

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

HILDO AUGUSTO SANTIAGO FILHO

**ESTUDO DO COMPORTAMENTO DE LAJES DE CONCRETO ARMADO EM
SITUAÇÃO DE INCÊNDIO**

RECIFE

2018

HILDO AUGUSTO SANTIAGO FILHO

**ESTUDO DO COMPORTAMENTO DE LAJES DE CONCRETO ARMADO EM
SITUAÇÃO DE INCÊNDIO**

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil do Centro de Tecnologia e Geociências da Universidade Federal de Pernambuco, como requisito parcial para obtenção do grau de Mestre em Engenharia Civil.

Área de Concentração: Estruturas.

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

Orientador externo: Prof. Dr. José Jéferson do Rêgo Silva.

RECIFE

2018

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

S235e	Santiago Filho, Hildo Augusto. Estudo do comportamento de lajes de concreto armado em Situação de incêndio./ Hildo Augusto Santiago Filho - 2018. 111folhas, Il., e Tabs. Orientadores: Prof. Dr. Tiago Ancelmo de Carvalho Pires de Oliveira. e Prof. Dr. José Jéferson do Rêgo Silva. . Dissertação (Mestrado) – Universidade Federal de Pernambuco. CTG. Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, 2018. Inclui Referências. 1. Engenharia Civil. 2. Concreto armado. 3. Incêndio. 4. Temperatura elevada. 5. Comportamento estrutural. 6. Método dos elementos finitos. I. Oliveira, Tiago Ancelmo de Carvalho Pires de; Silva, José Jéferson do Rêgo (Orientadores). III. Título. UFPE 624 CDD (22. ed.) BCTG/2018-175
-------	--



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

A comissão examinadora da Defesa de Dissertação de Mestrado

**ESTUDO DO COMPORTAMENTO DE LAJES DE CONCRETO ARMADO
EM SITUAÇÃO DE INCÊNDIO**

defendida por

Hildo Augusto Santiago Filho

Considera o candidato APROVADO

Recife, 08 de janeiro de 2018

Prof. Dr. Tiago Ancelmo de Carvalho Pires de Oliveira – Orientador Interno – UFPE

Prof. Dr. José Jéferson do Rêgo Silva – Orientador Externo – UFPE

Banca Examinadora:

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

Prof. Dr. Romilde Almeida de Oliveira – UNICAP
(examinador externo)

Prof. Dr. Ézio da Rocha Araújo – UFPE
(examinador externo)

Dedico este trabalho a Deus, meus pais Hildo e Lindalva e a minha irmã.

AGRADECIMENTOS

Primeiramente a Deus por ter me dado força e capacidade de conseguir vencer todos os meus desafios.

Aos meus pais, Hildo Augusto Santiago e Lindalva da Silva Santiago, por ter me apoiado incondicionalmente, sempre me incentivando a seguir com minha vida acadêmica e estando junto a mim em todos os momentos, principalmente nos financiamentos de todos os meus estudos.

À minha irmã, Lindalva Augusto Santiago, pelos constantes apoios e conselhos nas horas difíceis e importantes dicas de estudo.

Ao amigo de sempre, Renato Guilherme da Silva Pereira, pela parceria de longa data, grandes dicas, conselhos e apoios nos momentos mais tortuosos, e sem dúvida alguma tem uma participação muito especial no trabalho desenvolvido.

Ao meu professor orientador, Tiago Ancelmo, pelas orientações e confiança no trabalho conduzido.

Em especial ao meu professor coorientador, José Jeferson, pelas constantes orientações, apoio e oportunidade a mim confiada para produzir este trabalho, além da paciência, disponibilidade de tempo e satisfação em compartilhar seu conhecimento nesta dissertação.

Ao meu professor e amigo, Fernando Artur Nogueira e Silva, pelas importantes dicas e apoio durante toda minha jornada acadêmica, pois ele foi um dos principais incentivadores desta etapa da minha vida.

Ao professor Romilde Almeida de Oliveira, que foi com ele que comecei a carreira acadêmica.

Aos meus companheiros de trabalho pelo incentivo e compreensão do tempo dedicado ao mestrado.

Aos amigos, Fernando Mellia e Giane Lira pelo apoio, conselhos e dicas para realização desta etapa.

RESUMO

Estudos realizados mostram que 38,29% dos incêndios registrados na região metropolitana do Recife entre os anos de 2011 e 2013 ocorreram em edificações. Apesar da norma ABNT NBR 15200:2012 estar disponível, o dimensionamento de estruturas de concreto armado em situação de incêndio ainda não é prática usual, uma vez que a referência maior continua sendo a norma ABNT NBR 6118:2014. O presente trabalho trata de uma análise numérica de lajes em concreto armado, na qual se considera efeitos da temperatura elevada no concreto e no aço, tomando-se como referência as normas EUROCODE 2/1992 e ABNT NBR 15200, e utilizando o software ABAQUS. Um modelo computacional é proposto, adotando a simulação sequencial (térmica e mecânica), e seus resultados são confrontados com resultados simplificados e experimentais disponíveis na literatura. Duas lajes em concreto armado são estudadas em temperatura ambiente, para comparação dos resultados numéricos com resultados teóricos simplificados. Apesar de resultados experimentais de lajes submetidas a altas temperaturas ainda serem escassos, Wang (2016) apresenta um modelo experimental cujos resultados servem de base para comparação dos resultados numéricos obtidos com o modelo computacional proposto. Os resultados da análise numérica se mostraram satisfatórios, tanto para temperatura, quanto para os deslocamentos, o que indica que o modelo computacional proposto pode ser uma alternativa inovadora e consistente para projeto de estruturas em concreto armado.

Palavras chave: Concreto armado. Incêndio. Temperatura elevada. Comportamento estrutural. Método dos elementos finitos.

ABSTRACT

Studies have shown that 38.29% of the fires recorded in the metropolitan region of Recife between 2011 and 2013 occurred in buildings. Although the standard ABNT NBR 15200: 2012 is available, the design of reinforced concrete structures subjected to fire is still not usual practice, since the major reference remains the ABNT NBR 6118: 2014 standard. The present work deals with a numerical analysis of slabs in reinforced concrete, in which high temperature effects are considered in concrete and steel, taking as reference the standards EUROCODE 2/1992 and ABNT NBR 15200, and using ABAQUS software. A computational model is proposed, adopting the sequential simulation (thermal and mechanical), and its results are confronted with simplified and experimental results available in the literature. Two slabs in reinforced concrete are studied at room temperature for comparison of numerical results with simplified theoretical results. Although experimental results of slabs subjected to high temperatures are still scarce, Wang (2016) presents an experimental model whose results serve as a basis for comparing the numerical results obtained with the proposed computational model. The results of the numerical analysis were satisfactory for both temperature and displacement, which indicates that the proposed computational model can be an innovative and consistent alternative for the design of structures in reinforced concrete.

Keywords: Reinforced concrete. Fire. High temperature. Structural behavior. Finit Element Method.

LISTA DE ILUSTRAÇÕES

Figura 1 - O grande incêndio de Roma	17
Figura 2 - O grande incêndio de Londres	18
Figura 3 - Mecanismos de transferência de calor	22
Figura 4 - Curva de incêndio padrão (ISO 834 e ASTM E119)	24
Figura 5 - Fator $K_{(c,\theta)}$ em função da temperatura.....	27
Figura 6 - Alongamento específico do concreto em função da temperatura.....	30
Figura 7 - Calor específico do concreto em função da temperatura	31
Figura 8 - Condutividade térmica do concreto em função da temperatura	32
Figura 9 - Densidade do concreto em função da temperatura	33
Figura 10 - Coeficiente $K_{(s,\theta)}$ para aço CA 50, CA 60 (tração) e compressão para armadura passiva	36
Figura 11 - Coeficiente $K_{Es}(\theta)$ para aço CA 50 e CA 60	37
Figura 12 - Elementos finitos 1D, 2D e 3D	44
Figura 13 - Deslocamento nas direções perpendiculares	48
Figura 14 - Famílias de elementos mais utilizadas nas modelagens computacionais	49
Figura 15 - Denominação de elementos sólidos unidimensionais, bidimensionais, tridimensionais e assimétricos.....	51
Figura 16 - Denominação dos elementos cilíndricos para família "CONTINUUM"	52
Figura 17 - Área de trabalho do abqus no campo "Part"	53
Figura 18 - Especificações para modelar peça	54
Figura 19 - Campo de desenho das peças do menu Part.....	54
Figura 20 - Programação dimensão final da peça (espessura)	55
Figura 21 - Laje de concreto e armadura A.....	55
Figura 22 - Laje de concreto e armadura B.....	56
Figura 23 - Concreto e armadura com suas divisões A.....	57
Figura 24 - Concreto e armadura com suas divisões B.....	58
Figura 25 - Concreto com seu material atribuído no menu Property.....	59
Figura 26 - Menu assembly na forma inicial	60
Figura 27 - Janela de opções	60
Figura 28 - Armaduras posicionadas nas duas direções	61
Figura 29 - Janela para os ajustes do zero absoluto e constante de Stefan-Boltzmann	62
Figura 30 - Guias "Basic" análise térmica	63

Figura 31 - Guias "Incrementation" análise térmica	64
Figura 32 - Guias "Other" análise térmica	64
Figura 33 - Guia com programação dos dados de saída da análise térmica.....	65
Figura 34 - Guia "Basic" temperatura ambiente.....	66
Figura 35 - Guia "Incrementation" temperatura ambiente	66
Figura 36 - Guia "Other" temperatura ambiente.....	66
Figura 37 - Guia “Basic” carga térmica	67
Figura 38 - Saída de resultado	67
Figura 39 - Configuração “Surfasse film condition”	68
Figura 40 - Configuração “surfasse radiation”	69
Figura 41 - Configuração “Seed part instance”	70
Figura 42 - Malhas do concreto	70
Figura 43 - Malha da armadura.....	71
Figura 44 - Configuração de elemento utilizado na análise térmica	71
Figura 45 - Configuração no menu Job.....	72
Figura 46 - Guia monitor: andamento do problema	73
Figura 47 - Solução térmica concluída.....	73
Figura 48 - Configuração do tipo de elemento utilizado na análise mecânica	75
Figura 49 - Esquema do forno	76
Figura 50 - Forma das lajes A	78
Figura 51 - Forma das lajes B	78
Figura 52 - Armação das lajes S1, S2 e S3 A.....	79
Figura 53 - Armação das lajes S1, S2 e S3 B	79
Figura 54 - Esquema estrutural da laje com o carregamento.....	79
Figura 55 - Apoio de primeiro gênero	80
Figura 56 - Termopares A	80
Figura 57 - Termopares B	81
Figura 58 - Deslocamentos verticais e horizontais da laje	81
Figura 59 - Planta baixa da laje armada em uma direção	84
Figura 60 - Corte AA	84
Figura 61 - Detalhamento da armação da laje	84
Figura 62 - Esquema estrutural da peça analisada	84
Figura 63 - Campo de temperatura na seção transversal	85
Figura 64 - Magnitude da temperatura e evolução com o tempo	86

Figura 65 - Deslocamento vertical no meio do vão da laje	87
Figura 66 - Deslocamento vertical ao longo do eixo central da laje.....	88
Figura 67 - Deslocamento vertical avaliado na seção transversal da laje.....	89
Figura 68 - Avaliação de tensões na armadura de flexão.....	89
Figura 69 - Tensões na armadura durante o incêndio 1	89
Figura 70 - Tensões na armadura durante o incêndio 2	89
Figura 71 - Tensões na armadura durante o incêndio 3	90
Figura 72 - Tensões na armadura durante o incêndio 4	90
Figura 73 - Tensões na armadura durante o incêndio 5	90
Figura 74 - Tensões na armadura durante o incêndio 6	90
Figura 75 - Tensões na armadura durante o incêndio 7	90
Figura 76 - Evolução da temperatura do forno nas lajes S1	92
Figura 77 - Evolução da temperatura do forno nas lajes S3.....	92
Figura 78 - Campo de temperatura na seção transversal da laje S1	93
Figura 79 - Temperatura nos pontos descritos para a laje S1 T4-1.....	94
Figura 80 - Temperatura nos pontos descritos para a laje S1 T4-2.....	94
Figura 81 - Temperatura nos pontos descritos para a laje S1 T4-3.....	94
Figura 82 - Temperatura nos pontos descritos para a laje S1 T4-4.....	94
Figura 83 - Temperatura nos pontos descritos para a laje S1 T4-5.....	94
Figura 84 - Temperatura nos pontos descritos para a laje S1 T4-6.....	94
Figura 85 - Campo de temperatura na seção transversal da laje S3	96
Figura 86 - Temperatura nos pontos descritos para a laje S3 T6-1.....	97
Figura 87 - Temperatura nos pontos descritos para a laje S3 T6-2.....	97
Figura 88 - Temperatura nos pontos descritos para a laje S3 T6-3.....	97
Figura 89 - Temperatura nos pontos descritos para a laje S3 T6-4.....	97
Figura 90 - Temperatura nos pontos descritos para a laje S3 T6-5.....	97
Figura 91 - Temperatura nos pontos descritos para a laje S3 T6-6.....	97
Figura 92 - Cálculos validados no ponto V6 da laje	99
Figura 93 - Evolução dos deslocamentos em função do tempo S1	100
Figura 94 - Evolução dos deslocamentos em função do tempo S1	100
Figura 95 - Avaliação dos deslocamentos	102
Figura 96 - Deslocamento ao longo da diagonal principal das lajes S1 e S3.....	102
Figura 97 - Deslocamento ao longo da seção transversal no meio do vão das lajes S1 e S3	103

Figura 98 - Armaduras tomadas para a análise das tensões atuantes	103
Figura 99 - Tensões normais atuantes nas armaduras durante a duração do incêndio na laje S1 1	104
Figura 100 - Tensões normais atuantes nas armaduras durante a duração do incêndio na laje S1 2	104
Figura 101 - Tensões normais atuantes nas armaduras durante a duração do incêndio na laje S1 3	104
Figura 102 - Tensões normais atuantes nas armaduras durante a duração do incêndio na laje S1 4	104
Figura 103 - Tensões normais atuantes nas armaduras durante a duração do incêndio na laje S1 5	104
Figura 104 - Tensões normais atuantes nas armaduras durante a duração do incêndio na laje S1 6	104

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Curva da ASTM E119 (2000)	23
Tabela 2 - Valores da relação $f_{pyk,0l}(0,9f_{pyk})$ e $E_{p,0}/E_p$ para fios e cordoalhas da armadura ativa	39
Tabela 3 - Dimensões mínimas para lajes simplesmente apoiadas ^c	41
Tabela 4 - Dimensões mínimas para lajes contínuas ^c	41
Tabela 5 - Dimensões mínimas para lajes lisas ou cogumelo a.....	41
Tabela 6 - Dimensões mínimas para lajes nervuradas simplesmente apoiadas ^c	42
Tabela 7 - Dimensões mínimas para lajes nervuradas contínuas em pelo menos uma das bordas ^c	42
Tabela 8 - Dimensões mínimas para lajes nervuradas armadas em uma só direção ^a	43
Tabela 9 - Resultados dos deslocamentos	83
Tabela 10 - Tempo de processamento	83
Tabela 11 - Temperatura no concreto e armadura em função do tempo	86
Tabela 12 - Resultados analíticos em temperatura ambiente	87
Tabela 13 - Resultados numéricos em temperatura ambiente	87
Tabela 14 - Deslocamentos, junto com as respectivas taxas de deflexão, avaliados em intervalos de 30 minutos.....	88
Tabela 15 - Tensões na armadura durante o incêndio	91
Tabela 16 - Relação temperatura x propriedades mecânicas (deslocamento e modulo de elasticidade) do aço em função do tempo.....	91
Tabela 17 - Temperatura do termopar F1 nas lajes S1 e S3	93
Tabela 18 - Temperatura do termopar T1 em função do tempo (laje S1)	95
Tabela 19 - Temperatura termopar T2 em função do tempo (laje S1)	95
Tabela 20 - Temperatura termopar T3 em função do tempo (laje S1)	95
Tabela 21 - Temperatura termopar T4 em função do tempo (laje S1)	95
Tabela 22 - Temperatura termopar T5 em função do tempo (laje S1)	96
Tabela 23 - Temperatura termopar T6 em função do tempo (laje S1)	96
Tabela 24 - Temperatura do termopar T1 em função do tempo (laje S3)	98
Tabela 25 - Temperatura do termopar T2 em função do tempo (laje S3)	98
Tabela 26 - Temperatura do termopar T3 em função do tempo (laje S3)	98
Tabela 27 - Temperatura do termopar T4 em função do tempo (laje S3)	98
Tabela 28 - Temperatura do termopar T5 em função do tempo (laje S3)	99

Tabela 29 - Temperatura do termopar T6 em função do tempo (laje S3)	99
Tabela 30 - Resultados analíticos em temperatura ambiente	100
Tabela 31 - Resultados numéricos em temperatura ambiente	100
Tabela 32 - Deslocamentos da laje S1 durante o incêndio	101
Tabela 33 - Deslocamentos da laje S3 durante o incêndio	101
Tabela 34 - Tensões na armadura durante o incêndio (S1)	105

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO.....	16
1.1	CONSIDERAÇÕES INICIAIS	16
1.2	OBJETIVOS	18
1.3	METODOLOGIA DA PESQUISA	19
1.4	CONTRIBUIÇÕES E ESTRUTURA DA DISSERTAÇÃO	19
2	SEGURANÇA CONTRA INCÊNDIO EM EDIFICAÇÕES	20
2.1	CONSIDERAÇÕES GERAIS	20
2.2	O INCÊNDIO	20
2.2.1	Mecanismos de transferência de calor	21
2.2.2	Incêndio padrão	22
2.3	COMPARTIMENTAÇÃO	24
2.4	RESISTÊNCIA AO FOGO DOS ELEMENTOS ESTRUTURAIS DE CONCRETO ARMADO.....	25
2.5	PROTEÇÃO ATIVA.....	26
2.6	PROPRIEDADE DOS MATERIAIS.....	26
2.6.1	Propriedades mecânicas do concreto	26
2.6.1.1	Resistência à compressão e tração em temperatura elevada.....	27
2.6.2	Propriedades térmicas do concreto	29
2.6.2.1	Alongamento	29
2.6.2.2	Calor específico	30
2.6.2.3	Condutividade térmica.....	31
2.6.2.4	Densidade	32
2.6.2.5	Coeficiente de expansão térmica	33
2.6.2.6	Spalling (lascamento) do concreto.....	34
2.6.3	Propriedades mecânicas do aço para armadura ativa	35
2.6.3.1	Resistência ao escoamento para armadura passiva	35
2.6.3.2	Módulo de elasticidade para armadura passiva	36
2.6.3.3	Resistência ao escoamento para armadura ativa	38
2.6.3.4	Módulo de elasticidade para aço de armadura ativa.....	38
2.6.4	Propriedades térmicas do aço	39
2.6.4.1	Calor específico	39
2.6.4.2	Condutividade térmica.....	39

2.6.4.3	Densidade	40
2.7	DIMENSIONAMENTO DE LAJES DE CONCRETO ARMADO EM SITUAÇÃO DE INCÊNDIO.....	40
2.7.1	Método tabular para dimensionamento de lajes em situação de incêndio	40
2.8	MÉTODOS ALTERNATIVOS	43
2.9	MÉTODO DOS ELEMENTOS FINITOS	43
2.10	CRITÉRIO DE FALHA ESTABELECIDO PELA ISO 834:1999	45
3	MODELAGEM COMPUTACIONAL	47
3.1	INTRODUÇÃO	47
3.2	HIPÓTESES DE CÁLCULO	47
3.3	PLATAFORMA ABAQUS.....	48
3.3.1	Elementos sólidos (contínuos)	51
3.3.2	Modelagem do estudo de caso	52
4	MODELO EXPERIMENTAL	76
5	APRESENTAÇÃO DOS RESULTADOS.....	82
5.1	INTRODUÇÃO	82
5.2	REFINAMENTO DA MALHA	82
5.3	LAJE MACIÇA ARMADA EM UMA DIREÇÃO	83
5.3.1	Comportamento térmico.....	85
5.3.2	Comportamento mecânico	87
5.4	LAJE MACIÇA ARMADA EM DUAS DIREÇÕES	91
5.4.1	Comportamento térmico.....	91
5.4.2	Comportamento mecânico	99
6	CONSIDERAÇÕES FINAIS	106
6.1	CONCLUSÃO.....	106
6.2	SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS	107
	REFERÊNCIAS	108

1 INTRODUÇÃO

1.1 CONSIDERAÇÕES INICIAIS

Para a elaboração de um projeto estrutural, devem-se considerar todas as situações em que a estrutura poderá ser exposta. É importante que normas como a ABNT NBR 6118 (2014) sejam seguidas à risca para o dimensionamento. Além dos esforços, que naturalmente deve resistir, a estrutura deve ser estudada quando submetida a temperaturas elevadas, pois nestas condições as propriedades mecânicas do concreto e do aço se alteram em função da evolução da temperatura, fazendo com que a estrutura perca eficiência no seu desempenho e podendo até chegar ao colapso.

Historicamente os incêndios são comuns em centros urbanos de maneira que a população deve estar preparada para receber o sinistro se em algum momento este existir. Curta e Delcros (2010) afirmam que as áreas mais propensas ao fogo em todo o mundo, quase sempre, estão na vizinhança de atividades humanas.

Em 18 de Julho do ano 64 d.C. ocorreu o grande incêndio de Roma, onde o fogo se propagou pela cidade durante nove dias. Segundo a narrativa tácita o incêndio ocorreu devido à enorme quantidade de material inflamável que o fogo encontrou no seu caminho, fazendo com que se propagasse de forma mais rápida, tomando maiores proporções.

Devido ao fato de que neste período existia uma grande perseguição aos cristãos, há controvérsias de que Nero foi o mandante do incêndio para reconstruir a cidade e culpar os cristãos. No entanto, a partir deste incêndio, o imperador imaginou um sistema de alarme para incêndio, onde vigilantes andavam pela cidade e tinham a função de alarmar quando houvesse qualquer fonte ou início de incêndio. Roma tornou-se a primeira cidade na história a adotar um sistema de proteção contra incêndio.

Figura 1 - O grande incêndio de Roma



Fonte: Natureza do Fogo, 2014.

O incêndio de Londres também foi bastante devastador e relevante para a implementação da ciência de combate ao fogo. Teve seu início em 2 de setembro de 1666 com mais de 13 mil casas destruídas. A propagação das chamas neste sinistro teve um favorecimento devido a arquitetura medieval da cidade, pois as ruas eram estreitas e as casas de madeira perto uma das outras. A única técnica na época era derrubar as casas para assim o fogo não se propagar mais, no entanto, por subestimar a magnitude das chamas, o Lord Mayor de Londres, Sir Thomas Bloodworth, não autorizou as demolições fazendo assim com que o fogo tomasse proporções devastadoras. O incêndio deu um prejuízo de 10 milhões de libras, e o rei Charles II contratou um arquiteto para construir casas de tijolo e longe uma das outras, nos moldes medievais.

Figura 2 - O grande incêndio de Londres



Fonte: Galeote, 2016.

Tanto Roma como Londres, sofreram estes sinistros por possuírem edificações de madeira e ruas estreitas, fazendo com que o incêndio se propagasse com mais rapidez.

Na era moderna, o primeiro país a sofrer um incêndio em largas proporções, e dimensões urbanas, foram os Estados Unidos, na cidade de Chicago, com início datado em 8 de outubro de 1871, e dois dias de incêndio com mais de 300 vítimas. Devido a este fato, em 1896 foi lançado o primeiro manual publicado por Everett U. Crosby, com a finalidade de facilitar o trabalho dos inspetores das companhias de seguro. Este manual ainda não foi editado pela National Fire Protection Association (NFPA), que é o predecessor do atual Fire Protection Handbook.

Baseado nestas condições a presente pesquisa busca estudar o comportamento de uma laje de concreto armado submetida a incêndio, avaliando os deslocamentos e temperaturas.

1.2 OBJETIVOS

Estruturas de concreto armado em situação de incêndio é uma discussão recente no meio acadêmico, visto que no Brasil não é hábito usual a verificação de peças deste porte em tais situações. Em meio a este fato, são raros os trabalhos na área de estruturas de concreto armado em situação de incêndio o que torna a pesquisa um diferencial. Devido à falta de experimentos nesta área de concentração e o pouco tempo de estudo para elaborar uma

pesquisa experimental objetivando verificar o real comportamento de lajes de concreto armado em situação de incêndio, foi utilizada nesta pesquisa uma análise numérica com um programa que utiliza um código com soluções aproximadas através do método dos elementos finitos. Para validação dos resultados foi comparado os resultados dos deslocamentos e tensões com suas respectivas soluções analíticas e para a resposta ao comportamento térmico e termo mecânico foi tomada uma análise experimental de uma laje de concreto armado conduzida por Wang (2016) na China.

1.3 METODOLOGIA DA PESQUISA

Considerando as pesquisas relacionadas ao tema até aqui, estas pesquisas serão tratadas neste trabalho de forma breve com alguns estudos relacionados à laje maciça de concreto armado em uma e duas direções. Apesar da falta de experimentos relacionados ao tema no meio acadêmico local, foi encontrada uma laje maciça armada em duas direções, em situação de incêndio, Wang (2016), que foi tomada como validação dos resultados obtidos na modelagem numérica. Os resultados em temperatura ambiente foram comparados com soluções analíticas disponíveis na literatura. Também foi realizada uma verificação através de alguns métodos disponíveis na ABNT NBR 15200:2012, para a laje armada em uma direção.

1.4 CONTRIBUIÇÕES E ESTRUTURA DA DISSERTAÇÃO

A dissertação foi desenvolvida em seis capítulos. O primeiro capítulo mostra a introdução do assunto, bem como os objetivos gerais da pesquisa, a organização do trabalho e a metodologia da pesquisa. O segundo capítulo trata de uma aprofundada revisão bibliográfica embasadas nas normas técnicas, artigos, trabalhos, dissertações e teses disponíveis na área de atuação do presente trabalho. O terceiro capítulo trata da modelagem computacional, abordando a plataforma Abaqus, que foi o software utilizado para todas as análises numéricas neste trabalho, bem como uma breve introdução de seu código e biblioteca de elementos disponíveis para a solução de problemas e o modelo computacional abordado de forma detalhada. O quarto capítulo mostra o detalhamento da análise experimental utilizada para a validação dos resultados da análise numérica. O quinto capítulo trata da discussão dos resultados. Finalmente o sexto capítulo trata das conclusões e sugestões para trabalhos futuros.

2 SEGURANÇA CONTRA INCÊNDIO EM EDIFICAÇÕES

2.1 CONSIDERAÇÕES GERAIS

Atualmente os edifícios são projetados de tal maneira que caso ocorra um sinistro seus dispositivos de combate a incêndio sejam acionados para tentar impedir que este tome maiores proporções, de modo que estes dispositivos minimizem o risco à vida.

Dispositivos como “sprinklers”, extintores, etc., tem suas funcionalidades de modo a diminuir o grau de incêndio a que o ambiente está submetido. No Brasil, a NR23-Proteção contra incêndio, mostra as exigências a serem seguidas para que uma edificação proporcione um ambiente de trabalho seguro citando dispositivos de proteção contra incêndio como saída de emergência, portas corta fogo, extintores e sistemas de alarme. Entretanto, um fato indispensável de se conhecer é o comportamento das estruturas em situação de incêndio.

2.2 O INCÊNDIO

O fogo tem um poder devastador, podendo reduzir às cinzas diversos objetos. Segundo Brushlinsky et al. (2016), em seu relatório de 2016 com dados de trinta e dois países, houve cerca de 2,7 milhões de incêndios, com 20,7 mil mortes. Em 2013 o Brasil sofreu mais uma vez com uma catástrofe de grandes proporções, que foi o incêndio da boate KISS com 242 óbitos. Em um mapeamento realizado no estado de Pernambuco, Corrêa et al. (2015) afirma que entre os anos de 2011 e 2013 houveram 15 mil casos de incêndio que foram atendidos. Segundo o mesmo autor, mais de 30% dos casos foram em edifícios e que a média atual para esses últimos anos é de 1,5 mil casos por ano.

Há diversos conceitos e formas de se tentar conceituar o fogo, para a ABNT NBR 13860 (1997), é um processo de combustão caracterizado pela emissão de calor e luz. Segundo Caldas (2008), o fogo é o principal exemplo de oxi-redução, que se pode resumir como sendo a transferência de elétrons entre os átomos. O estudo do fogo pode ser considerado recente, Seito et al. (2008) afirma que tem cerca de 20 anos que se começou pesquisas mais relevantes. O autor pontua que o motivo se deve ao surgimento da *International Association For Fire Safety Science (IAFFS)*, que uniu diversos dos maiores pesquisadores sobre o assunto, sendo-os de vários países.

Quando se pensa em considerar o incêndio em um projeto estrutural, se procura em suma, que tal estrutura traga segurança para moradores, vizinhos e patrimônio. Para tanto, é

necessário que a edificação atenda à função suporte e à função corta-fogo. Segundo Sousa (2012), os elementos estruturais devem garantir que haja tempo para evacuações e ação dos bombeiros (função suporte) e que o fogo não possa se propagar rapidamente (função corta-fogo). Esses cuidados são aumentados conforme a verticalização da edificação em questão.

É importante pontuar que os custos para esses cuidados, e os referentes à elaboração de um projeto completo que vise o melhor desempenho em uma estrutura, é menor do que os custos de manutenção. Concordando com o ponto anterior, Souza e Ripper (2009), afirmam que é mais benéfico o investimento em um programa de vitorias e manutenção, do que o ônus de recuperação após o surgimento e alastramento do problema. Quando o assunto é uma catástrofe relacionada ao fogo, além dos custos, o tema vida pesa enormemente na balança, pois se torna algo intangível e motivo de grande comoção.

Para garantir esse nível de eficiência, a ABNT NBR 15200 (2012) estabelece critérios de projeto de estruturas de concreto em situação de incêndio, indicando o comportamento de peças de concreto armado e protendido em temperatura elevada, de modo que seja conhecido o ponto máximo de resistência ao fogo, como por exemplo o tempo máximo que a peça pode resistir até chegar ao colapso.

2.2.1 Mecanismos de transferência de calor

Seguindo a lei de Isaac Newton, conhecida como segunda lei da termodinâmica, a transferência de calor é uma troca de energia entre dois corpos. A mesma lei embasa que essa troca é feita através da passagem de temperatura do corpo mais quente para o mais frio. Segundo Silva (2014), há três modos de transferência de calor, que são:

- Condução;
- Convecção; e
- Radiação.

Segundo a mesma autora, é possível que haja casos em que a transferência ocorra dos três modos.

O calor pode ser definido como a energia térmica em trânsito; dessa forma se dois corpos com temperaturas diferentes entram em contato, há uma troca de energia térmica, onde o corpo de maior temperatura sede energia para de menor temperatura até que haja um equilíbrio. Analogamente, quando uma edificação é submetida a uma situação de fogo, sua

energia térmica é transferida por meio da radiação e convecção, e quando seus elementos construtivos forem atingidos, o aquecimento se dará por condução.

Na convecção a transferência de calor acontece por meio de um fluido em movimento. Já na radiação a transferência acontece por meio de ondas eletromagnéticas. A condução é o processo que necessita que os corpos entrem em contato, onde o calor é transferido para o corpo que está mais frio. A velocidade e a quantidade da transferência dependem dos materiais de cada corpo.

A figura 3 ilustra graficamente os mecanismos de transferência de calor, para melhor entendimento.

Figura 3 - Mecanismos de transferência de calor



Fonte: Transmissão de calor, 2017.

Para os cálculos de dimensionamento estrutural não são usadas todas as fases, uma vez que só é considerada a parte crescente do processo. Essa função depende do tipo de material a que é submetido o incêndio. Se for material calorífico, caso da madeira, papel, etc., a função que representa a fase de aquecimento é logarítmica, e pode ser encontrada na ISO 834-11:2014. Para materiais cuja origem são hidrocarbonetos, ou seja, derivados do petróleo, a função não é logarítmica e é encontrada no Eurocode 1 (2002).

2.2.2 Incêndio padrão

Em se tratando de incêndio, o que se busca para a avaliação do sinistro e entender o comportamento dos gases, bem como sua evolução de acordo com o tempo. A melhor maneira de conseguir esta análise é através das denominadas curvas temperatura-tempo do incêndio. Pitanga (2004) chama de curvas nominais de temperatura-tempo, o conjunto de

curvas que tem o propósito de tornar reproduzíveis os ensaios de resistência ao fogo, em fornos laboratoriais, dos elementos estruturais. Segundo o mesmo autor, o incêndio padrão representa uma dessas curvas nominais.

Para Rodrigues (2017) quando se pensa em realizar estudos de estruturas e elementos construtivos de uma edificação em situação de incêndio, há a necessidade de padronizar os ensaios em laboratórios, inclusive para permitir a comparação e o aproveitamento de resultados obtidos em laboratórios em diversos países.

Considerando estas condições foram estabelecidas algumas curvas padronizadas temperatura dos gases x tempo pela ASTM E119 (2000) e ISO 834-1999, utilizadas para incêndios à base de materiais celulósicos proposta pelo EUROCODE 1, para incêndios com materiais compostos por hidrocarbonetos.

A tabela 1 mostra a curva da ASTM E119 (2000).

Tabela 1 - Curva da ASTM E119 (2000)

Tempo (min)	Temperatura (°C)	Tempo (min)	Temperatura (°C)
0	20	55	916
5	538	60	927
10	704	65	937
15	760	70	946
20	795	75	955
25	821	80	963
30	843	85	971
35	862	90	978
40	878	120	1010
45	892	240	1093
50	905	480	1260

Fonte: Silva, V., 1997.

A ISO 834 descreve que a temperatura obedece uma função logarítmica dependente do tempo. A equação 1 mostra a função que governa a temperatura dos gases adotada pela norma citada.

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

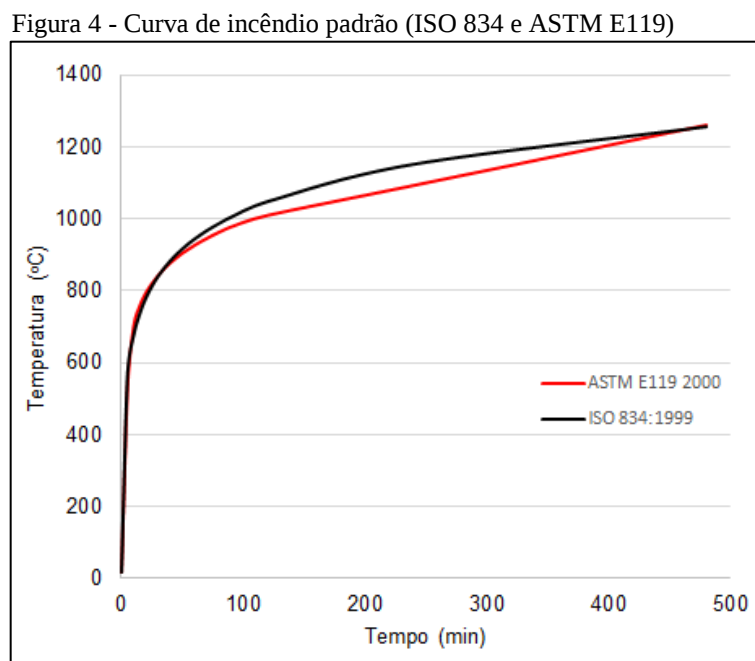
Onde:

T – Tempo em minutos

θ_g – Temperatura dos gases no instante t;

θ_o – Temperatura ambiente dos gases.

A figura 4 mostra a curva de incêndio padrão da ASTM E119 (2000) comparada com a ISO 834:1999.



Fonte: Autor, 2017.

2.3 COMPARTIMENTAÇÃO

A compartimentação é uma medida de proteção passiva determinante na segurança contra incêndio e consiste em dividir a edificação em células resistentes à propagação do fogo (CUNHA, 2015). De acordo com o mesmo autor a ABNT NBR 14432:2001 apresenta uma definição qualitativa de compartimentação, porém sem atribuir dimensões ao elemento.

De acordo com Silva, V. (2012), “a compartimentação é um dos principais meios de segurança contra incêndio. Uma vez iniciado o incêndio em um compartimento, deve-se evitar que ele se propague para outros”.

Tendo em vista as definições acima, pode-se chegar a definição de compartimentação como um meio de segurança contra incêndio cuja função é isolar o sinistro em apenas um compartimento, ou seja, o local de início do incêndio.

O mesmo autor define alguns conceitos que são necessários para elaboração de um projeto de proteção contra incêndio. Estes conceitos são definidos a seguir:

- Compartimento – parte da edificação cuja função é evitar a propagação do fogo para outros ambientes;

- Elementos de compartimentação – tipo de elemento cuja função é vedar o compartimento de forma a deixá-lo estanque e seguro estruturalmente;
- Isolamento – capacidade que o elemento construtivo possui em impedir a propagação da temperatura ao lado não exposto ao fogo;
- Estanqueidade - a ABNT NBR 5628 e ABNT NBR 10636 estabelecem que um elemento é estanque quando impede a ocorrência de rachaduras ou aberturas, que possam passar chamas e gases quentes que sejam capazes de ignizar um incêndio em outro compartimento;
- Compartimentação vertical – impede a propagação dos gases ou calor para o compartimento superior, por exemplo, lajes, parapeitos, marquises, porta corta fogo, etc.;
- Compartimentação horizontal – impede a propagação dos gases ou calor para o compartimento lateral, por exemplo, alvenaria de vedação;
- Isolamento de risco – de acordo com Silva, V. (2012), dois edifícios estão isolados quanto ao risco de incêndio quando estão separados por uma parede corta fogo ou estão a uma distância suficiente um do outro de modo que os gases ou calor de um não se propague para o outro.

2.4 RESISTÊNCIA AO FOGO DOS ELEMENTOS ESTRUTURAIS DE CONCRETO ARMADO

Cada material possui uma resistência específica quando submetido a temperatura elevada. Esta resistência é essencial para o dimensionamento de peças estruturais de modo que garantam um tempo mínimo para ao menos evacuar o local em caso de incêndio.

De posse disso, a norma ABNT NBR 14432 (2001), define o tempo requerido de resistência ao fogo (TRRF) da seguinte maneira:

Tempo mínimo de resistência ao fogo de um elemento construtivo quando sujeito ao incêndio padrão, e a resistência ao fogo é a propriedade de um elemento de construção de resistir à ação do fogo por determinado período de tempo, mantendo sua segurança estrutural, estanqueidade e isolamento, onde aplicável.

Vale salientar que o TRRF é um valor paramétrico, estabelecido por norma, apenas para elaboração de projeto, sem relação com o tempo de duração de um incêndio, tempo para desocupação de uma edificação ou tempo resposta do corpo de bombeiros. Silva, V. (2012)

supõe que o par “TRRF + curva-padrão” minimiza adequadamente a probabilidade de colapso estrutural durante a vida útil da edificação.

2.5 PROTEÇÃO ATIVA

De acordo com Silva, V. (2012) é exigida a formação de brigada contra incêndio em todos os edifícios residenciais multifamiliares, escolares, de escritórios e hotéis, independentemente do número de andares, conforme o Decreto n.º 56819 (2011). Tal proteção pode ser aparelho de detecção de incêndio automático, chuveiros automáticos, etc.

2.6 PROPRIEDADE DOS MATERIAIS

2.6.1 Propriedades mecânicas do concreto

Cada material irá reagir de uma forma ao fogo. O concreto tem um bom comportamento quando exposto ao fogo, por não ser combustível e apresentar baixa condutividade térmica. Além de sua função estrutural, o concreto em situação de incêndio ainda protege a armadura de aço que não é tão eficiente em temperatura elevada.

Contudo, em temperaturas acima de 100°C a capacidade resistente do concreto vai diminuindo, por causa da degeneração de suas propriedades mecânicas. Quando há a evaporação da água contida no cimento, geram-se tensões internas que podem acarretar no desprendimento das camadas mais superficiais. Esse fenômeno é chamado de “spalling” ou lascamento, e é bastante prejudicial à estrutura, uma vez que expõe a armadura da peça ao fogo.

Para tentar minimizar estes efeitos, métodos como adição de fibras de carbono ou polipropileno no traço do concreto são testados com obtenção de resultados satisfatórios. Novak e Kohoutkova (2018) diz que a presença de fibras de polipropileno no traço de concreto reduz o risco de “spalling” a medida que as fibras derretem com o aumento da temperatura devido ao baixo ponto de fusão. No entanto, como consequência as fibras aumentam a permeabilidade do composto de concreto e diminuem a pressão dos poros.

2.6.1.1 Resistência à compressão e tração em temperatura elevada

De acordo com a ABNT NBR 15200 (2012), a resistência à compressão do concreto em função da temperatura, pode ser obtida através da equação 2.

$$f_{c,\theta} = K_{c,\theta} * f_{ck} \quad (2)$$

Onde:

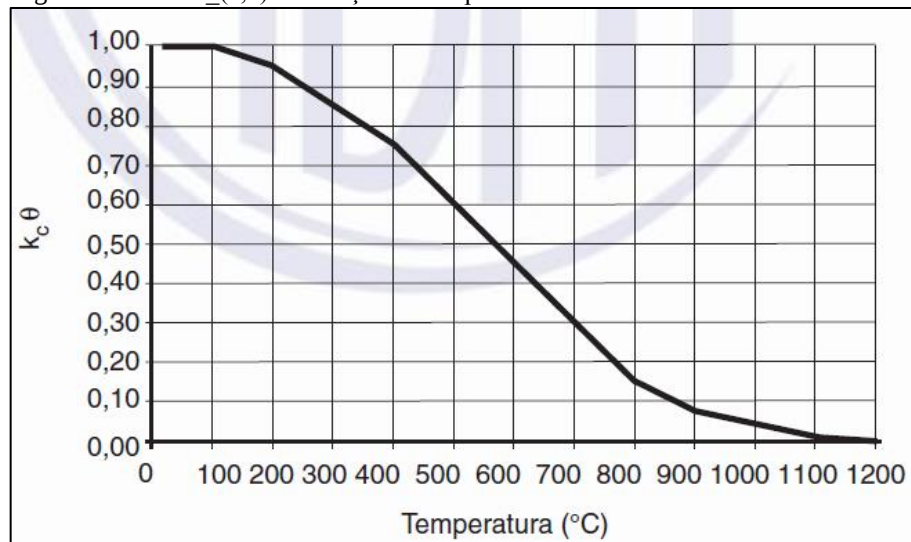
f_{ck} – Resistência característica a compressão em situação normal;

$K_{c,\theta}$ – fator de redução da resistência do concreto na temperatura θ ,

$f_{c,\theta}$ – resistência à compressão do concreto na temperatura θ .

O fator de redução da resistência do concreto em função da temperatura ($K_{c,\theta}$) dependerá do tipo de agregado que irá compor o traço do concreto. A tabela 1 da norma citada mostra os valores deste coeficiente, em função da temperatura, para concretos compostos de agregados silicosos e com densidade entre 2000 kg/m^3 a 2800 kg/m^3 . A figura 5 mostra o fator $K_{c,\theta}$ em função da temperatura conforme ABN NBR 15200:2012.

Figura 5 - Fator $K_{c,\theta}$ em função da temperatura



Fonte: ABNT NBR 15200, 2012.

A mesma norma indica que se o concreto for composto por agregado não silicioso ou se sua densidade for fora do intervalo acima citado, deve-se calcular o fator $K_{c,\theta}$ conforme o Eurocode 2: Design of concrete structures – Part 1-2: General rules – Structural fire design.

O Quadro 1 mostra os valores para o fator $K_{c,\theta}$ para agregados siliciosos e calcareos em função da temperatura, conforme o Eurocode 2 – Part 1-2. Também é possível verificar os valores das tensões ultimas do concreto para cada temperatura.

Quadro 1 - Valores de $K_{c,\theta}$ para agregados siliciosos e calcareos em função da temperatura

Concrete temp. θ [°C]	Siliceous aggregates			Calcareous aggregates		
	$f_{c,\theta} / f_{ck}$	$\varepsilon_{c1,\theta}$	$\varepsilon_{cu1,\theta}$	$f_{c,\theta} / f_{ck}$	$\varepsilon_{c1,\theta}$	$\varepsilon_{cu1,\theta}$
1	2	3	4	5	6	7
20	1,00	0,0025	0,0200	1,00	0,0025	0,0200
100	1,00	0,0040	0,0225	1,00	0,0040	0,0225
200	0,95	0,0055	0,0250	0,97	0,0055	0,0250
300	0,85	0,0070	0,0275	0,91	0,0070	0,0275
400	0,75	0,0100	0,0300	0,85	0,0100	0,0300
500	0,60	0,0150	0,0325	0,74	0,0150	0,0325
600	0,45	0,0250	0,0350	0,60	0,0250	0,0350
700	0,30	0,0250	0,0375	0,43	0,0250	0,0375
800	0,15	0,0250	0,0400	0,27	0,0250	0,0400
900	0,08	0,0250	0,0425	0,15	0,0250	0,0425
1000	0,04	0,0250	0,0450	0,06	0,0250	0,0450
1100	0,01	0,0250	0,0475	0,02	0,0250	0,0475
1200	0,00	-	-	0,00	-	-

Fonte: European Committee For Standardization, 2002.

Onde:

$$K_{c,\theta} = \frac{f_{c,\theta}}{f_{ck}} \quad (3)$$

O fato de o concreto ser um material que resiste mais a compressão, sua resistência a tração é muitas vezes desprezada, no entanto nos casos em que essa resistência deve ser

considerada, Silva, V. (2012), cita que em situação de incêndio admite-se que não haja redução da resistência convencional de escoamento à tração até 100°C e, além dessa temperatura, $K_{ct} = 1 - (\theta - 100)/500$, para $\theta \leq 600^\circ\text{C}$, onde $K_{ct} = f_{ct,\theta}/f_{ct}$ sendo $f_{ct,\theta}$ e f_{ct} os valores de resistência convencional ao escoamento na tração do concreto à temperatura elevada e à temperatura ambiente, respectivamente.

2.6.2 Propriedades térmicas do concreto

2.6.2.1 Alongamento

O Anexo C da ABNT NBR 15200 (2012) determina que o alongamento específico do concreto em densidade normal com agregado silicoso é determinado através da seguinte condição:

$$\frac{\Delta l}{l} = -1.8 * 10^{-4} + 9 * 10^{-6} * \theta_c + 2.3 * 10^{-11} * \theta_c^3, \text{ para } 20^\circ\text{C} \leq \theta_c \leq 700^\circ\text{C} \quad (4)$$

$$\frac{\Delta l}{l} = 14 * 10^{-3}, \text{ para } 700^\circ\text{C} \leq \theta_c \leq 1200^\circ\text{C} \quad (5)$$

Onde:

L é o comprimento da peça de concreto a 20°C;

ΔL é o alongamento do elemento de concreto provocado pela temperatura;

θ_c é a temperatura do concreto, em graus Celcius.

De acordo com a mesma norma, pode ser considerada uma relação entre a temperatura e o alongamento específico do concreto de forma simplificada, conforme pode ser visto na equação 6.

$$\frac{\Delta l}{l} = 18 * 10^{-3}(\theta_c - 20) \quad (6)$$

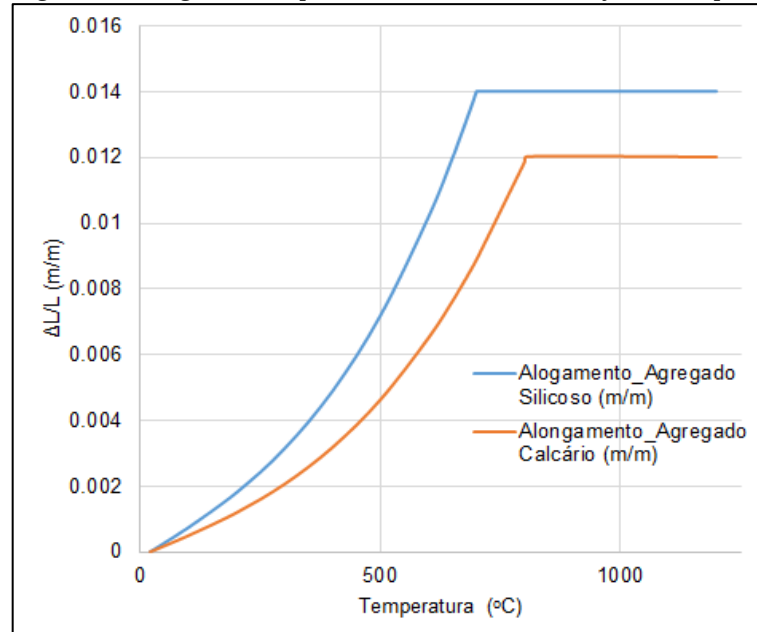
Também é estabelecido o alongamento específico do concreto para agregado calcário, através da seguinte condição:

$$\frac{\Delta l}{l} = -1.2 * 10^{-4} + 6 * 10^{-6} * \theta_c + 1.4 * 10^{-11} * \theta_c^3, \text{ para } 20^\circ\text{C} \leq \theta_c \leq 805^\circ\text{C} \quad (7)$$

$$\frac{\Delta l}{l} = 12 * 10^{-3}, \text{ para } 805^\circ\text{C} \leq \theta_c \leq 1200^\circ\text{C} \quad (8)$$

A figura 6 mostra a variação do alongamento específico do concreto em função da temperatura.

Figura 6 - Alongamento específico do concreto em função da temperatura



Fonte: O autor, 2017.

2.6.2.2 Calor específico

De acordo com a ABNT NBR 15200 (2012), o calor específico do concreto em ambiente com 0% de umidade, independente do agregado, pode ser calculado pelas equações 9, 10, 11 e 12.

$$C_p(\theta) = 900 \text{ (J/kg}^\circ\text{C)}, \text{ para } 20^\circ\text{C} \leq \theta \leq 100^\circ\text{C} \quad (9)$$

$$C_p(\theta) = 900 + (\theta - 100) \text{ (J/kg}^\circ\text{C)}, \text{ para } 100^\circ\text{C} \leq \theta \leq 200^\circ\text{C} \quad (10)$$

$$C_p(\theta) = 1000 + (\theta - 200) \text{ (J/kg}^\circ\text{C)}, \text{ para } 200^\circ\text{C} \leq \theta \leq 400^\circ\text{C} \quad (11)$$

$$C_p(\theta) = 1000 \text{ (J/kg}^\circ\text{C)}, \text{ para } 400^\circ\text{C} \leq \theta \leq 1200^\circ\text{C} \quad (12)$$

A mesma norma considera que quando a umidade não for considerada de forma explícita no método de cálculo, pode ser adicionado um coeficiente $C_{p,top}$, entre os intervalos 100°C e 115°C com decréscimo linear entre 115°C e 200°C . Este coeficiente deve ser calculado através da seguinte condição:

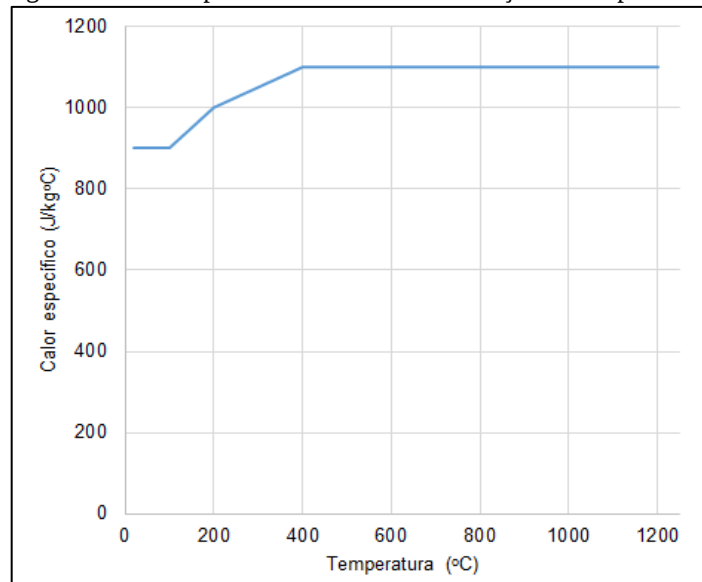
$$C_{p,top} = 900 \text{ (J/kg}^\circ\text{C)}, \text{ para umidade de 0\% em peso} \quad (13)$$

$$C_{p,top} = 1470 \text{ (J/kg}^\circ\text{C)}, \text{ para umidade de 1,5\% em peso} \quad (14)$$

$$C_{p,top} = 2020 \text{ (J/kg}^\circ\text{C)}, \text{ para umidade de 3,0\% em peso} \quad (15)$$

A figura 7 mostra o comportamento do calor específico do concreto em função da temperatura.

Figura 7 - Calor específico do concreto em função da temperatura



Fonte: O autor, 2017.

2.6.2.3 Condutividade térmica

De acordo com a ABNT NBR 15200 (2012), para concretos com densidade normal a condutividade térmica, medida em watt e por grau Celsius ($\text{W/m}^\circ\text{C}$), independentemente do

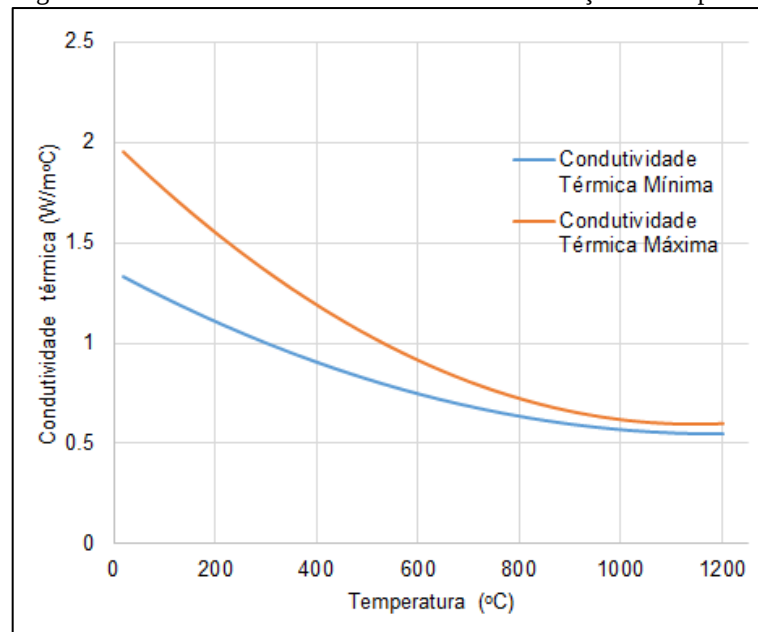
tipo de agregado, pode ser calculada para um valor mínimo e máximo pelas equações 16 e 17, respectivamente, em qualquer temperatura.

$$\lambda = 1,36 - 0,136 * \theta_c/100 + 0,0057 * (\theta_c/100)^2 \quad (16)$$

$$\lambda = 2 - 0,2451 * \theta_c/100 + 0,0107 * (\theta_c/100)^2 \quad (17)$$

A figura 8 mostra o comportamento da condutividade térmica do concreto em função da temperatura.

Figura 8 - Condutividade térmica do concreto em função da temperatura



Fonte: O autor, 2017.

2.6.2.4 Densidade

Durante o aquecimento, a evaporação da água faz com que haja a diminuição da densidade do concreto. Novak e Kohoutkova (2018) afirma que em seu experimento, com o aumento da temperatura, a densidade de massa volumétrica do concreto diminuiu gradualmente aproximadamente até 2375 kg/m³, 2352 kg/m³, 2275 kg/m³ e 2225kg/m³ correspondendo as temperaturas 20°C, 200°C, 400°C e 600°C, respectivamente.

A ABNT NBR 15200 (2012) aborda a diminuição da densidade do concreto através da perda de água através das seguintes condições:

$$\rho(\theta) = \rho(20^{\circ}\text{C}), \text{ para } 20^{\circ}\text{C} \leq \theta \leq 1150^{\circ}\text{C} \quad (18)$$

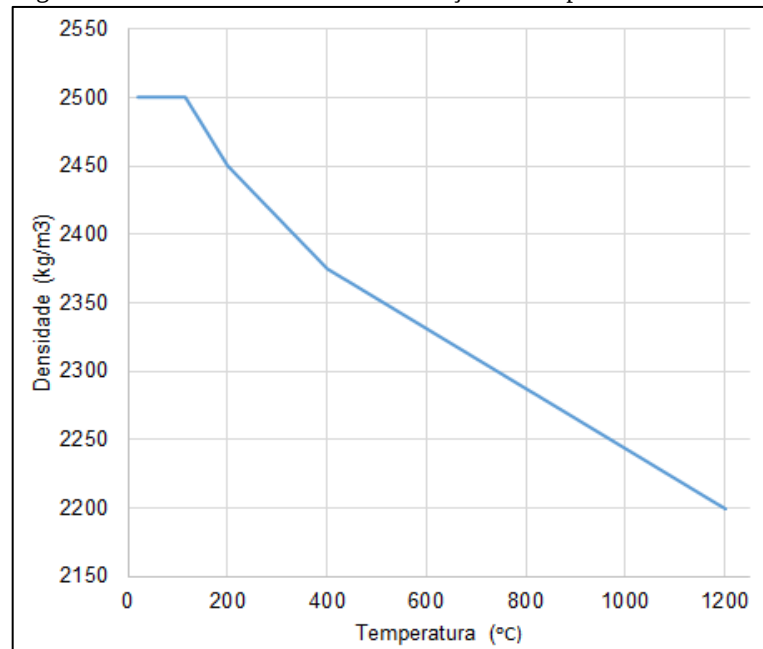
$$\rho(\theta) = \rho(20^{\circ}\text{C}) * (1 - 0,02 * (\theta - 115) / 85), \text{ para } 115^{\circ}\text{C} \leq \theta \leq 200^{\circ}\text{C} \quad (19)$$

$$\rho(\theta) = \rho(20^{\circ}\text{C}) * (0,98 - 0,03 * (\theta - 200) / 200), \text{ para } 200^{\circ}\text{C} \leq \theta \leq 400^{\circ}\text{C} \quad (20)$$

$$\rho(\theta) = \rho(20^{\circ}\text{C}) * (0,95 - 0,07 * (\theta - 400) / 800), \text{ para } 400^{\circ}\text{C} \leq \theta \leq 1200^{\circ}\text{C} \quad (21)$$

A figura 9 mostra o comportamento da densidade do concreto em função da temperatura.

Figura 9 - Densidade do concreto em função da temperatura



Fonte: O autor, 2017.

2.6.2.5 Coeficiente de expansão térmica

Venkatesh (2014) diz que as propriedades de deformação que determinam o desempenho dos elementos de concreto em situação de incêndio são a expansão térmica e a fluência. O concreto geralmente sofre expansão quando submetido a temperaturas elevadas.

Através da equação clássica de dilatação linear, pode-se concluir que o coeficiente de expansão térmica está diretamente relacionado com o alongamento do concreto, podendo ser expressado através da equação 22.

$$\alpha = \frac{\Delta l}{l * (\theta - T)} \quad (22)$$

2.6.2.6 Spalling (lascamento) do concreto

O Spalling (lascamento) do concreto é um fenômeno explosivo que ocorre quando o mesmo é submetido a temperatura elevada. De acordo com Deeny (2008) o spalling envolve a quebra de camadas ou peças de concreto da superfície durante a exposição térmica.

A mesma autora informa que o spalling pode ser classificado em três tipos diferentes:

- Spalling de agregado – causa o desprendimento do agregado perto da superfície envolvendo pequenos pedaços que voam para fora da superfície. Este tipo não afeta o desempenho da estrutura, causando apenas danos estruturais;
- Spalling de canto – ocorre mais tarde, em sua maioria no estágio de decaimento do fogo. Sua característica é peças de cantos maiores que caem do concreto devido a rachaduras de tensão que se desenvolvem nos cantos e bordas. Em geral não é pensado que o spalling de canto tenha um impacto significativo no desempenho estrutural pois quando ocorre o desprendimento das camadas de canto neste estágio o concreto já está enfraquecido devido a ação da temperatura elevada; e
- Spalling explosivo – envolve a ejeção de peças de concreto na superfície aquecida em altas velocidades. Normalmente ocorre nos estágios iniciais do fogo quando as taxas de aquecimento são altas (KHOURY 2000; HERTZ, 2003). O spalling explosivo representa a maior ameaça à estabilidade estrutural.

De acordo com Deeny (2008) o spalling explosivo é um fenômeno complexo que representa uma grande ameaça ao desempenho estrutural de algumas peças de concreto armado em situação de incêndio. Há uma grande quantidade de pesquisas sobre a previsão de quando este fenômeno irá ocorrer, e poucas pesquisas sobre as consequências que este tipo de lascamento tem no desempenho estrutural.

2.6.3 Propriedades mecânicas do aço para armadura ativa

O aço acima de 400°C o perde resistência rapidamente, mas ao sofrer o resfriamento pode ter suas propriedades recuperadas. Para uma temperatura de 800°C a queda de resistência é brusca, e alcançando os 1000°C a resistência é nula. É importante registrar que os aços encruados a frio terão suas mudanças da estrutura internas revertidas devido ao aumento elevado da temperatura. De acordo com a ABNT NBR 15200 (2012), acima de 600°C a resistência ao escoamento do aço da armadura ativa cai para 10% do valor normal e o módulo de elasticidade do mesmo para 21% do valor normal.

2.6.3.1 Resistência ao escoamento para armadura passiva

A ABNT NBR 15200 (2012) diz que a resistência ao escoamento do aço decresce com o aumento da temperatura. Este decréscimo pode ser calculado através da equação 23.

$$f_{y,\theta} = K_{s,\theta} * f_{yk} \quad (23)$$

Onde:

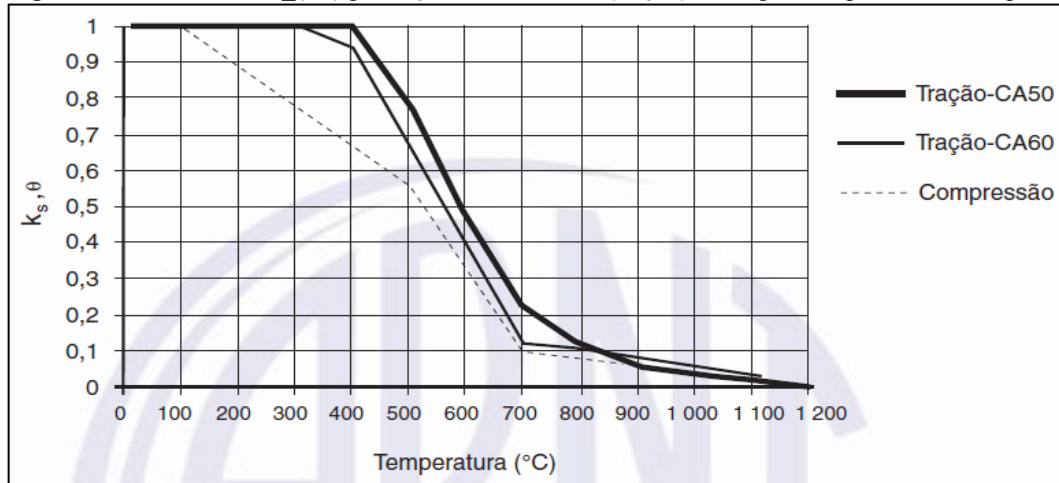
f_{yk} – Resistência característica do aço em situação normal;

$K_{s,\theta}$ – fator de redução da resistência do aço na temperatura θ (modifica se o aço possuir uma deformação maior ou menor que 0,002);

$f_{y,\theta}$ – resistência do aço na temperatura θ .

A figura 10 mostra o diagrama do fator de redução do aço na temperatura θ .

Figura 10 - Coeficiente $K_{s,\theta}$ para aço CA 50, CA 60 (tração) e compressão para armadura passiva



Fonte: ABNT NBR 15200, 2012.

Onde de acordo com a mesma norma:

- Curva cheia: $K_{s,\theta}$ aplicável quando $\varepsilon_{yi} \geq 2\%$, usualmente armaduras tracionadas de vigas lajes ou tirantes;
- Curva tracejada: $K_{s,\theta}$ aplicável quando $\varepsilon_{yi} \leq 2\%$, usualmente armaduras comprimidas de pilares, vigas ou lajes.

2.6.3.2 Módulo de elasticidade para armadura passiva

De acordo com a ABNT NBR 15200 (2012) o módulo de elasticidade do aço da armadura passiva decresce com o aumento da temperatura, podendo ser calculado através da equação 24.

$$E_{s,\theta} = K_{Es}(\theta) * E_s \quad (24)$$

Onde:

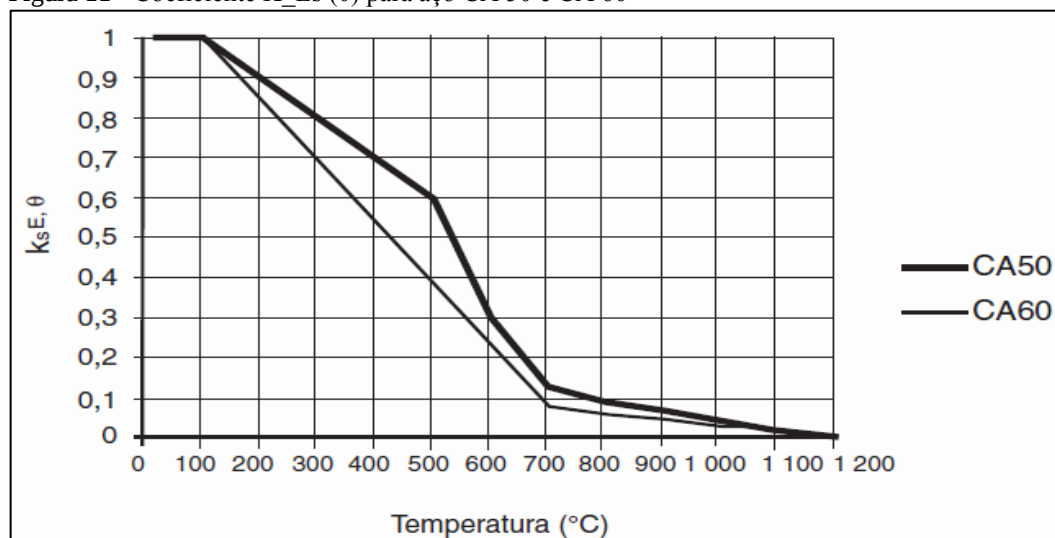
E_s – Módulo de elasticidade longitudinal do aço em situação normal;

$K_{Es}(\theta)$ – fator de redução do módulo de elasticidade do aço na temperatura θ ;

$E_{s,\theta}$ – módulo de elasticidade longitudinal do aço na temperatura θ .

Figura 11 mostra o fator de redução do módulo de elasticidade do aço em função da temperatura para aço CA-50 e CA-60.

Figura 11 - Coeficiente $K_{Es}(\theta)$ para aço CA 50 e CA 60



Fonte: ABNT NBR 15200, 2012.

A tabela 2 da ABNT NBR 15200:2012 fornece a relação entre a resistência ao escoamento da armadura submetido a diferentes temperaturas e a resistência característica ao escoamento a temperatura ambiente, e a mesma relação para o módulo de elasticidade. O Quadro 2 mostra a Tabela 2 da ABNT NBR 15200 (2012).

Quadro 2 - Valores das relações $k_{s,0}=f_{yk,0}/f_{yk}$ e $k_{Es,0}=E_{s,0}/E_s$ para aços de armadura passiva

Temperatura do aço °C	$K_{s,\theta} = f_{yk,\theta}/f_{yk}$			$k_{Es,\theta} = E_{s,\theta}/E_s$	
	Tração		Compressão CA-50 ou CA-60	CA-50	CA-60
	CA-50	CA-60			
1	2	3	4	5	6
20	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00
100	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00
200	1,00	1,00	0,89	0,90	0,87
300	1,00	1,00	0,78	0,80	0,72
400	1,00	0,94	0,67	0,70	0,56
500	0,78	0,67	0,56	0,60	0,40
600	0,47	0,40	0,33	0,31	0,24
700	0,23	0,12	0,10	0,13	0,08
800	0,11	0,11	0,08	0,09	0,06
900	0,06	0,08	0,06	0,07	0,05
1 000	0,04	0,05	0,04	0,04	0,03
1 100	0,02	0,03	0,02	0,02	0,02
1 200	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00

Fonte: Adaptação da ABNT NBR 15200, 2012.

2.6.3.3 Resistência ao escoamento para armadura ativa

Para o cálculo da resistência ao escoamento para armadura ativa é utilizado o mesmo procedimento da seção 2.6.3.1, com as modificações dos valores do coeficiente de redução de resistência em função da temperatura. A resistência em determinada temperatura pode ser calculada através da equação 25, conforme ABNT NBR 15200 (2012).

$$f_{pyk,\theta} = K_{p,\theta} * f_{pyk} \quad (25)$$

Onde:

f_{pyk} – Resistência característica do aço de armadura ativa à temperatura ambiente;

$K_{p,\theta}$ – fator de redução da resistência do aço de armadura ativa na temperatura θ .

2.6.3.4 Módulo de elasticidade para aço de armadura ativa

Para o cálculo do módulo de elasticidade para armadura ativa é utilizado o mesmo procedimento da seção 2.6.3.2, com as modificações dos valores do coeficiente de redução do módulo de elasticidade em função da temperatura. O módulo de elasticidade em determinada temperatura pode ser calculada através da Equação 26, conforme ABNT NBR 15200 (2012).

$$E_{\rho,\theta} = K_{E\rho,\theta} * E_{\rho} \quad (26)$$

Onde:

E_{ρ} – Módulo de elasticidade longitudinal do aço em situação normal;

$K_{E\rho,\theta}$ – fator de redução do modulo de elasticidade do aço na temperatura θ ;

$E_{\rho,\theta}$ – modulo de elasticidade longitudinal do aço na temperatura θ .

A Tabela 2 a seguir de autoria da ABNT NBR 15200 (2012) fornece a relação entre a resistência ao escoamento da armadura ativa submetido a diferentes temperaturas e 90% resistência característica ao escoamento a temperatura ambiente, e a relação entre o módulo de elasticidade do aço submetido a diferentes temperaturas e o modulo de elasticidade a temperatura ambiente.

Tabela 2 - Valores da relação $f_{pyk,\theta}/(0,9f_{pyk})$ e $E_{p,\theta}/E_p$ para fios e cordoalhas da armadura ativa

Temperatura do aço °C	$f_{pyk,\theta}/(0,9 f_{pyk})$	$E_{p,\theta}/E_p$
	Fios e cordoalhas	Fios e cordoalhas
20	1,00	1,00
100	0,99	0,98
200	0,87	0,95
300	0,72	0,88
400	0,46	0,81
500	0,22	0,54
600	0,10	0,41
700	0,08	0,10
800	0,05	0,07
900	0,03	0,03
1 000	0,00	0,00
1 100	0,00	0,00
1 200	0,00	0,00

Fonte: ABNT NBR 15200, 2012.

2.6.4 Propriedades térmicas do aço

2.6.4.1 Calor específico

O calor específico do aço pode ser determinado através da ABNT NBR 14323 (2013), pode ser determinado pelas equações 27, 28, 29 e 30.

$$C_a = 425 + 0.773 * \theta - 0,00169 * \theta^2 + 2,22 \times 10^{-6} * \theta^3, \text{ para } 20^\circ\text{C} \leq \theta \leq 600^\circ\text{C} \quad (27)$$

$$C_a = 666 + 13002/(738 - \theta), \text{ para } 600^\circ\text{C} \leq \theta \leq 735^\circ\text{C} \quad (28)$$

$$C_a = 545 + 17820/(\theta - 731), \text{ para } 735^\circ\text{C} \leq \theta \leq 900^\circ\text{C} \quad (29)$$

$$C_a = 650^\circ\text{C}, \text{ para } 900^\circ\text{C} \leq \theta \leq 1200^\circ\text{C} \quad (30)$$

2.6.4.2 Condutividade térmica

A condutividade térmica do aço pode ser determinada através da ABNT NBR 14323 (2013), em Watt por metro e por graus Celsius, através da equação 31.

$$\lambda_a = 54 - 3,33 \times 10^{-2} * \theta, \text{ para } 20^\circ\text{C} \leq \theta \leq 800^\circ\text{C} \quad (31)$$

De 800°C a 1200°C a condutividade térmica vale 27.3 W/m°C.

2.6.4.3 Densidade

Devido a não ser um material que passa por processo de secagem como o concreto, o aço não possui perdas significantes de massa específica. Portanto a densidade do aço pode ser considerada constante de valor 7800kg/m³.

2.7 DIMENSIONAMENTO DE LAJES DE CONCRETO ARMADO EM SITUAÇÃO DE INCÊNDIO

O método de dimensionamento de estruturas de concreto armado em situação de incêndio é feito apenas para concretos de classe inferior a C50, pois a ABNT NBR 15200 (2012) foi modificada antes da modificação da ABNT NBR 6118 (2014).

2.7.1 Método tabular para dimensionamento de lajes em situação de incêndio

A ABNT NBR 15200 (2012) em seu capítulo 8, que trata da verificação de estruturas em situação de incêndio, fornece tabelas para dimensionamento de lajes de concreto armado em situação de incêndio de calculando o TRRF de cada estrutura.

As Tabelas 6, 7, 8, 9, 10 e 11, da norma citada acima, indicam valores mínimos para espessura da laje, para garantir a função corta fogo, em função do TRRF. Estas tabelas são mostradas a seguir conforme Tabelas 3, 4, 5, 6, 7 e 8, respectivamente.

As Tabelas 3 e 4 mostram as dimensões mínimas para lajes simplesmente apoiadas e lajes contínuas respectivamente. A Tabela 5 mostra as dimensões mínimas para lajes lisas ou cogumelos. A Tabela 6 mostra a mesma condição para lajes nervuradas simplesmente apoiadas. A Tabela 7 mostra as dimensões mínimas para lajes nervuradas contínuas em pelo menos uma das bordas. E finalmente a Tabela 8 mostra as dimensões mínimas para lajes nervuradas armadas em uma direção.

Tabela 3 - Dimensões mínimas para lajes simplesmente apoiadas ^c

TRRF min	h^a mm	c_1 mm		
		Laje armada em duas direções ^b		Laje armada em uma direção $\ell_y/\ell_x > 2$
		$\ell_y / \ell_x \leq 1,5$	$1,5 < \ell_y / \ell_x \leq 2$	
30	60	10	10	10
60	80	10	15	20
90	100	15	20	30
120	120	20	25	40
180	150	30	40	55

^a Dimensões mínimas para garantir a função corta-fogo.

^b Lajes apoiadas nas quatro bordas; caso contrário, a laje deve ser considerada armada em uma direção.

^c Os valores de c_1 indicados nesta tabela são válidos para armadura passiva. No caso de elementos protendidos, os valores de c_1 para as armaduras ativas são determinados acrescentando-se 10 mm para barras e 15 mm para fios e cordoalhas.

Fonte: ABNT NBR 15200, 2012.

Tabela 4 - Dimensões mínimas para lajes contínuas ^c

TRRF min	h^a mm	c_1^b mm
30	60	10
60	80	10
90	100	15
120	120	20
180	150	30

^a Dimensões mínimas para garantir a função corta-fogo.

^b Válido para lajes armadas em uma ou duas direções.

^c Os valores de c_1 indicados nesta tabela são válidos para armadura passiva. No caso de elementos protendidos, os valores de c_1 para as armaduras ativas são determinados acrescentando-se 10 mm para barras e 15 mm para fios e cordoalhas.

Fonte: ABNT NBR 15200, 2012.

Tabela 5 - Dimensões mínimas para lajes lisas ou cogumelo ^a

TRRF min	h mm	c_1 mm
30	150	10
60	180	15
90	200	25
120	200	35
180	200	45

^a Os valores de c_1 indicados nesta tabela são válidos para armadura passiva. No caso de elementos protendidos, os valores de c_1 para as armaduras ativas são determinados acrescentando-se 10 mm para barras e 15 mm para fios e cordoalhas.

Fonte: ABNT NBR 15200, 2012.

Tabela 6 - Dimensões mínimas para lajes nervuradas simplesmente apoiadas ^c

TRRF min	Nervuras Combinações de $b_{\min}/c_1$ a mm/mm			Capa ^b h/c_1 mm/mm
	1	2	3	
30	80/15			60/10
60	100/35	120/25	190/15	80/10
90	120/45	160/40	250/30	100/15
120	160/60	190/55	300/40	120/20
180	220/75	260/70	410/60	150/30

^a $b_{\min}$ corresponde à largura mínima da nervura ao nível do centro geométrico das armaduras.

^b h é a altura mínima da laje para garantir a função corta-fogo.

^c Os valores de c_1 indicados nesta tabela são válidos para armadura passiva. No caso de elementos protendidos, os valores de c_1 para as armaduras ativas são determinados acrescentando-se 10 mm para barras e 15 mm para fios e cordoalhas.

Fonte: ABNT NBR 15200, 2012.

Tabela 7 - Dimensões mínimas para lajes nervuradas contínuas em pelo menos uma das bordas ^c

TRRF min	Nervuras Combinações de $b_{\min}/c_1$ a mm/mm			Capa ^b h/c_1 mm/mm
	1	2	3	
30	80/10			60/10
60	100/25	120/15	190/10	80/10
90	120/35	160/25	250/15	100/15
120	160/45	190/40	300/30	120/20
180	310/60	600/50		150/30

^a $b_{\min}$ corresponde à largura mínima da nervura ao nível do centro geométrico das armaduras.

^b h é a altura mínima da laje para garantir a função corta-fogo.

^c Os valores de c_1 indicados nesta tabela são válidos para armadura passiva. No caso de elementos protendidos, os valores de c_1 para as armaduras ativas são determinados acrescentando-se 10 mm para barras e 15 mm para fios e cordoalhas.

Fonte: ABNT NBR 15200, 2012.

Tabela 8 - Dimensões mínimas para lajes nervuradas armadas em uma só direção ^a

TRRF min	Nervuras Combinações de $b_{\min}/c_1$ mm/mm	
	1	2
30	80/25	100/20
60	100/45	120/40
90	130/60	150/50
120	160/65	220/50
180	220/80	

^a Os valores de c_1 indicados nesta tabela são válidos para armadura passiva. No caso de elementos protendidos, os valores de c_1 para as armaduras ativas são determinados acrescentando-se 10 mm para barras e 15 mm para fios e cordoalhas.

Fonte: ABNT NBR 15200, 2012.

2.8 MÉTODOS ALTERNATIVOS

A ABNT NBR 15200 (2012) permite que sejam utilizados métodos alternativos para dimensionamento de peças de concreto armado em situação de incêndio. A norma cita de forma explícita os seguintes métodos alternativos:

- Método simplificado de cálculo;
- Métodos avançados de cálculo;
- Método experimental.

2.9 Método dos elementos finitos

Logan (2010) define o método dos elementos finitos (MEF) como um método numérico para resolver problemas de engenharia, física e matemática, dentre os quais estão problemas como análise estrutural, transferência de calor, transporte de massa e potencial eletromagnético.

De acordo com Lira (2017) com o avanço dos trabalhos científicos, tem-se desenvolvido diversos modelos que buscam solucionar problemas matemáticos objetivando analisar o comportamento da estrutura, onde dentre estes modelos, o mais utilizado é o método dos elementos finitos (MEF).

O MEF é realizado dividindo o domínio de um determinado problema, estrutural, transferência de calor, etc., em subdomínios ou elementos superpostos, de dimensões infinitesimais, interligados entre si por pontos nodais.

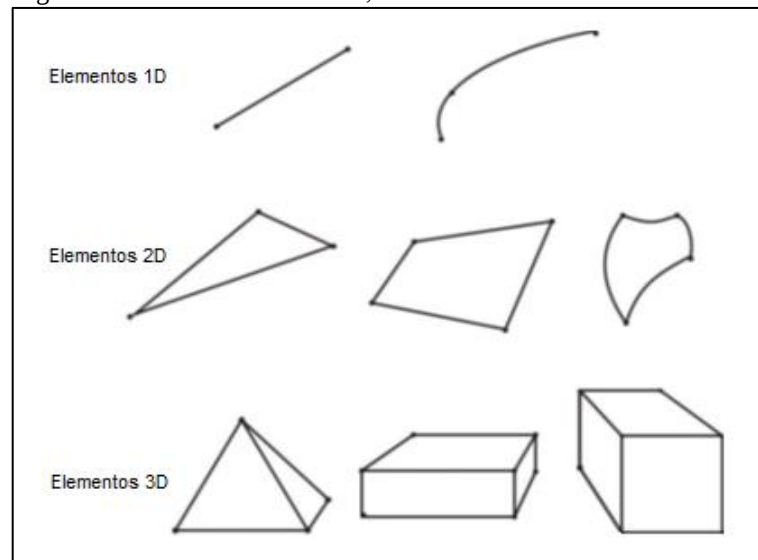
Soriano (2009) aborda que o objetivo do MEF não é apenas transformar um sólido contínuo em uma associação de elementos discretos, escrevendo equações de compatibilidade e equilíbrio entre si, mas sim, buscar funções aproximadas que representem seus respectivos comportamentos de solução.

Zienkiewicz (1977) aborda que a estrutura usual de engenharia pode ser abordada como um conjunto de elementos estruturais interligados por um número limitado de pontos nodais.

Os elementos finitos possuem diversas formas com diversos modelos de solução para cada tipo de problema. Para tal, existem elementos com função de aproximação linear e quadrática. Os resultados com função de aproximação quadrática são mais poderosos que os lineares, porém o tempo de processamento será maior devido à quantidade de solução por elemento que este recurso utilizará.

Os elementos finitos podem ser expressos em elementos 1D, 2D e 3D, conforme figura 12.

Figura 12 - Elementos finitos 1D, 2D e 3D



Fonte Soriano, 2009.

Lira (2017) aborda que as técnicas mais comuns para solução de problemas via MEF são: o método direto, a formulação energética e o método dos resíduos ponderados (método de Galerkin).

2.10 CRITÉRIO DE FALHA ESTABELECIDO PELA ISO 834:1999

A ISO 834:1999 em seu capítulo 10 trata a respeito dos critérios de desempenho que devem ser considerados na avaliação da resistência ao fogo de diversas formas de construção de edifícios, que forem submetidos ao teste de incêndio padrão.

O item 10.2.1 da mesma norma trata da capacidade de carga, ou seja, o tempo decorrido para o qual a amostra de teste continua a manter sua capacidade de suportar a carga durante o teste realizado. A mesma norma indica que a taxa de falha deve ser determinada tanto pela quantidade (valor absoluto) quanto pela taxa de deflexão (deslocamento por tempo).

Estes valores são obtidos tanto para elementos submetidos a flexão quanto para elementos submetidos a flexocompressão. Os itens 10.2.1a e 10.2.1b da ISO 834:1999 mostram as taxas de falhas para elementos submetidos a flexão e flexocompressão, respectivamente.

- Limite de deflexão para elementos submetidos a flexão (ISO 834:1999 – item 10.2.1a):

$$D = \frac{L^2}{400d} mm \quad (32)$$

- Taxa de deflexão para elementos submetidos a flexão (ISO 834:1999 – item 10.2.1a):

$$\frac{dD}{dt} = \frac{L^2}{9000d} mm/min \quad (33)$$

Onde:

L é o vão livre da viga ou laje em milímetros;

d é a distância da fibra mais comprimida até a fibra mais tracionada em milímetros.

- Limite de contração axial para elementos submetidos a flexocompressão (ISO 834:1999 – item 10.2.1b):

$$c = \frac{h}{1000} mm \quad (34)$$

- Taxa de contração axial para elementos submetidos a flexocompressão (ISO 834:1999 – item 10.2.1b):

$$\frac{dC}{dt} = \frac{3h}{1000} mm/min \quad (35)$$

Onde h é a altura inicial em milímetros.

3 MODELAGEM COMPUTACIONAL

3.1 INTRODUÇÃO

Para a análise dos modelos estudados foi utilizado o software comercial ABAQUS, que é um programa baseado no método dos elementos finitos que tem por objetivo resolver numericamente equações diferenciais, aplicados em diversas áreas da engenharia, mais especificamente utilizado em indústrias automotivas e aeroespaciais. O ABAQUS foi inicialmente projetado para abordar o comportamento não linear dos materiais analisados. Possui uma ampla biblioteca de materiais e uma ótima solução para problemas de transferência de calor.

Devido a estas abordagens, foi adotado este software para analisar e apresentar os resultados no presente capítulo.

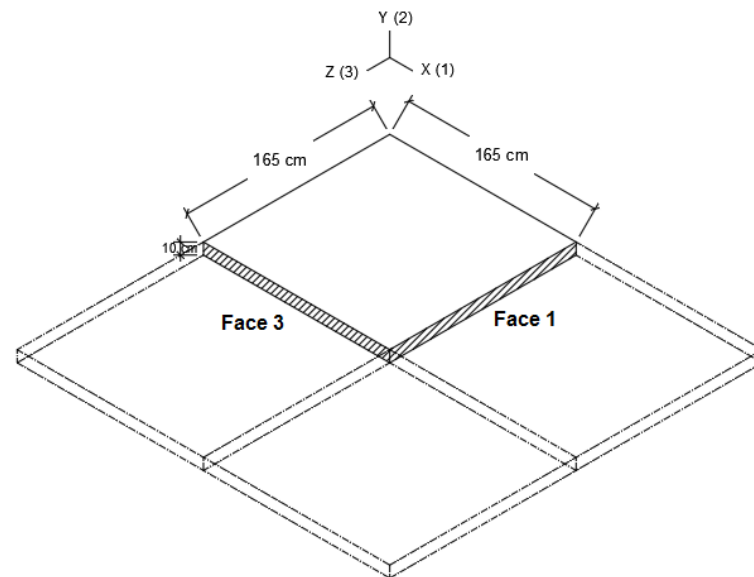
3.2 HIPÓTESES DE CÁLCULO

O presente trabalho tratou de analisar casos de laje de concreto armado em situação de incêndio.

Todos os modelos analisados neste item foram considerados com um incêndio na inferior da peça, ou seja, o incêndio de baixo para cima. No estudo comparativo com a laje analisada por Wang (2016) foi adotado a curva de aquecimento do forno, fornecido pelo autor. Para a análise da laje proposta no presente trabalho, como não houve estudos experimentais, adotou-se a curva de aquecimento estabelecida pela ISO 834:1999.

Para a laje proposta no experimento de Wang (2016), apresentada no capítulo anterior, foi utilizado um artifício para otimização dos resultados: foi considerado um quarto da laje e nos onde há continuidade de material, para a análise mecânica, foi restringido o deslocamento nas direções perpendiculares. A Figura 13 ilustra a utilização deste artifício.

Figura 13 - Deslocamento nas direções perpendiculares



Fonte: O autor, 2017.

As faces hachuradas terão seus respectivos deslocamentos horizontais restringidos devido a continuidade do material, ou seja, para a face 1 deverá ser restringido o deslocamento na direção “X” (1), e para face 3 deverá ser restringido o deslocamento na direção “Z” (3), conforme indicado nos eixos auxiliares.

Esta recomendação foi proposta inicialmente por Guo (2012), e posteriormente testada por Sousa, P. (2017), obtendo resultados satisfatórios.

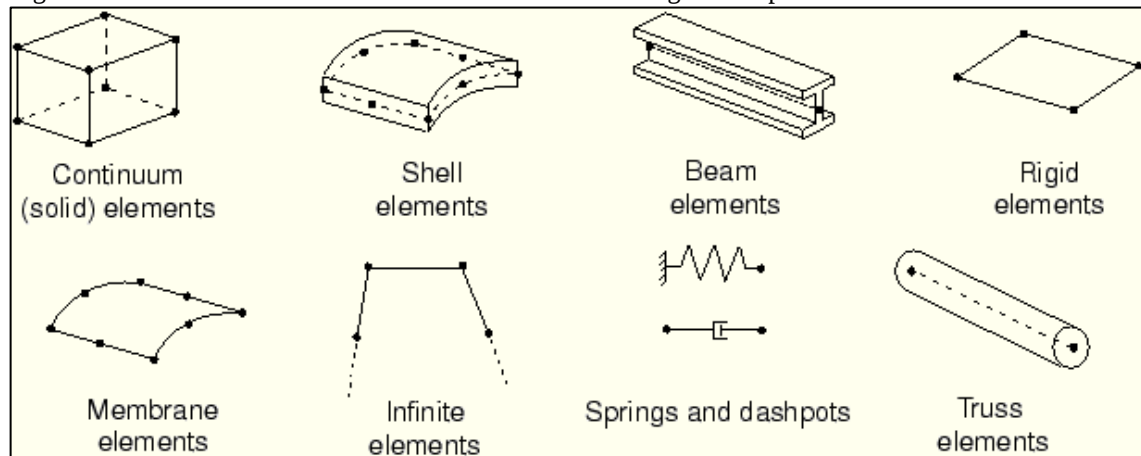
3.3 PLATAFORMA ABAQUS

O ABAQUS possui uma extensa biblioteca de elementos que formam uma poderosa ferramenta para a solução de diferentes problemas.

Cada elemento é caracterizado pela família, graus de liberdade, número de nós, formulação e integração, além de ter um nome exclusivo que caracteriza a função do elemento em meio ao problema que será aplicado.

A Figura 14 mostra as famílias de elementos mais utilizadas nas modelagens computacionais.

Figura 14 - Famílias de elementos mais utilizadas nas modelagens computacionais



Fonte: ABAQUS, 2013.

A nomenclatura do elemento é baseada na família. A primeira letra que forma o nome de um elemento informa qual família este pertence, ou seja, se o elemento pertence à família “SHELL” a primeira letra do nome do elemento será “S”.

Os graus de liberdade são a quantidade de números reais necessários para determinar completamente a solução de um determinado problema. Para análise estática os graus de liberdade são as rotações e deslocamentos em cada nó, em uma análise térmica, problema de transferência de calor, os graus de liberdade são as temperaturas nos nós.

O ABAQUS adota a seguinte convenção para os graus de liberdade:

- 1 – Translação na direção 1;
- 2 – Translação na direção 2;
- 3 – Translação na direção 3;
- 4 – Rotação em torno do eixo 1;
- 5 – Rotação em torno do eixo 2;
- 6 – Rotação em torno do eixo 3;
- 7 – Deformação em seção aberta em elementos de viga;
- 8 – Pressão acústica;
- 9 – Potencial elétrico;
- 11 – Temperaturas para elementos contínuos (continuum elements) ou no primeiro ponto através da espessura de vigas ou cascas;
- 12+ - temperaturas em outros pontos através da espessura de vigas e cascas.

Os elementos assimétricos seguem orientação de graus de liberdade diferentes das apresentadas acima, como não serão utilizados no presente trabalho, não serão abordados nesta seção.

Os números de nós de um elemento indicam qual tipo de solução haverá no caso estudado, visto que, a solução é dada diretamente nos nós. Elementos contínuos, possuem naturalmente 4 nós elementares, neste caso este elemento terá 4 soluções para seu grau de liberdade, com uma função de interpolação linear. Este elemento é chamado de elemento com aproximação linear, ou elemento de primeira ordem. Se este mesmo elemento possuir nós nas arestas intermediárias, formando um total de 20 nós por elemento, obtém-se 20 soluções para o grau de liberdade, com uma função de interpolação quadrática. Este elemento é chamado de elemento quadrático ou de segunda ordem. Em geral os elementos de segunda ordem possuem uma solução mais poderosa que o de primeira ordem.

Normalmente o número de nós em um elemento é identificado em seu nome. O elemento C3D20, é um elemento da família “CONTINUUM” e possui 20 nós para sua solução, portanto, um elemento de aproximação quadrática.

A formulação de um elemento se refere a base matemática utilizada para definir seu comportamento. Elementos para solução de problemas estruturais possuem comportamentos lagrangianos. O nome do elemento não é influenciado pelo tipo de formulação utilizado, salvo em casos que algumas famílias possuam formulações específicas para determinados problemas. Assim sendo, estes elementos serão identificados por uma letra no final de seu nome.

Algumas formulações de elementos permitem resolver problemas acoplados, por exemplo, elementos cujos nomes começam com a letra “C” e terminam com a letra “T” possuem graus de liberdade mecânicos e térmicos e são utilizados para problemas térmico-mecânico.

O principal método de integração utilizado pelo ABAQUS, é o método da quadratura gaussiana, onde o ABAQUS avalia a resposta material em cada ponto de integração em cada elemento.

Para elementos da família “CONTINUUM” deve-se optar entre integração total ou reduzida, para a obtenção de melhores resultados em diferentes tipos de problemas. Para elementos com integração reduzida o ABAQUS adota a letra “R” no final de seu nome.

3.3.1 Elementos sólidos (contínuos)

Os elementos sólidos podem ser utilizados para análise linear e não linear, envolvendo contato, plasticidades e grandes deformações. Este tipo de elemento é disponível para análise estrutural, transferência de calor, acústica, acoplamento térmico e análises térmicas e elétricas.

A biblioteca padrão de elementos sólidos do ABAQUS inclui elementos de interpolação de primeira e segunda ordem, linear e quadrático, especificamente.

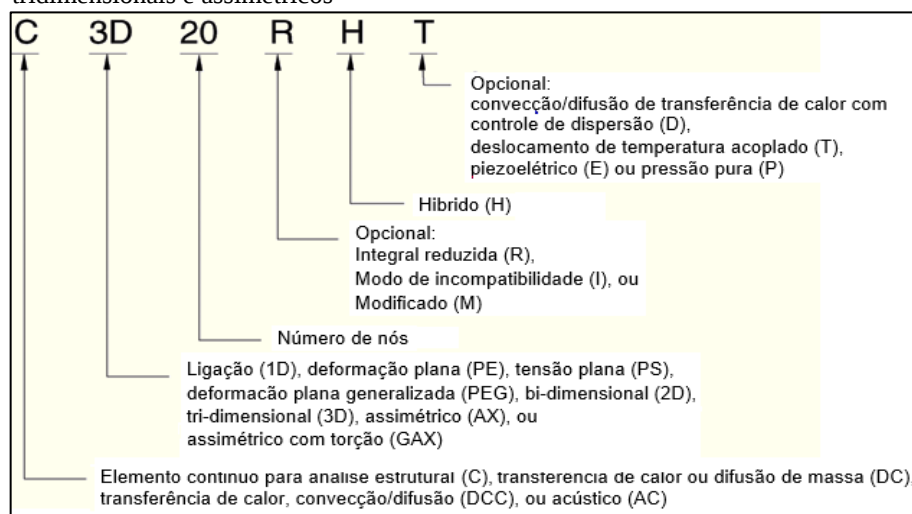
Os elementos cilíndricos (CCL9, CCL9H, CCL12, CCL12H, CCL18, CCL18H, CCL24, CCL24H e CCL24RH) são disponíveis para modelagem de elementos com geometria circular. Utilizam funções trigonométricas para interpolar os deslocamentos ao longo da direção circunferencial e usam interpolação isoparamétrica regular no plano radial ou em corte transversal do elemento. Todos os elementos usam três nós ao longo da direção circunferencial e podem atingir ângulos entre 0 e 180 graus. Podem ser utilizados como elementos de primeira ou segunda ordem.

A saída dos resultados é feita em um sistema cilíndrico local, onde as direções 1, 2 e 3 são as direções radial, axial e circunferencial, respectivamente.

As convenções de nomenclatura dos elementos sólidos dependem da dimensionalidade do elemento.

A Figura 15 mostra a denominação de elementos sólidos unidimensionais, bidimensionais, tridimensionais e assimétricos.

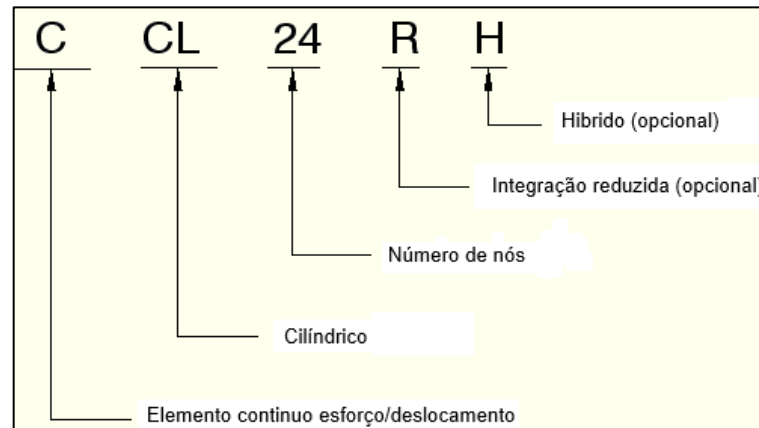
Figura 15 - Denominação de elementos sólidos unidimensionais, bidimensionais, tridimensionais e assimétricos



Fonte: ABAQUS, 2013.

A Figura 16 mostra a denominação dos elementos cilíndricos para família “CONTINUUM”.

Figura 16 - Denominação dos elementos cilíndricos para família “CONTINUUM”



Fonte: ABAQUS, 2013.

A presente pesquisa foi realizada com uma análise sequencial, ou seja, primeiro foi realizada uma análise térmica e depois se tomou os resultados e aplicou-se como dados de entrada para a análise mecânica.

Assim sendo, foram adotados dois elementos distintos para cada análise. Para a análise térmica foi utilizado o elemento DCC3D20, elemento para transferência de calor com aproximação quadrática. Para a análise mecânica foi utilizado o elemento C3D20, elemento para problemas estruturais com aproximação quadrática. Estes elementos se mostraram eficazes nos modelos analisados, com um tempo de processamento próximo aos elementos de primeira ordem.

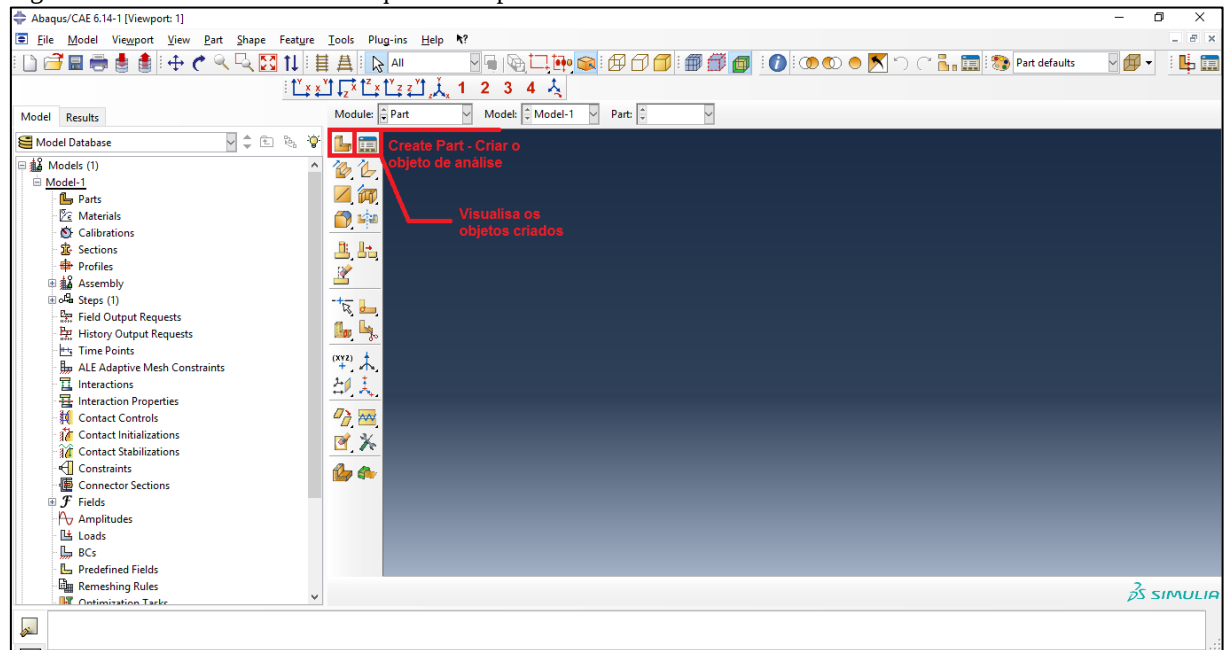
3.3.2 Modelagem do estudo de caso

Para a demonstração do estudo analisado será mostrada neste tópico a modelagem da laje do experimento de Wang (2016) na plataforma ABAQUS.

O modelo foi feito com elementos tipo sólido tomando a sequência seguida abaixo.

Inicialmente criou-se as peças no menu “Part”, subitem “Create a Part”. Foram criados dois sólidos, equivalentes ao concreto da laje e aço da armadura de flexão. A figura 17 mostra a área de trabalho do abqus no campo “Part”.

Figura 17 - Área de trabalho do abqus no campo "Part"

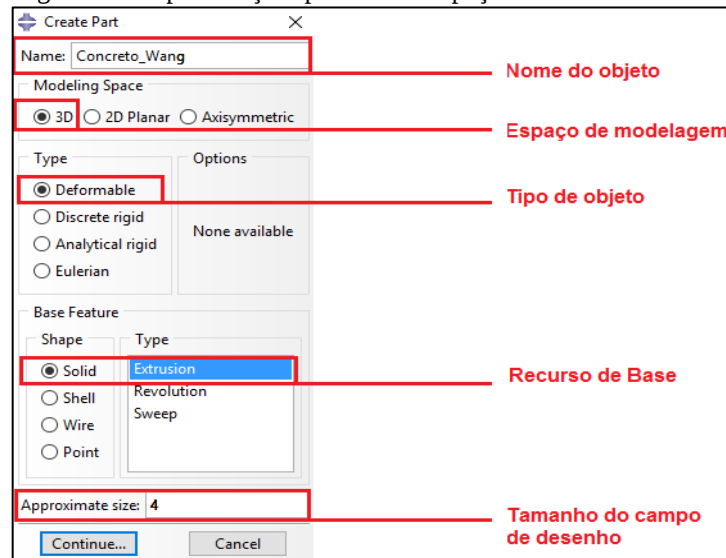


Fonte: O autor, 2017.

Quando o menu create part é acionado aparece as especificações que deverão ser consideradas para o objeto criado. Primeiramente o material deverá ser nomeado. Como neste caso ambos os materiais são compostos por sólidos, ou seja, tridimensional, o espaço de modelagem (Modeling Space) será o 3D, o tipo de objeto (Type), será Deformable, ou seja, um objeto deformável, o recurso de base (Base Feature), será o Solid, neste modelo adotado com a opção Extrusion. No final da programação há uma janela para colocar o tamanho aproximado da área de desenho do material. O tamanho da área de desenho dependerá de como será feito o esboço da peça analisada, neste modelo foi desenhada a seção transversal e depois, devido a opção Extrusion marcada, foi aplicado um exdrude com o valor da largura da peça. Atentar que o abaqus não tem a opção de selecionar o sistema de unidades, logo se deve adotar um sistema que seja compatível com as unidades de entrada. Neste modelo, para facilitar nas entradas de unidades, foram adotadas as unidades do sistema internacional (SI), ou seja, todos os dados de entrada e saída serão no SI. Concluída a programação inicial clica em “continue”.

A Figura 18 mostra todas as especificações necessárias para modelar a peça.

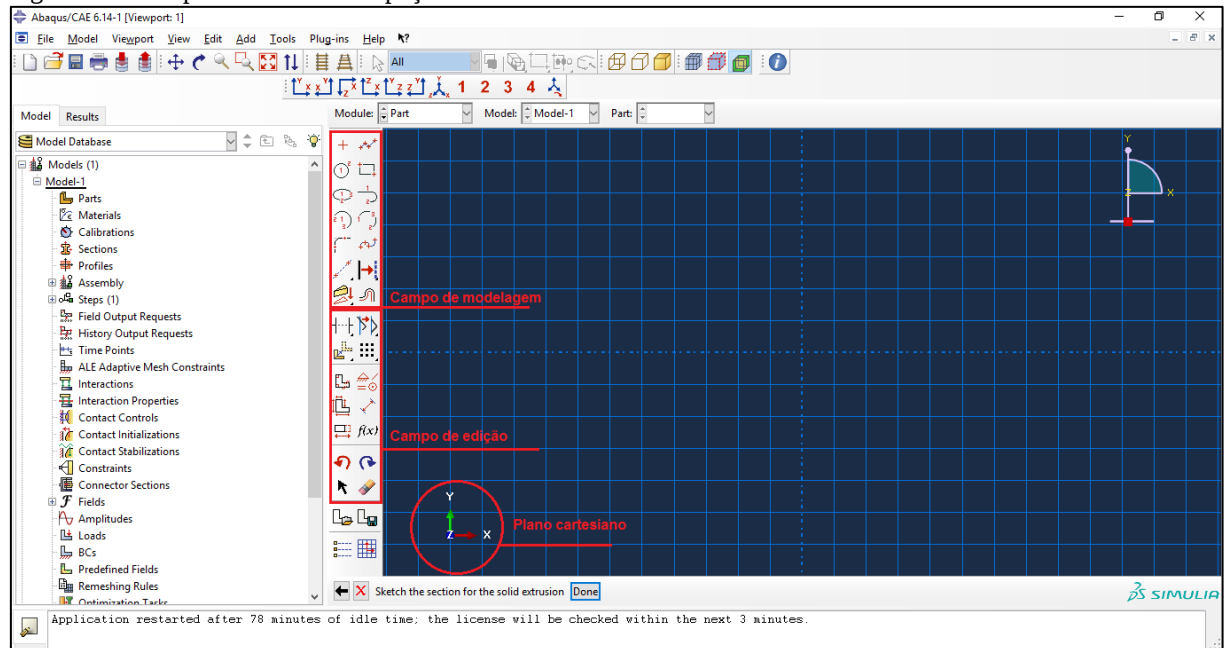
Figura 18 - Especificações para modelar peça



Fonte: O autor, 2017.

A Figura 19 mostra o campo de desenho das peças do menu Part. Na figura pode ser verificado que o plano adotado no desenho é o plano cartesiano.

Figura 19 - Campo de desenho das peças do menu Part



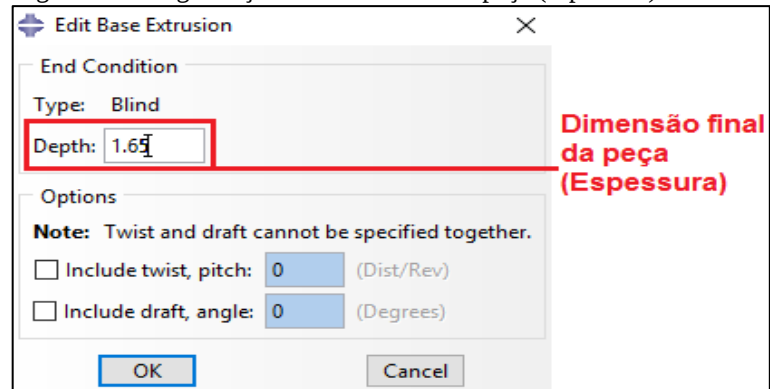
Fonte: O autor, 2017.

É importante notar que o objeto desenhado sempre estará na posição que foi desenhado no plano cartesiano da Figura 10.

Concluído o desenho e clicando em “done” aparecerá uma aba que pedirá o valor da espessura da seção transversal desenhada. Neste caso, como foi desenhada a seção transversal, este valor (em metro) será a largura da laje analisada, que é de 1,65 metros.

A figura 20 mostra a programação desta etapa.

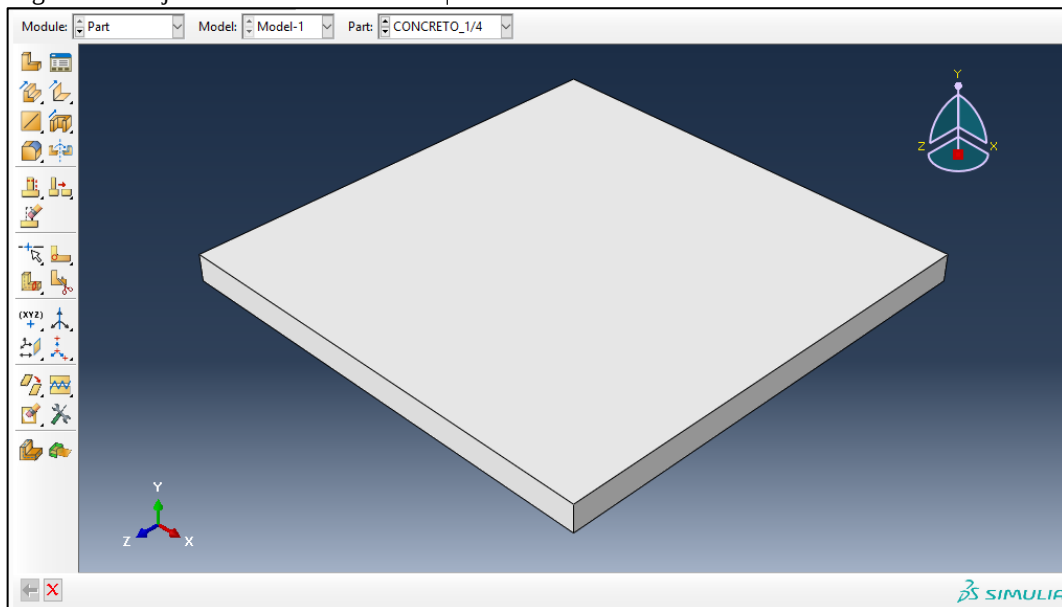
Figura 20 - Programação dimensão final da peça (espessura)



Fonte: O autor, 2017.

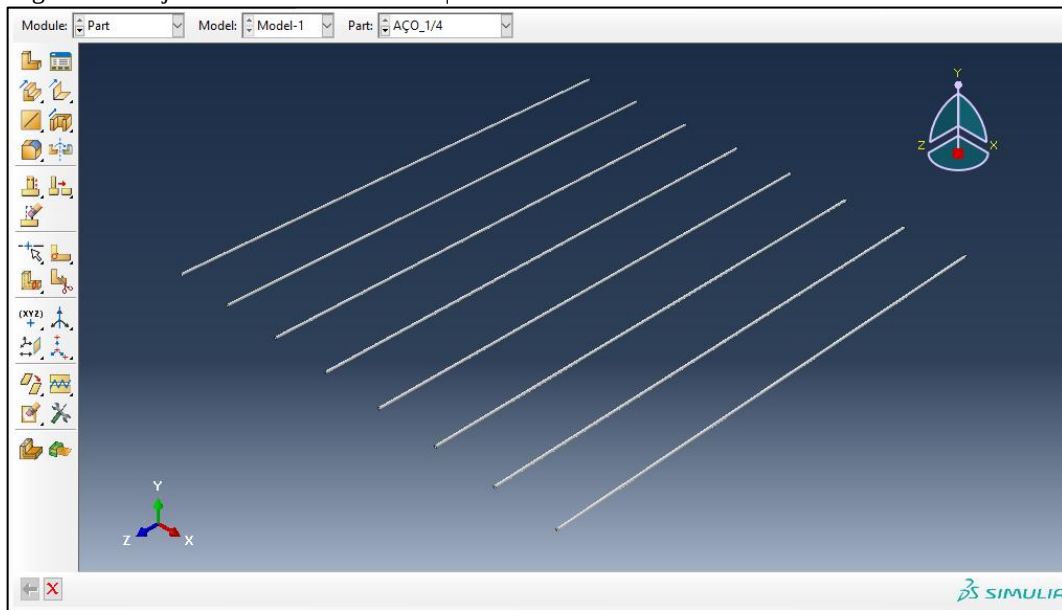
As Figuras 21 e 22 mostram a laje de concreto e a armadura, respectivamente.

Figura 21 - Laje de concreto e armadura | A



Fonte: O autor, 2017.

Figura 22 - Laje de concreto e armadura | B



Fonte: O autor, 2017.

A figura 22 mostra a armadura aplicada em apenas uma direção, no entanto esta será ajustada para duas direções no menu “Assembly”.

Para finalizar a modelagem dos objetos no menu “Part”, é necessário partir os sólidos de modo que os nós das peças casem entre si, a fim de garantir o contato entre as faces através dos nós. Este artifício deve ser feito em casos de estruturas de concreto armado. Contudo ao fazer este procedimento, a modelagem ficará mais lenta, independentemente do tipo de elemento ou tamanho de malha que será adotado. Por isso, no modelo estudado as divisões feitas no concreto e na armadura foram direção horizontal, de modo que a linha divisória no concreto passasse no mesmo plano onde passa o centro da armadura.

Existem diversas maneiras de partir a peça. No presente trabalho este procedimento foi realizado do seguinte modo:

- Foi criado um Datum Plane: esta etapa foi realizada de forma separada entre a peça da armadura e do concreto. Para a peça da armadura foi criado um plano a partir de três pontos. Dois pontos foram de dois centros distintos em uma mesma linha e o terceiro ponto foi do outro lado da armadura, também no centro. Deve-se ter cuidado para não tomar pontos desnivelados, pois desta forma o plano ficará inclinado. Desta forma foi formado um plano que passa pelo centro da armadura. Para a peça do concreto foi criado um plano a partir de outro plano principal (Offset from a Principal Plane), sendo estes os “xy”,

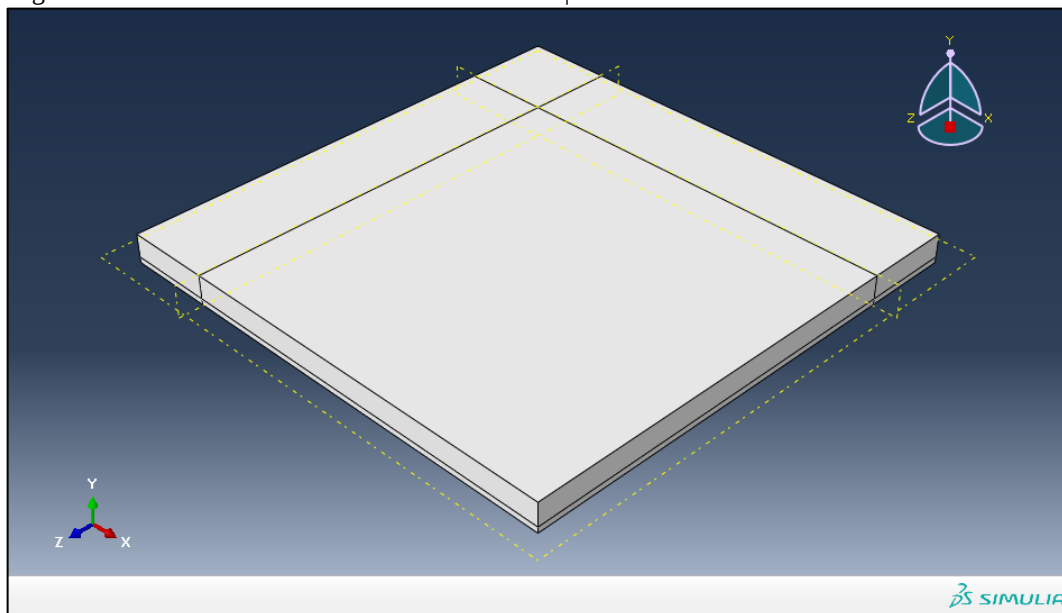
“yz” e “xz”. Como a seção transversal da peça de concreto foi criada no plano “xy” sua face inferior está no plano “xz”. Então o plano principal para criação do “Datum Plane” foi o plano “xz”. Este novo plano deve ser criado de modo que esteja no centro da armadura, então o valor de referência a partir do plano “xz” será de 0,025 metros (considerando o cobrimento do concreto e o centro da armadura);

- Foi criada a divisão (Create a Partition): nesta etapa, para ambas as peças, foi feita a divisão da peça no submenu Create a Partition, selecionando o tipo “Cell” seguido da opção “Use a Datum Plane”. Em sequência foi selecionado toda a estrutura e depois o plano criado na etapa anterior. Finaliza a etapa com Done.

Para simular o apoio da laje, conforme Figura 25, também foi feito o mesmo procedimento, na peça de concreto e armadura.

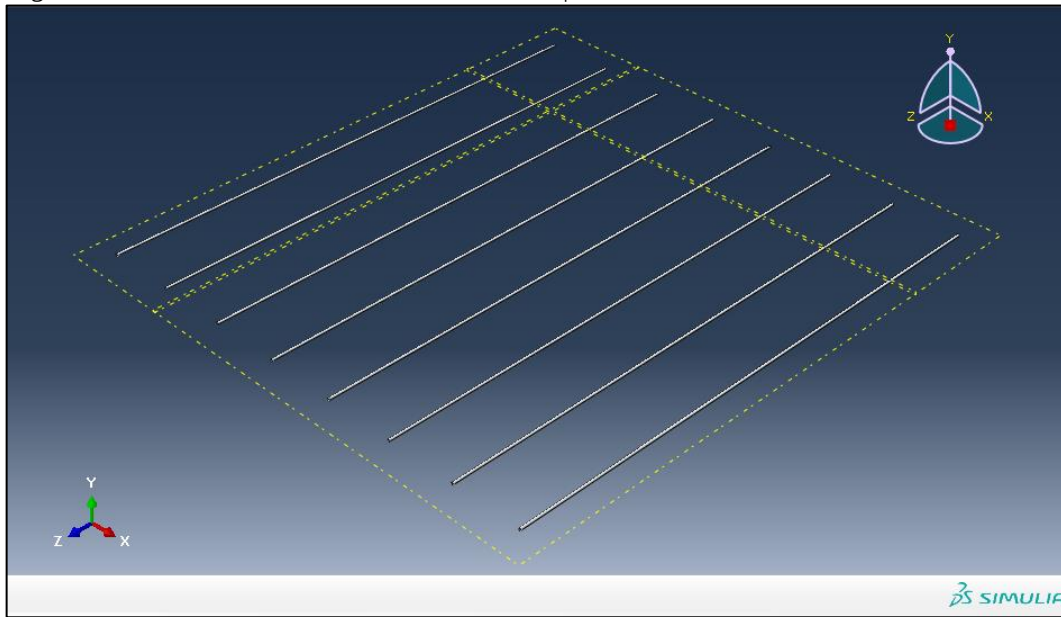
As Figuras 23 e 24 mostram o concreto e a armadura com suas respectivas divisões.

Figura 23 - Concreto e armadura com suas divisões | A



Fonte: O autor, 2017.

Figura 24 - Concreto e armadura com suas divisões | B



Fonte: O autor, 2017.

Alguns usuários tem a preferência de refinar a malha ao mesmo tempo em que faz as divisões da peça a analisar. Neste modelo foi seguida a sequência do menu do Abaqus.

Com a etapa dos sólidos concluída, deve-se informar as propriedades dos materiais no menu “Property”. Para isto deve-se criar os materiais que serão analisados neste menu (Create Material) e depois caracterizar os sólidos criados com estes materiais. Neste modelo serão criados dois materiais: o concreto de 28 Mpa e o aço CA-50, ambos equivalentes ao modelo do experimento de Wang (2016).

Como se trata de uma análise termomecânica deve-se considerar as seguintes propriedades dos materiais:

- Condutividade térmica;
- Massa específica (densidade);
- Módulo de elasticidade;
- Coeficiente de expansão térmica;
- Calor específico.

Para o concreto, deve considerar a propriedade plástica, referente à sua resistência a tração e compressão, denominada no Abaqus Concrete Damaged Plasticity. Foram considerados os valores de 53, 0,1, 1,16, 0,667 e 0 para o Dilation Angle, Eccentricity, f_{b0}/f_{c0} , K e Viscosity Parameter, respectivamente.

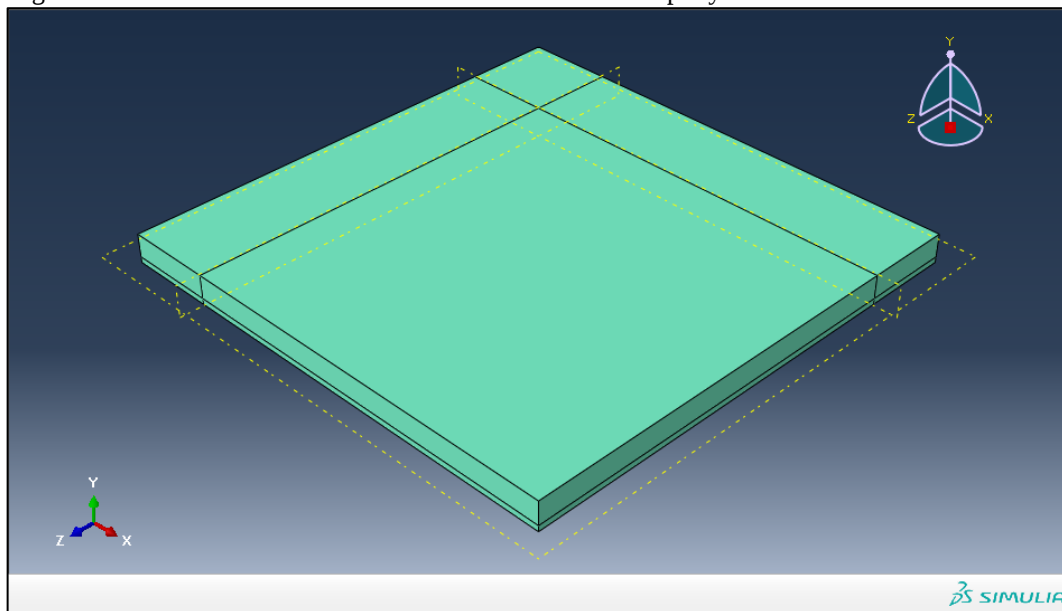
No aço deve considerar a propriedade plástica referente a sua resistência a tração, denominada no Abaqus Plastic.

Os valores das propriedades dos materiais foram obtidos através das formulações do capítulo 2.

Depois de ter criado os materiais deve-se criar uma seção equivalente ao material desejado para poder atribuir à peça criada no menu Part.

Quando se atribui o material à peça fica com a coloração verde, informando que está com todas as atribuições de material aplicadas. Este detalhe pode ser observado na Figura 25, que mostra o concreto com seu material atribuído no menu Property.

Figura 25 - Concreto com seu material atribuído no menu Property



Fonte: O autor, 2017.

Concluída esta etapa, a próxima será o menu Assembly. Neste menu será tomada todas as peças criadas no menu Part e organizada de forma coerente para dar sequência na análise.

Neste menu, para adicionar as peças criadas, deve-se ir em “Create Instance”, onde abrirá uma aba com todas as peças criadas, para que seja adicionada para a análise. Quando o modelo analisado for constituído de duas ou mais peças, deve-se optar pelas seguintes alternativas:

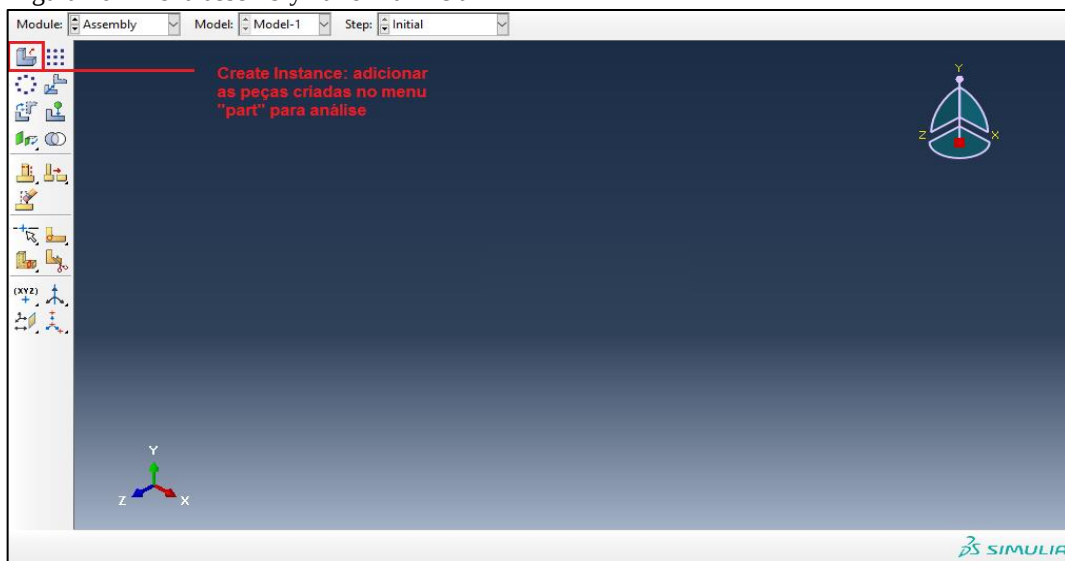
- Dependent (mesh on part) – se esta opção for marcada, a malha deverá ser feita no sólido criado, de forma isolada;

- Independent (mesh on instance) – nesta opção a malha deverá ser feita no menu assembly e com a opção de refinar todos os elementos de uma só vez em uma só malha.

Para este modelo, foi selecionada a opção de “Independent”.

A Figura 26 mostra o menu assembly em sua forma inicial.

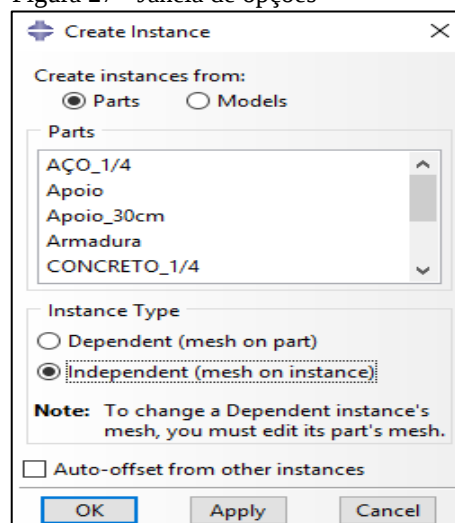
Figura 26 - Menu assembly na forma inicial



Fonte: O autor, 2017.

A Figura 27 mostra a janela com as opções.

Figura 27 - Janela de opções

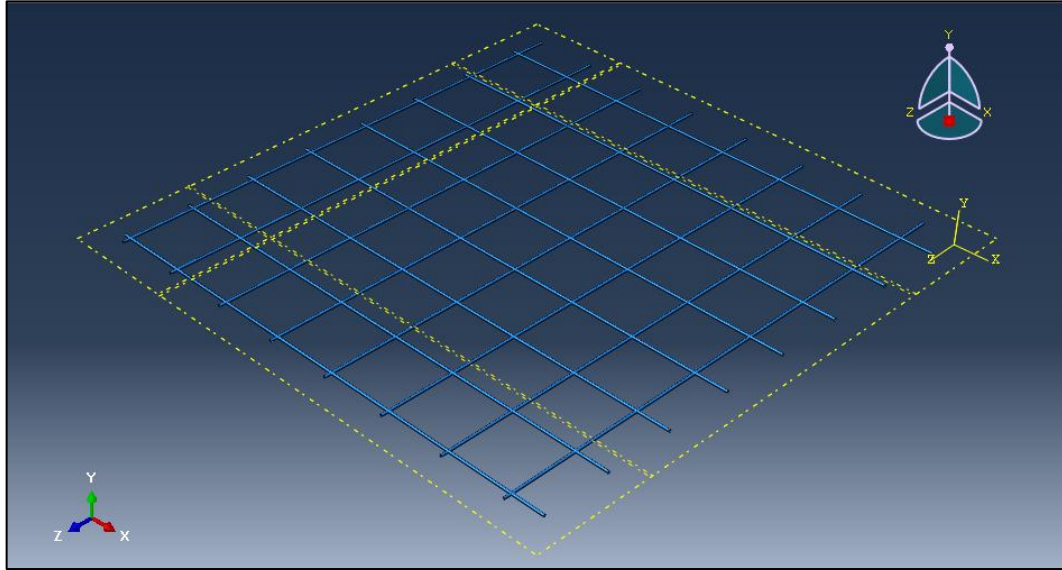


Fonte: O autor, 2017.

Devido ser uma laje armada em duas direções, ao adicionar a armadura, atentar para girar a fim de posiciona-la na direção perpendicular à que foi criada, deste modo, ficará com as armaduras nas duas direções assim como no experimento citado. Neste caso, deve-se adicionar a armadura duas vezes, uma equivalente a direção “lx” e outra a “ly”.

A figura 28 mostra as armaduras posicionadas nas duas direções

Figura 28 - Armaduras posicionadas nas duas direções

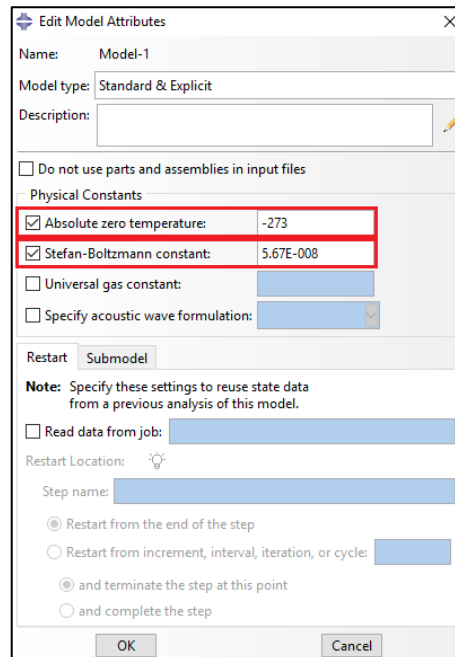


Fonte: O autor, 2017.

Depois de adicionado o concreto e finalizada a etapa do menu Assembly, seguirá na sequência com o menu Step. Para ativar as funções de transferência e calor, deve-se informar o zero absoluto, que na escala Kelvin vale -273, e a constante de Stefan-Boltzmann, que de acordo com o EUROCODE 3 Part 1-2, vale $5,67 * 10^{-8}$.

Estes valores devem ser ajustados no menu Model seguido de Edit Attributes e Model-1. A Figura 29 mostra a janela para os ajustes do zero absoluto e constante de Stefan-Boltzmann.

Figura 29 - Janela para os ajustes do zero absoluto e constante de Stefan-Boltzmann



Fonte: O autor, 2017.

Concluída esta etapa, a próxima será o menu Step. Nesta etapa é necessário programar toda a modelagem, como por exemplo, o tipo de análise e dados de saída. Este modelo foi composto por três análises distintas:

- Análise térmica (chamado de Aquecimento): nesta etapa foi simulado o incêndio de 3 horas de duração, aplicado na face inferior da laje;
- Análise mecânica em temperatura ambiente (chamado de Carga_Mecanica): nesta etapa foi simulado o comportamento da laje em temperatura ambiente, ou seja, foi simulado o estado da laje antes do incêndio – instante de aplicação do carregamento;
- Análise mecânica durante o incêndio (chamado de Carga_Termica): nesta etapa foi simulado o comportamento mecânico da laje durante as 3 horas de incêndio. Para isto, foi criado um “Step” dependente do tempo que usava como dado de entrada as temperaturas obtidas no “Step” da análise térmica.

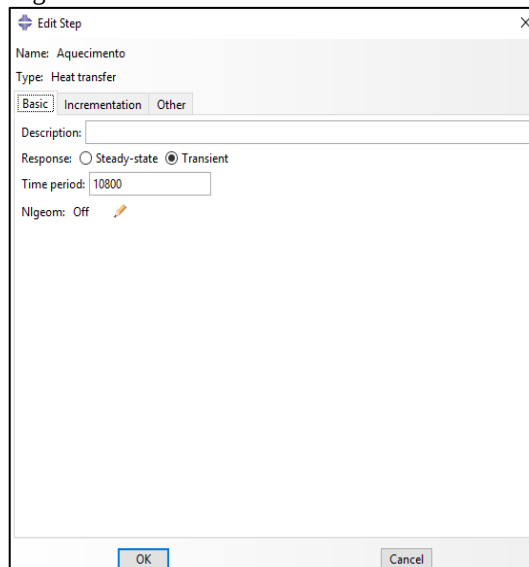
Para simular o incêndio do, da etapa “Aquecimento”, foi criado um “Step” do tipo “Heat Transfer”, que serve para solução de problemas de transferência de calor. Vale salientar que este tipo de problema é dependente do tempo, que deverá ser informado na programação. Para isto, deve-se ir ao item “Create a Step” e selecionar a opção “Heat transfer”. Em seguida

aparecerá uma janela para fazer toda a programação necessária da modelagem. Na guia “Basic” deve ser informado a resposta (Transient) e o tempo de duração, que como está no SI deverá ser informado em segundos. A duração do incêndio foi de 3 horas, ou seja, 10800 segundos. Como não há não linearidade geométrica, devido a deformações ao longo do tempo (por se tratar de uma análise térmica), este campo encontra-se desativado. Na guia “Incrementation” deve informar o número máximo de incrementos, que por padrão este número máximo é de 100, e para que a modelagem não falhe, por falta de tentativas, deve-se aumentar para um número grande. Neste modelo foi adotado 1000000. Na mesma guia deve-se informar o tamanho do incremento (Increment size), ou seja, o passo em que o programa analisará a temperatura, onde o inicial vale 1, o mínimo vale $1 * 10^{-5}$ (se o Abaqus precisar de um incremento de tempo menor do que esse valor para alcançar uma solução convergente, a análise será encerrada) e o máximo vale 10, neste caso o Abaqus analisa a temperatura a cada 10 segundos.

Na guia “Other” será especificado o tipo de solução matemática que o Abaqus irá utilizar na análise.

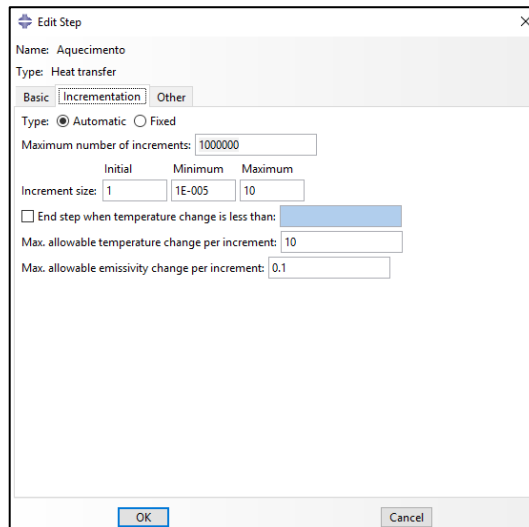
As Figuras 30, 31 e 32 mostram as guias “Basic”, “Incrementation” e “Other”, respectivamente, programadas para a análise térmica para o presente modelo.

Figura 30 - Guias "Basic" análise térmica



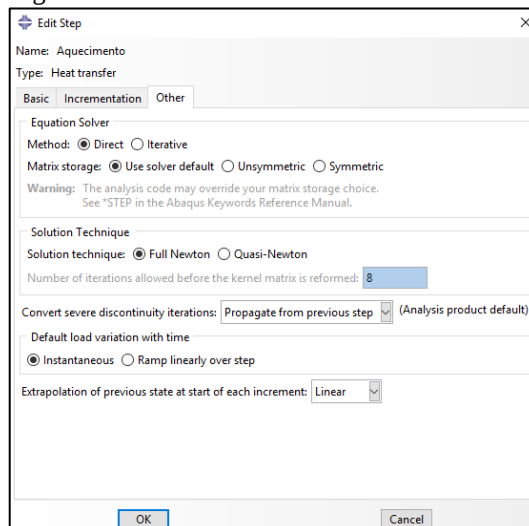
Fonte: O autor, 2017.

Figura 31 - Guias "Incrementation" análise térmica



Fonte: O autor, 2017.

Figura 32 - Guias "Other" análise térmica



Fonte: O autor, 2017.

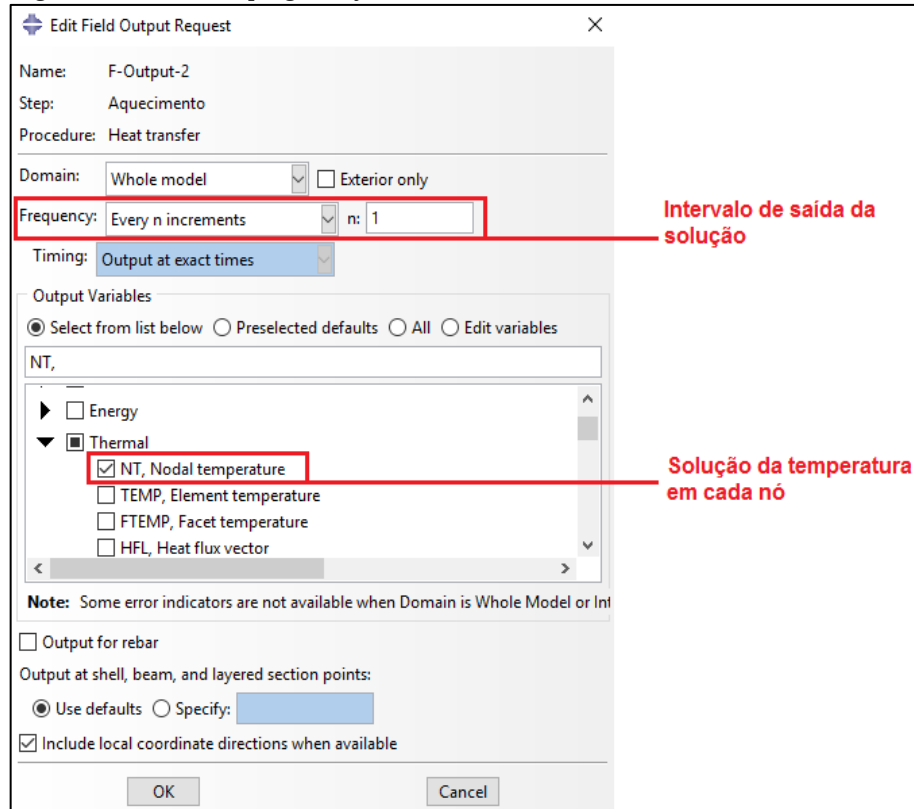
Depois de pronta esta etapa, deve-se programar os dados de saída, bem como onde o Abaqus deverá informar as respostas, nós ou elementos, e o intervalo em que deverão ser fornecidas.

Esta etapa deverá ser programada na guia “Create Field Output”. Para o presente modelo, foi apenas tomada a solução da temperatura nos nós dos elementos com uma frequência de cada incremento, ou seja, as respostas da temperatura serão fornecidas nos nós em um intervalo de 10 segundos. A quantidade de resposta que o usuário quiser obter não influi no tempo de solução, no entanto o arquivo de saída ficará mais pesado devido a grande

quantidade de soluções presentes em sua formulação. Por conta disso, nesta pesquisa só foi analisada as temperaturas nos nós.

A Figura 33 mostra a guia com a programação dos dados de saída da análise térmica.

Figura 33 - Guia com programação dos dados de saída da análise térmica



Fonte: O autor, 2017.

Para mais eficácia na modelagem, foram já programadas as etapas da carga mecânica e carga térmica antes de seguir os passos restantes. Para isto deve-se desabilitar momentaneamente a etapa do “Aquecimento”.

Ambas as etapas restantes foram criadas com a análise “visco”, pois são análises que dependerão do tempo do incêndio. A carga mecânica tem um período de tempo de 1 segundo (equivalente a carga instantânea), sendo que a não linearidade geométrica é ativada devido a geometria da armadura e futuras deformações que a peça sofrerá. As demais guias são feitas da mesma forma que a etapa anterior. As Figuras 34, 35 e 36, mostram as guias “Basic”, “Incrementation” e “Other”, respectivamente, programadas para a mecânica em temperatura ambiente para o presente modelo.

Figura 34 - Guia "Basic" temperatura ambiente

The screenshot shows the 'Edit Step' dialog box with the 'Basic' tab selected. The 'Name' field is 'Carga_Mecanica' and the 'Type' is 'Visco'. The 'Description' field is empty. The 'Time period' is set to '1'. The 'Nlgeom' option is 'On'. The 'Automatic stabilization' dropdown is set to 'None'. At the bottom are 'OK' and 'Cancel' buttons.

Fonte: O autor, 2017.

Figura 35 - Guia "Incrementation" temperatura ambiente

The screenshot shows the 'Edit Step' dialog box with the 'Incrementation' tab selected. The 'Name' is 'Carga_Mecanica' and 'Type' is 'Visco'. Under 'Type', 'Automatic' is selected. The 'Maximum number of increments' is '100000'. The 'Increment size' table has columns 'Initial', 'Minimum', and 'Maximum' with values '0.1', '1E-005', and '1' respectively. The 'Creep/swelling/viscoelastic strain error tolerance' is '1'. The 'Creep/swelling/viscoelastic integration' has 'Explicit/Implicit' selected. At the bottom are 'OK' and 'Cancel' buttons.

Fonte: O autor, 2017.

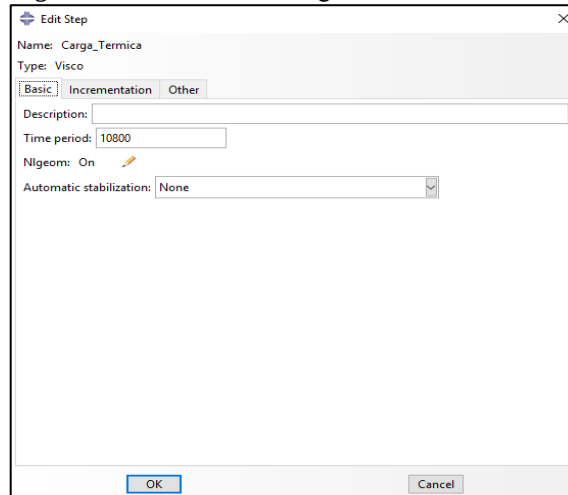
Figura 36 - Guia "Other" temperatura ambiente

The screenshot shows the 'Edit Step' dialog box with the 'Other' tab selected. The 'Name' is 'Carga_Mecanica' and 'Type' is 'Visco'. Under 'Equation Solver', 'Method' is 'Direct' and 'Matrix storage' is 'Use solver default'. A warning message is displayed. Under 'Solution Technique', 'Full Newton' is selected. The 'Number of iterations allowed before the kernel matrix is reformed' is '8'. The 'Convert severe discontinuity iterations' dropdown is 'Propagate from previous step'. Under 'Default load variation with time', 'Instantaneous' is selected. The 'Extrapolation of previous state at start of each increment' dropdown is 'Linear'. At the bottom are 'OK' and 'Cancel' buttons.

Fonte: O autor, 2017.

A carga térmica sucede a carga mecânica na ordem da análise, tem a mesma programação da carga mecânica, sendo que o tempo de duração desta etapa é equivalente ao tempo de duração do incêndio. A Figura 37 mostra a guia “Basic” desta etapa.

Figura 37 - Guia “Basic” carga térmica

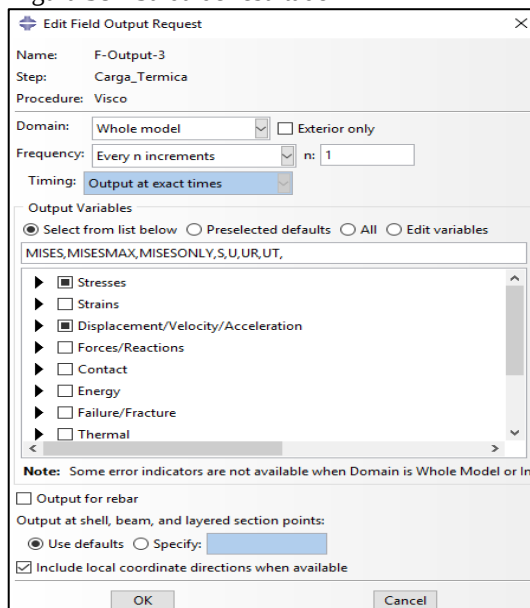


Fonte: O autor, 2017.

Em sequência devem-se programar os dados de saída das duas etapas acima. Como a carga térmica é uma sequência da carga mecânica, as saídas dos resultados foram programadas apenas para a carga térmica. Os resultados selecionados para saída foram os deslocamentos nos nós e as tensões nos nós e elementos.

A Figura 38 mostra a saída dos resultados para esta etapa.

Figura 38 - Saída de resultado



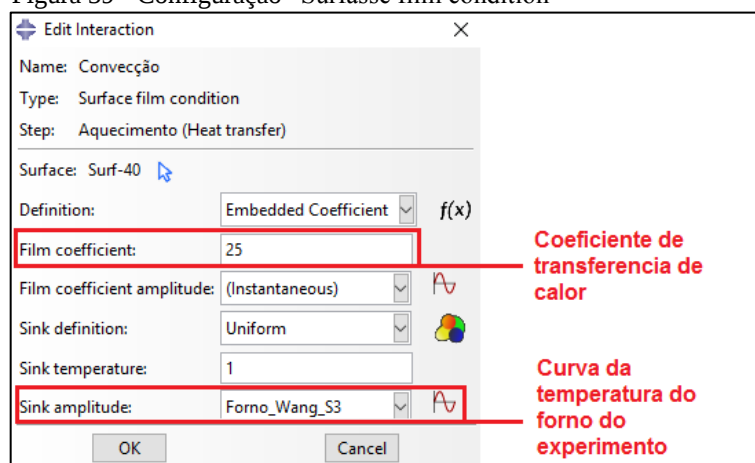
Fonte: O autor, 2017.

Depois de programada as duas etapas relativa a carga mecânica e carga térmica, deve-se desabilita-las e habilitar a etapa de aquecimento para dar sequência a modelagem do estudo de caso.

Concluída a etapa do menu “Step” segue-se a sequência com o menu “Interaction”. É nesta etapa que se atribui o tipo de incêndio e o tipo de contato entre os materiais.

Para o tipo de incêndio foram considerados como mecanismos de transferência de calor a convecção e a radiação. Ambos possuem a curva de aquecimento do forno do experimento de Wang (2016). Para a configuração destes mecanismos, deve-se na guia “Create Interaction”, selecionar qual o “Step” será aplicado (para o presente modelo foi no Step Aquecimento), renomear e selecionar qual o tipo de mecanismo de transferência de calor será utilizado. Para convecção deve-se selecionar o item “Surface film condition”, clicando em continuar deve-se selecionar o local que o incêndio atuará (para o presente modelo será a face inferior da laje). Pronta esta etapa e continuando, será informado o coeficiente de transferência de calor “film coefficient”, com um valor de 25. A temperatura será definida na guia “Sink temperature”, no entanto se for definida diretamente nesta guia, o incêndio ficará com uma temperatura constante, então na guia seguinte, “sink amplitude” deverá ser informada de forma tabular a curva do aquecimento do forno do incêndio, com o tempo em segundos e a temperatura em graus Celsius, e a guia sink temperature ficará como um fator que multiplicará as temperaturas da curva de aquecimento, ou seja, será 1. A Figura 39 mostra a configuração desta etapa.

Figura 39 - Configuração “Surface film condition”

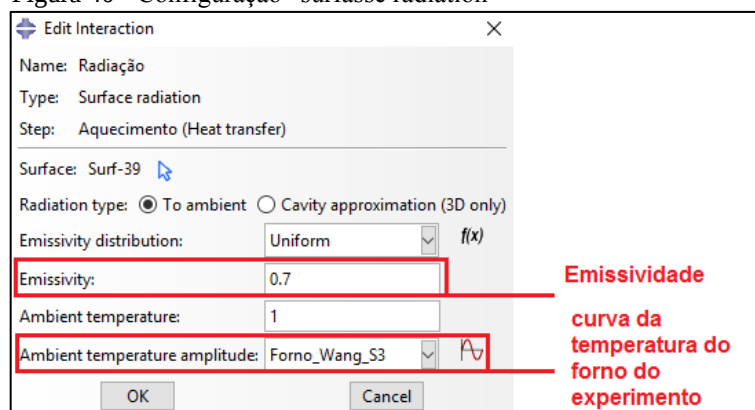


Fonte: O autor, 2017.

A radiação é criada na mesma forma através do item “surface radiation”. Na guia seguinte ao procedimento inicial, deve ser informada a emissividade, adotado neste modelo

0,7, e a temperatura do forno, que também deve ser informada de forma tabular, respeitando as unidades do sistema internacional de medidas. A Figura 40 mostra a configuração desta etapa.

Figura 40 - Configuração “surface radiation”



Fonte: O autor, 2017.

O contato adotado entre os dois materiais, para a análise térmica, no step Aquecimento, foi o “Tie”. Como há conexão entre os nós dos dois materiais, definido no menu Part, foi adotado que o contato será atribuído entre os nós. Este artifício foi utilizado devido a solução da temperatura ser entre os nós, caso contrário, a armadura não seria afetada pelo aquecimento da laje. Para a análise mecânica, foi adotado o “Embedded Region” para o contato entre o concreto e a armadura, neste caso entre as faces do concreto e armadura. Para a análise térmica, esta configuração ficou desativada, sendo acionada na análise mecânica.

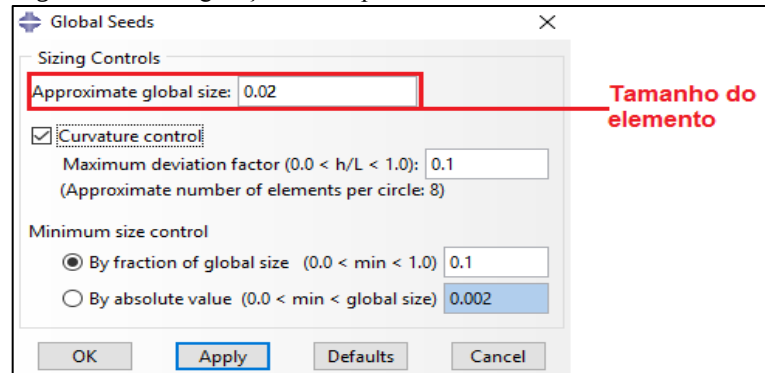
Concluída esta etapa, segue-se para o menu “Load”. Com o step aquecimento ativo, devido as condições das soluções de transferência de calor, primeiro configura-se as condições do aquecimento, que para este modelo será a temperatura ambiente na guia “Predefined Field Manager”. Esta temperatura ambiente deve ser criada no Step inicial, predefinido por padrão no Abaqus, e propagada para os demais Steps. Ao criar a temperatura, seleciona toda a estrutura e informa a temperatura ambiente a que a peça está submetida, que neste modelo foi 29 graus Celsius.

A próxima etapa é a malha do elemento no menu “Mesh”. Para definir o tipo de malha dos elementos deve-se fazer um estudo de malhar para verificar qual tipo e tamanho são mais efetivos para cada modelo. Baseado neste estudo foi utilizada uma malha, para o presente modelo, de 2 centímetros no concreto e armadura, com funções de interpolação de aproximação quadrática, na análise térmica. Estes valores ajustam automaticamente a seção

transversal da armadura, apesar de seu diâmetro não chegar a 2 centímetros, devido a divisão feita no menu Part.

Para configurar a malha do elemento, feito para o concreto e armadura simultaneamente, deve-se ir na guia “Seed Part Instance”, selecionar toda a peça e informar o tamanho da malha. A Figura 41 mostra a guia para configuração desta etapa.

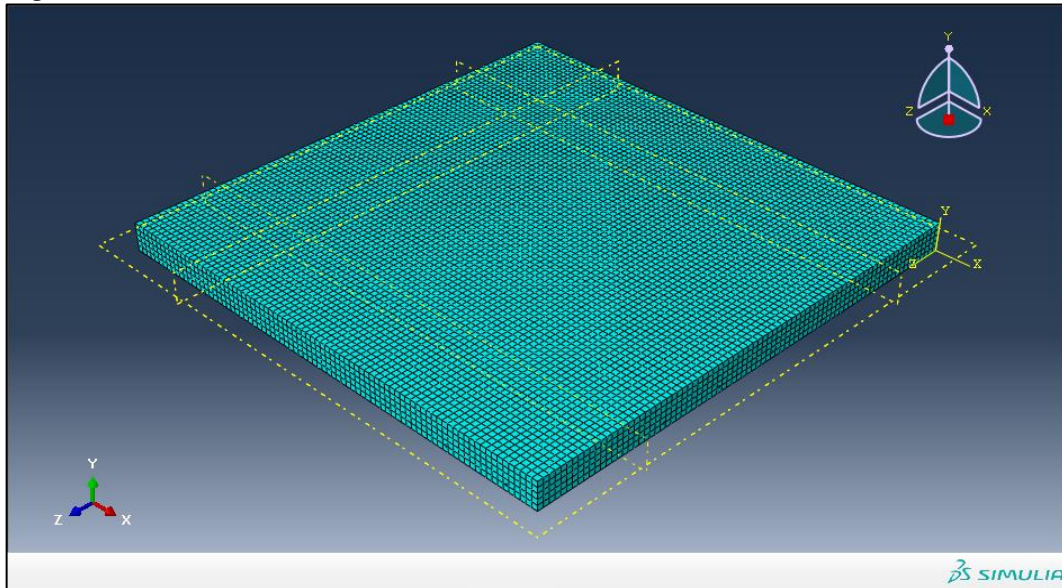
Figura 41 - Configuração “Seed part instance”



Fonte: O autor, 2017.

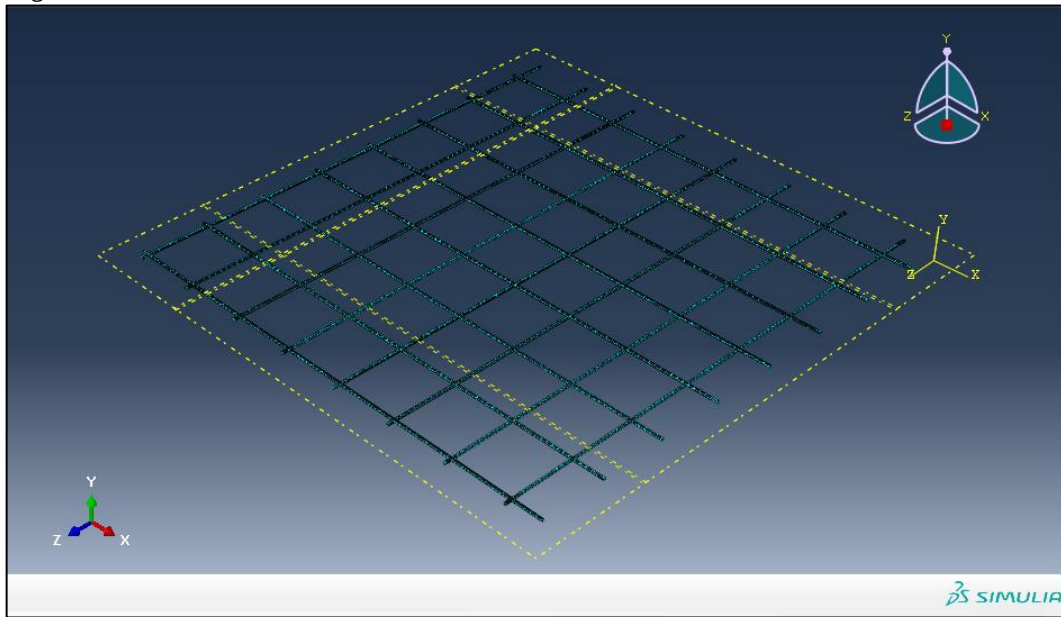
Aplicando a configuração anterior, deve-se confirmar a malha dos elementos na guia “Mesh Part Instance”. A Figura 42 e 43 mostram as malhas do concreto e armadura respectivamente.

Figura 42 - Malhas do concreto



Fonte: O autor, 2017.

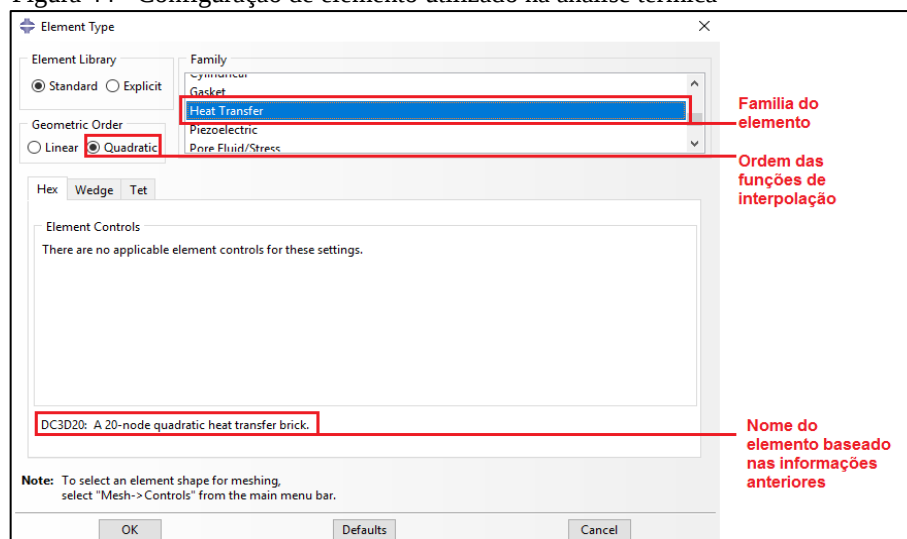
Figura 43 - Malha da armadura



Fonte: O autor, 2017.

Em sequência deve-se configurar o tipo de elemento e aproximação que será utilizado para a solução do problema. Neste modelo foi utilizado o elemento DC3D20, elemento da família Heat Transfer como funções de interpolação quadráticas. Este elemento possui uma solução mais poderosa que o D3D8, que possui funções de interpolação linear, no entanto o tempo de processamento é maior. Apesar disto, os resultados se mostram satisfatórios para o elemento DC3D20. A Figura 44 mostra a configuração do tipo de elemento utilizado na análise térmica.

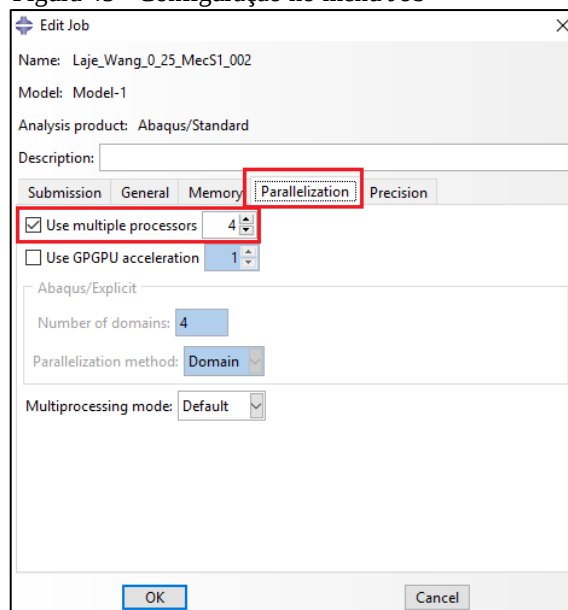
Figura 44 - Configuração de elemento utilizado na análise térmica



Fonte: O autor, 2017.

Após a conclusão desta etapa, finaliza a modelagem para a análise térmica, e pode seguir para o menu “Job” para dar início a solução do problema. Nesta etapa, é interessante configurar a quantidade de processadores que serão utilizados na solução. A presente pesquisa foi realizada com um computador da Lenovo, ideapad 310, DDR4, processador intel COREi7. Possui 8 GB de memória RAM, sistema operacional 64bits e 1 TB de HD. A máquina utilizada para o desenvolvimento da pesquisa possui 4 processadores lógicos e 2 núcleos. Com estas informações, foi configurado no menu job que o Abaqus utilizará os 4 processadores para a solução do problema, com isto, a máquina deverá estar apenas rodando o modelo quando estiver solucionando o problema. Foi observado que o tempo de obtenção de solução, considerando apenas o padrão do Abaqus, dois processadores, foi de 6 horas, enquanto que considerando os quatro processadores este tempo reduziu para 5 horas e 20 minutos, ou seja, uma economia de tempo de 40 minutos. A Figura 45 mostra a configuração desta etapa no menu Job.

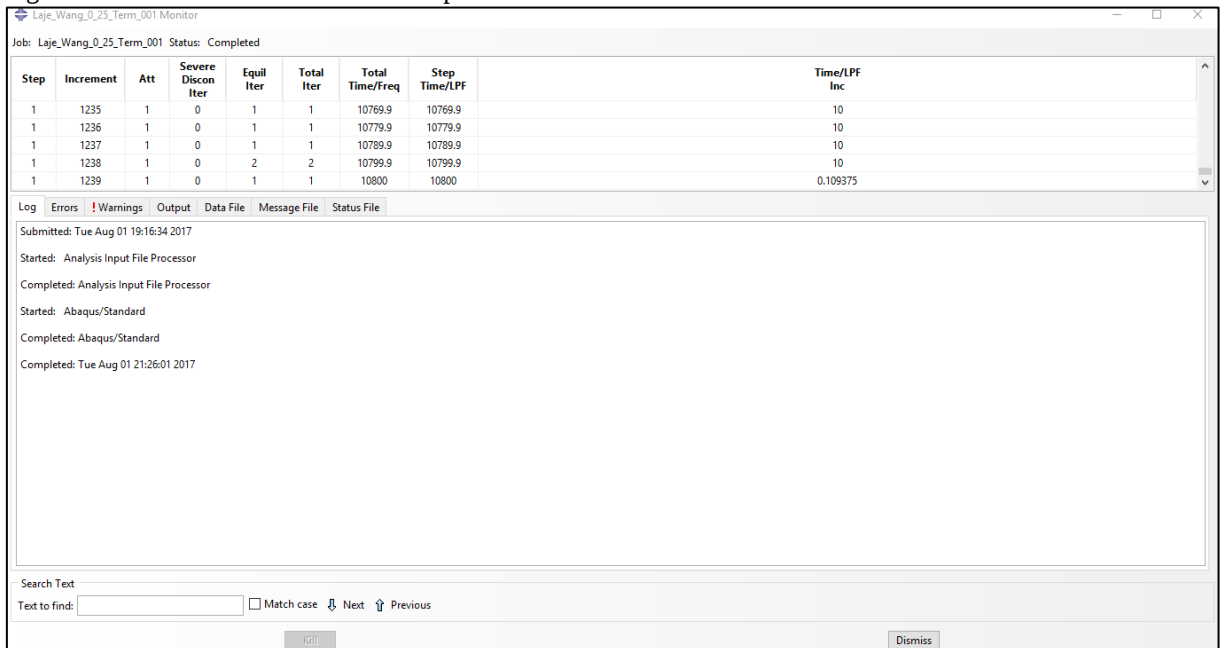
Figura 45 - Configuração no menu Job



Fonte: O autor, 2017.

Durante a etapa de processamento, há a possibilidade de o usuário acompanhar o andamento do problema, indo na guia Monitor. Esta guia pode ser observada na Figura 46.

Figura 46 - Guia monitor: andamento do problema

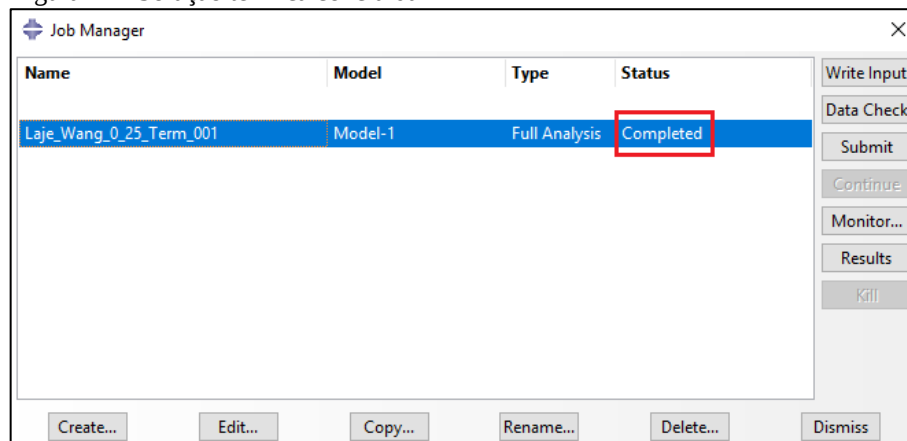


Fonte: O autor, 2017.

Esta imagem mostra o andamento da solução da análise térmica concluída.

Quando a solução for concluída será apresentada a mensagem Completed na guia Job Manager, conforme Figura 47.

Figura 47 - Solução térmica concluída



Fonte: O autor, 2017.

Concluída a solução da análise térmica, deve-se ir para a análise mecânica.

Para seguir com a análise mecânica, deve-se voltar no menu “Step”, desabilitar a etapa do Aquecimento e reabilitar as etapas de Carga_Mecanica e Carga_Termica, configuradas anteriormente. A partir desta configuração é possível notar, no menu “Interaction”, que os

mecanismos de transferência de calor estão desabilitados, pois estão configurados para a etapa do Aquecimento. No menu Load, deve-se configurar as seguintes condições:

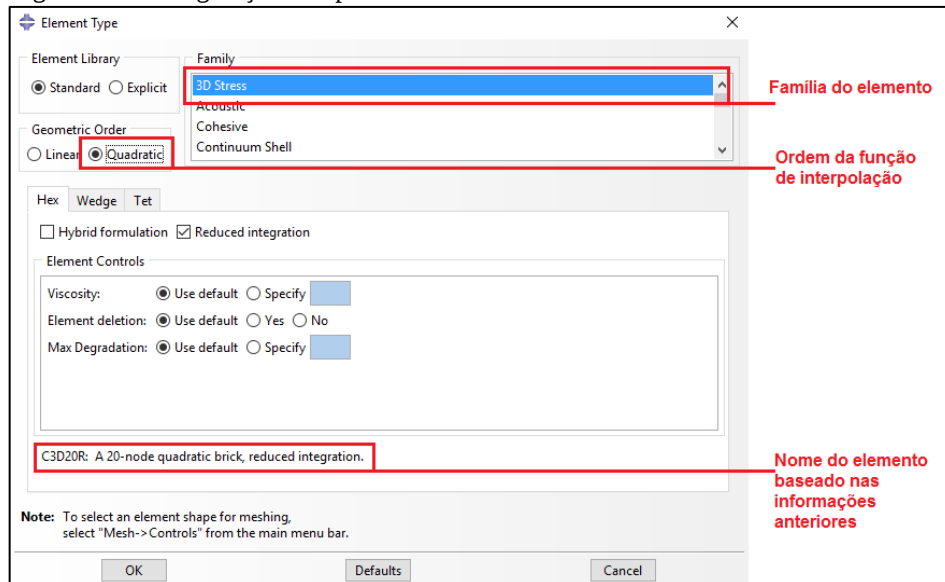
- Carregamento (guia Create Load) – nesta etapa cria-se o carregamento mecânico a que a peça está submetida. Para este modelo foi considerado o carregamento do tipo Body force (unidade de força por unidade de volume), com um valor relativo à sobrecarga de $2 \frac{kN}{m^2}$, que passado para unidade de volume fica um valor de $20000 \frac{kN}{m^3}$, para uma espessura de 10 centímetros. Este carregamento deve ser criado na etapa Carga_Mecanica e propagado para a Carga_Termica;
- Tipo de apoio (guia Create Boundary Bondition) – nesta etapa criam-se os tipos de apoio da estrutura. Para simular o apoio feito na análise experimental deve-se selecionar as faces indicadas na Figura 28 e restringir o deslocamento na direção vertical, que no Abaqus é a direção 2. Estas condições devem ser criadas na etapa Carga_Mecanica e propagado para a Carga_Termica;
- Simular o aquecimento do incêndio (Create Predefined Field) – nesta etapa, tomam-se os resultados nodais obtidos na análise térmica e aplica nos nós da análise mecânica. Esta condição deve ser criada exclusivamente na etapa Carga_Termica.

Em seguida deve-se ajustar a malha que atende a melhor solução do problema mecânico. Da mesma forma da análise térmica, é necessário que se faça um estudo de malha para verificar qual melhor tamanho e tipo de solução se adapta ao problema. Baseado neste estudo, a ótima para a presente modelagem é com um tamanho de 2 centímetros para o concreto e armadura, com funções de interpolação quadráticas. Para uma malha com o mesmo tamanho e um elemento com função de interpolação linear, os resultados não foram satisfatórios, o que se fez necessário diminuir o tamanho da malha para obter uma solução mais próxima. Contudo, nesta condição o tempo de processamento foi maior que considerando a malha com 1,5 centímetros e função de interpolação quadrática, pois para aproximação linear com 1 centímetro de malha obteve um tempo de processamento de 8 horas contra 6 horas e meia para a função de interpolação quadrática com malha de 1,5 centímetros. Este assunto será comentado na seção de resultados.

Neste modelo foi utilizado o elemento C3D20R, elemento da família 3D Stress como funções de interpolação quadráticas e integração reduzida.

A Figura 48 mostra a configuração do tipo de elemento utilizado na análise mecânica.

Figura 48 - Configuração do tipo de elemento utilizado na análise mecânica



Fonte: O autor, 2017.

Da mesma forma que foi feita na análise térmica, deve-se seguir para o menu “Job” e configurar o processamento da solução, finalizando assim a modelagem e pré-processamento da laje de concreto armado.

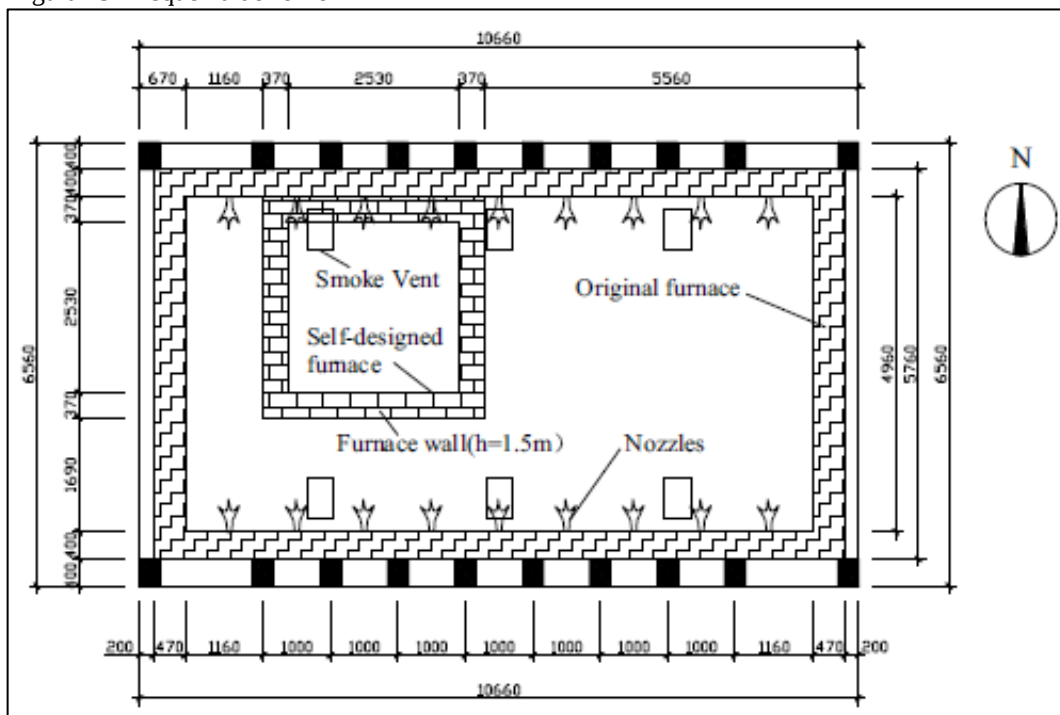
4 MODELO EXPERIMENTAL

O presente trabalho busca analisar numericamente a laje do experimento de Wang (2016), a fim de validar os resultados do programa utilizado na modelagem.

Esta seção mostra o desenvolvimento do modelo experimental, bem como os materiais e artifícios utilizados para a elaboração do experimento.

No experimento, o forno foi construído com paredes de tijolo com uma espessura de 37 centímetros e lâ mineral com 5 centímetros de espessura, operados por dois bicos de queimadores a óleo localizados na parede norte. O mesmo foi projetado exclusivamente para aquecer as lajes analisadas. As dimensões do forno são: 327cm x 327cm x 150cm. A Figura 49 e Foto 1 mostram o esquema e uma vista do forno, respectivamente.

Figura 49 - Esquema do forno



Fonte: Wang, 2016.

Foto 1 - Esquema do forno



Fonte: Wang, 2016

O modelo experimental foi tratado de uma análise de quatro casos de lajes simplesmente apoiada, em escala real, testadas em situação de incêndio. As lajes foram nomeadas de S1, S2, S3 e S4.

As dimensões das lajes são:

- Largura: 330 cm;
- Altura: 330 cm;
- Espessura: 10 cm.

Todas as lajes foram concretadas no mesmo instante, e depois armazenadas no laboratório para o processo de cura, que se deu em idades distintas:

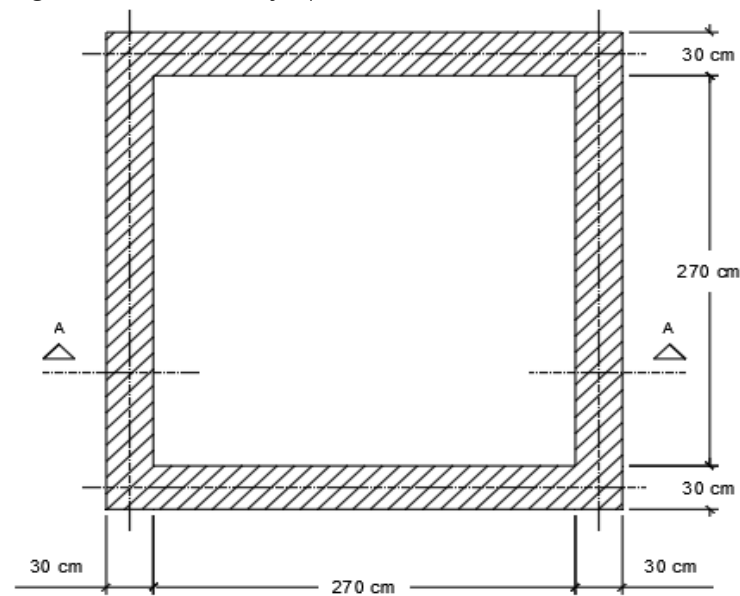
- S1: 224 dias;
- S2: 243 dias;
- S3: 253 dias;
- S4: 259 dias.

O traço do concreto foi composto por agregado silicoso, com uma resistência a compressão de 28 MPa.

As lajes S1, S3 e S3 são reforçadas com barras de 8 milímetros de diâmetro espaçadas em 20 centímetros, nas duas direções, apenas na parte inferior. A laje S4 é reforçada com barras de 8 milímetros de diâmetro espaçadas em 10 centímetros, nas duas direções, também na parte inferior. Todas as lajes possuem um cobrimento de 15 milímetros. A resistência ao escoamento do aço foi de 414 MPa. Cada laje é solicitada por uma carga uniformemente distribuída de $2 \frac{kN}{m^2}$ de cima para baixo.

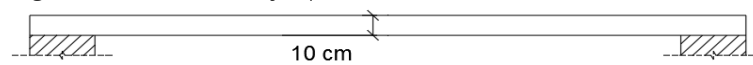
As Figuras 50 e 51 mostram a forma das lajes analisadas.

Figura 50 - Forma das lajes | A



Fonte: Wang, 2016.

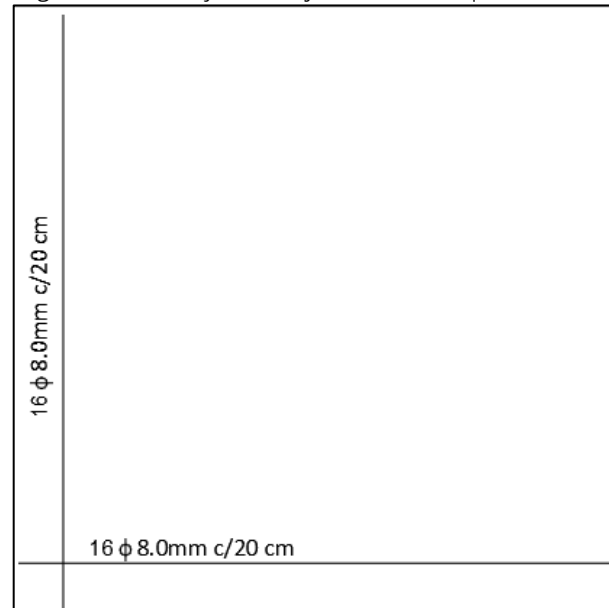
Figura 51 - Forma das lajes | B



Fonte: Wang, 2016.

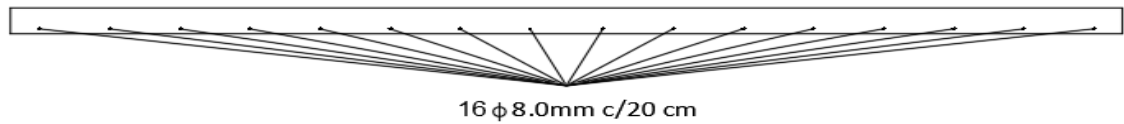
As Figuras 52 e 53 mostram o detalhamento da armação das lajes S1, S2 e S3.

Figura 52 - Armação das lajes S1, S2 e S3 | A



Fonte: Wang, 2016.

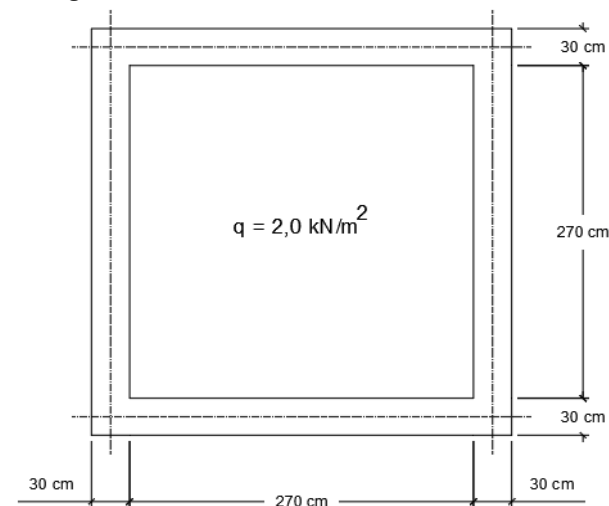
Figura 53 - Armação das lajes S1, S2 e S3 | B



Fonte: Wang, 2016.

A figura 54 mostra o esquema estrutural da laje com o carregamento.

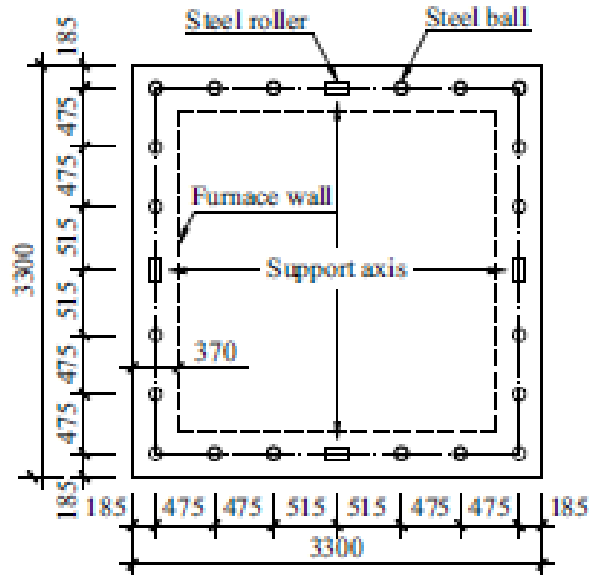
Figura 54 - Esquema estrutural da laje com o carregamento



Fonte: Wang, 2016.

Para simular o apoio de primeiro gênero, foram colocadas 4 esferas metálicas e rolos nas 4 paredes que apoiam a laje. Este esquema pode ser visto na Figura 55.

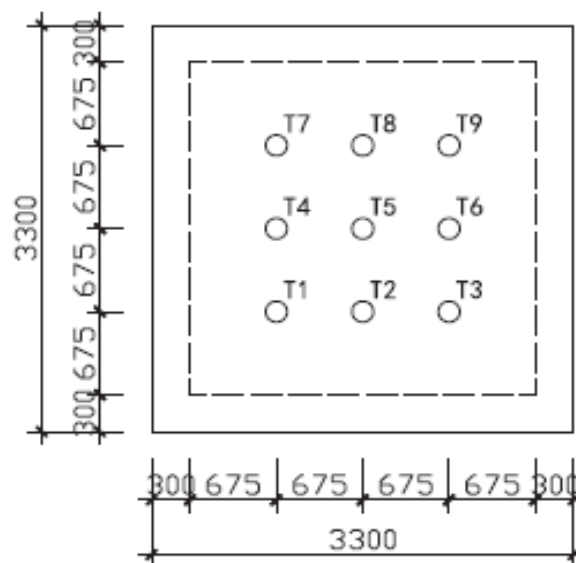
Figura 55 - Apoio de primeiro gênero



Fonte: Wang, 2016.

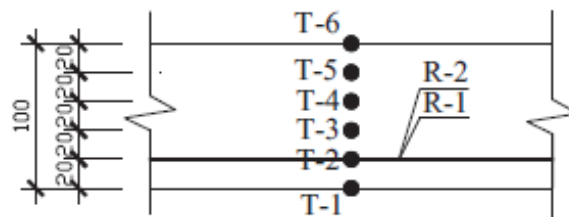
As temperaturas do forno foram medidas por dois termopares (F1 e F2) durante os testes realizados. Para avaliar a temperatura na laje, foi distribuída nove grupos de termopares (T1 a T9) com 6 termopares distribuídos ao longo da espessura da laje, denominados T-1 a T-6. Estas disposições podem ser vistas nas Figuras 56 e 57.

Figura 56 - Termopares | A



Fonte: Wang, 2016.

Figura 57 - Termopares | B

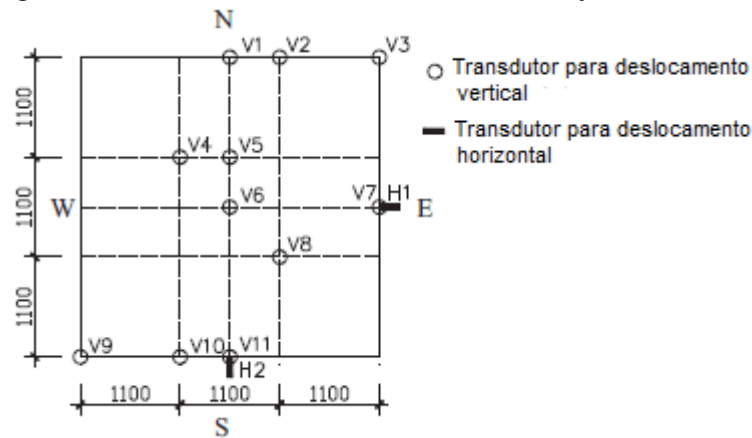


Fonte: Wang, 2016.

Foi colocado dois termopares no centro da armadura, denominados R1 e R2, para medir a temperatura nestes pontos. A projeção destes termopares pode ser visualizada na Figura13.

Foram medidos durante o ensaio os deslocamentos verticais e horizontais da laje. Para avaliar os deslocamentos verticais da laje foram colocados onze transdutores (pontos V1 a V11). Os deslocamentos horizontais foram medidos por dois transdutores chamados H1 e H2. O posicionamento destes pontos está mostrado na Figura 58.

Figura 58 - Deslocamentos verticais e horizontais da laje



Fonte: Wang, 2016.

5 APRESENTAÇÃO DOS RESULTADOS

5.1 INTRODUÇÃO

Esta seção objetiva mostrar o comportamento observado na análise realizada nos seguintes casos estudados:

- Laje de concreto armado maciça – armada em uma direção; e
- Laje de concreto armado maciça – armada em duas direções.

A laje maciça de concreto armada em duas direções é a mesma apresentada nos capítulos 3 e 4, também utilizada na validação dos resultados apresentados nesta seção.

Para diminuir o tempo de processamento da modelagem e poder ter um melhor refinamento de malha foi considerado apenas $\frac{1}{4}$ da laje, adotando as condições necessárias para simular este artifício, conforme capítulo 3.

5.2 REFINAMENTO DA MALHA

Nesta seção foi realizado o estudo de malha para a escolha do tipo de aproximação mais viável para o modelo.

Foram utilizados e analisados dois tipos de elementos distintos de solução:

- Elemento com solução linear (função de interpolação de primeira ordem);
- Elemento com solução quadrática (função de interpolação de segunda ordem).

A análise se iniciou com uma malha de 5 centímetros tanto para a armadura como para o concreto. A primeira análise feita nesta condição foi a avaliação do deslocamento no meio do vão para a laje proposta por Wang (2016), a partir destes resultados foi adotado a malha final do elemento.

A Tabela 9 mostra os resultados dos deslocamentos de acordo com o tamanho da malha para elemento com solução linear e quadrática. O valor base para validação é a solução analítica com o valor de 0,425 milímetros.

Tabela 9 - Resultados dos deslocamentos

Malha (mm)	Aproximação Linear (mm)	Aproximação quadrática (mm)
50	0.702275	0.618886
40	0.702737	0.619446
30	0.687033	0.519557
20	0.648922	0.42533
10	0.648915	0.42512

Fonte: O autor, 2017.

A Tabela 10 mostra o tempo de processamento, em segundos, para cada tamanho de malha.

Tabela 10 - Tempo de processamento

Malha (mm)	Aproximação Linear (s)	Aproximação quadrática (s)
50	20	89
40	39	162
30	94	185
20	179	225
10	280	562

Fonte: O autor, 2017.

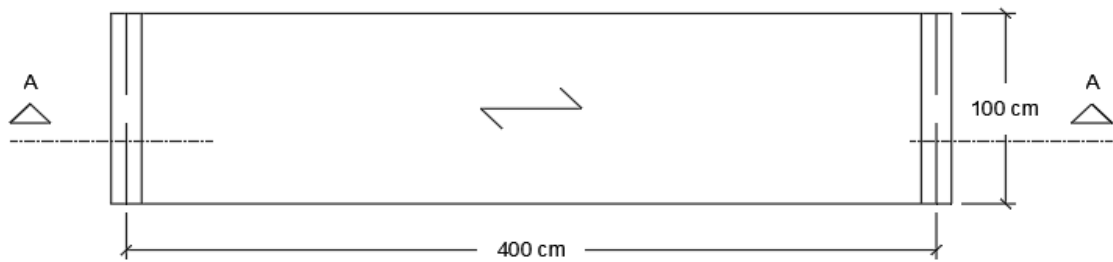
É possível notar que as soluções a partir de 2 centímetros de malha, permanece com poucas diferenças da solução analítica, e o tempo de processamento aumentou consideravelmente para os dois tipos de aproximação. Baseado nestas condições, foi adotada uma malha média de 2 centímetros.

5.3 LAJE MACIÇA ARMADA EM UMA DIREÇÃO

Para esta análise, foi utilizada uma laje bi apoiada com dimensões de 6cm x 100cm x 400cm com 13 barras de 8 milímetros espaçadas em 6,4 centímetros entre si. Foi considerada uma resistência à compressão em temperatura ambiente de 28 MPa e um módulo de elasticidade longitudinal de 30000 Mpa. Foi utilizado aço CA-50 para a armadura ativa. O cobrimento da armadura é de 10 milímetros.

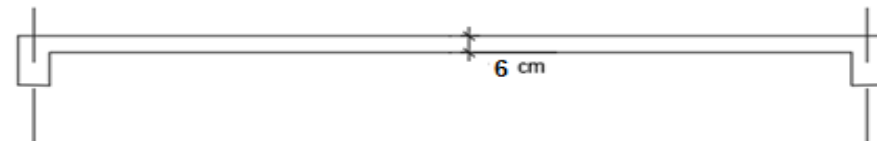
As Figuras 59 e 60 mostram as dimensões em centímetros da laje analisada em planta e em corte, respectivamente.

Figura 59 - Planta baixa da laje armada em uma direção



Fonte: O autor, 2017.

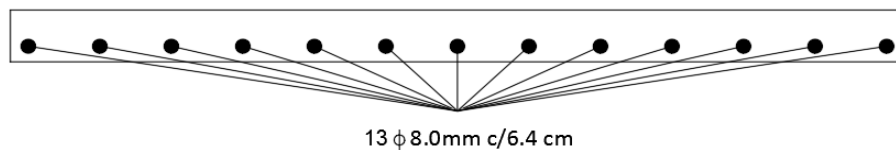
Figura 60 - Corte AA



Fonte: O autor, 2017.

A Figura 61 mostra o detalhamento da armação da laje.

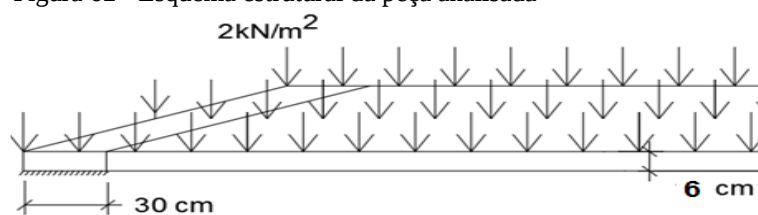
Figura 61 - Detalhamento da armação da laje



Fonte: O autor, 2017.

Como a laje é bi apoiada, seus apoios são considerados simples (restrições na direção vertical), no entanto, estes apoios foram modelados com uma face de 30 centímetros a partir do final da laje (dois lados) com restrições verticais, fazendo com que haja um impedimento na rotação da seção, surgindo, como consequência, um engaste. Desta maneira o vão efetivo da laje, considerando a dimensão dos apoios, reduz para 340 centímetros. A laje possui uma carga uniformemente distribuída de 2 kN/m^2 . A Figura 62 mostra o esquema estrutural da peça analisada.

Figura 62 - Esquema estrutural da peça analisada



Fonte: O autor, 2017.

Para a laje analisada, foi calculado um TRRF de 30 minutos. Os resultados se mostram satisfatórios para o tempo encontrado através no método da norma, pois a laje não colapsará neste período de tempo.

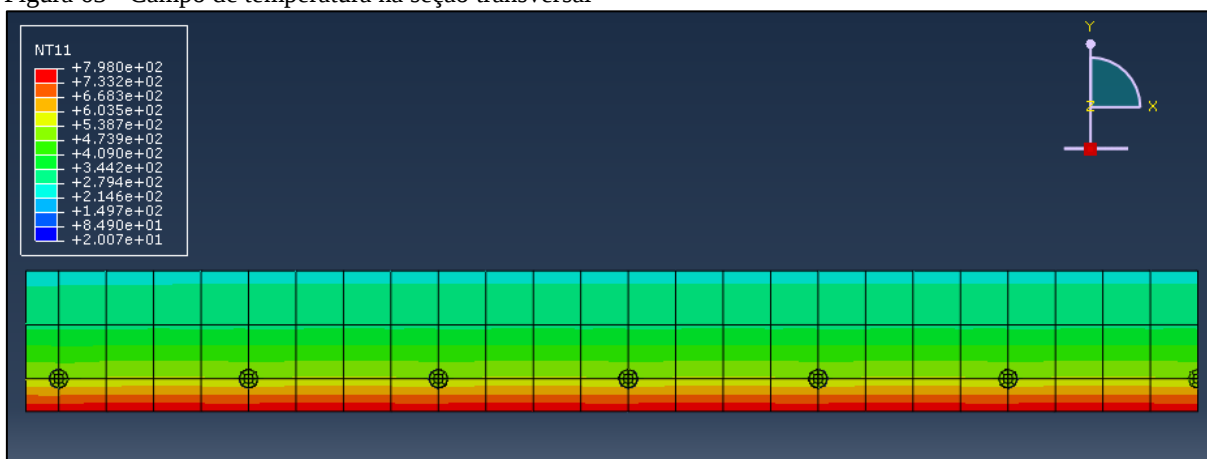
As propriedades dos materiais (aço e concreto) são obtidas pela ABNT NBR 15200:2012 apresentadas no capítulo 2 deste trabalho.

5.3.1 Comportamento térmico

Para a análise térmica foi utilizada uma malha de 2 centímetros no concreto e 1,5 centímetros na armadura com função e interpolação quadrática, utilizando o elemento DC3D20. O procedimento de modelagem foi o mesmo descrito no capítulo anterior, no entanto, como não há experimentos na comunidade científica que sirva para comparar os resultados desta análise, a fase de aquecimento seguiu a curva estabelecida pela ISO-834:2014.

A Figura 63 mostra o campo de temperatura na seção transversal da peça durante os 180 minutos de duração e incêndio.

Figura 63 - Campo de temperatura na seção transversal

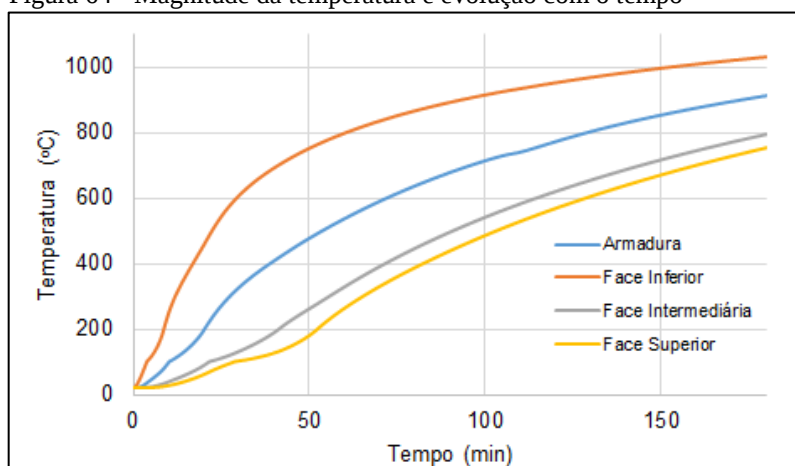


Fonte: O autor, 2017.

As cores variam do azul ao vermelho, temperaturas mais baixas e mais altas, respectivamente. Nota-se que a face inferior está mais aquecida e a superior menos aquecida, no entanto, devido à baixa condutividade térmica do concreto, a armadura não chega à mesma temperatura do concreto em sua altura.

A magnitude da temperatura, e sua evolução com o tempo, ao longo da seção transversal e na armadura pode ser observada no Figura 64.

Figura 64 - Magnitude da temperatura e evolução com o tempo



Fonte: O autor, 2017.

De maneira superficial, é possível verificar que a face inferior da laje (face aquecida) chega a 100°C em aproximadamente 4 minutos após o início, e neste tempo a armadura ativa encontra-se com 35°C, ou seja, ainda não perde suas propriedades mecânicas, porém começa a ter variação no seu deslocamento devido à variação do coeficiente de dilatação térmica, conforme item 5.3.2. A armadura chega a 100°C depois de aproximadamente 10 minutos de incêndio, onde neste instante, a face mais aquecida do concreto encontra-se com 253°C. No mesmo instante a face intermediária e superior encontram-se com 39°C e 27°C respectivamente.

A Tabela 11 apresenta um resumo com a temperatura obtida em cada tempo. Foi adotado, para demonstração dos resultados, um intervalo de 30 minutos.

Tabela 11 - Temperatura no concreto e armadura em função do tempo

Tempo (min)	Temperatura (°C)			
	Armadura	Face Inferior	Face Intermediária	Face Superior
0	20	20	20	20
30	327.443	607.128	131.613	102.261
60	537.438	797.108	328.768	263.917
90	678.565	891.136	495.88	439.128
120	772.833	950.819	619.505	568.801
150	853.888	995.067	716.215	670.916
180	913.035	1029.32	793.731	753.662

Fonte: O autor, 2017.

5.3.2 Comportamento mecânico

Na análise termomecânica, para a obtenção dos deslocamentos em temperatura ambiente, foi admitido que laje comporta-se como uma viga biapoiada de inércia equivalente, portanto, os resultados dos deslocamentos e tensões em temperatura ambiente, verificados no meio da laje, foram calculados através da equação diferencial da linha elástica e equilíbrio dos momentos no dimensionamento em concreto armado, respectivamente.

As tabelas 12 e 13 mostram os resultados dos deslocamentos e tensão na armadura, da solução analítica e numérica, respectivamente, para temperatura ambiente, no meio da laje.

Tabela 12 - Resultados analíticos em temperatura ambiente

Temperatura (°C)	Deslocamento vertical (mm)	Tensão na armadura (Mpa)
30	1.285	11.043

Fonte: O autor, 2017.

Tabela 13 - Resultados numéricos em temperatura ambiente

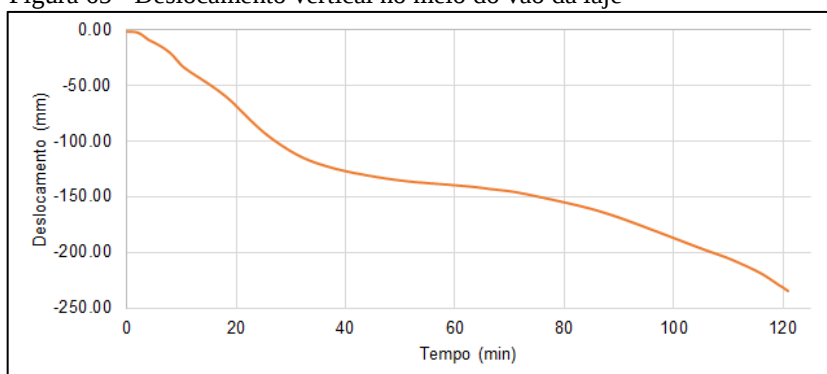
Temperatura (°C)	Deslocamento vertical (mm)	Tensão na armadura (Mpa)
30	1.285	11.17

Fonte: O autor, 2017.

A malha adotada foi a mesma da modelagem do experimento de Wang, 2 centímetros e baseado nas tabelas anteriores é possível verificar que o erro relativo vale 0,38% e 1,15% para deslocamento e tensões na armadura, respectivamente.

A Figura 65 mostra o deslocamento vertical no meio do vão da laje ao durante a duração do tempo de incêndio.

Figura 65 - Deslocamento vertical no meio do vão da laje



Fonte: O autor, 2017.

Este modelo foi testado até a falha, que ocorreu em 121 minutos após o início do aquecimento. A falha ocorreu na taxa de deflexão por minuto, que o limite, calculado através da ISO 834:1999, vale 21,40 mm/min e o calculado no instante de falha foi de 23,24 mm/min.

A Tabela 14 mostra os deslocamentos, junto com as respectivas taxas de deflexão, avaliados em intervalos de 30 minutos.

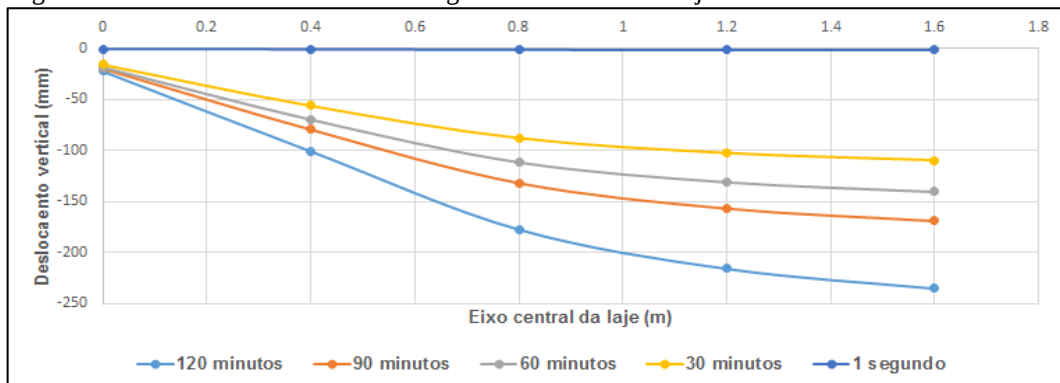
Tabela 14 - Deslocamentos, junto com as respectivas taxas de deflexão, avaliados em intervalos de 30 minutos

Tempo (min)	Deslocamento (mm)	Taxa de deflexão (mm/min)
0	0	-----
30	109.39	2.91
60	139.85	0.4
90	169.07	1.71
120	233.32	3.22
120.84	235.24	23.17

Fonte: O autor, 2017.

A Figura 66 mostra o deslocamento vertical ao longo do eixo central da laje, em intervalos de 30 minutos.

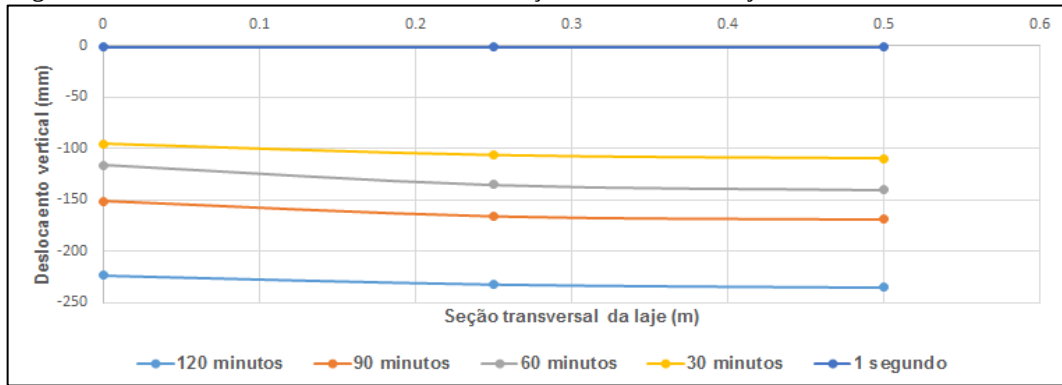
Figura 66 - Deslocamento vertical ao longo do eixo central da laje



Fonte: O autor, 2017.

A Figura 67 mostra o deslocamento vertical avaliado na seção transversal da laje em intervalos de 30 minutos.

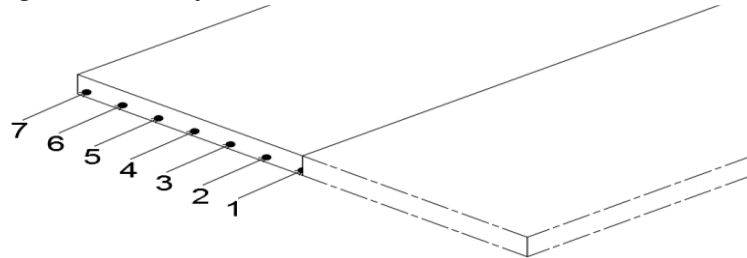
Figura 67 - Deslocamento vertical avaliado na seção transversal da laje



Fonte: O autor, 2017.

A Figura 68 mostra o esquema de avaliação de tensões normais na armadura de flexão.

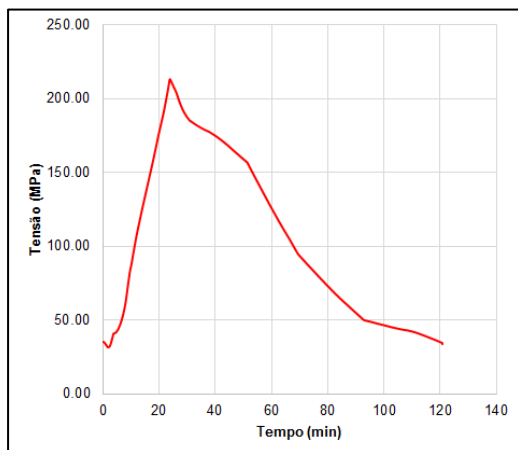
Figura 68 - Avaliação de tensões na armadura de flexão



Fonte: O autor, 2017.

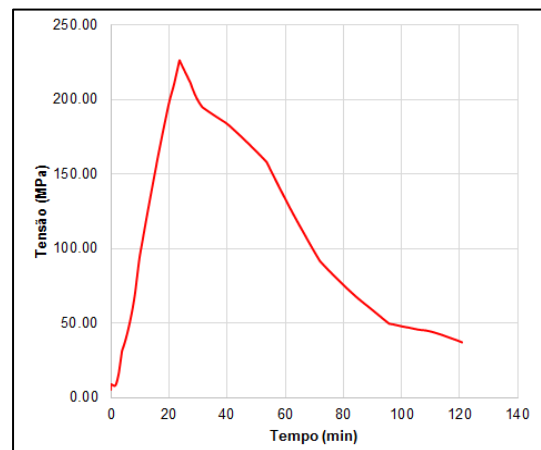
Os Gráficos 69 a 75 mostram as tensões na armadura durante o incêndio.

Figura 69 - Tensões na armadura durante o incêndio | 1



Fonte: O autor, 2017.

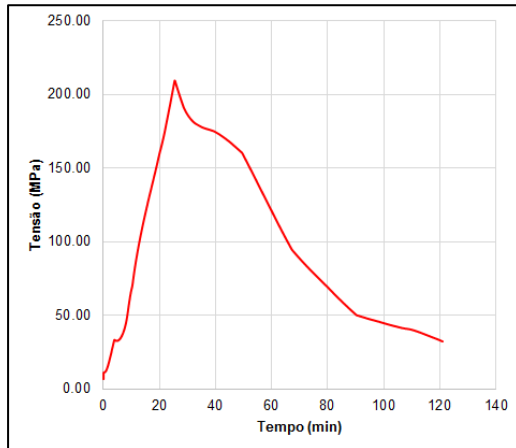
Figura 70 - Tensões na armadura durante o incêndio | 2



Fonte: O autor, 2017.

Figura 71 - Tensões na armadura durante o incêndio |

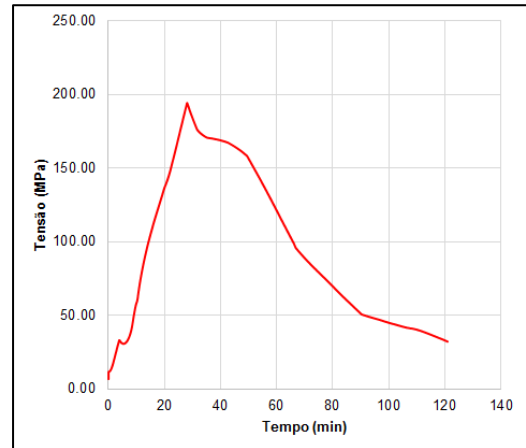
3



Fonte: O autor, 2017.

Figura 72 - Tensões na armadura durante o incêndio |

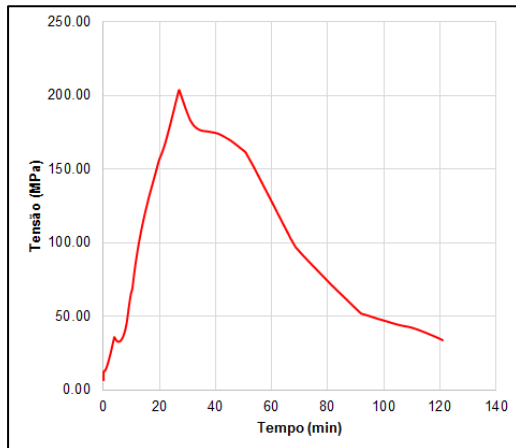
4



Fonte: O autor, 2017.

Figura 73 - Tensões na armadura durante o incêndio |

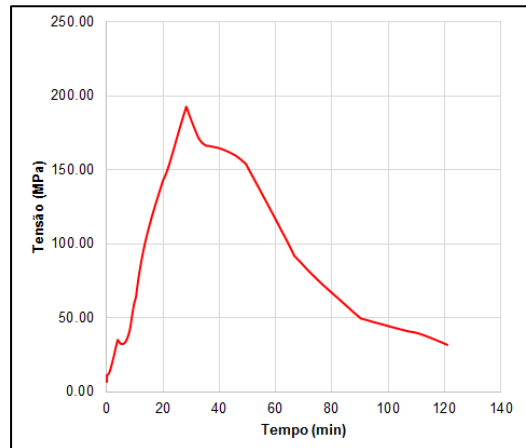
5



Fonte: O autor, 2017.

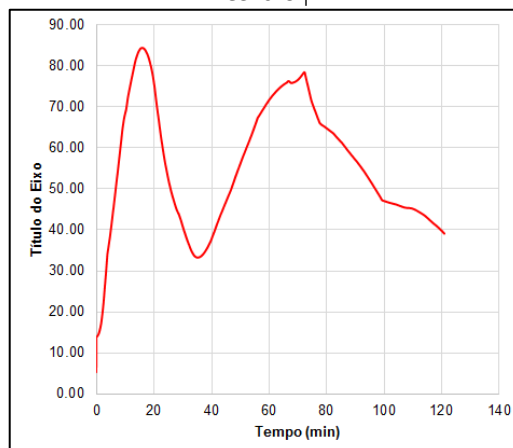
Figura 74 - Tensões na armadura durante o incêndio |

6



Fonte: O autor, 2017.

Figura 75 - Tensões na armadura durante o incêndio | 7



Fonte: O autor, 2017.

A Tabela 15 mostra as tensões nas armaduras durante o incêndio avaliado em um intervalo de 30 minutos até a ruptura.

Tabela 15 - Tensões na armadura durante o incêndio

Tempo (min)	Tensão Real (Mpa)						
	1	2	3	4	5	6	7
0	0	0	0	0	0	0	0
30	193.87	199.2	185.92	183.44	187.45	183.45	40.85
60	130.39	133.29	120.29	120.65	127.61	116.17	71.61
90	56.97	58.64	50.2	50.84	55.09	49.88	56.99
120	36.47	37.6	32.81	32.76	34.59	32.52	39.72
120.8	35.01	36.82	32.11	32.05	33.82	31.78	39.08

Fonte: O autor, 2017.

Tabela 16 - Relação temperatura x propriedades mecânicas (deslocamento e modulo de elasticidade) do aço em função do tempo

Tempo (min)	Temperatura (°C)	Deslocamento Vertical- δ (mm)	$\delta\theta/\delta_{amb}$	$K_{(E_p, \theta)}$
0	Ambiente (30°C)	1.285	1	1
30	327.44	109.39	85.12840467	0.52
60	537.44	139.85	108.8326848	0.2
90	678.56	169.07	131.5719844	0.125
120	772.83	233.32	181.5719844	0.08
120.84	773	235.24	183.0661479	0.08

Fonte: O autor, 2017.

5.4 LAJE MACIÇA ARMADA EM DUAS DIREÇÕES

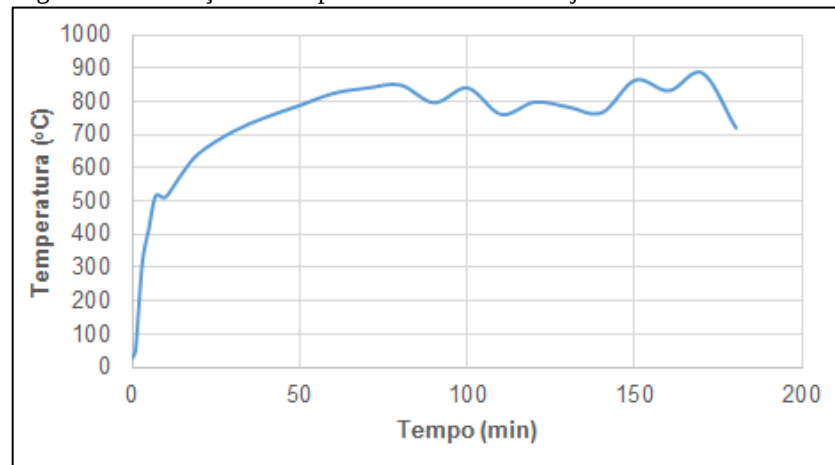
As lajes utilizadas por Wang (2016) são simplesmente apoiadas nas 4 extremidades (restrição na direção vertical) com $\lambda = 1$.

5.4.1 Comportamento térmico

O presente trabalho analisou e comparou os resultados das lajes S1 e S3, pois são lajes com as mesmas disposições e servem como parâmetro estatístico. A laje S2 não foi considerada pois os resultados obtidos na análise numérica não convergiram com os do experimento. A laje S4 não foi considerada pois o espaçamento das armaduras é menor que as demais e existe apenas uma análise experimental nesta condição.

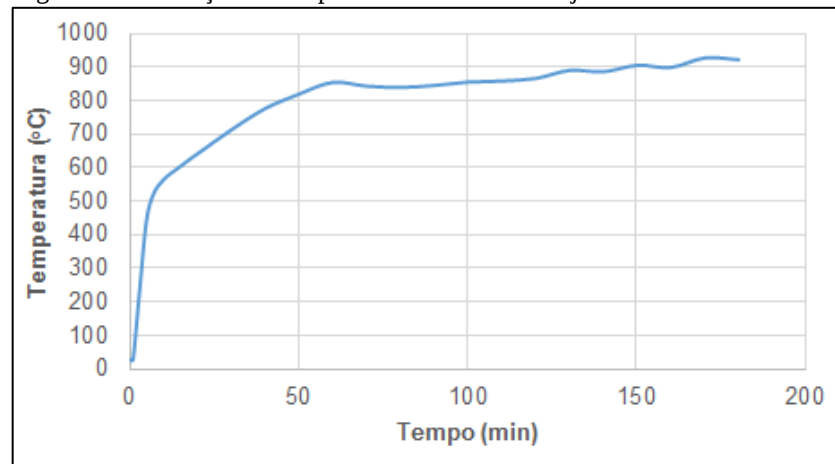
As Figuras 76 e 77 mostram a evolução da temperatura do forno nas lajes S1 e S3, respectivamente.

Figura 76 - Evolução da temperatura do forno nas lajes S1



Fonte: Wang, 2016.

Figura 77 - Evolução da temperatura do forno nas lajes S3



Fonte: Wang, 2016.

A Tabela 16 mostra a temperatura no termopar F1 nas lajes S1 e S3, respectivamente, analisada por Wang (2016) em seu experimento.

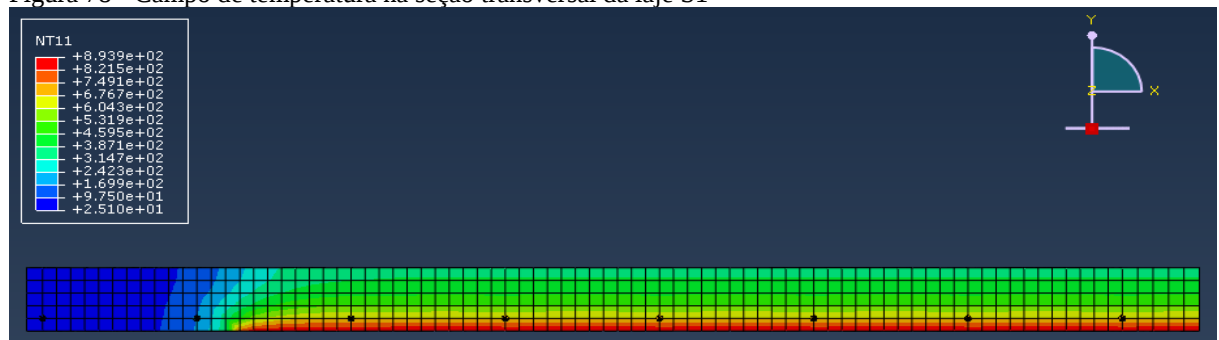
Tabela 17 - Temperatura do termopar F1 nas lajes S1 e S3

Tempo (min)	Temperatura - S1 (°C)	Temperatura - S3 (°C)
0	29	25
1	54	24
3	312	235
5	420	441
7	517	517
10	514	561
15	586	601
20	646	638
30	710	709
40	754	773
50	789	816
60	825	851
70	841	840
80	850	836
90	797	842
100	841	852
110	762	855
120	799	863
130	784	887
140	767	883
150	865	902
160	833	896
170	886	924
180	721	919

Fonte: Wang, 2016.

A Figura 78 mostra o campo de temperatura na seção transversal da laje S1 durante 180 minutos de incêndio.

Figura 78 - Campo de temperatura na seção transversal da laje S1

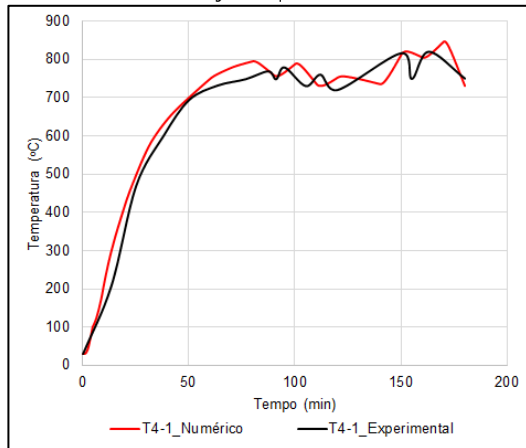


Fonte: O autor, 2017.

A variação das cores segue o mesmo padrão adotado na análise da Figura 63.

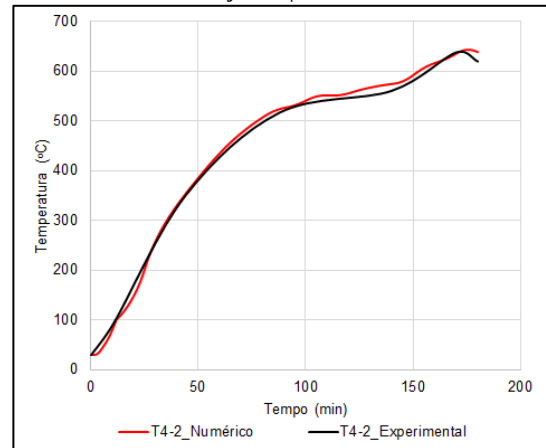
Os Gráficos 79 a 84 mostram a temperatura nos pontos descritos para a laje S1.

Figura 79 - Temperatura nos pontos descritos para a laje S1 | T4-1



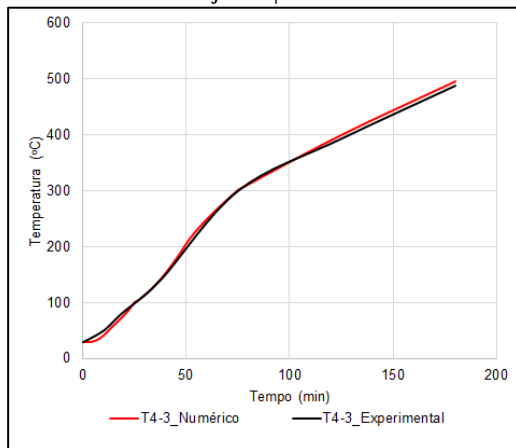
Fonte: O autor, 2017.

Figura 80 - Temperatura nos pontos descritos para a laje S1 | T4-2



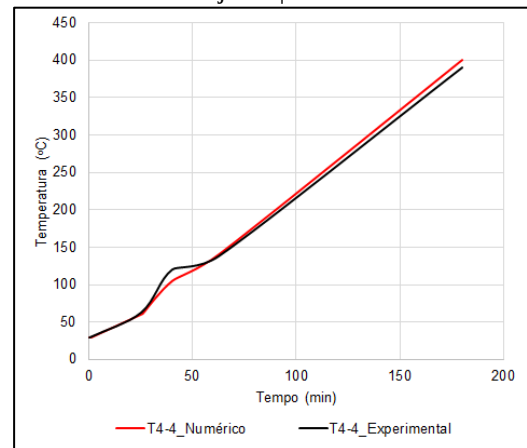
Fonte: O autor, 2017.

Figura 81 - Temperatura nos pontos descritos para a laje S1 | T4-3



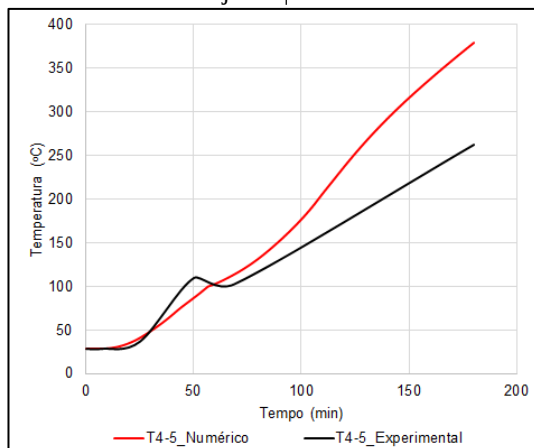
Fonte: O autor, 2017.

Figura 82 - Temperatura nos pontos descritos para a laje S1 | T4-4



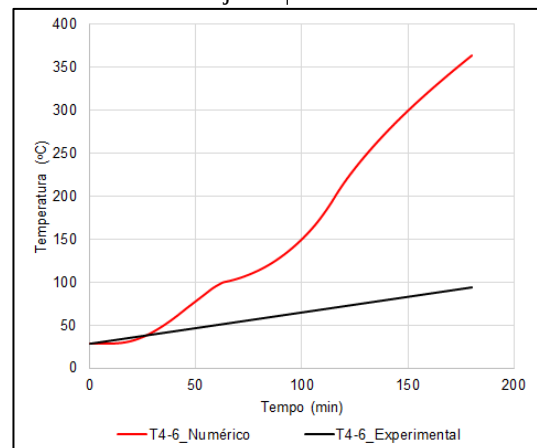
Fonte: O autor, 2017.

Figura 83 - Temperatura nos pontos descritos para a laje S1 | T4-5



Fonte: O autor, 2017.

Figura 84 - Temperatura nos pontos descritos para a laje S1 | T4-6



Fonte: O autor, 2017.

As Tabelas 17 a 22 apresentam um resumo com a temperatura obtida em cada tempo para o caso da laje S1 em um intervalo de 30 minutos.

Tabela 18 - Temperatura do termopar T4-1 em função do tempo (laje S1)

Tempo (min)	Temperatura - T1 (°C) Numérico	Temperatura - T1 (°C) Experimental	Erro (%)
0	29	29	0%
30	561.834	565	1%
60	750.582	730	3%
90	758.352	748	1%
120	753.141	720	5%
150	813.83	816	0%
180	731.112	750	3%

Fonte: O autor, 2017.

Tabela 19 - Temperatura termopar T4-2 em função do tempo (laje S1)

Tempo (min)	Temperatura - T2 (°C) Numérico	Temperatura - T2 (°C) Experimental	Erro (%)
0	29	29	0%
30	278.794	320	13%
60	456.534	490	7%
90	526.843	525	0%
120	556.326	561	1%
150	593.141	605	2%
180	638.944	618.37	3%

Fonte: O autor, 2017.

Tabela 20 - Temperatura termopar T4-3 em função do tempo (laje S1)

Tempo (min)	Temperatura - T3 (°C) Numérico	Temperatura - T3 (°C) Experimental	Erro (%)
0	29	29	0%
30	124.123	135	8%
60	260.587	285	8%
90	346.01	350	1%
120	404.869	392	3%
150	455.968	430	6%
180	513.948	487	6%

Fonte: O autor, 2017.

Tabela 21 - Temperatura termopar T4-4 em função do tempo (laje S1)

Tempo (min)	Temperatura - T4 (°C) Numérico	Temperatura - T4 (°C) Experimental	Erro (%)
0	29	29	0%
30	70.7883	65	9%
60	140.019	138	1%
90	228.413	230	1%
120	300.659	260	16%
150	367.375	350	5%
180	427.611	390	10%

Fonte: O autor, 2017.

Tabela 22 - Temperatura termopar T4-5 em função do tempo (laje S1)

Tempo (min)	Temperatura - T5 (°C) Numérico	Temperatura - T5 (°C) Experimental	Erro (%)
0	29	29	0%
30	49.4909	40	24%
60	103.604	105	1%
90	153.368	120	28%
120	238.53	200	19%
150	316.724	230	38%
180	379.221	262	45%

Fonte: O autor, 2017.

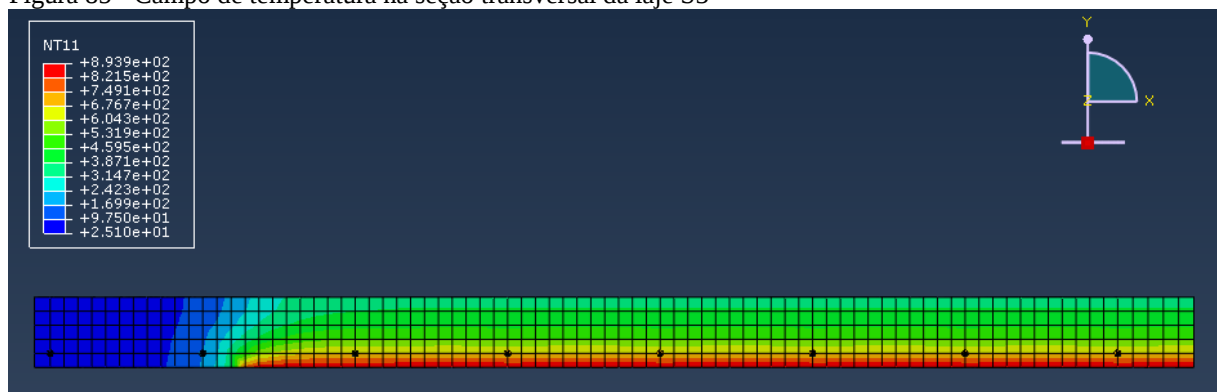
Tabela 23 - Temperatura termopar T4-6 em função do tempo (laje S1)

Tempo (min)	Temperatura - T6 (°C) Numérico	Temperatura - T6 (°C) Experimental	Erro (%)
0	29	29	0%
30	43.251	39	11%
60	96.9621	50.58	92%
90	130.093	59.875	117%
120	217.145	91.5	137%
150	300.204	92.5	225%
180	363.702	93.75	288%

Fonte: O autor, 2017.

A Figura 85 mostra o campo de temperatura na seção transversal da laje S3 durante 180 minutos de incêndio.

Figura 85 - Campo de temperatura na seção transversal da laje S3

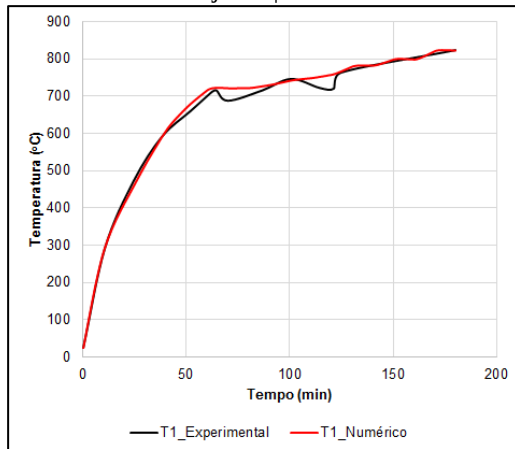


Fonte: O autor, 2017.

A variação das cores segue o mesmo padrão adotado na análise das Figuras 55 e 57.

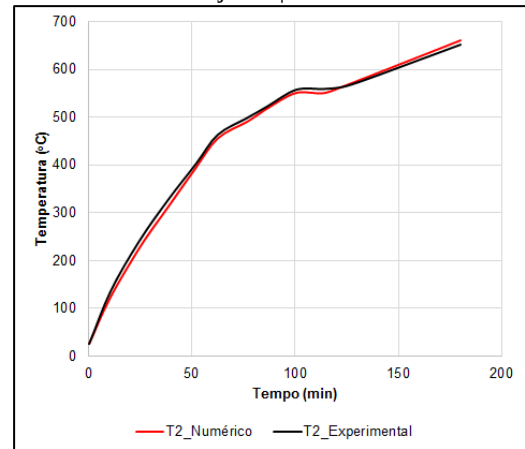
Os Gráficos de 86 a 91 mostram a temperatura nos pontos descritos para a laje S3.

Figura 86 - Temperatura nos pontos descritos para a laje S3 | T6-1



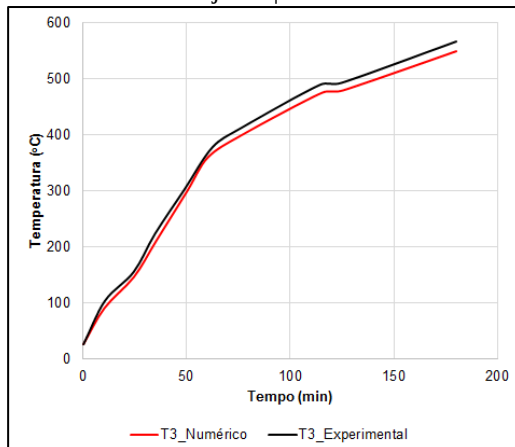
Fonte: O autor, 2017.

Figura 87 - Temperatura nos pontos descritos para a laje S3 | T6-2



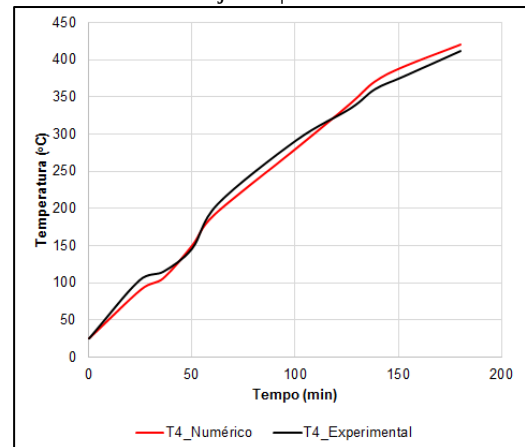
Fonte: O autor, 2017.

Figura 88 - Temperatura nos pontos descritos para a laje S3 | T6-3



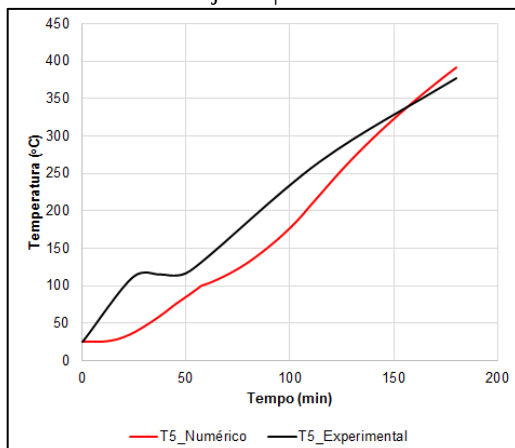
Fonte: O autor, 2017.

Figura 89 - Temperatura nos pontos descritos para a laje S3 | T6-4



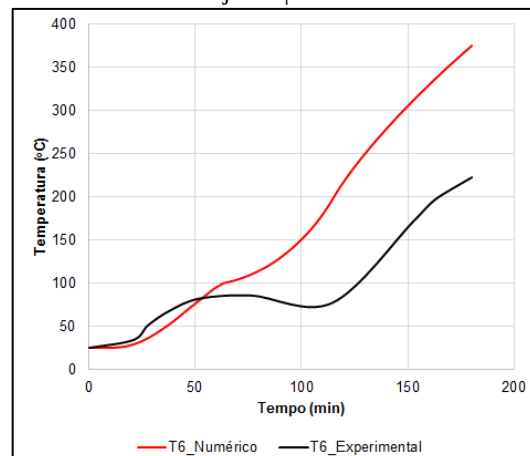
Fonte: O autor, 2017.

Figura 90 - Temperatura nos pontos descritos para a laje S3 | T6-5



Fonte: O autor, 2017.

Figura 91 - Temperatura nos pontos descritos para a laje S3 | T6-6



Fonte: O autor, 2017.

As Tabelas 23 a 28 apresentam um resumo com a temperatura obtida em cada tempo para o caso da laje S3 em um intervalo de 30 minutos.

Tabela 24 - Temperatura do termopar T6-1 em função do tempo (laje S3)

Tempo (min)	Temperatura - T1 (°C) Numérico	Temperatura - T1 (°C) Experimental	Erro (%)
0	25	25	0%
30	490	480	2%
60	716.95	710	1%
90	730.22	720	1%
120	757.92	720	5%
150	798.89	760	5%
180	822.85	805	2%

Fonte: O autor, 2017.

Tabela 25 - Temperatura do termopar T6-2 em função do tempo (laje S3)

Tempo (min)	Temperatura - T2 (°C) Numérico	Temperatura - T2 (°C) Experimental	Erro (%)
0	25	25	0%
30	300	310	3%
60	455	462.85	2%
90	520	524.25	1%
120	560	568.65	2%
150	633	600	6%
180	660	651.42	1%

Fonte: O autor, 2017.

Tabela 26 - Temperatura do termopar T6-3 em função do tempo (laje S3)

Tempo (min)	Temperatura - T3 (°C) Numérico	Temperatura - T3 (°C) Experimental	Erro (%)
0	25	25	0%
30	210	222.85	6%
60	360	377.14	5%
90	450	461.42	2%
120	480	492	2%
150	520	532	2%
180	550	565.71	3%

Fonte: O autor, 2017.

Tabela 27 - Temperatura do termopar T6-4 em função do tempo (laje S3)

Tempo (min)	Temperatura - T4 (°C) Numérico	Temperatura - T4 (°C) Experimental	Erro (%)
0	25	25	0%
30	100.88	105.88	5%
60	190.452	205.71	7%
90	270	281.42	4%
120	335	329.28	2%
150	390	377.14	3%
180	420	411.429	2%

Fonte: O autor, 2017.

Tabela 28 - Temperatura do termopar T6-5 em função do tempo (laje S3)

Tempo (min)	Temperatura - T5 (°C) Numérico	Temperatura - T5 (°C) Experimental	Erro (%)
0	25	25	0%
30	46	110	58%
60	102	130	22%
90	153	200	24%
120	240	270	11%
150	324	300	8%
180	392	377	4%

Fonte: O autor, 2017.

Tabela 29 - Temperatura do termopar T6-6 em função do tempo (laje S3)

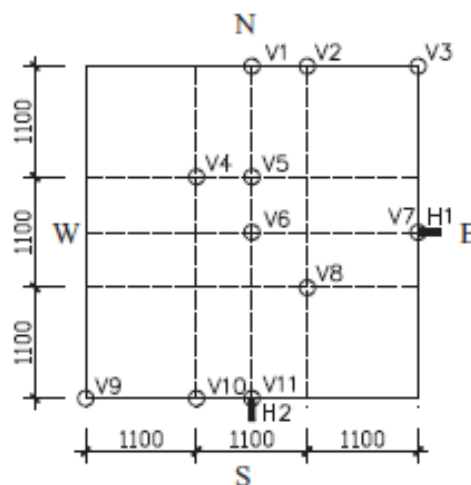
Tempo (min)	Temperatura - T6 (°C) Numérico	Temperatura - T6 (°C) Experimental	Erro (%)
0	25	25	0%
30	39	55	29%
60	95	84	13%
90	130	90	44%
120	219	78	181%
150	306	171	79%
180	375	222.8	68%

Fonte: O autor, 2017.

5.4.2 Comportamento mecânico

Os resultados foram calculados e validados no ponto V6 da laje, conforme é mostrado na Figura 92.

Figura 92 - Cálculos validados no ponto V6 da laje



Fonte: Wang, 2016.

Os resultados dos deslocamentos e tensões em temperatura ambiente, verificados no meio da laje, foram calculados através das tabelas de Bares e equilíbrio dos momentos no dimensionamento em concreto armado, respectivamente.

As Tabelas 29 e 30 mostram os resultados dos deslocamento e tensão na armadura, da solução analítica e numérica, respectivamente, para temperatura ambiente, no ponto V6.

Tabela 30 - Resultados analíticos em temperatura ambiente

Temperatura (°C)	Deslocamento vertical (mm)	Tensão na Armadura (MPa)
30	0.425	4.797

Fonte: O autor, 2017.

Tabela 31 - Resultados numéricos em temperatura ambiente

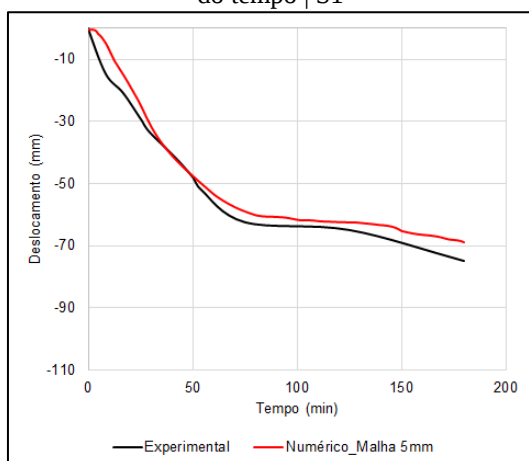
Temperatura (°C)	Deslocamento vertical (mm)	Tensão na Armadura (MPa)
30	0.42533	4.7596

Fonte: O autor, 2017.

Com estes resultados é possível verificar que o erro relativo, para os deslocamentos foi de 0,0776% e para a tensão na armadura 0,7797%, considerando uma malha de 2 centímetros.

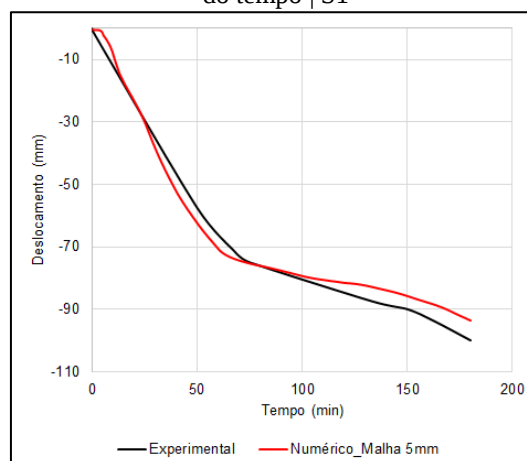
As Figuras 93 e 94 mostram a evolução dos deslocamentos em função do tempo, durante o incêndio para as lajes S1 e S3.

Figura 93 - Evolução dos deslocamentos em função do tempo | S1



Fonte: O autor, 2017.

Figura 94 - Evolução dos deslocamentos em função do tempo | S1



Fonte: O autor, 2017.

As Tabelas 31 e 32 mostram os valores dos deslocamentos, para S1 e S3 em um intervalo de 30 minutos com o erro relativo em cada instante analisado.

Tabela 32 - Deslocamentos da laje S1 durante o incêndio

Tempo (min)	Deslocamento Vertical (mm) Numérico	Deslocamento Vertical (mm) Experimental	Erro(%)
0	0	0	0%
30	31.57	34.28	8%
60	56.37	55	2%
90	60.67	63	4%
120	62.34	64.5	3%
150	65.16	70.7	8%
180	68.84	75	8%

Fonte: O autor, 2017.

Tabela 33 - Deslocamentos da laje S3 durante o incêndio

Tempo (min)	Deslocamento Vertical (mm) Numérico	Deslocamento Vertical (mm) Experimental	Erro (%)
0	0	0	0%
30	39.03	40.71	4%
60	70.93	64.28	10%
90	77.8	69	13%
120	81.69	77.143	6%
150	85.96	90	4%
180	93.78	100	6%

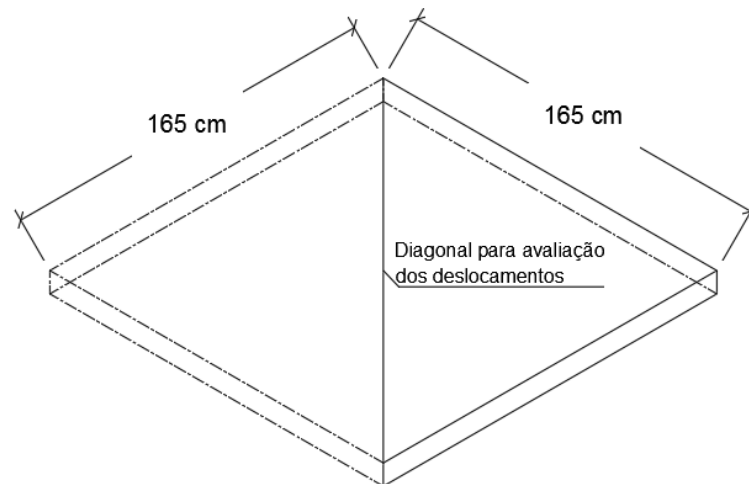
Fonte: O autor, 2017.

De acordo com os dados das Tabelas 31 e 32, pode-se verificar que a laje S1 mostra um resultado com uma melhor acurácia, obtendo erros maiores a partir dos 150 minutos. A laje S3 possui uma boa acurácia, no entanto em dois instantes, 60 e 90 minutos, este erro chega a 10% e 13%, respectivamente.

O limite de deflexão limite para a laje analisada, obtida através da ISO 834:1999 vale 272,25 milímetros. A taxa de deflexão limite, obtida através da mesma norma, vale 12,1 milímetros por minuto.

A Figura 95 mostra uma linha ao longo da diagonal e seção transversal para a avaliação dos deslocamentos a fim de visualizar o comportamento das lajes S1 e S3.

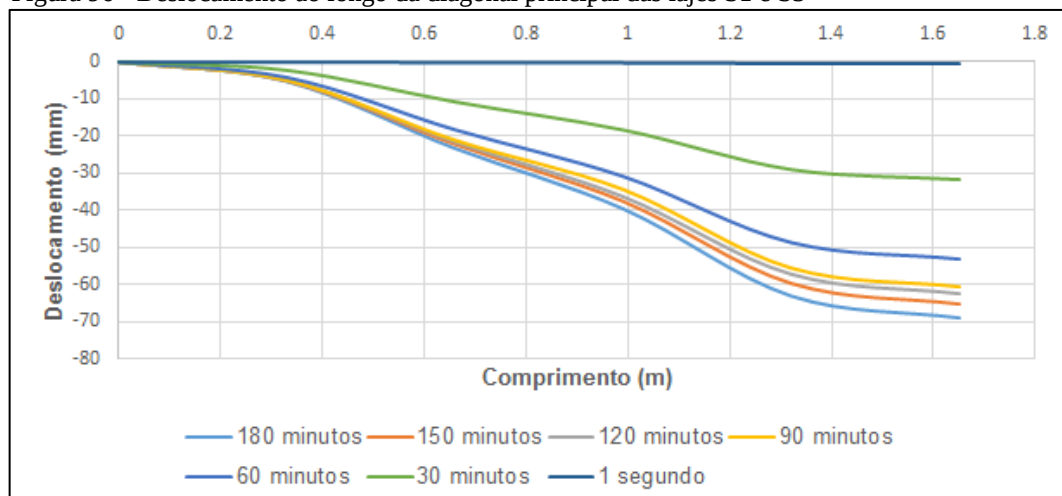
Figura 95 - Avaliação dos deslocamentos



Fonte: O autor, 2017.

A Figura 96 mostra o deslocamento ao longo da diagonal principal das lajes S1 e S3, respectivamente, em intervalos de 30 minutos.

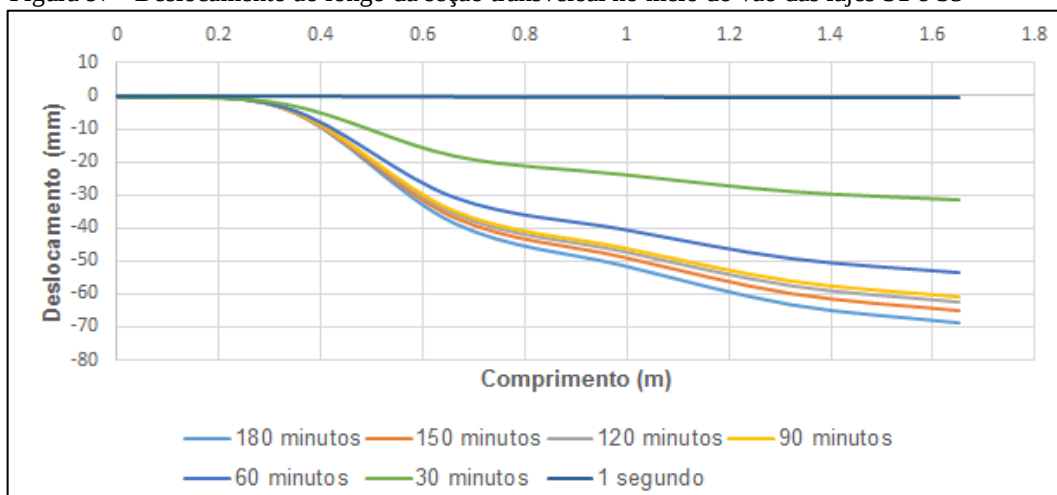
Figura 96 - Deslocamento ao longo da diagonal principal das lajes S1 e S3



Fonte: O autor, 2017.

A Figura 97 mostra o deslocamento ao longo da seção transversal das lajes S1 e S3, respectivamente, em intervalos de 30 minutos.

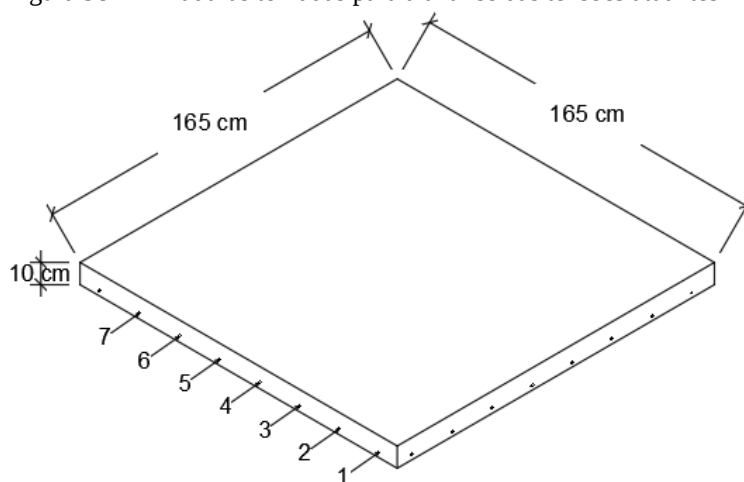
Figura 97 - Deslocamento ao longo da seção transversal no meio do vão das lajes S1 e S3



Fonte: O autor, 2017.

A Figura 98 mostra as armaduras tomadas para a análise das tensões atuantes.

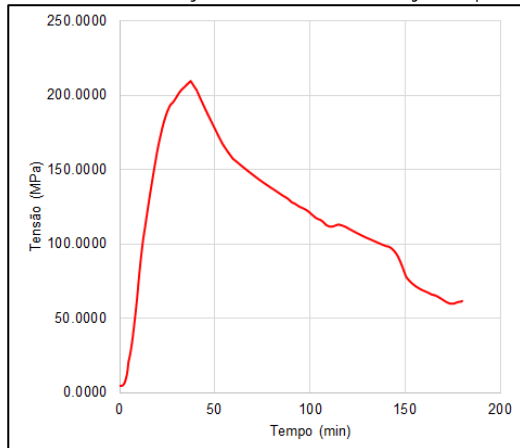
Figura 98 - Armaduras tomadas para a análise das tensões atuantes



Fonte: O autor, 2017.

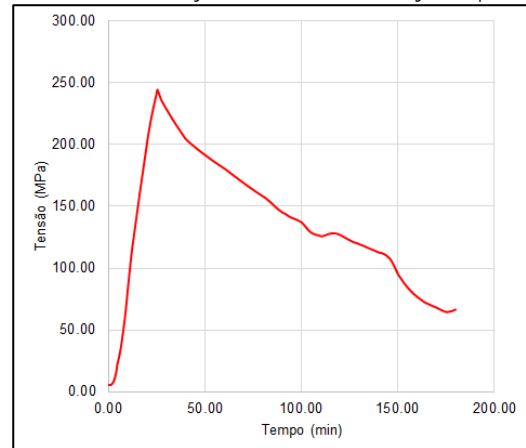
As Figuras 99 a 104 mostram as tensões normais atuantes nas armaduras durante a duração do incêndio na laje S1.

Figura 99 - Tensões normais atuantes nas armaduras durante a duração do incêndio na laje S1 | 1



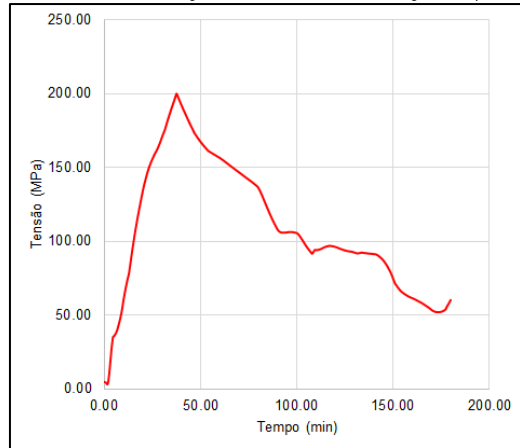
Fonte: O autor, 2017.

Figura 100 - Tensões normais atuantes nas armaduras durante a duração do incêndio na laje S1 | 2



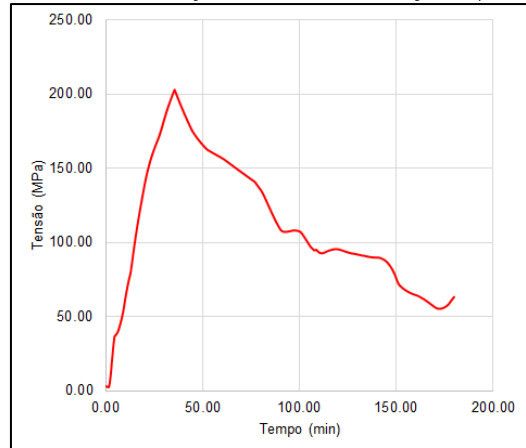
Fonte: O autor, 2017.

Figura 101 - Tensões normais atuantes nas armaduras durante a duração do incêndio na laje S1 | 3



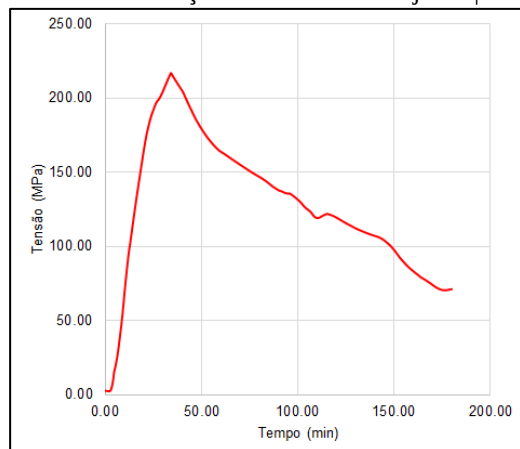
Fonte: O autor, 2017.

Figura 102 - Tensões normais atuantes nas armaduras durante a duração do incêndio na laje S1 | 4



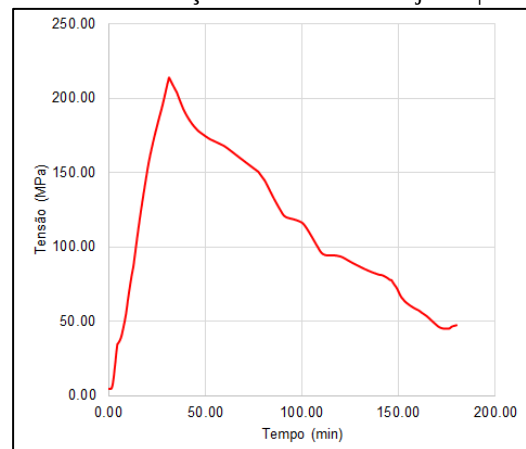
Fonte: O autor, 2017.

Figura 103 - Tensões normais atuantes nas armaduras durante a duração do incêndio na laje S1 | 5



Fonte: O autor, 2017.

Figura 104 - Tensões normais atuantes nas armaduras durante a duração do incêndio na laje S1 | 6



Fonte: O autor, 2017.

A Tabela 33 mostra as tensões nas armaduras durante o incêndio medidas a cada 30 minutos.

Tabela 34 - Tensões na armadura durante o incêndio (S1)

Tempo (min)	Tensão (MPa)					
	1	2	3	4	5	6
0	0	0	0	0	0	0
30	199.74	228.97	170.59	182.08	204.5	207.58
60	157.06	180.75	156.39	156.75	163.64	167.63
90	128.72	145.18	107.87	109	137.68	122.12
120	110.89	126.9	96.17	95.42	119.4	93.52
150	79.68	95.34	74.74	75.79	97.56	69.71
180	61.91	66.27	60.22	63.35	71.17	47.33

Fonte: O autor, 2017.

6 CONSIDERAÇÕES FINAIS

6.1 CONCLUSÃO

Nesta dissertação foram analisados os efeitos do fogo em lajes de concreto armado, com armadura em uma e duas direções através de uma análise numérica comparada com uma análise experimental realizada por Wang (2016).

Os resultados são mostrados a seguir:

- Os resultados mostram que a modelagem computacional, realizada através método dos elementos finitos no programa Abaqus, são satisfatórios tanto para a temperatura quanto para deslocamentos, obtendo erros inferiores a 13% em ambos os casos, comparados com a análise experimental;
- Foi observado também, no refinamento de malha, que os resultados obtidos com elementos de função de interpolação quadráticos são mais efetivos que os resultados obtidos com elementos de função de interpolação linear, tanto em comparação com solução analítica quanto, principalmente, em tempo de processamento, que apesar de os elementos quadráticos necessitarem de mais tempo de processamento em determinada malha, os elementos de aproximação linear necessitam de uma malha aproximadamente 5 vezes menor para obter a solução mais próxima da solução com elemento quadrático, o que leva um tempo de processamento equivalente ao utilizado nesta condição;
- Os resultados da temperatura obtidos através do modelo numérico convergem com os obtidos da análise experimental de Wang (2016), no entanto, quando se compara nos termopares T4-5 e T4-6, os resultados não são convergentes;
- Foi observado também que para laje armada em uma direção, dimensionada para um TRRF de 30 minutos, através da ABNT NBR 15200:2012, rompe através do critério de falha da ISO 834:1999 na taxa de deflexão limite em aproximadamente 121 minutos, ou seja, esta laje suporta 4 vezes mais o tempo no incêndio que o estabelecido pela ABNT NBR 15200:2012, levando a conclusão de que esta norma trabalha dentro da segurança da estrutura;
- A tensão na armadura aumenta nos primeiros instantes porque o deslocamento aumenta muito mais do que o módulo de elasticidade diminui;

- A tensão na armadura diminui nos instantes finais porque o modulo de elasticidade diminui muito mais do que o deslocamento aumenta.

6.2 SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS

É essencial dar continuidade ao estudo do tema acima apresentado, e através do estudo realizado neste volume, o autor sugere as seguintes continuações para futuras pesquisas:

- O presente trabalho realizou uma análise numérica de lajes de concreto armado submetido a incêndio devido ao curto tempo de obtenção de resultados. Consequentemente não foi desenvolvido uma análise experimental, que é de suma importância para o entendimento do real comportamento estrutural nestas condições, uma vez que não é viável a obtenção de uma solução analítica genérica para os casos de estruturas de concreto armado em situação de incêndio. Então há um campo vasto para ser desvendado nesta área de concentração na comunidade científica;
- Considerar o efeito da fluência e retração na cura do experimento;
- Considerar uma análise acoplada e verificar o tempo de processamento junto com os resultados obtidos.

REFERÊNCIAS

ABAQUS. **Standard User's Manual, version 6.13**. Simulia Corp., USA, 2013.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR-10636**: paredes e divisórias sem função estrutural. Determinação da resistência ao fogo. Método de ensaio. Rio de Janeiro, 1989.

_____. **NBR-13860**: Glossário de termos relacionados com a segurança contra incêndio. Rio de Janeiro, 1997.

_____. **NBR-14323**: projeto de estruturas de aço e estruturas mistas de aço e concreto em situação de incêndio. Rio de Janeiro, 2013.

_____. **NBR-14432**: exigências de resistência ao fogo de elementos construtivos de edificações – procedimento. Rio de Janeiro, 2001.

_____. **NBR-15200**: projeto de estruturas de concreto em situação de incêndio. Rio de Janeiro, 2012.

_____. **NBR-5628**: componentes construtivos estruturais: determinação da resistência ao fogo. Rio de Janeiro, 2011.

_____. **NBR-6118**: projeto de estruturas de concreto. Rio de Janeiro, 2014.

_____. **NBR-8681**: ações e segurança nas estruturas – procedimento. Rio de Janeiro, 2004.

BERENGUER, R. A. et al. Estudo de caso: estrutura de concreto que sofreu incêndio na região metropolitana do Recife. In: CONGRESSO BRASILEIRO DO CONCRETO, 57., Bonito, MS. **Anais...** Bonito, MS: [s.n.], 2015.

BRUSHLINSKY, N. N. et al. **World fire statistics**. International Association of Fire and Rescue Services (CTIF). [S.l.: s.n.]. 2016.

CALDAS, R. B. **Análise numérica de estruturas de aço, concreto e mistas em situação de incêndio**. 2008. 226 f. Tese (Doutorado em engenharia)–Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte, 2008. Disponível em: <<http://pct.capes.gov.br/teses/2008/32001010038P8/TES.pdf>>. Acessado em: 11 ago. 2017.

CORRÊA, C. et al. Mapeamento de incêndios em edificações: um estudo de caso na cidade do Recife. **Revista de Engenharia Civil IMED**, Recife, v. 2, n. 3, p. 15-34, 2015.

COSTA, C. N. **Dimensionamento de elementos de concreto armado em situação de incêndio**. 2008. 724 f. Tese (Doutorado)–Universidade de São Paulo, São Paulo, 2008. Disponível em: <<http://www.teses.usp.br/teses/disponiveis/3/3144/tde-04092008-155911/en.php>>. Acessado em: 30 ago. 2017.

DEENY, S. M. **Spalling of concrete**: implications for structural performance in fire. 2008. Disponível em: <<https://ir.canterbury.ac.nz/handle/10092/4389>>. Acesso em: 22 ago. 2017.

EUROPEAN COMMITTEE FOR STANDARDIZATION. **EUROCODE 1: Actions on structures - Part 1-2: General actions - Actions on structures exposed to fire.** 2002. Disponível em: < <http://www.phd.eng.br/wp-content/uploads/2015/12/en.1991.1.2.2002.pdf>>. Acesso em: 19 jul. 2017.

_____. **EUROCODE 2: design of concrete structures - part 1-2: general rules - structural fire design.** 2004. Disponível em: <<http://www.phd.eng.br/wp-content/uploads/2015/12/en.1992.1.2.2004.pdf>>. Acesso em: 19 jul. 2017.

GALEOTE, D. **10 grans incendis que van fer història.** 2016. 1 Figura. Disponível em: <<http://www.sapiens.cat/ca/notices/2016/09/10-grans-incendis-que-van-fer-historia-6787.php>>. Acesso em: 21 abr. 2017.

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

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

HARMATHY, T. Z. Thermal properties of concrete at elevated temperatures. **ASTM Journal of Materials**, Atlanta, v. 5, n. 1, p. 47-74, 1970.

HERTZ, K. D. Limits of spalling of fire exposed concrete. **Fire Safety Journal**, Lausanne, v. 38, n. 2, p. 103-116, 2003.

INTERNATIONAL ORGANIZATION FOR STANDARDIZATION. **ISO 834-11: fire-resistance tests – elements of building construction – part 1: general requirements for fire resistance testing.** Geneva, 2014.

JANSSON, R. **Fire spalling of concrete: theoretical and experimental studies.** doctoral thesis in concrete structures. Stockholm: KTH Royal Institute of Technology, 2013.

KALIFA, P. et al. Spalling and pore pressure in HPC at high temperatures. **Cemente and concrete Research**, Bratislava, v. 30, n. 12, p. 1915-1927, 2000.

KHOURY, G. A. Effect of fire on concrete and concrete structures. **Progress in Structural Engineering and Materials**, Heidelberg, v. 2, n. 4, p. 429-447, 2000.

KHOURY, G. A.; ANDERBERG, Y. **Concrete spalling review: fire safety design.** [S.l.: s.n.], 2000.

KODUR, V. **Properties of concrete at elevated temperatures.** 2014. Disponível em: <<https://www.hindawi.com/journals/isrn/2014/468510/>>. Acesso em: 17 ago. 2017.

LIRA, G. M. V. **Análise das consequências da retirada de paredes na estabilidade de edifícios de quatro pavimentos construídos com alvenaria resistente e estrutural.** 2017. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil)–Universidade Católica de Pernambuco, Recife, 2017.

LOGAN, D. L. **A first course in the finite element method**. 5th ed., SI. Stamford, CT: Cengage Learning, 2012.

NATUREZA DO FOGO. **O grande incêndio de Roma**. 2014. 1 figura. Disponível em: <<http://naturezadofogo.com.br/2014/06/o-grande-incendio-de-roma/>>. Acesso em: 21 abr. 2017.

NEVILLE, A. M. **Propriedades do concreto**. 2. ed. São Paulo: Pini, 1997.

NOVAK, J.; KOHOUTKOVA, A. Mechanical properties of concrete composites subject to elevated temperature. **Fire Safety Journal**, Lausanne, v. 95, p. 66-76, jan. 2018.

OLIVEIRA, A. de C. P. de. **Gerenciamento de riscos de incêndio: avaliação do impacto em estruturas de concreto armado através de uma análise experimental de vigas isostáticas**. 2007. 150 f. Dissertação (Mestrado)–Universidade Federal de Pernambuco, Recife, 2007.

PIERIN, I.; SILVA, V. P. E. Análise térmica de laje alveolar protendida em situação de incêndio. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE CONCRETO, 51., Curitiba. **Anais...** Curitiba: [s.n.], 2009.

PIRES, T. A., RODRIGUES, J. P. C.; SILVA, J. J. R. Fire resistance of concrete filled circular hollow columns with restrained thermal elongation. **Journal of Constructional Steel Research**, v. 77, p. 82-94, oct. 2012.

PITANGA, M. de A. **Análise térmica de vigas mistas aço-concreto em situação de incêndio**. 2004. 150 f. Dissertação (Mestrado)–Universidade Federal de Pernambuco, Recife, 2004.

REGGIANI, R. F. P. **Verificação de lajes de concreto armado no estado limite de serviço de deformação excessiva**. 2016. 151 f. Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação em engenharia civil)–Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, 2016. Disponível em: <<https://goo.gl/fpRGk7>>. Acesso em: 12 ago. 2017.

SANTIAGO FILHO, H. A. Análise de uma laje de concreto armado em situação de incêndio. In: CONGRESSO BRASILEIRO DO CONCRETO, 59., Bento Gonçalves. **Anais... Bento Gonçalves: [s.n.]**, 2017.

SANTIAGO FILHO, H. A.; PEREIRA, R. G.; NOGUEIRA, F. A. Structural behavior of reinforced concrete buildings due to Construction effects. In: CONGRESSO BRASILEIRO DO CONCRETO, 56., Ponta Negra, RN. **Anais...** Ponta Negra, RN: [s.n.], 2014.

SANTOS, E. M. dos. **Influência da alvenaria no comportamento estrutural de edifícios altos de concreto armado**. 2007. 132 f. Dissertação (Mestrado em engenharia civil)–Universidade Católica de Pernambuco, Recife, 2007.

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

SILVA, C. R. S. **Desenvolvimento de formulações de elementos finitos para problemas de transferência de calor**. 2014. 131 f. Tese (Doutorado)–Faculdade de Ciências e Tecnologia,

Universidade Nova de Lisboa, Caparica, 2014. Disponível em: <<http://hdl.handle.net/10362/12328>>. Acesso em: 19 set. 2017.

SILVA, V. P. e. **Estruturas de aço em situação de incêndio**. 1997. 170 f. Tese (Doutorado em engenharia)–Universidade de São Paulo, São Paulo, 1997. Disponível em: <<https://goo.gl/WdcLzw>>. Acesso em: 12 maio 2017.

_____. **Projeto de estruturas de concreto em situação de incêndio**: conforme a ABNT NBR 15200:2012. São Paulo: Blucher, 2012.

SORIANO, H. L. **Elementos finitos**: formulação e aplicação na estática e dinâmica das estruturas. Rio de Janeiro: Editora ciência Moderna Ltda, 2009.

SOUSA, P. F. S. Desempenho de lajes steel deck em situação de incêndio. In: CONGRESSO BRASILEIRO DO CONCRETO, 59., Bento Gonçalves. **Anais...** Bento Gonçalves: [s.n.], 2017.

SOUSA, S. F. F. M. de. **Projeto de segurança contra incêndios em edifícios - caso em estudo**: hotel. 2012. 96 f. Dissertação (Mestrado em engenharia civil)–Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto, Porto, 2012. Disponível em: <<https://repositorio-aberto.up.pt/bitstream/10216/69333/1/000155134.pdf>>. Acesso em: 12 out. 2017.

SOUZA, V. C. M. de; RIPPER, T. **Patologia, recuperação e reforço de estruturas de concreto**. 1.ed. São Paulo: Pini, 2009.

TEIXEIRA, A. A. R. **Desempenho de lajes alveolares protendidas em situação de incêndio**. 2016. Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação em engenharia civil)–Universidade Federal de Pernambuco, 2016.

TIMOSHENKO, S. P.; GERE, J. E. **Mecânica dos sólidos**. Rio de Janeiro: LTC, 1983-1998. 2 v. ISBN 85-216-0247-2 (v.1).

TRANSMISSÃO de calor. [2017?]. 1 figura. Disponível em: <<https://www.coladaweb.com/fisica/termologia/transmissao-de-calor>>. Acesso em: 22 maio 2017.

URNS, S. R. **Introdução à combustão**: conceitos e aplicações. 3. ed. Porto Alegre: AMGH Editora, 2013.

WANG, Y. Experimental study on the fire behaviour of reinforced concrete slabs under combined uni-axial in-plane and out-of-plane loads. **Engineering Structures**, v. 128, n. 1, p. 316-332, dec. 2016. Disponível em: <<http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0141029616307532>>. Acesso em: 22 out. 2017.

ZIENKIEWICZ, O. C. **The Finite Element Method – in Engineering Science**. London: McGraw-Hill Co., 1977.