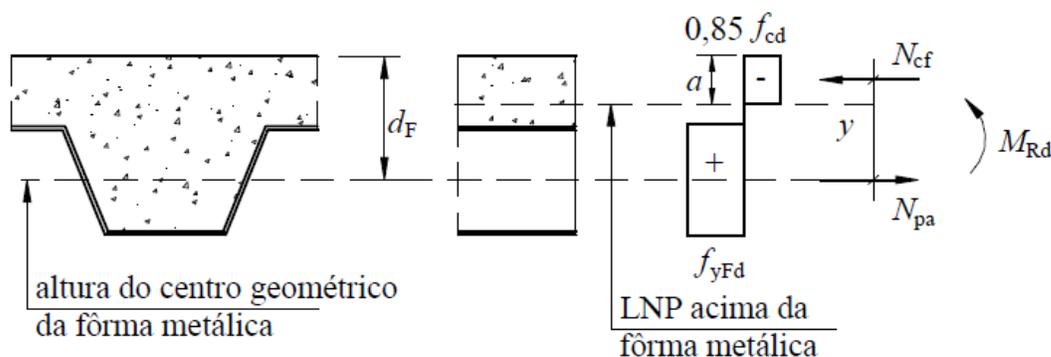


Figura 7: Diagrama de tesões para o momento positivo; Linha neutra plástica acima da forma de aço

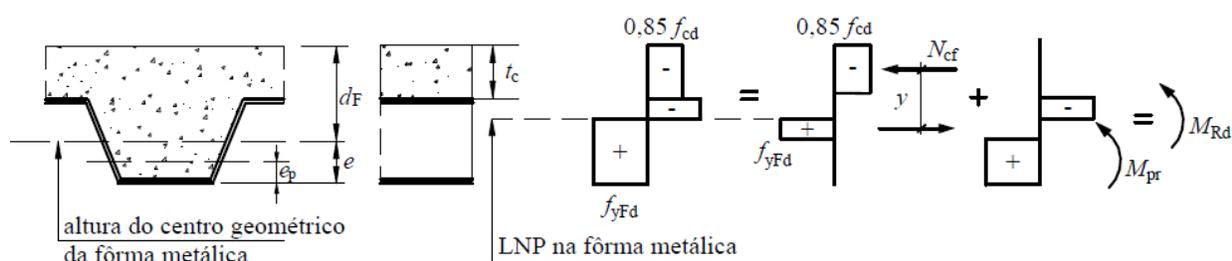


Figura 8: Diagrama de tesões para o momento positivo - Linha neutra plástica na forma de aço

Deve-se assegurar também que não haverá flambagem local da forma de aço preenchida com concreto. Para tanto, a largura plana de todos os elementos da forma havendo ou não mossa no elemento considerado, deve atender às exigências de cálculo em relação ao b_{Fis} apresentadas pela norma.

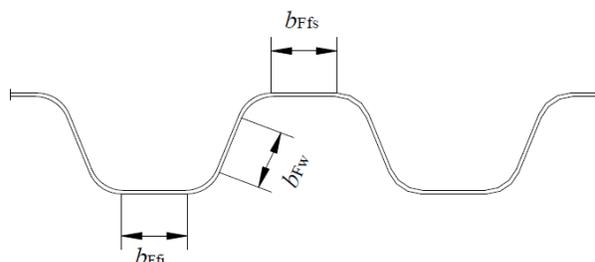


Figura 9: Largura plana dos elementos da forma

Do cisalhamento longitudinal

A força cortante longitudinal resistente de cálculo de lajes com fôrma de aço incorporada, $V_{l,Rd}$, em newton, relativa a 1 000 mm de largura, pode ser calculada pelo método semi-empírico $m-k$, usando-se a expressão a seguir:

$$V_{l,Rd} = \frac{b d_F \left[\left(\frac{m A_{F,ef}}{b L_s} \right) + k \right]}{\gamma} \quad (2.5)$$

d_F : É a distância da face superior da laje de concreto ao centro geométrico da seção efetiva da fôrma expressa em milímetros (mm);

b : É a largura unitária da laje, tomada igual a 1 000 mm;

L_s : É o vão de cisalhamento, expresso em milímetros (mm);

m e k : São constantes empíricas, em newton por milímetro quadrado (N/mm²), obtidas por meio de ensaios realizados conforme o Eurocode 4 Part 1-1 ou o CSSBI S2 ou o ANSI/ASCE 3, devidamente adaptadas para assegurar o nível de segurança desta Norma (no caso das duas últimas normas citadas, são necessárias ainda adaptações para que as constantes m e k tenham como dimensão força por unidade de área, em newton por milímetro quadrado);

γ_{sl} : É o coeficiente de ponderação da resistência, igual ao determinado pela norma ou especificação utilizada nos ensaios;

$A_{F,ef}$: É área da seção efetiva da fôrma (correspondente a 1000 mm).

Do cisalhamento vertical

A força cortante vertical resistente de cálculo de lajes com fôrma de aço incorporada, $V_{v,Rd}$, em newton, relativa a 1 000 mm de largura, deve ser determinada pela seguinte expressão:

$$V_{v,Rd} = V_{v,F,Rd} + V_{v,c,Rd} \leq V_{\max} \quad (2.6)$$

Onde:

$V_{v,F,Rd}$: É a força cortante vertical resistente de cálculo da fôrma de aço incorporada, expressa em newton (N), relativa a 1 000 mm de largura, determinada conforme a ABNT NBR 14762;

$V_{v,c,Rd}$: É a força cortante vertical resistente de cálculo do concreto, expressa em newton (N), relativa a 1 000 mm de largura.

V_{\max} : É um limite da força cortante, expresso em newton (N), relativo a 1000 mm de largura.

As expressões para o cálculo $V_{v,F,Rd}$ e V_{\max} são destrinchadas pela norma neste mesmo anexo.

Da punção

A força cortante resistente de cálculo à punção provocada por uma carga concentrada, $V_{Rd,p}$, expressa em newton (N), pode ser determinada pela seguinte expressão:

$$V_{p,Rd} = u_{cr} d_l \tau_{Rd} \quad (2.7)$$

As expressões para o cálculo de u_{cr} , d_l , τ_{Rd} , são destrinchadas pela norma neste mesmo anexo.

3. Dimensionamento no ELS:

Neste estado limite a norma contém duas verificações: quanto à abertura de fissuras no concreto e ao deslocamento vertical máximos das peças. Na análise dos estados limites últimos a peça já apresenta um comportamento de sistema misto, deve-se considerar, portanto, que o carregamento é sustentado pelo conjunto.

Fissuração do concreto

O estado-limite de fissuração do concreto em regiões de momento negativo de lajes contínuas deve ser verificado de acordo com a ABNT NBR 6118 para o concreto de densidade normal ou, na ausência de Norma Brasileira aplicável, de acordo com o Eurocode 2 Part 1-1 para o concreto de baixa densidade. Para lajes calculadas como simplesmente apoiadas, deve-se colocar armadura para combater os efeitos de retração e temperatura com área não menor que 0,1 % da área de concreto acima da face superior da fôrma. Essa armadura deve ser colocada preferencialmente a 20 mm abaixo do topo da laje. Atenção especial deve ser dada à possibilidade de fissuração da laje nos locais onde possa haver tendência de continuidade dos elementos estruturais, como, por exemplo, nas ligações de vigas secundárias com vigas principais e em relação a pilares.

Deslocamento vertical

O deslocamento vertical de lajes mistas de aço e concreto não pode ser maior que $L_F/350$, considerando apenas o efeito das ações variáveis, onde L_F é o vão teórico da laje na direção das nervuras.

4. Disposições construtivas:

O anexo fala também das disposições a serem obedecidas por:

- Espessura de concreto sob a fôrma que deve ser no mínimo de 50mm.
- Dimensão máxima do agregado graúdo que não deve exceder os seguintes valores:

$0,40t_c$, onde t_c é a altura da laje de concreto acima do topo da fôrma de aço;

$b_o/3$, onde b_o é a largura média das nervuras para fôrmas trapezoidais e a largura mínima das nervuras para fôrmas reentrantes;

30 mm.

- Armadura adicional necessária para resistir momentos adicionais positivos e negativos que devem obedecer às prescrições da ABNT NBR 6118 para o concreto de densidade normal ou, na ausência de Norma Brasileira aplicável, do Eurocode 2 Part 1-1, para o concreto de baixa densidade;

- Comprimentos mínimos de apoio

Deve ser o necessário para evitar que se atinjam os estados-limites correspondentes, tais como enrugamento da alma da fôrma de aço ou esmagamento do apoio; entretanto não pode ser inferior a 75mm para apoio em aço ou concreto e 100 mm para apoio em outros materiais. Nas extremidades da fôrma esses valores podem ser reduzidos para 50 mm e 70 mm, respectivamente.

5. Verificação da laje para cargas concentradas ou lineares

Este tópico trata dos seguintes aspectos:

Distribuição

Quando cargas concentradas ou lineares paralelas às nervuras da fôrma de aço forem suportadas pela laje, pode-se considerá-las como distribuídas em uma largura b_m , medida imediatamente acima do topo da fôrma, de acordo com a Figura 10. As expressões para o cálculo de b_m , são apresentadas na norma.

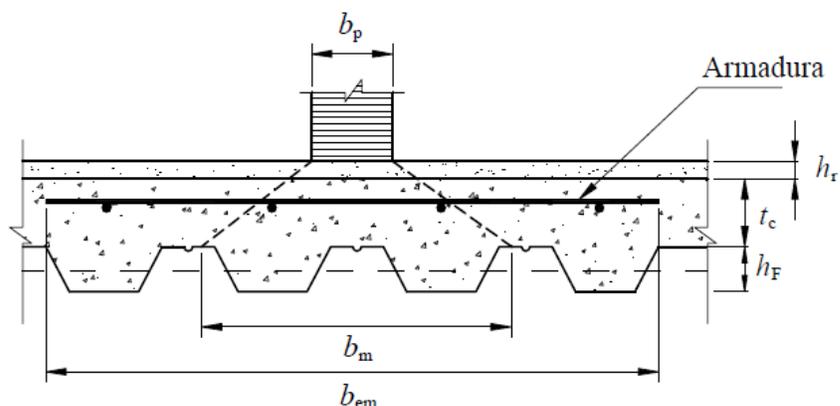


Figura 10: Distribuição das cargas concentradas ou lineares

Largura efetiva

A norma traz as expressões de cálculo para a largura efetiva mínima que a laje deve ter, nos casos de vãos simples e tramos extremos de lajes contínuas, no caso de tramos internos de lajes contínuas e para cisalhamento vertical.

Armadura de distribuição

A norma diz que a armadura de distribuição pode ser calculada de acordo com a NBR 6118 e apresenta a expressão para o cálculo do momento transversal a ser considerado no dimensionamento da mesma.

6. Aços utilizados para fôrma e revestimento

Neste tópico o anexo diz que as fôrmas de aço devem ser fabricadas com chapas de aço estrutural que atendam aos requisitos da NBR 14762:2010. Traz recomendações sobre proteção por galvanização e fala que caso decida-se usar outro tipo de proteção a eficiência desta deve ser comprovada por meio de estudos específicos.

3. Estado da Arte

É sabido que no Brasil existe uma carência muito grande de estudos que tratem de incêndio em estruturas de concreto armado. Até o ano de 1947 as referências brasileiras no assunto advinham dos continentes europeu e americano e de observações experimentais feitas no Instituto de Pesquisas Tecnológicas (I.P.T). No referido ano foi publicado na Revista Politécnica uma nota que tratava do incêndio ocorrido;

Molinari (1949): “Irrompeu, em maio de 1947, violento incêndio no edifício que está sendo construído para sede da Agência do Banco do Brasil em São Paulo. Parte da estrutura do edifício, toda ela em concreto armado, ficou seriamente atingida, dando lugar, em inspeção posterior, a importantes observações colhidas pelo I.P.T.”.

Para o presente trabalho não se buscou fazer um resumo histórico sobre o tema, mas sim a análise de publicações que embasassem o estudo de incêndio em Lajes do tipo Steel Deck. Não se encontrou bibliografia que tratasse do tema de forma específica de sorte que se tomaram como referência os presentes citados a seguir.

3.1 Trabalhos Científicos

O primeiro trabalho analisado trata-se de uma tese de mestrado feita por Castro G. S. G. (2005). Nesta, o autor utiliza um programa de elementos finitos para simulação da distribuição tridimensional de temperaturas, para avaliar se estruturas de concreto dimensionadas em temperatura ambiente resistem aos incêndios com diferentes tempos requeridos.

O autor segue o procedimento descrito na NBR15200:2004 conforme os seguintes passos:

Determinam-se os coeficientes de ponderação para o aço, concreto e ações atuantes na peça. Utiliza-se o diagrama tensão x deformação fornecido pela NBR 6118 para determinar a tensão de compressão no concreto. Determina-se com base na NBR14432, conforme o tempo e ocupação o tempo requerido de resistência ao fogo. Calcula-se a armadura em temperatura ambiente segundo os procedimentos descritos na ABNT NBR 6118.

Até tal ponto os passos seguidos pelo autor são todos procedimentos normatizados.

O passo seguinte é a determinação da distribuição da temperatura nos elementos analisados. Esta deve ser calculada considerando-se as não linearidades envolvidas. No caso, o autor utilizou o programa Thersys – “Sistema para simulação via MEF da distribuição 3D de temperatura em estruturas em situação de incêndio. Este programa, elaborado por Ribeiro (2003), fundamenta-se no Método dos Elementos Finitos, realiza análise térmica para elementos bidimensionais e tridimensionais de geometria qualquer”.

O autor observou que pontualmente a temperatura do aço e do concreto eram praticamente idênticas. Isto posto, deduziu-se que a hipótese do cobrimento ser fundamental para proteger a armadura do calor é incorreta. O cálculo dos coeficientes de redução das propriedades mecânicas do aço e concreto é feito da seguinte maneira:

As propriedades dos materiais variam conforme a temperatura θ ;

Os valores utilizados para a redução são os advindos da NBR 15200; 2004, por meio da interpolação linear dos dados obtidos;

Para o aço e o concreto determina-se o módulo de elasticidade e a resistência característica na temperatura θ .

Para a determinação do esforço resistente em situação de incêndio o autor segue os seguintes preceitos:

Em situação de incêndio os coeficientes de majoração das ações são inferiores aos utilizados em temperatura ambiente, desta forma é possível que a resistência da peça seja maior àquela tomada em temperatura ambiente. Entretanto, em hipótese alguma, a resistência de uma peça deve ser tomada como superior à resistência de cálculo a 20°C.

Se este novo esforço for igual ou superior ao esforço obtido à temperatura ambiente, a peça resiste ao incêndio para o qual foi verificado.

A contribuição deste trabalho na verificação das peças de concreto armado foi o estudo das seções usuais de vigas, pilares e lajes. A distribuição da temperatura nos elementos estruturais é determinada pelo programa THERSYS. Este programa foi desenvolvido para trabalhar com o pré e pós-processador gráfico GID (CIMNE,2000). Entretanto, o uso do programa GID requer licenças, não sendo facilmente acessível a todos os usuários. Assim sendo, o trabalho elabora um banco de dados de temperaturas para seções usuais que é obtido pelos programas descritos anteriormente. No seguir se apresenta o caso das lajes do estudo. O autor tabelou os valores das temperaturas para as alturas da tabela 3 e o seu respectivo TRRF.

Tabela 2: Alturas de Lajes Estudadas

Laje	Altura (cm)
1	8
2	10
3	12
4	13
5	15
6	20

Como exemplo na tabela 3, tem-se os valores referentes aos TRRF de 30, 60, 90 e 120 min para a laje de 10 cm de espessura, tabela a ser posteriormente comparada com a laje em estudo neste trabalho com uma altura efetiva (h_{ef}) de 11,5cm.

Tabela 3: Temperaturas para a Laje de 10cm

Fatia	30min	60min	90min	120min
0	680	857	944	1002
0,5	572	760	859	927
1	438	674	782	858
1,5	409	599	712	794
2	347	534	650	737
2,5	296	477	595	684
3	252	427	546	638
3,5	215	383	502	595
4	184	345	463	558
4,5	158	311	429	525
5	136	282	399	495
5,5	117	257	372	469
6	101	235	350	446
6,5	88	216	330	427
7	77	200	313	410
7,5	69	187	299	396
8	62	176	288	385
8,5	57	168	279	377
9	53	163	273	370
9,5	51	159	270	367
10	50	158	269	366

Essas tabelas serviram para a determinação dos coeficientes de redução do aço e do concreto de acordo com a temperatura desejada:

- Determinação dos coeficientes de redução no concreto k_c :

O autor faz uma interpolação linear nos resultados obtidos da discretização de 0,5 em 0,5cm para obter a temperatura de 0,1 em 0,1 cm. Conclui aceitáveis os valores da interpolação e faz o cálculo do k_c segundo descrição da norma.

- Determinação dos coeficientes de redução no aço k_s :

O autor determina as temperaturas na barra de aço e faz os cálculos do coeficiente k_s segundo recomendações da norma

Finalmente, para a obtenção do esforço final em situação de incêndio calcula-se a nova linha neutra em situação de incêndio com o diagrama parábola-retângulo, reduzindo-se convenientemente as tensões no concreto.

Após o desenvolvimento do método o autor traz as aplicações numéricas do mesmo. Ele apresenta alguns exemplos de estruturas usuais, com diversas geometrias e carregamentos. Ainda faz comparações com o método simplificado de cálculo proposto por SOARES (2003).

Em um dos exemplos analisados pelo autor para uma determinada condição de laje foram verificados os resultados a seguir:

“Segundo o Método Geral, este exemplo mostra que a laje resiste a um TRRF superior a 60 minutos. Pelo Método Simplificado, a laje resiste a um TRRF superior a 90 minutos. Este é um dos exemplos onde o método Geral mostra-se mais conservador que o método simplificado”.

Tais divergências de resultados são apresentadas em suas conclusões. O autor busca explicações para os fatos apresentados;

“No caso das lajes, por exemplo, o Método Geral apresenta valores de temperatura obtidos pelo programa Thersys, aproximadamente 40% superiores ao Método Simplificado, que utiliza a tabela de variação de temperaturas proposta pela ABNT NBR 14323:1999. Segundo Ribeiro (2003), esta divergência ocorre devido às propriedades térmicas do concreto serem totalmente dependentes dos 93 agregados utilizados, tipo de cimento, traço, processo de cura e presença de umidade nos poros e micro poros. Dessa forma, as propriedades reais do concreto utilizado nos ensaios que geraram os dados do Método Simplificado raramente serão as mesmas utilizadas no modelo numérico, explicando-se, então, esta divergência.”

Zago, C. da S.; Moreno J. e Marin M (2014) trazem considerações a respeito do estudo da engenharia de segurança contra incêndios, expondo casos ocorridos no Brasil, enfatizando a escassez de estudos específicos envolvendo estruturas pré-moldadas e justificando a necessidade da mesma.

Apresentam em seguida os fundamentos desta engenharia, cujos requisitos fundamentais são resistência, isolamento e estanqueidade (R-E-I). Tratam das variáveis do estudo de incêndio de maior controle e explicam o porquê da utilização da curva de incêndio padrão ISO834 e a essência do TRRF, tempo que a estrutura resiste ao incêndio padrão.

O decorrer do artigo consiste em enquadrar o estudo das estruturas pré-moldadas nos requisitos fundamentais de R-E-I.

-Resistência:

Consiste na análise estrutural regida pelas teorias da estática e da resistência dos materiais. Em incêndio estas teorias continuam válidas, a diferença é a combinação em caráter excepcional. Como alternativa, pode-se realizar uma verificação que leve em conta a redução da resistência mecânica dos materiais e a capacidade dos elementos estruturais, mediante a Equação 1:

$$F_d, f_i = \gamma_g F_{gk} + F_{qexc} + \gamma_q \sum \psi_{2j} F_{qjk} \quad (3.1)$$

Apresentam o efeito Spalling que, segundo Kirchof et al. (2011), consiste na dificuldade para a saída do vapor de água gerada pelo aquecimento, tendo assim um acréscimo de pressão interna e o surgimento de tensões de tração que superam a resistência do concreto e trata das temperaturas críticas para o aço devidas aos diferentes coeficientes de dilatação para o aço e o concreto que em temperaturas elevadas podem se distanciar em até 30 vezes, causando tensões que podem levar a fissura da peça. Essas tensões podem ser definidas como um limite de temperatura no qual a armadura se encontra.

A norma Eurocode 2 prescreve algumas temperaturas críticas de diferentes tipos de aço

- Barras protendidas: 400 °C;
- Fios e cordoalhas protendidas: 350 °C;
- Barras de aço convencionais para o concreto armado: 500°C.

Por fim, apresentam o critério de deformação crítica em lajes de acordo com o manual da FIB n. 43 (2008). Tal situação crítica ocorre quando o fogo cobre uma larga superfície, resultando em grandes deformações acumuladas. Nesse caso é possível assumir que, tomando uma grande área de piso, a deformação longitudinal acumulada em tramos sucessivos pode chegar a 100 mm ou mais.

- Estanqueidade

Este fundamento consiste que aberturas desprotegidas podem reduzir a resistência ao fogo em alguns ambientes. Portanto, as juntas estruturais devem ser concebidas de forma à respeitar as condições impostas pelo incêndio Eurocode1 (2002) onde se recomenda que as larguras nas juntas não excedam o limite de 20 mm e não tenham mais que a metade da espessura do elemento. O manual do PCI (PRESTRESSED CONCRETE INSTITUTE) aborda esse assunto de maneira mais abrangente. Os autores afirmam que a utilização das capas de concreto moldadas in loco traz grande benefício para a resistência ao fogo, em lajes alveolares, uma vez que o concreto sela a chave de cisalhamento.

- Isolamento

Para este requisito, o elemento construtivo deverá ter a capacidade de impedir, em sua face não exposta ao fogo, um incremento de temperatura maior que 140°C, na média dos pontos de medida, ou temperaturas maiores que 180°C em qualquer ponto de medida (ABNT, 2001).

Trazem em seguida considerações do PCI e do Eurocode2 sobre o isolamento de lajes e painéis alveolares, que afirmam ser os elementos mais preocupantes quanto se trata do isolamento.

Antes de apresentar as conclusões, o artigo é demonstra, segundo a ABNT NBR 14432;2001 as estruturas isentas de verificação quanto ao incêndio mas ressaltam que deve se atentar que, para a realização de um projeto seguro ante um incêndio, o responsável técnico deverá ter um discernimento apurado para realizar esse tipo de avaliação, tendo em vista o valor agregado da edificação ou dos materiais que ela abrigará.

Na conclusão consta a afirmação da carência de trabalhos nacionais sobre o assunto e que a utilização dos trabalhos internacionais pode causar imprecisões devido à diferentes características climáticas e essência de materiais. Ainda existem, portanto, pontos que podem ser analisados e acrescentados à NBR 15200; 2004.

Mesmo com essa defasagem no campo dos conhecimentos sobre o assunto é notória a afirmação que O sistema pré-moldado possui grande vantagem em situação de incêndio graças ao controle tecnológico.

De uma maneira geral deve-se sempre seguir as recomendações normativas e projetar estruturas com segurança, edificações que possuem análise e dimensionamento estrutural que respeitem as condições impostas há menor risco de colocar vidas e patrimônio em perigo.

3.2 Normas

A NBR 15200:2004 é uma norma elaborada pela Associação Brasileira de Normas Técnicas que tem por objetivo estabelecer os critérios de projeto de estruturas de concreto em situação de incêndio e a forma de demonstrar seu atendimento. Ela se aplica às estruturas projetadas de acordo com a NBR 6118 e NBR 9062.

Primeiramente a norma apresenta os requisitos gerais da verificação das estruturas em situação de incêndio, que são:

- Limitar o risco à vida humana,
- Limitar o risco à vizinhança e sociedade;
- Limitar o risco da propriedade exposta ao fogo.

A norma considera que esses objetivos são atendidos se a estrutura apresentar a função corta-fogo e a função de suporte, ou seja, a estrutura não permite que o fogo a ultrapasse ou que o calor a atravesse em quantidade suficiente para gerar combustão no lado oposto ao incêndio inicial e mantém sua capacidade de suporte da construção como um todo ou de cada uma de suas partes, evitando o colapso global ou o colapso local progressivo respectivamente. Essas duas condições devem ser verificadas sob combinações excepcionais de ações no estado limite último, de modo que sejam aceitáveis plastificações e ruínas locais que não determinem colapso além do local.

No capítulo seguinte a norma traz as propriedades dos materiais em situação de incêndio pois estas variam conforme a temperatura a que são submetidos por ação do fogo.

Para o concreto a norma apresenta a tabela 4 com $f_{c,\theta}/f_{ck}$ e $E_{c,\theta}/E_c$ (resistência e módulo de elasticidade) em função da temperatura. Ela diferencia o concreto de acordo com o tipo de agregado, se este é calcário ou silicoso. Essas razões são dadas por coeficientes cujos gráficos também são apresentados na norma.

Tabela 4: Redução das propriedades do concreto em função da temperatura

Temperatura do Concreto (°C)	Agregado Silicoso		Agregado Calcáreo	
	$f_{c,\theta} / f_{ck}$	$E_{c,\theta} / E_c$	$f_{c,\theta} / f_{ck}$	$E_{c,\theta} / E_c$

20	1	1	1	1
100	1	1	1	1
200	0,95	0,9	0,97	0,94
300	0,85	0,72	0,91	0,83
400	0,75	0,56	0,85	0,72
500	0,6	0,36	0,74	0,55
600	0,45	0,2	0,6	0,36
700	0,3	0,09	0,43	0,19
800	0,15	0,02	0,27	0,07
900	0,08	0,01	0,15	0,02
1000	0,04	0	0,06	0
1100	0,01	0	0,02	0
1200	0	0	0	0

Tabela 5: Redução das propriedades do concreto em função da temperatura

Temperatura do aço (θ)	$f_{y,\theta} / f_{yk}$			$E_{s,\theta} / E_s$	
	Tração		Compressão	CA-50	CA-60
	CA-50	CA-60			
20	1	1	1	1	1
100	1	1	1	1	1
200	1	1	0,89	0,9	0,87
300	1	1	0,78	0,8	0,72
400	1	0,94	0,67	0,7	0,56
500	0,78	0,67	0,56	0,6	0,4
600	0,47	0,4	0,33	0,31	0,24
700	0,23	0,12	0,1	0,13	0,08
800	0,11	0,11	0,08	0,09	0,06
900	0,06	0,08	0,06	0,07	0,05
1000	0,04	0,05	0,04	0,04	0,03
1100	0,02	0,03	0,02	0,02	0,02
1200	0	0	0	0	0

Para o aço a mesma consideração é feita, a norma apresenta a tabela 5 que leva em consideração as razões $f_{y,\theta}/f_{yk}$ e $E_{s,\theta}/E_s$ do aço em função da temperatura, entretanto se faz a distinção entre armadura passiva e armadura ativa. A tabela de armadura passiva traz os casos de tração e compressão para os aços CA- 50 e CA-60. A tabela de

armadura ativa ($f_{py,\theta}/f_{pyk}$; $E_{ps,\theta}/E_{ps}$) diferencia estas razões para fios e cordoalhas. Em ambos os casos o gráfico dos coeficientes dessas razões é apresentado.

Em seguida a norma apresenta o conceito do TRRF (tempo requerido de resistência ao fogo) é definido como o tempo mínimo de resistência ao fogo, preconizado pela mesma, de um elemento construtivo quando sujeito ao incêndio-padrão, sendo tanto maior quanto maiores forem o tamanho e a carga de incêndio (energia gerada pela combustão de materiais presentes em um compartimento) da edificação. Através dele, obtém-se a máxima temperatura de incêndio que deve ser usada para verificação dos elementos de construção. Ele é determinado a partir de características da construção e seu uso. Neste tópico a norma faz uma afirmação muito importante; “Como com o aquecimento, a rigidez das peças diminui muito e a capacidade de adaptação plástica cresce proporcionalmente; os esforços gerados pelo aquecimento podem, em geral, ser desprezados.”

O incêndio padrão é definido segundo a NBR 14432:2011 como: “Elevação padronizada de temperatura em função do tempo, dada pela seguinte expressão:”

$$\theta_g = \theta_0 + 345 \log(8t + 1) \quad (3.2)$$

Onde:

t - tempo de incêndio, desde o início da queima do material combustível, em minutos;

θ_g - temperatura dos gases em função do tempo t;

θ_0 - temperatura ambiente inicial, geralmente adotada igual a 20 °C.

A curva ISO834:2011 é ilustrada pelo gráfico 1, mostrada a seguir, nela é possível visualizar o comportamento logarítmico da evolução da temperatura dos gases.

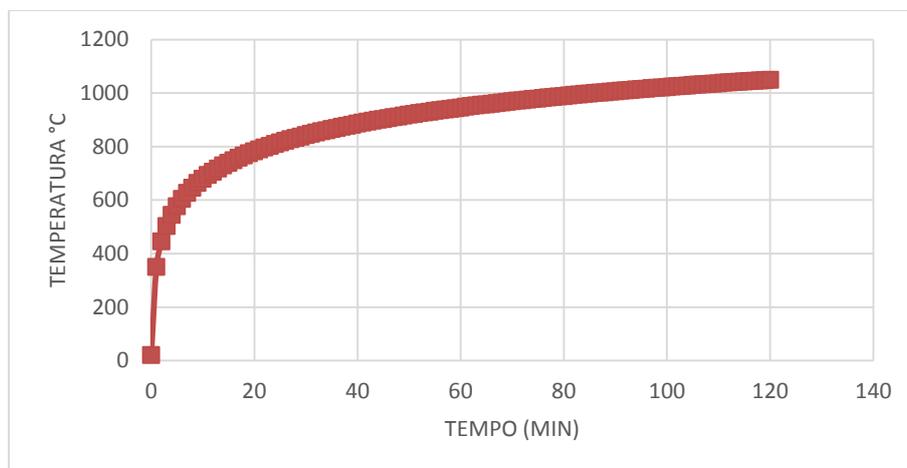


Gráfico 1: Curva ISO 834:2011

Por fim, em seu último capítulo, a norma apresenta os métodos de verificação de estruturas de concreto em situação de incêndio. Estas são feitas de acordo com a equação 1, combinação do ELU.

Sobre esta verificação a norma faz as seguintes observações:

- a) usualmente, desprezam-se todos os esforços decorrentes de deformações impostas, por serem muito reduzidos e pelas grandes deformações plásticas que ocorrem em situação de incêndio;
- b) a ação do incêndio se traduz, usualmente, apenas na redução da resistência dos materiais e na capacidade dos elementos estruturais;
- c) como o incêndio tem uma probabilidade de ocorrência extremamente baixa, a ABNT NBR 8681 permite adotar para o fator de combinação ψ o valor dos fatores de redução ψ_{2j} correspondentes à combinação quase permanente.

Assim, a verificação usual da estrutura em incêndio se reduz a mostrar a seguinte equação 2:

$$S_d, f_i = (\gamma_g F_{gk} + \gamma_q \sum \psi_{2j} F_{qjk}) \leq R_d, f_i [f_{ck}, \theta, f_{yk}, \theta, f_{pyk}, \theta] \quad (3.2)$$

Existem vários métodos para fazer essa verificação. Os métodos aceitos pela norma e que serão utilizados no presente trabalho estão resumidos no que se apresenta no seguinte:

Método Tabular

Este varia de acordo com o TRRF requerido. Para utilizá-lo, apenas é necessário atender às dimensões mínimas respeitando a NBR 6118:2003 e NBR 15200:2004.

Essas dimensões mínimas são normalmente a espessura das lajes, a largura das vigas, as dimensões das seções transversais de pilares e tirantes e principalmente a distância entre o eixo da armadura longitudinal e a face do concreto exposta ao fogo.

Ensaio mostram que em situação de incêndio as peças de concreto rompem por flexão ou flexo-compressão e não por cisalhamento. Considera-se apenas armadura longitudinal nesse critério.

Nessa seção são apresentadas tabelas da dimensão mínima em função do TRRF requerido para vigas, pilares e lajes. No que se refere as lajes as tabelas tratam dos seguintes casos:

- Lajes apoiadas em vigas;
- Lajes lisas ou cogumelo;
- Lajes nervuradas bi-apoiadas.
- Lajes nervuradas apoiadas em 3 ou 4 lados contínuos;

Tabela 6: Exemplo do método tabular para lajes lisas ou cogumelo

TRRF min	h mm	c1 mm
30	150	10
60	180	15
90	200	25
120	200	35
*Dimensões mínimas para garantir a função corta-fogo.		

No que se refere ao estudo direcionado a este trabalho, destacam-se as seguintes afirmativas presentes neste método:

Na elaboração das tabelas considerou-se a condição do fogo na face inferior da peça;

Traz as espessuras mínimas e distâncias à face do concreto e eficiência relativa ao concreto.

Método Geral de Cálculo

A norma recomenda que ao se utilizar este método aos critérios mínimos a serem considerados são:

- a) As combinações em situação de incêndio em conformidade com a ABNT NBR 8681;
- b) Para se considerar os esforços de cálculo acrescidos dos efeitos da temperatura deve-se considerar modelos não lineares que sejam capazes de considerar as profundas redistribuições de esforços que ocorrem;
- c) Os esforços resistentes devem ser calculados considerando as distribuições de temperatura conforme o TRRF requerido;

- d) As distribuições de temperatura e resistência devem ser rigorosamente calculadas considerando distribuições NÃO lineares.

A Norma ressalta que os programas utilizados devem ser validados, ser de uso consagrado internacionalmente ou ser avaliados por ensaios experimentais em estruturas o atendimento aos requisitos de estanqueidade, quando exigidos, pode ser feito por ensaios experimentais do elemento que deve apresentar função corta-fogo, em escala reduzida (amostra do material ou sistema), de acordo com a NBR 5628.

No que se diz respeito norma NBR14323:2013, pode-se destacar o anexo C o qual trata do dimensionamento de lajes mistas de aço e concreto em situação de incêndio. As regras nela apresentadas são aplicáveis à verificação em situação de incêndio de lajes simplesmente apoiadas ou contínuas, sem ou com material de revestimento contra fogo, quando expostas ao incêndio pela face inferior.

Quanto ao critério de estanqueidade ela o garante pela presença da forma de aço. Para o isolamento térmico é necessário que a laje, segundo a tabela C.1 apresentada, tenha no mínimo 60mm de altura efetiva a fim de garantir um TRRF de 30 min. Em seguida, de acordo com as dimensões do concreto e da forma é dada a fórmula para a conversão da altura da laje Steel Deck em altura efetiva.

Tabela 7: Tabela C1 da NBR 14323:2013

TRRF (mm)	Espessura efetiva mínima h_{ef} (mm)
30	60
60	80
90	100
120	120

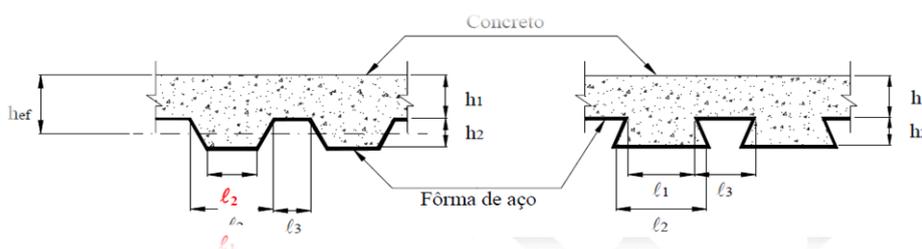


Figura 11: Figura C.1 na NBR 14323:2013 para o cálculo da h_{ef}

- Para $h_2/h_1 \leq 1,5$ e $h_1 > 40\text{mm}$

$$h_{ef} = h_1 + \frac{h_2}{2} \left(\frac{l_1 + l_2}{l_1 + l_3} \right) \quad (3.3)$$

- Para $h_2/h_1 > 1,5$ e $h_1 > 40\text{mm}$

$$h_{ef} = h_1 \left(1 + 0,75 \frac{l_1 + l_2}{l_1 + l_3} \right) \quad (3.4)$$

Para o cálculo da capacidade resistente em situação de incêndio considerando os valores dos momentos positivos e negativos resistentes de cálculo $M_{fi,Rd}$ e $M_{fi,Rd+e}$ os modos de colapso possíveis, que dependem da existência ou não de armaduras positiva ou negativa no interior do concreto acima da forma de aço.

Os preceitos de resistência estrutural são dados em função da análise plástica considerando os momentos fletores positivo e negativo e os modos de colapso possíveis.

- Momento Fletor Positivo

No cálculo desse momento, devem ser determinadas as forças de tração proporcionada pela armadura positiva e pelos componentes da fôrma de aço (mesa inferior, alma e mesa superior) e a força de compressão proporcionada pelo concreto, que devem estar em equilíbrio.

A força de compressão resistente proporcionada pelo concreto pode ser tomada à temperatura ambiente, conforme a NBR 6118, considerando a tensão igual a f_{ck} .

A força proporcionada pela armadura positiva é igual ao produto de sua área pela resistência ao escoamento do aço à temperatura θ_s . A norma apresenta um método simplificado para obtenção desta temperatura em função do TRRF requerido e da geometria da laje. A norma fala que a resistência ao escoamento da armadura na temperatura θ_s pode ser calculada com os fatores de redução dados na NBR 15200 (tabela 4 e tabela5).

A força proporcionada pela fôrma de aço, caso se opte por considerar a resistência da mesma no dimensionamento, pode ser calculada com os fatores de redução para a resistência ao escoamento dos aços $k_{y,\theta}$ apresentados nesta norma (tabela 8). A norma também apresenta um método simplificado para se calcular a temperatura da laje em função da geometria da forma de aço e do TRRF requerido.

Tabela 8: Redução das propriedades mecânicas de elementos de aço

Temperatura do aço θ_a (°C)	Fator de redução da resistência ao escoamento $k_{y,\theta}$	Fator de redução do módulo de elasticidade $k_{E,\theta}$
20	1	1
100	1	1
200	1	0,9

300	1	0,8
400	0,94	0,7
500	0,67	0,6
600	0,4	0,31
700	0,12	0,13
800	0,11	0,09
900	0,08	0,0675
1000	0,05	0,045
1100	0,03	0,0225
1200	0	0

Observa-se que quanto maior a temperatura, menor a resistência do aço. A norma permite interpolação linear para os valores não tabelados.

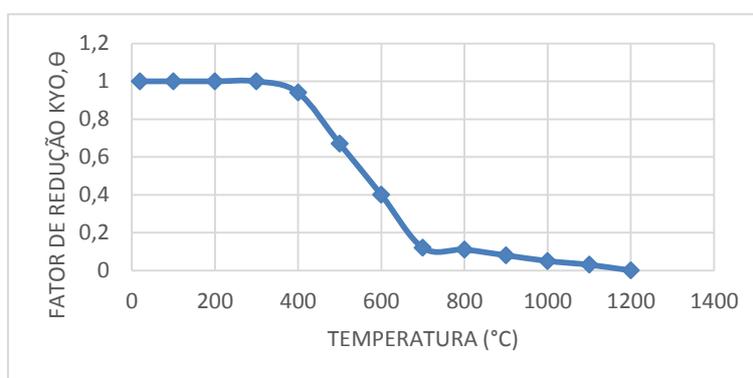


Gráfico 2: Redução do fy do aço em função da temperatura

- Momento Fletor Negativo

O momento fletor negativo resistente de cálculo da laje corresponde ao momento de plastificação, obtido com base no diagrama de tensões na seção da laje totalmente plastificada. No cálculo desse momento, devem ser determinadas as forças de tração proporcionada pela armadura negativa e a força de compressão proporcionada pelo concreto, que devem estar em equilíbrio.

A força de tração resistente proporcionada pela armadura negativa pode ser tomada à temperatura ambiente, igual a:

$$N_s = A_s f_{ys} \quad (3.5)$$

Onde:

A_s : É a área de todas as barras da armadura;

f_{ys} : É a resistência ao escoamento do aço das barras da armadura.

O momento fletor negativo resistente de cálculo pode ser obtido utilizando-se uma seção transversal reduzida, na qual se despreza a parte da seção com temperatura superior à temperatura limite θ_{lim} . Esta temperatura limite depende também da geometria da laje e o procedimento de cálculo é apresentado na Norma.

Por último neste anexo a norma traz os procedimentos a serem adotados no caso de lajes com material de revestimento contra fogo.

4. Modelo em Elementos Finitos

4.1 Características gerais do programa

A resistência dos materiais e os métodos analíticos clássicos nos permitem obter resultados exatos de deslocamentos, deformações, tensões e esforços em todos os pontos de uma estrutura. O nível de precisão dessas soluções, porém, não é necessário à maioria das aplicações práticas da engenharia civil.

Com o desenvolvimento da tecnologia computacional métodos aproximados ganharam cada vez mais espaço e consistência no mercado. O Método dos Elementos Finitos trouxe consigo a união de resultados muito próximos do que seria obtido através de uma análise clássica pelos métodos da resistência dos materiais e a rapidez de cálculo para atender à demanda do mercado. Ele consiste em subdividir elementos em um número finito de partes através de pontos discretos, chamados de nós. A divisão da estrutura em pequenos elementos é chamada de malha nodal.

Existem vários programas de elementos finitos disponíveis no mercado e com finalidades distintas. Neste trabalho foi utilizado o programa ABAQUS/CA versão 6.13 para o problema de resistência de um elemento de laje submetido ao incêndio padrão. O modelo em questão foi baseado no que foi proposto por Correia, Rodrigues, Laim e Pires (2014) no artigo “Fire Resistance of Steel and Composite Steel and Concrete Columns under Fire Situation” e por Pires, Rodrigues e Silva (2013) no artigo “Numerical Assessment of the Fire Resistance of Tubular Steel Columns Filled with Concrete”.

4.2 Modelo térmico

O modelo térmico consiste nas seguintes etapas, que serão explicadas neste capítulo:

- Part;
- Property;
- Assembly;
- Step
- Interaction;
- Load;
- Mesh;
- Job.

A primeira etapa da modelagem é escolher o tipo de elemento a ser analisado no menu PART. No caso citado foram feitos dois elementos sólidos por extrusão. O elemento de laje tem altura de 14cm, largura de 1m e 2,8m de comprimento.

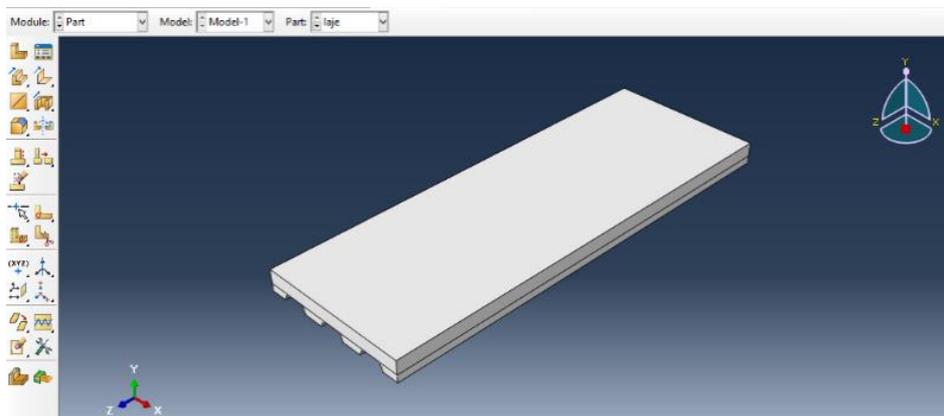


Figura 12: Part Laje

O elemento de Steel Deck tem altura de 0,95mm, largura de 1m e 2,8m de comprimento. Essas dimensões foram adotadas seguindo o catálogo do fabricante do Steel Deck (Tabela 1). Ele afirma que com a chapa de 0,95mm a laje de 14cm de altura suportaria uma sobrecarga de $5,40\text{kN/m}^2$, e teria um TRRF de 30min.

As dimensões da placa utilizadas para o cálculo são apresentadas na figura 14

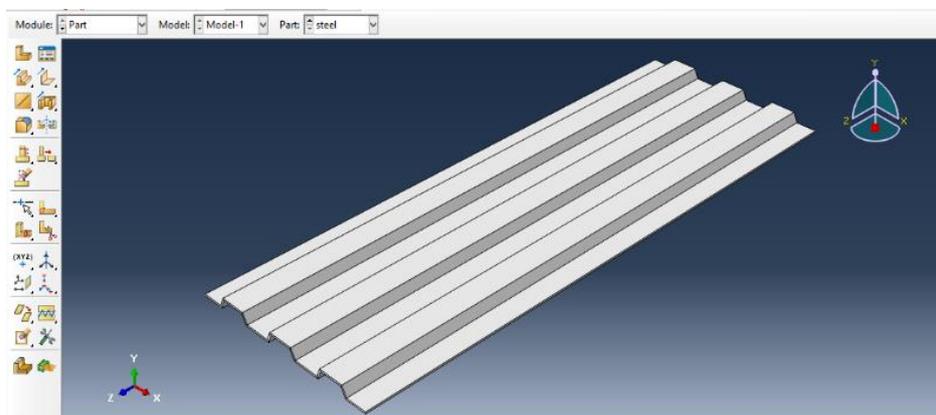


Figura 13: Part Steel

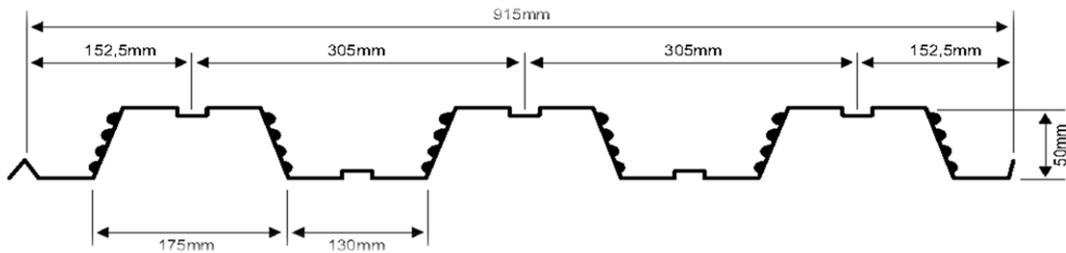


Figura 14: Dimensões da chapa do Fornecedor

A segunda etapa é feita no menu PROPERTY. É necessária a criação de materiais para utilização no modelo. Os materiais utilizados neste trabalho são aço (com tensão de escoamento $f_y 280\text{MPa}$) e concreto ($f_{ck} 20\text{MPa}$). Os parâmetros de entrada desses materiais são: condutividade, densidade, elasticidade, coeficiente de expansão e calor específico.

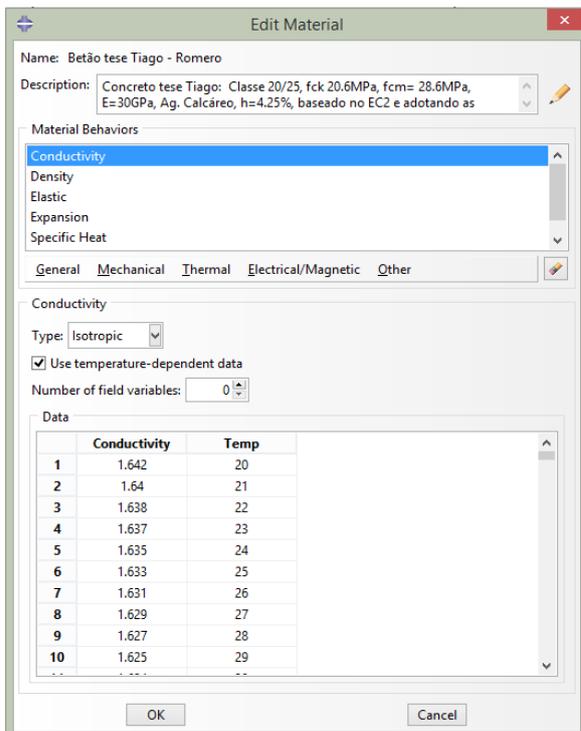


Figura 15: Parâmetros do Aço

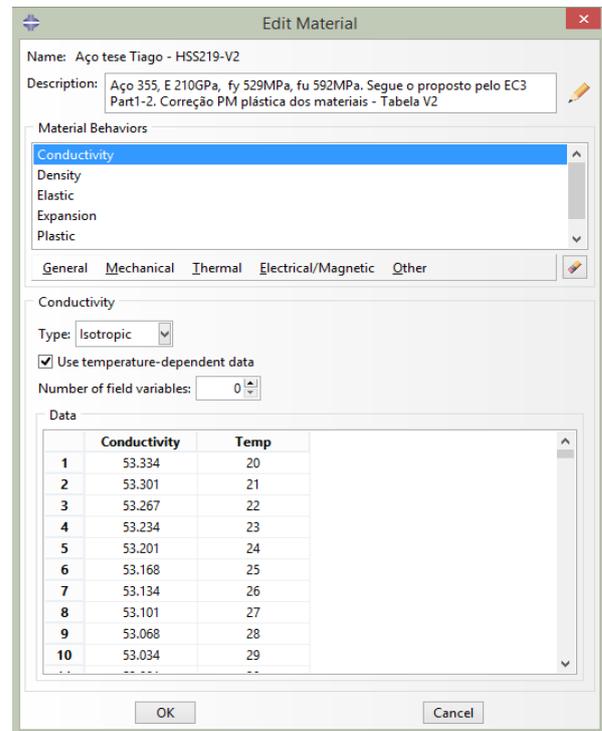


Figura 16: Parâmetros do Concreto

O programa exige que seja criada uma seção para atribuição desses materiais e essa seção deve ser atribuída à “PART” anteriormente criada.

A terceira etapa é o ASSEMBLY, onde o Steel Deck é simplesmente colocado em baixo da laje e eles devem conhecer em suas dimensões.

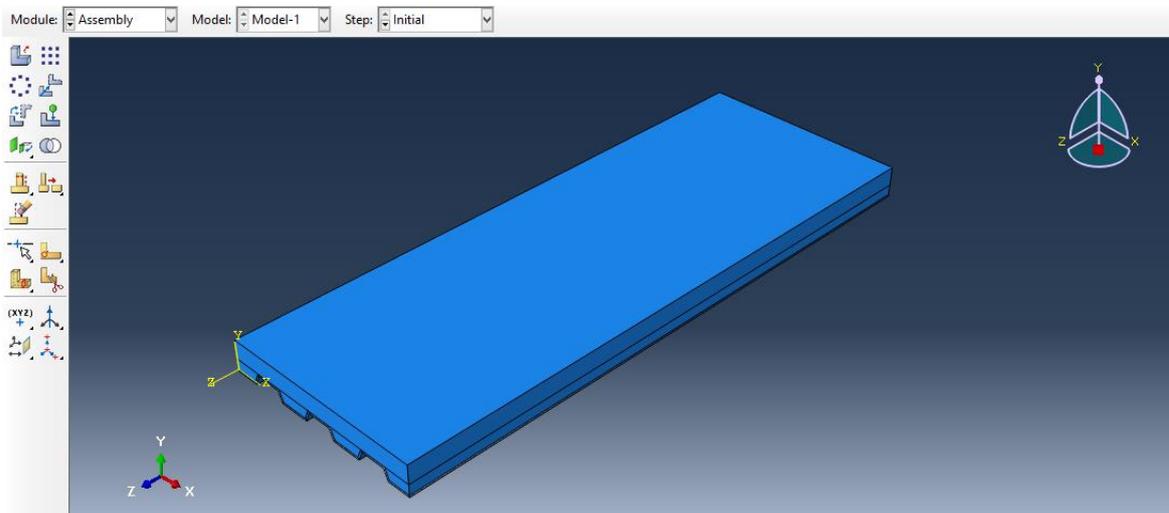


Figura 17: União da Laje com o Steel Deck

A quarta etapa é feita no menu STEP, onde é definido o intervalo de variação do carregamento, ou seja, o carregamento criado vai variar conforme as definições deste menu, são elas: a duração, o incremento inicial, o incremento máximo e mínimo que pode ser dado.

Para o modelo térmico tem-se apenas o “step” inicial onde está a condição de contorno de temperatura e o “step” aquecimento, no qual será definido a carga térmica da laje. No menu STEP também são definidas as saídas do programa, ou seja, as informações desejadas da análise.

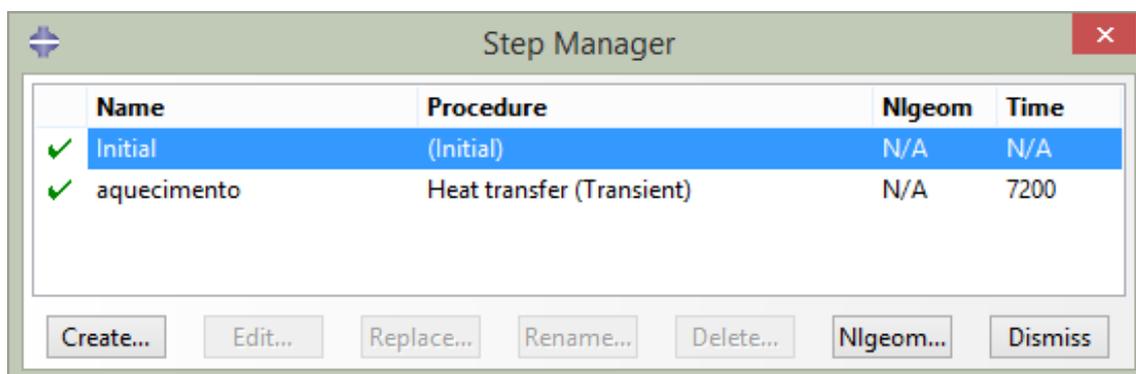


Figura 18: Etapas de carregamento "STEP"

A quinta etapa é feita no menu “INTERACTION”.

São definidas as duas formas de aquecimento da laje, radiação e convecção. Observa-se que as duas interações serão executadas pelo programa dentro do STEP “aquecimento”.

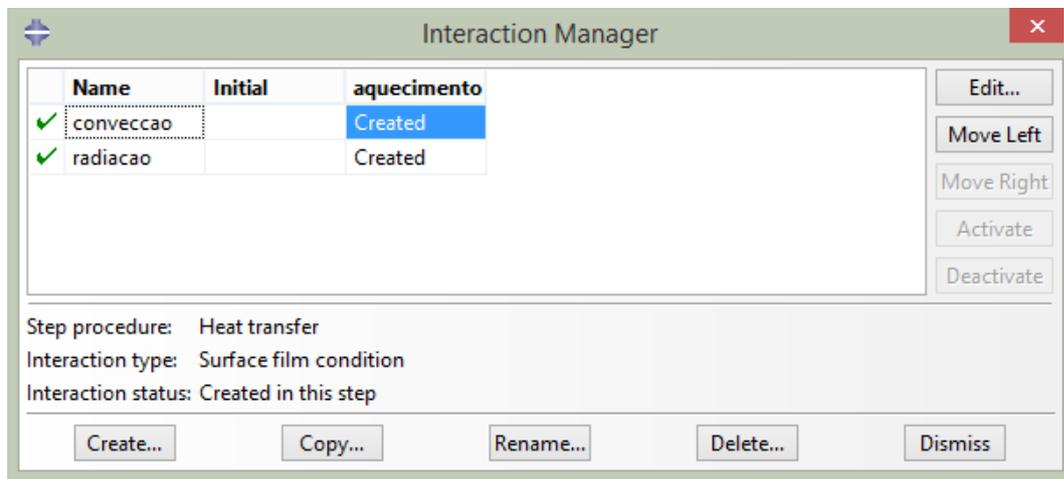


Figura 19: Mecanismos de transferência de calor

Radiação e convecção são os mecanismos de transmissão de calor que atuam nesta simulação. Para ambos processos a curva de aquecimento dos gases é inserida manualmente, a curva selecionada para este trabalho foi a de incêndio padrão da ISO834:1999, definida pela NBR 14432:2001, mostrada na Equação 5. O intervalo de tempo para a construção da curva foi de 10s.

Para simular o fenômeno da radiação o ABAQUS já possui para análise térmica a opção “surface film radiation”. Para esta interação são definidos os coeficientes indicados na figura 14. A superfície selecionada para atuação do mesmo foi a face inferior do Steel Deck.

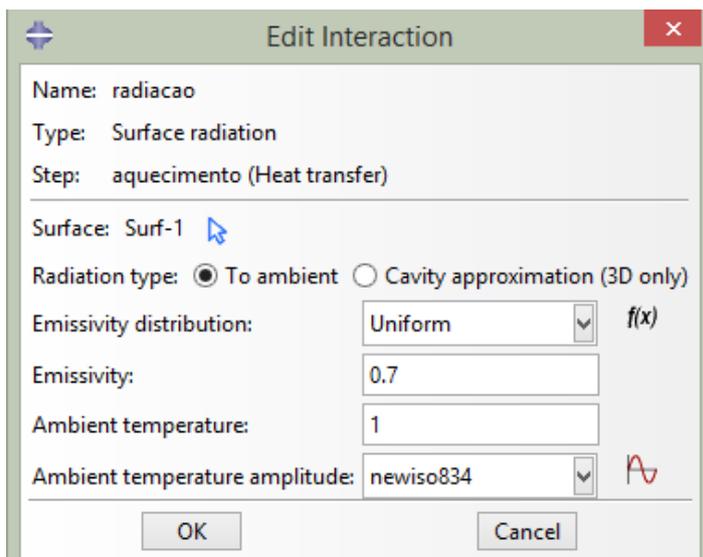


Figura 20: Coeficientes da Radiação

Para simular o fenômeno da convecção o ABAQUS já possui para análise térmica a opção “surface film condition”. Para esta interação são definidos os coeficientes indicados na figura 15. A superfície selecionada para a atuação do mesmo foi a face inferior do Steel Deck.

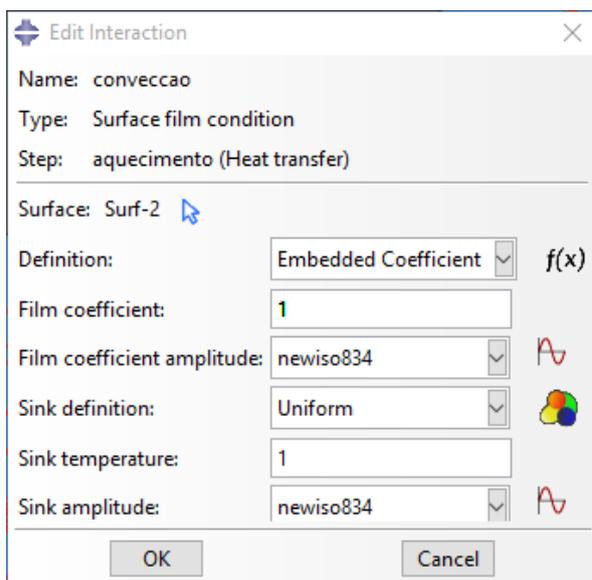


Figura 21: Coeficientes da Convecção

Ainda no menu INTERACTION é definido o tipo de contato entre a laje e o Steel Deck. A opção selecionada foi “TIE” que simula uma aderência perfeita entre as faces dos elementos, sem deslizamentos e sem perda de calor entre a chapa e o concreto até se suas malhas discretizadas forem diferentes. Mesmo sabendo se tratar de uma hipótese que não corresponde à realidade, em uma situação de incêndio, onde pode haver um desprendimento dos elementos e também existem peças de fixação como stud bolts. Esta ainda foi a escolhida por este trabalho ser um estudo preliminar, sem informações de uma análise experimental.

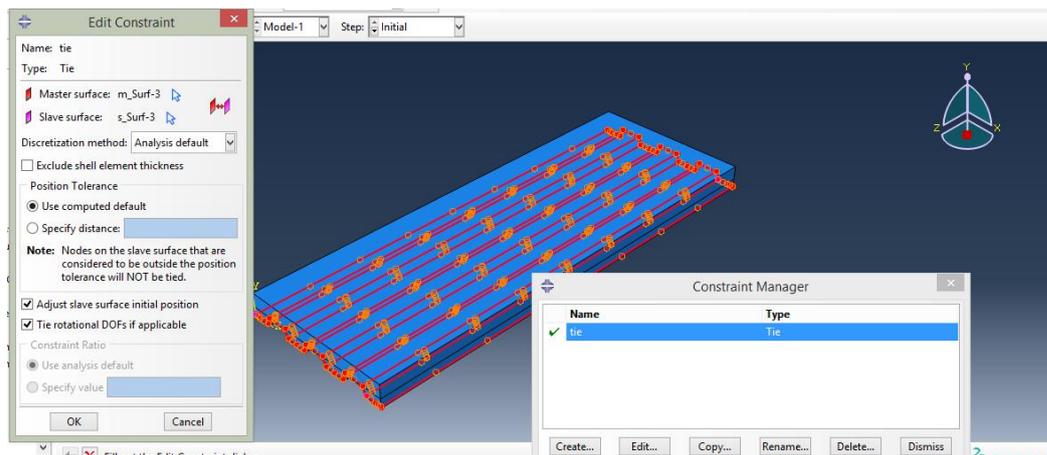


Figura 22: Contato entre os elementos

Segue a definição dada pelo ABAQUS para esta interação:

“A tie constraint ties two separate surfaces together so that there is no relative motion between them. This type of constraint allows you to fuse together two regions even though the meshes created on the surfaces of the regions may be dissimilar.”

A interação TIE exige que seja escolhida uma face como “master” e outra como “slave”. O Steel Deck foi selecionado como master e a laje de concreto como slave.

A sexta etapa é feita no menu LOAD. Por se tratar de um modelo térmico, neste menu não são definidas cargas nem condições de contorno, apenas as condições iniciais do modelo, ou seja, a temperatura ambiente. Note na figura 23 que toda a laje é envolvida por uma temperatura ambiente de 20°C.

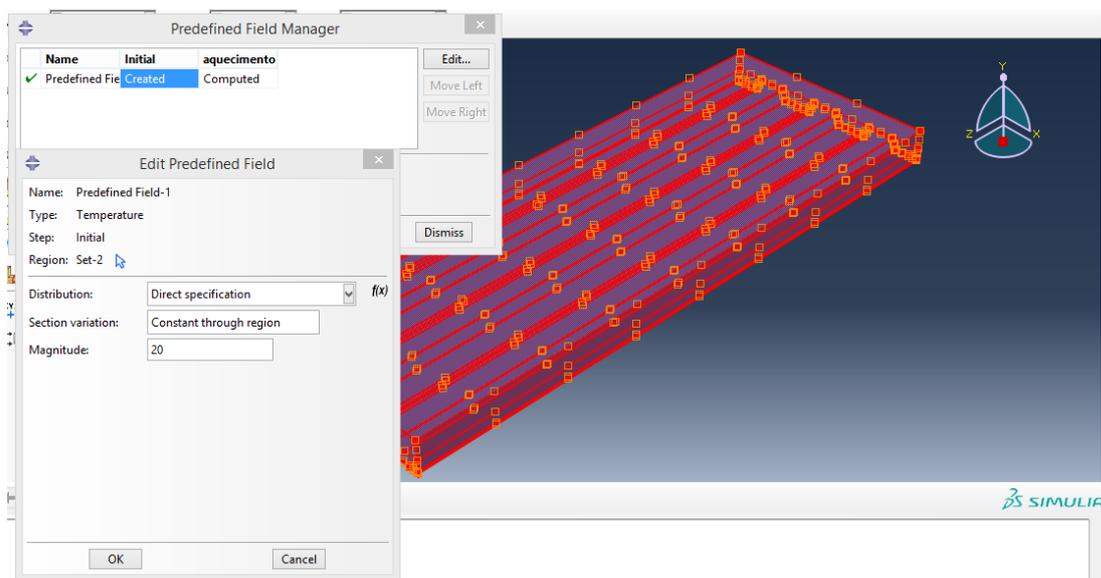


Figura 23: Temperatura ambiente

O último menu da modelagem é o MESH. Nele são estabelecidos o tipo e o tamanho da malha de discretização dos elementos. Às duas partes do modelo (stell deck e laje) é atribuída uma malha do tipo “Heat transfer” com divisão “Quadratic – hexagonal”. A malha será discretizada em pequenos elementos 3d de condução de calor, cada um com 20 nós, conforme visto na figura 18 “DC3D20”, sigla ser explicada abaixo.

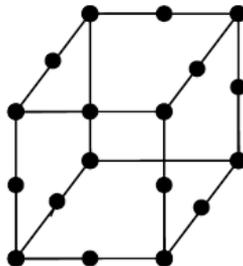


Figura 24: Elemento DC3D20

DC: Contínuo para esforços, deslocamentos e transferência de calor ou difusão de massa.

3D: Elemento com três dimensões.

20: Número de nós.

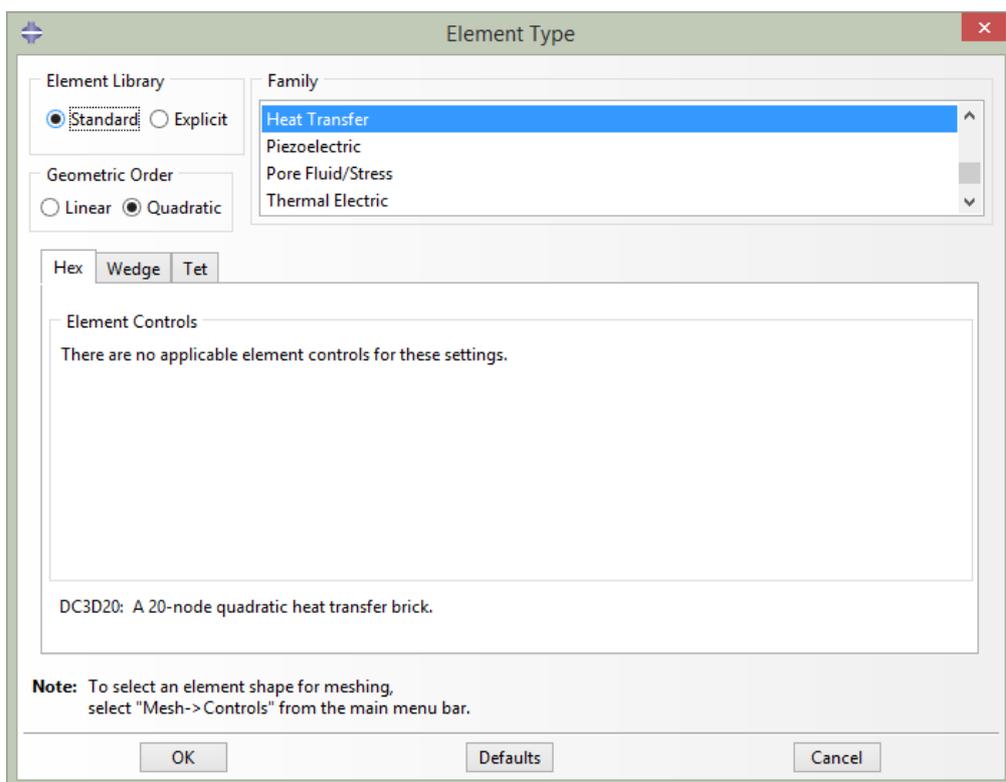


Figura 25: Elemento finito adotado no modelo térmico

A tabela 9 resume a discretização e as informações do processamento computacional.

Tabela 9: Dados do processamento

Número de nós	113791
Tipo do elemento	DC3D20
Tempo de processamento	30h
Características da CPU	8GB de HD; 500GB RAM; 4 Núcleos de processamento de 3.60GHz

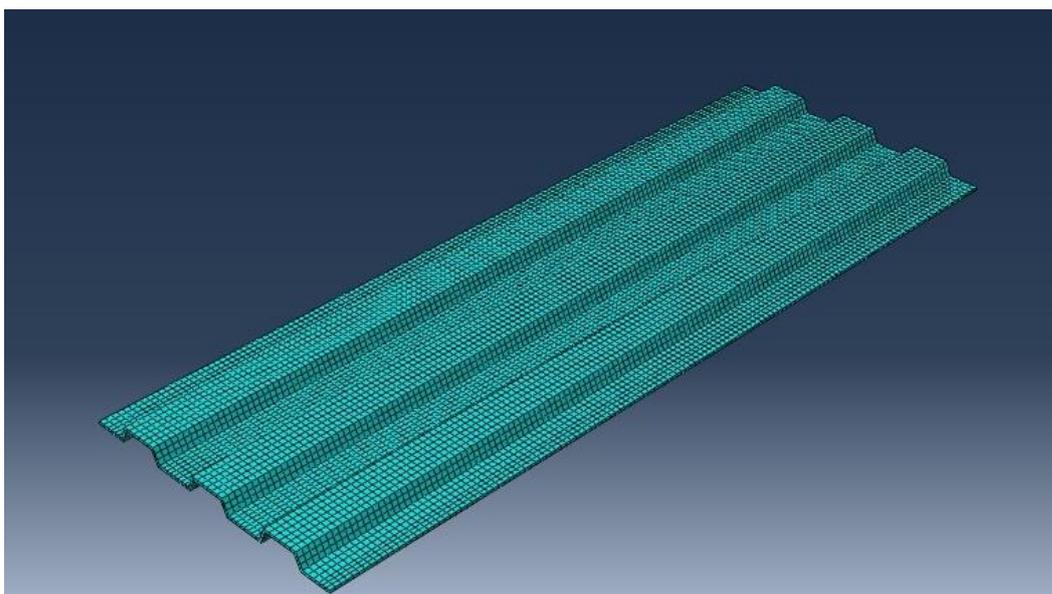


Figura 26: Malha utilizada para o Steel Deck

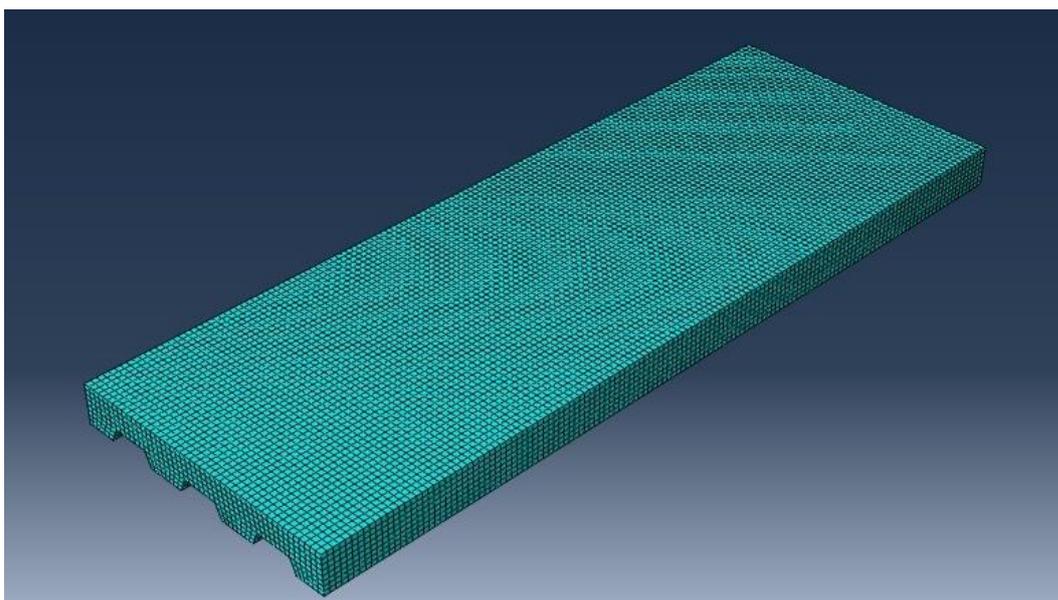


Figura 27: Malha utilizada para a laje de concreto

5. Resultados

Neste capítulo serão apresentados os dados obtidos da análise térmica do modelo numérico e as interpretações provenientes do mesmo.

5.1 Modelo Térmico

Os resultados da análise nos permitem ver a cada instante qual a temperatura nos elementos de laje. No tempo $t=0s$ da simulação temos que todo material encontra-se envolvido por uma temperatura $T_0=20^\circ C$.

A tabela a seguir mostra a evolução de temperatura em função do tempo para os nós selecionados e com destaque para os instantes analisados neste capítulo.

Tabela 10: Temperatura em função do tempo para os nós selecionados

Tempo (min)	LAJE	LAJE	STELL	STELL
	N: 1	N: 2	N: 3	N: 4
0	20	20	20	20
1	20	20	32	34
2	20	20	53	56
3	20	20	78	81
4	20	20	105	109
5	20	20	129	133
6	20	20	153	158
7	20	20	179	184
8	20	21	206	212
9	20	21	233	239
10	20	22	260	267
20	21	40	507	516
30	26	66	668	677
40	37	94	735	744
50	52	121	819	826
60	69	158	876	883
70	86	198	913	918
80	99	236	940	945
90	105	271	965	970
100	115	303	985	989
110	129	332	1003	1006
120	151	360	1019	1023

Para a elaboração da tabela 6 foram escolhidos 4 nós, um na face inferior da chapa, um na entre face da chapa com o concreto, um na metade da laje de concreto e, por último,

um na face superior do concreto. Esses nós estão indicados na figura e considera-se que estão numerados de 1 a 4 de cima para baixo.

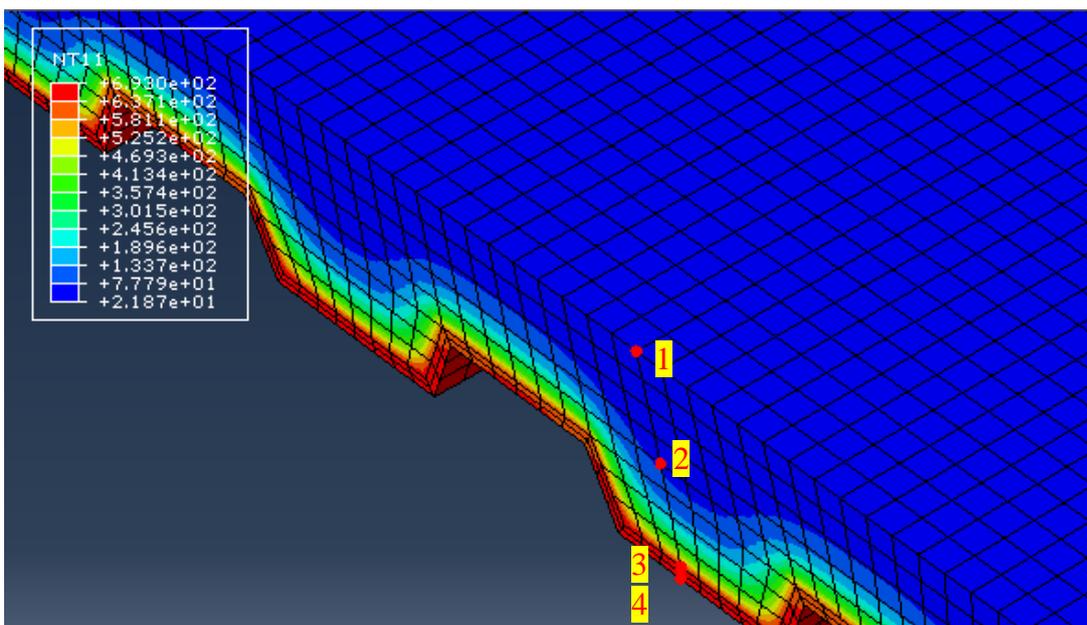


Figura 28: Nós escolhidos para conferência de temperatura

Podemos ainda plotar o gráfico desta tabela e verificar a coerência com a evolução de temperatura da curva ISO834:2011 (3.2). Nele é possível ver que a temperatura é a mesma ao longo da seção de aço (as linhas dos pontos 1 e 2 se sobrepõem).

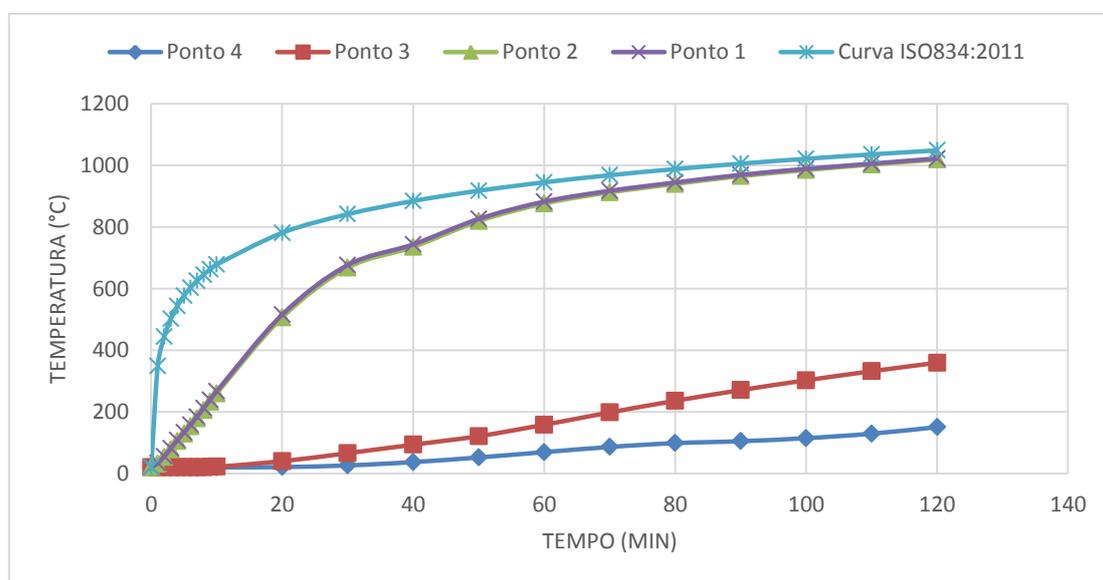


Gráfico 3: Evolução da temperatura dos pontos e ISO 834:2011

Destaca-se que o tempo crítico para esta análise segundo critério do Eurocode 2 pode ser observado na Tabela 10, como sendo de 20 minutos, tempo este onde a laje atingiria a temperatura de 500°C.

Ao final da simulação no tempo $t = 120\text{min}$ temos um gradiente de temperatura que se propaga pela laje. A chapa do Steel Deck encontra-se com uma temperatura de 1029°C e a face superior da laje de concreto encontra-se com uma temperatura de 109°C. Estas temperaturas são aproximadas pela escala de cores apresentada na tela ao lado laje.

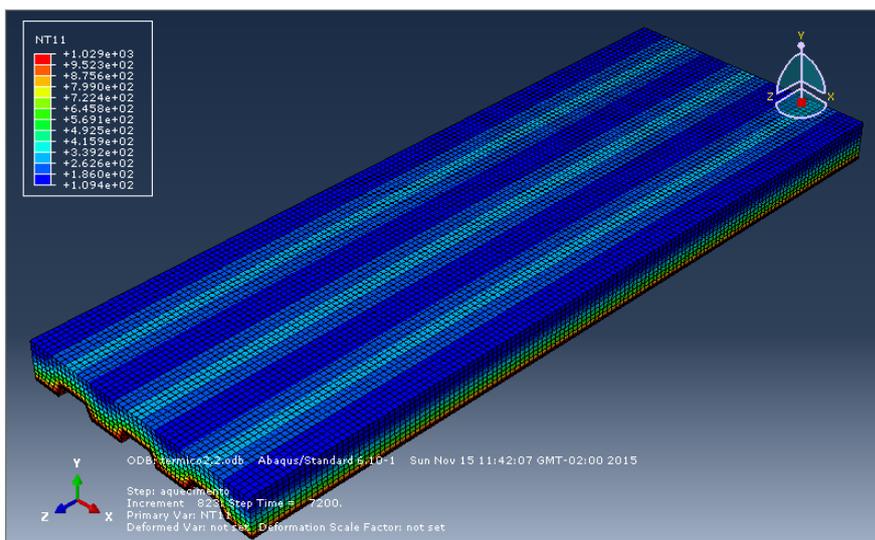


Figura 29: Temperatura da laje no tempo $t=120\text{min}$

Para o tempo $t=30\text{min}$ que seria o TRRF indicado pelo catálogo do Fabricante a chapa do Steel Deck encontra-se com uma temperatura de 693°C e a face superior da laje de concreto encontra-se com uma temperatura de 21,8°C, segundo escala de cores observada na figura 30.

“Os valores indicados na tabela de cargas correspondem aos carregamentos que podem ser aplicados em temperatura ambiente, ou em situações de incêndio com tempos de atuação de até 30 minutos. Para situações de incêndio com tempos de atuação superiores a 30 minutos a norma NBR – 14323 deverá ser consultada, para que as armaduras adicionais sejam consideradas na resistência nominal das lajes.”

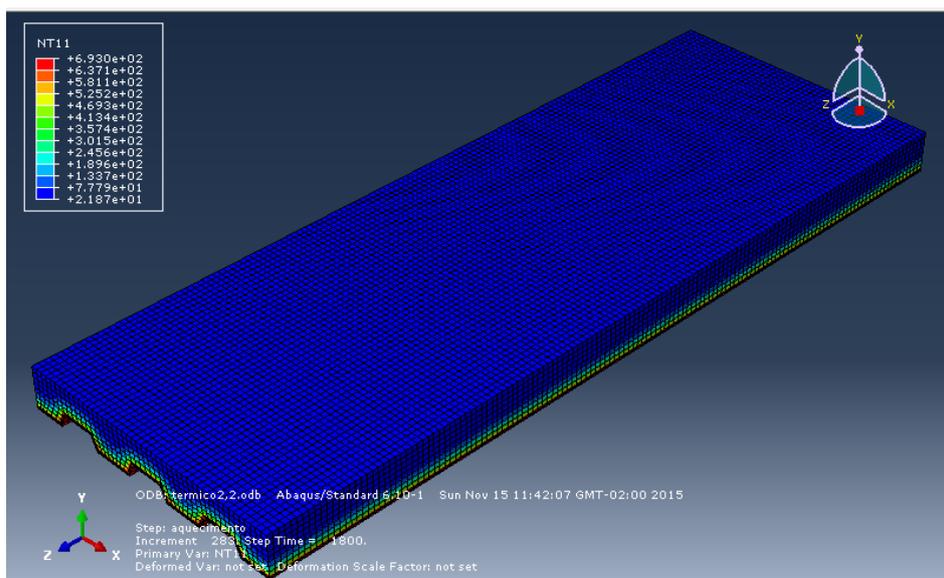


Figura 30: Temperatura da laje no tempo $t=30\text{min}$

O item 3.10 da NBR14432 traz que para ser dado como seguro o elemento de compartimentação deve ser capaz de impedir a ocorrência, na face não exposta ao incêndio, de incrementos de temperatura superiores a 140°C , na média dos pontos da medida, ou superiores a 180°C , em qualquer ponto da medida. Esta mesma afirmação pode ser encontrada na norma internacional ISO834-1 no item 10.2.2.

Segundo este critério de vemos que a laje atenderia com folga ao dimensionamento contra o incêndio no que diz respeito ao ISOLAMENTO, entretanto tem-se consagrado na literatura que a temperatura de falha do aço é de 500°C , Eurocode 2 (2004).

O item C.2.1.3.2.5 da NBR 14323; 2013 traz que a resistência ao escoamento da armadura na temperatura θ_s pode ser calculada com os fatores de redução apresentados na Tabela 2 da mesma norma (tabela 8 apresentada na revisão bibliográfica).

Na temperatura de 690°C (TRRF 30min) o $k_{\theta,s}$ vale 0,148 e como a laje em questão NÃO possui armadura positiva, nenhum elemento resistiria à tração advinda do carregamento do incêndio e provavelmente a laje iria ao colapso, adotando-se 500°C como temperatura crítica para o aço. O TRRF do fabricante é superior ao tempo crítico de 20min.

Neste ponto cabe a ressalva que o critério mais correto para a falha do modelo seria o apresentado pela ISO834:1999 (standard international) quanto à flecha máxima ou taxa máxima de deformação. Esta critério não está sendo apresentado neste trabalho mas o modelo mecânico que permitiria tal análise está em desenvolvimento e este pode ficar como sugestão para trabalhos futuros.

Uma situação ainda mais preocupante é a interpretação do tempo $t=90\text{min}$, que seria o TRRF de resistência segundo a NBR 14323:2013. Ela afirma para que seja atendido o

critério de isolamento térmico, a espessura efetiva da laje, h_{ef} , deve ser maior ou igual ao valor dado na Tabela C.1 (tabela 7 deste trabalho), conforme o tempo requerido de resistência ao fogo (TRRF). O TRRF estipulado pela norma é superior ao tempo crítico de 20min.

A laje em estudo tem uma altura total de 140mm resultando numa altura efetiva de 115mm segundo cálculo indicado no anexo C com dimensões apresentadas na figura C.1 da referida norma (figura 11 deste trabalho).

Tabela 11: Cálculo da altura efetiva da laje

MF - 50		
H total da laje	140	mm
h1	90	mm
h2	50	mm
l1	175	mm
l2	130	mm
l3	130	mm
h_{ef}	115	mm
TRRF	90	min

Neste instante a chapa do Steel Deck encontra-se com uma temperatura de 803°C e a face superior da laje de concreto encontra-se com um temperatura de 30,9°C segundo escala de cores observada na figura 31. Como explicado na situação anterior, na temperatura de 803°C o $k_{\theta,s}$ vale 0,1094 e como a laje em questão NÃO possui armadura positiva, nenhum elemento resistiria à tração advinda do carregamento do incêndio e provavelmente a laje iria ao colapso, adotando o mesmo critério de falha da situação anterior, temperatura de 500°C para o aço.

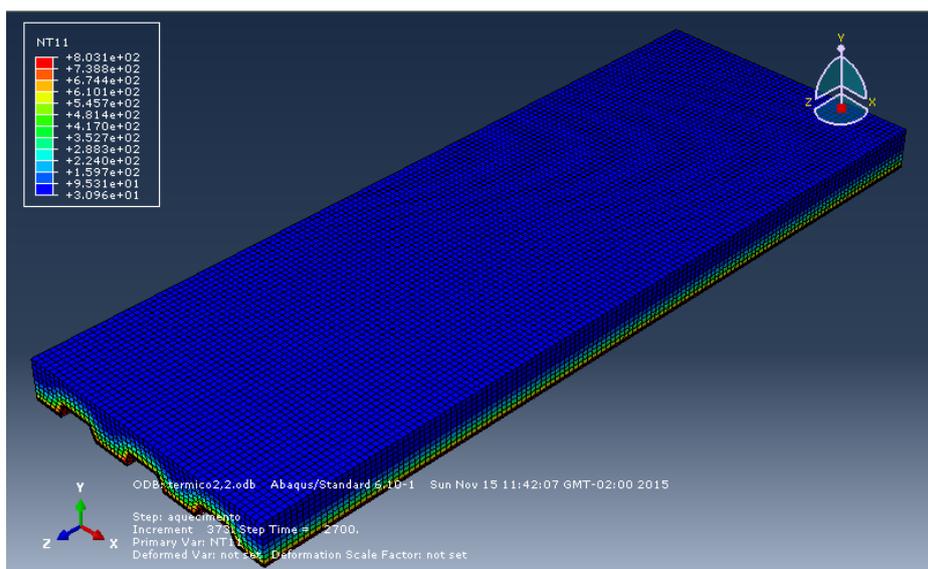


Figura 31: Temperatura da laje no tempo $t=90\text{min}$

6. Conclusões

Este trabalho abordou o comportamento de Lajes Mistas em Aço e Concreto do Tipo Steel Deck em situação de incêndio. A motivação deve-se a crescente utilização deste tipo de laje pela indústria da construção civil em suas edificações, especialmente na cidade do Recife, devido a suas vantagens tais como alta qualidade de acabamento da laje; dispensa escoramento, redução dos gastos com desperdício de material; facilidade de instalação e maior rapidez construtiva.

Foi apresentado um modelo tridimensional, não linear, em elementos finitos desenvolvido no ABAQUS/CA versão 6.13 para analisar a o comportamento das lajes Steel Deck em situação de Incêndio. Neste trabalho foram apresentados resultados e discussões baseadas apenas na análise térmica do modelo. O modelo mecânico está em desenvolvimento e será oportunamente apresentado em trabalhos futuros.

Embora o modelo ainda necessite de aperfeiçoamentos e mais testes para sua validação, algumas considerações iniciais já podem ser levantadas conforme apresentadas abaixo. Ratifica-se que estas não são conclusões definitivas e precisam de maior análise para serem validadas.

- A laje estuda atende aos critérios de isolamento pois a temperatura na face superior do concreto não atingiu às temperaturas de falha dadas pela NBR 14432:2011;

- A temperatura crítica da Laje ocorreu em um tempo de 20 min (tempo crítico) indicando que provavelmente não teria uma resistência ao fogo (TRRF) superior a esta;

- Este tempo critico é inferior ao é inferior ao TRRF recomendado pelo fabricante da chapa de aço (30 min), é inferior também ao TRRF indicado pelo método tabular proposto a norma NBR 14323:2013 (90 min), isto sugere que a norma e o fabricante podem estar contra a segurança.

Sugestões para trabalhos futuros:

Diante das observações feitas ao longo deste trabalho pode-se listar sugestões para o melhoramento do modelo e da pesquisa:

- Realização de ensaios experimentais de resistências ao fogo nas Lajes para validação dos resultados numéricos e hipóteses de contato entre os elementos;

- Necessidade de caracterização do comportamento das propriedades mecânicas dos materiais sob altas temperaturas para alimentar o modelo numérico;

- Aprimorar o modelo numérico, por exemplo, na interface entre a laje de concreto e a chapa de aço (Steel Deck), assim como representação de armaduras, studs bolts e etc.

- Desenvolvimento do modelo mecânico para analisar parâmetros de deformação e deslocamento da estrutura (em desenvolvimento).

Por conclusão espera-se que este trabalho sirva como incentivo a estudos mais aprofundados e tenha mostrado a real necessidade do desenvolvimento de métodos práticos de verificação de lajes Steel Deck à situação de incêndio.

7. Referências Bibliográficas

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS (ABNT). “Projeto de estruturas de concreto – Procedimento” – NBR 6118, 2003.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS (ABNT). “Projeto de estruturas de concreto em situação de incêndio” – NBR 15200, 2004

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS (ABNT). “Exigências de resistência ao fogo de elementos construtivos de edificações – Procedimento” – NBR 14432, 2011.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS (ABNT). “Dimensionamento de estruturas de aço de edifícios em situação de incêndio” – NBR 14323, 2013.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS (ABNT). “Dimensionamento de estruturas de aço constituídas por perfis formados a frio” – NBR 14762, 2010.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS (ABNT). “Edificações Habitacionais — Desempenho” – NBR 15575-1, 2013.

BRENDOLAN, G. “Análise do comportamento e da resistência de um sistema de lajes com forma de aço incorporada”. Dissertação de Mestrado - Universidade Federal de Minas Gerais, 2007.

CASTRO, G. G. S. “Um método Geral de cálculo para verificação de estruturas de concreto em situação de incêndio” – Dissertação (mestrado) – Universidade Federal de Minas Gerais, 2005.

CICHINELLI, Gisele. Coberturas Metálicas. Revista Técnica, São Paulo, edição 147, junho, 2009. São Paulo, SP, 2009a.

CORREIA, A. M. ; RODRIGUES, J. P. C. ; LAIM, L.M.S. ; PIRES, T. A. C. . “Fire Resistance of Steel and Composite Steel and Concrete Columns under Fire Situation”. In: Institut für Stahlbau, Hannover. (Org.). Festschrift Peter Schaumann : gewidmet Univ.-Prof. Dr.-Ing. Peter Schaumann zur Vollendung seines 60. Lebensjahres. 1ed.Hannover: Technische Informationsbibliothek u. Universitätsbibliothek, 2014, v. , p. 169-176.

DI PIETRO, João Eduardo. “O conhecimento qualitativo das estruturas das edificações na formação do arquiteto e do engenheiro”. Tese de Doutorado – Universidade Federal de São Carlos, 2000.

EUROPEAN COMMITTEE FOR STANDARDIZATION. “Design of concrete structures. Structural fire design.” (Part 1.2). Eurocode 2 – ENV 1996-1-2, Bruxelas, 1996.

ISO 834-1. Fire resistance tests – Elements of buildings construction, Part 1: General requirements. ISO – International Organization for Standardization. Geneva, 1999.

KIRCHHOF, L. D. *et al.* “Análise da Influência do Teor de Umidade no Fenômeno de *Spalling* Explosivo em Amostras de Concreto Expostas a Elevadas Temperaturas”. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE CONCRETO, 53. Florianópolis, 2011.

Lajes Steel Deck. Disponível em: <<http://wwwo.metallica.com.br/lajes-steel-deck>>. Acesso em: 05 de mai. 2015.

LEMOS, P. P. “Sistema de lajes mistas Steel Deck: análise comparativa com o sistema se lajes zero em concreto armado” – Trabalho de conclusão de curso – Universidade Federal do Rio Grande do Sul, 2013

MOLINARI, G. “Efeitos de um incêndio da estrutura em concreto armado de um grande edifício em construção” – Revista Politécnica n° 231– São Paulo, 1949.

ROCHA, W. C. ; PIRES, T. A. C. ; RÊGO SILVA, J. J. . “Numerical Models of Cold Formed Steel Columns made of Square Tubular Section Subject to Fire”. In: IFireSS International Fire Safety Symposium, 2015, Coimbra, Portugal. Proceedings of International Fire Safety Symposium, 2015. v. 1. p. 9-18.

PIRES, T. A. C. “Gerenciamento de Riscos de Incêndio: Avaliação do impacto em Estruturas de Concreto Armado através de uma Análise Experimental de Vigas Isostáticas”. Dissertação de Mestrado - Universidade Federal de Pernambuco, 2006

PIRES, T. A. C. “Fire resistance of composite columns made of concrete filled circular hollow sections and with restrained thermal elongation” - Universidade de Coimbra -2013.

PIRES, T. A. C. ; RODRIGUES, J. P. C. ; RÊGO SILVA, J. J. . “Fire resistance of composite columns made of concrete filled circular hollow sections and with restrained thermal elongation. In: Structures in fire”, 2014, Shangai. Proceedings of the 8th international conference on structures in fire. Shangai: Tongji university press, 2014. v. II. p. 745-752.

PIRES, T. A. C. ; RODRIGUES, JOÃO PAULO C. ; Silva, José Jéferson Rêgo . “Numerical Assessment of the Fire Resistance of Tubular Steel Columns Filled with Concrete. Design, Fabrication and Economy of Metal Structures”. 1ed.: Springer Berlin Heidelberg, 2013, v. , p. 395-400

RODRIGUES. F.O. “Lajes nervuradas versus lajes Steel Deck, uma análise de projeto e comparativos de custos.” – Trabalho de conclusão de curso – Universidade Federal de Pernambuco, 2010.

Vantagens das lajes alveolares. Disponível em:
<<http://www.alveolare.com.br/vantagens.html>>. Acesso em: 05 de mai. 2015.

ZAGO, C. da S.; MORENO JUNIOR, A. L.; MARIN, M. “Considerações sobre o desempenho de estruturas de concreto pré-moldado em situação de incêndio” - Revista Ambiente construído v.15, Porto Alegre,2014.