

UNIVERSIDADE FEDERAL DE PERNAMBUCO
CENTRO DE TECNOLOGIA E GEOCIÊNCIAS
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA CIVIL

ANDREW ALBUQUERQUE DA ROSA TEIXEIRA

**DESEMPENHO DE LAJES ALVEOLARES PROTENDIDAS EM
SITUAÇÃO DE INCÊNDIO**

RECIFE-PE

2016

ANDREW ALBUQUERQUE DA ROSA TEIXEIRA

**DESEMPENHO DE LAJES ALVEOLARES PROTENDIDAS 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 grau em Engenharia Civil.

Orientador:

Prof. Tiago Ancelmo de Carvalho Pires, PhD

Banca Examinadora:

Profa. Liliâne de Allan Fonseca, PhD

Prof. José Jéferson do Rêgo Silva, PhD

RECIFE-PE

2016

Catálogo na fonte
Bibliotecária Margareth Malta, CRB-4 / 1198

T266d Teixeira, Andrew Albuquerque da Rosa.
Desempenho de lajes alveolares protendidas em situação de incêndio / Andrew Albuquerque da Rosa Teixeira. – 2016.
74 folhas, il., gráfs., tabs.

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

TCC (Graduação) – Universidade Federal de Pernambuco. CTG.
Departamento de Engenharia Civil, 2016.
Inclui Referências.

1. Engenharia Civil. 2. Incêndio. 3. Laje alveolar. 4. Análise térmica. 5. Lajes protendidas. I. Pires, Tiago Ancelmo de Carvalho. (Orientador). II. Título.

UFPE

624 CDD (22. ed.)

BCTG/2016-193



SERVIÇO PÚBLICO FEDERAL
UNIVERSIDADE FEDERAL DE PERNAMBUCO
CENTRO DE TECNOLOGIA E GEOCIÊNCIAS
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA CIVIL E AMBIENTAL
COORDENAÇÃO DO CURSO DE GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA CIVIL

ATA DA DEFESA DO TRABALHO DE CONCLUSÃO DE CURSO PARA CONCESSÃO DO GRAU DE ENGENHEIRO CIVIL

CANDIDATO(S): 1 –
2 –

BANCA EXAMINADORA:

Orientador:

Examinador 1:

Examinador 2:

TÍTULO DO TRABALHO DE CONCLUSÃO DE CURSO:

LOCAL: Recife - PE, CT6, sala 120

DATA: 18 / 07 / 16 **HORÁRIO DE INÍCIO:** 9:30 .

Em sessão pública, após exposição de cerca de 30 minutos, o(s) candidato(s) foi (foram) arguido(s) oralmente pelos membros da banca com NOTA: 8,56 (deixar 'Exame Final', quando for o caso).

1) **aprovado(s) (nota > = 7,0)**, pois foi demonstrado suficiência de conhecimento e capacidade de sistematização no tema da monografia e o texto do trabalho aceito.

As revisões observadas pela banca examinadora deverão ser corrigidas e verificadas pelo orientador no prazo máximo de 30 dias (o verso da folha da ata poderá ser utilizado para pontuar revisões).

O trabalho com nota no seguinte intervalo, **3,0 = < nota < 7,0**, será reapresentado, gerando-se uma nota ata; sendo o trabalho aprovado na reapresentação, o aluno será considerado **aprovado com exame final**.

2) **reprovado(s). (nota <3,0)**

Na forma regulamentar foi lavrada a presente ata que é assinada pelos membros da banca e pelo(s) candidato(s).

Recife 18 de julho de 20.16

Orientador:

Avaliador 1:

Avaliador 2:

Candidato 1:

Candidato 2:

AGRADECIMENTOS

A Deus, em primeiro lugar, pela vida e por me mostrar o caminho no momento mais difícil.

A meus queridos pais, Arnaldo e Gilka, por todo amor, carinho, dedicação e por sempre me apoiarem incondicionalmente.

A meu avô, Gilberto, que mesmo não estando mais aqui, sei que sempre me guiou para que sempre atingisse meus objetivos.

A minha avó, Terezinha, por todo amor e por sempre cobrar e exigir muito de mim.

Ao meu querido irmão, Igor, por todo amor e sempre se demonstrar meu fã. Hoje, é você quem é meu ídolo, um verdadeiro exemplo de pessoa, estudante e profissional.

A minha querida Bruna, por todo amor, carinho, dedicação sempre tão bem concedidos a mim ao longo dessa jornada e, principalmente, por sempre acreditar mais em mim do que eu mesmo. Sem você esse caminho teria sido muito mais difícil.

A Ted e Thor, por darem um trabalho imenso, mas que enchem a casa de alegria.

A meu orientador, Tiago, pela paciência, dedicação e por estar sempre disponível.

A todos os amigos e familiares, que de alguma forma contribuíram para o meu desenvolvimento profissional.

RESUMO

Atualmente, no Brasil, os elementos pré-moldados de concreto têm sido largamente utilizados na construção civil apresentando também um grande potencial de uso no futuro devido a sua aplicação estar se mostrando cada vez maior. Aliado a esse fator, nos últimos anos, o risco de incêndio no país aumentou e quando submetidos a essa situação os elementos de concreto perdem sua capacidade resistente.

Diante dos fatores apresentados e devido aos estudos na área serem pouco desenvolvidos, decidiu-se estudar o comportamento de lajes alveolares protendidas em situação de incêndio. Para tanto, foram apresentados, neste trabalho, os métodos de verificação de lajes conforme a (ABNT NBR 15200, 2012), sendo o método tabular a ferramenta de dimensionamento mais prática, pois a partir do tempo requerido de resistência ao fogo (TRRF) é possível determinar a espessura mínima da laje e a menor distância admissível entre o eixo das armaduras e a face inferior da laje. Contudo, apesar de prática, essa ferramenta limita os cálculos a poucos valores tabelados.

Devido as dificuldades apresentadas pelo método tabular, neste trabalho buscou-se elaborar uma análise térmica dessas lajes alveolares protendidas em situação de incêndio através do método dos elementos finitos (MEF) com a finalidade de aplicar o método dos 500°C e poder comparar seus resultados com os obtidos através do método tabular. Para tanto foi elaborado um modelo tridimensional e não linear, no programa computacional Abaqus, na sua versão 6.13. Para fins comparativos, também foi elaborado um segundo modelo com a aplicação do recurso da simetria. É importante ressaltar que ambos os modelos foram sujeitos ao incêndio padrão recomendado pela (ABNT NBR 14432, 2001), que por sua vez se baseia na (ISO-834, 1999), apenas na face inferior.

Assim, pôde-se determinar o campo de temperaturas na seção transversal da laje e com o auxílio de uma planilha, para verificação de lajes alveolares protendidas, foi possível aplicar o método dos 500°C para os tempos requeridos de resistência ao fogo de 30min e 60min. A laje foi verificada para esses dois tempos pois, de acordo com o método tabular a mesma só poderia ser classificada com R30.

Palavras-chave: Incêndio. Laje alveolar. Análise térmica. Lajes protendidas.

ABSTRACT

Currently, in Brazil, the precast concrete elements have been widely used in civil construction, also presenting a great potential for use in the future due to its application is showing increasing. Allied to this factor, in recent years, the risk of fire in the same country increased, and when subjected to this situation the concrete elements lose their resistant capacity.

In the face of factors presented and due to studies in the area are poorly developed, it was decided to study the behavior of prestressed hollow core slabs in fire situation. Therefore, were included in this study, the slabs verification methods according to (ABNT NBR 15200, 2012), being the tabular method the most practical design tool, because from the time of fire resistance required (TRRF) is possible to determine the minimum thickness of the slab and the lowest permissible distance between the shaft of armor and the under face of the slab. However, despite practice, this tool limits the calculations just a few tabulated values.

Because of the difficulties presented by the tabular method, this study sought to develop a thermal analysis of hollow core slabs prestressed in fire by the finite element method (FEM) in order to apply the method of 500°C and compare their results with obtained using the tabular method. Thus, a three-dimensional and non-linear model was developed in the computer program Abaqus, in the version 6.13. For comparative purposes, it was also developed a second model to the application of the symmetry feature. It notes that both models were subjected to the standard recommended by the fire (NBR 14432, 2001), which in turn is based on (ISO-834, 1999), just underneath.

Thus, it was possible to determine the temperature field in the cross slab section and with the aid of a spreadsheet to check prestressed hollow core slabs, it was possible to apply the method of 500°C for the required time of fire resistance of 30min and 60min. The slab was verified for these two times because, in accordance with the tabular method it just could be classified as R30.

Keywords: Fire. Hollow core slab. Thermal analysis. Prestressed slab.

LISTA DE FIGURAS

| | |
|--|-----------|
| Figura 1.1 – Incêndio do Edifício Andraus | 18 |
| Figura 1.2 - Incêndio do Edifício Joelma..... | 18 |
| Figura 1.3 - Atendimentos de incêndios realizados em PE | 18 |
| Figura 1.4 - Evolução do número de incêndios atendidos no estado de Pernambuco..... | 19 |
| Figura 2.1 - Tetraedro do Fogo | 24 |
| Figura 2.2 - Curva temperatura-tempo de um incêndio natural | 25 |
| Figura 3.1 - Representação de uma laje de concreto..... | 36 |
| Figura 3.2 - Fôrmas de polipropileno | 37 |
| Figura 3.3 - Vigotas pré-moldadas para lajes nervuradas | 37 |
| Figura 3.4 - Esquema de uma laje nervurada..... | 37 |
| Figura 3.5 - Laje tipo π..... | 38 |
| Figura 3.6 - Laje mista steel deck..... | 39 |
| Figura 3.7 - Seções e elementos dos painéis alveolares da (TATU, 2008)..... | 40 |
| Figura 3.8 - Chave de cisalhamento | 41 |
| Figura 3.9 - Painéis com capa de concreto e malha de distribuição | 42 |
| Figura 3.10 - Posicionamento das telas de distribuição e da armadura negativa..... | 43 |
| Figura 3.11 - Movimentação de lajes alveolares | 43 |
| Figura 3.12 - Força cortante nas chavetas ou chaves de cisalhamento..... | 50 |
| Figura 3.13 – Redução das seções no método dos 500°C..... | 57 |
| Figura 3.14 - Modelo analisado termicamente..... | 59 |
| Figura 3.15 - Malha de elementos finitos no SuperTempCalc | 60 |
| Figura 3.16 - Campo de temperaturas para um tempo de 60min..... | 60 |
| Figura 3.17 - Resumo dos resultados | 61 |

| | |
|---|-----------|
| Figura 3.18 - Resumo dos resultados obtidos via método gráfico e tabular..... | 63 |
| Figura 3.19 - Campo de temperaturas na laje "steel deck" | 64 |
| Figura 3.20 – Evolução das temperaturas dos pontos e curva de incêndio padrão..... | 64 |
| Figura 4.1 - Seção da laje alveolar | 67 |
| Figura 4.2 - Importação de arquivo | 68 |
| Figura 4.3 - Seleção do arquivo desejado | 68 |
| Figura 4.4 - Dados para criação da laje..... | 69 |
| Figura 4.5 - Part Laje_Alveolar | 69 |
| Figura 4.6 - Propriedades do concreto..... | 70 |
| Figura 4.7 - Atribuição do material a seção | 71 |
| Figura 4.8 - Atribuição da seção a "part" | 71 |
| Figura 4.9 - Step Aquecimento | 72 |
| Figura 4.10 - Escolha das variáveis de saída | 72 |
| Figura 4.11 - Dados do mecanismo de radiação | 73 |
| Figura 4.12 - Stefan-Boltzmann e o zero absoluto..... | 73 |
| Figura 4.13 - Dados do mecanismo de convecção..... | 74 |
| Figura 4.14 - Aplicação da temperatura ambiente..... | 74 |
| Figura 4.15 - Tipo de elemento da malha | 75 |
| Figura 4.16 - Elemento DC3D20 | 75 |
| Figura 4.17 - Malha de elementos finitos em toda a laje..... | 76 |
| Figura 4.18 - Aplicação da simetria | 77 |
| Figura 5.1 - Campo de temperaturas na seção aos 180min | 79 |
| Figura 5.2 - Isotermas da laje para um tempo de 30min | 85 |
| Figura 5.3 - Detalhes das isotermas na região das cordoalhas | 85 |
| Figura 5.4 - Isotermas na laje para 60min | 88 |

| | |
|---|-----------|
| Figura 5.5 - Detalhe das isotermas na região das cordoalhas..... | 88 |
|---|-----------|

LISTA DE GRÁFICOS

| | |
|---|-----------|
| Gráfico 2.1 - Curva temperatura-tempo de um incêndio padrão | 27 |
| Gráfico 5.1 - Variação da temperatura nos cinco pontos selecionados | 81 |
| Gráfico 5.2 - Gráfico comparativo das temperaturas dos modelos com e sem simetria .. | 84 |

LISTA DE TABELAS

| | |
|---|----|
| Tabela 3.1 - Resumo dos coeficientes | 53 |
| Tabela 3.2- Larguras mínimas exigidas para aplicação do método dos 500°C..... | 56 |
| Tabela 4.1 - Resumo dos dados de processamento | 77 |
| Tabela 5.1 - Valores de temperatura (°C) e tempo (min) do modelo sem simetria | 80 |
| Tabela 5.2 - Dimensões para lajes simplesmente apoiadas..... | 84 |
| Tabela 5.3 - Momentos fletores característicos atuantes na laje alveolar | 87 |
| Tabela 5.4 – Verificação da laje para um aquecimento de 30min | 87 |
| Tabela 5.5 - Verificação da laje para um tempo de aquecimento de 60 min | 89 |
| Tabela 5.6 - Resumo das Verificações..... | 90 |

LISTA DE SÍMBOLOS

t - tempo

θ_0 - temperatura do ambiente antes do início do aquecimento

θ_g - temperatura dos gases no instante

φ_c - fluxo de calor convectivo

α_c - coeficiente de transferência de calor por convecção

θ_s - temperatura da superfície aquecida

φ_r - fluxo de calor radiante

σ - constante de Stefan-Boltzmann

ϵ_{res} - emissividade resultante da superfície aquecida

$f_{c,\theta}$ - resistência a compressão à temperatura θ

f_{ck} - Resistencia característica à compressão

$k_{c,\theta}$ - fator de redução da resistência a compressão a temperatura θ

λ_c - condutividade térmica do concreto

θ - temperatura

$f_{py,\theta}$ - resistência do aço de armadura ativa a temperatura θ

f_{py} - resistência característica do aço de armadura ativa

$k_{c,\theta}$ - fator de redução da resistência do aço de armadura ativa a temperatura θ

V_{sd} - força cortante solicitante de cálculo na seção em análise

V_{Rd1} - força cortante resistente de cálculo na seção em análise

V_{Rd2} - força cortante resistente de cálculo na seção em análise, das diagonais comprimidas do concreto

$V_{Rd2,capa}$ - força cortante resistente de cálculo na seção em análise, das diagonais comprimidas do concreto com capa e alvéolos preenchidos;

σ_{sp} - tensão na nervura mais solicitada

$f_{ctkj,inf}$ - valor da resistência a tração característica inferior do concreto na idade “j”, referente a liberação da protensão

f_{ctd} - valor de cálculo da resistência a tração do concreto da laje alveolar

$f_{ctd,ch}$ - valor de cálculo da resistência a tração do concreto da chaveta

$f_{ctd,t}$ - valor de cálculo da resistência a tração do concreto da capa estrutural

h_{ch} - altura da chaveta

h_t - altura da capa estrutural

$V_{Rd,punção}$ - resistência a punção da nervura da laje alveolar

σ_{cp} - tensão de compressão do concreto no centro de gravidade da peça devido a força de protensão

b_{ef} - espessura efetiva das nervuras

f_{ctd} - resistência de cálculo a tração do concreto da nervura da laje alveolar

h - altura total da laje sem capa ou equivalente a h_{tot}

α - relação entre a distância da extremidade da laje ao ponto de aplicação da ação e o valor superior do comprimento de ancoragem

$F_{d,fi}$ - solicitações de cálculo para a combinação excepcional

γ_{gi} - coeficientes de ponderação do carregamento permanente

$F_{gi,k}$ - ações permanentes características

$F_{g,exp}$ - ação acidental excepcional principal

γ_q - coeficiente de ponderação das demais ações variáveis

ψ_{0j} - fator de combinação das ações variáveis características

$F_{qj,k}$ - ações variáveis características

$S_{d,fi}$ - solicitação de cálculo do elemento estrutural, que varia com a temperatura

$R_{d,fi}$ - esforço resistente da peça estrutural em situação de incêndio

$M_{Rd,fi}$ - momento fletor resistente de cálculo da seção transversal em situação de incêndio

M_{Rd} - momento resistente de cálculo da seção transversal à temperatura ambiente

L - Vão livre

d - Distância da fibra mais extrema da zona de compressão até a fibra mais extrema da zona de tração

SUMÁRIO

| | | |
|-------|--|----|
| 1 | Introdução..... | 17 |
| 1.1 | Generalidades..... | 17 |
| 1.2 | Justificativas..... | 17 |
| 1.3 | Objetivos..... | 20 |
| 1.4 | Organização do texto | 20 |
| 2 | Incêndio – Conceitos Importantes | 22 |
| 2.1 | Generalidades..... | 22 |
| 2.2 | Caracterização do processo..... | 23 |
| 2.2.1 | Combustão..... | 23 |
| 2.2.2 | O incêndio e sua curva característica | 24 |
| 2.2.3 | Curva Incêndio-Padrão | 26 |
| 2.2.4 | Tempo Requerido de Resistência ao Fogo (TRRF)..... | 27 |
| 2.3 | Mecanismos de Transferência de Calor..... | 28 |
| 2.3.1 | Convecção | 29 |
| 2.3.2 | Radiação | 30 |
| 2.3.3 | Condução..... | 31 |
| 2.4 | Efeito da Fogo nos Materiais | 31 |
| 2.4.1 | Concreto | 32 |
| 2.4.2 | Aço | 35 |
| 3 | Estado da arte..... | 36 |
| 3.1 | Tipos de Laje | 36 |
| 3.1.1 | Lajes Moldadas no Local..... | 36 |
| 3.1.2 | Lajes Pré-Moldadas ou Pré-Fabricadas | 38 |
| 3.1.3 | Lajes Mistas..... | 38 |
| 3.2 | Lajes Alveolares | 39 |

| | | |
|-------|---|----|
| 3.2.1 | Definição e Caracterização | 39 |
| 3.2.2 | Vantagens | 44 |
| 3.2.3 | Execução..... | 45 |
| 3.2.4 | Dimensionamento de Lajes Alveolares em Temperatura Ambiente | 46 |
| 3.2.5 | Dimensionamento de Estruturas em Situação de Incêndio | 52 |
| 3.3 | Trabalhos Científicos | 59 |
| 4 | Modelo Computacional | 66 |
| 4.1 | Características do Programa | 66 |
| 4.2 | Modelo Térmico | 67 |
| 4.2.1 | Definição do Modelo | 67 |
| 4.2.2 | Definição dos Módulos..... | 68 |
| 4.2.3 | Aplicação do Recurso da Simetria..... | 76 |
| 5 | Resultados e Verificação em Situação de Incêndio..... | 78 |
| 5.1 | Análise Através do modelo Avançado - Abaqus | 78 |
| 5.2 | Verificação Através do Método Tabular (ABNT NBR 15200, 2012)..... | 84 |
| 5.3 | Verificação Através do Método das Isotermas dos 500°C..... | 85 |
| 5.3.1 | Tempo de Aquecimento de 30min..... | 85 |
| 5.3.2 | Tempo de Aquecimento de 60min..... | 88 |
| 5.4 | Resumo das Verificações | 90 |
| 6 | Conclusão e Sugestões para trabalhos futuros..... | 91 |
| | Referências | 93 |

1 INTRODUÇÃO

1.1 GENERALIDADES

Na ocasião da elaboração de um projeto estrutural de uma edificação, o mesmo deve ser preparado com base nas especificações da norma (ABNT NBR 6118, 2014) e, no caso de obras em concreto pré-moldado, também no prescrito na (ABNT NBR 9062, 2006). Desta forma, atende-se, portanto, aos requisitos mínimos de qualidade durante sua construção e utilização ao longo da sua vida útil.

Além de ser dimensionada para resistir aos esforços atuantes em temperatura ambiente (considerada 20°C), a estrutura também deve ser avaliada para situação de incêndio, já que nessa condição ocorre uma redução da resistência mecânica de seus materiais constituintes bem como na capacidade de seus elementos estruturais acompanhada de uma redistribuição de tensões nos mesmos. A ação correspondente ao incêndio é considerada excepcional e conforme estabelecido na (ABNT NBR 15200, 2004), a edificação deve ser verificada considerando a combinação excepcional de ações, no estado limite último.

1.2 JUSTIFICATIVAS

De acordo com (BRUSHLINSKY, AHRENS, *et al.*, 2016) no relatório de 2016, que apresenta dados do ano de 2014, em 32 países, que juntos representam 15% da população mundial, ocorreram cerca de 2,7 milhões de incêndios (o que representa uma ocorrência de 2,5 incêndios por 1000 habitantes). Além, disso, 20,7 mil pessoas morreram (1,9 mortes a cada 100 mil habitantes) e 64,3 mil pessoas tiveram algum tipo de lesão ou trauma devido a incêndios (5,9 lesões por 100 mil habitantes).

Especialmente no Brasil, o risco de incêndio aumentou bastante com o passar dos anos devido a urbanização exacerbada e que culminou em dois casos muito famosos na cidade de São Paulo, ocasionando um grande número de vítimas humanas. O primeiro dos casos é o do edifício

Andraus (1972), que se tratava de prédio comercial e de serviços, com 31 pavimentos e estrutura em concreto armado. Esse episódio fez 352 vítimas, das quais 16 morreram. Outro caso que chamou bastante atenção foi o do incêndio no edifício Joelma (1974), com 23 pavimentos e em concreto armado, que gerou 179 mortes. Mais recentemente, em 2013, pode-se citar o caso da boate KISS em Santa Maria, que deixou 242 mortos.



Figura 1.1 – Incêndio do Edifício Andraus

Fonte: (SEITO, GIL, *et al.*, 2008)



Figura 1.2 - Incêndio do Edifício Joelma

Fonte: (SEITO, GIL, *et al.*, 2008)

Segundo (CORRÊA, SILVA, *et al.*, 2015), só no estado de Pernambuco durante o triênio (2011-2013) ocorreram mais de 15 mil incêndios atendidos. Desse total 4.903 ocorreram em edificações, o que representa 32,67% dos casos como pode observado na figura abaixo:



Figura 1.3 - Atendimentos de incêndios realizados em PE

Fonte: (CORRÊA, SILVA, *et al.*, 2015)

Ainda de acordo com (CORRÊA, SILVA, *et al.*, 2015) além de representar uma boa parcela do total de atendimentos, os incêndios em edificações têm apresentado um crescimento progressivo ao longo dos anos sendo computados, inclusive, mais de 1,5 mil casos anuais. Abaixo pode-se perceber como se deu a evolução do número de incêndios no período:

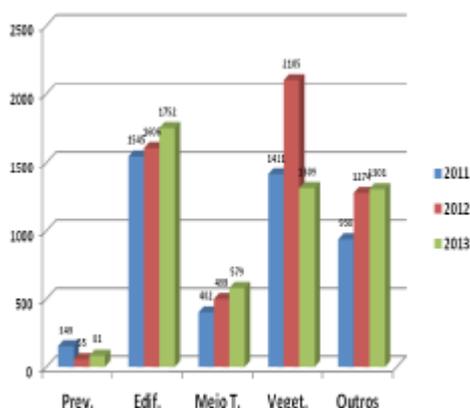


Figura 1.4 - Evolução do número de incêndios atendidos no estado de Pernambuco

Fonte: (CORRÊA, SILVA, *et al.*, 2015)

Logo, a verificação de estruturas de concreto em situação de incêndio, ou seja, quando as mesmas estiverem submetidas a elevadas temperaturas torna-se essencial para que se possa, por exemplo, limitar o risco a vida e a propriedade exposta ao fogo. Para tanto, como especificado na (ABNT NBR 15200, 2012), a estrutura deve apresentar duas funções básicas: a corta fogo e a suporte.

Além disso, o tema também se justifica por colaborar com o desenvolvimento da área no país visto que, apesar do interesse pela área ter evoluído nos últimos anos, o estudo de estruturas de concreto submetidas a elevadas temperaturas ainda é pouco difundido no Brasil.

O interesse pelo estudo de um elemento pré-fabricado, no caso as lajes alveolares, é pautado nas perspectivas de aumento do emprego do concreto pré-moldado no Brasil, apresentando, portanto, grande potencial para o futuro. Esse panorama de aumento pode ser explicado pelo grau de desenvolvimento tecnológico e social que a pré-moldagem trás para um país, pois acarreta uma maior oferta por equipamentos, valorização da mão-de-obra e exigências mais rigorosas em relação a qualidade dos produtos. Ademais, a análise de lajes alveolares em uma situação de incêndio é mais complicada se comparada com lajes maciças ou, inclusive, outros tipos de lajes pré-fabricadas. Isso se deve devido ao fato dos alvéolos causarem uma descontinuidade na transferência de calor.

Adianta-se também, que o método tabular apresentado pela (ABNT NBR 15200, 2012) é aplicável para o dimensionamento desse tipo de laje sem que sejam necessárias verificações feitas por programas computacionais mais avançados ou ensaios experimentais. Contudo, apesar de toda a vantagem no que diz respeito a praticidade, este método apresenta limitações e, portanto, uma análise mais específica é necessária, a fim de validá-lo ou não.

1.3 OBJETIVOS

O objetivo geral do presente trabalho consiste na análise térmica de um painel de laje alveolar quando o mesmo estiver submetido a uma situação de incêndio com posterior verificação através do método das isotermas dos 500°C. Para a realização do estudo é necessário o auxílio de um programa computacional em elementos finitos, fazendo-se o uso do ABAQUS, tendo-se como base para a simulação a curva de incêndio-padrão da (ISO-834, 1999).

Constituem-se como objetivos específicos:

- a) Revisão bibliográfica sobre os principais conceitos relativos ao comportamento de estruturas em situação de incêndio;
- b) Desenvolver um modelo numérico para analisar termicamente a lajes alveolares;
- c) Efetuar a verificação de um estudo de caso de laje alveolar em situação de incêndio através do método avançado, do método tabular e do método simplificado das isotermas dos 500°C.

1.4 ORGANIZAÇÃO DO TEXTO

Este trabalho foi estruturado em seis capítulos, os quais são brevemente descritos abaixo:

No Capítulo 1, **Introdução**, o assunto que é tema deste trabalho é contextualizado e justificado bem como são apresentados seus objetivos gerais e específicos.

O Capítulo 2, **Incêndio – Conceitos Importantes**, apresenta uma revisão bibliográfica a respeito do incêndio. Neste capítulo, é caracterizado o processo, são descritos os mecanismos de transferência de calor e trata do efeito do fogo nas propriedades dos materiais.

O Capítulo 3, **Estado da Arte**, foi reservado para fazer uma abordagem acerca do elemento estrutural a ser estudado, que no caso são as lajes alveolares e como se dá seu comportamento em situação ambiente e em situação de incêndio. Antes de entrar especificamente no tema, porém, são apresentados os tipos de lajes mais usuais. Ao final, são apresentados trabalhos científicos que tratam de elementos de concreto em situação de incêndio.

No Capítulo 4, **Modelo Computacional**, são apresentadas as características do programa computacional utilizado, Abaqus. Após isso, é descrito todo o procedimento de modelagem, demonstrando sua interface, as definições e considerações utilizadas. Ao final, é apresentado também um segundo modelo com a aplicação do recurso da simetria.

O Capítulo 5, **Resultados e Verificação em Situação de Incêndio**, é dividido em duas partes. Na primeira são apresentados os resultados obtidos nas simulações numéricas desenvolvidas no capítulo anterior, buscando apresentar um comparativo entre ambas, fazer as considerações necessárias e comparar seus resultados com outro modelo numérico. Na segunda parte é efetuada a verificação das lajes alveolares em situação de incêndio através dos métodos tabular e das isotermas dos 500°C.

No Capítulo 6, **Conclusão**, encontram-se as considerações finais no trabalho, bem como sugestões para trabalhos futuros sobre este tema.

2 INCÊNDIO – CONCEITOS IMPORTANTES

2.1 GENERALIDADES

Segundo (SEITO, GIL, *et al.*, 2008), o estudo do fogo como uma ciência tem pouco mais de vinte anos, com a criação da IAFSS – International Association for Fire Safety Science que reuniu os cientistas dos maiores institutos e universidades do mundo.

Ainda de acordo com (SEITO, GIL, *et al.*, 2008) não há um consenso para definir o fogo, apesar dos avanços que a ciência apresentou. Isso pode ser percebido pelas diferentes definições apresentadas pelas normas de cada país. Contudo a norma brasileira (ABNT NBR 13860, 1997), define o fogo como um processo de combustão caracterizado pela emissão de calor e luz.

Visto isso, pode-se afirmar que os principais objetivos a serem alcançados ao se dimensionar uma estrutura para a ação do fogo consiste em, sobretudo:

- a) Limitar o risco a vida humana;
- b) Limitar o risco da vizinhança e da própria sociedade;
- c) Limitar o risco da propriedade exposta ao fogo;

Para tanto a estrutura deve ser capaz de manter sua capacidade de suporte como um todo, ou de cada uma de suas partes, evitando assim o colapso global ou local progressivo, permitindo que as pessoas presentes possam abandonar, em segurança, o local do sinistro (**função suporte**). É importante também que a estrutura seja capaz de isolar termicamente o local e apresentar uma estanqueidade à passagem das chamas, impedindo assim que o fogo a ultrapasse ou o calor a atravesse em uma quantidade suficiente para gerar combustão em um local diferente daquele onde o incêndio teve início (**função corta-fogo**).

Além do objetivo citado acima, outros também são almejados quando se projeta uma estrutura para uma situação de incêndio. Dentre os quais pode-se citar o favorecimento da operação da equipe de combate, bem como a preservação da mesma, redução dos danos patrimoniais e a limitação do risco causado à vizinhança e à sociedade.

De modo a atender a esses objetivos, a (ABNT NBR 15200, 2012) estabelece que estruturas de grande porte, especialmente as mais altas, que possuam elevada carga de incêndio e de difícil

desocupação devem estar sempre sujeitas a um projeto de segurança contra incêndios, com o objetivo de prevenir ou proteger a edificação a ação do fogo. Nesses casos, é de fundamental importância levar em consideração a ação do fogo. Em contrapartida, como estabelecido na (ABNT NBR 14432, 2001), no anexo A, edificações de pequeno porte, e de fácil desocupação estão isentas desse tipo de exigência.

Como na engenharia tudo envolve custo, é importante frisar que a elaboração desse tipo de projeto ajuda a evitar o desperdício e se torna muito importante sob o ponto de vista econômico, visto que o gasto para a sua elaboração é relativamente menor, quando comparado a possíveis restaurações as quais uma determinada edificação possa estar sujeita.

Para as situações em que se faz necessária a verificação dos elementos estruturais quanto ao fogo, o incêndio é representado por uma curva que relaciona a temperatura média dos gases do ambiente que se encontra em chamas e o tempo, como será melhor explicado posteriormente nesse trabalho. A partir desta é que são obtidos os parâmetros necessários para dimensionamento das estruturas.

Neste capítulo, portanto, será apresentada a caracterização do processo de incêndio bem como suas curvas típicas, as propriedades térmicas dos materiais estudados, além dos mecanismos de transferência de calor.

2.2 CARACTERIZAÇÃO DO PROCESSO

2.2.1 Combustão

Para que se possa entender o incêndio é preciso que, de antemão, se entenda também como se dá o processo de combustão e o que resulta desse processo. De forma clara, pode-se dizer que a combustão nada mais é do que uma reação química que ocorre se, e somente se, houver a combinação de quatro elementos: uma substância combustível (como madeira, papel, tinta, algodão, álcool, entre outros), uma fonte de calor atuante nessa substância, um gás comburente (que normalmente é o oxigênio, podendo ser outros gases) e uma reação em cadeia dos elementos anteriores citados. Caso ocorra a falta de algum desses elementos o processo de combustão não se dá, ou se já for existente o mesmo se anula. Essa teoria que prega a

coexistência desses elementos é conhecida, atualmente, como Tetraedro do Fogo e recebe essa denominação pois cada face da figura espacial (tetraedro) representaria um elemento diferente.



Figura 2.1 - Tetraedro do Fogo

Fonte: (SEITO, GIL, *et al.*, 2008)

O fogo, por sua vez, pode ser entendido como a reação física que resulta do processo de combustão sendo caracterizado por chamas quando o material combustível for gasoso ou líquido e por brasas quando o mesmo for sólido. O mesmo para ser iniciado e, por conseguinte, se manter no material combustível, sofre influência de diversos fatores, alguns deles são: massa específica, superfície específica, calor específico, ponto de ignição, quantidade de calor, composição química, umidade, quantidade de oxigênio disponível no ambiente e o estado da matéria. Todos esses fatores ajudam a entender, portanto, como se dá o comportamento de cada material combustível na ignição e na manutenção do fogo.

2.2.2 O incêndio e sua curva característica

Do processo físico-químico explicitado no tópico anterior resulta, portanto, o que se chama de incêndio que compreende três fases que podem ser bem representadas num gráfico que fornece a temperatura média dos gases em função do tempo. Na Figura 2.2, segue uma imagem representativa da curva citada com as suas fases bem definidas.

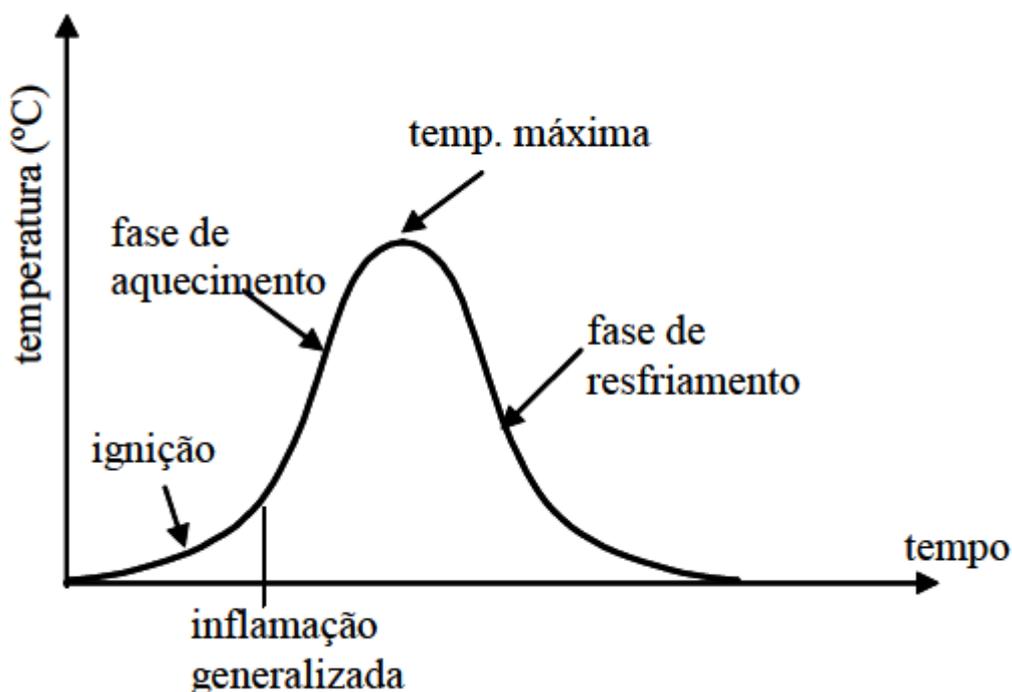


Figura 2.2 - Curva temperatura-tempo de um incêndio natural

Fonte: (PIERIN e SILVA, 2009)

Ao se analisar o gráfico anterior, pode-se notar que o incêndio, em geral, quando na sua fase inicial, apresenta um crescimento bastante lento. É nessa fase inicial que ocorre a ignição de alguma substância combustível presente no ambiente, sendo esta a responsável pela liberação da energia térmica que aquecerá, lentamente, o local e os outros materiais inflamáveis presentes. Nesse período de tempo que a temperatura permanece baixa, caso o sinistro seja solucionado, a edificação não apresentará maiores danos estruturais. É ainda nessa fase que os sistemas de proteção ativa, como hidrantes, chuveiros automáticos, extintores, dentre outros, ainda são eficazes e capazes de extinguir o fogo.

Contudo, caso o fogo não seja controlado em sua fase inicial, e a medida que mais carga de incêndio é consumida, mais energia térmica é liberada e, por consequência as temperaturas começam a se elevar de forma mais rápida até o momento em que todo o material inflamável é consumido. Esse é o momento mais crítico de todo o processo e consequentemente também é para as estruturas, recebendo o nome de *flashover* ou inflamação generalizada. O ambiente é tomado pelas chamas e as temperaturas continuam a aumentar, rapidamente, caracterizando a fase de aquecimento.

Somente após a queima de todo o material combustível presente no local, a temperatura começa a ser reduzida, de forma gradual, caracterizando a terceira e última fase denominada de fase de resfriamento.

Do exposto, pode-se dizer então que o gráfico que representa o processo de incêndio possui três fases bem definidas que são: fase inicial, aquecimento e resfriamento. Contudo, apesar de representar fielmente a situação do ambiente em chamas, seu uso não é conveniente para a verificação de estruturas que se encontram submetidas a esse tipo de situação.

A utilização desta curva se torna não usual devido à grande dificuldade encontrada, atualmente, na sua determinação, seja por meio de ensaios ou ainda por intermédio de equações que dependem, por sua vez, de um grande número de variáveis que estão associadas e influenciam cada situação de incêndio, tais como:

- a) A geometria e dimensão do local
- b) Distribuição dos materiais combustíveis no local
- c) Grau de ventilação ou fator de abertura
- d) Características dos materiais envolvidos
- e) Quantidade e especificação da carga de incêndio

2.2.3 Curva Incêndio-Padrão

Pelas dificuldades apresentadas no tópico anterior, no que diz respeito a determinação da curva de incêndio natural, convencionou-se adotar um outro modelo matemático que possa, de maneira simplificada, representar a situação real. Essa curva alternativa, denominada de curva de incêndio padrão se caracteriza por apresentar a temperatura sempre crescente com o tempo, ou seja, possui apenas o ramo ascendente que corresponde a fase de aquecimento. É válido salientar que essa curva não serve para representar o que de fato ocorre numa situação real de incêndio, é apenas uma maneira prática e aproximada para dimensionamento de estruturas nesses casos.

A função que determina a curva do incêndio padrão é logarítmica e é estabelecida pela ABNT (ABNT NBR 14432, 2001), que se baseia, por sua vez na (ISO-834, 1999). No Gráfico 2.1, é

demonstrada a curva desenvolvida, no excel, para a elaboração deste trabalho para um tempo de 180 minutos:

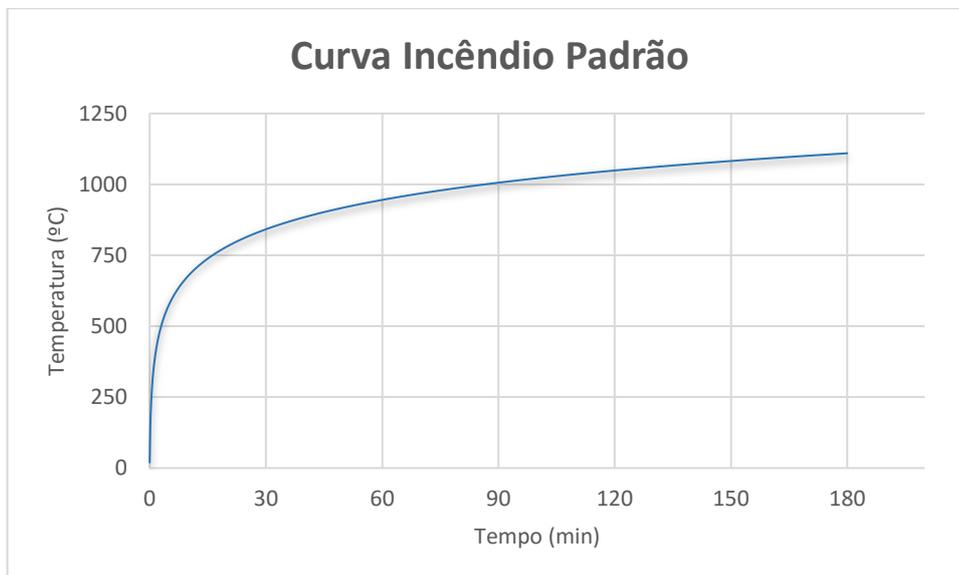


Gráfico 2.1 - Curva temperatura-tempo de um incêndio padrão

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

Onde:

t = tempo [min];

θ_o = temperatura do ambiente antes do início do aquecimento [°C];

θ_g = temperatura dos gases no instante t [°C];

De uma forma geral, adota-se para a temperatura ambiente o valor de 20 °C.

2.2.4 Tempo Requerido de Resistência ao Fogo (TRRF)

À curva de incêndio padrão é associado um tempo, denominado tempo requerido de resistência ao fogo (TRRF), que são determinados por meio de consenso técnico, e que servem de parâmetro para o dimensionamento de estruturas em situação de incêndio. De acordo com a (ABNT NBR 14432, 2001), o TRRF pode ser entendido como o tempo mínimo que vigas, lajes ou pilares devem resistir, quando submetidos a esse modelo de aquecimento.

Segundo a mesma norma o valor do TRRF depende de dois fatores:

- a) Ocupação ou uso da edificação
- b) Altura da edificação

Isso significa dizer que o TRRF vai ser tanto maior quanto maior for o risco que um desses dois fatores oferecer à edificação seja sob o ponto de vista da ocorrência de um sinistro ou de suas possíveis consequências. Ou seja, duas edificações que possuam o mesmo uso ou ocupação, mas alturas pertencentes a grupos diferentes, de acordo com a (ABNT NBR 14432, 2001), terão, conseqüentemente, TRRF diferentes, sendo o maior deles referentes a edificação mais alta. Por exemplo: se duas edificações de uso residencial do tipo multifamiliar (edifícios de apartamento em geral) tem alturas de 10m e 20m para a menor é exigido um TRRF de 30min enquanto que para a maior é exigido 60min. Isso se deve ao fato de que nas edificações mais altas as consequências da ação do fogo são muito mais graves.

De maneira análoga, edificações pertencentes a mesma classe de altura e ocupação ou uso diferentes também apresentarão TRRF diferentes, sendo determinado o maior deles para as edificações que possuam uma maior carga de incêndio, pois o risco da propagação do fogo é maior. Ou seja, uma biblioteca de 6m de altura apresenta um TRRF de 60min enquanto que uma academia de igual altura apresenta um TRRF de 30min.

Um outro parâmetro muito importante definido na (ABNT NBR 15200, 2012) é o tempo de resistência ao fogo (TRF) dos elementos construtivos. Este parâmetro pode ser entendido como o tempo máximo de resistência de um elemento estrutural, sendo compreendido entre o início da exposição ao fogo até o instante do colapso. Assim, para garantir a segurança o valor do TRF deve ser sempre maior ou igual ao valor do TRRF.

2.3 MECANISMOS DE TRANSFERÊNCIA DE CALOR

Por definição, o calor pode ser entendido como a energia térmica em transito, decorrente de uma diferença de temperatura. Portanto, se dois corpos com temperaturas diferentes são colocados em contato há entre eles uma troca de energia térmica e o corpo mais quente transfere energia para o corpo de menor temperatura. Esse processo é contínuo, até que se estabeleça um equilíbrio térmico entre os mesmos.

Quando um compartimento de determinada edificação se encontra em chamas, sua energia térmica é transferida por meio da convecção e da radiação. Uma vez atingido por esses fluxos, os elementos construtivos são aquecidos internamente por outro processo, a condução.

2.3.1 Convecção

Pode ser entendida como um dos processos de transferência de calor em que a propagação é proveniente de um fluido em movimento. Num ambiente em chamas, primeiramente os gases inferiores são aquecidos, tornam-se menos densos e tendem a subir. Os gases das camadas superiores, mais densos, descem, por ação da gravidade. Essa turbulência de movimentação dos gases gera um fluxo de calor que atinge as estruturas.

Isaac Newton determinou a equação de fluxo de calor convectivo, apresentada na Equação (2):

$$\varphi_c = \alpha_c(\theta_g - \theta_s) \quad (2)$$

Onde:

φ_c = fluxo de calor convectivo [W/m^2]

α_c = coeficiente de transferência de calor por convecção [$W/(m^2 \text{ } ^\circ C)$]

θ_s = temperatura da superfície aquecida [$^\circ C$]

θ_g = temperatura dos gases no instante t [$^\circ C$];

A NBR 15200:2012 recomenda que seja adotado para α_c o valor de $25 W/(m^2 \text{ } ^\circ C)$, para o caso de exposição ao incêndio padrão.

2.3.2 Radiação

É o processo de transferência de calor que se dá por meio de ondas eletromagnéticas, também conhecidas como ondas caloríficas ou calor radiante, geradas e emitidas por um corpo aquecido com elevado grau de agitação de suas partículas. Quando incidem sobre determinado corpo receptor, essas ondas são absorvidas e se transformam em energia térmica.

Contudo, apenas numa situação ideal todo o calor proveniente da radiação seria absorvido em sua totalidade pelo corpo receptor. Em casos reais, uma parte dessa energia é refletida para o ambiente. Logo, para a determinação do calor radiante absorvido pelas estruturas aplica-se a equação 3, determinada empiricamente por Josep e, posteriormente por Ludwig Boltzmann:

$$\varphi_r = \sigma \varepsilon_{res} [(\theta_g + 273)^4 - (\theta_s + 273)^4] \quad (3)$$

Onde:

φ_r = fluxo de calor radiante [W/m²]

σ = constante de Stefan-Boltzmann [W/(m² °C)]

ε_{res} = emissividade resultante da superfície aquecida [adimensional]

θ_s = temperatura da superfície aquecida [°C]

θ_g = temperatura dos gases no instante t [°C];

A emissividade da superfície aquecida indica a capacidade, de um corpo, no que diz respeito a transmitir ou receber calor. Segundo a NBR 15200:2012, recomenda que seja adotado o valor de 0,7 para superfícies de concreto.

No diz respeito à constante de Stefan-Boltzmann, seu valor a ser adotado é de $5,67 \times 10^{-8}$ W/(m² °C).

2.3.3 Condução

No processo de condução o calor flui, internamente, em um determinado corpo através do contato direto entre as partículas do mesmo. Desta forma, o calor se propaga para a extremidade mais fria do elemento, sendo a velocidade de propagação e a quantidade de energia necessária para elevar sua temperatura dependentes do seu material constituinte.

2.4 EFEITO DA FOGO NOS MATERIAIS

O concreto é conhecido pelo seu bom comportamento quando exposto ao fogo. O material em questão apresenta vantagens como: não ser combustível (ou seja, não queima ou alimenta as chamas) e apresentar uma baixa condutividade térmica. Aliado a esses dois fatores pode-se considerar o fato dos elementos de concreto serem robustos.

No entanto mesmo com as vantagens citadas, numa situação de incêndio, quando o elemento atinge, aproximadamente, 100°C sua capacidade resistente diminui devido a degeneração de suas propriedades mecânicas: a resistência a compressão e o módulo de elasticidade. Observa-se também, que nas primeiras variações de temperaturas, que ocorrem nas temperaturas mais baixas, entre 20°C e 300C, pode ocorrer o fenômeno conhecido como *spalling*, ou lascamento. Esse processo ocorre devido a evaporação de água presente na pasta do cimento gerando tensões internas no concreto, podendo causar o desprendimento de suas camadas mais superficiais. A ocorrência desse fenômeno é bastante prejudicial a estrutura por diminuir a área de material resistente, bem como por expor a armadura da peça ao fogo.

Apesar do exposto acima, segundo (ALBUQUERQUE *apud* LANDI, 1986) os maiores problemas em estruturas de concreto armado ocorrem quando a peça atinge temperaturas da ordem dos 500°C a 600°C. Nesse estágio, o aço perde, consideravelmente, sua capacidade de resistência a tração, comprometendo assim, a estrutura como um todo.

É importante salientar que não são somente as propriedades referentes a resistência ou ao módulo de elasticidade que variam no concreto quando o mesmo é submetido a uma situação de incêndio. Outras propriedades também são sensíveis ao fogo quais sejam: condutividade térmica, calor específico e a massa específica.

2.4.1 Concreto

2.4.1.1 Resistência

De acordo com a (ABNT NBR 15200, 2012) e o (EUROCODE 2 PART 1-2, 2004) a resistência a compressão do concreto varia de acordo com a seguinte equação:

$$f_{c,\theta} = k_{c,\theta} f_{ck} \quad (4)$$

Onde:

$f_{c,\theta}$ = Resistência a compressão à temperatura θ [Mpa];

f_{ck} = Resistência característica à compressão [Mpa];

$k_{c,\theta}$ = fator de redução da resistência a compressão a temperatura θ ;

2.4.1.2 Condutividade Térmica

De acordo com o (EUROCODE 2 PART 1-2, 2004), a condutividade térmica do concreto pode ser determinada entre dois valores um superior e outro inferior. O limite superior é determinado pela equação 5:

$$\lambda_{c,sup} = 2 - 0,2451 \left(\frac{\theta}{100} \right) + 0,0107 \left(\frac{\theta}{100} \right)^2 \quad (5)$$

O limite inferior por sua vez é determinado pela equação 6:

$$\lambda_{c,inf} = 1,36 - 0,136 \left(\frac{\theta}{100} \right) + 0,0057 \left(\frac{\theta}{100} \right)^2 \quad (6)$$

Onde:

$\lambda_{c,sup}$ = limite superior da condutividade térmica do concreto [W/m°C]

$\lambda_{c,inf}$ = limite inferior da condutividade térmica do concreto [W/m°C]

θ = temperatura [°C], variando entre 20°C e 1200°C

Segundo a (ABNT NBR 15200, 2012) a condutividade térmica do concreto para $20^\circ\text{C} \leq \theta \leq 1200^\circ\text{C}$ pode ser determinada pela equação (6).

2.4.1.3 Calor Específico

De acordo com a (ABNT NBR 15200, 2012) e o (EUROCODE 2 PART 1-2, 2004), o calor específico de um concreto seco, ou seja, com umidade igual a 0%, pode ser determinado pelas Equações (7) a (11):

- Para $20^\circ\text{C} \leq \theta \leq 100^\circ\text{C}$:

$$c_p(\theta) = 900 \quad (7)$$

- Para $100^\circ\text{C} \leq \theta \leq 200^\circ\text{C}$:

$$c_p(\theta) = 900 + (\theta - 100) \quad (8)$$

- Para $200^\circ\text{C} \leq \theta \leq 400^\circ\text{C}$:

$$c_p(\theta) = 1000 + \frac{(\theta - 200)}{2} \quad (9)$$

- Para $400^\circ\text{C} \leq \theta \leq 1200^\circ\text{C}$:

$$c_p(\theta) = 1100 \quad (10)$$

Sendo θ a temperatura em °C.

Ainda de acordo com as mesmas normas quando a umidade não for explicitamente expressa no modelo de cálculo, a função do calor específico, com agregado calcáreo ou silicoso, pode ser

modelada como constante entre 100°C e 115°C, assumindo um valor de pico ($c_{p,pico}$), com decréscimo linear entre 115° e 200°. Dependendo do teor de umidade esse valor assume os seguintes valores.

- $c_{p,pico} = 900 \text{ J/kg } ^\circ\text{C}$, para umidade = 0,0%
- $c_{p,pico} = 1470 \text{ J/kg } ^\circ\text{C}$, para umidade = 1,5%
- $c_{p,pico} = 2020 \text{ J/kg } ^\circ\text{C}$, para umidade = 3,0%

Para outros valores de umidade deve-se fazer uma interpolação.

2.4.1.4 Densidade

Segundo a (ABNT NBR 15200, 2012) e o (EUROCODE 2 PART 1-2, 2004), a densidade é influenciada pela perda de água e deve ser definida segundo as Equações (11) a (14):

- Para $20^\circ\text{C} \leq \theta \leq 115^\circ\text{C}$:

$$\rho(\theta) = \rho(20^\circ\text{C}) \quad (11)$$

- Para $115^\circ\text{C} \leq \theta \leq 200^\circ\text{C}$:

$$\rho(\theta) = \rho(20^\circ\text{C}) \left(1 - \frac{0,02(\theta - 115)}{85}\right) \quad (12)$$

- Para $200^\circ\text{C} \leq \theta \leq 400^\circ\text{C}$:

$$\rho(\theta) = \rho(20^\circ\text{C}) \left(0,98 - \frac{0,03(\theta - 200)}{200}\right) \quad (13)$$

- Para $400^\circ\text{C} \leq \theta \leq 1200^\circ\text{C}$:

$$\rho(\theta) = \rho(20^\circ\text{C}) \left(0,95 - \frac{0,07(\theta - 400)}{800}\right) \quad (14)$$

Sendo θ a temperatura em °C e $\rho(20^\circ\text{C})$ a densidade do concreto a temperatura ambiente, considerada igual a 2300 kg/m³.

2.4.2 Aço

2.4.2.1 Resistencia

De acordo com a (ABNT NBR 15200, 2012), a resistência ao escoamento do aço da armadura ativa decresce com o aumento da temperatura podendo ser obtida pela equação (15):

$$f_{py,\theta} = k_{p,\theta} f_{pyk} \quad (15)$$

Onde:

$f_{py,\theta}$ = resistência do aço de armadura ativa a temperatura θ [Mpa];

f_{pyk} = resistência característica do aço de armadura ativa à temperatura ambiente [Mpa];

$k_{p,\theta}$ = fator de redução da resistência do aço de armadura ativa a temperatura θ ;

3 ESTADO DA ARTE

3.1 TIPOS DE LAJE

De acordo com (MIGLIORE *apud* FUSCO, 1995), lajes são elementos estruturais bidimensionais planos e de superfície lisa nos quais atuam cargas proponderantemente normais ao seu plano. Convencionalmente, esses elementos são responsáveis por transmitir seu carregamento às vigas, que, por sua vez, transferem as cargas aos pilares, sendo estes ultimos os reponsáveis por transmitir as mesmas às fundações, que as dirige ao solo.

Na Figura 3.1 é possível visualizar a representação de uma laje:

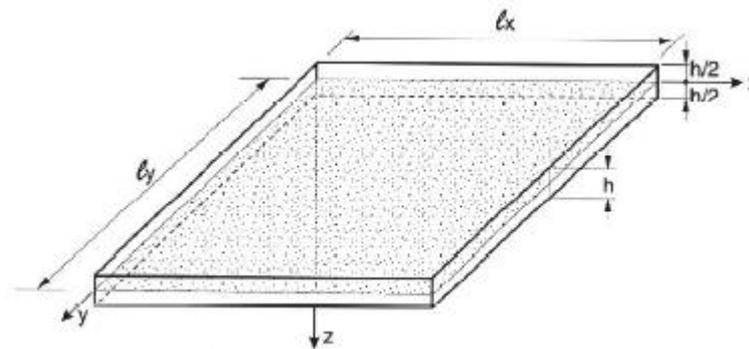


Figura 3.1 - Representação de uma laje de concreto

Fonte: (MIGLIORE *apud* FUSCO, 1995)

Quanto à forma de execução as lajes podem ser divididas em três grupos:

- a) Lajes moldadas no local;
- b) Lajes pré-moldadas ou pré-fabricadas;
- c) Lajes Mistas

3.1.1 Lajes Moldadas no Local

Dentre as lajes moldadas no local, as maciças se destacam como sendo o modelo mais tradicional. Nada mais são do que placas de concreto armado ou protendido, que vencem vãos

de até 5m. Esse sistema exige grande utilização de formas e escoramentos, o que torna seu sistema construtivo mais caro.

Já as nervuradas são uma boa opção para vencer grandes vãos. Apesar de apresentarem espessuras maiores que as das lajes maciças consomem menos concreto devido aos vazios entre as nervuras, que podem ser ou não preenchidos com materiais inertes como tijolos cerâmicos e EPS, o que torna o conjunto mais leve. Também consomem menos aço, devido ao fato de serem mais espessas, o que aumenta a eficiência. As lajes nervuradas podem ser construídas com formas de polipropileno ou ainda fazendo a utilização de vigotas pré-moldadas, como representado nas Figuras 3.2 e 3.3, respectivamente. Na Figura 3.4 pode-se observar um esquema representativo de uma laje nervurada.



Figura 3.2 - Fôrmas de polipropileno

Fonte: (CLEIDE, 2011)

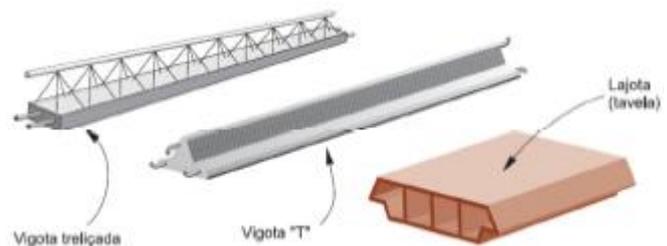


Figura 3.3 - Vigotas pré-moldadas para lajes nervuradas

Fonte: (CLEIDE, 2011)

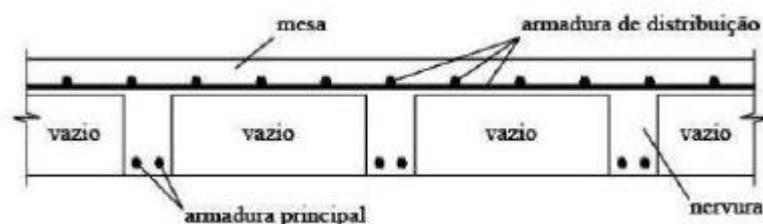


Figura 3.4 - Esquema de uma laje nervurada

Fonte: (ESO, 2011)

3.1.2 Lajes Pré-Moldadas ou Pré-Fabricadas

As lajes pré-fabricadas surgem como um passo decisivo para a industrialização da construção civil. Esse grupo contempla as lajes tipo π e as alveolares, sendo que esta última é objeto de estudo deste trabalho e, portanto, será detalhada mais à frente.

As lajes tipo π são produzidas em concreto protendido e são empregadas para atingir vãos que variam de cinco a doze metros. Na Figura 3.5 está representada um exemplo desse elemento pré-moldado:

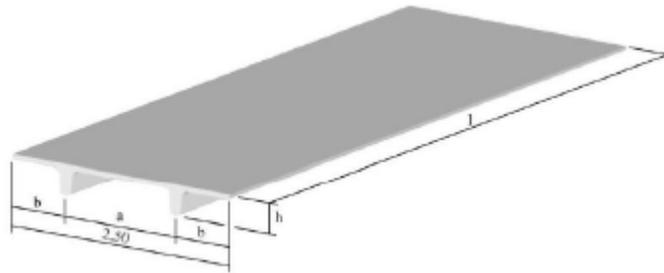


Figura 3.5 - Laje tipo π

Fonte: (MIGLIORE, 2008)

3.1.3 Lajes Mistas

Esse tipo de laje é constituído de uma chapa de aço perfilada, sobre a qual é concretado o concreto armado, que por sua vez possui uma armadura superior para controlar a fissuração. Dessa forma, a mesma funciona como uma laje unidirecional. Na Figura 3.6 pode-se visualizar esse elemento:

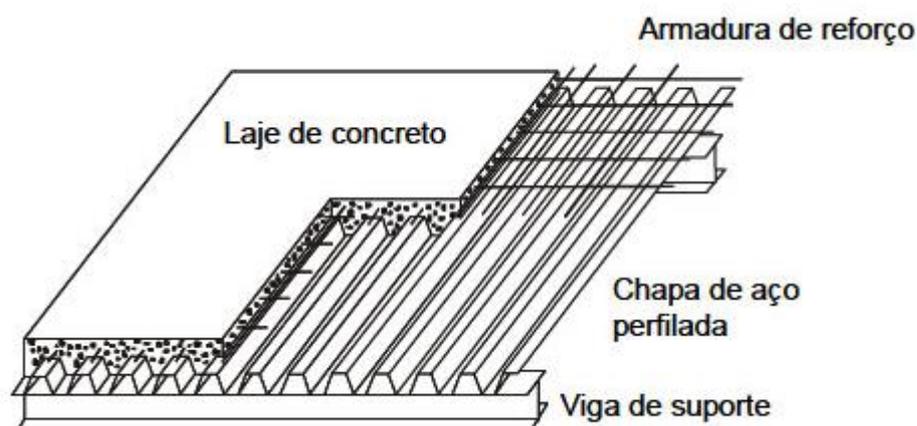


Figura 3.6 - Laje mista steel deck

Fonte: (PORTAL METÁLICA)

3.2 LAJES ALVEOLARES

3.2.1 Definição e Caracterização

De acordo com (EL DEBS, 2000), os painéis alveolares tiveram sua origem na Alemanha e hoje constituem-se em um dos mais populares elementos pré-moldados utilizados em todo o mundo, especialmente na América do Norte e Europa Ocidental, sendo estimada uma produção de 150 milhões de metros cúbicos por ano.

Em (MELO, 2004), o autor atribui, principalmente a fácil instalação e a possibilidade de atingir grandes vãos, o que facilita o *layout* e otimiza a estrutura, o grande sucesso do sistema de pisos em lajes alveolares.

Por definição, as lajes alveolares podem ser entendidas como sendo formadas pelo conjunto dos chamados painéis alveolares de concreto protendido, produzidos industrialmente, fora do local de utilização e sob rigorosas condições de controle de qualidade. Esses painéis apresentam seções transversais de altura constante e apresentam alvéolos longitudinais. Segundo (EL DEBS, 2000), as alturas em que esses painéis são produzidos variam normalmente entre 150mm e 300mm, mas podem atingir em casos excepcionais valores de até 500mm. No que diz respeito

à largura desses painéis, segundo o mesmo autor, os mesmos são produzidos com valores que variam entre 1,00m e 1,20m, podendo chegar a valores de 2,50m.

Aqui no Brasil, existem várias empresas de pré-fabricados de concreto que produzem esses tipos de painéis, sendo que suas configurações geométricas dependem, obviamente, do fabricante em questão. Pode-se citar, por exemplo, os da T&A pré-fabricados que apresentam larguras de 1,19m e são produzidos nas alturas de 17, 20, 21, 26, 29 e 32cm.

Os alvéolos longitudinais que contribuem para a redução de peso do elemento pré-fabricado, podem apresentar várias formas: ovalado, circular, retangular, dentre outras, dependendo, portanto, de cada fabricante e de seus equipamentos utilizados.

Na Figura 3.7, pode-se observar uma série de seções típicas de painéis alveolares, bem como as diferentes alturas em que são produzidos, além das diferentes formas possíveis para seus alvéolos longitudinais. Ainda na Figura 3.7 estão indicados em uma seção à parte, seus elementos, ficando claro, portanto, como são medidas as alturas e as larguras de um painel alveolar, a alma e as faces inferior e superior.

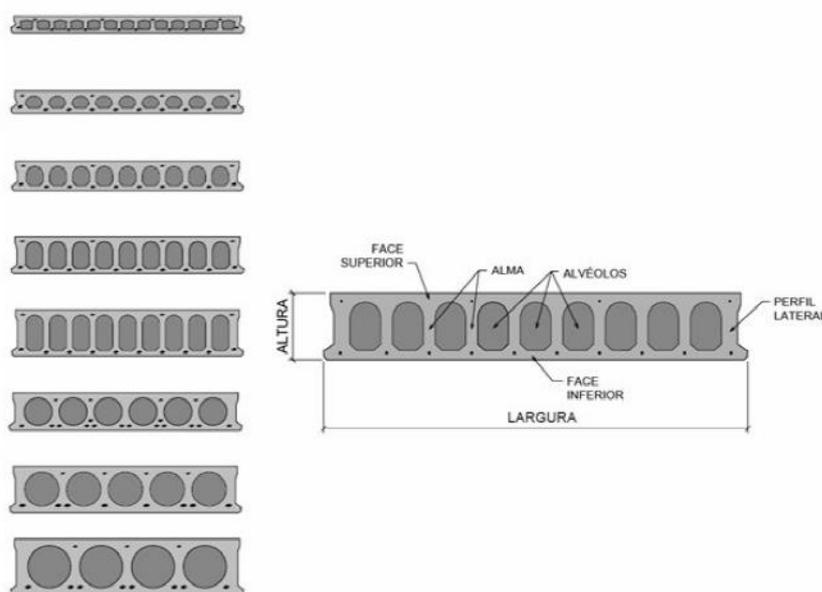


Figura 3.7 - Seções e elementos dos painéis alveolares da (TATU, 2008)

Os painéis protendidos utilizam concreto com elevada resistência característica, com f_{ck} maior ou igual a 40Mpa, e se caracterizam por serem compostos apenas por cabos de pretensão (armadura ativa) no seu sentido longitudinal que englobam totalmente a armadura de tração

inferior necessária. Logo, em uma análise estrutural, deve-se admitir que o comportamento do elemento corresponda ao de uma laje armada em uma direção. No sentido transversal, os esforços são projetados para serem suportados pela resistência à tração do concreto.

Na execução das lajes alveolares, é obrigatório o preenchimento das juntas longitudinais entre as faces laterais de dois painéis consecutivos com concreto, graute ou ainda argamassa. Esse preenchimento das juntas forma a chamada chave de cisalhamento ou chaveta, que garante a solidarização e a transmissão de esforços entre duas peças vizinhas. Além do aspecto estrutural, a chave de cisalhamento confere acabamento e estanqueidade necessários a laje. O processo de preenchimento das juntas longitudinais é conhecido como chaveteamento.

Na figura 3.8 pode-se observar a chave de cisalhamento que solidariza o sistema de lajes alveolares.

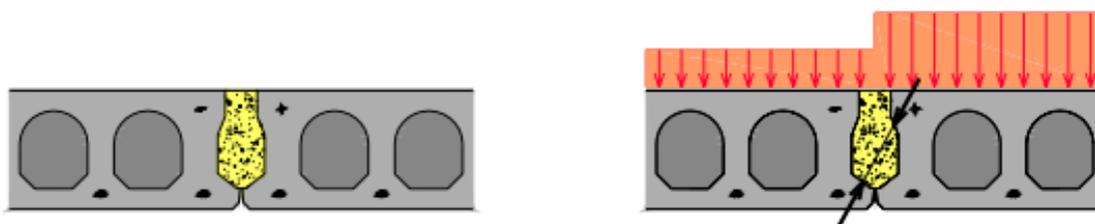


Figura 3.8 - Chave de cisalhamento

Fonte: (TATU, 2008)

As lajes alveolares são montadas justapostas, de modo que as faces inferiores fiquem em contato, permitindo que as faces superiores fiquem, portanto, afastadas umas das outras. De acordo com (EL DEBS, 2000), os painéis devem ser projetados de modo que a abertura na parte superior seja suficiente para permitir o preenchimento das juntas, cuja abertura mínima deve ser de 30mm.

Esses painéis foram desenvolvidos para que se fosse executada uma capa de concreto sobre as mesmas de, no mínimo, 5 cm de espessura. Conforme (MELO, 2004), essa capa melhora o desempenho de todo o conjunto pois distribui melhor os esforços e as mesmas trabalham de forma mais eficiente. Contudo, existe a possibilidade da não execução dessa capa, pois a área de concreto dos painéis pode ser suficiente para resistir as tensões de compressão e o monolitismo requerido pode ser alcançado apenas com o preenchimento das juntas de cisalhamento. Esses casos, no entanto, devem ser estudados pontualmente, pois uma laje não solidarizada pela capa pode apresentar um trecho mais flexível do que um outro, vizinho,

podendo causar fissuras em uma alvenaria transversal, por exemplo. Além disso, recomenda-se o uso da capa de concreto para o nivelamento da superfície e correção da contra-flecha devida a pretensão.

Segundo (MELO, 2004), no caso de utilização de uma capa de concreto sobre as lajes, deve-se elaborar um projeto que contenha três informações obrigatórias:

- a) Um projeto de tela de reforço sobre a laje, que impede a fissuração por retração;
- b) Um projeto de reforço dos negativos das lajes, no caso de serem consideradas como planos contínuos;
- c) Um projeto de armação dos negativos das vigas;

Na Figura 3.9 é possível ter uma ideia de como se dá a execução do capeamento sobre a laje com a malha de distribuição. Já na Figura 3.10 é possível visualizar o posicionamento da malha e da armadura negativa.

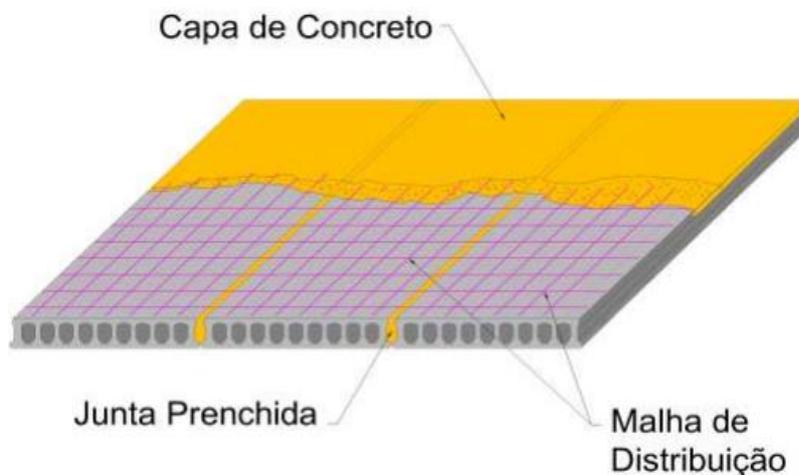


Figura 3.9 - Painéis com capa de concreto e malha de distribuição

Fonte: (SISTREL)

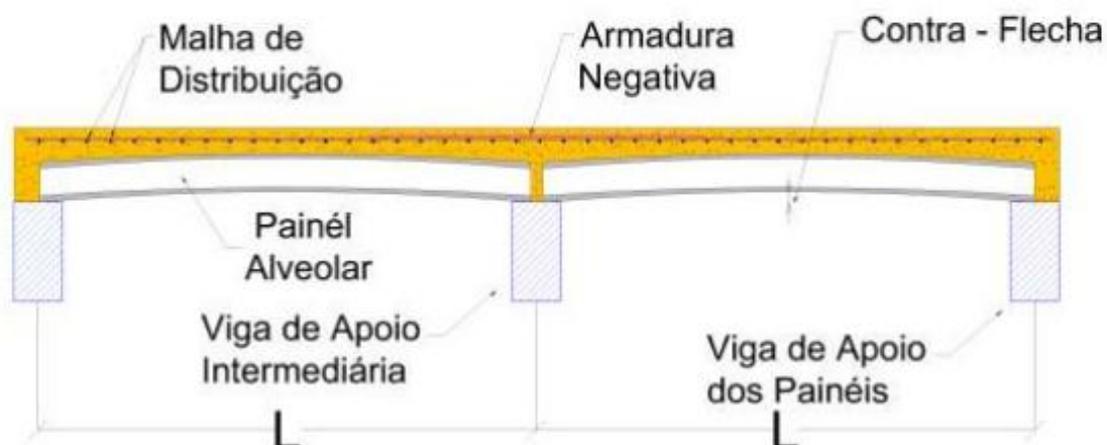


Figura 3.10 - Posicionamento das telas de distribuição e da armadura negativa

Fonte: (SISTREL)

De acordo com (MELO, 2004), como as lajes alveolares não possuem alças de içamento, qualquer movimentação das mesmas deve ser executada por meio de fitas, que laçam a laje por baixo e devem estar posicionadas a 30cm de cada extremidade da peça. O processo de içamento dos painéis pode ser observado na Figura 3.11



Figura 3.11 - Movimentação de lajes alveolares

Fonte: (TATU, 2008)

Segundo (MELO, 2004), para estocagem dos painéis alveolares os mesmos devem ser mantidos na posição horizontal com calços em posições próximas das quais serão colocadas as cintas para içamento das peças.

3.2.2 Vantagens

A escolha do sistema em lajes alveolares carrega consigo grandes vantagens, cujas principais serão citadas a seguir e que estão disponíveis em (EL DEBS, 2000) e (TATU, 2008).

- a) **Transporte:** Diferentemente de outros tipos tradicionais de lajes, que exigem o recebimento, transporte e estocagem de vários componentes (como vigotas, elementos de enchimento e escoras), a solução em lajes alveolares, os únicos componentes são os próprios painéis alveolares e, eventualmente, o aço da malha de distribuição.
- b) **Montagem:** A montagem dos painéis alveolares constitui-se em uma das grandes vantagens desse tipo de sistema por ser repetitivo, simples, rápido e que apresenta um alto rendimento da equipe de trabalho durante a execução da mesma.
- c) **Eliminação do cimbramento:** Os painéis alveolares são auto-portantes, logo dispensam a utilização de escoramentos, ainda que na execução de eventuais capeamentos.
- d) **Redução de serviços na obra:** Por ser constituída de painéis alveolares pré-fabricados ou pré-moldados, esse tipo de laje reduz, ao ponto de quase eliminar serviços de carpintaria, armação e revestimento. Além disso, os detalhes quanto ao acabamento podem ser executados por profissionais menos especializados.
- e) **Possibilidade de atingir grandes vãos:** Constitui-se em uma de suas principais características, onde mesmo quando submetida a cargas elevadas de utilização a mesma consegue atingir grandes vãos. De acordo com (EL DEBS, 2000), esse elemento pode ser aplicado em uma faixa de 5m a 15m de vão.

- f) **Economia:** Por ser um produto totalmente industrializado que envolve um baixo número de horas/homem na sua produção, redução de materiais e prazo de execução reduzido a solução em lajes alveolares constitui-se em uma solução indispensável sob o ponto de vista econômico. Contudo, sua grande eficiência estrutural e econômica é alcançada na medida em que maior for a padronização e racionalização do projeto, pois devido a esse aspecto industrial qualquer intervenção manual, seja ela de recorte ou de reforço de alvéolos, eleva consideravelmente seu custo, diminuindo então, sua característica industrial-mecanizada. Na elaboração do projeto também deve-se visar a otimização da pista de protensão, promovendo o seu melhor aproveitamento, de modo que seja minimizada a perda de cordoalhas de protensão. O projeto de paginação, que está diretamente ligado à modulação da obra, ganha muita importância pois garante a viabilidade econômica do sistema devendo ser estudado da maneira mais racional possível, de forma que seja maximizada a repetição e eliminadas, ao máximo, as intervenções manuais.
- g) **Qualidade e Confiabilidade:** Devido à sua característica de ser produzido industrialmente, existe um maior controle dos materiais utilizados na sua produção, bem como um controle rigoroso no que diz respeito às dimensões das peças.

3.2.3 Execução

Por sua vez, compreendem, basicamente, quatro etapas, que são descritas a seguir:

- a) **Montagem dos Painéis:** esta etapa é realizada para a formação dos pisos, devendo-se procurar posicioná-los lado a lado de modo que as faces inferiores entrem em contato. É essencial que seja verificado o nivelamento dos apoios, para evitar que determinados apoios pontuais possam causar o desnivelamento das peças, ou ainda, causar, de forma inesperada o aumento de tensões.
- b) **Equalização:** Após a montagem dos painéis, deve-se proceder com a equalização das lajes, que consiste num processo de nivelamento. Esse processo se faz necessário pois

os painéis encontram-se desnivelados após a montagem pois apresentam diferenças nas contra-flechas devidas à protensão, além de apresentar desnivelamentos naturais do processo de montagem. A equalização das lajes é realizada por meio de um sistema de torniquete de aço na face superior e travas com cunhas de madeira na face inferior

- c) **Chaveteamento:** conforme a (ABNT NBR 14861, 2011), pode ser executado de duas formas distintas: antes da execução do capeamento ou concomitantemente a ele, tomando-se o cuidado de limpar as juntas longitudinais antes de seu preenchimento e verificar se a diferença de nível entre as lajes adjacentes atende aos limites de tolerância, que é de 10mm, a fim de evitar concentrações de tensões. Após esse procedimento ocorre então preenchimento do restante da junta, desde que seja atingida a resistência mínima estabelecida em projeto em três pontos, configurando então, o chamado chaveteamento total. De acordo com (MELO, 2004) o chaveteamento parcial deve ser executado de forma a garantir o processo de equalização das lajes contudo é obrigatória a realização do chaveteamento total das juntas, mesmo que não seja realizada a concretagem da capa de concreto adicional.
- d) **Concretagem:** Por fim, a última etapa do processo de execução das lajes com painéis alveolares é a concretagem da capa de concreto. Como já foi explicado anteriormente, pode-se ou não, dependendo do projeto e da situação em questão, utilizar a capa de concreto sobre a laje, entretanto, a opção por sua execução é a mais usual, uma vez que esse tipo de laje foi desenvolvido para isso.

3.2.4 Dimensionamento de Lajes Alveolares em Temperatura Ambiente

O dimensionamento das lajes alveolares protendidas deve seguir as prescrições da (ABNT NBR 14861, 2011). Segundo esta norma o dimensionamento das armaduras longitudinais deve conduzir a um conjunto de esforços (M_{rd} , N_{rd}) capazes de resistir aos esforços solicitantes determinados na análise estrutural.

Deve-se deixar claro também que devem ser respeitados o que é estabelecido nas normas (ABNT NBR 6118, 2014) e (ABNT NBR 8681, 2004) quanto às combinações de ações para os

estados limites. Da mesma forma deve-se valer das prescrições da (ABNT NBR 6120, 2000) para a determinação dos carregamentos.

Segundo a norma, o dimensionamento da laje deve ser feito considerando ou não o capeamento sobre a laje. No caso da consideração da capa estrutural sobre a laje (situação mais usual), o dimensionamento deve ser dividido em três fases, quais sejam:

- a) **Produção e Manuseio:** nesta fase considera-se o dimensionamento das peças isoladas para resistir aos esforços devidos à aplicação da protensão, manuseio, transporte, içamento, armazenamento e montagem. Devem ser considerados os efeitos dinâmicos devido as ações de transição
- b) **Construção Preliminar:** Nesta fase a laje alveolar deve ser dimensionada para resistir aos esforços do peso próprio da laje e da capa estrutural, além de eventuais esforços variáveis que possam surgir durante a execução do capeamento. A estimativa do carregamento deve ser feita considerando a espessura da capa.
- c) **Construção Final:** Deve ser feito o dimensionamento considerando a seção composta resistente, composta pela laje e pela capa. Devem ser considerados carregamentos permanentes, aos quais as lajes estarão submetidas, como pisos e alvenarias, além de carregamentos variáveis.

Caso não seja executado o capeamento sobre a laje, o seu dimensionamento deve ser feito considerando apenas as fases **a** e **c**, sendo a seção resistente correspondente a seção do elemento pré-fabricado.

3.2.4.1 Resistência à Flexão

Para a determinação da resistência à flexão, valem as prescrições da (ABNT NBR 9062, 2006) e (ABNT NBR 6118, 2014). A verificação da seção transversal resistente deve ser feita no ponto cujo momento fletor é máximo.

Assim, a verificação das tensões admissíveis deve ser feita, de tal forma que atenda aos requisitos de flexão e durabilidade, conforme a seguir:

- Nas situações de caráter transitório descritas em “a” e “b”:

$$\sigma_{ct,j} \leq \frac{f_{ct,mj}}{1,2} \quad (16)$$

$$\sigma_{c,j} \leq \frac{0,85f_{ck,j}}{\gamma_c} \quad (17)$$

- Na situação “c”:

$$\sigma_{ct} \leq \frac{1,3f_{ct,m}}{\gamma_c} \quad (18)$$

$$\sigma_{c,j} \leq \frac{0,85f_{ck}}{\gamma_c} \quad (19)$$

3.2.4.2 Resistência à Força Cortante

Segundo a (ABNT NBR 14861, 2011) a ruptura de uma laje alveolar em relação ao esforço cortante pode ocorrer de duas formas: se a tensão de cisalhamento superar a resistência à tração diagonal do concreto na nervura do alvéolo ou se a tensão de cisalhamento combinada com as tensões de tração da protensão ou da flexão da peça.

Assim, a verificação quanto ao cortante deve ser feita na seção transversal mais crítica. Sua resistência só será satisfatória se atender simultaneamente as seguintes condições:

$$V_{sd} \leq V_{Rd1} \quad (20)$$

$$V_{sd} \leq V_{Rd2} \quad \text{ou} \quad V_{sd} \leq V_{Rd2, \text{capa}} \quad (21)$$

Onde:

V_{sd} = é a força cortante solicitante de cálculo na seção em análise;

V_{Rd1} = é a força cortante resistente de cálculo na seção em análise;

V_{Rd2} = é a força cortante resistente de cálculo na seção em análise, das diagonais comprimidas do concreto;

$V_{Rd2, \text{capa}}$ = é a força cortante resistente de cálculo na seção em análise, das diagonais comprimidas do concreto com capa e alvéolos preenchidos;

3.2.4.3 Resistencia ao Fendilhamento Longitudinal

Na fase de liberação das cordoalhas de protensão da laje alveolar, não pode haver nenhum tipo de fissura longitudinal nas nervuras. Assim, deve-se garantir que a tensão na nervura mais solicitada seja inferior à tensão de tração do concreto, ou seja:

$$\sigma_{sp} \ll f_{ctkj, \text{inf}} \quad (22)$$

Onde:

σ_{sp} = tensão na nervura mais solicitada;

$f_{ctkj, \text{inf}}$ = é o valor da resistência à tração característica inferior do concreto na idade “j”, referente à liberação da protensão;

3.2.4.4 Resistência ao Esforço Cortante nas Chaves de Cisalhamento ou Chaveta

A transferência de ações de um painel alveolar para o outro pode gerar esforços cortantes verticais na direção das chaves de cisalhamento. Logo, a resistência ao cortante nessa região é dependente das propriedades do concreto presente na chaveta e deve ser considerado o menor valor dentre as equações 23 e 24, expressas por:

$$V_{Rd1} = 0,25 f_{ctd} \sum h_f \quad (23)$$

$$V_{Rd1} = 0,15(f_{ctd,ch} h_{ch} + f_{ctd,t} h_t) \quad (24)$$

Onde:

V_{Rd1} = é a resistência ao esforço cortante;

f_{ctd} = é o valor de cálculo da resistência à tração do concreto da laje alveolar;

$f_{ctd,ch}$ = é o valor de cálculo da resistência à tração do concreto da chaveta;

$f_{ctd,t}$ = é o valor de cálculo da resistência à tração do concreto da capa estrutural;

h_{ch} e h_t = são as alturas da chaveta e da capa estrutural, respectivamente.

$\sum h_f$ = é a soma das menores espessuras das flanges da face inferior e da face superior com a espessura da capa estrutural (Na Figura 3.12 $\sum h_f = h_{f1} + h_{f2} + h_t$)

Na Figura 3.12 pode-se visualizar como atua a força cortante nas chaves de cisalhamento:

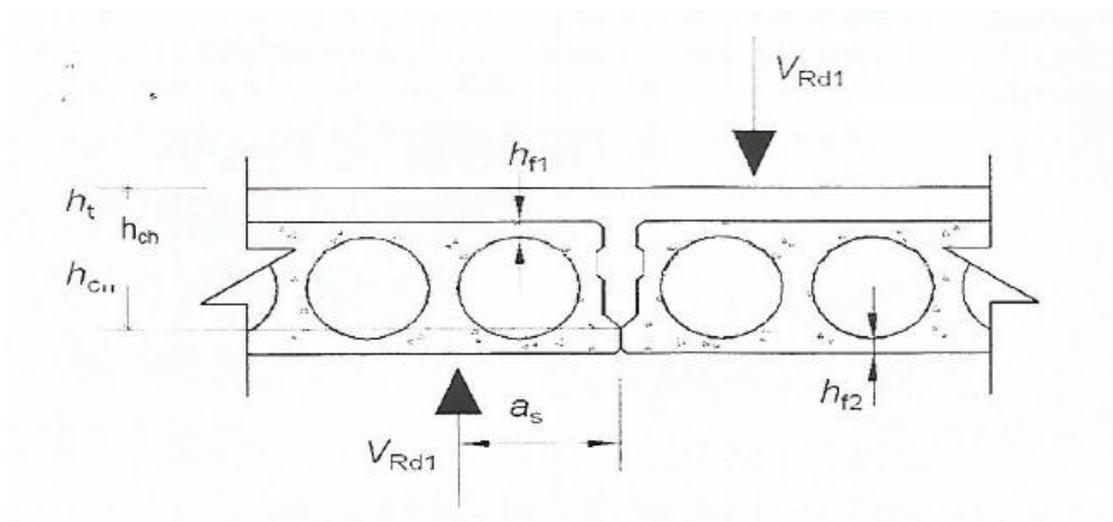


Figura 3.12 - Força cortante nas chavetas ou chaves de cisalhamento

Fonte: (ABNT NBR 14861, 2011)

No que diz respeito às ações concentradas, a resistência ao cortante, $V_{Rd1,conc}$, é dada pela Equação 25:

$$V_{Rd1,conc} = V_{Rd1}(a + h_{ch} + h_t 2 a_s) \quad (25)$$

Onde:

V_{Rd1} = é o menor valor determinado para resistência ao esforço cortante calculados pelas Equações 23 e 24;

a = é o comprimento da ação paralela à junta longitudinal;

a_s = é a distância entre o centro da aplicação da ação concentrada e o centro da junta longitudinal;

h_{ch} e h_t = são as alturas da chaveta e da capa estrutural, respectivamente

3.2.4.5 Resistência à Punção

Deve ser calculada utilizando-se a seguinte expressão:

$$V_{Rd} = b_{ef} h f_{ctd} \left(1 + 0,3 \alpha \frac{\sigma_{cp}}{f_{ctd}}\right) \quad (26)$$

Onde:

$V_{Rd,punção}$ = a resistência a punção da nervura da laje alveolar;

σ_{cp} = a tensão de compressão do concreto no centro de gravidade da peça devido à força de protensão;

b_{ef} = a espessura efetiva das nervuras;

f_{ctd} = a resistência de cálculo à tração do concreto da nervura da laje alveolar;

h = a altura total da laje sem capa ou equivalente a h_{tot} ;

α = a relação entre a distância da extremidade da laje ao ponto de aplicação da ação e o valor superior do comprimento de ancoragem;

3.2.5 Dimensionamento de Estruturas em Situação de Incêndio

Como já esclarecido no Capítulo 2, à medida que a temperatura aumenta as estruturas de concreto tem degeneradas suas propriedades mecânicas. Além disso, o efeito da temperatura também causa a expansão térmica de seus materiais constituintes, evaporação da água, aumento da poropressão, podendo causar o fenômeno do *spalling* ou lascamento. Assim, para que a estrutura de concreto apresente resistência ao fogo, deve-se garantir que a combinação desses fatores não prejudique as funções corta-fogo e suporte.

3.2.5.1 Esforços Solicitantes em Situação de Incêndio

A (ABNT NBR 15200, 2012) especifica que, em situações usuais, as estruturas de concreto devem ser projetadas para trabalhar à temperatura ambiente e, somente depois, dependendo das suas características e uso, devem ser verificadas numa situação de incêndio. De acordo com a mesma norma, esta verificação deve ser feita no Estado Limite Último (ELU) para uma combinação excepcional de ações, conforme estabelecido na (ABNT NBR 8681, 2004) em seu item 5.1.3.3, através da seguinte equação:

$$F_{d,fi} = \sum_{i=1}^m \gamma_{gi} F_{gi,k} + F_{q,exp} + \gamma_q \sum_{j=1}^n \psi_{0j} F_{qj,k} \quad (27)$$

Onde:

$F_{d,fi}$ = Solicitações de cálculo para a combinação excepcional;

γ_{gi} = Coeficientes de ponderação do carregamento permanente;

$F_{gi,k}$ = Ações permanentes características;

$F_{q,exp}$ = Ação acidental excepcional principal;

γ_{qj} = Coeficiente de ponderação das demais ações variáveis;

ψ_{0j} = Fator de combinação das ações variáveis características;

$F_{qj,k}$ = Ações variáveis características;

Nessa verificação, são desprezados os efeitos decorrentes de deformações térmicas devido ao fato dos esforços serem muito reduzidos e pelas grandes deformações plásticas que ocorrem em uma situação de incêndio. Dessa forma, conclui-se que a ação decorrente do incêndio consiste, usualmente, em reduzir a resistência dos materiais e a capacidade dos elementos estruturais. Além disso, como o incêndio se constitui em uma ação que tem uma probabilidade de ocorrência muito baixa e atua durante um intervalo de tempo muito curto em relação ao tempo de vida útil de uma edificação, a (ABNT NBR 8681, 2004) permite adotar para o fator de combinação ψ_{0j} o valor do fator de redução ψ_{2j} das combinações quase permanentes (Item 4.2.2.1.3 da norma). A referida norma ainda estabelece que quando a ação variável principal for o fogo, o fator de redução ψ_{2j} ainda pode ser reduzido, multiplicando-o por 0,7 (Tabela 6 da norma). No que tange aos coeficientes de ponderação γ_{gi} e γ_{qi} , seus valores devem ser adotados conforme as prescrições da (ABNT NBR 6118, 2014) para combinações excepcionais de ações, sendo iguais, portanto, a 1,2 e 1,0, respectivamente. De forma sucinta essas considerações se resumem a:

Tabela 3.1 - Resumo dos coeficientes

| γ_{gi} | γ_{qi} | ψ_{0j} |
|---------------|---------------|-------------------|
| 1,2 | 1,0 | 0,7 x ψ_{2j} |

Levando-se em conta todas as considerações acima, a Equação (27), pode ser reescrita da seguinte forma:

$$F_{d,fi} = 1,2 \sum_{i=1}^m F_{gi,k} + 0,7 \sum_{j=1}^n \psi_{2j} F_{qj,k} \quad (28)$$

Por fim, na avaliação da resistência ao fogo o que se busca é avaliar se, para o tempo requerido de resistência ao fogo (TRRF), a Equação 29 é satisfeita.

$$S_{d,fi} \leq R_{d,fi} [f_{ck}(\theta); f_{yk}(\theta); f_{pyk}(\theta)] \quad (29)$$

Onde:

$S_{d,fi}$ = Solicitação de cálculo do elemento estrutural, que varia com a temperatura;

$R_{d,fi}$ = Esforço resistente da peça estrutural em situação de incêndio;

Em situações de incêndio em que não há qualquer solicitação gerada por deformações impostas, pode-se considerar o valor de cálculo do esforço solicitante em situação de incêndio igual a 70% do da solicitação à temperatura ambiente, tomando-se apenas combinações de ações que não envolvam o vento.

$$S_{d,fi} = 0,70S_d \quad (30)$$

As solicitações de cálculo em situação de incêndio sofrem redução em relação às solicitações em temperatura ambiente devido ao incêndio representar uma ação excepcional, constituindo-se numa ação de pequena probabilidade de ocorrência e de curta duração.

Existem vários métodos para se realizar essa verificação, sendo cinco deles, aceitos e descritos pela (ABNT NBR 15200, 2012). São eles: o método tabular, o método analítico para pilares, o método simplificado de cálculo, o método avançado de cálculo e o método experimental. Por se tratar de uma análise térmica de uma laje alveolar, o método analítico para pilares não será abordado nesse trabalho.

3.2.5.2 Método Tabular

A verificação da resistência dos elementos estruturais em relação a uma situação de incêndio pelo método tabular consiste, apenas, em atender às dimensões mínimas estabelecidas nas tabelas da (ABNT NBR 15200, 2012). Contudo, esses elementos devem ter sido previamente dimensionados conforme as prescrições da (ABNT NBR 6118, 2014) e (ABNT NBR 9062, 2006) e estarem de acordo com as especificações das mesmas.

As dimensões mínimas citadas acima correspondem a: largura de vigas (b_{\min}) e seções transversais de pilares e tirantes, espessuras de lajes (h), e principalmente, a distância entre o eixo da armadura longitudinal e a face exposta ao fogo (c_1). Vale ressaltar que para dimensões intermediárias, em relação as fornecidas nas tabelas, pode-se recorrer a interpolação linear.

Nota-se que esse método não faz nenhuma exigência quanto à armadura de cisalhamento. Isso se deve ao fato de que em situação de incêndio as peças de concreto rompem normalmente por flexão ou flexocompressão e não por cisalhamento, de acordo com ensaios realizados.

Outro ponto importante em relação a esse método é que os valores correspondentes a c_1 , apresentado nas tabelas de verificação de lajes, referem-se a armaduras passivas. Caso a verificação seja de um elemento protendido, ou seja, composto por armaduras ativas deve-se acrescentar ao valor de c_1 , 10mm para barras e 15mm para fios e cordoalhas.

Ainda no que se refere a lajes, os valores de espessura (h) contidos nas tabelas são válidos para elementos que sofrem aquecimento na face inferior e o valor de c_1 é dado para armaduras inferiores. Além disso, os valores de (h) são os considerados mínimos para garantir a função corta fogo.

3.2.5.3 Método Simplificado de Cálculo

Diferentemente do método tabular, em que apenas são verificadas se as dimensões de determinado elemento estrutural atendem aos valores mínimos prescritos nas tabelas normativas para um certo valor de TRRF, o método simplificado de cálculo consiste em analisar se a equação (29) é atendida. Este método, contudo, assim como o tabular, não leva em consideração as verificações quanto ao cisalhamento e efeitos oriundos do *spalling*, sendo por isso chamado de simplificado. Também é importante ressaltar que este método não garante a função corta-fogo a estrutura, devendo-se recorrer a outro método, caso necessário.

Assim, para atender a equação (29), é preciso que sejam determinados os esforços solicitantes e resistentes de cálculo para uma situação de incêndio. Atendendo a essa necessidade, a (ABNT NBR 15200, 2012) apresenta as seguintes hipóteses, que indicam as diretrizes de cálculo para os mesmos:

- a) Os esforços solicitantes de cálculo ($S_{d,fi}$) podem ser determinados conforme estabelecido no item 3.2.5.1;
- b) Já para a determinação dos esforços resistentes de cálculo ($R_{d,fi}$), inicialmente deve ser determinado a distribuição de temperatura na seção transversal do elemento estrutural em análise, considerando a exposição ao fogo de acordo com o TRRF adotado. Essa distribuição de temperatura pode ser obtida em literatura técnica ou pode ser calculada em *softwares* específicos de computador. Com esse campo de temperatura, devem ser

aplicados os coeficientes de redução da resistência dos materiais para o concreto e o aço ($k_{c,\theta}$, $k_{s,\theta}$ e $k_{p,\theta}$), que são calculados de acordo com a temperatura correspondente.

- c) Para o cálculo propriamente dito dos esforços resistentes, procede-se de forma análoga ao cálculo em situação ambiente através da (ABNT NBR 6118, 2014), adotando para o concreto e para o aço, a resistência de cálculo média. Essa resistência média é obtida distribuindo-se uniformemente na seção de concreto e na armadura total a perda total de resistência correspondente, devido ao aquecimento.

De forma alternativa, a norma ainda cita que podem ser utilizados métodos que reduzem a seção de concreto em situação de incêndio para simular, corretamente, a perda de resistência. Dentre esses métodos, pode-se citar o método das isotermas dos 500°C, que será abordado a seguir. Apesar de permitir sua utilização, a norma brasileira não descreve esse método, devendo-se recorrer ao (EUROCODE 2 PART 1-2, 2004).

3.2.5.3.1 Método das Isotermas dos 500°C

De acordo com o (EUROCODE 2 PART 1-2, 2004), este método pode ser aplicado a seções expostas tanto ao incêndio-padrão quanto a qualquer outro regime de incêndio, desde que o mesmo provoque campos de temperaturas semelhantes no elemento submetido a análise. A mesma norma também especifica que o método dos 500°C só é válido para seções transversais com dimensões mínimas, contidas na seguinte Tabela 3.2:

Tabela 3.2- Larguras mínimas exigidas para aplicação do método dos 500°C

| TRRF (min) | Largura Mínima (mm) |
|---------------|------------------------|
| 60 | 90 |
| 90 | 120 |
| 120 | 160 |
| 180 | 200 |
| 240 | 280 |

Este método propõe, como já dito anteriormente, que a redução da área de concreto da seção transversal. Assim, como o próprio nome já diz, deve-se desprezar a área de concreto que apresente temperatura superior a 500°C, por estar bastante prejudicada devido à ação do fogo, não apresentando, portanto, função estrutural.

A seção efetiva de cálculo é, portanto, àquela que se encontra envolta pela isoterma de 500°C. Segundo o método, nessa região deve-se considerar a resistência à compressão característica do concreto igual a resistência à compressão característica do concreto à temperatura ambiente, ou seja, despreza-se também o coeficiente de redução deste material ($k_{c,\theta}$). Logo, para essa região pode-se escrever:

$$f_{cd,fi} = f_{ck} \quad (31)$$

Onde:

$f_{cd,fi}$ = Resistência à compressão do concreto em situação de incêndio;

f_{ck} = Resistência à compressão do concreto à temperatura ambiente;

A norma europeia traz três exemplos de aplicação do método em seções transversais, que podem ser vistos na Figura 3.13. Nota-se que nas regiões arredondadas as seções são aproximadas por retângulos ou quadrados:

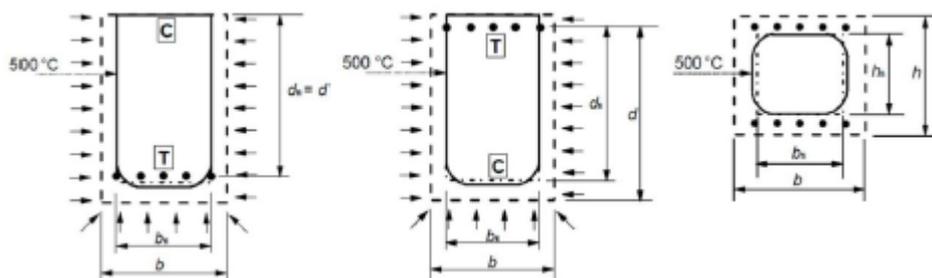


Figura 3.13 – Redução das seções no método dos 500°C

Fonte: (EUROCODE 2 PART 1-2, 2004)

É perceptível na Figura 3.13, que algumas barras da armadura não fazem parte da seção efetiva. Porém, de acordo com o método, as mesmas devem ser consideradas para o cálculo do momento

resistente na situação de incêndio. Assim, deve-se determinar a temperatura no eixo das barras e aplicar o fator de redução de resistência do aço.

De uma maneira geral, os procedimentos de aplicação do método das isothermas dos 500°C consistem em:

- a) Determinação do campo de temperatura na seção transversal em função do TRRF;
- b) Determinar a seção efetiva envolta pela isoterma dos 500°C;
- c) Determinar as temperaturas nos eixos das armaduras;
- d) Estimar a resistência da peça de acordo com a seção efetiva e a resistência reduzida do aço;
- e) Comparar a resistência estimada em temperatura elevada com o esforço solicitante de cálculo para a situação de incêndio;

Os esforços solicitantes devem ser calculados, considerando-se os coeficientes de ponderação das combinações excepcionais, em ambos os materiais.

3.2.5.4 Métodos Avançados de Cálculos

A priori, deve se estabelecer que a capacidade resistente deve atender ao que está prescrito na (ABNT NBR 6118, 2014). Posto isto, para ser considerado um método avançado de cálculo, os mesmos devem considerar:

- a) As combinações de ações em situação de incêndio devem ser rigorosamente determinadas conforme descrito na (ABNT NBR 8681, 2004);
- b) Esforços solicitantes de cálculo em situação de incêndio, acrescidos dos efeitos térmicos de deformações restringidas, desde que sejam calculados por modelos não lineares e que considerem as profundas redistribuições de esforços que ocorrerem;
- c) Os esforços resistentes, calculados de acordo com as distribuições de temperatura em função do TRRF;
- d) Devem ser consideradas as não linearidades envolvidas para a determinação das resistências e distribuição da temperatura;

3.2.5.5 Método Experimental

Segundo a (ABNT NBR 15200, 2012), em casos especiais, pode-se considerar a resistência ao fogo superior à calculada com base nos métodos descritos, desde que devidamente comprovada através de ensaios, conforme estabelecido na (ABNT NBR 5628, 2001).

3.3 TRABALHOS CIENTÍFICOS

Neste tópico serão apresentados alguns trabalhos da área de engenharia de estruturas em situação de incêndio que foram fundamentais para elaboração deste trabalho

(PIERIN e SILVA, 2009) elaboraram um artigo para o 51º Congresso Brasileiro de Concreto, tendo como objetivo fazer uma análise térmica de uma laje alveolar pretendida a ser executada num *shopping center*. Nessa situação a edificação não apresentava compartimentação vertical, ficando sujeita a ação térmica em ambas as faces. Não se sabia, à época, se seria necessária a aplicação da carga térmica na face superior e na inferior da laje e, assim sendo, o método tabular não seria aplicável. Assim, atuando a favor da segurança, a carga correspondente ao incêndio padrão foi aplicada em ambas as faces. Hoje, a (ABNT NBR 15200, 2012) estabelece que apenas a aplicação na face inferior é necessária, validando a aplicação do método tabular.

A partir destas considerações, foi elaborado um modelo em elementos finitos no *software* Super TempCalc (STC), para a determinação do campo de temperaturas na laje alveolar. Na Figura 3.14 é apresentada a seção transversal da laje que tem 26cm de altura, mais uma capa de 5cm. Além disso, a mesma apresenta cordoalhas localizadas a 3cm da face inferior bem como a 5cm.

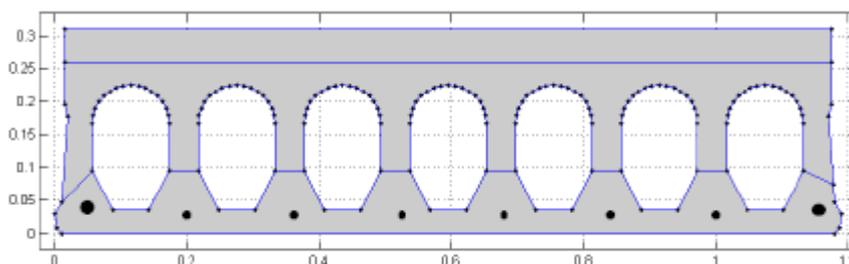


Figura 3.14 - Modelo analisado termicamente

Fonte: (PIERIN e SILVA, 2009)

Para a simulação foi considerada uma malha triangular de 2cm, conforme apresentado na Figura 3.15:

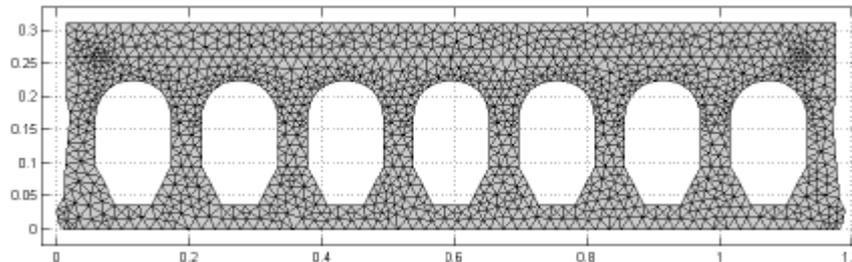


Figura 3.15 - Malha de elementos finitos no SuperTempCalc

Fonte: (PIERIN e SILVA, 2009)

O campo de temperaturas na seção transversal, para um tempo de 60min é apresentado na Figura 3.16:

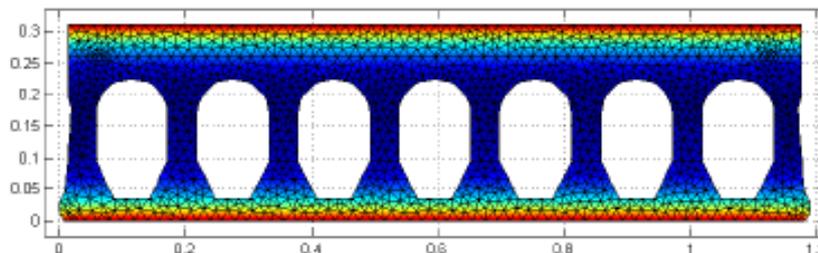


Figura 3.16 - Campo de temperaturas para um tempo de 60min

Fonte: (PIERIN e SILVA, 2009)

Ao final da simulação foram determinadas as isotermas para determinação da seção transversal efetiva, bem como foram determinados os diagramas de tensão-deformação das armaduras. Vale ressaltar, que a temperatura encontrada no eixo das armaduras localizadas a 3cm da face inferior foi de 415°C, sendo essa informação muito útil para fins de comparação neste trabalho. Por fim, o artigo forneceu subsídios à verificação da resistência da laje em situação de incêndio não sendo determinado por quanto tempo a mesma resistiria sem entrar em colapso, quando submetida a um aquecimento.

(ALBUQUERQUE, 2012) tratou do tema: dimensionamento de vigas em situação de incêndio, em sua dissertação de mestrado. Para tanto, fez uma revisão do estado da arte da literatura

nacional e internacional. Também estudou os diferentes métodos de dimensionamento para vigas propostos pela (ABNT NBR 15200, 2012), estando o método tabular muito bem detalhado.

Após o referido estudo, o autor comparou valores de momentos fletores resistentes em situação de incêndio, calculados por diferentes métodos, para diferentes seções de vigas, a fim de validar os valores de momento fletor resistente em situação de incêndio obtidos por meio do *software* SuperTempCalc (STC). Os métodos utilizados foram:

- Resultados diretos obtidos através do programa SuperTempCalc;
- Cálculo manual a partir de resultados obtidos no SuperTempCalc;
- Cálculo com base na (ABNT NBR 15200, 2012);
- Cálculo com base em hipótese simplificada da (ABNT NBR 15200, 2012);
- Cálculo utilizando o método simplificado das isothermas dos 500°C;
- Cálculo direto do FNC-FOGO (programa de computador que aplica métodos de cálculo mais avançados, desenvolvido por (JÚNIOR, 2011));

Como pode ser observado na Figura 3.17, os valores de momento resistente obtidos pelos diferentes métodos foram próximos, validando, portanto, o (STC).

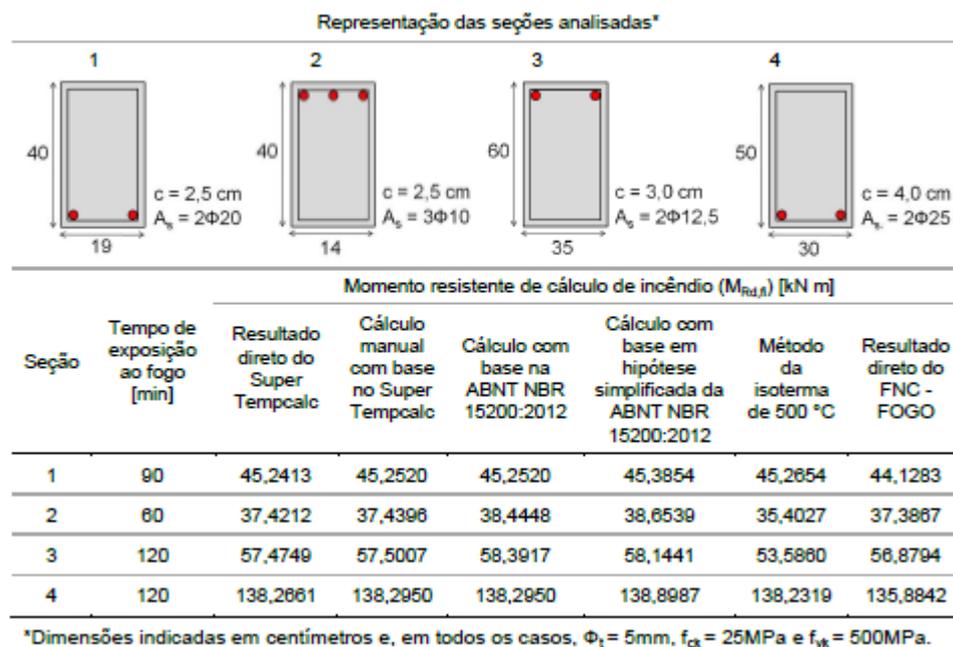


Figura 3.17 - Resumo dos resultados

Fonte: (ALBUQUERQUE, 2012)

Assim, validados os resultados obtidos através do software, finalmente foi proposto um método alternativo ao método tabular já que, embora seja considerado prático, este último restringe o dimensionamento de vigas de concreto expostas ao fogo a pequenos valores. Chamado de método gráfico, o mesmo foi desenvolvido a partir de curvas que relacionam o parâmetro μ , indicado na Equação (32), ao tempo de aquecimento padronizado.

$$\mu = \frac{M_{Rd,fi}}{M_{Rd}} \quad (32)$$

Onde:

$M_{Rd,fi}$ = Momento fletor resistente de cálculo da seção transversal em situação de incêndio, utilizando os valores obtidos através do (STC) ;

M_{Rd} = Momento resistente de cálculo da seção transversal à temperatura ambiente;

Após fazer alguns exemplos de aplicação, em diferentes situações, do método proposto e obter os resultados, os mesmos foram comparados a análises do método tabular. Foi constatado que o método gráfico conduz a verificações mais econômicas pois os valores de TRF obtidos por este método sempre foram superiores se comparados aos obtidos pelo método tabular, conforme apresentado a seguir:

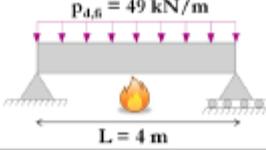
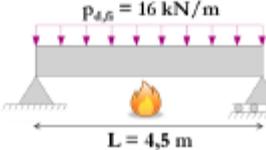
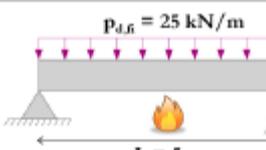
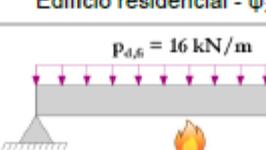
| Dados estipulados para a aplicação dos métodos | | TRF _{viga} (min) | |
|---|--|---------------------------|----------------|
| Dimensionamento à temperatura ambiente | Carregamento em incêndio | Método gráfico | Método tabular |
| Estribos - 5 mm | Biblioteca - $\psi_2 = 0,6$ | | |
| Cobrimento - 25 mm | $p_{d,6} = 49 \text{ kN/m}$ | 115 | 95 |
| $As^* = 6\Phi 16 \text{ mm}$ distribuídas em 1 camada |  | | |
| Estribos - 5 mm | Edifício residencial - $\psi_2 = 0,3$ | | 110 |
| Cobrimento - 40 mm | $p_{d,6} = 16 \text{ kN/m}$ | 120 | 88 |
| $As^* = 6\Phi 10 \text{ mm}$ distribuídas em 1 camada |  | | |
| Estribos - 5 mm | Escritório - $\psi_2 = 0,4$ | | |
| Cobrimento - 30 mm | $p_{d,6} = 25 \text{ kN/m}$ | 90 | 64,5 |
| $As^* = 4\Phi 16 \text{ mm}$ distribuídas em 2 camadas |  | | |
| Estribos - 5 mm | Edifício residencial - $\psi_2 = 0,3$ | | 76 |
| Cobrimento - 25 mm | $p_{d,6} = 16 \text{ kN/m}$ | 90 | 56 |
| $As^* = 3\Phi 16 \text{ mm}$ distribuídas em 1 camada |  | | |

Figura 3.18 - Resumo dos resultados obtidos via método gráfico e tabular

Fonte: (PIERIN e SILVA, 2009)

(SANTOS, 2015) em seu trabalho de conclusão de curso, fez um estudo a respeito do comportamento de lajes mistas de concreto e aço do tipo “steel deck” quando submetidas a uma situação de incêndio. Começa seu estudo fazendo uma breve abordagem a respeito dos tipos de lajes existentes e em seguida entra em detalhes no que diz respeito ao seu objeto de estudo, expondo suas dimensões usuais, vantagens, desvantagens e como seria seu dimensionamento numa situação ambiente. No estado da arte estudou trabalhos científicos nacionais e apresentou alguns métodos de dimensionamento propostos (ABNT NBR 15200, 2004).

Após a introdução teórica, elaborou um modelo tridimensional e não linear, em elementos finitos através do software Abaqus, versão 6.13, para realizar a análise térmica na laje. Vale ressaltar que todo o procedimento de modelagem foi descrito na obra. A seguir é apresentado o modelo analisado.

A carga térmica foi inserida apenas na face inferior da laje e obedeceu a curva padronizada internacionalmente pela (ISO-834, 1999). Após sua aplicação, o campo de temperaturas obtido foi o apresentado pela seguinte Figura 3.19, ao final de uma simulação de 120min:

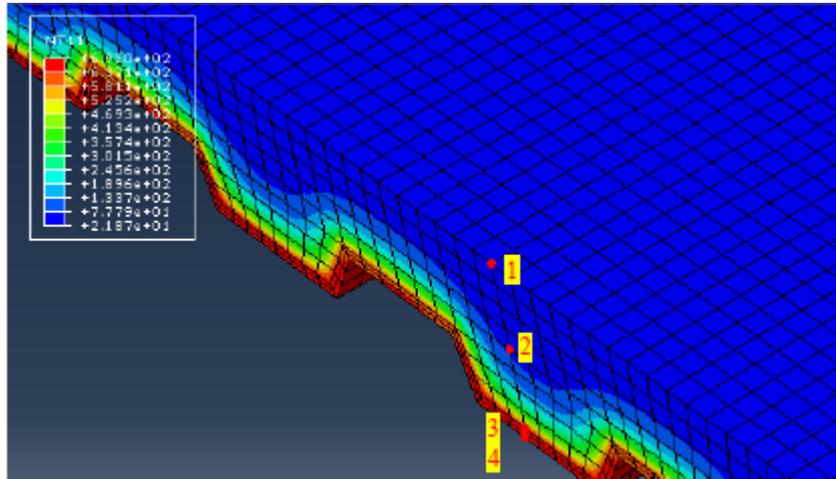


Figura 3.19 - Campo de temperaturas na laje "steel deck"

Fonte: (SANTOS, 2015)

Os pontos destacados na seção laje foram escolhidos estrategicamente para elaborar uma tabela com dados de tempo e temperatura, a fim de que se possa observar como a temperatura variou ao longo do tempo, na Figura 3.20

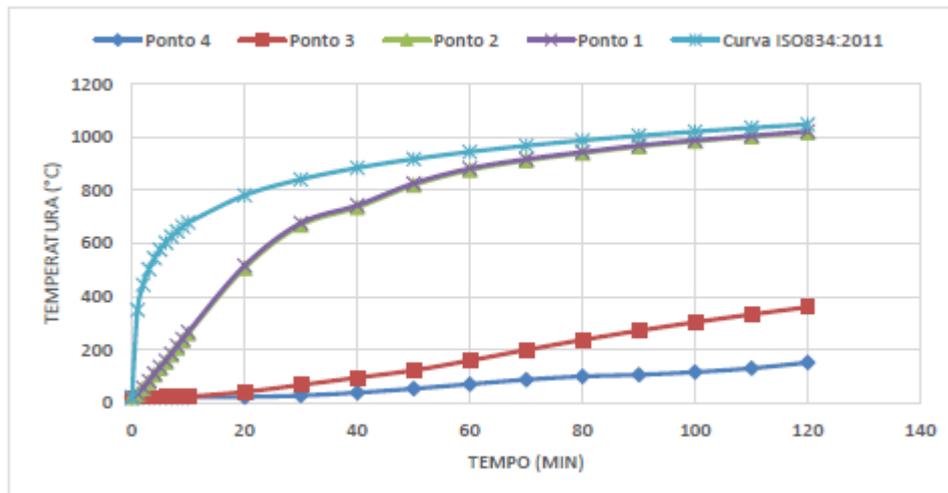


Figura 3.20 – Evolução das temperaturas dos pontos e curva de incêndio padrão

Fonte: (SANTOS, 2015)

Por fim, foram propostas as seguintes conclusões, consideradas não definitivas:

- a) A laje atende aos critérios de isolamentos prescrito pela (ABNT NBR 14432, 2001);

- b)** A temperatura crítica que corresponde àquela na qual a chapa de aço atingir a temperatura de 500°C. À essa temperatura a chapa de aço da peça já teria perdido sensivelmente a sua resistência e provavelmente a estrutura viria a colapso. O tempo obtido na simulação numérica para que se atingisse essa situação foi igual a 20min, sendo denominado de tempo crítico;
- c)** Esse tempo crítico foi inferior ao recomendado pelo fabricante da chapa de aço, que considerou que a mesma resistiria a 30min. Este tempo também foi inferior ao que estabelece o método tabular, sugerindo que tanto o fabricante quando o método esteja contra a segurança;

4 MODELO COMPUTACIONAL

Este capítulo é dedicado a apresentação do modelo computacional desenvolvido para realizar uma análise térmica de um painel de laje alveolar. Aqui serão expostas as características do programa utilizado, bem como as etapas a serem seguidas para que se possa obter os resultados desejados.

4.1 CARACTERÍSTICAS DO PROGRAMA

Atualmente, com o advento do desenvolvimento tecnológico e computacional, vários *softwares* voltados para as mais diversas áreas da engenharia, em especial, da engenharia civil, foram elaborados e cada vez ganham mais espaço no mercado. Para fazer um estudo térmico em lajes alveolares, por exemplo, programas consagrados, como o Ansys, Diana e Abaqus podem ser utilizados, sendo estes últimos programas considerados mais “gerais”. Uma outra alternativa, voltada apenas para a análise térmica, é o SuperTempCalc. No presente trabalho, o programa escolhido foi o Abaqus, na sua versão 6.13.

Todos os programas supracitados, fazem análises pelo Método dos Elementos Finitos (MEF). Basicamente, o método consiste na resolução numérica de um sistema de equações diferenciais parciais, tendo aplicabilidade em vários campos. Para possibilitar a análise numérica no programa, é necessário que o objeto em estudo (neste trabalho, uma laje alveolar), seja ele qual for, seja dividido num número finito de elementos através de pontos discretos, também chamados de nós. Chama-se por sua vez de malha nodal a estrutura dividida em pequenos elementos. Vale salientar, que quanto menor for o tamanho dos elementos da malha, mais preciso e mais próximo da realidade serão os resultados obtidos, sendo essencial, portanto, que se busque a malha ideal para cada tipo de problema, de modo que se obtenha resultados significativos. Um ponto negativo do refinamento da malha nodal é o aumento do tempo computacional, sendo importante que se chegue a um meio termo entre os resultados obtidos com determinada malha e o tempo necessário para o processamento da mesma pelo *software*.

4.2 MODELO TÉRMICO

Para utilização do programa computacional, deve-se, de antemão, definir o que se pretende, de fato, estudar. O Abaqus é um programa organizado em módulos, então, após a definição do modelo, deve-se suceder a definição desses módulos, de acordo com o que se quer analisar. As etapas a serem seguidas, que serão explicadas ainda neste capítulo, estão listadas a seguir:

- a) Part
- b) Property
- c) Assembly
- d) Step
- e) Interaction
- f) Load
- g) Mesh
- h) Job

4.2.1 Definição do Modelo

A Figura 4.1 apresenta a seção transversal de um painel de laje alveolar protendido de 10 metros de vão a ser analisado termicamente pelo Abaqus e que foi utilizado para compor o piso de uma loja de um *shopping center*. Cada um dos painéis que compõem a laje, padrão T&A, tem altura de 26cm e uma largura de 119cm, com cordoalhas (armaduras ativas) de $\phi 12,7$ mm de diâmetro centradas a 3cm e a 5cm da face inferior. Para realização da análise, foi considerado que o painel se encontra, inicialmente, à temperatura de 20°C.

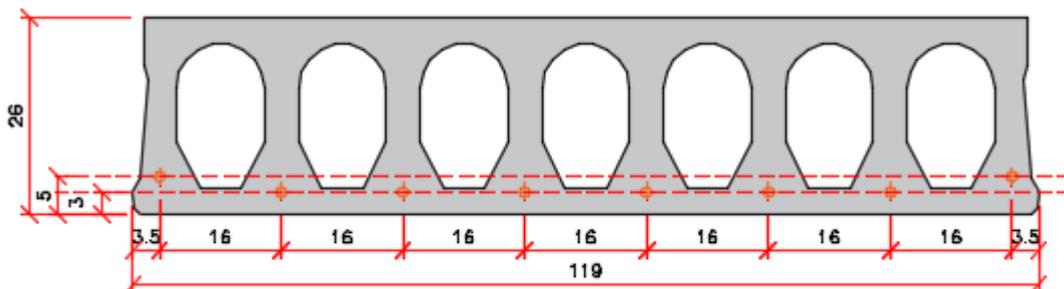


Figura 4.1 - Seção da laje alveolar

4.2.2 Definição dos Módulos

a) **PART:** Este módulo permite ao usuário criar a geometria requerida pelo problema. Para a criação de um modelo 3D, é necessário, inicialmente, a elaboração de um perfil 2D. A concepção da seção transversal pode ser desenhada no próprio programa ou pode ser importada de um outro programa. Por questão de facilidade, a geometria da laje alveolar foi desenhada no programa AutoCad e importada para o Abaqus. Para tanto é necessário que o trabalho do CAD seja salvo com a extensão *.dxf*.

Para proceder com a importação deve-se ir no menu file, na parte superior do programa e selecionar a opção *import* e em seguida a opção *sketch*. Após isso, uma janela abrirá automaticamente, sendo possível selecionar o arquivo de CAD, o qual deseja-se importar para o programa. Pode-se visualizar o este procedimento através das Figuras 4.2 e 4.3:

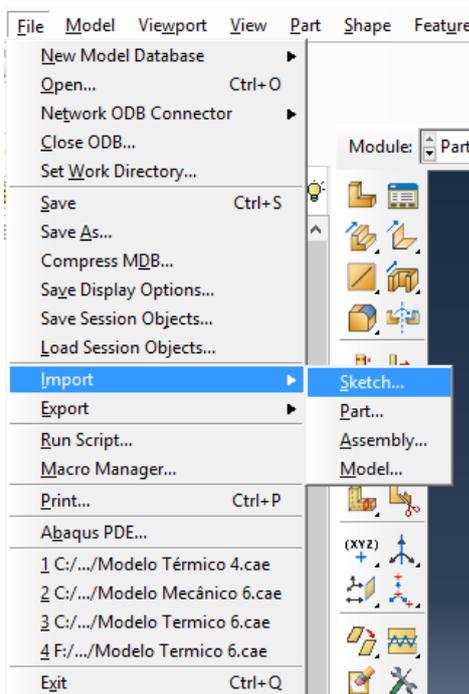


Figura 4.2 - Importação de arquivo

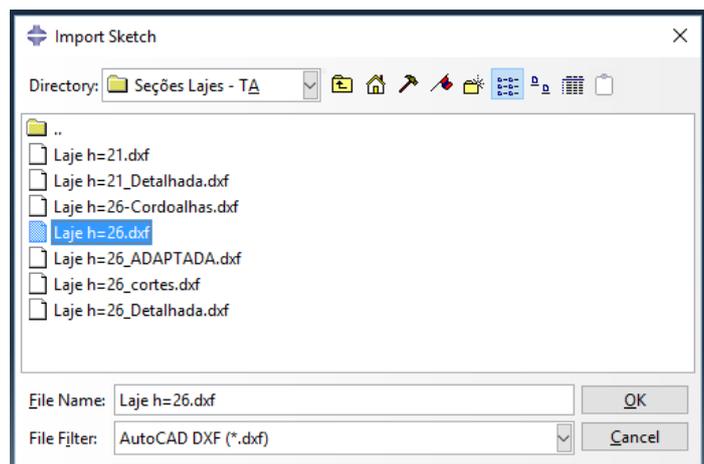


Figura 4.3 - Seleção do arquivo desejado

Importado o arquivo, que para os fins deste trabalho foi o “Laje h=26.dxf”, correspondente a um painel padrão da T&A de 26cm de altura, pode-se, portanto, continuar com a elaboração do modelo 3D. Realizado esse procedimento o arquivo estará salvo na base de dados do modelo.

Finalmente, para criação da laje, no módulo *part*, deve-se selecionar a opção *create part* e fornecer ao software os dados solicitados. Para o caso presente, foi elaborado um sólido por extrusão, 3D e deformável. Ao prosseguir, pode-se realizar o desenho da seção no programa ou utilizar o desenho de CAD importado como *sketch*. Para inserir a geometria, importada, basta selecionar *add sketch* no toolbox lateral. Ao final do procedimento, basta inserir o vão desejado para a laje, que foi de 10 m.

Como será demonstrado futuramente neste trabalho, o vão adotado poderia ser menor, para realizar uma análise térmica. Isso se deve ao fato de que o aquecimento foi aplicado uniformemente em toda a face inferior.

Na Figura 4.4 são inseridos os dados para a criação do painel alveolar por extrusão no Abaqus. Já na Figura 4.5 é possível visualizar o mesmo já desenhado no programa.

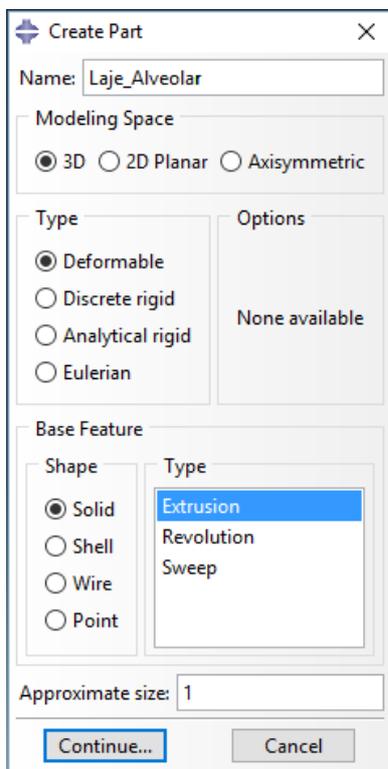


Figura 4.4 - Dados para criação da laje

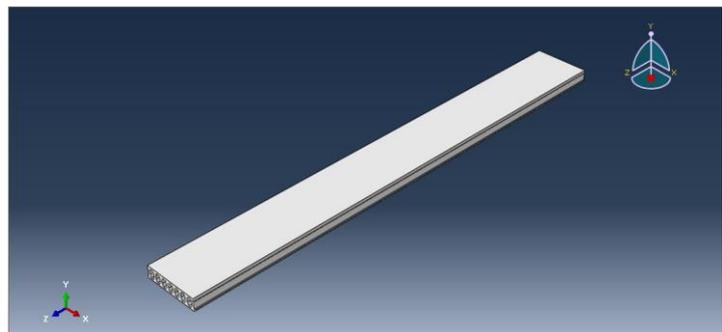


Figura 4.5 - Part Laje_Alveolar

b) PROPERTY: Neste módulo é possível definir as características dos materiais utilizados na análise e associá-los com cada *part* criada no módulo anterior. Para a análise em questão foi preciso definir apenas as características de um material, o concreto. Como definido no Capítulo 2, na parte em que trata do efeito do fogo nos materiais, este material tem suas propriedades mecânicas (resistência à compressão e módulo de elasticidade) degeneradas devido ao aumento da temperatura. De forma análoga, outras propriedades também variam quais sejam: calor específico, densidade e condutividade térmica. Desta forma as mesmas são inseridas, como dados de entrada, dependentes da temperatura. Vale ressaltar que foram seguidas as recomendações do (EUROCODE 2 PART 1-2, 2004) e da (ABNT NBR 15200, 2012), conforme também explicitado no mesmo capítulo. Outra informação importante é que as unidades estão de acordo com o sistema internacional de unidade (SI).

Em *create part* pode-se inserir as características do material desejado, conforme apresentado na Figura 4.6:

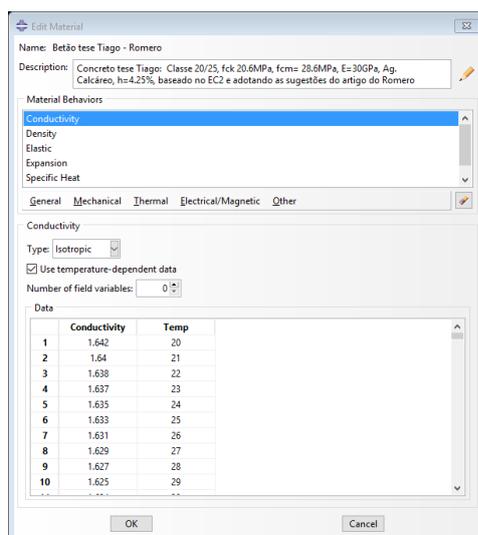


Figura 4.6 - Propriedades do concreto

Inserido os dados dos materiais, nesse caso, do concreto, deve-se criar uma seção para atribuir-lhe o material. Esse procedimento é feito no *toolbox* lateral no ícone *create section*. Posteriormente a isso é preciso associar a seção à “*part*”, acessando o ícone *assign section*.

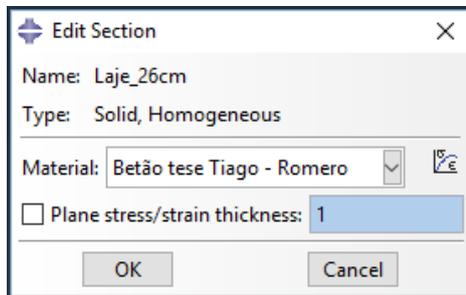


Figura 4.7 - Atribuição do material a seção

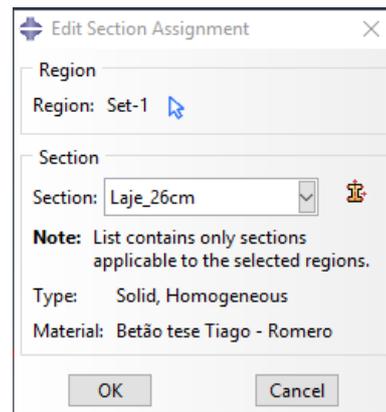


Figura 4.8 - Atribuição da seção a "part"

c) **ASSEMBLY:** este módulo permite ao usuário associar ou montar diferentes “parts” que eventualmente tenham sido criadas no modelo. Neste caso, apenas a laje alveolar foi criada. Nesta etapa é importante que no campo “*instance type*” assinale-se “*dependent*” para gerar a malha na “*part*”.

d) **STEP:** Este módulo permite selecionar o tipo de análise desejada para o modelo e definir quais os parâmetros associados. Aqui também é possível escolher as variáveis de saída do programa. Este módulo é muito importante pois os carregamentos que serão aplicados ao modelo estarão associados a cada *step*.

Assim, para realizar a análise térmica, além do *step inicial*, já pertencente às configurações padrão do sistema, foi criado um outro adicional: o aquecimento. Nele são definidos que esta análise ocorre após o *step inicial* e o tipo da análise, que para este caso foi escolhida a *heat transfer* (transferência de calor). Em seguida, informa-se ao programa o tempo de duração da análise: 10800s, que corresponde a um incêndio de 3h. Além disso, também são informados os incrementos: inicial, máximo e mínimo. Ressalta-se que as unidades estão de acordo com o **SI**. As variáveis de saída da análise foram escolhidas na opção *field output*, emitindo resultados a cada 30s.

Nas Figuras 4.9 e 4.10 estão ilustrados os procedimentos iniciais para criar o *step* e definir as variáveis de saída, respectivamente:

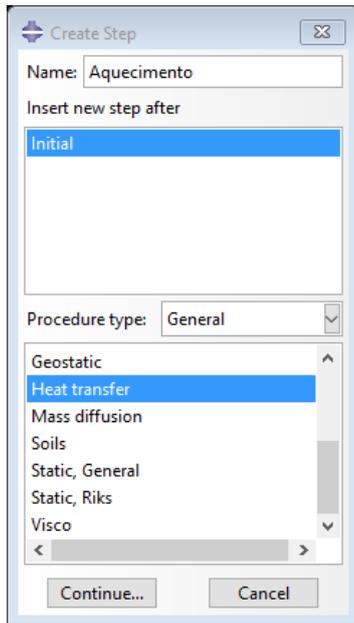


Figura 4.9 - Step Aquecimento

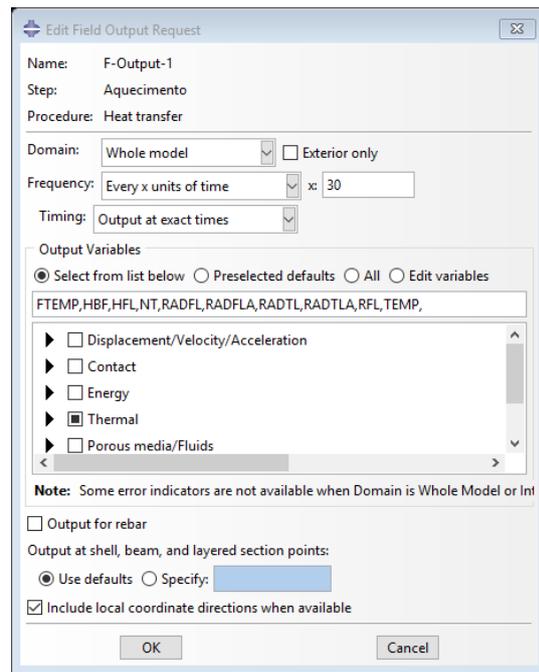


Figura 4.10 - Escolha das variáveis de saída

e) **INTERACTION:** este módulo permite que sejam configuradas, entre outras coisas, interações e restrições entre as “*parts*” criadas no modelo. Como se trata de uma simulação de incêndio, neste módulo são definidos dois mecanismos de transferência de calor: a radiação e a convecção. A outra forma de transferência de calor, a condução é dependente das características no material utilizado na análise, que no caso em estudo é o concreto.

Selecionando *create interaction*, o Abaqus oferece vários tipos de interações para *step* Aquecimento, que trata da transferência de calor. Para simular o mecanismo da radiação, deve-se escolher a opção *surface radiation*, selecionando, como área de atuação, apenas a face inferior da laje, como estabelece a (ABNT NBR 15200, 2012). Ainda de acordo com a mesma norma e como explicitado também no Capítulo 2, o valor da emissividade adotado foi 0,7 (concreto). No que tange à constante de Stefan-Boltzmann, cujo valor também já foi definido anteriormente, a mesma deve ser definida acessando-se, na barra superior, a aba “*model*” e em seguida *Edit Attributes*. Ainda nesta opção deve-se informar ao programa o valor do zero absoluto, admitido igual a -273°C .

Ao definir a radiação é preciso informar os dados relativos à curva de incêndio padrão da (ABNT NBR 14432, 2001), que se baseia na (ISO-834, 1999), conforme explicitado

anteriormente. Os valores de tempo e temperatura devem ser incluídos em *Ambient temperature amplitude*.

Na Figura 4.11 são apresentados os dados inseridos para configurar o mecanismo de radiação, enquanto que na Figura 4.12 é definida a constante de Stefan-Boltzmann bem como o valor do zero absoluto:

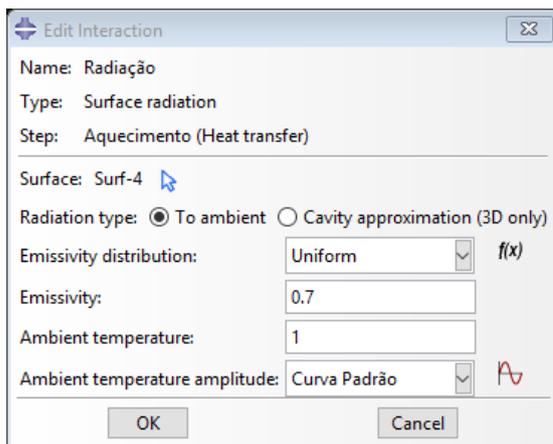


Figura 4.11 - Dados do mecanismo de radiação

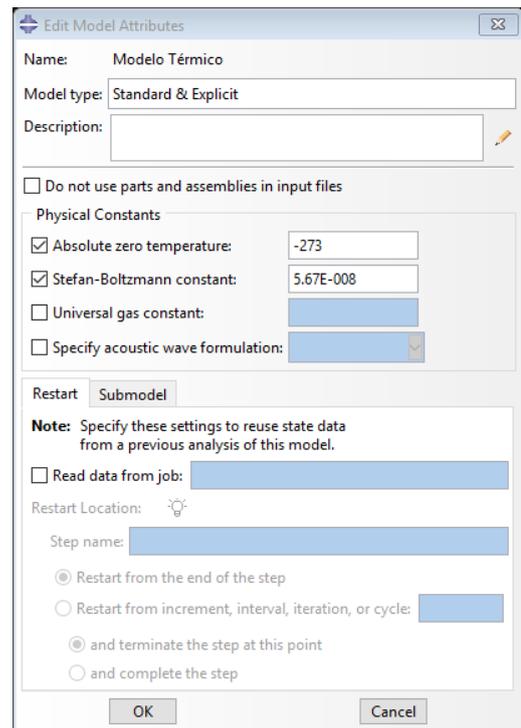


Figura 4.12 - Stefan-Boltzmann e o zero absoluto

Para aplicar o mecanismo de convecção, deve-se proceder de maneira análoga ao descrito no parágrafo anterior. Após criar a nova interação, deve-se selecionar a opção *surface film condition* e aplicar a convecção na parte inferior da laje. Na Figura 4.13 são apresentados os dados inseridos para configurar o mecanismo de convecção:

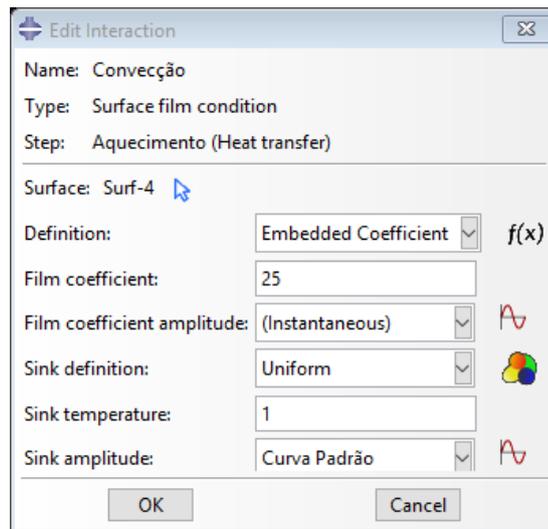


Figura 4.13 - Dados do mecanismo de convecção

f) **LOAD:** Neste módulo é possível definir carregamentos e condições de contorno para o modelo. Como dito anteriormente, cada carregamento ou condição de contorno deve estar associados a um determinado *step*. Por se tratar de um modelo térmico, foi preciso apenas definir as condições iniciais do problema, ou seja, a temperatura ambiente. Para realizar esse procedimento deve-se acessar *predefined fields* e aplicar a temperatura do ambiente, considerada igual a 20°C em toda a laje, conforme mostrado na Figura 4.14:

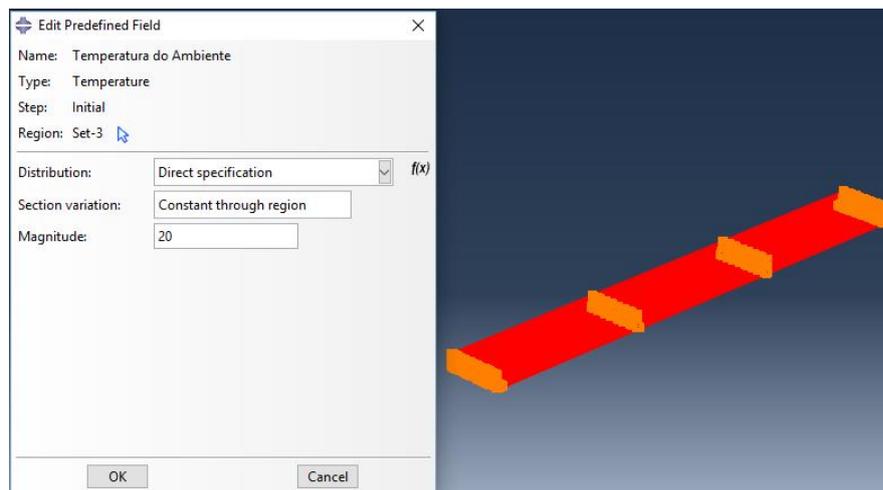


Figura 4.14 - Aplicação da temperatura ambiente

g) **MESH:** Neste módulo é possível controlar como gerar a malha do modelo, podendo-se definir o tipo e o tamanho dos elementos que compõem a mesma. Para este trabalho foi definida

uma malha discretizada por elementos do tipo DC3D20, que são elementos 3D formados, cada um deles, por 20 nós, conforme ilustrado na Figura 4.15:

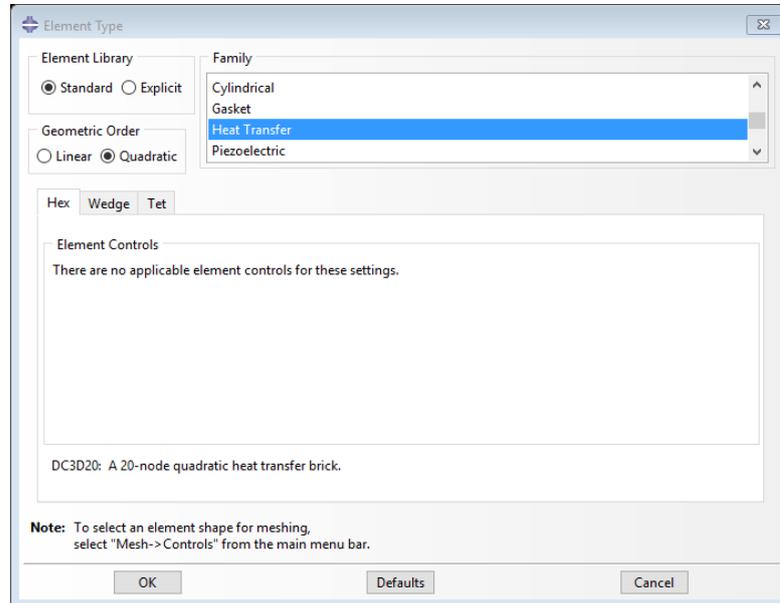


Figura 4.15 - Tipo de elemento da malha

A sigla que dá nome ao tipo de elemento da malha pode ser entendida da seguinte forma:

- **DC**: Contínuo para esforços, deslocamentos e transferência de calor ou difusão de massa;
- **3D**: Elemento tridimensional;
- **20**: Número de nós que compõem cada elemento:

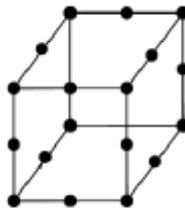


Figura 4.16 - Elemento DC3D20

Antes de gerar a malha recomenda-se, quando necessário, realizar partições na laje, de modo a obter sólidos regulares. Esse procedimento melhora a qualidade dos elementos da laje, pois os mesmos ficam menos distorcidos. Em alguns casos essa partição se torna necessária, pois caso

não realizada, o programa não consegue gerar os elementos. O Abaqus fornece uma escala de cores para indicar a necessidade ou não das partições, sendo o verde a cor ideal. Para o caso em questão as partições foram realizadas afim de melhorar os resultados da análise.

Na Figura 4.17 apresentada de elementos finitos distribuída ao longo do painel alveolar:

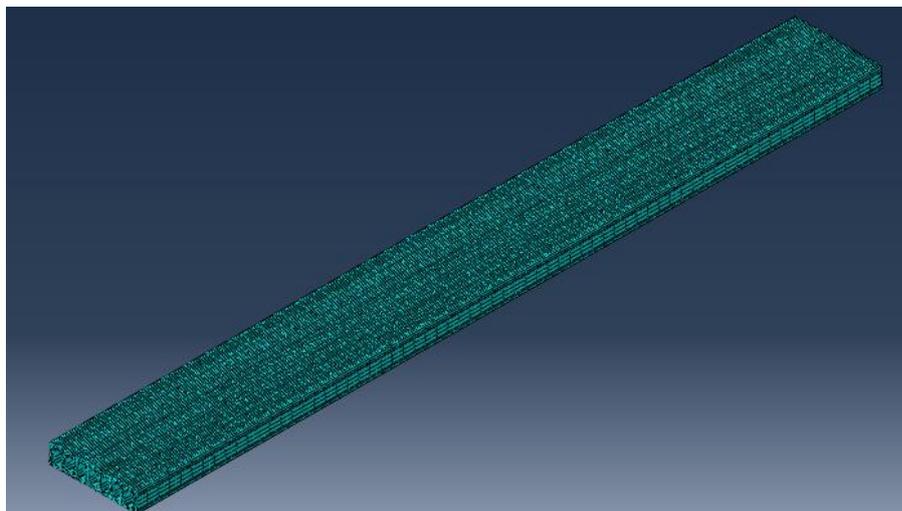


Figura 4.17 - Malha de elementos finitos em toda a laje

h) JOB: Este modulo permite ao usuário submeter o trabalho para análise.

4.2.3 Aplicação do Recurso da Simetria

Com o intuito de diminuir o tempo de processamento e o número de nós do modelo computacional, pode-se lançar mão do recurso da simetria. Em análises mais sofisticadas esse recurso pode ser fundamental. Assim, foi elaborado um segundo modelo computacional, no qual foi aplicado este recurso, para que se possa comparar seus resultados com o resultado do modelo original e o que se teve de ganho computacional. Foi considerada uma laje com metade do vão do modelo anterior, ou seja, com 5m de comprimento. Os passos para a elaboração desse modelo são os mesmos detalhados no tópico anterior, devendo-se aplicar a condição de contorno que se refere a simetria, conforme ilustrado na Figura 4.18:

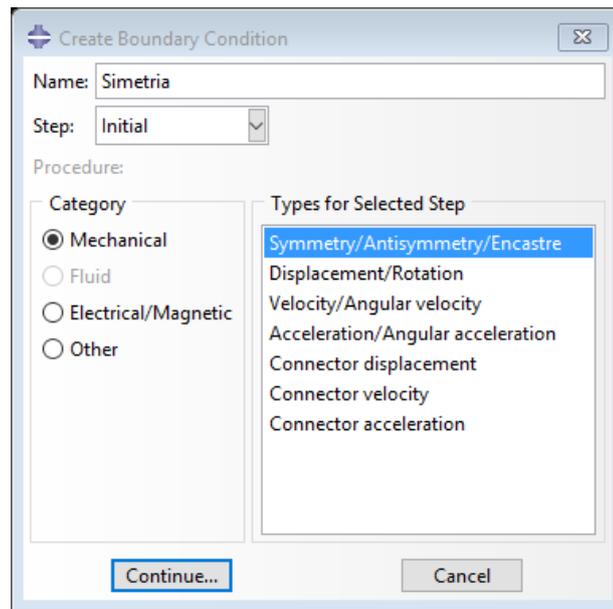


Figura 4.18 - Aplicação da simetria

A seguir, na Tabela 4.1, são resumidos os dados de processamento dos dois modelos desenvolvidos de modo que se possa verificar o ganho em termos de tempo computacional que a aplicação da simetria confere ao problema:

Tabela 4.1 - Resumo dos dados de processamento

| Tipo do Elemento | DC3D20 |
|--|--|
| Número de elementos (modelo sem simetria) | 38994 |
| Número de nós (modelo sem simetria) | 184926 |
| Número de elementos (modelo com simetria) | 19206 |
| Número de nós (modelo com simetria) | 92106 |
| Características da CPU | Windows 10; 1TB de HD; Memória RAM de 8GB; Processador i5-3230M 2.60GHz; 2 núcleos |
| Tempo de processamento (modelo sem simetria) | 12h |
| Tempo de processamento (modelo com simetria) | 5h |

5 RESULTADOS E VERIFICAÇÃO EM SITUAÇÃO DE INCÊNDIO

Este capítulo será dedicado, inicialmente, a apresentação dos resultados obtidos através do modelo avançado de cálculo, desenvolvido no Abaqus. Também serão comparados os resultados com e sem a utilização do recurso da simetria, já descritos no Capítulo 4. Após isso, será realizada a verificação da laje alveolar protendida quanto a sua resistência em situação de incêndio através do método tabular (ABNT NBR 15200, 2012) e do método das isothermas dos 500°C (método simplificado proposto pelo (EUROCODE 2 PART 1-2, 2004), no anexo B), buscando-se comparar os resultados obtidos por cada um deles. É importante frisar que os métodos escolhidos para verificar o painel alveolar, quanto sua resistência ao fogo, já foram descritos no Capítulo 3 desta obra.

5.1 ANÁLISE ATRAVÉS DO MODELO AVANÇADO - ABAQUS

A seguir, na Figura 5.1, será apresentado o campo de temperaturas na seção transversal da laje alveolar gerado através do primeiro modelo computacional descrito no Capítulo 4, ao final de 30, 60, 90 e 180 minutos. Neste último, foram destacados cinco pontos da malha de elementos finitos a fim de que se possa analisar a evolução da temperatura em função do tempo dos mesmos, sendo estes: um ponto na face inferior da laje, um no eixo das cordoalhas localizadas a 3cm da face inferior da laje, outro na região das cordoalhas localizadas a 5cm da face inferior, um quarto ponto localizado mais ou menos na metade da altura da laje e por fim o quinto e último ponto na face superior da laje, onde:

Ponto 1 = Temperatura na face inferior [°C];

Ponto 2 = Temperatura no eixo das cordoalhas localizadas a 3cm da face inferior [°C];

Ponto 3 = Temperatura na região das cordoalhas localizadas a 5cm da face inferior [°C];

Ponto 4 = Temperatura na metade da seção transversal [°C];

Ponto 5 = Temperatura na face superior [°C];

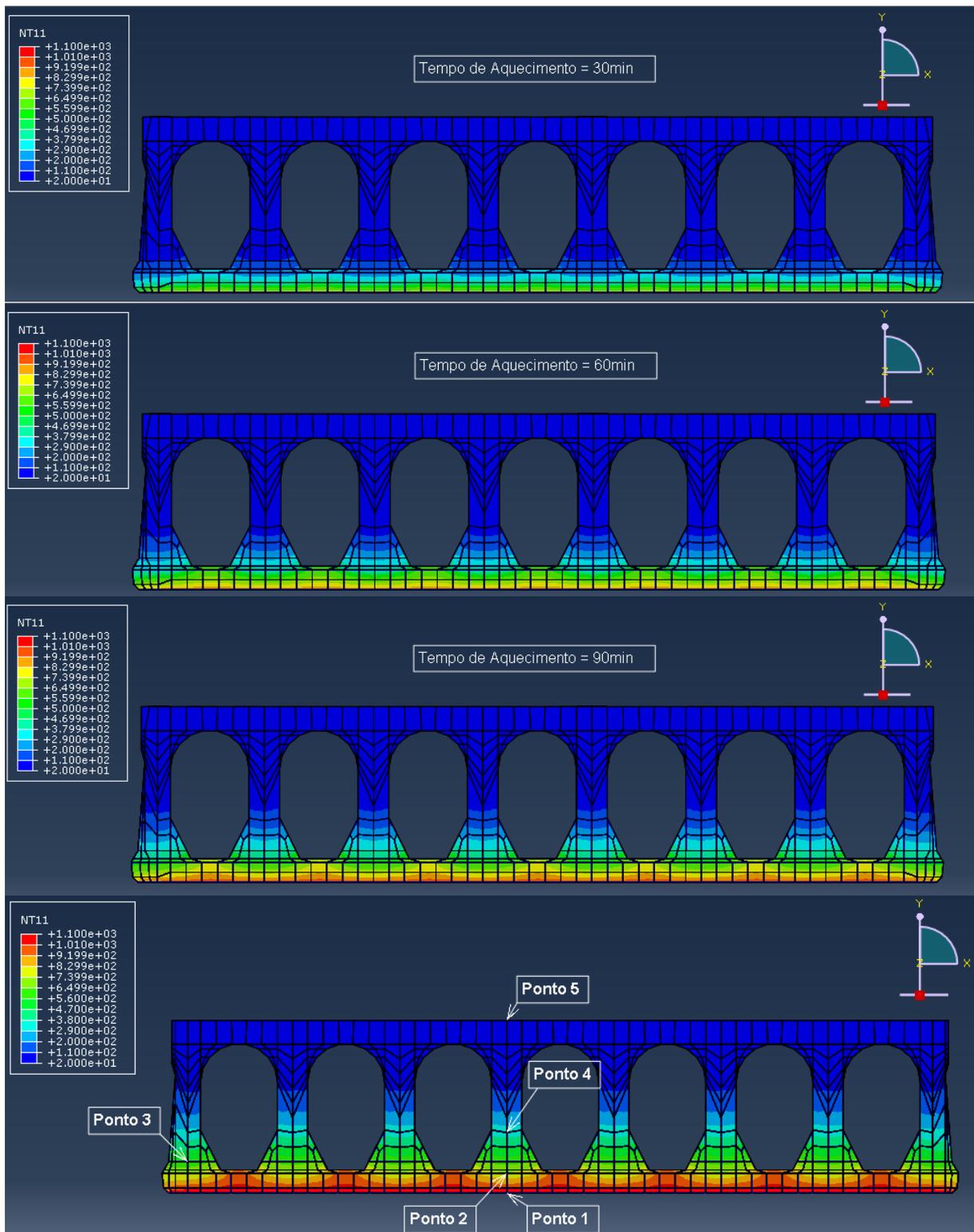


Figura 5.1 - Campo de temperaturas na seção aos 180min

Determinados os pontos na seção transversal pôde-se elaborar a Tabela 5.1, que apresenta dados de temperaturas, em °C, e de tempo, em minutos. Também está inserido na mesma os valores de temperatura da curva do incêndio-padrão, para fins comparativos. É importante lembrar que no instante inicial, ou seja, quando $t=0$ min, a laje está à temperatura considerada ambiente, o que significa que $T=20^{\circ}\text{C}$.

Tabela 5.1 - Valores de temperatura (°C) e tempo (min) do modelo sem simetria

| Tempo (min) | Temperatura (°C) | | | | | |
|-------------|------------------|----------------------------|-----------------------------|---------------------------|---------------|------------------------|
| | Face Superior | Metade da Seção Trnsversal | Região das Cordoalhas (5cm) | Eixo das Cordoalhas (3cm) | Face Inferior | Curva Incendio- Padrão |
| 0 | 20 | 20 | 20 | 20 | 20 | 20 |
| 1 | 20 | 20 | 20 | 20 | 67 | 349 |
| 2 | 20 | 20 | 20 | 21 | 113 | 445 |
| 3 | 20 | 20 | 20 | 23 | 148 | 502 |
| 4 | 20 | 20 | 21 | 27 | 183 | 544 |
| 5 | 20 | 20 | 22 | 33 | 223 | 576 |
| 6 | 20 | 20 | 23 | 39 | 263 | 603 |
| 7 | 20 | 20 | 25 | 45 | 301 | 626 |
| 8 | 20 | 20 | 28 | 51 | 337 | 645 |
| 9 | 20 | 20 | 30 | 58 | 373 | 663 |
| 10 | 20 | 20 | 33 | 64 | 408 | 678 |
| 20 | 20 | 26 | 71 | 135 | 629 | 781 |
| 30 | 20 | 39 | 108 | 219 | 738 | 842 |
| 40 | 20 | 56 | 152 | 290 | 806 | 885 |
| 50 | 20 | 72 | 205 | 351 | 855 | 918 |
| 60 | 20 | 88 | 252 | 404 | 892 | 945 |
| 65 | 20 | 97 | 284 | 428 | 908 | 957 |
| 70 | 20 | 105 | 306 | 450 | 923 | 968 |
| 75 | 21 | 114 | 326 | 472 | 936 | 979 |
| 80 | 21 | 125 | 346 | 492 | 949 | 988 |
| 85 | 21 | 136 | 365 | 511 | 960 | 997 |
| 90 | 21 | 148 | 366 | 529 | 971 | 1006 |
| 120 | 25 | 224 | 454 | 622 | 1023 | 1049 |
| 180 | 36 | 337 | 585 | 754 | 1092 | 1110 |

Para um melhor entendimento dos resultados, os dados foram plotados no Gráfico 5.1, para analisar os comportamentos das curvas temperatura (°C) x tempo (min) relativas a cada um dos

pontos destacados nos modelos. No mesmo gráfico também se traçou, de forma comparativa, a curva do incêndio-padrão.

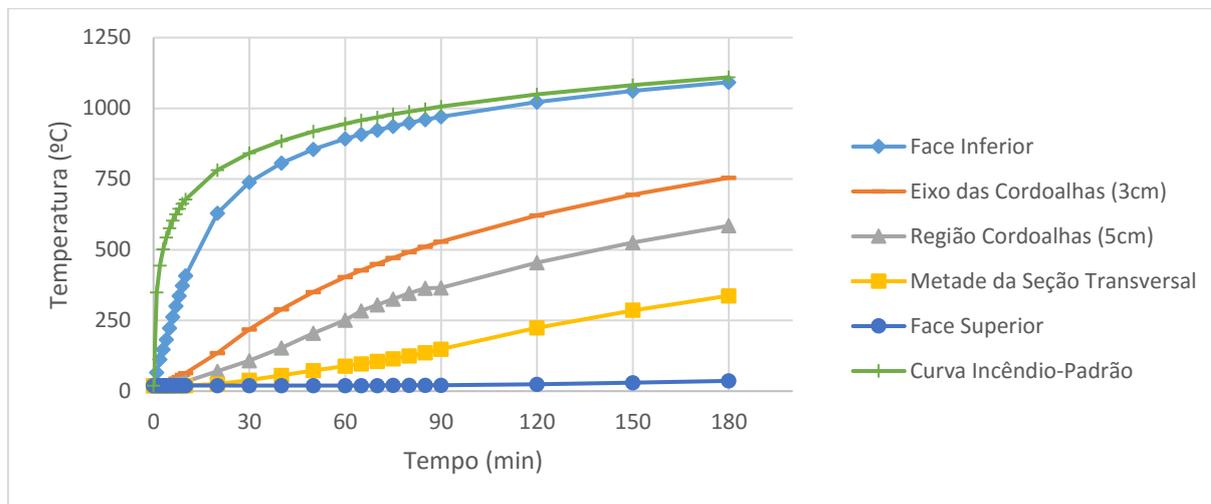


Gráfico 5.1 - Variação da temperatura nos cinco pontos selecionados

Para um tempo de aquecimento de 30min (TRRF mínimo exigido pela ABNT NBR 14432 (2001), para o caso estudado) os pontos 2, 3, 4 e 5 não apresentaram temperaturas muito elevadas atingindo o valor máximo de 219°C, como pode ser observado na Tabela 5.1. Para esta temperatura a redução nas propriedades mecânicas é muito pequena, por exemplo: os fatores de redução para resistência à compressão do concreto serão da ordem de 0,95 e do módulo de elasticidade é da ordem de 0,90 (para agregados silicosos). Já para fios e cordoalhas os fatores de redução são da ordem de 0,87 e 0,95, respectivamente. Diante disso, é de se esperar que a laje atenda a resistência ao fogo de 30min, devidos a todos os fatores de segurança considerados no projeto estrutural.

Já para um aquecimento de 60min na região das cordoalhas à 3cm da face inferior (ponto 2) a temperatura já supera os 400°C, como pode ser visualizado na Tabela 5.1. Esse valor é muito próximo do obtido por (PIERIN e SILVA, 2009) que fez uma análise semelhante, descrita no final do capítulo 3 deste trabalho, e obteve um valor de 415°C, o que demonstra uma coerência em relação aos dados apresentados.

Para os 400°C o fator de redução da resistência ao escoamento do aço para fios e cordoalhas é 0,46. Essa redução já é significativa e, provavelmente, a laje alveolar não atenderia a resistência ao fogo de 60min.

Agravando esse cenário, ressalta-se que o modelo não considera problemas comuns a lajes de concreto em situação de incêndio como: fissuras, rachaduras e o efeito do *spalling*. Nessa situação mais realística, as temperaturas desenvolvidas na seção transversal provavelmente seriam maiores, ratificando que a laje pode não atingir a resistência ao fogo para um tempo de 60min.

Já com tempos iguais ou superiores a 90min as temperaturas observadas nas cordoalhas ultrapassam os 500°C. Pela mesma razão já exposta acima a laje provavelmente não atingiria resistência ao fogo de 90min ou superior.

Uma solução recomendada para melhorar o desempenho em situação de incêndio deste tipo de elemento seria a aplicação de elementos de proteção passiva. O aumento do cobrimento de concreto, jateamento de argamassa de proteção ao fogo ou, até mesmo, a utilização de painéis de matérias isolantes, podendo ser constituídos de gesso ou vermiculita, são exemplos de soluções para o aumento do desempenho.

A resistência ao fogo deste tipo de elemento (laje alveolar) deve ser determinada, corretamente, conforme os critérios de falha apresentados na (ISO-834, 1999). Esses critérios para elementos sob flexão são:

- Deflexão máxima, que é dada, em milímetros (mm), por:

$$D = \frac{L^2}{400d} \quad (33)$$

- Taxa de deflexão máxima, que é dada, em milímetros por minuto (mm/min), por:

$$\frac{dD}{dt} = \frac{L^2}{9000d} \quad (34)$$

Onde:

L = Vão livre [mm];

t = Tempo [min];

d = Distância da fibra mais extrema da zona de compressão até a fibra mais extrema da zona de tração [mm];

Contudo, não foi possível determinar a resistência ao fogo da laje alveolar estudada segundo esses critérios pois o modelo mecânico ainda se encontra em desenvolvimento e pode ser

sugerido como um tema para trabalhos futuros. De qualquer forma a análise térmica de temperatura já sugere a classificação deste tipo de elemento estrutural como R30 ou no máximo R60.

Outro critério relevante para análise do desempenho deste tipo de elemento em situação de incêndio é a capacidade de isolar termicamente o ambiente. Observa-se que mesmo ao final dos 180min, de acordo com a Tabela 5.1, a face superior (Ponto 5) está em uma temperatura de 36°C, variando assim, somente 16°C. Essa pequena variabilidade térmica na face superior demonstra que a mesma é um bom isolante térmico, caso continue íntegra, como já era de se esperar para uma estrutura de concreto.

De acordo com a (ABNT NBR 14432, 2001), para o critério do isolamento térmico, estabelecido no item 3.18, não é permitido incrementos de temperatura superiores a 140°C, na média dos pontos de medida, ou superiores a 180°C em qualquer ponto de medida, na face que não está exposta ao incêndio. Segundo esse critério a laje em estudo apresentaria isolamento térmico superior a 180min.

Ratifica-se que o modelo desenvolvido não simula fissuras, rachaduras e *spalling*, que provavelmente comprometerão esse desempenho. Além disso, as camadas da face inferior provavelmente apresentariam degradação mecânica devido as altas temperaturas desenvolvidas (acima de 700°C – vide Gráfico 5.1).

Apesar da laje ser considerada um bom isolante, de acordo com o modelo térmico aqui desenvolvido, não se pode dizer que a mesma garante a função corta fogo pois para garanti-la, além de isolar termicamente o ambiente, a mesma também deve ser estanque à passagem de chamas e gases através de eventuais fissuras e rachaduras que possam surgir. Para fazer tal verificação devem ser realizados ensaios experimentais de estanqueidade, que não foram desenvolvidos neste trabalho.

A seguir é apresentado o Gráfico 5.2, que representa a evolução das temperaturas ao longo do tempo em quatro pontos da laje (Ponto1, Ponto 2, Ponto 4 e Ponto 5) para o modelo já apresentado e o com recurso da simetria, com o objetivo de comparar as temperaturas de ambos os modelos. Como pode ser observado, neste gráfico, as curvas praticamente se sobrepõem em todos os casos, o que torna válido o recurso da simetria.

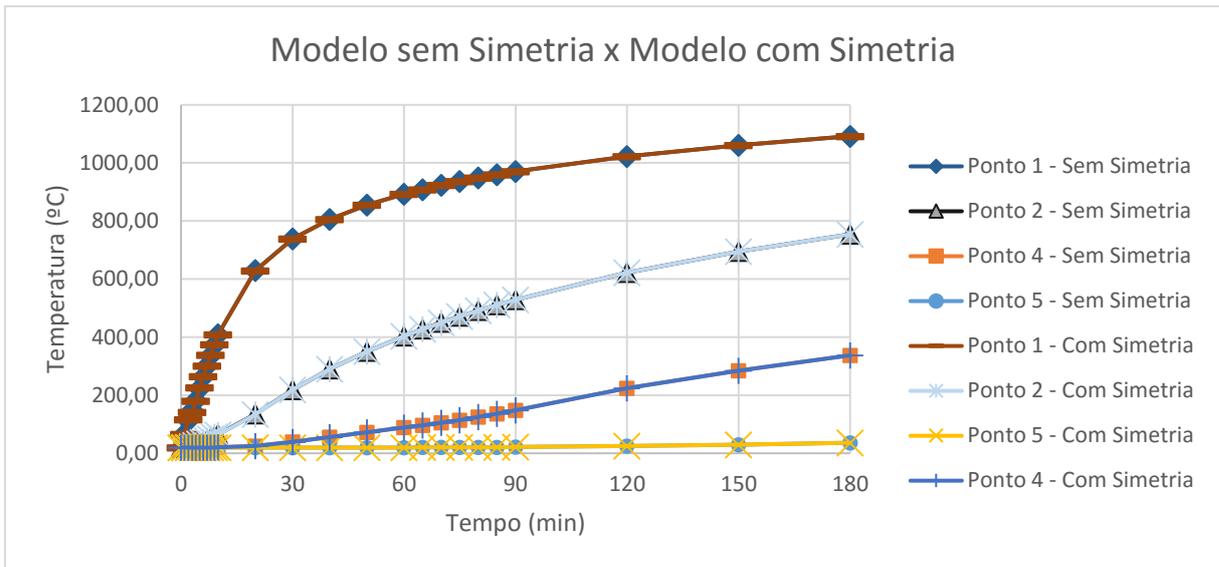


Gráfico 5.2 - Gráfico comparativo das temperaturas dos modelos com e sem simetria

5.2 VERIFICAÇÃO ATRAVÉS DO MÉTODO TABULAR (ABNT NBR 15200, 2012)

O método mais prático, simples e direto para avaliar a resistência ao fogo de um elemento estrutural quando o mesmo é submetido a uma situação de incêndio é o método tabular. Considerando a laje em estudo simplesmente apoiada e protendida pode-se estimar o tempo de resistência ao fogo baseado na Tabela 5.3 da (ABNT NBR 15200, 2012):

Tabela 5.2 - Dimensões para lajes simplesmente apoiadas

| TRRF (min) | h (cm) | c ₁ (cm) | | | |
|------------|--------|------------------------------|-----------------------------|----------------------------|-----------------|
| | | Laje Armada em Duas Direções | | Laje Armada em Uma Direção | Laje protendida |
| | | $l_y/l_x \leq 1,5$ | $1,5 \leq l_y/l_x \leq 2,0$ | | |
| 30 | 6.00 | 1.00 | 1.00 | 1.00 | 2.50 |
| 60 | 8.00 | 1.00 | 1.50 | 2.00 | 3.50 |
| 90 | 10.00 | 1.50 | 2.00 | 3.00 | 4.50 |
| 120 | 12.00 | 2.00 | 2.50 | 4.00 | 5.50 |
| 180 | 15.00 | 3.00 | 4.00 | 5.50 | 7.00 |

De acordo com a referida norma os valores de h, do método tabular, são os mínimos para garantir a função corta-fogo. No que diz respeito a função suporte, para a distribuição de armaduras proposto em 4.2.1, no Capítulo 4, a distância c₁ é igual a 3,00 cm. Assim, de acordo com o método tabular, é correto afirmar e classificar esse painel alveolar como uma R30.

5.3 VERIFICAÇÃO ATRAVÉS DO MÉTODO DAS ISOTERMAS DOS 500°C

Para a verificação da resistência ao fogo da laje alveolar através do método das isotermas dos 500°C é preciso, inicialmente, determinar o campo de temperaturas na seção transversal. Serão utilizadas as temperaturas obtidas no modelo numérico já apresentadas item 5.1 deste capítulo. A laje será verificada para os tempos de aquecimento de 30min e 60min, uma vez que a mesma não apresentou classificação de resistência ao fogo superiores a esses valores, segundo os métodos já apresentados nos itens 5.1 e 5.2 deste capítulo.

5.3.1 Tempo de Aquecimento de 30min

Na Figura 5.3 apresentam-se as isotermas na seção obtidas pelo modelo numérico:

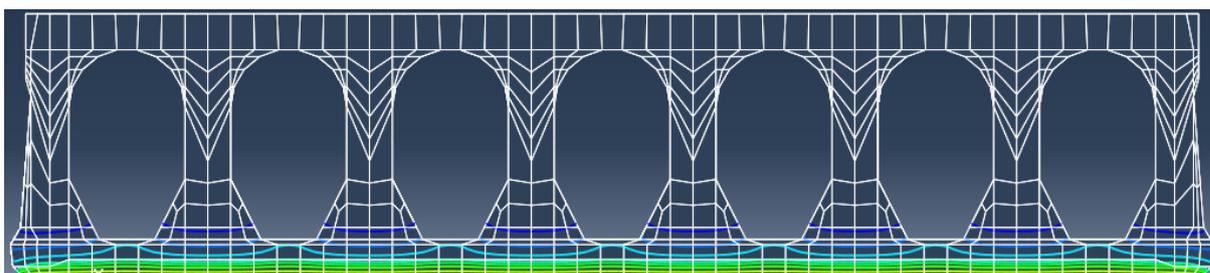


Figura 5.2 - Isotermas da laje para um tempo de 30min

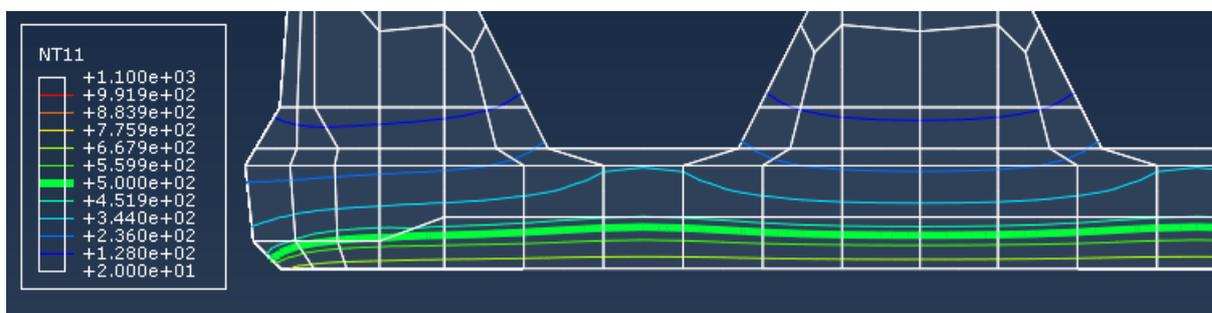


Figura 5.3 - Detalhes das isotermas na região das cordoalhas

Na Figura 5.3 é possível observar as isotermas na região das cordoalhas, estando em destaque (linha grossa) e em verde, a isoterma correspondente a 500°C. Foi estimado que a mesma passa

paralelamente a 1cm da face inferior da laje, sendo esta a faixa de concreto que deve ser desconsiderada no dimensionamento da laje em situação de incêndio para o tempo de 30 min. Ressalta-se que essa seção residual de concreto considerada é utilizada para o cálculo dos esforços resistentes da peça.

Como as temperaturas no eixo das cordoalhas já foram determinadas e apresentadas na Tabela 5.1 no início deste capítulo (219°C para as cordoalhas centradas a 3cm da face inferior e 108°C para as centradas a 5cm face inferior), pode-se então proceder com a determinação da resistência da peça. O fator redutor de resistência das armaduras, a favor da segurança, foi considerado igual a 0,87, para todas, conforme a (ABNT NBR 15200, 2012).

Os dados geométricos da seção efetiva utilizados no cálculo são: $h=25\text{cm}$, $\text{Área}=1611,30\text{cm}^2$, $Y_{cg} = 12,78\text{cm}$ e $I_x=120411,58\text{cm}^4$.

Para a análise foi considerado o seguinte carregamento:

- a) Peso Próprio (g_0) = 4,32kN/m (Deve ser calculado para a seção integral de concreto)
- b) Capeamento (g_1) = 1,25kN/m²
- c) Revestimento (g_2) = 2kN/m²
- d) Sobrecarga (q) = 4kN/m², considerada para lojas, segundo a (ABNT NBR 6120, 1980)

A laje de 10 metros de vão foi considerada simplesmente apoiada e, portanto, com esses dados de carregamento é possível determinar os momentos fletores característicos atuantes em várias seções da laje, sendo o seu valor máximo da ordem de 158,48kN.m, conforme observado na Tabela 5.3.

Vale ressaltar que em situação de incêndio, as solicitações de cálculo devem ser determinadas para uma combinação excepcional de ações no Estado Limite Último (ELU), conforme estabelecido em 3.2.5.1 (Esforços Solicitantes em Situação de Incêndio). Desta forma, a laje deve ser verificada então para um momento de cálculo de 136,44kN.m.

Finalmente após a determinação do momento fletor solicitante e com a determinação do momento fletor resistente da seção efetiva da peça é possível verificar, portanto, se a Equação (29) é satisfeita. Para tanto na

Tabela 5.4 são apresentadas as relações entre os momentos resistentes (MR) e os momentos solicitantes (Md) para algumas seções da laje e como se pode observar essa relação é sempre

maior do que 1. Logo, conclui-se que a laje resiste até com uma certa folga a um incêndio de 30min, como já esperado.

Tabela 5.3 - Momentos fletores característicos atuantes na laje alveolar

| Seção (m) | M(kN.m) | | | | |
|-----------|---------|-------|-------|-------|--------|
| | g0 | g1 | g2 | q | Mk |
| 0.15 | 3.15 | 1.09 | 1.75 | 3.50 | 9.49 |
| 0.50 | 10.13 | 3.51 | 5.62 | 11.24 | 30.51 |
| 1.58 | 28.28 | 9.81 | 15.70 | 31.40 | 85.19 |
| 2.66 | 41.41 | 14.37 | 22.99 | 45.98 | 124.75 |
| 3.73 | 49.52 | 17.18 | 27.49 | 54.98 | 149.18 |
| 4.81 | 52.61 | 18.25 | 29.21 | 58.41 | 158.48 |
| 5.89 | 50.67 | 17.58 | 28.13 | 56.27 | 152.66 |
| 6.97 | 43.72 | 15.17 | 24.27 | 48.54 | 131.70 |
| 8.04 | 31.74 | 11.01 | 17.62 | 35.25 | 95.62 |
| 9.12 | 14.74 | 5.12 | 8.19 | 16.37 | 44.42 |
| 9.50 | 7.60 | 2.64 | 4.22 | 8.44 | 22.89 |
| 9.85 | 0.43 | 0.15 | 0.24 | 0.47 | 1.28 |

Tabela 5.4 – Verificação da laje para um aquecimento de 30min

| Seção (m) | Md (kN.m) | MR(kN.m) | MR/Md |
|-----------|-----------|----------|-------|
| 0.15 | 8.17 | 40.34 | 4.94 |
| 0.50 | 26.26 | 40.34 | 1.54 |
| 1.58 | 73.34 | 129.88 | 1.77 |
| 2.66 | 107.40 | 253.54 | 2.36 |
| 3.73 | 128.43 | 253.54 | 1.97 |
| 4.81 | 136.44 | 253.54 | 1.86 |
| 5.89 | 131.42 | 253.54 | 1.93 |
| 6.97 | 113.39 | 253.54 | 2.24 |
| 8.04 | 82.32 | 253.54 | 3.08 |
| 9.12 | 38.24 | 219.10 | 5.73 |
| 9.50 | 19.70 | 129.88 | 6.59 |
| 9.85 | 1.10 | 40.34 | 36.52 |

5.3.2 Tempo de Aquecimento de 60min

Semelhante ao item anterior, nas Figuras 5.6 e 5.7 são apresentadas as isotermas na seção transversal da laje alveolar:

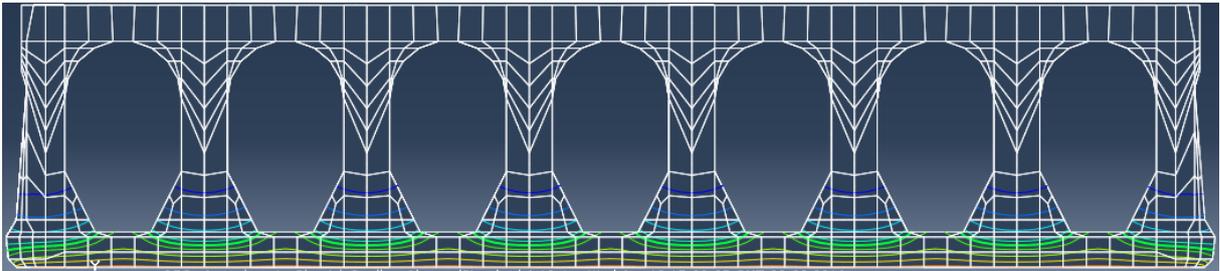


Figura 5.4 - Isotermas na laje para 60min

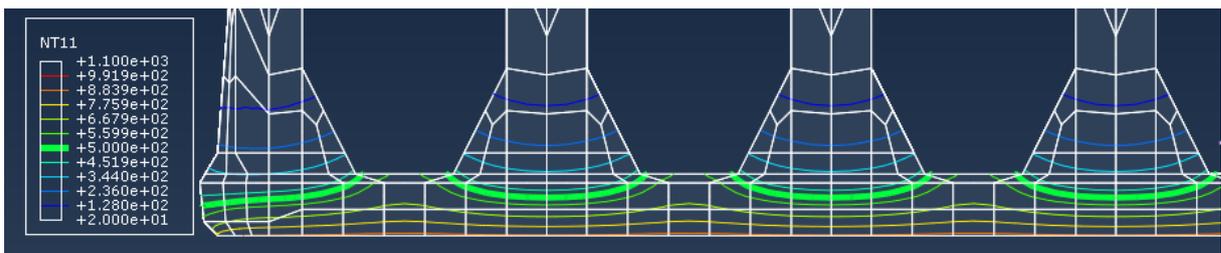


Figura 5.5 - Detalhe das isotermas na região das cordoalhas

Na Figura 5.5 pode se observar as isotermas na região das cordoalhas, destacando-se, tal qual no item anterior, a isoterma dos 500°C em linha grossa e em verde escuro. Neste caso, a região de concreto efetiva se torna muito irregular, devido a forma das isotermas. Por conveniência e de forma aproximada, porém, considerou-se a retirada de uma faixa de 2cm a partir da face inferior da laje para a determinação da seção efetiva.

Da Tabela 5.1 pode-se observar que para um tempo de 60min as temperaturas na região das cordoalhas foram: 404°C para cordoalhas localizadas a 3cm da face inferior e 252°C para cordoalhas centradas a 5cm da face inferior. Contudo, assim como no caso anterior, a favor da segurança, adotou-se o menor fator de redução de resistência das cordoalhas, que para este caso é igual a 0,45.

Os dados geométricos da seção efetiva utilizados no cálculo são: $h=24\text{cm}$, $\text{Área}=1492,62\text{cm}^2$, $Y_{cg} = 12,75\text{cm}$ e $I_x=101096,80\text{cm}^4$.

O carregamento ao qual a laje estará submetida é o mesmo já determinado para um tempo de aquecimento de 30min. Logo para verificar a distribuição de momentos fletores característicos atuantes basta visualizar novamente a Tabela 5.3.

Por fim, para verificar a resistência ao fogo da peça para o tempo de 60min, basta verificar novamente se a equação (29) é satisfeita. Na Tabela 5.5 são apresentados os valores da relação entre o momento resistente (MR) e o momento solicitante (Md), lembrando que este último foi obtido através de uma combinação excepcional de ações no ELU:

Tabela 5.5 - Verificação da laje para um tempo de aquecimento de 60 min

| Seção (m) | Md (kN.m) | MR(kN.m) | MR/Md |
|-----------|-----------|----------|-------|
| 0.15 | 8.17 | 39.66 | 4.85 |
| 0.50 | 26.26 | 39.66 | 1.51 |
| 1.58 | 73.34 | 131.26 | 1.79 |
| 2.66 | 107.40 | 141.96 | 1.32 |
| 3.74 | 128.43 | 141.96 | 1.11 |
| 4.82 | 136.44 | 141.96 | 1.04 |
| 5.89 | 131.42 | 141.96 | 1.08 |
| 6.97 | 113.39 | 141.96 | 1.25 |
| 8.05 | 82.32 | 141.96 | 1.72 |
| 9.13 | 38.24 | 141.96 | 3.71 |
| 9.50 | 19.70 | 131.26 | 6.66 |
| 9.86 | 1.10 | 39.66 | 35.91 |

Como pode ser observado na Tabela 5.8, a relação entre os momentos resistentes e solicitantes é sempre maior do que 1. Essa observação permite concluir que, pelo método das isotermas dos 500°C, a laje alveolar protendida estudada ainda resistiria a um tempo 60min em uma situação de incêndio, pois a Equação (29) é satisfeita. Contudo é importante fazer a ressalva de que na região mais solicitada essa relação (entre os momentos resistentes e solicitantes) se torna muito próxima do limite atingindo o valor de **1,04**, não sendo recomendada, portanto, sua utilização para esse tempo de exposição.

Pelo exposto, fica evidente que para tempos de aquecimento de 90min ou superiores o elemento estrutural analisado não é aprovado segundo o método das isotermas dos 500°C.

5.4 RESUMO DAS VERIFICAÇÕES

A análise do painel alveolar protendido proposto foi verificado, como disposto no presente Capítulo, por três métodos: o método avançado, desenvolvido no Abaqus, o método tabular e o método simplificado das isotermas dos 500°C. Como pode-se observar, a laje alveolar apresentou resistência ao fogo para 30min de aquecimento para todos os métodos aplicados. Contudo, para um tempo de exposição ao incêndio de 60min, o elemento estrutural apenas foi aprovado pelo método avançado e pelo método das isotermas dos 500°C. Apesar de ter sido aprovada para 60min de exposição, a classificação dessa laje para esse tempo de resistência ao fogo não é recomendada devido à proximidade do limite de falha.

Se for considerado um tempo de aquecimento de 90min nenhum dos três métodos aplicados aprovam sua utilização.

Assim, de uma maneira geral, pode-se resumir as verificações realizadas neste trabalho na Tabela 5.9, que relaciona os tempos requeridos de resistência ao fogo (TRRF) com os métodos utilizados:

Tabela 5.6 - Resumo das Verificações

| TRRF (min) | Método Avançado | Método Tabular | Método dos 500°C |
|------------|---------------------------|----------------|---------------------------|
| 30 | OK | OK | OK |
| 60 | OK, mas não recomendável. | X | OK, mas não recomendável. |
| 90 | X | X | X |

6 CONCLUSÃO E SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS

Neste trabalho foi elaborado um estudo a respeito do comportamento de lajes alveolares protendidas em situação de incêndio. Ainda que o interesse pela área tenha aumentado nos últimos anos, ainda é pouco difundido no Brasil. Somado a isso, no país o risco de incêndio tem aumentado cada vez mais assim como o uso de elementos pré-moldados na construção civil. Devido a esses fatores decidiu-se elaborar esta pesquisa.

Assim, efetuou-se, inicialmente, a análise térmica da laje simulando uma situação de incêndio por meio de um modelo computacional, tridimensional, não linear em elementos finitos, desenvolvido no programa Abaqus utilizando sua versão 6.13, com o intuito de determinar o campo de temperaturas na seção transversal. De forma alternativa, também foi desenvolvido um segundo modelo no qual se fez a aplicação do recurso da simetria para fins comparativos. É importante frisar que, ambos os modelos citados, foram submetidos a um aquecimento apenas em sua face inferior utilizando a curva padronizada temperatura x tempo, conforme estabelecido na (ABNT NBR 14432, 2001).

Após a elaboração do modelo térmico, foi possível determinar como se dá o aquecimento ao longo do tempo no interior da laje (demonstrado graficamente e por tabelas nesse trabalho) e, conseqüentemente, determinar o campo de temperaturas na sua seção transversal para os intervalos de tempo desejados, que neste caso foram 30min e 60min. Deve-se ressaltar que neste trabalho não foram considerados problemas comuns a lajes quando as mesmas são submetidas a uma situação de incêndio como: fissuras, rachaduras e o efeito do *spalling* o que provavelmente conduziria a temperaturas superiores às apresentadas neste modelo. O conhecimento das temperaturas é muito importante para que se possa determinar o quanto de perda de resistência das armaduras está associada ao aquecimento além de possibilitar o traçado das isotermas permitindo a determinação da seção efetiva ou seção reduzida de concreto a ser considerada para a verificação da estrutura através do método das isotermas dos 500°C.

A laje alveolar protendida, foi então verificada pelo método avançado desenvolvido no Abaqus, pelo método tabular, que é prescrito na (ABNT NBR 15200, 2012) e o método dos 500°C, que não é prescrito na norma brasileira sendo necessário recorrer ao (EUROCODE 2 PART 1-2, 2004) para sua correta aplicação. Apesar de não descrever este último método em seu texto, a norma brasileira permite a sua utilização.

Ao aplicar os métodos de verificação mencionados, verificou-se que a laje suportaria um tempo de exposição ao fogo de 30min para todos. Contudo, ao se considerar um tempo de aquecimento de 60min, somente através do método avançado e do método das isotermas dos 500°C, a laje alveolar protendida estudada poderia ser classificada como R60. Apesar disso, deve-se fazer a ressalva que devido à proximidade de seu limite de falha não é recomendado adotar essa classificação sem que sejam executadas medidas de proteção ao fogo. Para classificações R90 ou superiores a laje não é aprovada.

A partir do exposto neste trabalho fica como sugestão para trabalhos futuros os seguintes itens:

- a)** Realização de ensaios de resistência ao fogo nas lajes alveolares, de modo que se possa validar os resultados obtidos através do modelo em elementos finitos;
- b)** Realização de ensaios (SUVRANU) (BROWN UNIVERSITY) estanqueidade, de modo que se possa garantir a função corta fogo a esse painel alveolar já que a mesma é considerada um bom isolante térmico, de acordo com o modelo computacional apresentado neste trabalho;
- c)** Verificação de lajes alveolares protendidas em situação de incêndio para de diferentes espessuras, carregamentos e disposição das armaduras;
- d)** Necessidade de aprimoramento do modelo numérico como, por exemplo: refinamento de malha e contato cordoalha concreto
- e)** Elaborar a verificação da laje através de um método avançado de cálculo através do desenvolvimento de modelo computacional mecânico de forma que se possa analisar os parâmetros de deformação e deslocamento da estrutura e assim determinar a resistência da mesma através da norma internacional (ISO-834, 1999). Vale ressaltar que este modelo já se encontra em desenvolvimento;

REFERÊNCIAS

- ABNT NBR 13860. **Glossário de termos relacionados com a segurança contra incêndio.** ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. [S.l.]. 1997.
- ABNT NBR 14432. **Exigências de resistência ao fogo de elementos construtivos de edificações - Procedimento.** ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. [S.l.]. 2001.
- ABNT NBR 14861. **Lajes alveolares pré-moldada de concreto protendido - requisitos e procedimentos.** ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. [S.l.]. 2011.
- ABNT NBR 15200. **Projeto de estruturas de concreto em situação de incêndio.** ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. [S.l.]. 2004.
- ABNT NBR 15200. **Projeto de estruturas de concreto em situação de incêndio.** ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. [S.l.]. 2012.
- ABNT NBR 5628. **Componentes construtivos estruturais - Determinação da resistência ao fogo.** ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. [S.l.]. 2001.
- ABNT NBR 6118. **Projeto de estruturas de concreto — Procedimento.** ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. [S.l.], p. 238. 2014.
- ABNT NBR 6120. **Cargas para o cálculo de estruturas de edificações.** Associação Brasileira de Normas Técnicas. Rio de Janeiro. 1980.
- ABNT NBR 6120. **Cargas para o cálculo de estruturas de edificações.** ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. [S.l.]. 2000.
- ABNT NBR 8681. **Ações e segurança nas estruturas - Procedimento.** ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. [S.l.]. 2004.
- ABNT NBR 9062. **Projeto e execução de estruturas de concreto pré-moldado.** Associação Brasileira de Normas Técnicas. [S.l.]. 2006.
- ACKER, A. V. **Manual de sistemas pré-fabricados de concreto.** Tradução de Marcelo de Araújo Ferreira. [S.l.]: [s.n.], 2002.
- ALBUQUERQUE, G. B. D. M. L. D. **Dimensionamento de vigas de concreto armado em situação de incêndio.** Universidade de São Paulo. São Paulo. 2012.

- BROWN UNIVERSITY. **Abaqus tutorial**. Division of Engineering, Brown University. [S.l.].
- BRUSHLINSKY, N. et al. **World fire statistics**. International Association of Fire and Rescue Services (CTIF). [S.l.]. 2016.
- CARVALHO, R. C. **Estruturas em concreto protendido**. 1º. ed. [S.l.]: PINI, 2012.
- CLEIDE, M. **Construção civil lajes**. Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia. Rio Grande do Norte. 2011.
- CORRÊA, C. et al. Mapeamento de incêndios em edificações: um estudo de caso na cidade do Recife. **Revista de Engenharia Civil IMED**, Recife, p. 15-34, 2015.
- EL DEBS, M. K. **Concreto pré moldado: fundamentos e aplicações**. [S.l.]: EESC-USP, 2000.
- ESO. **Estágio Supervisionado em Obra**, 2011. Disponível em: <<http://www.ufrgs.br/eso/content/?cat=10>>. Acesso em: 18 jul. 2016.
- EUROCODE 2 PART 1-2. **Design of concrete structures - Part 1-2: General rules - Structural fire design**. EUROPEAN COMMITTEE FOR STANDARDIZATION. [S.l.]. 2004.
- FUSCO, P. B. **Técnica de armar as estruturas de concreto**. 2º. ed. [S.l.]: PINI, 1995.
- ISO-834. **Fire-resistance tests — Elements of building construction — Part 1: General requirements**. International Organization for Standardization. [S.l.]. 1999.
- JÚNIOR, O. K. **Pilares de concreto armado em situação de incêndio submetidos à flexão composta**. Escola Politécnica, Universidade de São Paulo. São Paulo. 2011.
- LANDI, F. R. **Ação do incêndio sobre estruturas de concreto armado**. São Paulo: EPUSP, 1986.
- MELO, C. E. E. **Manual Munte de projeto em pré-fabricados de concreto**. São Paulo : Pini, 2004.
- MIGLIORE, G. M. **Dimensionamento e utilização de laje alveolar protendida**. Centro Universitário da Fundação Educacional Barretos. Barretos. 2008.
- PIERIN, I.; SILVA, V. P. E. Análise térmica de laje alveolar protendida em situação de incêndio. **Anais do 51º Congresso Brasileiro de Concreto**, Outubro 2009.

PORTAL METÁLICA. **Portal Metálica**. Disponível em: <<http://wwwo.metallica.com.br/lajes-mistas>>. Acesso em: 18 jul. 2016.

SANTOS, M. M. L. D. **Considerações iniciais sobre o comportamento de lajes mistas "steel deck" em situação de incêndio**. Universidade Federal de Pernambuco. Recife. 2015.

SEITO, A. I. et al. **A segurança contra incêndio no Brasil**. São Paulo : Projeto Editora , 2008.

SISTREL. **Sistrel laje alveolar**. Disponível em: <<http://lajealveolar.com/site/landing-page/>>. Acesso em: 18 jul. 2016.

SUVRANU, P. **Abaqus Handout**. Department of Mechanical, Aerospace - Rensselaer Polytechnic Institute. [S.l.].

TATU, 2008. Disponível em: <http://www.tatu.com.br/pdf_novo/lajes_alveolares.pdf>. Acesso em: 15 jan. 2016.