

Universidade Federal do Rio Grande do Sul
Escola de Engenharia
Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil

Estudo numérico dos efeitos estruturais da exposição de pilares em
concreto armado a altas temperaturas

Matheus Wanglon Ferreira

Porto Alegre
2019

MATHEUS WANGLON FERREIRA

**ESTUDO NUMÉRICO DOS EFEITOS ESTRUTURAIS DA
EXPOSIÇÃO DE PILARES EM CONCRETO ARMADO A
ALTAS TEMPERATURAS**

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-Graduação em
Engenharia Civil da Universidade Federal do Rio Grande do Sul,
como parte dos requisitos para obtenção do título de Mestre em
Engenharia.

Porto Alegre

2019

CIP - Catalogação na Publicação

Ferreira, Matheus Wanglon

Estudo numérico dos efeitos estruturais da exposição de pilares em concreto armado a altas temperaturas / Matheus Wanglon Ferreira. -- 2019. 238 f.

Orientador: Luiz Carlos Pinto da Silva Filho.

Dissertação (Mestrado) -- Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Escola de Engenharia, Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, Porto Alegre, BR-RS, 2019.

1. Análise termomecânica. 2. Incêndio. 3. Método dos elementos finitos. 4. Altas temperaturas. 5. Concreto armado. I. Filho, Luiz Carlos Pinto da Silva, orient. II. Título.

MATHEUS WANGLON FERREIRA

**ESTUDO NUMÉRICO DOS EFEITOS ESTRUTURAIS DA
EXPOSIÇÃO DE PILARES EM CONCRETO ARMADO A
ALTAS TEMPERATURAS**

Esta dissertação de mestrado foi julgada adequada para a obtenção do título de MESTRE EM ENGENHARIA, Área de Concentração (Estruturas), e aprovada em sua forma final pelo professor orientador e pelo Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil da Universidade Federal do Rio Grande do Sul.

Porto Alegre, 30 de abril de 2019

Prof. Luiz Carlos Pinto da Silva Filho
Ph.D. pela Universidade de Leeds / Inglaterra
orientador

Prof. Nilo Cesar Consoli
Coordenador do PPGEC/UFRGS

BANCA EXAMINADORA

Prof. Américo Campos Filho (UFRGS)
Dr. pela Escola Politécnica da Universidade de São Paulo

Prof. Mauro de Vasconcellos Real (FURG)
Dr. pela Universidade Federal do Rio Grande do Sul

Prof^ª. Paula Manica Lazzari (UFRGS)
Dr^ª. pela Universidade Federal do Rio Grande do Sul

Dedico este trabalho à minha mãe Idelma e à minha filha Sophia pela compreensão e apoio durante o período de seu desenvolvimento.

AGRADECIMENTOS

Agradeço primeiramente a toda minha família pelo apoio incondicional que recebi durante este desafio. Em especial, à minha mãe Idelma Wanglon que sempre acreditou no estudo e na educação e me propiciou todo suporte para realização do mestrado.

Agradeço à minha filha Sophia Ferreira por tentar compreender e aceitar minha ausência nos períodos mais conturbados do mestrado. Agradeço por ela ser minha maior fonte de inspiração e me motivar para alcançar objetivos ainda maiores.

Agradeço aos meus irmãos Marcela Wanglon, Pablo Wanglon, Mirelli Ferreira e Gilvana Ferreira que sempre incentivam meu desenvolvimento pessoal e profissional.

Permito-me a fazer um agradecimento especial à Marcela Wanglon por contribuir diretamente com a conclusão da dissertação, dispondo de seu tempo e conhecimento para todas as correções sempre que necessárias. Agradeço-a também por ser um exemplo de pessoa e professora, por ter aberto as portas da vida acadêmica na família, por ser a pioneira a fazer mestrado, doutorado e pós-doutorado. Tua luta, tua honestidade, tua capacidade e teu amor pela profissão me inspiram e inspirarão gerações.

Agradeço ao meu afilhado Antônio Garcia pela amizade, pelo exemplo de perseverança e determinação. Sempre que eu pensar em desistir de algo, lembrarei da tua luta pela vida.

Agradeço à minha namorada Luciana Prado por todo companheirismo e amizade que dividimos desde o começo da pós-graduação. A tua presença no meu cotidiano foi fundamental para a elaboração e conclusão deste trabalho, por termos compartilhado, além do amor, todas aflições e alegrias da vida acadêmica.

Agradeço aos meus amigos de vida, em especial, ao Matheus Lopes, por permanecerem ao meu lado e me incentivarem na busca de meus objetivos.

Agradeço ao Prof. Luiz Carlos Pinto da Silva Filho, orientador deste trabalho pela oportunidade e credibilidade a mim condecoradas.

Agradeço com todo meu respeito e profunda admiração ao Prof. Mauro de Vasconcellos Real pelo apoio, atenção e orientação no desenvolvimento deste trabalho.

Agradeço à Larissa Kirchhof, Paulo Baumbach, Erica Kimura, Ronaldo Rigobello e ao Puneet Kumar pelas trocas de experiências e pela gentil colaboração sempre que foram solicitados por mim.

À Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior (CAPES) pelo suporte financeiro que possibilitou a minha dedicação total à pesquisa durante os dois anos de mestrado.

Aos professores, funcionários e amigos do Programa de Pós-graduação em Engenharia Civil da UFRGS e da FURG que me acolheram e colaboraram para a realização deste trabalho.

A todos vocês, os meus sinceros agradecimentos e reconhecimento.

One child, one teacher, one book and one pen can change
the world.

Malala Yousafzai

RESUMO

FERREIRA, M. W. **Estudo numérico dos efeitos estruturais da exposição de pilares em concreto armado a altas temperaturas.** 2019. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) – Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre.

Com o passar dos anos, devido principalmente as catástrofes provocadas por graves incêndios em prédios, pavilhões industriais, túneis e outras obras de engenharia, percebeu-se um aumento no foco de grupos de pesquisas em estudar o comportamento dos elementos estruturais expostos ao fogo. Sabe-se que os pilares que compõem a estrutura de uma edificação são os principais responsáveis pela integridade da mesma, o que justifica a necessidade e a preocupação em estudá-las e protegê-las. Atualmente, o comportamento e a segurança de elementos estruturais são determinados por procedimentos simplificados presentes nas normas vigentes que abrangem esta área de estudo, tal como a NBR 15200:2012. Desta forma, o presente trabalho tem como principal objetivo a criação de um modelo numérico tridimensional para simulação adequada de pilares de concreto armado em situação de incêndio através do *software* ANSYS 19.1, com base no método dos elementos finitos (MEF). O modelo proposto visa prever o comportamento estrutural sob altas temperaturas, pois é sabido que a temperatura elevada reduz significativamente a resistência dos materiais. Para isto, os principais fatores que governam a resposta estrutural dos elementos em função da temperatura são levados em consideração. As análises obtidas com o modelo criado foram confrontadas e validadas com resultados oriundos de ensaios laboratoriais, evidenciando boa correlação entre o campo numérico e o experimental. Ao final do estudo, apresenta-se, em conformidade com a normatização brasileira, uma aplicação prática de dimensionamento e verificação de um pilar usual. Tanto a análise térmica quanto a termomecânica deste pilar permitem concluir que o dimensionamento feito pela NBR 6118:2014 em conjunto com a NBR 15200:2012 oferece a segurança requerida, protegendo o aço frente ao aumento de temperatura e resistindo ao incêndio sem atingir o colapso estrutural.

Palavras-chave: *análise termomecânica; incêndio; método dos elementos finitos; altas temperaturas; concreto armado.*

ABSTRACT

FERREIRA, M. W. **Numerical study of structural effects in reinforced concrete columns exposed to high temperatures.** 2019. Dissertation (Civil Engineering M. Sc. Dissertation) – Civil Engineering Postgraduate Program, Federal University of Rio Grande do Sul, Porto Alegre.

Over the years, mostly due to the catastrophes caused by serious fires in buildings, industrial pavilions, tunnels, and other engineering works, it was observed an increase in the focus of research groups to study the behavior of structural elements exposed to fire. It is known that the columns of the structure of a building are the main responsible for its integrity, which justifies the need and concern in understanding and protecting them. Nowadays, the behavior of structural elements and their safety are commonly determined by simplified procedures suggested by the current specific standards, such as NBR 15200:2012. Therefore, this work aims to create a three-dimensional numerical model for appropriate simulation of reinforced concrete columns exposed to fire through software ANSYS 19.1, based on finite element method (FEM). The proposed model aims to predict the structural behavior of reinforced concrete columns in a fire situation since it is known that high temperatures significantly reduce their mechanical resistance. For this, the main factors that govern their structural response are taken into account. Analyzes obtained with the proposed model were validated with results from experimental data, evidencing a good correlation between numerical and experimental field. At the end of this study, according to Brazilian codes, a practical designing application and verification of a usual. Both thermal and thermomechanical analysis of this column allow to conclude that the designing made with NBR 6118:2014 associated with NBR 15200:2012 offers the required safety, protecting steel bars against rising temperature and resisting the fire situation without reaching structural collapse.

Palavras-chave: *termomechanical analysis; fire; finite element method; high temperatures; reinforced concrete.*

SUMÁRIO

1 INTRODUÇÃO	22
1.1 OBJETIVOS DA DISSERTAÇÃO	23
1.2 CONTEXTUALIZAÇÃO E JUSTIFICATIVA DO TEMA.....	23
1.3 DELIMITAÇÃO DO ESTUDO	24
1.4 METODOLOGIA	24
1.5 ORGANIZAÇÃO E APRESENTAÇÃO DO TRABALHO.....	24
2 CONCEITOS BÁSICOS SOBRE ESTRUTURAS DE CONCRETO ARMADO E TEMPERATURA	26
2.1 ESTRUTURAS DE CONCRETO ARMADO	26
2.2 ESTRUTURAS DE CONCRETO ARMADO EM SITUAÇÃO DE INCÊNDIO.....	27
2.3 FOGO, INCÊNDIO E SEGURANÇA.....	28
2.4 MECANISMOS DE TRANSFERÊNCIA DE CALOR	29
2.4.1 Transferência de calor por condução	30
2.4.2 Transferência de calor por convecção.....	31
2.4.3 Transferência de calor por radiação	32
2.5 AÇÕES TÉRMICAS EM ESTRUTURAS.....	34
2.6 CURVA TEMPERATURA-TEMPO DE UM INCÊNDIO	35
2.6.1 Incêndio Real.....	35
2.6.2 Incêndio Paramétrico (Natural).....	37
2.6.3 Incêndio Padrão.....	39
2.7 ELEVAÇÃO DA TEMPERATURA NAS ESTRUTURAS	41
2.8 ALGUMAS PESQUISAS INTERNACIONAIS DESENVOLVIDAS COM ABORDAGEM NUMÉRICA.....	42

2.9 ALGUMAS PESQUISAS NACIONAIS DESENVOLVIDAS NESTA ÁREA DE ESTUDO	45
3 COMPORTAMENTO DOS MATERIAIS SOB TEMPERATURA ELEVADA.....	47
3.1 PROPRIEDADES DO AÇO	48
3.1.1 Propriedades térmicas	48
3.1.2 Propriedades mecânicas	52
3.2 PROPRIEDADES DO CONCRETO.....	61
3.2.1 Propriedades térmicas	61
3.2.2 Propriedades mecânicas	68
3.3 PROPRIEDADES MECÂNICAS E TÉRMICAS DO CONCRETO DE ALTA RESISTÊNCIA.....	78
3.4 <i>SPALLING</i> DO CONCRETO	79
3.4.1 Definição de <i>spalling</i> explosivo.....	82
3.4.2 Fatores que influenciam no <i>spalling</i> explosivo.....	82
3.4.3 Medidas para evitar o <i>spalling</i>	85
4 METODOLOGIA ADOTADA – ANSYS 19.1.....	86
4.1 CONSIDERAÇÕES INICIAIS SOBRE O ANSYS.....	86
4.2 ANÁLISE TÉRMICA: Elevação de temperatura em elementos estruturais	87
4.2.1 Condução e convecção	88
4.2.2 Radiação	96
4.2.3 Elementos finitos utilizados para análise térmica bidimensional	98
4.2.4 Elementos finitos utilizados para análise térmica tridimensional.....	99
4.3 ANÁLISE ESTRUTURAL.....	101
4.3.1 Abordagem analítica inicial	102
4.3.2 Derivação das matrizes estruturais.....	104
4.3.3 Elementos finitos utilizados para análise estrutural tridimensional.....	108
4.3.4 Modelo Willam e Warnke para o comportamento do concreto.....	110

4.4 ANÁLISE ACOPLADA	112
----------------------------	-----

5 ASPECTOS E VALIDAÇÃO DA MODELAGEM NUMÉRICA 115

5.1 ANÁLISE TÉRMICA BIDIMENSIONAL	115
---	-----

5.1.1 Aspectos do modelo numérico	115
---	-----

5.1.2 Resultados da validação	117
-------------------------------------	-----

5.2 ANÁLISE TÉRMICA TRIDIMENSIONAL	119
--	-----

5.2.1 Breve descrição do programa experimental	119
--	-----

5.2.2 Aspectos do modelo numérico	120
---	-----

5.2.3 Resultados da validação	122
-------------------------------------	-----

5.3 ANÁLISE ESTRUTURAL EM TEMPERATURA AMBIENTE	125
--	-----

5.3.1 Breve descrição do programa experimental	125
--	-----

5.3.2 Aspectos do modelo numérico	125
---	-----

5.3.3 Resultados da validação	128
-------------------------------------	-----

5.4 ANÁLISE TERMOMECAÂNICA	130
----------------------------------	-----

5.4.1 Breve descrição do programa experimental	131
--	-----

5.4.2 Breve descrição do método analítico	131
---	-----

5.4.3 Aspectos do modelo numérico	132
---	-----

5.4.4 Resultados da validação	135
-------------------------------------	-----

6 APLICAÇÃO PARA VERIFICAÇÃO DO DIMENSIONAMENTO DE PILARES SEGUNDO AS NORMAS BRASILEIRAS..... 140

6.1 DIMENSIONAMENTO CONFORME A NBR 6118:2014.....	140
---	-----

6.1.1 Parâmetros de resistência	140
---------------------------------------	-----

6.1.2 Geometria da coluna.....	141
--------------------------------	-----

6.1.3 Classificação e carregamento da coluna	141
--	-----

6.1.4 Dimensionamento da armadura longitudinal	141
--	-----

6.1.5 Disposição da armadura transversal.....	145
---	-----

6.2 VERIFICAÇÃO DO DIMENSIONAMENTO PARA ATENDER O TRRF CONFORME A NBR 15200:2012	145
--	-----

6.3 ANÁLISE NUMÉRICA DA COLUNA PELO MODELO CRIADO NO ANSYS	147
7 CONSIDERAÇÕES FINAIS	152
7.1 CONCLUSÕES.....	152
7.2 SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS	155
8 REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....	152

LISTA DE FIGURAS

Figura 2.1: triângulo e tetraedro de incêndio.	28
Figura 2.2: exemplo qualitativo da lei de Fourier unidimensional	31
Figura 2.3: resfriamento convectivo de um corpo aquecido.	32
Figura 2.4: curva temperatura-tempo de um incêndio real.	36
Figura 2.5: modelo de incêndio paramétrico.	37
Figura 2.6: comparação entre as curvas padronizadas.	40
Figura 2.7: modelo criado no ANSYS.	45
Figura 3.1: deformação térmica específica do aço em função da temperatura.	49
Figura 3.2: calor específico do aço em função da temperatura.	51
Figura 3.3: condutividade térmica do aço em função da temperatura.	52
Figura 3.4: coeficiente redutor da resistência do aço em função da temperatura.	55
Figura 3.5: coeficiente redutor do módulo de elasticidade do aço em função da temperatura.	57
Figura 3.6: relação constitutiva multilinear genérica do aço	59
Figura 3.7: diagrama tensão-deformação para aço laminado a quente e com ductilidade normal.	60
Figura 3.8: deformação térmica específica do concreto em função da temperatura.	63
Figura 3.9: calor específico do concreto em função da temperatura.	65
Figura 3.10: condutividade térmica do concreto em função da temperatura.	66
Figura 3.11: massa específica do concreto em função da temperatura.	68
Figura 3.12: coeficiente redutor κ_c, θ em função da temperatura.	70
Figura 3.13: coeficiente redutor κ_t, θ em função da temperatura.	72
Figura 3.14: coeficiente redutor κ_{cE}, θ em função da temperatura.	74
Figura 3.15: relação constitutiva genérica do concreto sob compressão em função da temperatura.	74
Figura 3.16: relação constitutiva do concreto sob compressão em função da temperatura com o ramo descendente conforme equação 3.27.	76
Figura 3.17: relação constitutiva do concreto sob compressão em função da temperatura com o ramo descendente linear.	77
Figura 3.18: relação constitutiva genérica do concreto sob compressão em função da temperatura proposta por fib (2010).	78
Figura 3.19: <i>spalling</i> de um pilar de concreto normal (a) e um pilar de concreto HSC (b). ...	81
Figura 3.20: <i>spalling</i> em viga de concreto.	81

Figura 4.1: volume de controle para aplicação do fluxo de calor.	90
Figura 4.2: elemento PLANE55.....	99
Figura 4.3: elemento SURF151.	99
Figura 4.4: elemento LINK33.....	100
Figura 4.5: elemento SOLID70.....	100
Figura 4.6: elemento SURF152.	101
Figura 4.7: representação do método de Newton-Raphson.	102
Figura 4.8: definição do vetor de tensões.	103
Figura 4.9: elemento LINK180.....	109
Figura 4.10: elemento SOLID65.....	109
Figura 4.11: envoltória de falha tridimensional (σ_1 , σ_2 e σ_3 são as tensões principais).....	111
Figura 4.12: fluxograma da análise acoplada pelo método sequencial.....	113
Figura 5.1: distribuição de temperatura para uma seção de dimensões de 16x30 cm de concreto simples exposta a um incêndio de 90 min (a) pelo ANSYS (b) Figura A.5 extraída de EN 1992-1-2 (2004).....	117
Figura 5.2: detalhamento estrutural geral dos pilares analisados [cm].	120
Figura 5.3: comparação entre os valores experimentais e numéricos da elevação da temperatura no concreto para a coluna C1.....	122
Figura 5.4: comparação entre os valores experimentais e numéricos da elevação da temperatura no concreto para a coluna C2.....	123
Figura 5.5: comparação entre os valores experimentais e numéricos da elevação da temperatura nas armaduras principais da coluna C1.....	123
Figura 5.6: comparação entre os valores experimentais e numéricos da elevação da temperatura nas armaduras principais da coluna C2.....	124
Figura 5.7: detalhamento estrutural geral das colunas C3 (a) e C4 (b) [cm].	126
Figura 5.8: (a) modelo mecânico/termomecânico genérico (b) detalhe da chapa de topo (c) posicionamento das armaduras.	128
Figura 5.9: comparação dos resultados para a coluna C3.	129
Figura 5.10: comparação dos resultados para a coluna C4.....	130
Figura 5.11: detalhamento estrutural geral da coluna C5 e C6 [cm].	133
Figura 5.12: (a) modelo térmico genérico (b) detalhe da malha utilizada (c) posicionamento das armaduras.....	135
Figura 5.13: comparação entre os valores experimentais, calculados e numéricos da elevação da temperatura no concreto.	136

Figura 5.14: comparação entre os valores experimentais e numéricos da elevação da temperatura na armadura principal.	137
Figura 5.15: comparação deslocamento axial da coluna C5.	138
Figura 5.16: comparação deslocamento axial da coluna C6.	139
Figura 6.1: situação do pilar intermediário e hipóteses de cálculo	141
Figura 6.2: disposição construtiva preliminar [cm].	145
Figura 6.4: disposição construtiva final [cm].	147
Figura 6.5: comparação entre os valores da elevação da temperatura no concreto obtidas pelo pilar com e sem verificação.	148
Figura 6.6: comparação entre os valores da elevação da temperatura no aço obtidas pelo pilar com e sem verificação.	148
Figura 6.7: deslocamento axial da coluna em função do aumento da temperatura.	151

LISTA DE TABELAS

Tabela 2.1: curva ASTM E119.	39
Tabela 3.1: valores para o coeficiente redutor da resistência do aço.	54
Tabela 3.2: valores para o coeficiente redutor do módulo de elasticidade do aço.	56
Tabela 3.3: valores de $\kappa\rho, \theta$ para aços de armadura passiva.	58
Tabela 3.4: valor de pico do calor específico conforme umidade do concreto.	64
Tabela 3.5: valores de condutividade térmica dos materiais que compõe o concreto.	65
Tabela 3.6: valores para o coeficiente redutor da resistência à compressão do concreto.	70
Tabela 3.7: deformações lineares específicas para o concreto.	76
Tabela 3.8: valores para o coeficiente redutor da resistência à compressão do concreto HSC.	79
Tabela 3.9: características das diferentes categorias de <i>spalling</i>	83
Tabela 5.1: comparação da distribuição de térmica.	118
Tabela 5.2: informações complementares das colunas estudadas para validação estrutural.	120
Tabela 5.3: informações complementares das colunas estudadas.	126
Tabela 5.4: informações complementares das colunas estudadas para validação termoestrutural.	132
Tabela 6.1: comparação entre os valores da elevação da temperatura no concreto obtidas pelo pilar com e sem verificação.	149

LISTA ABREVIATURAS E SÍMBOLOS

HSC	Concreto de alta resistência (<i>high strength concrete</i>)
MEF	Método dos elementos finitos
TRRF	Tempo requerido de resistência ao fogo
TRF	Tempo de resistência ao fogo
$\{ \}$	Vetor
$[]$	Matriz
∇	Operador gradiente
δ	Operador virtual
A	Área
c	Calor específico
$c_{s,\theta}$	Calor específico do aço por unidade de massa em função de θ
$c_{p,\theta}$	Calor específico do concreto por unidade de massa em função de θ
e	Emissividade resultante
e_{ay}	Excentricidade acidental em relação ao eixo y
e_{cy}	Excentricidade de primeira ordem em relação ao eixo y
e_{iy}	Excentricidade inicial em relação ao eixo y
e_{1y}	Excentricidade de primeira ordem em relação ao eixo y
e_{2y}	Excentricidade de fluência em relação ao eixo y
E_{abs}	Energia absorvida pelo corpo
E_c	Módulo de elasticidade tangente do concreto à temperatura ambiente
$E_{c,\theta}$	Módulo de elasticidade tangente do concreto em função da temperatura θ
$E_{ci,\theta}$	Módulo de elasticidade tangente inicial do concreto em função da temperatura
$E_{c1,\theta}$	Módulo de elasticidade secante do concreto em função da temperatura
E_{emi}	Energia emitida pelo corpo
E_{ref}	Energia refletida pelo corpo
E_s	Módulo de elasticidade do aço à temperatura ambiente
$E_{s,\theta}$	Módulo de elasticidade do aço em função de θ
E_{trans}	Energia transmitida pelo corpo
F_{ji}	Fatores de visada
f_{ck}	Resistência característica à compressão do concreto
f_{cd}	Resistência à compressão do concreto para projeto
f_{ctk}	Resistência característica à tração do concreto
$f_{ck,\theta}$	Resistência característica à compressão do concreto em função de θ
$f_{ctk,\theta}$	Resistência característica à tração do concreto em função da temperatura θ
$f_{p,\theta}$	Tensão de proporcionalidade do aço em função de θ
f_{yd}	Resistência ao escoamento do aço para projeto

f_{yk}	Resistência característica do aço em temperatura ambiente
$f_{yk,\theta}$	Resistência característica do aço em função da temperatura θ
G	Energia irradiada ao corpo
G_{xy}	Módulo Cisalhante no plano xy
\hat{h}	entalpia específica
M_d	Momento calculado para dimensionamento dos pilares
N_d	Esforço axial calculado para dimensionamento dos pilares
p	Pressão do fluido
\dot{q}	Taxa de geração de calor por unidade de volume;
q_{cd}	Fluxo de calor por condução
q_{cv}	Fluxo de calor por convecção
q_{rad}	Fluxo de calor por radiação
R	Volume de controle
S	Superfície de controle
t^*	Tempo fictício
$t^*_{máx}$	Tempo fictício máximo
t	Tempo real
T	Temperatura
U	Energia ou trabalho interno
\hat{u}	Energia interna específica
V	Trabalho externo
X	Coeficiente dependente do tempo máximo e do tempo limite de incêndio
α	Coeficiente de transferência de calor por convecção
α_E	Coeficiente para cálculo do módulo de elasticidade do concreto
α^{se}	Coeficiente da deformação térmica secante
Γ	Superfície de controle
Γ_{corr}	Fator de correção para o tempo
γ_c	Coeficiente para minoração da resistência característica do concreto
γ_f	Coeficientes para majoração das cargas
γ_s	Coeficiente para minoração da resistência característica do aço
δ_{ji}	Delta de Kronecker
ε	Emissividade da superfície
$\varepsilon_{c,\theta}$	Alongamento relativo do concreto em função da temperatura θ
$\varepsilon_{cu1,\theta}$	Deformação linear específica última do concreto
$\varepsilon_{c1,\theta}$	Deformação linear específica do concreto correspondente à resistência máxima do concreto em função da temperatura
$\varepsilon_{s,\theta}$	Deformação do aço em função da temperatura
$\varepsilon_{p,\theta}$	Limite de proporcionalidade na deformação
$\varepsilon_{y,\theta}$	Deformação de escoamento
$\varepsilon_{t,\theta}$	Limite de deformação para a resistência ao escoamento
$\varepsilon_{u,\theta}$	Deformação de ruptura
θ	Campo de temperatura

θ_{corpo}	Temperatura absoluta do corpo
θ_g	Temperatura absoluta dos gases
$\theta_{g,0}$	Temperatura absoluta dos gases no instante $t=0$
$\theta_{m\acute{a}x}$	Temperatura máxima absoluta dos gases
θ_{viz}	Temperatura absoluta da fonte de radiaao térmica
θ_{∞}	Temperatura absoluta de um fluido qualquer escoando sobre a superfície
$\kappa_{c,\theta}$	Coefficiente redutor de resistência à compressão do concreto em funao de θ
$\kappa_{cE,\theta}$	Coefficiente redutor do módulo de elasticidade do concreto em funao de θ
$\kappa_{ES,\theta}$	Coefficiente redutor do módulo de elasticidade do aço em funao de θ
$\kappa_{p,\theta}$	Coefficiente redutor do limite de proporcionalidade em funao de θ
$\kappa_{s,\theta}$	Coefficiente redutor de resistência do aço em funao de θ
$\kappa_{t,\theta}$	Coefficiente redutor de resistência à traao do concreto em funao de θ
λ	Condutividade térmica
$\lambda_{c,\theta}$	Condutividade térmica do concreto em funao da temperatura θ
$\lambda_{s,\theta}$	Condutividade térmica do aço em funao da temperatura θ
\vec{v}	Campo de velocidades de um fluido
ν_{xy}	Coefficiente de Poisson no plano xy
ρ	Massa específica ou densidade
ρ_s	Massa específica do aço
ρ_{θ}	Massa específica do concreto em funao da temperatura θ
σ_0	Constante de Stefan-Boltzmann
$\sigma_{c,\theta}$	Tensão à compressão no concreto em funao da temperatura
$\sigma_{s,\theta}$	Tensão no aço em funao da temperatura
Ω	Volume de controle

1 INTRODUÇÃO

O incêndio representa uma situação de risco tanto à segurança material quanto à segurança humana. No âmbito da construção civil, tem-se o mesmo panorama, incêndios de médias e grandes proporções podem ocasionar o colapso de edificações vitimando, por morte ou por perdas materiais, as pessoas envolvidas.

Sabe-se que o incêndio, em geral, configura uma situação que pode ser evitada. No entanto, ao acontecer, seja por ignorância ou por algum ato criminoso, deve ser controlado e resolvido de maneira adequada e segura.

Em Wang (2002), atribui-se a evolução das medidas de combate ao incêndio em edificações aos desastres ocorridos ao longo da história. O ser humano não é capaz de prever com precisão todas as variáveis que estão envolvidas em uma situação de incêndio, porém aprender com os erros já ocorridos é de suma importância para que seja possível minimizar os fatores de risco no futuro.

Segundo Regobello (2007), os avanços ocorridos no contexto mundial com relação ao entendimento do comportamento de estruturas em altas temperaturas e as maiores exigências por parte do Corpo de Bombeiros estimulam, no Brasil, estudos relacionados ao tema, principalmente no campo estrutural.

Sabe-se ainda que as estruturas de concreto armado, no território nacional, são amplamente utilizadas no campo da construção civil. Diversos fatores evidenciam esse uso em grande escala, dentre eles destacam-se o fato de ser uma solução durável e relativamente econômica. Isto justifica o quão importante é aprimorar o conhecimento referente ao desempenho deste material também em situações extremas como incêndio.

1.1 OBJETIVOS DA DISSERTAÇÃO

O presente trabalho tem como principal objetivo avaliar o comportamento de colunas de concreto armado em situação de incêndio. Os objetivos específicos são a criação de um modelo numérico termomecânico, a validação deste modelo e uma aplicação prática utilizando o modelo desenvolvido.

Ao final do estudo, apresenta-se um exemplo prático hipotético de dimensionamento de um pilar que pode ser facilmente encontrado em uma solução estrutural de um edifício para fins residenciais ou comerciais. Tal pilar é submetido à compressão simples e ao fogo simultaneamente. Com base no gradiente térmico gerado é possível determinar o efeito do fogo na deformação média, bem como estimar o tempo de resistência ao fogo (TRF) da peça estrutural. Após validar o modelo termomecânico criado com ensaios experimentais consistentes presentes na bibliografia, apresenta-se a verificação da segurança do dimensionamento realizado através da NBR 15200:2012 utilizada em conjunto com a NBR 6118:2014.

Espera-se que o desenvolvimento do presente estudo possa contribuir com a evolução do conhecimento no âmbito acadêmico e prático da Engenharia Civil. Almeja-se, ao final do trabalho, fornecer material científico para colaborar com novas pesquisas na área estrutural sob altas temperaturas, bem como originar publicações referentes a esta linha de estudo.

1.2 CONTEXTUALIZAÇÃO E JUSTIFICATIVA DO TEMA

No Brasil, as pesquisas sobre o comportamento estrutural em situação de incêndio ainda se encontram em um estágio inicial, principalmente no caráter experimental devido aos custos de processos e equipamentos envolvidos. Diante disso, buscam-se, através da análise numérica, modelos capazes de representar de forma satisfatória o comportamento dos materiais em elevadas temperaturas.

Sabe-se que os pilares que compõem a solução estrutural de uma edificação são os principais responsáveis pela integridade da mesma, o que justifica a necessidade de buscar prever o comportamento estrutural em situações adversas através de métodos analíticos, numéricos e experimentais. Os ensaios experimentais são a melhor forma de se compreender o comportamento das estruturas em situação de incêndio. Contudo, a realização de ensaios de

laboratório costuma ser limitada em quantidade devido aos seus elevados custos e demanda de tempo. Assim, o desenvolvimento de modelos numéricos, devidamente calibrados com resultados experimentais, permite ampliar o conhecimento com maior economia de recursos e rapidez.

1.3 DELIMITAÇÃO DO ESTUDO

Em conformidade com os aspectos já enfatizados, o presente estudo se limita à análise numérica tridimensional de colunas de concreto armado expostas à situação de incêndio, considerando o regime não linear dos materiais, através do Método dos Elementos Finitos (MEF). A modelagem numérica se limitará às etapas que envolvem a análise térmica, análise mecânica e análise mecânica incorporando os efeitos da análise térmica de maneira sequencial (análise termomecânica).

1.4 METODOLOGIA

Para proceder com a pesquisa, adotou-se como principal ferramenta de análise o *software* ANSYS 19.1, o qual oferece ao programador diversas ferramentas nos campos da análise termomecânica. O *software* considera os efeitos da condução, convecção e radiação na transferência de calor do modelo, assim como a análise termomecânica transiente da estrutura, objeto de interesse do presente estudo.

Os resultados obtidos serão confrontados progressivamente com as referências bibliográficas escolhidas para fundamentar o estudo. Isto é, cada etapa da concepção do modelo como, por exemplo, a análise térmica bidimensional, a análise térmica tridimensional, a análise estrutural e a análise termomecânica serão comparadas separadamente com os valores presentes na literatura. Ressalta-se que todos os conceitos citados neste subitem estão em um caráter introdutório e serão apresentados com maior detalhamento no capítulo 4, referente à metodologia adotada para a realização do trabalho.

1.5 ORGANIZAÇÃO E APRESENTAÇÃO DO TRABALHO

O presente trabalho é constituído de assuntos relacionados às propriedades dos materiais que compõem os pilares de concreto armado, ao comportamento destas peças estruturais quando

expostas às altas temperaturas e à modelagem numérica dos pilares em situação de incêndio. Os assuntos pertinentes a este estudo estão separados em capítulos.

Ao longo deste primeiro capítulo foi apresentada a descrição do problema, juntamente com os objetivos, justificativa e organização do trabalho em um caráter introdutório.

No capítulo 2 é apresentada uma revisão bibliográfica de conceitos importantes para o andamento da pesquisa. Dentre estes, destacam-se as teorias referentes às estruturas de concreto armado, as características envolvidas na temática do incêndio e a ação térmica do fogo incidindo na estrutura, os mecanismos de transferência de calor e, por fim, a apresentação de modelos simplificados e avançados utilizados atualmente para determinar a resposta estrutural em situação de incêndio.

Ao longo do capítulo 3, têm-se as propriedades térmicas e mecânicas dos materiais que regem o desenvolvimento deste trabalho e constituem o concreto armado: aço e concreto. Além disso, apresenta-se a fundamentação teórica relacionada ao *spalling*. Incluindo sua definição, parâmetros que influenciam na ocorrência do fenômeno e medidas para evitar sua ocorrência.

No capítulo 4, por sua vez, apresenta-se detalhadamente a metodologia adotada para a realização do trabalho. Refere-se aos aspectos utilizados para representar as ações térmicas e mecânicas, apresentado toda formulação matemática utilizada pelo programa para proceder com a solução do problema.

Os aspectos da modelagem computacional nas diferentes análises, bem como as validações realizadas estão apresentados no capítulo 5. Nesta seção, definem-se os elementos finitos a serem utilizados, o grau de refinamento da malha adotada, as condições de contorno do problema e as relações constitutivas dos materiais que foram incorporados à rotina.

O fechamento do trabalho é dado a partir do capítulo 6, no qual será apresentada a verificação do dimensionamento de uma coluna de concreto armado conforme especificações das normas nacionais. Por fim, apresentam-se as conclusões do estudo e sugestões para trabalhos futuros no capítulo 7.

2 CONCEITOS BÁSICOS SOBRE ESTRUTURAS DE CONCRETO ARMADO E TEMPERATURA

Neste item, apresentam-se fundamentos básicos sobre a temática em estudo, abordando conceitos importantes para o entendimento de estruturas de concreto armado, incêndio e mecanismos de transferência de calor. Além disso, expõem-se de maneira sucinta algumas pesquisas elaboradas no campo termomecânico tanto no contexto nacional quanto internacional.

2.1 ESTRUTURAS DE CONCRETO ARMADO

Concreto é o material resultante da mistura de agregados com uma pasta de cimento e água. Em função de necessidades específicas, podem ser acrescentados aditivos químicos e minerais (escórias de alto-forno, pozolana, fillers calcários, etc.) que melhoram as características do concreto fresco ou endurecido (ARAÚJO, 2014a).

Conforme Leonhardt e Mönnig (1988), a função do aço na estrutura de concreto armado é absorver os esforços de tração, em decorrência da resistência reduzida à tração do concreto simples. O concreto, por sua vez, além de absorver os esforços de compressão, age na proteção das armaduras que são mais sensíveis aos efeitos de corrosão e temperatura, por exemplo.

As barras de aço incorporadas ao concreto simples possuem asperezas (saliências) em sua superfície para garantir uma melhor aderência entre os dois materiais. Segundo Araújo (2014a), caso não houvesse esta aderência, não seria possível o funcionamento conjunto desses dois materiais. Devido à aderência, as deformações das barras de aço são praticamente iguais às deformações do concreto que as envolve.

Leonhardt e Mönnig (1988), além de comentarem sobre algumas desvantagens do concreto armado como o elevado peso próprio da estrutura e as dificuldades impostas ao demolir ou modificar as estruturas, salientam que o concreto armado pode ser utilizado para qualquer tipo de estrutura, pois apresenta algumas vantagens como:

- a) é facilmente moldável, as armaduras podem ser dispostas conforme a trajetória dos esforços internos;

- b) é resistente aos efeitos climáticos e ao desgaste mecânico e, em linhas gerais, comparado com outros materiais, resistente ao fogo;
- c) é apropriado para construções monolíticas (sem juntas);
- d) é um material econômico.

2.2 ESTRUTURAS DE CONCRETO ARMADO EM SITUAÇÃO DE INCÊNDIO

Geralmente os projetos de estruturas de concreto armado, seguindo a NBR 6118:2014, estão inseridos no contexto de situações normais de uso em que se adota a temperatura padrão ambiente de 20 °C. Visando considerar a situação de incêndio, pode-se utilizar as normas NBR 14432:2001 e NBR 15200:2012. Estas normas apresentam as principais exigências de resistência ao fogo de elementos construtivos de edificações, bem como as diretrizes de projeto como as propriedades dos materiais constituintes e os métodos de cálculo a serem utilizados.

Entre os métodos, tem-se, por exemplo, o Método Tabular, um método simples que possibilita a verificação de dimensões mínimas da peça em função do tempo requerido de resistência ao Fogo (TRRF) e do tipo de elemento estrutural. O dimensionamento é idealizado para que não seja atingindo um estado limite na ocorrência de incêndio, o que poderia ocasionar danos irreparáveis à segurança das estruturas.

A exposição de estruturas de concreto armado às altas temperaturas promove perda em suas propriedades mecânicas e térmicas. De acordo com Lomba (2011), acima dos 100°C, a heterogeneidade do concreto armado é realçada pelas transformações físicas, químicas e mineralógicas dos materiais constituintes.

A composição do aço e as características da mistura do concreto simples como, por exemplo, o tipo de cimento, de agregados e o teor de água, oferecem inúmeras combinações possíveis. Essa infinidade de combinações dificulta uma análise precisa do comportamento do material em temperatura ambiente e as dificuldades são acentuadas no contexto de incêndio.

Em conformidade com o exposto por Araújo (2014c), do ponto de vista de projeto estrutural, deve-se garantir que a estrutura mantenha as funções corta-fogo e de suporte. A primeira função mencionada refere-se à capacidade da estrutura não permitir que o fogo a ultrapasse ou que o

calor a atravesse em quantidade suficiente para gerar combustão no lado oposto ao incêndio inicial. A função de suporte trata da capacidade da estrutura em evitar o colapso global ou o local progressivo. O autor ainda salienta que essas duas funções devem ser mantidas durante o tempo requerido de resistência ao fogo (TRRF).

2.3 FOGO, INCÊNDIO E SEGURANÇA

Em conformidade com o exposto por Silva et. al (2008), apesar dos grandes avanços na ciência do fogo, ainda não se tem um consenso mundial total da sua definição. No entanto, para todos os países, o fogo é definido como um processo de combustão e que pode ser caracterizado pela emissão de calor acompanhado por luz, fumaça, chama ou ambos. O que se sabe é que o fogo é o produto de uma reação química exotérmica e se trata do caso mais comum de oxidação.

O chamado triângulo do fogo, Figura 2.1 (a), ilustra os componentes necessários que devem se manter continuamente presentes para a ocorrência da combustão e manutenção do fogo: combustível, fonte de calor e oxigênio. Na ausência de um destes elementos, o fogo é extinto. Todavia, atualmente, percebeu-se que o fogo também depende da reação em cadeia dos elementos. Diante disso, criou-se a teoria do Tetraedro do Fogo conforme Figura 2.1 (b).

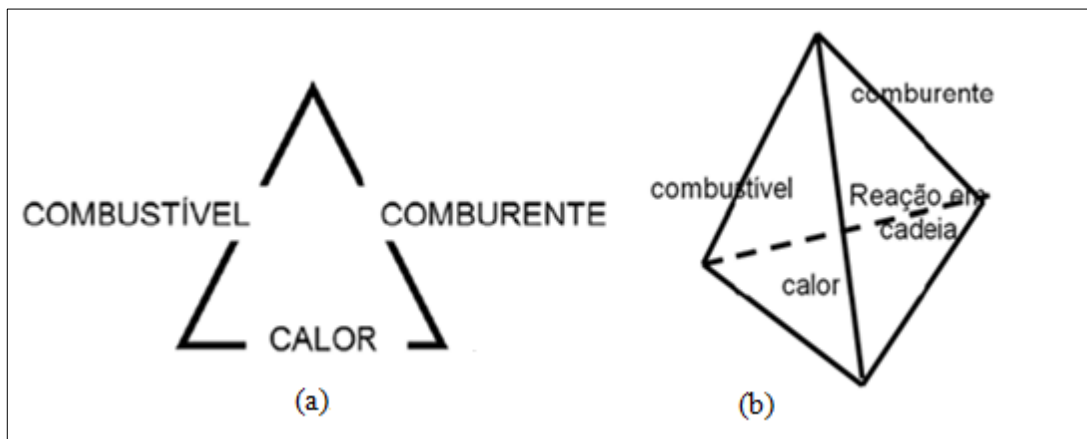


Figura 2.1: triângulo e tetraedro de incêndio.

(Fonte: SILVA ET AL., 2008)

Ter o conhecimento destes elementos é fundamental para o combate ao incêndio e ao fogo de uma maneira geral. Isto porque, em uma ação paliativa, faz-se necessário primeiramente conhecer as causas e o mecanismo de funcionamento do fenômeno. Por exemplo, o combate às

chamas através de água busca inibir a reação entre o combustível e o oxigênio, enquanto usar extintores a base de CO₂ significa substituir o oxigênio na reação para extinguir o fogo. Uma vez iniciado o fogo, deve-se levar em conta os mecanismos de transferência de calor que serão abordados na seção seguinte.

Segundo Silva (2012), a principal causa de óbitos em incêndio é geralmente a exposição à fumaça que ocorre nos primeiros momentos do sinistro. Assim, a rápida desocupação do ambiente em chamas é a principal medida de proteção. À fumaça e ao calor, atribui-se efeitos fisiológicos no ser humano durante um incêndio como, por exemplo, asfixia, queimaduras e hipertermia.

Um dos objetivos lógicos e principais da segurança contra incêndio é minimizar o risco à vida, adotando medidas que, em concordância com a NBR 14432:2001, dividem-se em proteção ativa e passiva. Sendo a ativa composta por medidas que se ativam manual ou automaticamente em resposta aos estímulos provocados pelo fogo. E a passiva, por sua vez, refere-se a um conjunto de medidas incorporadas ao sistema construtivo, sendo funcional durante o uso normal e reagindo também à uma situação de incêndio.

Dentre as medidas de segurança, têm-se o tempo requerido que a estrutura deve resistir ao fogo e as rotas de fuga adequadas como exemplos de proteção passiva e projetos complementares que incluam planos de prevenção e proteção contra incêndios como exemplos de proteção ativa. O presente trabalho tem como propósito primordial contribuir para o avanço de estudos especificamente pertinentes a resistência estrutural em situação de incêndio.

2.4 MECANISMOS DE TRANSFERÊNCIA DE CALOR

Para determinar o gradiente térmico ao qual a estrutura está submetida, primeiramente é necessário entender como o calor se propaga no seu interior. Ressalta-se que o calor por definição, conforme exposto por Regobello (2007), é a energia que está em movimento em um dado sistema. Tal movimento é governado pela diferença de temperatura, fluindo da região de maior temperatura, ou seja, maior energia cinética, para a de menor.

Os mecanismos de transferência de calor que devem ser compreendidos para a elaboração do trabalho são: a condução, a convecção e radiação. Estes conceitos fundamentais estão descritos nos subitens que seguem.

2.4.1 Transferência de calor por condução

Conforme Incropera et al. (2008), a condução está relacionada à atividade atômica e molecular sob a forma de movimento de translação, rotação e vibração das moléculas de um material. Acrescenta-se a isto que a transferência de calor por condução, para ocorrer, necessariamente precisa de um meio material para se propagar, seja ele sólido, líquido ou gasoso.

Incropera et al. (2008) complementa afirmando que, nos meios líquidos e gasosos, a transferência de calor ocorre quando as moléculas com mais energia colidem com as de menor energia. No meio sólido, a transferência difere em sólidos não condutores e condutores. No primeiro caso, a transferência é dada exclusivamente à atividade atômica na forma de ondas de vibrações dos retículos. Já para materiais condutores, a transferência se dá também na forma de movimentos de translação dos elétrons livres.

A Lei de Fourier, conforme já apresentado por diversos autores, é a lei física que governa o fenômeno da condução. A equação diferencial que representa a lei diz que o fluxo de calor está diretamente relacionado ao gradiente de temperatura na sua direção e à condutividade térmica do material. Na equação 2.1, apresenta-se a Lei de Fourier para o caso unidimensional estacionário, enquanto que na equação 2.2, tem-se a formulação para o caso tridimensional.

$$q_{cd} = -\lambda \cdot \frac{d\theta}{dx} \quad (2.1)$$

Sendo:

q_{cd} o fluxo de calor por condução por metro quadrado [W/m²];

λ a condutividade térmica genérica [W/(m.k)];

θ o campo de temperatura [K].

$$q_{cd} = -\lambda \cdot \nabla \theta \quad (2.2)$$

Em que:

∇ é o operador gradiente, ou seja, $\nabla = \{\partial x \ \partial y \ \partial z\}^T$.

Para ilustrar melhor o fenômeno da condução, apresenta-se na Figura 2.2 um exemplo unidimensional sob condição estacionária em um corpo tridimensional de superfície Γ e volume Ω .

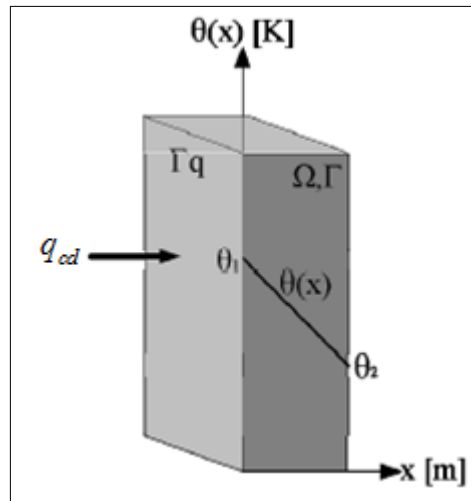


Figura 2.2: exemplo qualitativo da lei de Fourier unidimensional
(Fonte: LEMOS, 2011)

2.4.2 Transferência de calor por convecção

Conforme exposto por Lemos (2011), convecção é a transferência de calor entre um sólido e um fluido em movimento nas adjacências deste sólido. O fluido diretamente em contato com o sólido vai sendo aquecido e ficando menos denso que o fluido das camadas superiores.

Regobello (2007), adequa a explicação da convecção simples para uma situação de incêndio. Afirma que, na medida em que o ar é aquecido, as moléculas de ar da região aquecida se tornam menos densas e tendem a subir tomando o lugar das mais densas. Ao subirem, podem se chocar com elementos estruturais dando origem a transferência de calor por convecção.

A convecção pode ser subdividida em quatro tipos: convecção forçada, livre, por ebulição e por condensação. Na convecção livre, o movimento do fluido é induzido pelas forças de empuxo oriundas da diferença de densidade causada pela respectiva diferença de temperatura presente no próprio fluido. Por outro lado, na forçada, trata-se de um movimento causado por meios externos como bombas e foles, por exemplo. Dos tipos de convecção mencionados apenas a livre é pertinente ao presente estudo, visto que a natureza do movimento da convecção forçada e as demais não se adequam a situação de incêndio.

A equação 2.3 chama-se Lei de Newton de Resfriamento, esta equação governa o fenômeno da convecção. Este equacionamento trata-se de uma visão simplificada do processo, pois é sabido que sua real complexidade engloba fatores como a velocidade do deslocamento do fluido, densidade, viscosidade, natureza, dimensões, orientação do corpo, entre outros. Admite-se na equação 2.3 como resfriamento do corpo um fluxo de calor negativo enquanto o positivo representa aquecimento deste corpo.

$$q_{cv} = \alpha(\theta_{corpo} - \theta_{\infty}) \quad (2.3)$$

Onde:

q_{cv} é o fluxo de calor por convecção por metro quadrado [W/m²];

α é o coeficiente de transferência de calor por convecção, geralmente tomado como um valor médio de 25 [W/(m².K)];

θ_{corpo} é a temperatura absoluta do corpo (superfície) [K];

θ_{∞} é a temperatura absoluta de um fluido qualquer escoando sobre a superfície do modelo [K].

Com a finalidade de ilustrar o fenômeno da convecção apresenta-se, na Figura 2.3, o caso de um corpo aquecido sendo resfriado por um fluido com temperatura mais baixa em movimento.

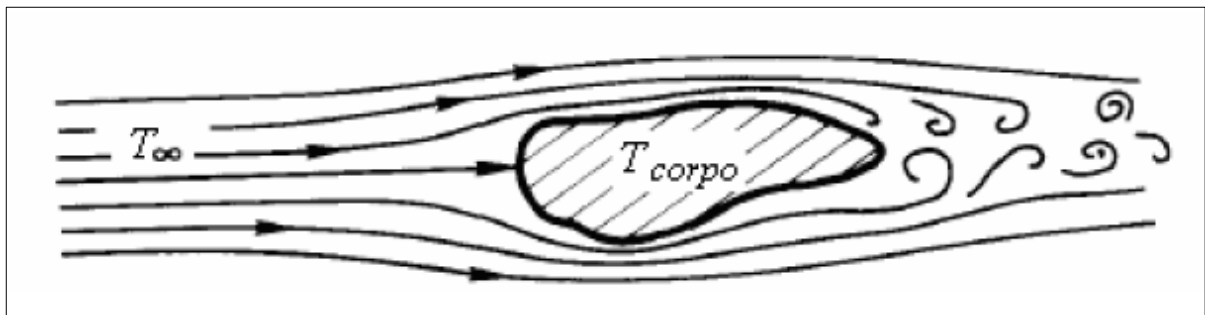


Figura 2.3: resfriamento convectivo de um corpo aquecido.

(Fonte: REGOBELLO, 2007)

2.4.3 Transferência de calor por radiação

Na transferência de calor por radiação, diferentemente dos outros modos de transferência anteriormente expostos, não se faz necessário um meio material porque a energia é propagada através de ondas eletromagnéticas.

Conforme Incropera et al. (2008), toda matéria que se encontra em uma temperatura absoluta não nula emite energia. Em virtude disto, divide-se a radiação térmica em dois mecanismos: irradiação (G) e a emissão (E). A irradiação se refere à energia que o corpo recebe emitida por uma fonte térmica de radiação. A emissão, por sua vez, como o nome diz, trata-se da energia que o corpo emite.

Wang (2002) diz que, ao ser irradiado, o corpo pode oferecer, dependendo de suas propriedades, três diferentes finalidades para esta energia. Uma parcela da energia pode ser absorvida enquanto a outra pode ser emitida. A parcela de energia emitida é constituída por: energia refletida e energia transmitida através do corpo. Com isso, conclui-se que a irradiação é exatamente igual ao somatório destas três parcelas conforme apresentado na equação 2.4.

$$G = E_{abs} + E_{emi} = E_{abs} + E_{ref} + E_{trans} \quad (2.4)$$

Para determinar o fluxo de calor por radiação, faz-se necessário quantificar o balanço de energia referente ao fenômeno. Isto é, saber o quanto de energia que está sendo absorvida e emitida pelo corpo. Para isso, considera-se um corpo opaco incapaz de transmitir energia, ou seja, E_{trans} se iguala à zero. Com isso, admite-se a energia emitida (E_{emi}) restrita apenas à E_{ref} . Para definir E_{abs} , pode-se proceder com a equação 2.5, enquanto para definir a energia emitida, utiliza-se a equação 2.6.

$$E_{abs} = \alpha \cdot G \quad (2.5)$$

Sendo:

α a absorvidade da superfície que pode variar de 0 a 1 dependendo do material [adimensional].

$$E_{emi} = \varepsilon \cdot \sigma_0 \cdot (\theta_{corpo})^4 \quad (2.6)$$

Sendo:

ε a emissividade da superfície que pode variar de 0 à 1 dependendo do material [adimensional];

σ_0 a constante de Stefan-Boltzmann [$5,6704 \cdot 10^{-8} \text{W}/(\text{m}^2 \cdot \text{K}^4)$].

Assim, a taxa líquida de transferência de calor por radiação térmica é a exposto na equação 2.7 abaixo.

$$q_{rad} = \alpha \cdot G - \varepsilon \cdot \sigma_0 \cdot (\theta_{corpo})^4 \quad (2.7)$$

Sendo:

q_{rad} o fluxo de calor por radiação por metro quadrado [W/m²].

O chamado corpo negro é definido por possuir emissividade igual à 1, sendo assim um perfeito emissor. Isto significa que nenhum outro corpo consegue emitir mais radiação térmica que um corpo negro em uma dada temperatura. Na prática, este tipo de corpo, considerado como ideal, não existe.

Com o objetivo de quantificar a energia emitida por uma superfície qualquer, define-se o corpo cinza, onde o valor da emissividade é igual ao da absorvidade. Regobello (2007) comenta que a radiação no corpo cinzento é a adotada nos cálculos de engenharia de segurança contra incêndio. Adotando a hipótese do corpo cinza, faz-se possível reescrever a equação 2.8 da seguinte maneira:

$$q_{rad} = e \cdot \sigma_0 \cdot (\theta_{viz}^4 - \theta_{corpo}^4) \quad (2.8)$$

Sendo:

e a emissividade resultante [adimensional];

θ_{viz} a temperatura absoluta da fonte de radiação térmica [K].

2.5 AÇÕES TÉRMICAS EM ESTRUTURAS

A ação térmica em outras palavras é o carregamento térmico ao qual a estrutura está sujeita e isto se obtém definindo a temperatura que está atuando na peça. O assunto apresentado no item anterior trabalha em conjunto com este, pois entendendo adequadamente os mecanismos de transferência de calor de um dado material, faz-se possível dimensionar a proporção das consequências das ações térmicas.

As reduções na resistência e na rigidez do material, bem como o aparecimento de esforços solicitantes adicionais estão associadas à nocividade da ação térmica. Conclui-se que estas ações são estimuladas pela diferença de temperatura no ambiente em chamas e pelas propriedades da estrutura.

Tanto nas análises numéricas quanto nas experimentais, são utilizadas curvas que fornecem a temperatura dos gases no ambiente variando com o tempo de incêndio. Este tipo de curva é a principal característica da ação térmica porque, a partir dela, determina-se a máxima temperatura que a estrutura está exposta. Existem três tipos de curvas temperatura-tempo de um incêndio: real, paramétrico e padrão. Todas as curvas mencionadas serão apresentadas no item que segue.

2.6 CURVA TEMPERATURA-TEMPO DE UM INCÊNDIO

De acordo com o exposto por Kimura (2009), a fim de possibilitar as análises dos fenômenos térmicos, utilizam-se basicamente três tipos diferentes de modelos para traçar a curva tempo-temperatura: o modelo de incêndio real, o de incêndio natural e o de incêndio padrão (nominal).

2.6.1 Incêndio Real

Conforme exposto por Costa (2008), a magnitude do incêndio é influenciada por quatro fatores principais: o tipo de combustível (carga de incêndio), o espaço físico também chamado compartimento de incêndio, a ventilação e as propriedades térmicas dos materiais presentes neste local.

Estes aspectos mencionados no primeiro parágrafo estão atribuídos ao incêndio real e para representar esta situação definiu-se uma curva onde as temperaturas dos gases respeitem as curvas temperatura-tempo naturais. Este tipo de curva é definido através de ensaios experimentais em laboratório, simulando o compartimento de interesse em chamas. Na Figura 2.4, está representada a curva de um modelo de incêndio real para possibilitar uma análise detalhada da mesma.

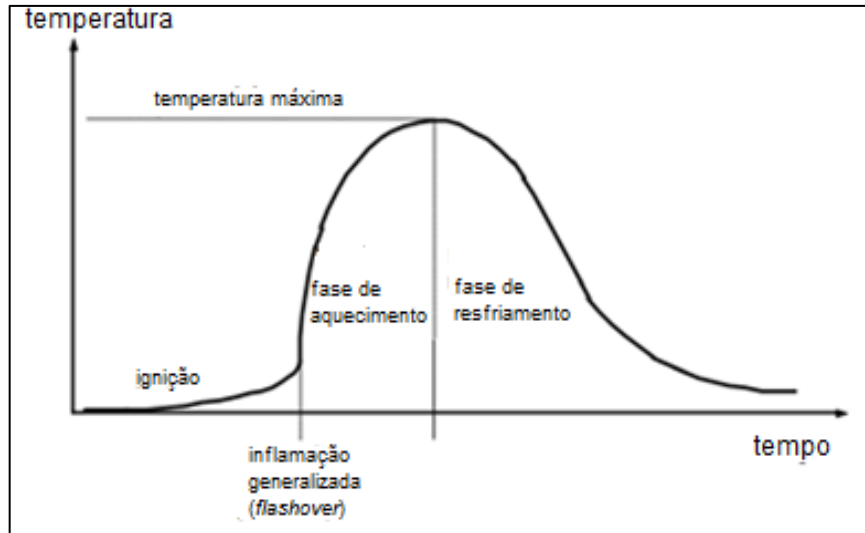


Figura 2.4: curva temperatura-tempo de um incêndio real.

(Fonte: SILVA, 1997)

Observa-se na Figura 2.4 exposta acima que o incêndio real pode ser dividido em três fases distintas: a fase de ignição, a fase de aquecimento e a fase de resfriamento (arrefecimento). A primeira fase é a de ignição onde o incêndio começa bem localizado e com temperaturas ainda baixas. Neste primeiro momento o aquecimento acontece de forma relativamente lenta e o incêndio é ainda considerado de pequenas proporções. Como é possível observar na curva, a fase de ignição delimita um período chamado *pré-flashover*, em que as medidas de proteção contra incêndio ainda são suficientes para contê-lo.

O ponto chamado *flashover* ou inflamação generalizada é quando o incêndio muda de proporção, inicia-se então um aumento brusco na temperatura. A partir deste momento começa a tomada generalizada do compartimento pelas chamas.

No período *pós-flashover*, tem-se a fase de aquecimento até chegar à temperatura máxima e, após a queima de todo material combustível e a redução do oxigênio no ambiente, inicia-se a última fase (fase de arrefecimento) em que se percebe a diminuição progressiva da temperatura.

Em Gerken (2007), tem-se o comentário que este tipo de curva não é muito utilizado em testes em virtude do seu elevado número de variáveis que devem ser consideradas ao elaborar o tipo de ensaio necessário. No entanto, segundo o autor, recorrendo a códigos computacionais, é possível obter resultados bem próximos à realidade.

Devido às dificuldades impostas para modelar um incêndio real, encontra-se na literatura e nos principais documentos normativos métodos para simplificar o comportamento da curva temperatura-tempo. Dentre estes, serão apresentados nos subitens 2.6.2 e 2.6.3 respectivamente o modelo de incêndio natural e o modelo de incêndio padrão que efetivamente será utilizado neste estudo.

2.6.2 Incêndio Paramétrico (Natural)

O modelo de incêndio paramétrico surge ao simplificar as condições de incêndio real, desconsiderando-se a fase de ignição (por não originar efeitos danosos à estrutura) e fazendo um ajuste ao linearizar a fase de resfriamento. Portanto, nota-se na curva de incêndio paramétrico somente a fase de aquecimento e a fase de resfriamento dos gases. Ademais, neste modelo, utiliza-se o conceito de tempo efetivo para que seja possível atingir os mesmos efeitos de um incêndio real. Na Figura 2.5 abaixo, ilustra-se a diferenciação entre o modelo real e o paramétrico considerando os aspectos supracitados.

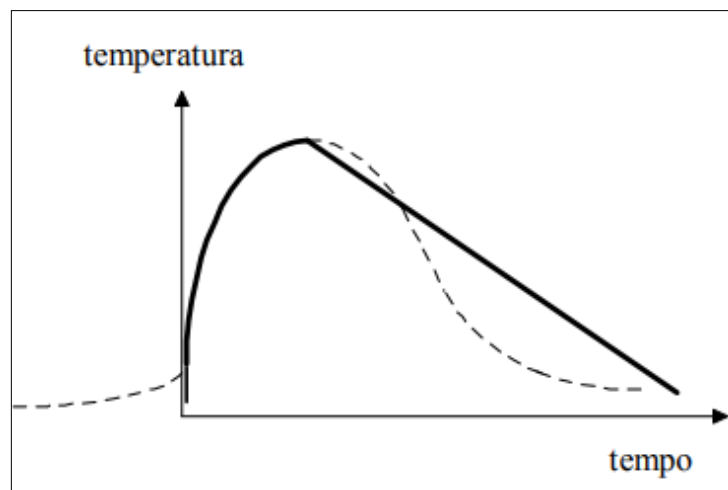


Figura 2.5: modelo de incêndio paramétrico.

(Fonte: SILVA, 1997)

O código EN 1991-1-2 (2002) apresenta dois tipos de modelos de incêndios paramétricos: modelo simplificado que é embasado em parâmetros físicos específicos com um limitado campo de aplicação e o modelo avançado, um modelo mais preciso utilizando códigos computacionais de dinâmica dos fluídos capaz de considerar as propriedades dos gases e a troca de massa e energia.

Conforme ANEXO A do EN 1991-1-2 (2002), para compartimentos maiores que 500 m² em planta, sem aberturas no telhado e com pé direito máximo de 4 m, existe uma parametrização adequada para traçar a curva temperatura-tempo assumindo que todo o compartimento é tomado pelo fogo.

A fase de aquecimento pode ser expressa conforme exposto na equação 2.9.

$$\theta_g = 20 + 1325 \cdot \left(1 - 0,324 \cdot e^{-0,2 \cdot t^*} - 0,204 \cdot e^{-1,7 \cdot t^*} - 0,472 \cdot e^{-19 \cdot t^*} \right) \quad (2.9)$$

Em que:

θ_g é a temperatura dos gases [°C];

t^* é o tempo fictício [h].

Para determinar o tempo fictício basta seguir da seguinte forma:

$$t^* = t \cdot \Gamma_{corr} \quad (2.10)$$

Sendo:

t o tempo real [h];

Γ_{corr} um fator de correção para o tempo.

A curva temperatura-tempo na fase de resfriamento pode ser definida de acordo com a equação 2.11.

$$\theta_g = \begin{cases} \theta_{máx} - 625 \cdot (t^* - t^*_{máx} \cdot X), & t^*_{máx} \leq 0,5 \\ \theta_{máx} - 250 \cdot (3 - t^*_{máx}) \cdot (t^* - t^*_{máx} \cdot X), & 0,5 < t^*_{máx} < 2,0 \\ \theta_{máx} - 250 \cdot (t^* - t^*_{máx} \cdot X), & t^*_{máx} \geq 2,0 \end{cases} \quad (2.11)$$

Sendo:

$\theta_{máx}$ a temperatura máxima do gás [°C];

$t^*_{máx}$ o tempo fictício máximo [h];

X um coeficiente que depende do tempo máximo e do tempo limite do incêndio.

O procedimento para obtenção dos parâmetros citados acima, bem como o fator de correção apresentado na equação 2.11, estão expostos no ANEXO A da EN 1991-1-2 (2002). Ressalta-se que os mesmos foram apresentados neste capítulo de maneira informativa e não foram deduzidos por não se tratar do foco principal do presente estudo.

2.6.3 Incêndio Padrão

Devido à complexidade individual de cada situação específica de incêndio, generaliza-se simplificadaamente o problema através das curvas de incêndio padrão idealizadas. Segundo Costa (2008), estas curvas podem ser utilizadas de maneira direta em qualquer compartimento, independente do cenário do incêndio. Existem diversos tipos de curvas que representam o modelo de incêndio padrão. Dentre estas, destacam-se a curva da ASTM E119 (2000) e a ISO 834 (2014).

A ASTM E119 (2000) é uma curva utilizada geralmente para ensaios. Criada pelo órgão de normatização norte americano (*American Society for testing and materials*), esta curva apresenta um comportamento similar a ISO 834 (2014). Originalmente, a relação entre o tempo e a temperatura é dada de maneira tabelada conforme apresentado na Tabela 2.1.

Tabela 2.1: curva ASTM E119.

Tempo [min]	[°C]	Tempo [min]	[°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	150	1031
50	905	180	1052

Fonte: ASTM (2000)

A curva ISO 834 (2014), por sua vez, é amplamente utilizada em pesquisas numéricas e experimentais envolvendo a temática de incêndio. Além disso, serviu de base para a norma brasileira NBR 14323:2013 e seu uso é recomendado pelo EN 1991-1-2 (2002), pela NBR

5628:2001 e NBR 14432:2001 para determinação da resistência de elementos construtivos expostos a altas temperaturas.

Nesse contexto, no presente trabalho, optou-se por utilizar a curva ISO 834 (2014). Ressalta-se que esta curva representa um incêndio típico em edifícios oriundo de materiais celulósicos e pode ser expressa também de acordo com a equação 2.12. Quando a carga de incêndio é formada por material cuja origem é hidrocarboneto (derivados de petróleo), o incêndio atinge maiores proporções e uma curva mais severa deve ser utilizada. Para estes casos, o EN 1991-1-2 (2002) recomenda a equação 2.13. As três curvas mencionadas encontram-se apresentadas na Figura 2.6.

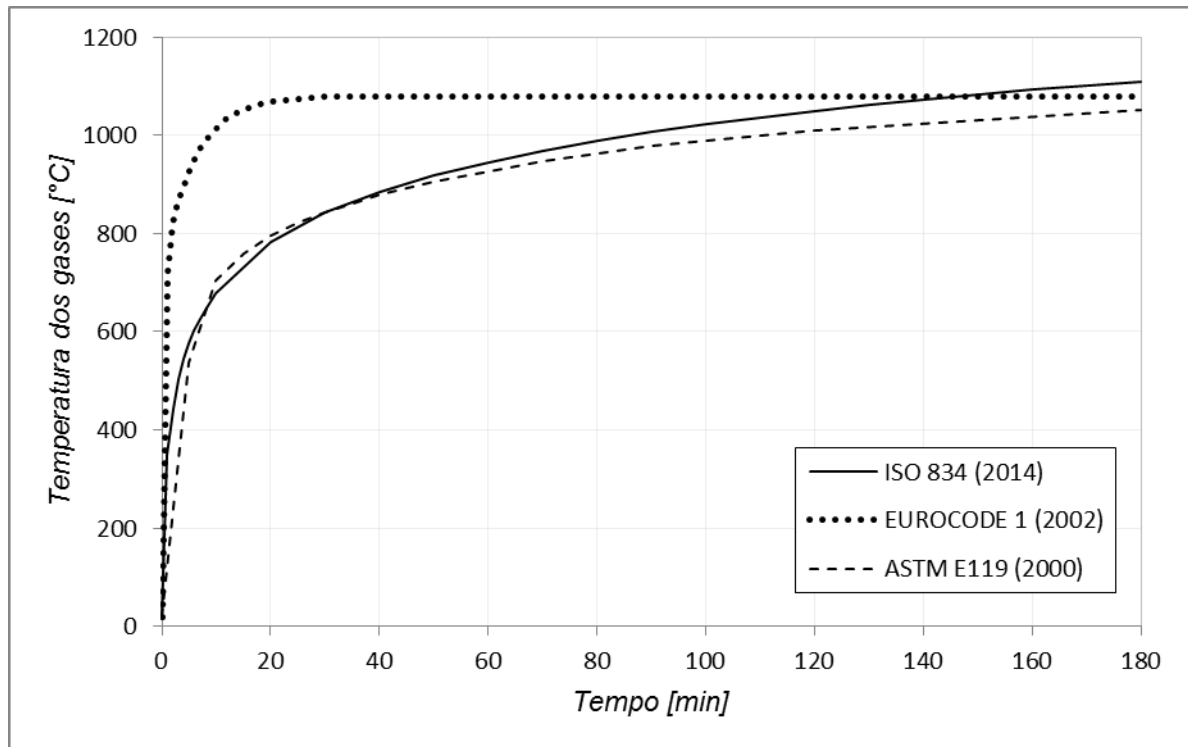


Figura 2.6: comparação entre as curvas padronizadas.

(Fonte: Elaborada pelo autor)

$$\theta_g - \theta_{g_0} = 345 \cdot \log \cdot (8 \cdot t + 1) \quad (2.12)$$

$$\theta_g - \theta_{g_0} = 1080 \cdot (1 - 0,33 \cdot e^{-0,17 \cdot t} - 0,68 \cdot e^{-2,50 \cdot t}) \quad (2.13)$$

Onde:

θ_g é a temperatura dos gases [°C];

θ_{g_0} é temperatura dos gases no instante $t=0$, isto é, temperatura ambiente [$^{\circ}\text{C}$];

t é o tempo [h].

Percebe-se que, diferentemente do modelo real e paramétrico, as curvas padronizadas simplificam o comportamento do incêndio propondo um crescimento constante da temperatura, ou seja, não apresentando a fase de resfriamento. Conforme Wang (2002), com o propósito de dar maior realidade à exposição ao incêndio padrão, especifica-se um tempo limite de exposição, denominado Tempo Requerido de Resistência ao Fogo, TRRF.

2.7 ELEVAÇÃO DA TEMPERATURA NAS ESTRUTURAS

Conforme Lomba (2011), os modelos de cálculo que permitem obter a resposta estrutural de elementos de concreto armado, considerando a elevação da temperatura dividem-se, basicamente, em: métodos dos valores tabelados, métodos simplificados e avançados.

Os métodos dos valores tabelados consistem simplesmente em verificar as dimensões adotadas no projeto e a distância entre eixos das barras de aço e a face exposta ao fogo para um elemento isolado. Tal verificação define se a estrutura em questão tem condições de suportar as altas temperaturas.

Dentre os métodos ou modelos simplificados para verificação da resistência do elemento estrutural, têm-se, conforme o EN 1992-1-2 (2004), o método da isoterma dos $500\text{ }^{\circ}\text{C}$ e o método da zona. Estes métodos consideram uma redução na seção transversal suprimindo a região danificada pelo fogo. Por exemplo, no método da isoterma dos $500\text{ }^{\circ}\text{C}$, considera-se que acima dos $500\text{ }^{\circ}\text{C}$ de temperatura, o concreto perde sua resistência à compressão, não mais contribuindo para a capacidade resistente do elemento. O restante da seção responde de maneira usual, ou seja, como se não estivesse exposta ao incêndio.

Os métodos avançados têm como base métodos numéricos como, por exemplo, diferenças finitas e elementos finitos. Estes possibilitam determinar, através do uso de programas computacionais, a resposta estrutural do elemento ao longo do processo de aquecimento. No capítulo 4, apresentam-se os programas mais comuns no mercado para análise termoestrutural.

2.8 ALGUMAS PESQUISAS INTERNACIONAIS DESENVOLVIDAS COM ABORDAGEM NUMÉRICA

Nos últimos anos, devido ao crescente interesse em descrever o comportamento estrutural frente às elevadas temperaturas, diversos modelos numéricos baseados no método dos elementos finitos foram desenvolvidos. Dentre estes, podem ser citados alguns trabalhos considerados importantes para este processo evolutivo como, por exemplo:

- a) Furumura e Shinohara (1978): desenvolveram uma análise não elástica de vigas e pórticos em situação de incêndio baseada no MEF. Os resultados obtidos mostraram a importância da fase de arrefecimento do incêndio para a análise dos elementos estruturais;
- b) Jain e Rao (1983): desenvolveram um modelo capaz de analisar estruturas metálicas planas baseado na teoria dos grandes deslocamentos e pequenas deformações, considerando uma variação linear entre as temperaturas na mesa dos perfis;
- c) Dotreppe e Franssen (1985): desenvolveram o programa CEFICOSS, código que passou por uma série de processos evolutivos até se tornar o consagrado SAFIR, capaz atualmente de análises tridimensionais termomecânicas de estruturas em situação de incêndio;
- d) Sanad et al. (2000): utilizou o programa ABAQUS para descrever o comportamento estrutural do sistema misto de laje de concreto e viga mista. As estruturas estudadas foram modeladas apenas com elementos de barras. A variação da temperatura nas estruturas é implementada de acordo com valores obtidos em ensaios experimentais prévios. Sanad et al. (2000), revelaram que os efeitos de expansão térmica durante o aquecimento dos elementos estruturais representam a etapa mais importante no comportamento dos mesmos;
- e) Feng et al. (2003): também através do programa ABAQUS desenvolveu um modelo capaz de representar o comportamento de colunas com perfis “C” de

paredes finas em situação de incêndio para diversas condições de carregamento térmico e mecânico. O foco do estudo foi avaliar a capacidade resistente das colunas;

- f) Bratina et al. (2005): desenvolveu um modelo numérico avançado baseado no método dos elementos finitos para o cálculo de pilares de concreto armado em situação de incêndio. Atribuiu aos materiais elementos finitos com comportamento não linear. Comparou os resultados obtidos com valores experimentais e obteve tempos de resistência das peças estruturais satisfatórios. Confrontando os resultados com os apresentados em EN 1992-1-2 (2004), concluiu que a norma europeia fornece valores não conservativos;
- g) Sarraj et al. (2007): realizaram análises numéricas envolvendo ligações de uma viga metálica com uma coluna, considerando grandes deformações, não linearidades tanto geométricas quanto físicas e elementos de contato. Um modelo tridimensional usando o *software* ABAQUS foi criado pelos autores. O modelo foi avaliado através do comportamento plástico do material até a falha;
- h) Ding e Wang (2008): realizaram diversas simulações através do ANSYS para definir o comportamento de colunas tubulares preenchidas por concreto em incêndio. Adotaram o método dos elementos de superfície para aplicar a ação térmica na estrutura e o método sequencial para análise acoplada. Este trabalho fundamenta até os dias atuais diversos estudos e os métodos supracitados serão apresentados com maior detalhamento no capítulo 4 do presente estudo;
- i) Kodur e Dwaikat (2009): utilizaram o ANSYS para simular vigas e colunas sujeitas a cargas térmicas e mecânicas, adotando procedimentos apresentados por Ding e Wang (2008);
- j) Kodur e Dwaikat (2012): também utilizando o ANSYS, modelaram seções de aço com os mesmos procedimentos adotados em Ding e Wang (2008) e Kodur e Dwaikat (2009). Neste estudo o objetivo foi obter a distribuição de temperatura na seção considerando um material isolante de proteção previamente danificado. A justificativa do estudo foi o significativo aumento do fluxo de calor na peça

devido ao uso de um material isolante com falhas, pois poderia acelerar a degradação da resistência e da rigidez do material e levar a estrutura ao colapso;

- k) Jacob et al. (2013): apresentaram um estudo do comportamento de estruturas de concreto em situação de incêndio comparando a norma indiana IS 456:2000 com os resultados obtidos no ANSYS. A estratégia adotada para modelagem térmica da estrutura foi a mesma proposta por Ding e Wang (2008) que inclui o método de elementos de superfície para aplicação da ação térmica. Esta mesma metodologia foi apresentada novamente em Balaji et al. (2015) complementando o estudo anterior;
- l) Zhang et al. (2016): publicaram na revista *Fire Technology* uma pesquisa onde se integra duas metodologias para simulação de análises termomecânicas. A integração é feita utilizando simuladores de dinâmica do fogo (FDS), onde se obtém a distribuição da temperatura de forma mais precisa, e o método dos elementos finitos utilizando o ANSYS para a análise estrutural. Isto é possível através de uma ferramenta chamada “*fire-thermomechanical interface*”. Dessa forma, utilizando o ANSYS, realiza-se apenas a análise estrutural através das relações constitutivas, deslocamentos, forças e tensões considerando as temperaturas nodais extraídas do FDS;
- m) Krishna et al. (2016): utilizando o ANSYS, os autores realizaram uma análise termomecânica em estruturas de concreto armado de forma não isolada, ou seja, o modelo inclui a iteração entre os membros estruturais conforme mostra a Figura 2.7. Os autores assumiram como hipótese inicial a não ocorrência do *spalling*. A publicação mencionada não fornece maiores detalhes do modelo criado no *software*, mas contribui ao evidenciar o uso na atualidade da análise acoplada através do ANSYS;

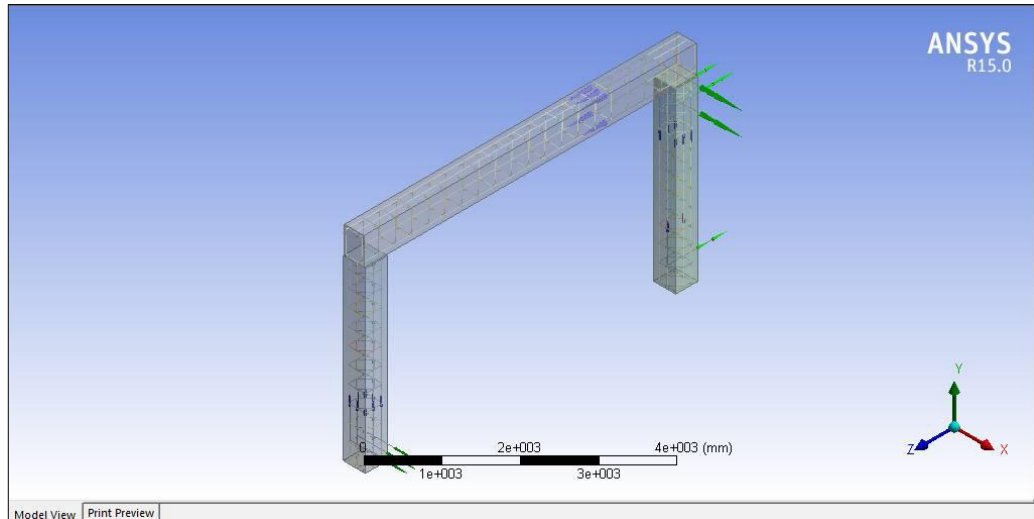


Figura 2.7: modelo criado no ANSYS.

Fonte: Krishna *et al.* (2016)

Percebe-se nas pesquisas internacionais mencionadas, a repetição até os anos atuais do uso da estratégia apresentada por Ding e Wang (2008) utilizando o *software* ANSYS. O modo mais atual e, portanto, possivelmente mais preciso para fazer a análise termomecânica é a interação FDS-MEF exposto em Zhang et al. (2016). No entanto, em outros estudos onde, diferentemente da estratégia adotada por Zhang et al. (2016), a análise acoplada completa foi feita apenas através do MEF, obtiveram-se resultados satisfatórios e com boa aproximação quando comparados com estudos experimentais (Balaji (2015); Kumar e Kodur (2017); Krishna et al. (2016)).

Maiores informações sobre os modelos, bem como os parâmetros de cálculos utilizados nos trabalhos expostos nesta seção podem ser obtidas nas pesquisas elaboradas pelos autores devidamente referenciadas no Capítulo 8.

2.9 ALGUMAS PESQUISAS NACIONAIS DESENVOLVIDAS NESTA ÁREA DE ESTUDO

No Brasil, existem diversas pesquisas nesta área, publicadas através de dissertações, teses e artigos. Silva (1997) realizou sua tese de doutorado avaliando estruturas de aço em situação de incêndio e continuou contribuindo com diversos trabalhos na temática de segurança contra incêndios como, por exemplo, Silva et al. (2008) e Silva (2012). Carla Costa teve grande

colaboração para o entendimento e dimensionamento de elementos de concreto armado em situação de incêndios (Costa e Silva (2002); Costa (2008)). Landesmann (2003) desenvolveu um procedimento numérico embasado no método dos elementos finitos considerando o regime transiente e não linear elastoplástico para definir o comportamento de estruturas metálicas planas e aperticadas em condições de incêndio. O comportamento estrutural foi avaliado através de princípios de plasticidade concentrada, permitindo estimar o tempo crítico de resistência ao fogo.

No Rio Grande do Sul, Souza Junior (2004) apresentou pela UFRGS sua tese de doutorado, estudando a simulação computacional do comportamento de estruturas de aço sob incêndio. O estudo foi realizado em parceria com a Universidade de Liège, na Bélgica, utilizando o programa SAFIR como ferramenta numérica. Lemos (2011) através de sua dissertação, realizou um estudo numérico de estruturas de concreto armado sob altas temperaturas com base no método dos elementos finitos, onde foi desenvolvido um código computacional próprio. Kirchhof (2010) desenvolveu, durante seu doutorado no Laboratório de Ensaios e Modelos Estruturais (LEME-UFRGS), um estudo teórico-experimental da influência do teor de umidade no fenômeno de *spalling* em concretos expostos ao fogo. Bolina (2016) apresentou resultados da avaliação experimental realizada no *itt Performance/UNISINOS*, analisando a influência dos requisitos de durabilidade na segurança contra incêndio através de pilares de concreto armado pré-fabricados expostos ao incêndio.

Pode-se dizer ainda que um grande número de estudos englobando modelos estruturais numéricos em situação de incêndio na plataforma ANSYS, no cenário nacional, foi criado pela USP - São Carlos. Onde já foram desenvolvidas análises termomecânicas de estruturas metálicas por Regobello (2007) e Kimura (2009), de colunas circulares de aço preenchidas com concreto por Santos (2009), de vigas mistas de aço e concreto por Kotinda (2006), de vigas mistas de madeira e concreto por Fernandes (2018), entre outras.

3 COMPORTAMENTO DOS MATERIAIS SOB TEMPERATURA ELEVADA

O aumento da temperatura altera o desempenho de um elemento estrutural, tal alteração depende das propriedades físicas de seus materiais constituintes. Conforme apontado por Caldas (2008), com relação ao comportamento em situação de incêndio, os materiais podem ser divididos em três categorias: resistentes (aço e concreto), isolantes (tijolo, concreto, gesso e materiais de proteção contra incêndio) e combustíveis (madeira, revestimentos e forros).

As propriedades térmicas dos materiais representam a resposta dos mesmos às ações térmicas as quais estão expostos. Isto é, a distribuição térmica em um elemento está diretamente relacionada com a condutividade térmica, o calor específico e a massa específica de seus materiais. Além destas, a propriedade denominada alongamento relativo ou deformação térmica específica dos materiais, representa um importante papel em situação de incêndio. Sob a ação das altas temperaturas, as estruturas podem apresentar uma variação no seu comprimento implicando em tensões adicionais quando houver restrição aos seus graus de liberdade.

As propriedades mecânicas, por sua vez, sofrem reduções com o aumento da temperatura. As resistências tanto à compressão quanto a tração diminuem, bem como a rigidez do material. Kodur e Harmathy (2002) ainda citam a fluência dos materiais como fundamental consideração no contexto das altas tensões e temperaturas, no entanto, os modelos para o aço e concreto sugeridos pelo código normativo europeu incluem este efeito de forma implícita.

Tanto os códigos nacionais NBR 15200:2012 e NBR 14323:2013, como os internacionais EN 1992-1-2 (2004), EN 1993-1-2 (2005) e o Comitê Euro-Internacional do Betão (CEB) apresentam as variações das propriedades mecânicas e térmicas do concreto e dos aços estruturais submetidos a elevadas temperaturas. Observa-se, nos subitens que seguem, grande concordância entre as especificações das normas brasileiras e as propostas pelo Eurocode.

Este item além de descrever e definir as propriedades físicas dos materiais supracitadas expõe uma breve revisão sobre o *spalling*. Tal revisão é composta pela definição do fenômeno, pelos parâmetros que influenciam na sua ocorrência e por modelos numéricos encontrados na pesquisa bibliográfica.

3.1 PROPRIEDADES DO AÇO

As temperaturas máximas registadas em um incêndio aproximam-se dos 1200 °C. Geralmente os incêndios em edifícios não chegam a temperaturas que possam causar a fusão do aço, aproximadamente 1550°C. Com isso, não há risco das armaduras se fundirem em situação de incêndio. (LOMBA, 2011)

O aço é dividido de acordo com o seu processo de fabricação, os laminados a quente se classificam em CA-25 e CA-50 e os encruados a frio, mais sensíveis à temperatura, referem-se ao CA-60. Nota-se no diagrama tensão-deformação do aço laminado a quente um patamar de escoamento bem definido enquanto no trabalhado a frio, tem-se a ausência do mesmo.

3.1.1 Propriedades térmicas

O aço apresenta, em geral, propriedades térmicas mais elevadas em comparação às do concreto. Sua maior condutividade térmica, por exemplo, permite uma absorção melhor do calor. Apesar disso, as propriedades térmicas do aço, no contexto da análise exclusivamente térmica de uma peça de concreto armado, comumente são desprezadas (LIE E LIN, 1985).

Considera-se que a presença e a posição do aço não alteram de maneira significativa a distribuição das temperaturas no concreto, pois a área das barras de aço em comparação à de concreto é muito reduzida e a temperatura em suas seções uniformiza-se rapidamente. Em análise térmica de estruturas de concreto armado, caso o aço não seja modelado, costuma-se assumir, de maneira simplificada, para o aço o mesmo valor da temperatura observado no concreto localizado em suas adjacências. (ALBUQUERQUE, 2012; LIE E LIN, 1985)

Todavia, na análise estrutural o efeito do aço é de suma importância. Devido a isto, no presente trabalho, buscando compatibilidade entre a análise térmica e a termoestrutural, as propriedades térmicas referentes ao aço foram devidamente atribuídas ao material.

3.1.1.1 Alongamento relativo

Além do exposto no Anexo E da NBR 14323:2013, tanto o EN 1992-1-2 (2004) quanto o EN 1993-1-2 (2005) prescrevem o alongamento relativo (ou a deformação térmica específica) do aço carbono através das expressões expostas abaixo (equação 3.1).

$$\varepsilon_{s,\theta} = \begin{cases} -2,416 \cdot 10^{-4} + 1,200 \cdot 10^{-5} \cdot \theta + 0,400 \cdot 10^{-8} \cdot \theta^2, & 20^\circ\text{C} \leq \theta \leq 750^\circ\text{C} \\ 1,100 \cdot 10^{-2}, & 750^\circ\text{C} < \theta \leq 860^\circ\text{C} \\ -6,200 \cdot 10^{-3} + 2,000 \cdot 10^{-5} \cdot \theta, & 860^\circ\text{C} < \theta \leq 1200^\circ\text{C} \end{cases} \quad (3.1)$$

Em que:

$\varepsilon_{s,\theta}$ é o alongamento relativo em função da temperatura, ou seja, o alongamento térmico em relação ao comprimento observado a temperatura ambiente [adimensional];

θ é a temperatura absoluta do aço em um dado instante [$^\circ\text{C}$].

A NBR 14323:2013 ainda sugere uma simplificação para o alongamento relativo, tornando a variação linear com o aumento da temperatura. Esta simplificação é expressa pela equação 3.2.

$$\varepsilon_{s,\theta} = 1,400 \cdot 10^{-5} \cdot (\theta - 20) \quad (3.2)$$

Na Figura 3.1 abaixo, pode-se observar a evolução do alongamento relativo do aço em função do aumento da temperatura.

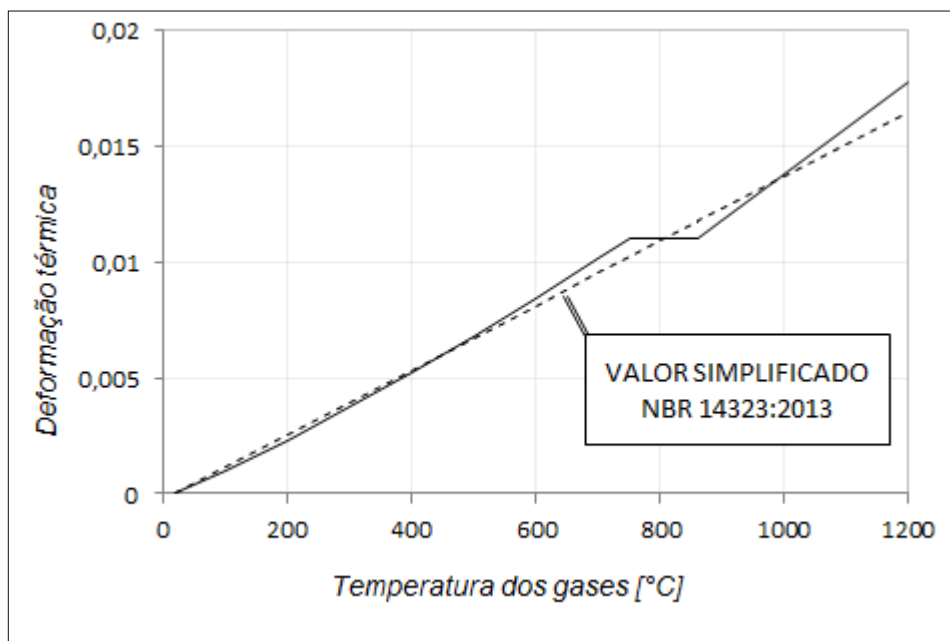


Figura 3.1: deformação térmica específica do aço em função da temperatura.

(Baseado em: NBR 14323:2013; EN 1992-1-2 (2004); EN 1993-1-2 (2005))

3.1.1.2 Calor específico

Esta propriedade refere-se à quantidade de calor requerida para aumentar em uma unidade de temperatura a massa unitária do material. O Anexo E da NBR 14323:2013 e o EN 1993-1-2 (2005), formulam o calor específico do aço em função da temperatura de acordo com a equação 3.3 abaixo. Salienta-se que tal formulação é válida tanto para o aço laminado a quente, quanto o trabalhado a frio.

$$c_{s,\theta} = \begin{cases} 425 + 7,730 \cdot 10^{-1} \cdot \theta - 1,690 \cdot 10^{-3} \cdot \theta^2 + 2,200 \cdot 10^{-6} \cdot \theta^3, & 20^\circ\text{C} \leq \theta \leq 600^\circ\text{C} \\ 666 + \frac{13002}{738 - \theta}, & 600^\circ\text{C} < \theta \leq 735^\circ\text{C} \\ 545 + \frac{17820}{\theta - 731}, & 735^\circ\text{C} < \theta \leq 900^\circ\text{C} \\ 650, & 900^\circ\text{C} < \theta \leq 1200^\circ\text{C} \end{cases} \quad (3.3)$$

Em que:

$c_{s,\theta}$ é o calor específico do aço por unidade de massa em função da temperatura θ [J/(kg · °C)].

A NBR 14323:2013 ainda sugere o valor simplificado de 650 J/(kg · °C) para o calor específico, tornando-o independente da temperatura na qual o aço se encontra. Na Figura 3.2, apresenta-se a curva do calor específico do aço em função do aumento da temperatura. Salienta-se que, considerando as propriedades variando em função da temperatura, a modelagem computacional do aquecimento oriundo do incêndio deve ser feita em passos de carga.

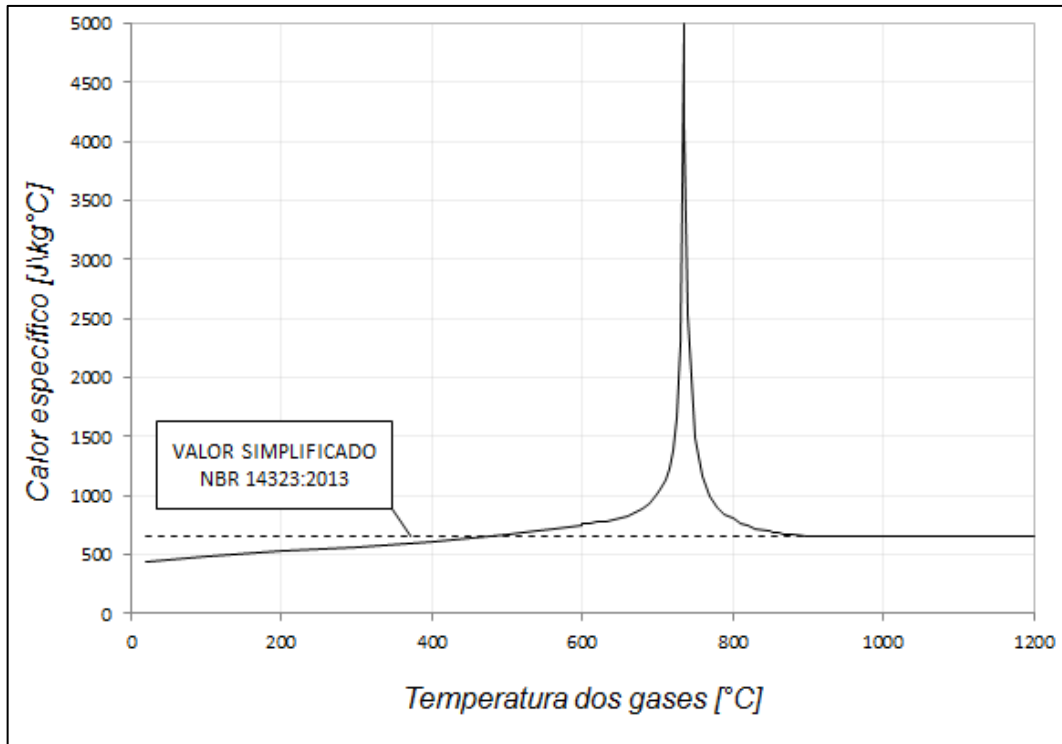


Figura 3.2: calor específico do aço em função da temperatura.
(Baseado em: NBR 14323:2013; EN 1993-1-2 (2005))

Ressalta-se que a 735 °C há uma descontinuidade do calor específico. Esta descontinuidade, segundo Costa (2008) é atribuída a uma perda das propriedades magnéticas do aço que são readquiridas com o seu resfriamento. Este fenômeno é denominado “Ponto *Curie*”.

3.1.1.3 Condutividade térmica

A condutividade térmica é o parâmetro que estabelece a razão com qual o calor é conduzido para o interior do aço. Para a determinação desta propriedade em função da temperatura, o Anexo E da NBR 14323:2013 e o EN 1993-1-2 (2005) também adotam o mesmo procedimento. Na equação 3.4 abaixo está apresentado o procedimento para determinar esta propriedade tanto para o aço laminado a quente, quanto o trabalhado a frio.

$$\lambda_{s,\theta} = \begin{cases} 54 - 3,330 \cdot 10^{-2} \cdot \theta, & 20^{\circ}\text{C} \leq \theta \leq 800^{\circ}\text{C} \\ 27,3, & 800^{\circ}\text{C} < \theta \leq 1200^{\circ}\text{C} \end{cases} \quad (3.4)$$

Sendo:

$\lambda_{s,\theta}$ a condutividade térmica do aço em função da temperatura θ [W/(m · °C)].

A NBR 14323:2013 também no seu item 5.1.2 apresenta o valor simplificado de $45 \text{ W}/(\text{m} \cdot ^\circ\text{C})$ para a condutividade térmica, tornando-a independente da temperatura. Na Figura 3.3, apresenta-se a curva que representa a condutividade térmica do aço em função do aumento da temperatura.

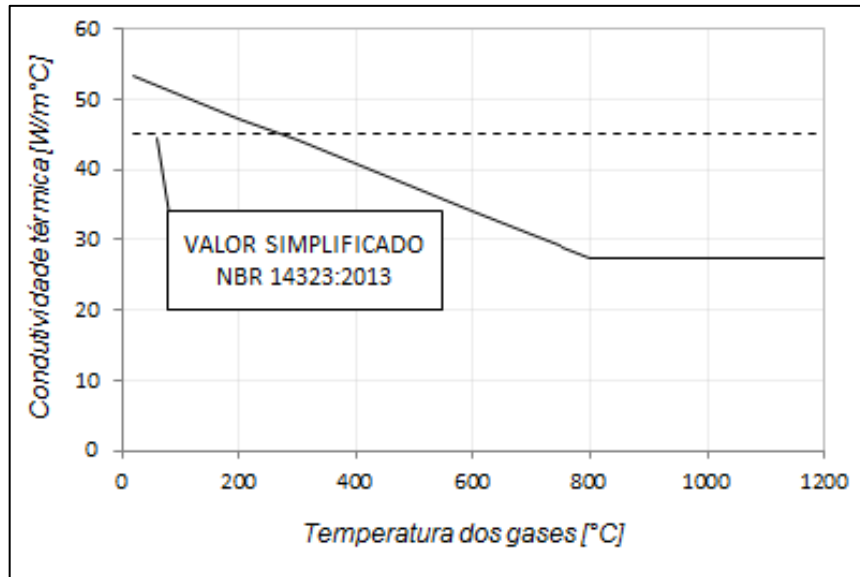


Figura 3.3: condutividade térmica do aço em função da temperatura.
(Baseado em: NBR 14323:2013; EN 1993-1-2 (2005))

3.1.1.4 Massa específica

Por último, dentre as propriedades térmicas, define-se a massa específica do aço (ρ_s). Tanto a NBR 14323:2013 quanto o EN 1993-1-2 (2005) afirmam que a massa específica pode ser considerada com o valor de $7850 \text{ kg}/\text{m}^3$ independentemente da temperatura do aço. O fato de a massa específica ser independente da temperatura, segundo Lomba (2011), atribui-se ao aço possuir uma microestrutura bem definida e estável a temperaturas elevadas.

3.1.2 Propriedades mecânicas

Conforme concluído por Landi (1986), os problemas mais graves de uma estrutura de concreto armado ocorrem quando a sua armadura atinge temperaturas da ordem de 500 a 600°C, pois nesse intervalo o aço perde sensivelmente sua resistência à tração, comprometendo a estrutura como um todo.

3.1.2.1 Resistência característica

A redução da resistência tanto à compressão, quanto à tração do aço de armadura passiva submetido a altas temperaturas, conforme a NBR 15200:2012 e o EN 1993-1-2 (2005), pode ser estimada através de um coeficiente redutor ($\kappa_{s,\theta}$) da seguinte forma (3.5):

$$f_{yk,\theta} = \kappa_{s,\theta} \cdot f_{yk} \quad (3.5)$$

Em que:

$f_{yk,\theta}$ é a resistência característica do aço em função da temperatura θ [MPa];

$\kappa_{s,\theta}$ é o coeficiente redutor [adimensional];

f_{yk} é a resistência característica do aço à temperatura ambiente [MPa].

O coeficiente redutor é um valor tabelado de acordo com a faixa de temperatura a qual o aço está sujeito. Na Tabela 3.1 abaixo, apresentam-se estes valores conforme especificado pela NBR 15200:2012 e EN 1993-1-2 (2005), onde se atribui diferentes valores de acordo com o tipo de aço (CA-50 ou laminados a quente e CA-60 ou encruados a frio). Salienta-se que para definição dos coeficientes em temperaturas intermediárias, conforme as normas supracitadas, basta interpolar linearmente os respectivos valores.

Tabela 3.1: valores para o coeficiente redutor da resistência do aço.

Temperatura do aço [°C]	$\kappa_{s,\theta}$	
	CA-50	CA-60
20	1,00	1,00
100	1,00	1,00
200	1,00	1,00
300	1,00	1,00
400	1,00	0,94
500	0,78	0,67
600	0,47	0,40
700	0,23	0,12
800	0,11	0,11
900	0,06	0,08
1000	0,04	0,05
1100	0,02	0,03
1200	0,00	0,00

(Baseado em: NBR 15200:2012 e EN 1993-1-2 (2005))

Observa-se que os valores expostos originalmente referem-se aos esforços de tração na armadura. Tanto a norma brasileira quanto a europeia fornecem valores mais baixos para o caso de compressão. No entanto, conforme Costa (2008), os valores considerados na redução da resistência do aço sujeito a compressão, representam um artifício para evitar a ruptura frágil do concreto. No presente estudo, adotaram-se os valores da Tabela 3.1 para o caso tanto de compressão, quanto tração.

Na Figura 3.4 abaixo, estão indicadas as curvas referente ao fator de redução da resistência do aço de armadura passiva em função da temperatura.

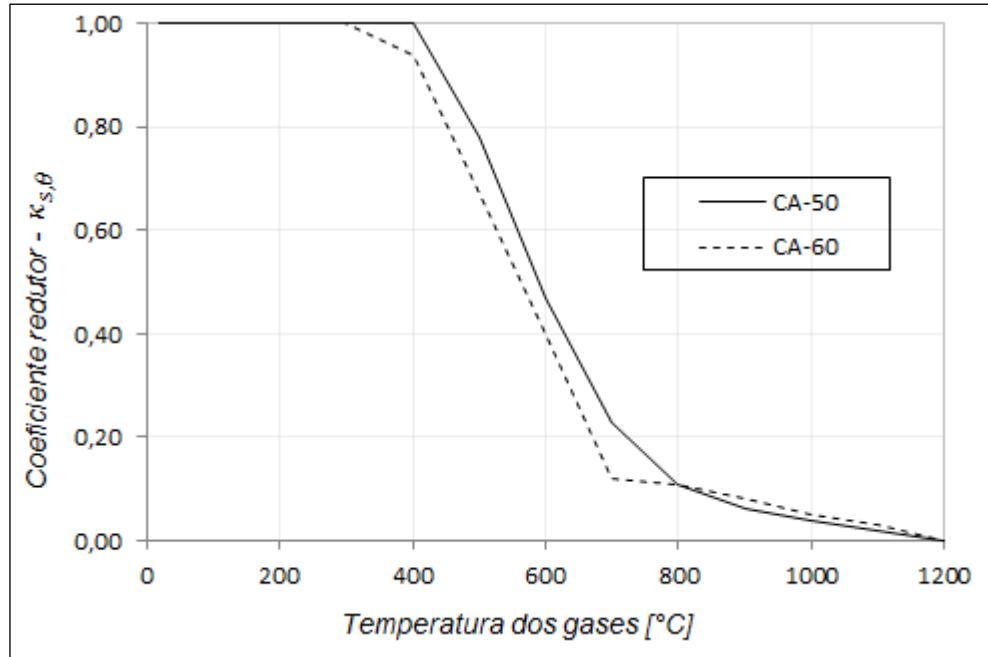


Figura 3.4: coeficiente redutor da resistência do aço em função da temperatura.

(Baseado em: NBR 15200:2012; EN 1993-1-2 (2005))

3.1.2.2 Módulo de elasticidade

Conforme já mencionado anteriormente, o módulo de elasticidade também decresce com o aumento da temperatura. De maneira similar à apresentada no item 3.1.2.1, nesta situação também se dispõe de fatores de redução ($\kappa_{E_s,\theta}$). Desta forma, o módulo de elasticidade do aço em temperaturas elevadas pode ser estimado conforme equação 3.6.

$$E_{s,\theta} = \kappa_{E_s,\theta} \cdot E_s \quad (3.6)$$

Sendo:

$E_{s,\theta}$ o módulo de elasticidade do aço em função da temperatura θ [MPa];

$\kappa_{E_s,\theta}$ o coeficiente redutor do módulo de elasticidade [adimensional];

E_s o módulo de elasticidade do aço à temperatura ambiente [MPa].

Na Tabela 3.2 abaixo, apresenta-se o coeficiente redutor conforme especificado pela NBR 15200:2012, através do qual se atribui diferentes valores de acordo com o tipo de aço (CA-50

ou laminados a quente e CA-60 ou encruados a frio). Salienta-se que para definição dos coeficientes em temperaturas intermediárias, de maneira análoga à anterior, basta interpolar linearmente os respectivos valores.

Tabela 3.2: valores para o coeficiente redutor do módulo de elasticidade do aço.

Temperatura do aço [°C]	$K_{Es,\theta}$	
	CA-50	CA-60
20	1,00	1,00
100	1,00	1,00
200	0,90	0,87
300	0,80	0,72
400	0,70	0,56
500	0,60	0,40
600	0,31	0,24
700	0,13	0,08
800	0,09	0,06
900	0,07	0,05
1000	0,04	0,03
1100	0,02	0,02
1200	0,00	0,00

(Baseado em: NBR 15200:2012)

Os valores apresentados na Tabela 3.2 podem ser observados de maneira gráfica na Figura 3.5 abaixo.

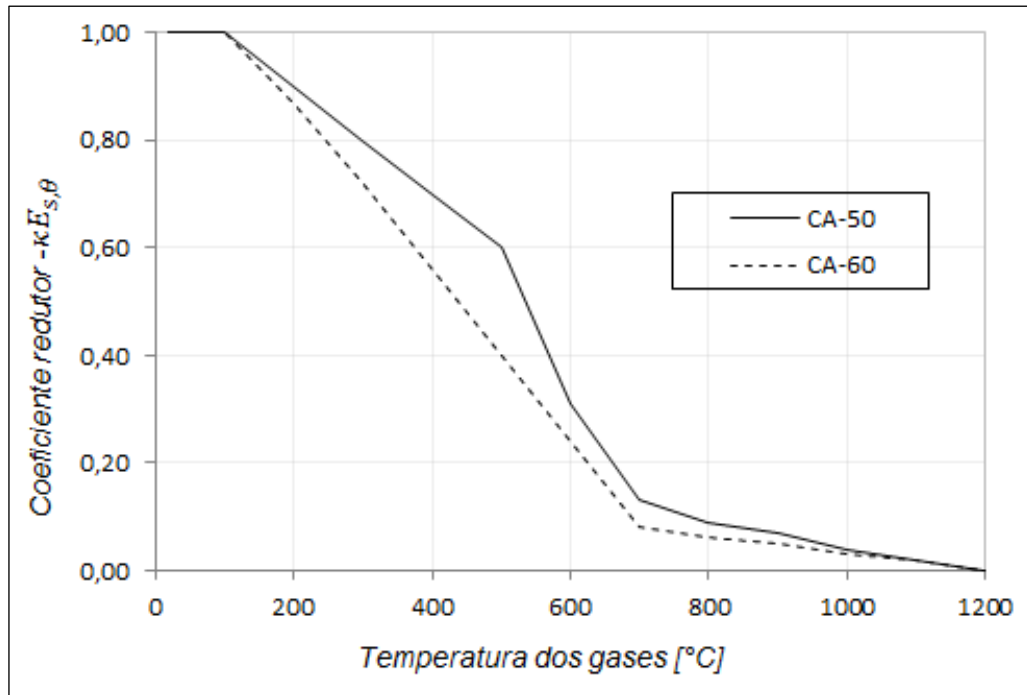


Figura 3.5: coeficiente redutor do módulo de elasticidade do aço em função da temperatura.

(Baseado em: NBR 15200:2012)

3.1.2.3 Limite de proporcionalidade

Com a elevação da temperatura há uma redução na tensão de proporcionalidade e, conseqüentemente, na deformação que indica o limite de proporcionalidade. Estes parâmetros indicam a transição entre o regime elástico e o elasto-plástico do material. Para obter o valor em função da temperatura, basta usar os coeficientes redutores sugeridos pela NBR 15200:2012 e o EN 1993-1-2 (2005), devidamente apresentados na Tabela 3.3, na equação 3.7.

$$f_{p,\theta} = \kappa_{p,\theta} \cdot f_{y,\theta} \quad (3.7)$$

Em que:

$f_{p,\theta}$ é a tensão de proporcionalidade do aço em função da temperatura θ [MPa];

$\kappa_{p,\theta}$ é o coeficiente redutor do limite de proporcionalidade [adimensional];

$f_{y,\theta}$ é a tensão característica do aço à temperatura ambiente [MPa].

Tabela 3.3: valores de $\kappa_{p,\theta}$ para aços de armadura passiva.

Temperatura do aço [°C]	$\kappa_{p,\theta}$	
	CA-50	CA-60
20	1,00	1,00
100	1,00	0,96
200	0,81	0,92
300	0,61	0,81
400	0,42	0,63
500	0,36	0,44
600	0,18	0,26
700	0,07	0,08
800	0,05	0,06
900	0,04	0,05
1000	0,02	0,03
1100	0,01	0,02
1200	0,00	0,00

(Baseado em: NBR 15200:2012 e EN 1993-1-2 (2005))

3.1.2.4 Diagrama Tensão-Deformação

Costa (2008), afirma que o aço em temperatura ambiente pode ser considerado um material elasto-plástico perfeito, representado por um diagrama tensão-deformação bilinear. Já para a situação de incêndio essa representação deixa de ser satisfatória, pois acima dos 100°C a região elasto-plástica que sucede o limite elástico é muito extensa. Ademais, acima dos 400°C, o aço também deixa de apresentar o patamar de escoamento bem definido.

O aspecto genérico do diagrama tensão-deformação multilinear do aço carbono está apresentado na Figura 3.6. Há quatro estágios distintos na curva da relação constitutiva, sendo o primeiro um comportamento linear da deformação para o nível de tensão aplicado até atingir a tensão de proporcionalidade ($f_{p,\theta}$). A relação linear é dada pelo módulo de elasticidade na fase elástica ($E_{s,\theta}$). No segundo estágio, tem-se o comportamento elasto-plástico com encruamento do material até atingir a tensão de escoamento ($f_{y,\theta}$). O terceiro estágio, por sua vez, representa o escoamento da barra, onde há acréscimo de deformação sem alteração do nível de tensão. O quarto e último estágio ilustra o decréscimo da tensão até que a mesma seja nula chegando à ruptura do material.

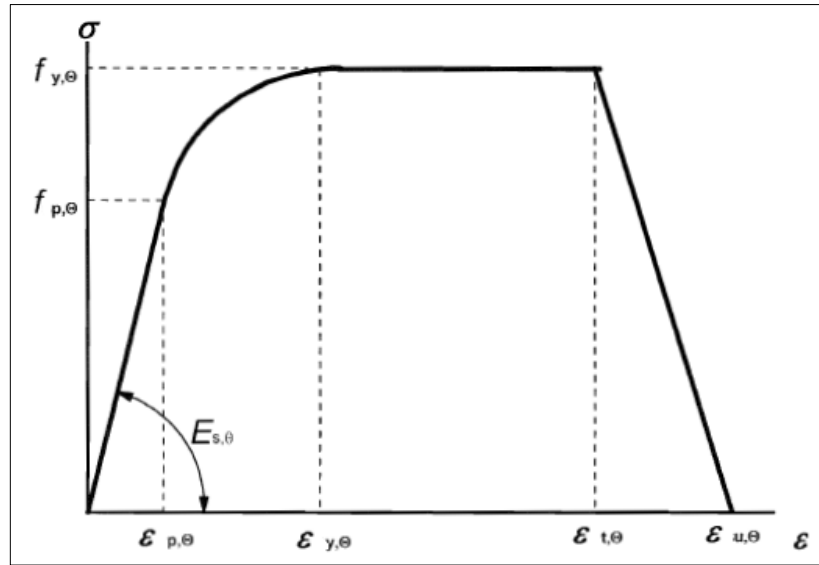


Figura 3.6: relação constitutiva multilinear genérica do aço .

(Adaptado de: EN 1992-1-2, 2004)

De acordo com o Anexo D da NBR 15200:2012, com o EN 1992-1-2 (2004) e o EN 1993-1-2 (2005), os diagramas tensão-deformação dos aços da armadura passiva a temperaturas elevadas, podem ser traçados em conformidade com as expressões expostas na equação 3.8.

$$\sigma_{s,\theta} = \begin{cases} \varepsilon_{s,\theta} \cdot E_{s,\theta}, & 0 \leq \varepsilon_{s,\theta} \leq \varepsilon_{p,\theta} \\ f_{p,\theta} - c + \frac{b}{a} \cdot \sqrt{a^2 - (\varepsilon_{y,\theta} - \varepsilon_{s,\theta})^2}, & \varepsilon_{p,\theta} \leq \varepsilon_{s,\theta} \leq \varepsilon_{y,\theta} \\ f_{y,\theta}, & \varepsilon_{y,\theta} \leq \varepsilon_{s,\theta} \leq \varepsilon_{t,\theta} \\ f_{y,\theta} \cdot \left[1 - \left(\frac{\varepsilon_{s,\theta} - \varepsilon_{t,\theta}}{\varepsilon_{u,\theta} - \varepsilon_{t,\theta}} \right) \right], & \varepsilon_{t,\theta} \leq \varepsilon_{s,\theta} \leq \varepsilon_{u,\theta} \\ 0, & \varepsilon_{s,\theta} \geq \varepsilon_{u,\theta} \end{cases} \quad (3.8)$$

Com:

$$a^2 = (\varepsilon_{y,\theta} - \varepsilon_{p,\theta}) \cdot \left(\varepsilon_{y,\theta} - \varepsilon_{p,\theta} + \frac{c}{E_{s,\theta}} \right) \quad (3.9)$$

$$b^2 = c \cdot (\varepsilon_{y,\theta} - \varepsilon_{p,\theta}) \cdot E_{s,\theta} + c^2 \quad (3.10)$$

$$c = \frac{(f_{y,\theta} - f_{p,\theta})^2}{(\varepsilon_{y,\theta} - \varepsilon_{p,\theta}) \cdot E_{s,\theta} - 2 \cdot (f_{y,\theta} - f_{p,\theta})} \quad (3.11)$$

$$\varepsilon_{p,\theta} = \frac{f_{p,\theta}}{E_{s,\theta}} \quad (3.12)$$

Em que:

$\sigma_{s,\theta}$ é tensão no aço em função da temperatura;

$\varepsilon_{s,\theta}$ é a deformação do aço em função da temperatura;

$\varepsilon_{p,\theta}$ é o limite de proporcionalidade na deformação;

$\varepsilon_{y,\theta}$ é a deformação de escoamento (0,02);

$\varepsilon_{t,\theta}$ é o limite de deformação para a resistência ao escoamento;

$\varepsilon_{u,\theta}$ é a deformação de ruptura.

Os parâmetros de deformação $\varepsilon_{t,\theta}$ e $\varepsilon_{u,\theta}$ são dados pela EN 1992-1-2 (2004) e pela NBR 15200:2012 em conformidade com a NBR 6118:2014, dependendo da classe e da ductilidade do aço. Na Figura 3.7 abaixo, para exemplificar, ilustra-se a relação constitutiva abordada neste item para diferentes níveis de temperatura, considerando aço laminado a quente e com $\varepsilon_{t,\theta}=0,05$ e $\varepsilon_{u,\theta}=0,10$, correspondente aos aços de ductilidade normal.

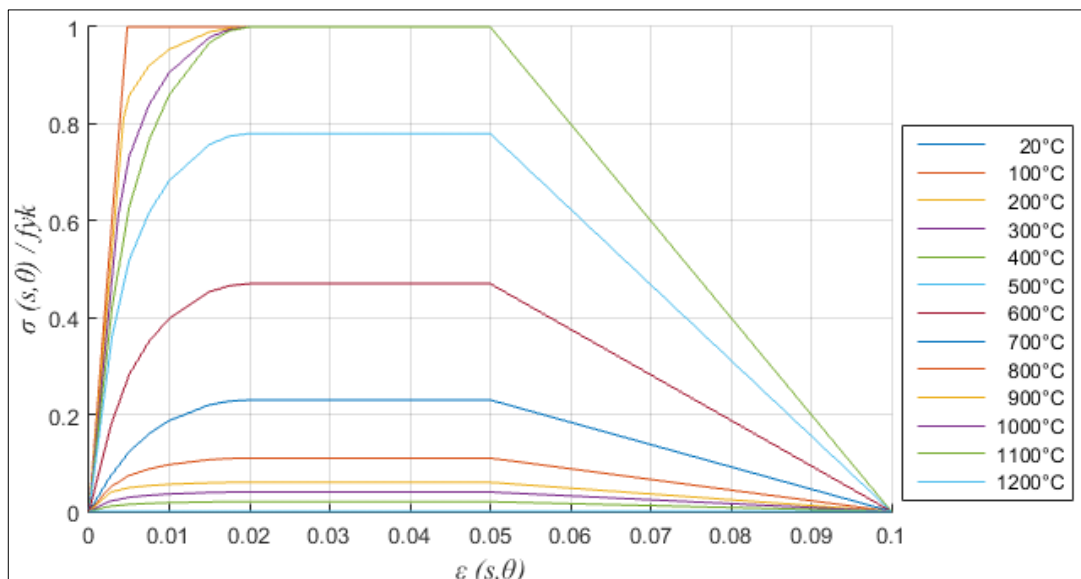


Figura 3.7: diagrama tensão-deformação para aço laminado a quente e com ductilidade normal.

(Baseado em: NBR 15200:2012; EN 1992-1-2 (2004); EN 1993-1-2 (2005))

3.2 PROPRIEDADES DO CONCRETO

Conforme já mencionado no item 2.1, o concreto é uma mistura onde a pasta de cimento hidratada envolve os agregados, em geral brita e areia. Conforme Costa (2008), cada componente reage de uma maneira diferente às temperaturas elevadas. O agregado se expande até desestruturar-se quimicamente e a pasta de cimento hidratada, por sua vez, expande somente com temperaturas mais baixas, apresentando contração acima dos 300°C.

De acordo com Caldas (2008), a pasta de cimento representa somente de 20 a 40% do volume total do concreto. Portanto, o tipo de agregado utilizado, normalmente silicosos ou calcáreos, tem papel fundamental na determinação das propriedades deste material.

À temperatura ambiente, esta mistura apresenta um comportamento homogêneo. No entanto, reforçando o item 2.2, salienta-se que, quando exposto às altas temperaturas, evidencia-se sua heterogeneidade. Isto dificulta prever com exatidão a sua resposta à situação de incêndio.

A NBR 6118:2014 classifica o concreto em dois grupos conforme a resistência característica à compressão (f_{ck}). O Grupo I engloba concretos com f_{ck} entre 10 MPa e 50 MPa e o Grupo II concretos com f_{ck} entre 55 MPa e 90 MPa, considerados como de alto desempenho. Salienta-se que, para concreto armado em obras permanentes, deve-se empregar no mínimo 20 MPa.

Quanto à densidade do concreto, o CEB (2010) através do *Bulletin* N° 55, classifica-o como de baixa densidade os concretos que apresentam densidade abaixo de 2000 kg/m³, densidade normal os concretos que apresentam densidade entre 2000 kg/m³ e 2600 kg/m³ e como de alta densidade aqueles que apresentam valor superior à 2600 kg/m³.

Conforme já mencionado, assim como o aço, o concreto perde eficiência quando exposto às altas temperaturas e as reduções em suas propriedades térmicas e mecânicas são tratadas neste item.

3.2.1 Propriedades térmicas

No cenário do incêndio, o concreto apresenta algumas vantagens por ser um material resistente, não combustível e com baixa condutividade térmica. A baixa condutividade, por exemplo, torna branda a transferência de calor no interior da estrutura, fazendo com que as zonas internas não sejam tão atingidas, quanto às expostas diretamente ao fogo.

3.2.1.1 Alongamento relativo

Conforme exposto no Anexo C da NBR 15200:2012 e no EN 1992-1-2 (2004), o alongamento térmico relativo (ou a deformação térmica específica) do concreto de densidade normal pode ser determinado através das equações 3.13 e 3.14.

Para o concreto composto por agregados silicosos:

$$\varepsilon_{c,\theta} = \begin{cases} -1,800 \cdot 10^{-4} + 9,000 \cdot 10^{-6} \cdot \theta + 2,300 \cdot 10^{-11} \cdot \theta^3, & 20^\circ\text{C} \leq \theta \leq 700^\circ\text{C} \\ 1,400 \cdot 10^{-2}, & 700^\circ\text{C} < \theta \leq 1200^\circ\text{C} \end{cases} \quad (3.13)$$

Para o concreto composto por agregados calcáreos:

$$\varepsilon_{c,\theta} = \begin{cases} -1,200 \cdot 10^{-4} + 6,000 \cdot 10^{-6} \cdot \theta + 1,400 \cdot 10^{-11} \cdot \theta^3, & 20^\circ\text{C} \leq \theta \leq 805^\circ\text{C} \\ 1,200 \cdot 10^{-2}, & 805^\circ\text{C} < \theta \leq 1200^\circ\text{C} \end{cases} \quad (3.14)$$

Em que:

$\varepsilon_{c,\theta}$ é o alongamento relativo do concreto em função da temperatura, ou seja, o alongamento térmico em relação ao comprimento observado a temperatura ambiente [adimensional].

O Anexo C da NBR 15200:2012 apresenta uma forma simplificada de se obter o alongamento específico do concreto de densidade normal, tornando a relação constante entre a propriedade e o aumento da temperatura. Esta simplificação é expressa pela equação 3.15.

$$\varepsilon_{c,\theta} = 1,800 \cdot 10^{-2} \cdot (\theta - 20) \quad (3.15)$$

Na Figura 3.8 abaixo, pode-se observar a evolução do alongamento relativo do concreto em função do aumento da temperatura.

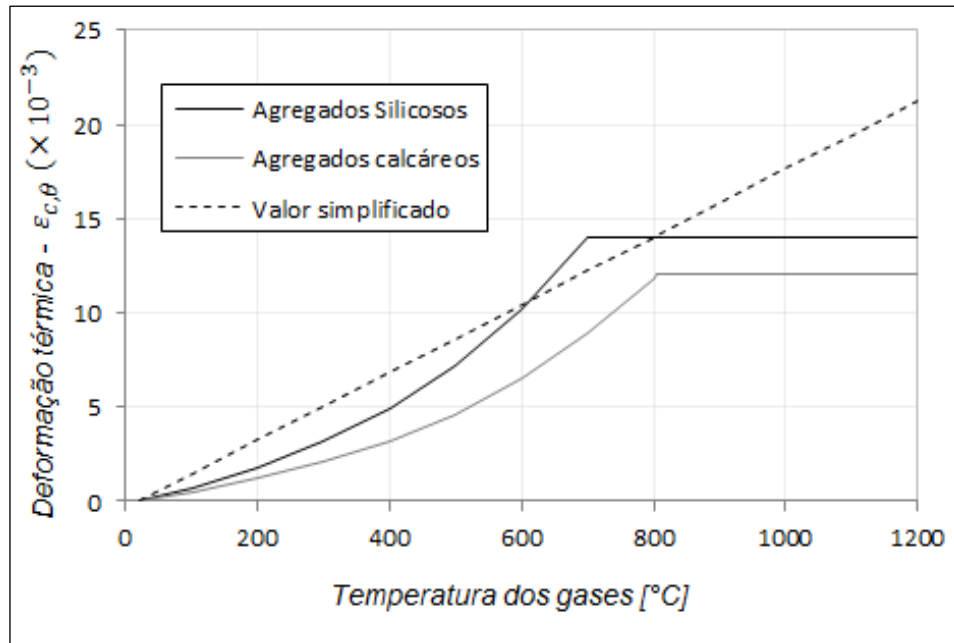


Figura 3.8: deformação térmica específica do concreto em função da temperatura.

(Baseado em: NBR 15200:2012; EN 1992-1-2 (2004))

3.2.1.2 Calor específico

O Anexo C da NBR 15200:2012 e o EN 1992-1-2 (2004) formulam o calor específico do concreto seco em função da temperatura de acordo com a equação 3.16 abaixo. Salienta-se que tal formulação é válida tanto para o concreto composto por agregados silicosos, quanto por agregados calcários.

$$c_{p,\theta} = \begin{cases} 900, & 20^{\circ}\text{C} \leq \theta \leq 100^{\circ}\text{C} \\ 900 + (\theta - 100), & 100^{\circ}\text{C} < \theta \leq 200^{\circ}\text{C} \\ 1000 + \frac{(\theta - 200)}{2}, & 200^{\circ}\text{C} < \theta \leq 400^{\circ}\text{C} \\ 1100, & 400^{\circ}\text{C} < \theta \leq 1200^{\circ}\text{C} \end{cases} \quad (3.16)$$

Na qual:

$c_{p,\theta}$ é o calor específico do concreto por unidade de massa em função da temperatura θ [J/(kg · °C)].

Assim como a norma brasileira, a europeia apresenta uma estratégia para os casos em que a umidade da mistura não for considerada explicitamente no método de cálculo. Sugere-se que a

função do calor específico do concreto seja modelada por um valor constante ($c_{p,top}$), situado entre 100 °C e 115 °C, com decréscimo linear entre 115 °C e 200 °C.

Conforme Costa (2008) os valores de pico do calor específico existem devido à evaporação da água livre em torno dos 100°C. Esses valores variam conforme a porcentagem de umidade em peso do concreto. A Tabela 3.4 abaixo informa os três valores expostos pelas duas normas citadas. O EN 1992-1-2 (2004) ainda aponta que é aceitável interpolar linearmente os valores para obtenção do parâmetro em misturas com umidades diferentes das mencionadas.

Tabela 3.4: valor de pico do calor específico conforme umidade do concreto.

$c_{p,top}$ J/(kg · °C)	Umidade
900	0,0% em peso
1470	1,5% em peso
2020	3,0% em peso

(Baseado em: NBR 15200:2012; EN 1992-1-2 (2004))

Percebe-se na tabela exposta que o valor de pico do calor específico aumenta com o acréscimo de umidade presente no concreto. De acordo com *fib* (2007), este fato é atribuído ao alto valor do calor específico da água. A NBR 15200:2012 ainda sugere o valor simplificado de 1000 J/(kg · °C) para o calor específico do concreto, tornando-o constante independentemente da temperatura. Conforme Browne, 1968 apud *fib* (2007), este valor refere-se a um valor típico para o concreto saturado a temperatura ambiente (20 °C).

Na Figura 3.9, apresenta-se a curva que representa o calor específico do concreto em função do aumento da temperatura, juntamente com os possíveis valores de pico supracitados.

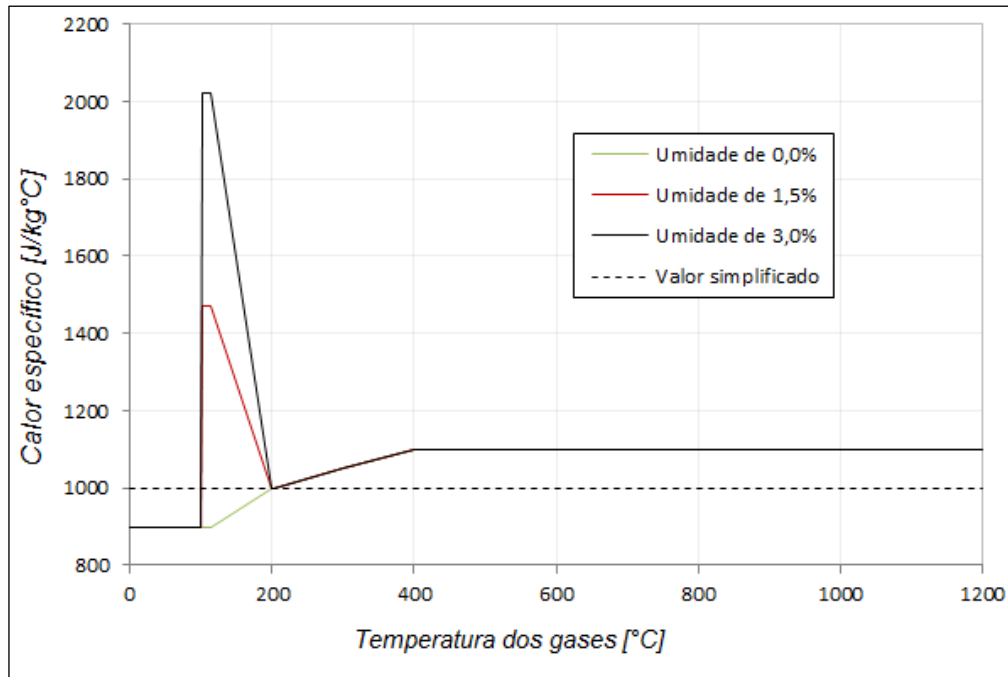


Figura 3.9: calor específico do concreto em função da temperatura.

(Baseado em: NBR 15200:2012; EN 1992-1-2 (2004))

3.2.1.3 Condutividade térmica

Segundo a *fib* (2007), as proporções dos materiais na mistura e o teor de umidade influenciam na condutividade térmica do concreto devido à disparidade entre os valores de condutividade da pasta de cimento e dos agregados. Na Tabela 3.5 abaixo exposta por Khoury, 1983 apud *fib* (2007), apresentam-se estes valores considerando a temperatura ambiente.

Tabela 3.5: valores de condutividade térmica dos materiais que compõe o concreto.

Material	Condutividade térmica [W/m°C]
Agregados	0,7 - 4,2
Concretos saturados	1,0 - 3,6
Pasta de cimento endurecida saturada	1,1 - 1,6
Água	0,515
Ar	0,0034

(Fonte: Khoury, 1983 apud *fib*, 2007)

Para obtenção da condutividade térmica do concreto de densidade normal com agregado silicioso, a NBR 15200:2012 apresenta a equação 3.17:

$$\lambda_{c,\theta} = 1,36 - 0,136 \cdot \frac{\theta}{100} + 0,0057 \cdot \left(\frac{\theta}{100} \right)^2, \quad 20^\circ\text{C} \leq \theta \leq 1200^\circ\text{C} \quad (3.17)$$

Em que:

$\lambda_{c,\theta}$ é a condutividade térmica do concreto em função da temperatura θ [W/(m · °C)].

O EN 1992-1-2 (2004), por sua vez, trata a equação exposta acima como forma de obtenção apenas do limite inferior (*lower limit*) da condutividade térmica que, segundo consta no seu Anexo A, trata-se do mais indicado para estruturas de concreto. No entanto, o código normativo também apresenta o limite superior (*upper limit*), oriundo de ensaios feitos com estruturas mistas de aço e concreto, definido através da equação 3.18 abaixo.

$$\lambda_{c,\theta} = 2,00 - 0,2451 \cdot \frac{\theta}{100} + 0,0107 \cdot \left(\frac{\theta}{100} \right)^2, \quad 20^\circ\text{C} \leq \theta \leq 1200^\circ\text{C} \quad (3.18)$$

De forma simplificada, para a condutividade térmica, a NBR 15200:2012 sugere considerar o valor constante de 1,3 W/(m · °C).

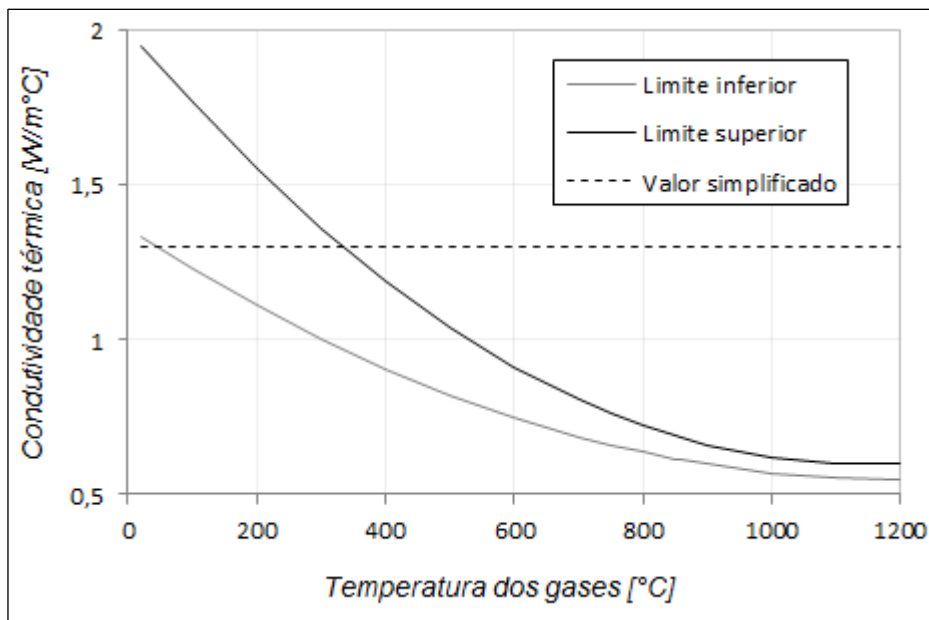


Figura 3.10: condutividade térmica do concreto em função da temperatura.

(Baseado em: NBR 15200:2012; EN 1992-1-2 (2004))

3.2.1.4 Massa específica

A variação da massa específica do concreto com a temperatura está relacionada às mudanças de peso, dilatação térmica e mudanças na porosidade. No concreto, o papel dos agregados é importante em termos da dilatação térmica e a dissociação dos agregados, como os carbonatados, implica em significativa redução na densidade acima de 600 °C e um aumento acentuado na porosidade (*fib*, 2017).

Tanto o Anexo C da NBR 15200:2012, quanto o EN 1992-1-2 (2004) apontam que a massa específica é influenciada pela perda de água do concreto e pode ser definida conforme equação 3.19.

$$\rho_{\theta} = \begin{cases} \rho(20^{\circ}\text{C}), & 20^{\circ}\text{C} \leq \theta \leq 115^{\circ}\text{C} \\ \rho(20^{\circ}\text{C}) \cdot \left(1,00 - 0,02 \cdot \frac{(\theta - 115)}{85}\right), & 115^{\circ}\text{C} < \theta \leq 200^{\circ}\text{C} \\ \rho(20^{\circ}\text{C}) \cdot \left(0,98 - 0,03 \cdot \frac{(\theta - 200)}{200}\right), & 200^{\circ}\text{C} < \theta \leq 400^{\circ}\text{C} \\ \rho(20^{\circ}\text{C}) \cdot \left(0,95 - 0,07 \cdot \frac{(\theta - 400)}{800}\right), & 400^{\circ}\text{C} < \theta \leq 1200^{\circ}\text{C} \end{cases} \quad (3.19)$$

Sendo:

ρ_{θ} a massa específica do concreto em função da temperatura θ [kg/(m³)];

$\rho(20^{\circ}\text{C})$ a massa específica do concreto em temperatura ambiente. Conforme a NBR 6118:2014, para efeitos de cálculo, pode-se adotar para o concreto simples 2400 kg/m³ e para o concreto armado 2500 kg/m³.

Na Figura 3.11, pode-se observar a variação da massa específica do concreto em função da temperatura conforme citado acima. Ressalta-se que foi considerada a massa específica do concreto armado para traçar a curva.

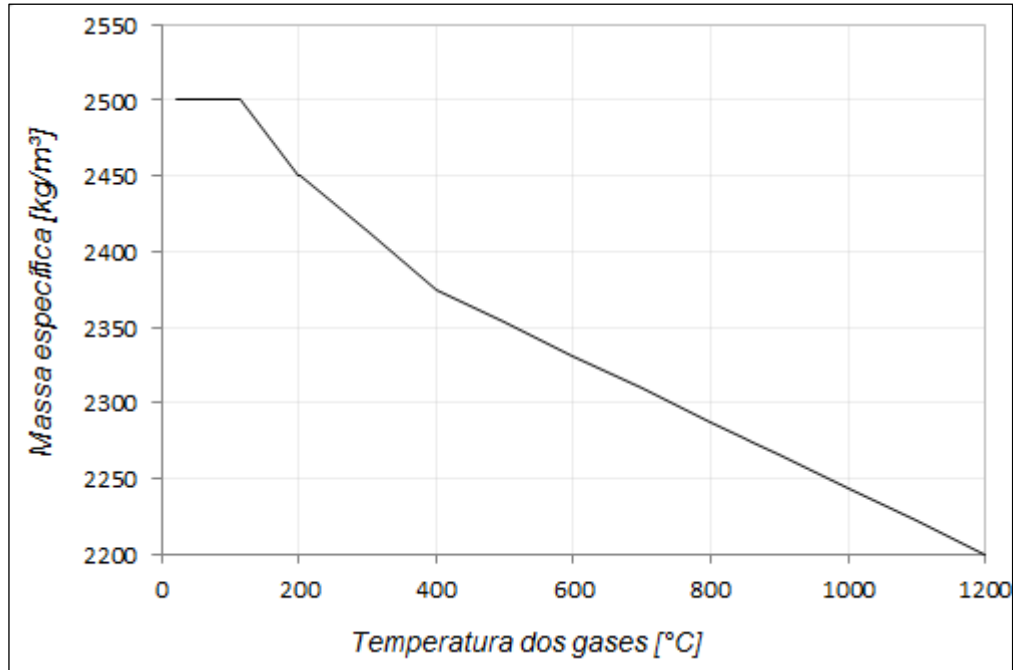


Figura 3.11: massa específica do concreto em função da temperatura.

(Baseado em: NBR 15200:2012; EN 1992-1-2 (2004))

3.2.2 Propriedades mecânicas

O concreto perde resistência e rigidez devido à fissuração interna e mudanças químicas, além de sofrer uma série de mudanças de coloração, especialmente se os agregados são silicosos. Logo, estas mudanças de cor podem indicar as perdas de resistência e rigidez (CÁNOVAS, 1988).

Diferentemente do aço, após o aquecimento o concreto não recupera sua resistência ao resfriar. No entanto, ainda conforme Cánovas (1988), se a temperatura que o concreto atingir não ultrapassar 500 °C, o material pode recuperar até 90% de sua resistência através de uma posterior hidratação. Rodrigues (1994), ainda afirma que em temperaturas abaixo dos 300 °C não existem variações apreciáveis na tensão residual do concreto.

Neste subitem são apresentados os procedimentos normatizados para lidar com as alterações nas propriedades mecânicas do concreto.

3.2.2.1 Resistência à compressão

A resistência à compressão é a propriedade mais estudada do concreto sob altas temperaturas, por se tratar de um elemento vital para o projeto estrutural e geralmente fornecer uma visão geral da qualidade do material (*fib*, 2007).

A redução desta propriedade em função do aumento da temperatura pode ser estimada, conforme preconizado pela NBR 15200:2012 e pelo EN 1992-1-2 (2004), assim como o aço, através de um coeficiente redutor ($\kappa_{c,\theta}$) de acordo com a equação 3.20.

$$f_{ck,\theta} = \kappa_{c,\theta} \cdot f_{ck} \quad (3.20)$$

Na qual:

$f_{ck,\theta}$ é a resistência característica à compressão do concreto em função da temperatura θ [MPa];

$\kappa_{c,\theta}$ é o coeficiente redutor [adimensional];

f_{ck} é a resistência característica à compressão do concreto à temperatura ambiente [MPa].

O coeficiente redutor mencionado acima também é um valor tabelado que varia em conformidade com o tipo de agregado presente no concreto e com o aumento da temperatura. Assim, na Tabela 3.6 abaixo, apresentam-se os valores conforme especificado pelo EN 1992-1-2 (2004).

Foi adotada a norma europeia como referência, pois a NBR 15200:2012 apenas oferece os coeficientes para concretos preparados predominantemente com agregados silicosos e com massa específica entre 2000 kg/m³ e 2800 kg/m³, indicando o uso da norma europeia caso o material em análise não esteja em conformidade com estes limitantes.

Salienta-se que para definição dos coeficientes em temperaturas intermediárias, conforme as normas supracitadas, basta interpolar linearmente os respectivos valores.

Tabela 3.6: valores para o coeficiente redutor da resistência à compressão do concreto.

Temperatura do concreto [°C]	$\kappa_{c,\theta}$	
	Agr. Silicosos	Agr. Calcáreos
20	1,00	1,00
100	1,00	1,00
200	0,95	0,97
300	0,85	0,91
400	0,75	0,85
500	0,60	0,74
600	0,45	0,60
700	0,30	0,43
800	0,15	0,27
900	0,08	0,15
1000	0,04	0,06
1100	0,01	0,02
1200	0,00	0,00

(Baseado em: EN 1992-1-2 (2004))

Na Figura 3.12 abaixo, estão indicadas as curvas referentes ao fator de redução à compressão do concreto em função da temperatura.

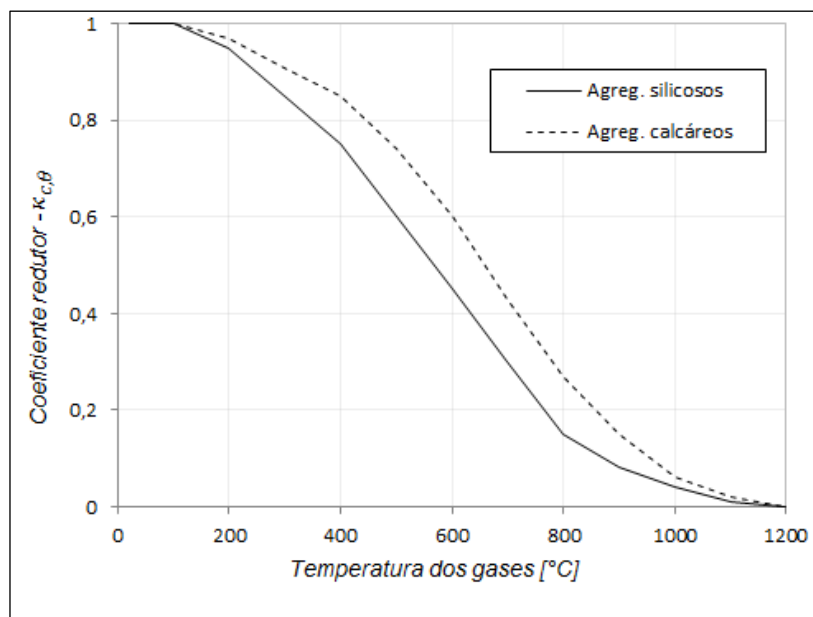


Figura 3.12: coeficiente redutor $\kappa_{c,\theta}$ em função da temperatura.

(Baseado em: EN 1992-1-2 (2004))

3.2.2.2 Resistência à tração

De maneira semelhante à apresentada ao tratar da resistência à compressão, no caso da resistência à tração do concreto também se percebe uma redução em função do aumento da temperatura. A NBR 15200:2012 não disponibiliza os coeficientes redutores para a minoração da resistência à tração, provavelmente devido ao fato de a resistência à tração geralmente ser desconsiderada, tornando a análise mais conservativa. No entanto, havendo a necessidade de considerar esta propriedade, ao usar tanto os métodos de cálculos simplificados quanto avançados, deve-se proceder de acordo com a equação 3.21 sugerida pelo EN 1992-1-2 (2004).

$$f_{ctk,\theta} = \kappa_{t,\theta} \cdot f_{ctk} \quad (3.21)$$

Onde:

$f_{ctk,\theta}$ é a resistência característica à tração do concreto em função da temperatura θ [MPa];

$\kappa_{t,\theta}$ é o coeficiente redutor [adimensional];

f_{ctk} é a resistência característica à tração do concreto à temperatura ambiente [MPa].

Para os valores do coeficiente redutor, o EN 1992-1-2 (2004) informa que, na ausência de informações mais precisas, os valores obtidos através da equação 3.22 podem ser utilizados.

$$\kappa_{t,\theta} = \begin{cases} 1,00, & 20^{\circ}\text{C} \leq \theta \leq 100^{\circ}\text{C} \\ 1,00 - 1,00 \cdot \left(\frac{\theta - 100}{500} \right), & 100^{\circ}\text{C} \leq \theta \leq 600^{\circ}\text{C} \\ 0,00, & 600^{\circ}\text{C} \leq \theta \leq 1200^{\circ}\text{C} \end{cases} \quad (3.22)$$

Na Figura 3.13 abaixo, está apresentada a curva referente ao fator de redução à tração do concreto em função da temperatura.

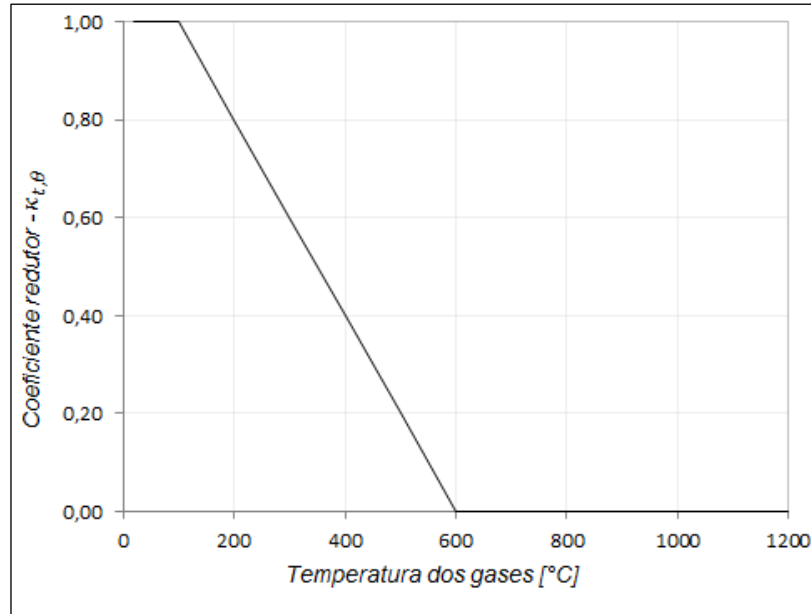


Figura 3.13: coeficiente redutor $\kappa_{t,\theta}$ em função da temperatura.

(Baseado em: EN 1992-1-2 (2004))

3.2.2.3 Módulo de elasticidade

O módulo de elasticidade do concreto é influenciado pela temperatura da mesma maneira que a resistência à compressão. A redução em função da temperatura é maior do que a apresentada em relação a resistência à compressão, uma vez que o pico de tensão aumenta com a temperatura (*fib*, 2010).

De maneira análoga às propriedades físicas do concreto descritas anteriormente, a redução do módulo de elasticidade também é dada de acordo com o respectivo coeficiente redutor ($\kappa_{cE,\theta}$). A obtenção do módulo em função da temperatura é obtida de acordo com a equação 3.23.

$$E_{c,\theta} = \kappa_{cE,\theta} \cdot E_c \quad (3.23)$$

Em que:

$E_{c,\theta}$ é o módulo de elasticidade do concreto em função da temperatura θ [MPa];

$\kappa_{cE,\theta}$ é o coeficiente redutor [adimensional];

E_c é o módulo de elasticidade do concreto à temperatura ambiente [MPa].

O módulo de elasticidade tangente inicial do concreto à temperatura ambiente, de acordo com a NBR 6118:2014, quando não forem realizados ensaios, pode ser obtido com a equação 3.24.

$$E_c = \begin{cases} \alpha_E \cdot 5600 \cdot \sqrt{f_{ck}}, & 20MPa \leq f_{ck} \leq 50MPa \\ 21,25 \cdot 10^3 \cdot \alpha_E \cdot \left(\frac{f_{ck}}{10} + 1,25\right)^{1/3}, & 55MPa \leq f_{ck} \leq 90MPa \end{cases} \quad (3.24)$$

Na qual:

α_E é igual a 1,0 para concretos silicosos e 0,9 para calcários [adimensional];

f_{ck} é a resistência característica à compressão do concreto à temperatura ambiente [MPa].

Todavia, seguindo o apontado por Araújo (2014a), por representar melhor o comportamento do concreto armado, adotou-se a relação do módulo de elasticidade tangente inicial do concreto proposto por *fib* (2010), conforme equação 3.25.

$$E_{ci} = 21500 \cdot \alpha_E \cdot \left(\frac{f_{cm}}{10}\right)^{1/3} \quad (3.25)$$

Para determinação dos valores do coeficiente redutor, o EN 1992-1-2 (2004) sugere que se proceda de acordo com a equação 3.26. Salienta-se que a NBR 15200:2012 não apresenta relações para considerar a redução do módulo de elasticidade do concreto, motivo pelo qual a norma europeia foi adotada. A curva referente ao fator de redução para o módulo de elasticidade do concreto em função da temperatura está exposta na Figura 3.14.

$$\kappa_{cE,\theta} = (\kappa_{c,\theta})^2 \quad (3.26)$$

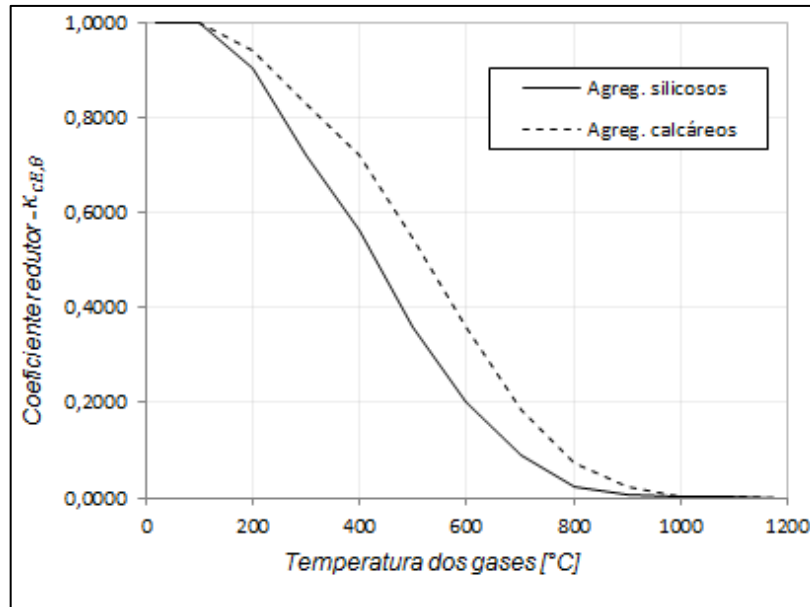


Figura 3.14: coeficiente reductor $\kappa_{cE,\theta}$ em função da temperatura.
(Baseado em: EN 1992-1-2 (2004))

3.2.2.4 Diagrama tensão-deformação

Tanto o EN 1992-1-2 (2004) quanto o Anexo B da NBR 15200:2012 apresentam a relação tensão deformação do concreto sob altas temperaturas de acordo com o aspecto genérico apresentado na Figura 3.15 abaixo.

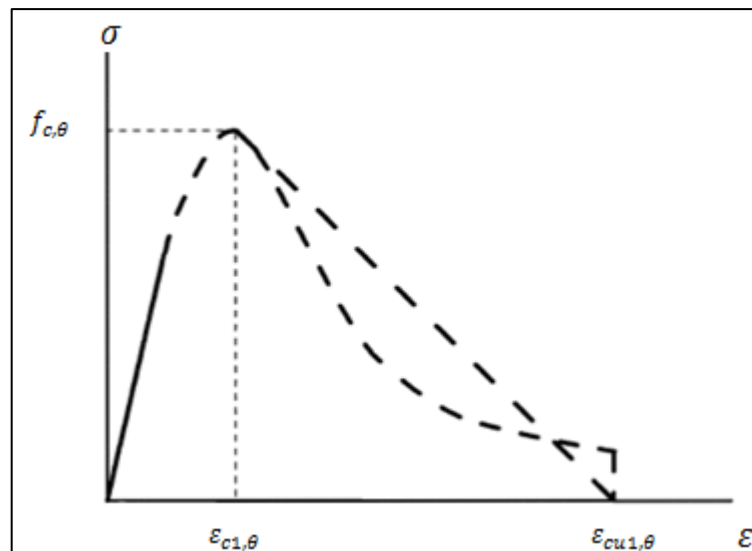


Figura 3.15: relação constitutiva genérica do concreto sob compressão em função da temperatura.
(Fonte: EN 1992-1-2, 2004)

Percebe-se, na figura, um ramo ascendente onde a deformação aumenta em função do incremento de tensão até chegar ao valor de resistência máxima à compressão do concreto ($f_{c,\theta}$) onde se inicia o ramo descendente que se desenvolve até a deformação linear específica última do concreto ($\varepsilon_{cu1,\theta}$).

O EN 1992-1-2 (2004) não determina um equacionamento que defina o ramo descendente do diagrama, apenas permite, caso necessário, a adoção arbitrária de uma relação linear ou não linear capaz de representar a plastificação do concreto. A NBR 15200:2012, por sua vez, apenas menciona que é permitido adotar uma linha reta para representar o ramo descendente. Para o ramo ascendente as normas supracitadas estabelecem a seguinte relação matemática:

$$\sigma_{c,\theta} = \frac{3 \cdot \varepsilon_{c,\theta} \cdot f_{c,\theta}}{\varepsilon_{c1,\theta} \cdot \left(2 + \left(\frac{\varepsilon_{c,\theta}}{\varepsilon_{c1,\theta}} \right)^3 \right)} \quad (3.27)$$

Na qual:

$\sigma_{c,\theta}$ é a tensão à compressão no concreto em função da temperatura [MPa];

$f_{c,\theta}$ é o valor da resistência à compressão do concreto à altas temperaturas, podendo ser atribuído a este parâmetro o valor característico ou o de cálculo à temperatura elevada [MPa];

$\varepsilon_{c,\theta}$ é a deformação linear específica do concreto à altas temperaturas [adimensional];

$\varepsilon_{c1,\theta}$ é a deformação linear específica do concreto correspondente à resistência máxima do concreto à altas temperaturas [adimensional].

O EN 1992-1-2 (2004) determina os valores para as deformações lineares específicas máximas e últimas conforme o exposto na Tabela 3.7. Ressalta-se que os valores independem do tipo de agregado do concreto.

Tabela 3.7: deformações lineares específicas para o concreto.

Temperatura do concreto [°C]	$\varepsilon_{c1,\theta}$	$\varepsilon_{cu1,\theta}$
20	0,0025	0,0200
100	0,0040	0,0225
200	0,0055	0,0250
300	0,0070	0,0275
400	0,0100	0,0300
500	0,0150	0,0325
600	0,0250	0,0350
700	0,0250	0,0375
800	0,0250	0,0400
900	0,0250	0,0425
1000	0,0250	0,0450
1100	0,0250	0,0475
1200	0,0000	0,0000

(Baseado em: EN 1992-1-2 (2004))

Conforme Costa (2008), pode-se utilizar, na ausência de dados experimentais, a própria equação 3.27 para o ramo descendente. A autora ainda comenta que a relação tensão-deformação reflete as alterações da resistência à compressão, do módulo de elasticidade e das tensões de compressão resistentes máximas e últimas do concreto. Na Figura 3.16 e Figura 3.17, apresentam-se os diagramas tensão-deformação do concreto conforme as considerações expostas pelo EN 1992-1-2 (2004) e pela NBR 15200:2012.

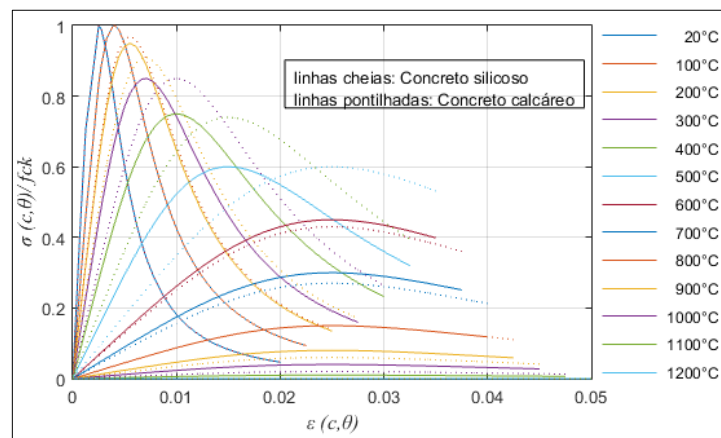


Figura 3.16: relação constitutiva do concreto sob compressão em função da temperatura com o ramo descendente conforme equação 3.27.

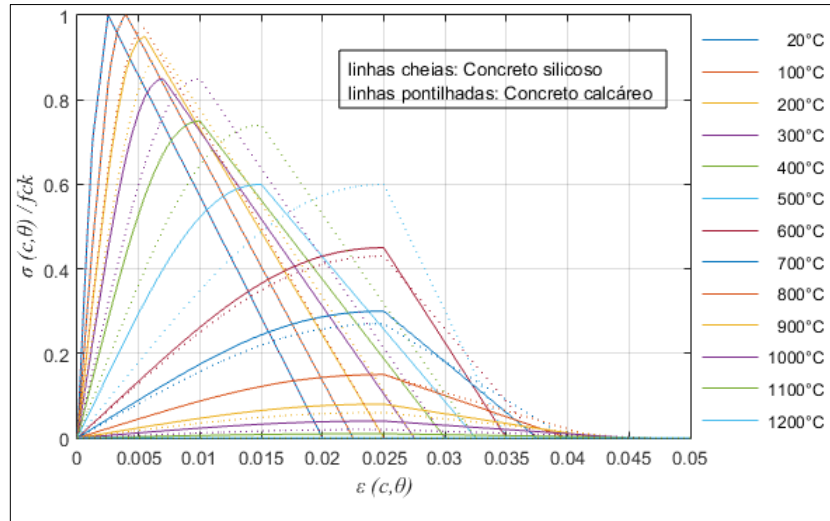


Figura 3.17: relação constitutiva do concreto sob compressão em função da temperatura com o ramo descendente linear.

Outra possibilidade para representar o diagrama tensão-deformação do concreto armado é optar pela relação proposta pelo Código Modelo *fib* (2010). Esta estratégia foi adotada por Lemos (2010) e a comparação entre o comportamento da simulação do concreto seguindo as diferentes relações também é objeto de estudo do presente trabalho. A curva proposta por *fib* (2010) é idealizada para temperatura ambiente, devido a isto, deve-se adequar os parâmetros em função da temperatura. A formulação original pode ser consultada em *fib* (2010) e a adaptada pode ser visualizada na equação 3.28.

$$\frac{\sigma_{c,\theta}}{f_{cm}} = - \left(\frac{\left(\frac{E_{ci,\theta}}{E_{c1,\theta}} \right) \cdot \left(\frac{\varepsilon_{c,\theta}}{\varepsilon_{c1,\theta}} \right) - \left(\frac{\varepsilon_{c,\theta}}{\varepsilon_{c1,\theta}} \right)^2}{1 + \left(\left(\frac{E_{ci,\theta}}{E_{c1,\theta}} \right) - 2 \right) \cdot \left(\frac{\varepsilon_{c,\theta}}{\varepsilon_{c1,\theta}} \right)} \right), \quad |\varepsilon_{c,\theta}| \leq |\varepsilon_{cu1,\theta}| \quad (3.28)$$

Onde:

$E_{ci,\theta}$ é o módulo de elasticidade tangente inicial do concreto em função da temperatura [MPa];

$E_{c1,\theta}$ é o módulo de elasticidade secante do concreto em função da temperatura [MPa].

Ressalta-se que os valores das deformações para cálculo do diagrama continuam sendo os propostos por EN 1992-1-2 (2004). O aspecto genérico do diagrama tensão-deformação sugerido por *fib* (2010) pode ser visualizado na Figura 3.18.

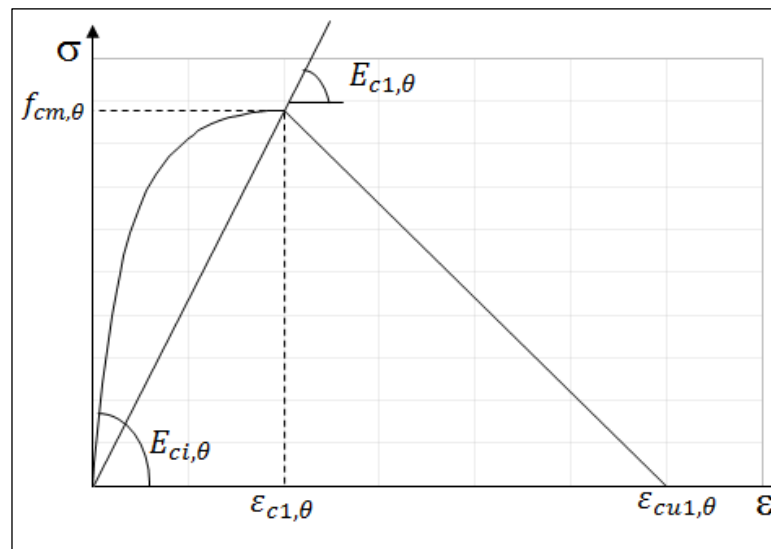


Figura 3.18: relação constitutiva genérica do concreto sob compressão em função da temperatura proposta por *fib* (2010).

3.3 PROPRIEDADES MECÂNICAS E TÉRMICAS DO CONCRETO DE ALTA RESISTÊNCIA

O EN 1992-1-2 (2004) em seu item 6, fornece especificações adicionais para o concreto de alta resistência (*high strength concrete* – HSC). Ao se tratar de concreto deste tipo, a norma salienta a importância de levar em consideração o fenômeno do *spalling* do concreto, fenômeno recorrente em situação de altas temperaturas que está melhor definido no item 3.4. A norma ainda subdivide o concreto de alta resistência em três classes, sendo a Classe 1 composta por concretos com resistência entre 55 MPa e 70 MPa, a Classe 2 por concretos entre 70 MPa e 90 MPa e a Classe 3 por concretos com resistência acima de 90 MPa. Os coeficientes redutores para a resistência à compressão referente às três classes mencionadas estão apresentados na Tabela 3.8.

Tabela 3.8: valores para o coeficiente redutor da resistência à compressão do concreto HSC.

Temperatura do concreto [°C]	$f_{c,\theta} / f_{ck}$		
	Classe 1	Classe 2	Classe 3
20	1,00	1,00	1,00
50	1,00	1,00	1,00
100	0,90	0,75	0,75
200			0,70
259	0,90		
300	0,85		0,65
400	0,75	0,75	0,45
500			0,30
600			0,25
700			
800	0,15	0,15	0,15
900	0,08		0,08
1000	0,04		0,04
1100	0,01		0,01
1200	0,00	0,00	0,00

(Baseado em: EN 1992-1-2 (2004))

Ainda conforme a norma supracitada, as propriedades térmicas exposta no item 3.2.1 também podem ser aplicadas para o concreto de alta resistência embora a condutividade térmica, por exemplo, seja mais elevada do que a constatada no concreto convencional. Logo, para o HSC, faz-se aconselhável utilizar o limite superior para a condutividade térmica conforme mencionado no subitem 3.2.1.3 deste trabalho.

3.4 SPALLING DO CONCRETO

Além de sofrer redução da resistência e rigidez devido à deterioração de suas propriedades mecânicas e químicas, com o aumento da temperatura em rápidas taxas de aquecimento, o concreto pode perder parte de sua seção transversal diminuindo ainda mais a sua funcionalidade e capacidade resistente. Este fenômeno é conhecido como *spalling* e não é diretamente um modo de falha da estrutura, mas sua ocorrência pode levar a falhas devido à flambagem das barras de aço e à flexão, por exemplo.

Existe uma preocupação maior com a questão do *spalling* em túneis onde se presencia curvas de temperatura-tempo mais severas e teores de umidade iniciais do concreto normalmente mais elevados em comparação com as edificações, 75% e 55% respectivamente. Kirchhof (2010) acrescenta que com a aplicação do concreto de alto desempenho em túneis, o fenômeno pode ocorrer nos primeiros 20 minutos de incêndio.

Conforme classificação exposta pela *fib* (2007), o *spalling* divide-se em:

- a) *spalling* de agregados;
- b) *spalling* explosivo;
- c) *spalling* superficial;
- d) *spalling* por descamação;
- e) *spalling* de canto;
- f) *spalling* após o resfriamento.

Na realidade, em uma situação de incêndio, todos os tipos de *spalling* supracitados podem ser encontrados, dificultando classificá-los corretamente. Sabe-se que os três primeiros tipos comumente acontecem no início do incêndio, enquanto os três últimos ocorrem posteriormente. O *spalling* explosivo refere-se à segregação brusca de partes do concreto acompanhado por ruídos característicos.

Na Figura 3.19 e Figura 3.20 e abaixo, pode-se visualizar em uma estrutura real o acontecimento do *spalling* e os danos causados pelo mesmo após o incêndio. Observa-se a exposição direta da armadura devido ao desprendimento do cobrimento de concreto.

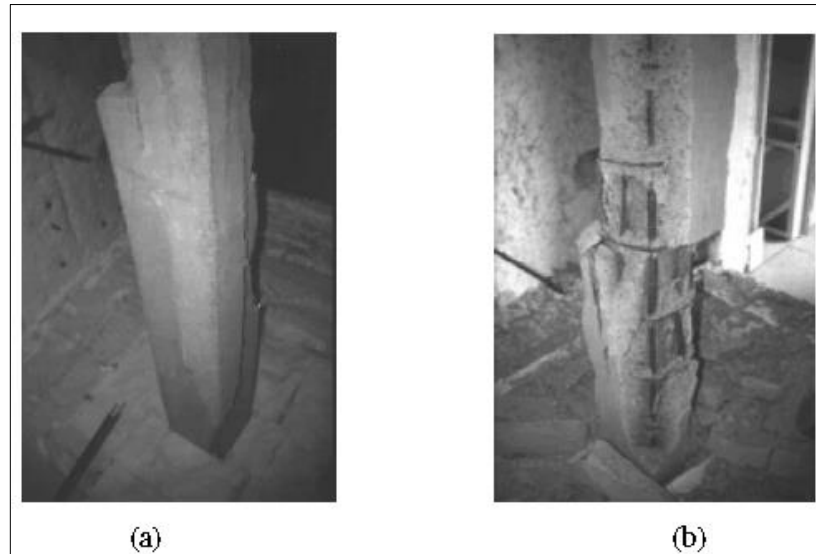


Figura 3.19: *spalling* de um pilar de concreto normal (a) e um pilar de concreto HSC (b).

(Fonte: KODUR E HARMATHY, 2002 apud CALDAS, 2008)



Figura 3.20: *spalling* em viga de concreto.

(Fonte: ABBASI E HOGG, 2006 apud ALBUQUERQUE, 2012)

Conforme apontado por Lourenço et al. (2006), o *spalling* é mais comum em concretos de alta resistência, pois por apresentar uma matriz mais compacta, com baixa porosidade, desenvolve pressões elevadas no interior da micro-estrutura. Estas pressões quando ultrapassam o limite da resistência à tração do concreto provocam o deslocamento.

Além disso, *fib* (2017) atenta para as consequências do *spalling*, salientando que o mesmo deve ser evitado ao máximo, pois, ao acontecer, pode invalidar hipóteses de cálculo e reduzir consideravelmente os níveis de segurança da estrutura. Isto implica situações emergenciais não

previstas em projeto que podem ocasionar riscos maiores à vida humana. Dentre as principais consequências do lascamento do concreto, além da redução da área da seção transversal já mencionada, um dos pontos que deve ser ressaltado é exposição direta das barras de aço às chamas. Isto acelera a ação da temperatura na estrutura, resultando em rápida perda de resistência estrutural. Kirchhof (2010) menciona que, na maioria dos casos, o deslocamento fica restrito ao cobrimento do concreto, não se propagando além da camada de armadura.

O EN 1992-1-2 (2004), por sua vez, ressalta a importância de evitar a ocorrência do *spalling* a partir de dispositivos ou considerar a sua influência no desempenho da estrutura. Acrescenta ainda que o fenômeno não costuma acontecer em concretos com teor de umidade abaixo de 3% em peso.

3.4.1 Definição de *spalling* explosivo

Segundo *fib* (2007), o *spalling* explosivo é considerado o tipo mais sério de *spalling*, pois sua ocorrência pode implicar na expulsão brusca de camadas de concreto com espessuras de 25 mm a 100 mm. Kirchhof (2010) acrescenta que os pedaços de material expulsos podem chegar a comprimentos de 300 mm e ainda aponta que, em geral, o lascamento explosivo ocorre durante os primeiros 30 minutos de ensaio em altas temperaturas.

Em conformidade com o *fib* (2007), o fenômeno pode ocorrer de duas maneiras: devido à pressão nos poros do concreto ou devido às tensões térmicas. Os dois fatores podem ocorrer isoladamente ou de maneira simultânea e são diretamente influenciados pelos carregamentos aplicados.

3.4.2 Fatores que influenciam no *spalling* explosivo

Muitos fatores são identificados como influenciadores do *spalling* explosivo. Estes incluem a resistência, idade e permeabilidade do concreto, condições de aquecimento como a taxa e intensidade dos gradientes térmicos, dimensões e forma da seção transversal, tipo e tamanho dos agregados, teor de umidade do concreto, presença de fissuras, tipo e quantidade de armaduras, presença de fibras de polipropileno e carregamento aplicado (*fib*, 2007). Na Tabela 3.9 abaixo, estão apresentados, resumidamente, os fatores supracitados em conformidade com o exposto por Khoury (2006) apud Boletim 38 da *fib* (2007).

Tabela 3.9: características das diferentes categorias de *spalling*.

Categoria de <i>spalling</i>	Fase de ocorrência (min)	Natureza	Som	Danos à estrutura	Fatores de influência
Agregados	7 - 30	Intensa	Estalo	Superficiais	6, 1, 13, 2 e 15
Cantos e quinas	30 - 90	Não violento	Nenhum	Podem ser sérios	14, 1, 4 e 12
Superficial	7 - 30	Violento	Fissuração	Podem ser sérios	6, 15, 10 e 4
Explosivo	7 - 30	Violento	Estrondo	Sérios	6, 1, 13, 3, 5, 7, 8, 10, 11, 12, 13, 15 e 16
Delaminação	Quando o concreto perde capacidade resistente	Não violento	Nenhum	Podem ser sérios	14, 3, 7, 11 e 12
Após o resfriamento	Durante e após o resfriamento, pela absorção da umidade	Não violento	Nenhum	Podem ser sérios	14, 3, 7, 11, 12, 17 e 9
Caracterização dos fatores de influência					
1 Expansão térmica dos agregados		7 Carregamento / Restrições		13 Tamanho dos agregados	
2 Difusividade térmica dos agregados		8 Gradiente térmico		14 Temperatura máxima	
3 Resistência ao cisalhamento do concreto		9 Tipo dos agregados		15 Umidade	
4 Resistência à tração do concreto		10 Permeabilidade		16 Tamanho da seção transversal	
5 Idade do concreto		11 Forma da seção transversal		17 Absorção de umidade	
6 Taxa de aquecimento		12 Armadura			

(Fonte: KHOURY, 2006 apud *fib* (2007))

Embasado em alguns estudos como, por exemplo, Khoury (2007) apud *fib* (2007) e Sertmehmetoglu (1977) apud *fib* (2007), o Boletim 38 no item 6.2.1 apresenta a descrição destes fatores. No presente trabalho, somente alguns pontos considerados como principais serão apresentados:

- a) permeabilidade do concreto: conforme já visto no subitem anterior, afeta diretamente a liberação de vapor no concreto. A baixa permeabilidade, evidenciada geralmente em concretos de alta resistência, corrobora com o aumento das pressões no interior dos poros. Conforme Harmathy (1965) apud *fib* (2007), não é comum o spalling em concretos com permeabilidade maior que $5 \cdot 10^{11}$ cm²;
- b) idade do concreto: a maioria das pesquisas aponta que a probabilidade de spalling reduz com a idade do concreto, no entanto, esta redução pode estar relacionada mais com a diminuição do teor de umidade nestes concretos do que propriamente com a sua idade;
- c) resistência do concreto: normalmente a ocorrência do spalling é evidenciada em concretos de alta resistência. Em geral, a relação água-cimento é reduzida para se obter estes concretos de desempenho elevado. Isto gera redução na permeabilidade e conseqüentemente aumento das pressões nos poros. No entanto, ao considerar a maior resistência à tração deste tipo de concreto, faz-se possível resistir a tais pressões, evitando a ocorrência do lascamento;
- d) teor de umidade: a água livre é considerada como a principal causa do spalling explosivo, o risco de ocorrência diminui se o teor de umidade for baixo. Kirchhof (2010) menciona que apenas 3% da água consegue escapar durante o intervalo de temperatura de 20 °C e 100 °C, para uma taxa de aquecimento de 1 °C/minuto. Isto representa que, para teor de umidade inferior a este valor, dificilmente o deslocamento estará atribuído a este fator;
- e) carregamentos/restrições: quanto maior o carregamento aplicado associado às restrições expostas na estrutura, maior a probabilidade de ocorrência do *spalling*;
- f) tipo e tamanho dos agregados: a probabilidade de ocorrência do *spalling* é crescente para a seguinte ordem de agregados: granito, basalto, silicoso e calcáreo. Além disso, agregados maiores também aumentam esta probabilidade;
- g) fissuração: a presença da fissuração no elemento estrutural tem efeito benéfico visto que facilita a liberação das pressões de vapor para a atmosfera durante o

aquecimento, todavia, a propagação das fissuras obviamente facilita a ocorrência do *spalling*, pois facilita o desprendimento de material;

- h) armaduras: regiões com acúmulo de armaduras e, conseqüentemente, espaçamento reduzido, são mais susceptíveis ao *spalling*;
- i) cobrimento: se o cobrimento exceder 40 mm para concretos preparados com agregados densos ou 50 mm para concretos preparados com agregados leves, há risco de ocorrência de *spalling*.

3.4.3 Medidas para evitar o *spalling*

O *spalling*, devido a sua complexidade, embora realizados diversas pesquisas e ensaios durante décadas, ainda não pode ser previsto de uma maneira completamente satisfatória. Segundo o *fib* (2007), embora se tenha avanços significativos na compreensão de seus mecanismos, a previsão atualmente ainda se baseia principalmente em critérios empíricos pouco precisos.

A modelagem numérica deste fenômeno é complexa e requer a associação de diversos parâmetros como se pode observar durante este item, motivo pelo qual o presente estudo se restringe a análise de concreto de resistência normal sem considerar os efeitos do lascamento.

Enquanto ainda não se consegue prever adequadamente este fenômeno, o *fib* (2007) sugere algumas medidas para diminuir a probabilidade de sua ocorrência. Dentre elas, destacam-se:

- a) uso de materiais de proteção térmica nas estruturas com a finalidade de reduzir os gradientes térmicos retardando a evolução da temperatura;
- b) adição de fibras de polipropileno à massa do concreto em prol do alívio de pressão devido ao vapor de água, pois, segundo Caldas (2008), estas fibras derretem a aproximadamente 160 °C criando pequenos canais no concreto;
- c) uso de agregados de baixa expansão térmica e estáveis sob altas temperaturas;
- d) adoção de seções transversais com maiores dimensões e escolha da forma da seção;
- e) armadura adicional, apesar da dificuldade em ser utilizada em seções transversais com dimensões reduzidas.

4 METODOLOGIA ADOTADA – ANSYS 19.1

Existem atualmente no mercado diversos programas capazes de realizar análises termoestruturais, alguns específicos para este tipo de análise e outros genéricos. Os programas específicos mais populares em circulação são: o *software* ADAPTIC (<https://www.imperial.ac.uk/>) desenvolvido no Imperial College em 1991, o SAFIR (<https://www.uee.uliege.be>) criado por Franssen na Universidade de Liège em 2011, o VULCAN (<https://www.maptek.com>) elaborado e aprimorado por sucessivos pesquisadores desde 1985 na Universidade de Sheffield e o SuperTempcalc (TCD) desenvolvido por Anderberg (1997) no FSD na Suécia.

Dentre os pacotes computacionais genéricos mais comuns estão ABAQUS (2014), ANSYS (2016) e DIANA (2017). Estes *softwares* não foram desenvolvidos exclusivamente para análise de estruturas em situação de incêndio, mas eles permitem atribuir as mais diversas propriedades dos materiais e isto possibilita a criação adequada dos modelos para tal finalidade. Os programas são capazes de realizar tanto a análise estrutural quanto térmica e alguns ainda permitem esta análise de maneira acoplada (termoestrutural). As suas extensas bibliotecas internas de elementos possibilitam realizar diferentes níveis de análise estrutural, desde a mais simples com os elementos de uma dimensão até os mais complexos com os elementos tridimensionais (BUCHANAN, 2017).

Segundo comentado por Wang (2002), estes *softwares* mencionados acima possuem acurácia similar. Optou-se pelo emprego do pacote computacional ANSYS já que o Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil da Universidade Federal do Rio Grande do Sul dispõe de uma licença do mesmo. Além disso, fatores como o prévio conhecimento do funcionamento do programa, disponibilidade do suporte técnico e a interação facilitada entre o programador e o *software* devido a linguagem APDL (*ANSYS Parametric Design Language*), também auxiliaram na escolha.

4.1 CONSIDERAÇÕES INICIAIS SOBRE O ANSYS

No presente trabalho, conforme já mencionado, a construção do modelo computacional foi feita através no *software* ANSYS, em sua versão 19.1. O programa, através do Método dos

Elementos Finitos (MEF), é capaz de resolver diversos problemas de engenharia no mais diversos campos de estudo.

O princípio básico do MEF é a decomposição do domínio em um número finito de subdomínios (elementos) para os quais a solução aproximada sistemática é construída aplicando os métodos variacionais ou métodos de resíduos ponderados. Em síntese, o MEF reduz o problema a um número finito de incógnitas dividindo o domínio e expressando as incógnitas em termos de funções aproximadas (funções de interpolação) para cada elemento (MADENCI e GUVEN, 2006).

O programa possui basicamente dois modos de apresentação: ANSYS APDL *Mechanical* e ANSYS *Workbench*. Neste trabalho, emprega-se a plataforma APDL do ANSYS.

Qualquer análise estrutural no *software* pode ser dividida em três fases: pré-processamento, processamento e pós-processamento. Na primeira fase, em suma, caracteriza-se o problema, definindo os elementos que serão utilizados, atribuindo as propriedades dos materiais e as constantes reais, definindo a geometria do modelo e o discretizando. A fase de processamento é a solução do problema, onde se define o tipo de análise, as opções de análises a serem adotadas pelo *software* e as condições de contorno do problema. A última fase refere-se aos *outputs*, isto é, a geração dos resultados das análises através de gráficos e listas de resultados.

4.2 ANÁLISE TÉRMICA: ELEVAÇÃO DE TEMPERATURA EM ELEMENTOS ESTRUTURAIIS

A análise térmica tem por objetivo determinar algumas variáveis de interesse como: o campo e a evolução da temperatura, a quantidade de calor perdido ou absorvido, os gradientes térmicos e os fluxos térmicos. Neste trabalho, para análise de estruturas em situação de incêndio, a análise térmica desempenhará papel fundamental, pois concederá a resolução do problema os efeitos da elevação da temperatura na posterior análise estrutural. Ressalta-se que o *software* trabalha com a unidade de temperatura em Kelvin, para converter em Celsius basta fazer uma correção através do comando TOFFST, trasladando o zero absoluto da escala em 273,15 (diferença entre as escalas Kelvin e Celsius).

O *software* ANSYS permite realizar dois tipos de análise térmica:

- a) análise estacionária: determina a solução do problema ignorando a variação das condições (ações e propriedades dos materiais) em um dado período de tempo;
- b) análise transiente: objeto de interesse neste estudo, este tipo de análise considera a variação das condições em um dado período de tempo.

Nesta seção serão discutidos os aspectos da modelagem numérica exclusivamente com o emprego do ANSYS em problemas de análise térmica. Será apresentada a forma com qual o programa lida com o problema de transferência de calor via método dos elementos finitos, as condições de contorno aplicáveis e os principais recursos disponíveis para elaboração de modelos numéricos.

O resultado da análise térmica consiste na determinação das temperaturas em cada nó da malha estrutural da peça. Ressalta-se que, conforme as análises realizadas, a temperatura se mantém uniforme longitudinalmente, enquanto na seção transversal da estrutura é observada a variação de temperatura.

É importante destacar que as propriedades dos materiais são definidas pelo usuário na etapa de pré-processamento. Estas propriedades são consideradas no problema automaticamente ao atualizar a matriz correspondente conforme a temperatura média dos elementos em cada passo de tempo. Tal temperatura média do elemento é calculada a partir da temperatura de cada um dos nós que o constitui. Isto porque cada nó do elemento pode apresentar uma diferente temperatura. Esta abordagem de média dos valores nodais é utilizada tanto na análise térmica quanto na análise estrutural e acoplada que serão definidas nos itens seguintes.

Para a transferência de calor no elemento o programa permite considerar os três modos primários de transferência de calor previamente descritos no item 2.4: condução, convecção e radiação.

4.2.1 Condução e convecção

Na análise especificamente da condução de calor, os carregamentos aplicáveis são temperaturas nodais e fluxo de calor nos elementos de contorno do modelo que, por sua vez, pode ter origem em um processo de convecção ou radiação. As propriedades físicas que devem ser oferecidas

ao *software* para a resolução de um problema de condução de calor incluem a condutividade térmica e a densidade do material.

Para incorporar os efeitos da convecção de calor à análise, deve-se especificar a convecção como uma carga de superfície em elementos sólidos ou de casca. Além disso, especifica-se o coeficiente de transferência de calor por convecção (α) e a temperatura do fluido na superfície de interesse. Assim, o programa calcula de forma apropriada a transferência de calor através da superfície.

4.2.1.1 Abordagem analítica inicial

Conforme ANSYS (2016) através do documento *Mechanical APDL Thermal Analysis Guide*, a base fundamental para a análise térmica é a equação diferencial do balanço de energia em um volume de controle obtida através do princípio de conservação de energia. Tal equação corresponde à 1ª lei do estado termodinâmico, conforme equação 4.1 retirada do documento *Mechanical APDL Theory Reference*.

$$\rho \cdot c \cdot \left(\frac{\partial T}{\partial t} + \{v\}^T \cdot \{L\} \cdot T \right) = \{L\}^T \cdot ([D] \cdot \{L\} \cdot T) + \dot{q} \quad (4.1)$$

Onde:

ρ é a densidade do material, atribuído ao material com a denominação DENS através do comando MP [kg/m³];

c é o calor específico do material, atribuído ao material com a denominação C através do comando MP [J/(kg · °C)];

T é a temperatura [°C];

t é o tempo [seg.];

$\{v\}$ é o vetor velocidade para o transporte de massa do fluido;

$\{L\}$ é o vetor operador gradiente, isto é, $\left\{ \frac{\partial}{\partial x} \quad \frac{\partial}{\partial y} \quad \frac{\partial}{\partial z} \right\}^T$;

\dot{q} é a taxa de geração de calor por unidade de volume;

$[D]$ é a matriz de condutividade, isto é, $\begin{bmatrix} \lambda_{xx} & 0 & 0 \\ 0 & \lambda_{yy} & 0 \\ 0 & 0 & \lambda_{zz} \end{bmatrix}$.

Para melhor entendimento da formulação apresentada na equação 4.1, apresenta-se a sua obtenção passo a passo conforme exposto por Lienhard IV e Lienhard V (2017). Primeiramente, aplica-se a 1ª lei do estado termodinâmico a um volume de controle qualquer. Neste estudo se optou pelo volume de controle esquematizado por Lienhard IV e Lienhard V (2017), conforme Figura 4.1.

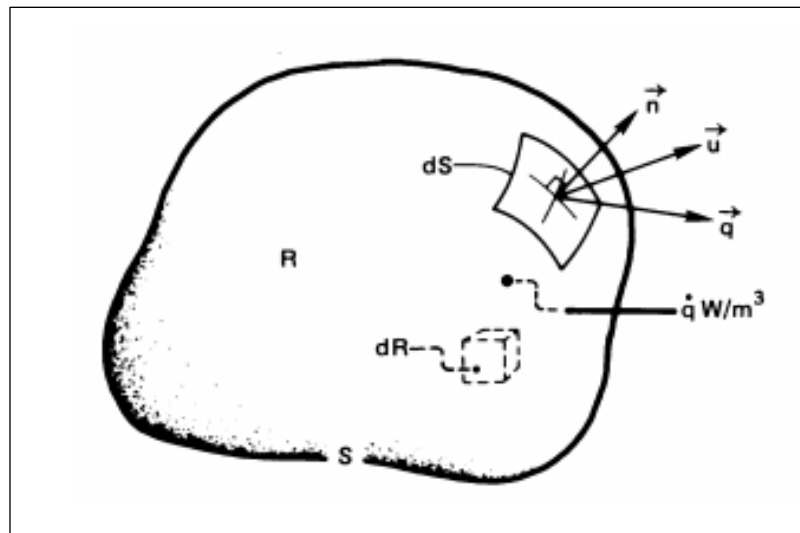


Figura 4.1: volume de controle para aplicação do fluxo de calor.

(Fonte: LIENHARD IV e LIENHARD V, 2017)

Percebe-se pela Figura 4.1 que o volume de controle é uma região finita de um corpo condutor, onde a superfície é chamada de S , o volume de R , o elemento de superfície dS e o elemento de volume dR . Ao elemento de superfície estão associados dois vetores: vetor unitário normal \vec{n} com $|\vec{n}|=1$ e o vetor fluxo de calor \vec{q} (definido nas equações 2.1 e 2.2) em um ponto específico da superfície.

Admite-se que o elemento de volume dR se trata de um sólido sujeito a um campo de temperaturas T e um fluido com um campo de velocidades \vec{v} . Admite-se ainda a possibilidade de uma geração de calor volumétrico interna \dot{q} distribuído em toda região.

Conforme Lienhard IV e Lienhard V (2017), antes de proceder com o balanço de energia, faz-se necessário o prévio conhecimento de conceitos como energia interna específica e entalpia específica de uma substância. Para isso, devem-se considerar as formas microscópicas de energia de uma substância: rotação das moléculas, vibração, translação e todas as interações intramoleculares desta substância. Estas formas microscópicas de energia são englobadas e

chamadas de energia interna (U). A energia interna específica, ou seja, a energia por unidade de massa (J/kg) é chamada de \hat{u} . A partir de premissas embasadas na termodinâmica, as relações expostas nas equações 4.2 e 4.3 podem ser adotadas.

$$\hat{h} = \hat{u} + \frac{P}{\rho} \quad (4.2)$$

$$d\hat{h} = c_p dT + \left(\frac{\partial \hat{h}}{\partial p} \right)_T dp \quad (4.3)$$

Onde:

\hat{h} é entalpia específica [J/kg];

p é a pressão do fluido;

c_p é o calor específico [J/kgK].

À pressão constante é possível afirmar, conforme Lienhard IV e Lienhard V (2017), que pode se negligenciar os efeitos de dp na entalpia, resultando em $d\hat{h} \cong c_p dT$. Essa aproximação é válida para a maioria dos escoamentos de gás e líquidos que se movem com velocidades menores que 1/3 da velocidade do som.

Aplicando o princípio da conservação de energia no volume de controle apresentado na Figura 4.1, chega-se à relação exposta abaixo na equação 4.4.

$$\frac{d}{dt} \int_R \rho \hat{u} dR = - \int_S (\rho \hat{h}) \vec{v} \cdot \vec{n} dS - \int_S (-\lambda \nabla T) \vec{n} dS + \int_R \dot{q} dR \quad (4.4)$$

Na segunda integral, $\vec{v} \cdot \vec{n} dS$ representa a vazão do fluido através do elemento dS da superfície de controle. A posição de R não está mudando com o tempo, o que permite levar a derivada de tempo para dentro da primeira integral. Aplicando o teorema de Gauss para transformar as integrais de superfície para integrais de volume, pode-se reescrever a equação supracitada de acordo com equação 4.5.

$$\int_R \left(\frac{\partial(\rho \hat{u})}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho \vec{v} \hat{h}) - \nabla \cdot \lambda \nabla T - \dot{q} \right) dR = 0 \quad (4.5)$$

Visto que o volume R é arbitrário, para que a equação exposta acima seja verdadeira para qualquer que seja o volume em análise, o seu integrando deve ser igual à zero. Assim, respeita-se a hipótese de um sistema conservativo. Diante desta afirmação, tem-se a equação 4.6.

$$\frac{\partial(\rho\hat{u})}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho\vec{v}\hat{h}) - \nabla \cdot \lambda\nabla^2 T - \dot{q} = 0 \quad (4.6)$$

Utilizando a equação 4.2 e desprezando os efeitos da variação de pressão no fluxo, assumindo a hipótese que a mesma não é suficientemente grande para afetar as propriedades termomecânicas, para a primeira derivada da equação 4.5, tem-se a seguinte relação:

$$d(\rho\hat{u}) = d(\rho\hat{h}) - dp \cong d(\rho\hat{h}) = \rho d\hat{h} + \hat{h}d\rho$$

Introduzindo a relação na equação 4.5 e fazendo as devidas manipulações, chega-se na equação (4.7).

$$\rho \left(\frac{\partial\hat{h}}{\partial t} + \vec{v} \cdot \nabla\hat{h} \right) + \hat{h} \left(\frac{\partial\rho}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho\vec{v}) \right) = \lambda\nabla^2 T + \dot{q} \quad (4.7)$$

Partindo da hipótese apresentada em Lienhard IV e Lienhard V (2017) em que as variações da densidade são pequenas e o fluido que escoar no volume de controle é aproximadamente incompressível, pode-se desprezar o segundo termo da equação 4.5. Ademais, trazendo a dedução realizada no início do item ($d\hat{h} = c_p dT$), tem-se finalmente a equação 4.8.

$$\rho \cdot c \cdot \left(\frac{\partial T}{\partial t} + \vec{v} \cdot \nabla T \right) = \lambda\nabla^2 T + \dot{q} \quad (4.8)$$

Ao final da dedução, observa-se que a equação 4.7 é a mesma apresentada como equação 4.1 no começo do item pela documentação do ANSYS (2016). Uma vez que $\{L\}$ e $\{L\}^T$ podem ser interpretados como operador gradiente e operador divergente respectivamente, conclui-se que as seguintes parcelas são iguais:

$$\begin{aligned} \vec{v} \cdot \nabla T &= \{v\}^T \cdot \{L\} \cdot T \\ \lambda\nabla^2 T &= \{L\}^T \cdot ([D] \cdot \{L\} \cdot T) \end{aligned}$$

De acordo com ANSYS (2016), três tipos de condições de contorno são considerados admitindo que as mesmas sejam aplicáveis a todo o elemento.

a) temperaturas especificadas pelo usuário atuando sobre a superfície S_1 :

$$T = T^* \quad (4.9)$$

Onde:

T^* é a temperatura especificada pelo usuário através do comando D, neste caso a curva de incêndio padrão ISO 834 (2014) [K].

b) fluxo de calor especificado pelo usuário atuando sobre a superfície S_2 :

$$\{q\}^T \{n\} = -q^* \quad (4.10)$$

Onde:

n é o vetor normal saindo do volume de controle como já definido anteriormente;

q^* é o fluxo de calor conhecido, ou seja, especificado pelo usuário.

c) superfície de convecção especificada pelo usuário atuando sobre a superfície S_3

:

$$\{q\}^T \{n\} = \alpha (T_{corpo} - T_{\infty}) \quad (4.11)$$

As variáveis desta condição de contorno já foram definidas no item 2.4.2.

Faz-se possível utilizar a Lei de Fourier exposta no item 2.4.1 pelas equações 2.1 e 2.2, para relacionar as equações 4.10 e 4.11 (vetor fluxo de calor) com o gradiente térmico. Primeiramente, para uma melhor visualização, coloca-se a equação 2.2 na forma matricial:

$$\{q\} = -[D]\{L\}T \quad (4.12)$$

Logo, combinando a equação 4.12 com as equações 4.10 e 4.11, têm-se as equações 4.13 e 4.14 abaixo.

$$\{n\}^T [D] \{L\} T = q^* \quad (4.13)$$

$$\{n\}^T [D] \{L\} T = \alpha (T_{corpo} - T_{\infty}) \quad (4.14)$$

Para finalizar, conforme ANSYS (2016), multiplicando a equação 4.1 por uma alteração virtual de temperatura, integrando sobre o volume do elemento, combinando com as equações 4.13 e 4.14 e fazendo as devidas manipulações matemáticas, tem-se:

$$\int_{vol} \left(\rho \cdot c \cdot \left(\frac{\partial T}{\partial t} + \{v\}^T \cdot \{L\} \cdot T \right) + \{L\}^T \cdot (\delta T) \cdot ([D] \cdot \{L\} \cdot T) \right) \cdot d(vol) = \int_{S_2} \delta T \cdot q^* \cdot d(S_2) + \int_{S_3} \delta T \cdot \alpha (T_{corpo} - T_{\infty}) \cdot d(S_3) + \int_{vol} \delta T \cdot \dot{q} \cdot d(vol) \quad (4.15)$$

Onde:

vol é o volume do elemento;

δT é uma temperatura virtual admissível e compatível com o problema em função das coordenadas cartesianas e do tempo ($= \delta T(x, y, z, t)$).

4.2.1.2 Derivação das matrizes de fluxo de calor

No item 6.2 de *Mechanical APDL Theory Reference* publicado por ANSYS (2016), tem-se a dedução matricial do problema de transferência de calor pelo método dos elementos finitos. Para acompanhar a formulação, ressalta-se que a variável temperatura (T) varia no espaço e no tempo ($T(x, y, z, t)$), como já havia sido definido no item 4.2.1.2. Esta dependência da variável T pode ser representada da seguinte forma:

$$T = \{N\}^t \cdot \{T_e\} \quad (4.16)$$

Onde:

$\{N\} = \{N(x, y, z)\}$ são as funções de forma do elemento, ou seja, funções de interpolação;

$\{T_e\} = \{T_e(t)\}$ é o vetor de temperatura nodal do elemento variando com o tempo.

Assim, derivando a equação 4.16 em relação ao tempo, tem-se:

$$\dot{T} = \frac{\partial T}{\partial t} = \{N\}^t \cdot \{\dot{T}_e\} \quad (4.17)$$

Sendo δT de mesma forma, ou seja, compatível com T :

$$\delta T = \{\delta T_e\}^T \cdot \{N\} \quad (4.18)$$

A combinação $\{L\}T$ pode ser escrita da seguinte forma:

$$\{L\}T = [B] \cdot \{T_e\} \quad (4.19)$$

Onde:

$$[B] = \{L\}\{N\}T \text{ .}$$

Dessa maneira, a forma variacional da equação 4.15 pode ser combinada com as equações 4.16 à 4.19, resultando na equação 4.20.

$$\begin{aligned} & \int_{vol} (\rho \cdot c \cdot \{\delta T_e\}^T \cdot \{N\} \cdot \{N\}^T \cdot \{\dot{T}_e\}) \cdot d(vol) + \int_{vol} (\rho \cdot c \cdot \{\delta T_e\}^T \cdot \{N\} \cdot \{v\}^T \cdot [B] \cdot \{T_e\}) \cdot d(vol) \\ & + \int_{vol} (\{\delta T_e\}^T \cdot [B]^T \cdot [D] \cdot [B] \cdot \{T_e\}) \cdot d(vol) = \int_{S_2} \{\delta T_e\}^T \cdot \{N\} \cdot q^* \cdot d(S_2) \\ & + \int_{S_3} \{\delta T_e\}^T \cdot \{N\} \cdot \alpha (T_\infty - \{N\}^T \cdot \{T_e\}) \cdot d(S_3) + \int_{vol} \{\delta T_e\}^T \cdot \{N\} \cdot \dot{q} \cdot d(vol) \end{aligned} \quad (4.20)$$

Ao ser aplicada a um elemento finito, a equação 4.20, conforme apontado por ANSYS (2016), pode assumir algumas simplificações. A densidade do material se mantém constante em todo o volume do elemento, por outro lado o calor específico e o calor gerado internamente podem variar. Finalmente, $\{T_e\}$, $\{\dot{T}_e\}$ e $\{\delta T_e\}$ são grandezas nodais e não variam no elemento finito, logo podem ser removidas da integral. Visto que todas as parcelas estão sendo multiplicadas por $\{\delta T_e\}$, este termo pode ser excluído da equação resultante.

$$\begin{aligned} & \rho \cdot \int_{vol} c \cdot \{N\} \cdot \{N\}^T \cdot d(vol) \cdot \{\dot{T}_e\} + \rho \cdot \int_{vol} c \cdot \{N\} \cdot \{v\}^T \cdot [B] \cdot d(vol) \cdot \{T_e\} \\ & + \rho \cdot \int_{vol} [B]^T \cdot [D] \cdot [B] \cdot d(vol) \cdot \{T_e\} = \int_{S_2} \{N\} \cdot q^* \cdot d(S_2) \\ & + \int_{S_3} T_\infty \cdot \alpha \cdot \{N\} \cdot d(S_3) - \int_{S_3} \alpha \cdot \{N\} \cdot \{N\}^T \cdot \{T_e\} \cdot d(S_3) + \int_{vol} \dot{q} \cdot \{N\} \cdot d(vol) \end{aligned} \quad (4.21)$$

A equação 4.21 pode ser reescrita na forma matricial:

$$[C_e^t] \cdot \{\dot{T}_e\} + ([K_e^{im}] + [K_e^{ib}] + [K_e^{ic}]) \cdot \{T_e\} = \{Q_e\} + \{Q_e^c\} + \{Q_e^g\} \quad (4.22)$$

Sendo:

$[C_e^t] = \rho \cdot \int_{vol} c \cdot \{N\} \cdot \{N\}^T \cdot d(vol)$ a matriz de calor específico do elemento, geralmente diagonalizada como descrito em *Lumped Matrices ANSYS* (2016);

$[K_e^{tm}] = \rho \cdot \int_{vol} c \cdot \{N\} \cdot \{v\}^T \cdot [B] \cdot d(vol)$ uma matriz não simétrica que representa a condutividade do elemento devido ao transporte de massa (fluxo de calor);

$[K_e^{tb}] = \int_{vol} [B]^T \cdot [D] \cdot [B] \cdot d(vol)$ a matriz de condutividade do elemento devido à difusão térmica;

$[K_e^{tc}] = \int_{S_3} \alpha \cdot \{N\} \cdot \{N\}^T \cdot d(S_3)$ a matriz de condutividade devido à convecção na superfície do elemento. Cabe ressaltar que a matriz só é definida desta forma para o elemento SOLID90, todos os outros elementos da biblioteca interna do ANSYS usam uma matriz diagonal com os termos definidos pelo vetor $\int_{S_3} \alpha \cdot \{N\} \cdot d(S_3)$;

$\{Q_e\} = \int_{S_2} \{N\} \cdot q^* \cdot d(S_2)$ o vetor de fluxo de massa no elemento;

$\{Q_e^c\} = \int_{S_3} T_\infty \cdot \alpha \cdot \{N\} \cdot d(S_3)$ o vetor de fluxo de calor devido à convecção na superfície do elemento;

$\{Q_e^g\} = \int_{vol} \dot{q} \cdot \{N\} \cdot d(vol)$ o calor interno gerado pelo elemento.

ANSYS (2016) ainda aponta uma importante observação, afirmando que se $[C_e^t]$ existe e é diagonalizada, a análise é transiente. Assim, $\{Q_e^g\}$ recebe um ajuste nos seus termos de forma que os mesmos sejam proporcionais aos termos da diagonal principal de $[C_e^t]$. Tal ajuste tem por função assegurar que elementos expostos a um aquecimento uniforme terão um incremento de temperatura também uniforme. Entretanto, este ajuste também altera os dados de entrada não uniformes de geração de calor para um valor médio no elemento.

4.2.2 Radiação

A troca de energia radiante entre superfícies vizinhas de uma região ou entre uma região e seu entorno pode gerar grandes efeitos no problema de transferência de calor. Para a radiação, o

programa oferece quatro tipos diferentes de procedimentos que o usuário pode adotar ANSYS (2016):

- a) o elemento de barra para radiação (LINK31);
- b) elementos de superfície (*surface-effect elements*) com a opção de radiação (SURF151 para modelos bidimensionais ou SURF152 para elementos tridimensionais);
- c) geração de uma matriz de radiação e utilizá-la como um superlemento na análise térmica;
- d) o método da solução da radioatividade.

Para o presente trabalho, tanto para considerar os efeitos da convecção quanto os da radiação, adotou-se o método dos elementos de superfície. Trata-se de um modo conveniente para modelar a radiação entre um ponto, denominado nó extra, e uma superfície. Para utilizá-lo basta atribuir uma temperatura ou uma função de temperatura em relação ao tempo ao nó extra e associar este nó ao elemento de superfície que, por sua vez, está localizado no contorno do modelo. Assim, permite-se que a superfície possa emitir ou receber radiação.

4.2.2.1 Abordagem analítica

Estendendo a lei de Stefan-Boltzman para um sistema de N compartimentos, o balanço de energia para cada superfície de um corpo cinza (veja item 2.4.3) é dado por Siegal e Howell (1988) apud ANSYS (2016) conforme equação 4.23.

$$\sum_{i=1}^N \left(\frac{\delta_{ji}}{\varepsilon_i} - F_{ji} \cdot \frac{1 - \varepsilon_i}{\varepsilon_i} \right) \cdot \frac{1}{A_i} \cdot Q_i = \sum_{i=1}^N (\delta_{ji} - F_{ji}) \cdot \sigma_0 \cdot T_i^4 \quad (4.23)$$

Em que:

N é o número de superfícies radiantes;

δ_{ji} é o delta de Kronecker;

ε_i é a emissividade da superfície i , atribuído ao material através do comando EMIS ou MP;

F_{ji} são os fatores de visada, simplificado com valor unitário neste trabalho;

A_i é a área da superfície i [m^2];

Q_i é a perda de energia da superfície i [W/m^2];

σ_0 é a constante de Stefan-Boltzmann (veja item 2.4.3);

T_i é a temperatura absoluta da superfície i [K].

Para um sistema onde se tem duas superfícies irradiando uma à outra, onde a área A_j é muito maior que A_i (caso em análise, pois está sendo considerada a irradiação entre um nó e uma superfície) e o fator de visada é unitário, a equação 4.23 pode ser simplificada para fornecer a taxa de transferência de calor de maneira similar à equação 2.8 apresentada no item 2.4:

$$Q_i = A_i \cdot \varepsilon_i \cdot \sigma_0 \cdot (T_i^4 - T_j^4) \quad (4.24)$$

Um vetor adicional $\{Q_e^r\}$ correspondente à Q_i é acrescentado à equação 4.22 para considerar os efeitos estabelecidos pela relação entre a superfície e o nó extra para simular os efeitos da radiação.

4.2.3 Elementos finitos utilizados para análise térmica bidimensional

Para a análise térmica bidimensional foram utilizados dois elementos: PLANE55 para modelar o elemento estrutural e SURF151 para simular os efeitos de superfície oriundos da aplicação do carregamento térmico.

O PLANE55 é um elemento finito para resolver problemas de transmissão de calor com capacidade de condução térmica que possui quatro nós com apenas um grau de liberdade associado por nó, a temperatura. O elemento pode ser aplicado tanto em análise de estado plano (*steady state*) quanto em análise térmica transiente.

O SURF151, por sua vez, trata-se um elemento bidimensional de superfície com capacidade de simular o efeito da convecção térmica e da radiação do ambiente para a estrutura. Na análise, utiliza-se o SURF151 sobreposto (nós compartilhados com o elemento subjacente) ao elemento PLANE55. Este elemento é definido por 2 a 5 nós e possui apenas a temperatura como grau de liberdade. As propriedades do material associadas são a densidade e a emissividade. Pode-se utilizar o artifício do nó extra para aplicação da ação térmica, onde a carga térmica (curva de incêndio) é aplicada diretamente no nó extra.

Abaixo na Figura 4.2 e Figura 4.3 estão ilustradas as geometrias, os sistemas de coordenadas e a localização dos nós dos elementos supracitados.

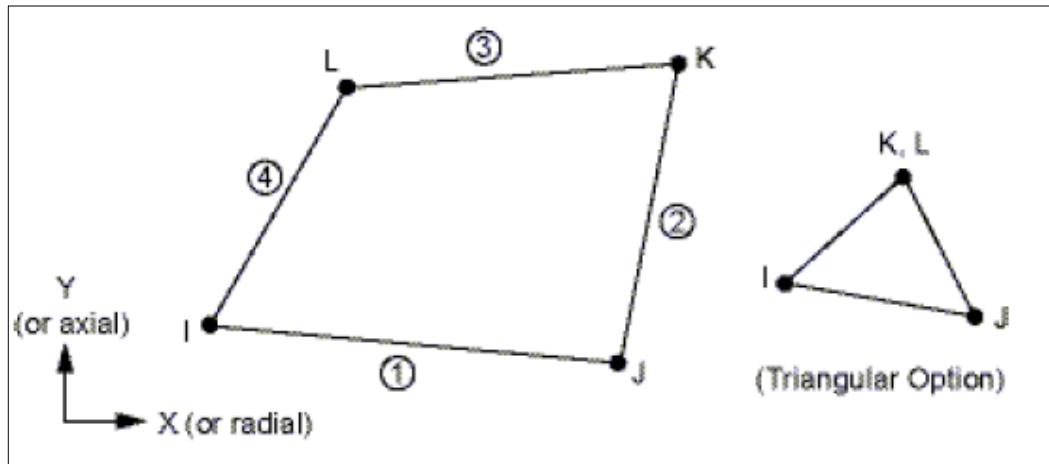


Figura 4.2: elemento PLANE55.

(Fonte: ANSYS, 2016)

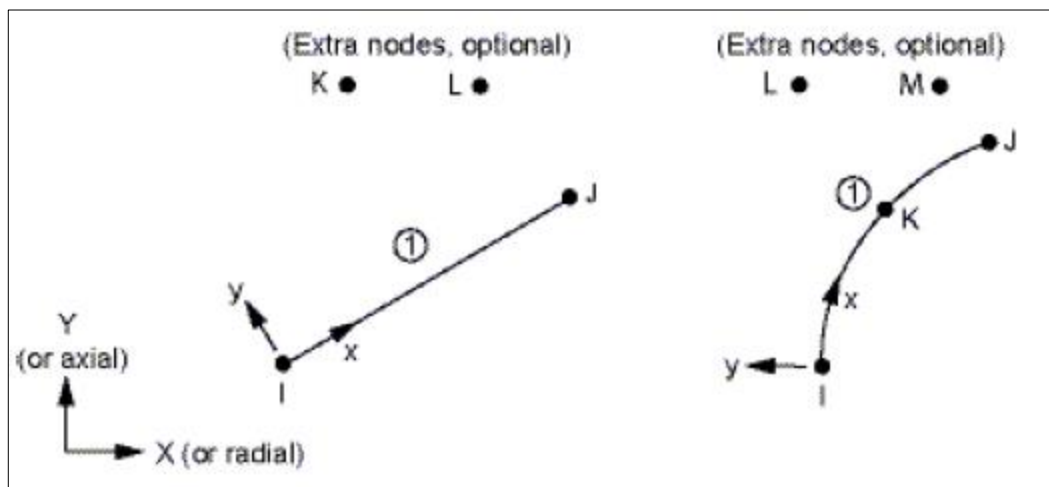


Figura 4.3: elemento SURF151.

(Fonte: ANSYS, 2016)

4.2.4 Elementos finitos utilizados para análise térmica tridimensional

Para a análise térmica tridimensional foram utilizados três elementos: LINK33 para modelar as barras de aço, SOLID70 para modelar o sólido e SURF152 para simular os efeitos de superfície.

O LINK33 é um elemento de barra uniaxial definido apenas por dois nós e pela capacidade de conduzir calor entre eles, o que define a condutividade térmica na direção longitudinal do

elemento. O SOLID70, por sua vez, é um elemento finito de oito nós com capacidade de condução térmica nas três dimensões, o que confere ao elemento aptidão para resolver problemas térmicos tridimensionais. Assim como o PLANE55, o SOLID70 pode ser aplicado tanto em análise de estado plano (*steady state*) quanto em análise térmica transiente, porém tem o adicional de poder ser aplicado em análise 3D.

O SURF152 tem as mesmas características e capacidades citadas na apresentação do elemento SURF151, porém trata-se um elemento aplicável às análises tridimensionais, sobreposto ao elemento sólido na área de interesse. Este elemento é definido por 4 a 10 nós. Também pode ser usado o nó extra para aplicação da ação térmica. Na sequência nas Figuras 4.4, 4.5 e 4.6 estão ilustradas as geometrias, os sistemas de coordenadas e a localização dos nós dos elementos, todos os elementos citados neste item possuem apenas um grau de liberdade associado por nó, a temperatura.

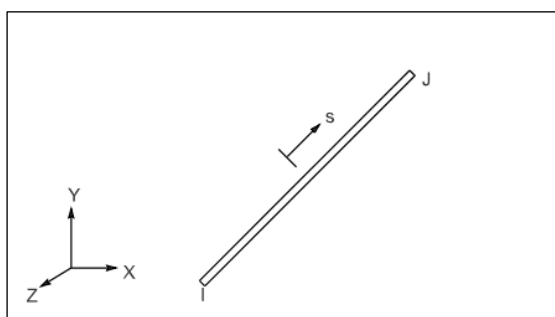


Figura 4.4: elemento LINK33.

(Fonte: ANSYS, 2016)

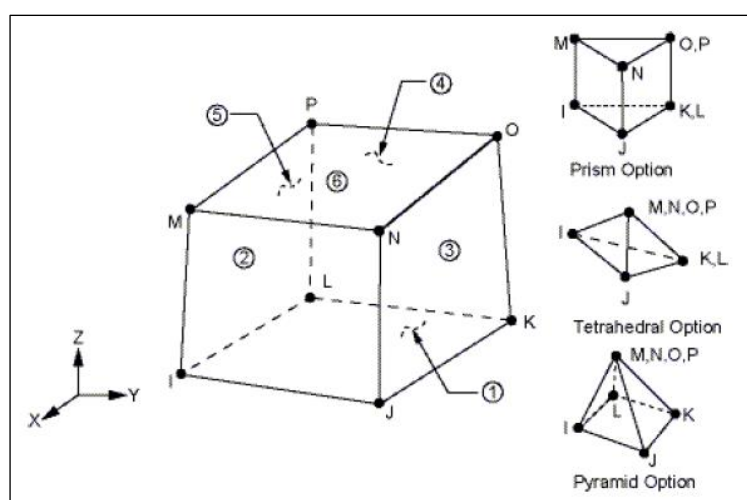


Figura 4.5: elemento SOLID70.

(Fonte: ANSYS, 2016)

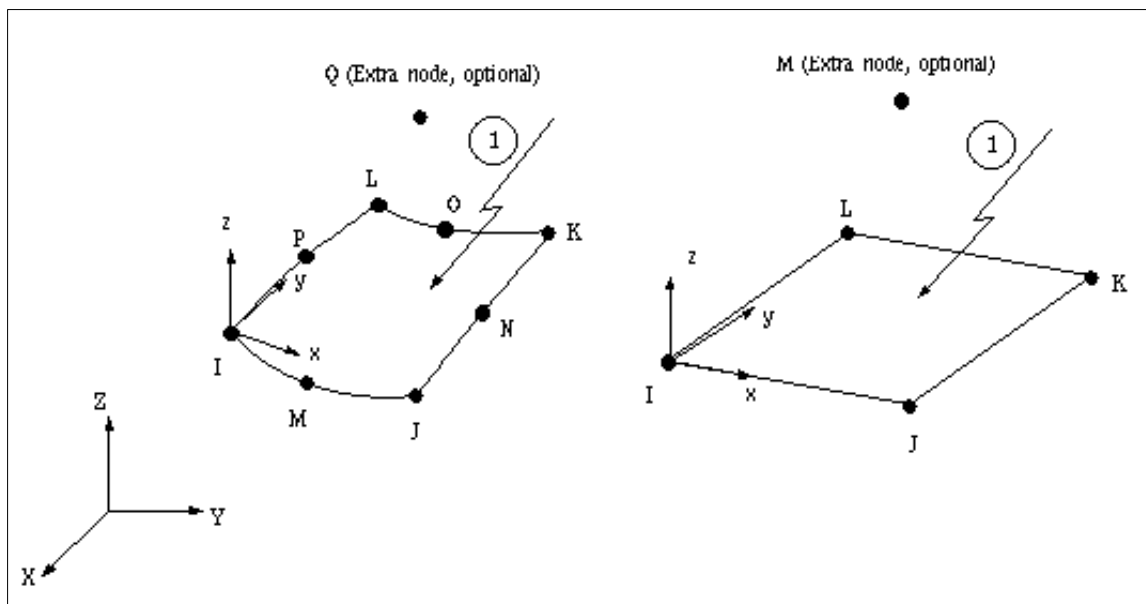


Figura 4.6: elemento SURF152.

(Fonte: ANSYS, 2016)

4.3 ANÁLISE ESTRUTURAL

O ANSYS permite diversos tipos diferentes de análise estrutural como a análise estática, modal, análise dinâmica, transiente, entre outros. O foco do estudo é a análise estática visando, através do modelo numérico, determinar os deslocamentos, deformações e tensões sob carregamento estático.

A análise estática pode ser dada de forma linear ou não linear. Todos os tipos de não linearidades são permitidos pelo ANSYS (grandes deformações, plasticidade, fluência, elementos de contato etc.). No presente trabalho, adota-se a análise não linear, pois se considera tanto o regime não linear do material, através das relações constitutivas apresentadas nos subitens 3.2.2.4 e 3.2.2.4, quanto a não linearidade geométrica.

Conforme explícito no ANSYS (2016) através do *Structural Analysis Guide*, o *software* emprega diversos métodos iterativos para resolver problemas não lineares, no presente estudo o método de Newton-Raphson completo é utilizado (NROPT, FULL). Nesta abordagem, o carregamento é dividido em diferentes passos de carga. Dentro de cada passo de carga, determina-se um número mínimo de subpassos. O programa avalia automaticamente a necessidade de mais subpassos intermediários conforme a dificuldade de convergência

encontrada na solução do problema. Em geral, para problemas puramente mecânicos, utilizou-se o critério de convergência para a norma de deslocamentos e de forças no valor de 0,05.

A Figura 4.7 abaixo ilustra o uso das iterações de equilíbrio do método buscando convergência com a relação não linear entre a força e o deslocamento em uma análise estrutural genérica.

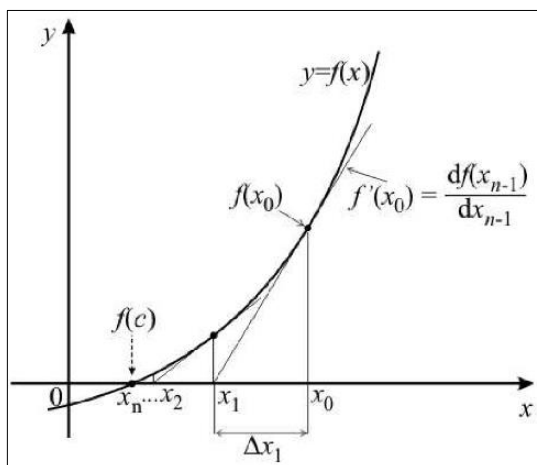


Figura 4.7: representação do método de Newton-Raphson.

Salienta-se que a análise puramente estrutural não é o objetivo principal deste trabalho, todavia para a criação do modelo final, primeiramente se optou por uma análise mais simples realizada em temperatura ambiente. O objetivo da adoção desta estratégia é certificar de maneira mais rápida se os critérios estabelecidos na concepção do modelo possuem um bom funcionamento. Feito isto, pode-se proceder com convicção para a análise estrutural em situação de incêndio.

4.3.1 Abordagem analítica inicial

O equacionamento básico que fundamenta a análise estrutural é dado pela equação 4.24, referente ao regime elástico dos materiais. Para obter as deformações a partir do estado de tensões do material, pode-se inverter a relação de acordo com a equação 4.25.

$$\{\sigma\} = [D] \cdot \{\varepsilon^{el}\} \quad (4.24)$$

$$\{\varepsilon^{el}\} = [D]^{-1} \cdot \{\sigma\} \quad (4.25)$$

Onde:

$\{\sigma\}$ é o vetor de tensões = $[\sigma_x \ \sigma_y \ \sigma_z \ \sigma_{xy} \ \sigma_{yz} \ \sigma_{xz}]^T$;

$[D]$ é a matriz de rigidez elástica;

$[D]^{-1}$ é a matriz de flexibilidade elástica;

$\{\varepsilon^{el}\}$ é o vetor de deformações elásticas = $\{\varepsilon\} - \{\varepsilon^{th}\}$;

$\{\varepsilon\}$ é o vetor de deformações totais = $[\varepsilon_x \ \varepsilon_y \ \varepsilon_z \ \varepsilon_{xy} \ \varepsilon_{yz} \ \varepsilon_{xz}]^T$;

$\{\varepsilon^{th}\}$ é o vetor de deformações térmicas.

A convenção de sinais utilizada pelo ANSYS consiste em sinal negativo para compressão e sinal positivo para tração. Para tensões cisalhantes, define-se positivo quando os dois eixos positivos aplicáveis em faces paralelas giram um em direção ao outro. O vetor de tensões pode ser visualizado graficamente na Figura 4.8.

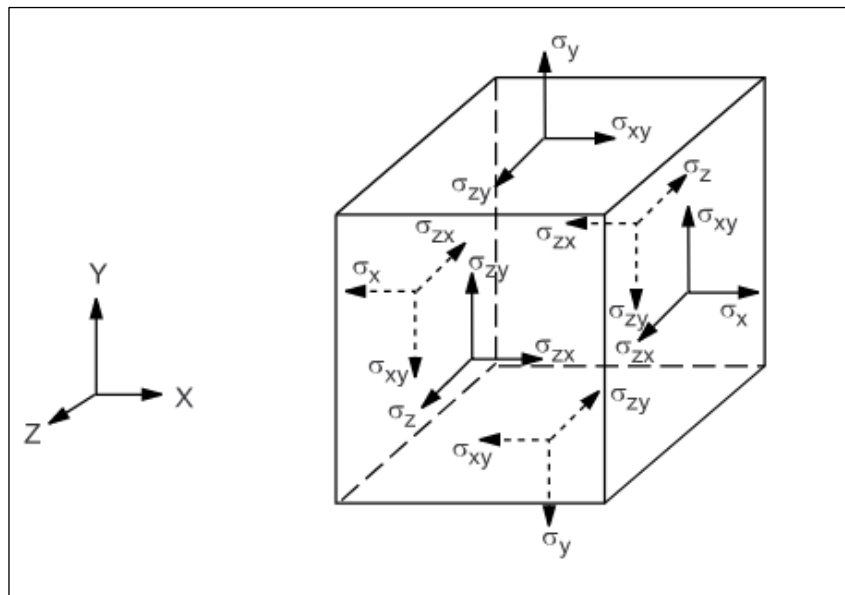


Figura 4.8: definição do vetor de tensões.

(Fonte: ANSYS, 2016)

A matriz de flexibilidade elástica $[D]^{-1}$ é definida pela equação 4.26.

$$[D]^{-1} = \begin{bmatrix} 1/E_x & -\nu_{xy}/E_x & -\nu_{xz}/E_x & 0 & 0 & 0 \\ -\nu_{yx}/E_y & 1/E_y & -\nu_{yz}/E_y & 0 & 0 & 0 \\ -\nu_{zx}/E_z & -\nu_{zy}/E_z & 1/E_z & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1/G_{xy} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 1/G_{yz} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1/G_{xz} \end{bmatrix} \quad (4.26)$$

Em que:

E_x é módulo de elasticidade do material ou módulo de Young na direção x [MPa];

ν_{xy} é o coeficiente de Poisson no plano xy;

$G_{xy} = \frac{E_x}{2 \cdot (1 + \nu_{xy})}$ é módulo cisalhante no plano xy [MPa].

Os parâmetros explícitos acima são considerados iguais em todas as direções, pois no presente estudo assume-se que os materiais apresentam comportamento isotrópico.

Para considerar o regime não linear (inelástico), o ANSYS adiciona o vetor de deformações plásticas $\{\varepsilon^{pl}\}$ aos vetores de deformações totais $\{\varepsilon\}$, veja equação 4.27 abaixo.

$$\{\varepsilon\} = \{\varepsilon^{el}\} + \{\varepsilon^{pl}\} + \{\varepsilon^{th}\} \quad (4.27)$$

Tratando-se de uma análise estrutural em temperatura ambiente, o vetor de deformações térmicas é nulo, logo a deformação total da estrutura analisada se refere somente as deformações elásticas e plásticas. No item 4.4, está exposta a forma de obtenção das deformações oriundas da expansão térmica dos materiais.

4.3.2 Derivação das matrizes estruturais

De acordo com o apontado por ANSYS (2016), o princípio do trabalho virtual define que uma pequena mudança virtual na energia de deformação (trabalho interno) deve ser compensada com uma mudança idêntica no trabalho externo devido ao carregamento aplicado, conforme resumido pela equação 4.28.

$$\delta U = \delta V \quad (4.28)$$

Onde:

U é o trabalho interno = $U_1 + U_2$;

V é o trabalho externo = $V_1 + V_2 + V_3$;

δ é o operador virtual.

A energia de deformação virtual pode ser representada por:

$$\delta U_1 = \int_{vol} \{\delta \varepsilon\} \cdot \{\delta \sigma\} \cdot d(vol)^T \quad (4.29)$$

Dando seguimento à derivação e assumindo o comportamento linear dos materiais e da geometria, as equações 4.28 e 4.29 podem ser combinadas dando origem à seguinte relação:

$$\delta U_1 = \left(\int_{vol} \{\delta \varepsilon\}^T \cdot [D] \cdot \{\varepsilon\} - \{\delta \varepsilon\}^T \cdot [D] \cdot \{\varepsilon^{th}\} \right) d(vol) \quad (4.30)$$

As deformações estão relacionadas com os deslocamentos nodais conforme equação 4.31.

$$\{\varepsilon\} = [B] \cdot \{u\} \quad (4.31)$$

Em que:

$[B]$ é a matriz deformação-deslocamento, baseada nas funções de forma dos elementos que podem ser consultadas para cada elemento no *Mechanical APDL Theory Reference* do ANSYS (2016);

$\{u\}$ é o vetor de deslocamento nodal.

Combinando as equações 4.30 e 4.31 e assumindo que os deslocamentos não variam dentro do volume de controle, tem-se a equação 4.32.

$$\delta U_1 = \{\delta u\}^T \cdot \int_{vol} [B]^T \cdot [D] \cdot [B] \cdot d(vol) \cdot \{u\} - \{\delta u\}^T \cdot \int_{vol} [B]^T \cdot [D] \cdot \{\varepsilon^{th}\} \cdot d(vol) \quad (4.32)$$

A outra parcela de trabalho interno virtual é dada quando uma superfície se move em direção à uma resistência distribuída. Podendo ser equacionado da seguinte maneira:

$$\delta U_2 = \int_{area_f} \{\delta w_n\}^T \cdot \{\sigma_s\} \cdot d(area_f) \quad (4.33)$$

Em que:

$\{w_n\}$ é o vetor referente ao movimento normal à superfície;

$\{\sigma_s\}$ é o vetor referente à tensão na superfície;

$area_f$ é a área de resistência distribuída.

O movimento normal à superfície está relacionado com os deslocamentos nodais conforme equação 4.34. O vetor $\{\sigma_s\}$ é definido conforme equação 4.35.

$$\{w_n\} = [N_n] \cdot \{u\} \quad (4.34)$$

$$\{\sigma_s\} = k \cdot \{w_n\} \quad (4.35)$$

Sendo:

$[N_n]$ a matriz de funções de forma para movimentos normais à superfície;

k é a resistência distribuída em unidades de força por comprimento por unidade de área.

Combinando as equações 4.33, 4.34 e 4.35 e assumindo que k é constante em toda área, tem-se:

$$\delta U_2 = \{\delta u\}^{Tk} \cdot \int_{area_f} [N_n]^T \cdot [N_n] \cdot d(area_f) \cdot \{u\} \quad (4.36)$$

O próximo passo é determinar o lado direito da igualdade da equação 4.28, onde o trabalho virtual externo será considerado. Primeiramente, serão apontados os efeitos inerciais:

$$\delta V_1 = - \int_{vol} \{\delta w\}^T \cdot \frac{\{F^a\}}{vol} \cdot d(vol) \quad (4.37)$$

Em que:

$\{w\}$ é o vetor de deslocamentos de um ponto genérico interno do elemento;

$\{F^a\}$ é o vetor de forças de aceleração.

De acordo com a segunda lei de Newton:

$$\frac{\{F^a\}}{vol} = \rho \cdot \frac{\partial^2}{\partial t^2} \cdot \{w\} \quad (4.38)$$

Onde:

ρ é a densidade do material [kg/m³];

t é o tempo [seg.].

Os deslocamentos de um ponto genérico interno ao elemento estão relacionados com os deslocamentos nodais conforme equação 4.39.

$$\{w\} = [N] \cdot \{u\} \quad (4.39)$$

Sendo:

$[N]$ é uma matriz de funções de forma;

Combinando as equações 4.37, 4.38 e 4.39 e assumindo que ρ é constante em todo volume de controle, tem-se:

$$\delta V_1 = -\{\delta u\}^T \cdot \rho \cdot \int_{vol} [N]^T \cdot [N] \cdot d(vol) \cdot \frac{\delta^2}{\delta t^2} \cdot \{u\} \quad (4.40)$$

A formulação do vetor de forças de pressão começa com:

$$\delta V_2 = \int_{area_p} \{\delta w_n\}^T \cdot \{P\} \cdot d(area_p) \quad (4.41)$$

Onde:

$\{P\}$ é o vetor de pressão aplicada à área;

$area_p$ é área em que a pressão é aplicada.

Combinando as equações 4.39 e 4.41:

$$\delta V_2 = \{\delta u\}^T \int_{area_p} [N_n]^T \cdot \{P\} \cdot d(area_p) \quad (4.42)$$

As forças nodais aplicadas aos elementos $\{F_e^{nd}\}$ são consideradas conforme equação 4.43.

$$\delta V_3 = \{\delta u\}^T \cdot \{F_e^{nd}\} \quad (4.43)$$

Finalmente, pegando a equação 4.28 e substituindo os termos pelas relações estabelecidas nas equações 4.32, 4.36, 4.40, 4.42 e 4.43, tem-se:

$$\begin{aligned} & \{\delta u\}^T \cdot \int_{vol} [B]^T \cdot [D] \cdot [B] \cdot d(vol) \cdot \{u\} - \{\delta u\}^T \cdot \int_{vol} [B]^T \cdot [D] \cdot \{\varepsilon^{th}\} \cdot d(vol) \\ & + \{\delta u\}^{Tk} \cdot \int_{area_f} [N_n]^T \cdot [N_n] \cdot d(area_f) \cdot \{u\} = -\{\delta u\}^T \cdot \rho \cdot \int_{vol} [N]^T \cdot [N] \cdot d(vol) \cdot \frac{\delta^2}{\delta t^2} \cdot \{u\} \\ & + \left(\{\delta u\}^T \int_{area_p} [N_n]^T \cdot \{P\} \cdot d(area_p) \right) + \{\delta u\}^T \cdot \{F_e^{nd}\} \end{aligned} \quad (4.44)$$

Observa-se que o termo $\{\delta u\}^T$ é um conjunto de deslocamentos virtuais arbitrários comum à todos os termos, logo a equação 4.44 pode ser reduzida e reescrita conforme a seguinte equação de equilíbrio:

$$\left([K_e] + [K_e^f] \right) \cdot \{u\} - \{F_e^{th}\} = [M_e] \cdot \{\ddot{u}\} + \{F_e^{pr}\} + \{F_e^{nd}\} \quad (4.45)$$

Sendo:

$[K_e] = \int_{vol} [B]^T \cdot [D] \cdot [B] \cdot d(vol)$ a matriz de rigidez do elemento;

$[K_e^f] = k \cdot \int_{area_f} [N_n]^T \cdot [N_n] \cdot d(area_f)$ a matriz de rigidez do elemento referente à $area_f$ anteriormente definida;

$\{F_e^{th}\} = \int_{vol} [B]^T \cdot [D] \cdot \{\varepsilon^{th}\} \cdot d(vol)$ o vetor referente ao carregamento térmico aplicado ao elemento;

$[M_e] = \rho \cdot \int_{vol} [N]^T \cdot [N] \cdot d(vol)$ a matriz de massa do elemento;

$\{\ddot{u}\} = \frac{\delta^2}{\delta t^2} \cdot \{u\}$ vetor referente à aceleração para considerar, por exemplo, os efeitos da gravidade;

$\{F_e^{pr}\} = \int_{area_p} [N_n]^T \cdot \{P\} \cdot d(area_p)$ o vetor referente à pressão aplicada ao elemento.

4.3.3 Elementos finitos utilizados para análise estrutural tridimensional

Para a análise estrutural tridimensional foi utilizado o elemento SOLID65 para modelar o elemento sólido principal, ou seja, o concreto. O SOLID65 é um elemento finito estrutural que pode ser modelado com ou sem armadura, pois permite a presença de mais de um material por elemento, sendo um material considerado como matriz (concreto) e o restante como materiais de reforço (aço). O elemento SOLID65 possui oito nós com três graus de liberdade associado por nó: translação nos eixos x, y e z (UX, UY e UZ). Em conformidade com ANSYS (2016), o aspecto mais importante do elemento é a capacidade de considerar o regime não linear dos materiais. Incluindo a fissuração em situação de tração, o esmagamento em situação de compressão, deformações plásticas e fluência.

O comportamento não linear do concreto representado pelo elemento SOLID65 é dado pela matriz de rigidez do elemento que varia para situações em que há fissuração do concreto, seja em uma, duas ou três direções. Além disso, a matriz de rigidez depende do estado das fissuras, isto é, se elas estão abertas ou fechadas. Estas definições estão expostas no próximo item que busca detalhar o modelo utilizado para a representação do concreto. Maiores informações sobre o elemento SOLID65 podem ser consultadas em Willam e Warnke (1975), Wilson et al. (1973) e Taylor et al. (1976).

A armadura será representada de maneira discreta usando o elemento LINK180, para assegurar o comportamento associado do elemento de barra com o elemento sólido, deve-se atentar ao criar a malha de maneira que permita a coincidência entre os nós dos elementos. O elemento finito LINK180 é um elemento de barra utilizado para modelagens tridimensionais. Com apenas

dois nós, é um elemento uniaxial que admite apenas esforços de tração e compressão e possui três graus de liberdade por nó: translação nas direções x , y e z . Plasticidade, fluência, rotação, grandes deformações e capacidade de resistir grandes tensões estão inclusas. Importante ressaltar que a área da seção não é atribuída como constante real (modo comum para a maioria dos elementos de barra), mas sim definida através dos comandos SECTYPE e SECDATA. Maiores informações sobre o elemento LINK180 podem ser consultadas em Cook et al. (1991).

Na Figura 4.9 e Figura 4.10, apresenta-se a geometria, o sistema de coordenadas e a localização dos nós do elemento supracitado.

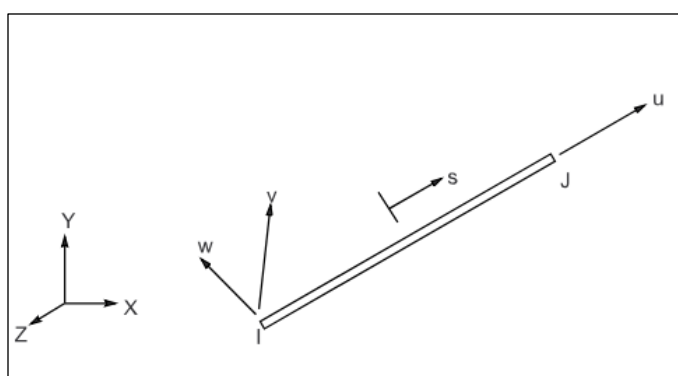


Figura 4.9: elemento LINK180.

(Fonte: ANSYS, 2016)

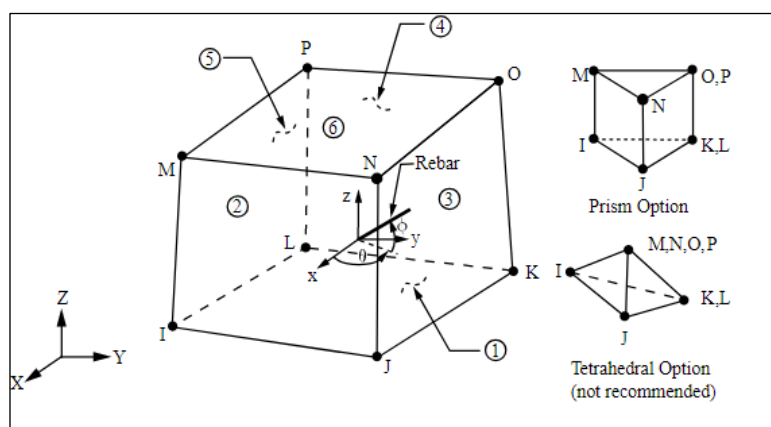


Figura 4.10: elemento SOLID65.

(Fonte: ANSYS, 2016)

4.3.4 Modelo Willam e Warnke para o comportamento do concreto

O modelo do material prevê a falha do concreto considerando os efeitos de fissuração e esmagamento ANSYS (2016). Estes fenômenos implicam em uma significativa perda de resistência da peça estrutural, levando-a a ruptura. No modelo numérico desenvolvido com o ANSYS 19.1, através do elemento SOLID65, conforme ANSYS (2016), pode-se atribuir a envoltória de ruptura proposta por Willam e Warnke (1975). A envoltória tem por objetivo considerar os efeitos do esmagamento e da fissuração do concreto, desempenhando um papel fundamental para definir o comportamento do mesmo. O critério de falha para um estado multiaxial de tensões é estabelecido conforme equação 4.46.

$$\frac{F}{f_c} - s \geq 0 \quad (4.46)$$

Onde:

F é uma função determinada conforme a tensão principal;

f_c é a resistência à compressão uniaxial do concreto [MPa];

S é a superfície contínua de falha.

Para definição da superfície de falha, cinco parâmetros são necessários: resistência à compressão uniaxial, resistência à tração uniaxial (f_t), resistência à compressão biaxial (f_{cb}) e a resistência última à compressão sobreposta no estado de tensão hidrostática (f_1 e f_2). As magnitudes relativas às tensões principais no plano octaédrico são definidas usando ângulo de similaridade (γ) e parâmetros r_1 e r_2 , conforme exposto na Figura 4.11. A envoltória de falha tridimensional resultante do estado de tensão principal é apresentada na Figura 6 e a formulação matemática detalhada pode ser consultada em Willam e Warnke (1975).

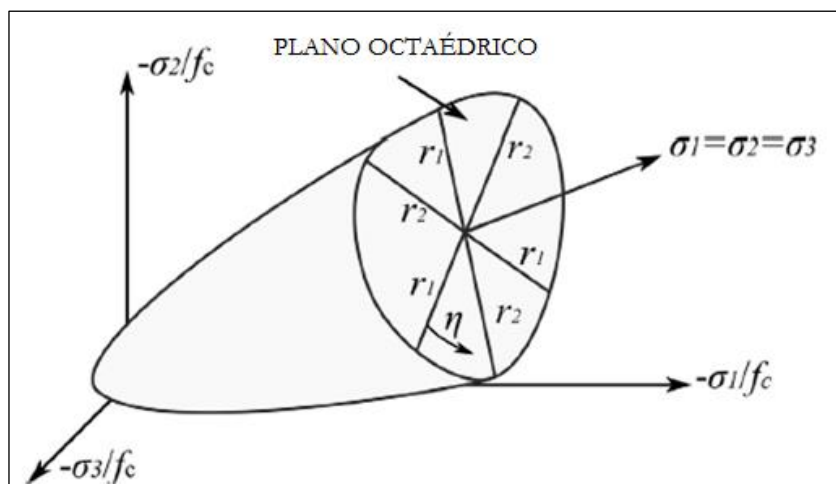


Figura 4.11: envoltória de falha tridimensional (σ_1 , σ_2 e σ_3 são as tensões principais).

(Adaptado de Kumar e Kodur, 2017)

Conforme ANSYS (2016), tem-se a possibilidade de fornecer somente dois inputs (f_t e f_c) para o cálculo da envoltória de falha caso não se disponha de dados experimentais suficientes. Os demais parâmetros são determinados conforme relações padrões do *software*: $f_{cb}=1,2f_c$, $f_1=1,45f_c$ e $f_2=1,725f_c$.

Para o caso em que houver a fissuração de um elemento, um plano de fraqueza é introduzido perpendicular ao plano de tensão principal de tração que esteja satisfazendo o critério. Para incorporar ao cálculo a redução de rigidez do elemento devido às fissuras, parâmetros adicionais são necessários. Tais parâmetros consistem em fatores de redução de transferência de tensão cisalhante para o caso de fissuras abertas (β_t) e fechadas (β_c). Os valores variam entre 0 e 1, sendo 0 representando perda completa de transferência de tensão (*smooth crack*) e 1 representando transferência integral de tensão (*rough crack*). Para o presente trabalho, assim como em Kumar e Kodur (2017), os valores de 0,53 e 0,98 para fissuras abertas e fechadas foram adotados.

A documentação do ANSYS salienta a dificuldade de convergência da solução para os casos em que a fissuração e o esmagamento do concreto são simultaneamente considerados. Assim, permita-se que seja feita a adoção de apenas um modo de falha, atribuindo o valor de -1 para o qual se pretende desconsiderar. Embasado nesta afirmação e na experiência adquirida com as

análises realizadas durante o desenvolvimento do trabalho, optou-se por considerar apenas a fissuração do concreto através do modelo Willam e Warnke (1975).

O esmagamento, por sua vez, está relacionado com a capacidade resistente do concreto imposta no diagrama tensão-deformação do material definido no item 3.2.2.4. Logo, considera-se o esmagamento do concreto quando o elemento não resistir mais ao estado de tensões originado a partir do carregamento mecânico e térmico.

4.4 ANÁLISE ACOPLADA

Através do ANSYS é possível realizar diversas análises acopladas. Estas análises, conforme exposto em ANSYS (2016) através do *Coupled-Field analysis guide*, definem-se por uma combinação entre diferentes áreas que, interagindo entre si, promovem a solução de problemas globais de engenharia. Este tipo de análise se faz necessário quando os dados de entrada em uma determinada análise dependem dos resultados de outra.

Em concordância com os trabalhos publicados por Silva et al. (2013) e Zang et al. (2016), pode-se concluir que a análise acoplada pode ser feita de dois métodos: método direto e método da transferência de carregamento (método sequencial). O método direto faz as duas análises simultaneamente para problemas que precisam de interações entre os campos enquanto o método sequencial faz as análises de forma independente uma da outra.

A análise termoestrutural, que é a de interesse no presente trabalho, consiste na combinação dos efeitos térmicos e mecânicos. Para este caso, a análise é chamada de unidirecional e não se faz necessário um processo iterativo entre as soluções dos dois campos de estudo. Isto porque, segundo Silva et al. (2013), a variação da temperatura causa deformações na estrutura, mas geralmente estas deformações não causam uma redistribuição no gradiente térmico da mesma.

Sendo assim, seguindo estratégia adotada por Wang (2002) e por diversos outros autores em trabalhos posteriores, o método sequencial é o adotado no presente trabalho. Todos os detalhes da metodologia criada para análise estrutural apresentada no item 4.3 são mantidos, o que difere na análise acoplada é que, através do comando LREAD, utiliza-se os *outputs* (temperaturas nodais) da análise térmica como *inputs* na análise estrutural. As temperaturas nodais são aplicadas como cargas nos nós (*body forces*). Um fluxograma ilustrando os passos desta análise pode ser observado na Figura 4.12.

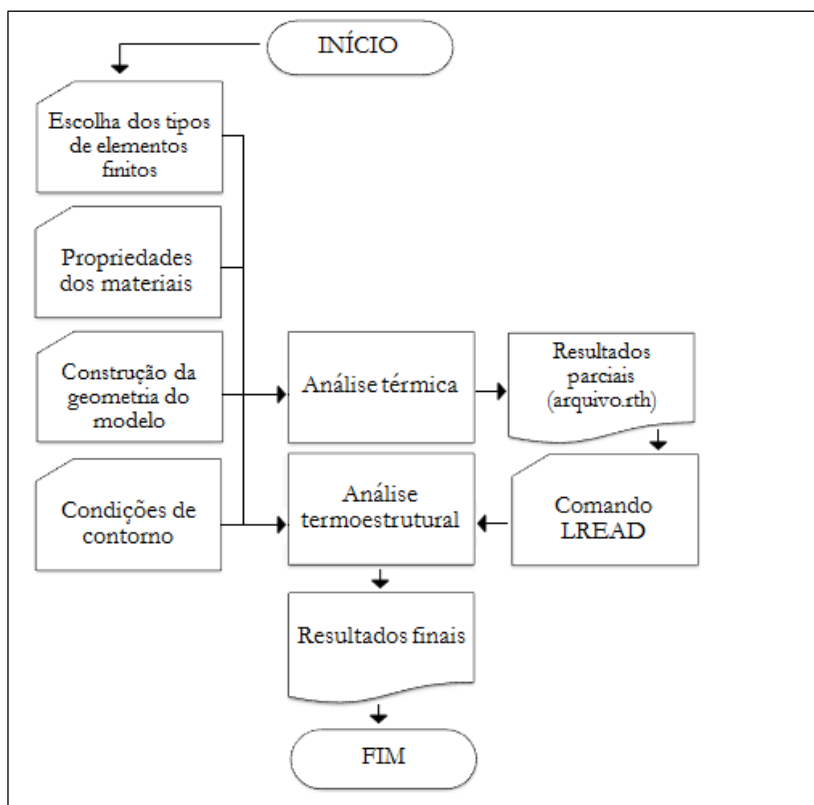


Figura 4.12: fluxograma da análise acoplada pelo método sequencial.

(Fonte: Elaborada pelo autor)

Para possibilitar o acoplamento das análises, a malha da segunda análise (neste caso a termomecânica) deve ser idêntica à malha definida no primeiro processo (térmico). Desta maneira, assegurasse-se a correta imposição dos dados de entrada em cada nó do modelo. A malha utilizada para análise foi feita manualmente, dividindo a região transversal do cobrimento e do núcleo de concreto de maneira que o maior lado do elemento não exceda 1 cm. O refinamento de malha, bem como suas condições de contorno para cada simulação se encontram individualmente expostos nos itens 5 e 6 onde os modelos numéricos criados são apresentados.

Conforme mencionado no item 4.3, em situações onde há variação de temperatura, o vetor de deformações térmicas $\{\varepsilon^{th}\}$ possui valor não nulo e altera o vetor de deformações totais devido ao alongamento dos materiais. O vetor de deformações térmicas é dado pela equação 4.47 abaixo.

$$\{\varepsilon^{th}\} = \alpha^{se}(T) \cdot (T - T_{ref}) \quad (4.47)$$

Onde:

$\alpha^{se}(T)$ é o coeficiente da deformação térmica secante em função da temperatura [adimensional];

A maneira estabelecida no presente estudo para entrar com as informações da deformação térmica foi dada através da propriedade do material definida pelo *software* por THSX. Os valores de alongamento relativo do concreto e do aço foram apresentados nos itens 3.2.1.1 e 3.1.1.1 respectivamente. O ANSYS assume esses dados de entrada como *input thermal strains* ($\varepsilon^{ith}(T)$) e define o valor de $\alpha^{se}(T)$ conforme equação 4.48.

$$\alpha^{se}(T) = \frac{\varepsilon^{ith}(T)}{(T - T_{ref})} \quad (4.48)$$

Logo, o vetor de deformações térmicas é constituído simplesmente pelos dados de entrada referente aos valores de alongamento relativo.

Para concluir as considerações sobre a análise acoplada, ressalta-se que os elementos da análise estrutural precisam ser compatíveis com os elementos adotados para a análise térmica. Isto justifica os elementos escolhidos e apresentados nos itens 4.2 e 4.3.

5 ASPECTOS E VALIDAÇÃO DA MODELAGEM NUMÉRICA

O capítulo 5 consiste na exposição dos modelos numéricos criados conforme experimentos encontrados na bibliografia. O objetivo é validar a estratégia adotada e descrita ao longo da dissertação. De acordo com o mencionado no item 4.3, antes de concluir o modelo final termomecânico, optou-se por proceder de uma forma progressiva. Começando por situações menos complexas até chegar ao objetivo final com a modelagem numérica.

Estas análises iniciais são utilizadas como referências para a criação de um modelo consistente, pois, por possuir um número reduzido de variáveis (em comparação com o modelo acoplado), a verificação do bom funcionamento dos aspectos adotados é facilitada. Com isso, análises simplificadas como a análise térmica bidimensional (2D) e a análise estrutural em temperatura ambiente são apresentadas neste item. Ademais, validações referentes à análise térmica tridimensional e à análise termoestrutural também estão descritas.

5.1 ANÁLISE TÉRMICA BIDIMENSIONAL

Para fins de validação da estratégia térmica, adotaram-se seções transversais das vigas expostas no Anexo A do EN 1992-1-2 (2004). Ressalta-se que, por se tratar de uma análise bidimensional, a presença das barras de aço foi desprezada, resultando em análises simplificadas de seções em concreto simples. Foram analisadas duas seções retangulares distintas com dimensões 16x30 cm e 30x60 cm, cada seção foi exposta a três diferentes tempos de incêndio. No próximo subitem serão detalhados os aspectos do modelo numérico, a forma de implementá-los utilizando o ANSYS pode ser consultada em um *script* referente à seção de 16x30cm elaborado em linguagem APDL exposto no apêndice A.1 deste trabalho. Para o outro exemplo de seção analisada neste item, utiliza-se o mesmo *script* adequando os dados de entrada.

5.1.1 Aspectos do modelo numérico

Conforme o Anexo A do EN 1992-1-2 (2004), os aspectos do modelo numérico que devem ser considerados para proceder com a análise são:

- a) escolha dos elementos finitos: PLANE55 e SURF151, os elementos estão apresentados no item 4.2.3;

- b) definição da malha: dimensão de 2x2 cm uniforme à toda seção;
- c) determinação das condições de contorno: aplicou-se, ao nó extra do elemento SURF151, a curva padrão de incêndio ISO 834 (2014) conforme equação 2.12 exposta no item 2.6.3. Cabe salientar que as vigas foram expostas ao incêndio padrão em todas as suas faces, exceto a face superior;
- d) massa específica: conforme equação 3.19 admitindo a massa específica do concreto simples em temperatura ambiente de 2400 kg/m³;
- e) condutividade térmica: atribuiu-se como propriedade do material o limite inferior apresentado no item 3.2.1.3;
- f) calor específico: foi adotado conforme apresentado no item 3.1.1.2 para concretos com teor de umidade de 1,5%;
- g) coeficiente de transferência de calor por convecção: 25 W/(m².k);
- h) emissividade resultante: adotou-se o valor fixo de 0,7 (EN 1992-1-2:2004);
- i) constante de Stefan-Boltzmann: $5,6704 \cdot 10^{-8}$ W/(m². K⁴);
- j) condições de contorno: aplicou-se, ao nó extra do elemento SURF151, a curva padrão de incêndio ISO 834 (2014) conforme equação 2.12 exposta no item 2.6.3. Somente a linha superior da seção transversal não foi exposta ao incêndio, sendo considerada adiabática. As análises puramente térmicas dispensam a utilização de vinculação para restringir os movimentos de corpo rígido da estrutura;
- k) opções de solução: foi utilizado o método explícito *default* para resolver as equações diferenciais do problema (TRNOPT, FULL). A seção transversal foi submetida a um tempo de incêndio variável de acordo com o tempo analisado pelo Anexo A do EN 1992-1-2 (2004). Todo o tempo de incêndio foi aplicado em apenas 1 passo de carga. O critério de tolerância para convergência adotado para temperatura (CNVTOL, TEMP) foi de 1% da norma do vetor.

5.1.2 Resultados da validação

Na Figura 5.1 abaixo, apresenta-se a distribuição da temperatura para uma seção transversal de uma viga em concreto simples com dimensões 16 cm x 30 cm exposta à curva padrão de incêndio por 90 minutos. Faz-se possível, através da Figura 5.1(a), visualizar de forma gráfica os resultados obtidos pelo ANSYS. Já na Figura 5.1(b), pode-se observar como a norma europeia apresenta os seus resultados, observa-se que a mesma oferece somente um quarto da seção, partindo do pressuposto que para o quarto superior da seção as linhas das isoterma permanecem retilíneas e os outros dois quartos são definidos de maneira simétrica.

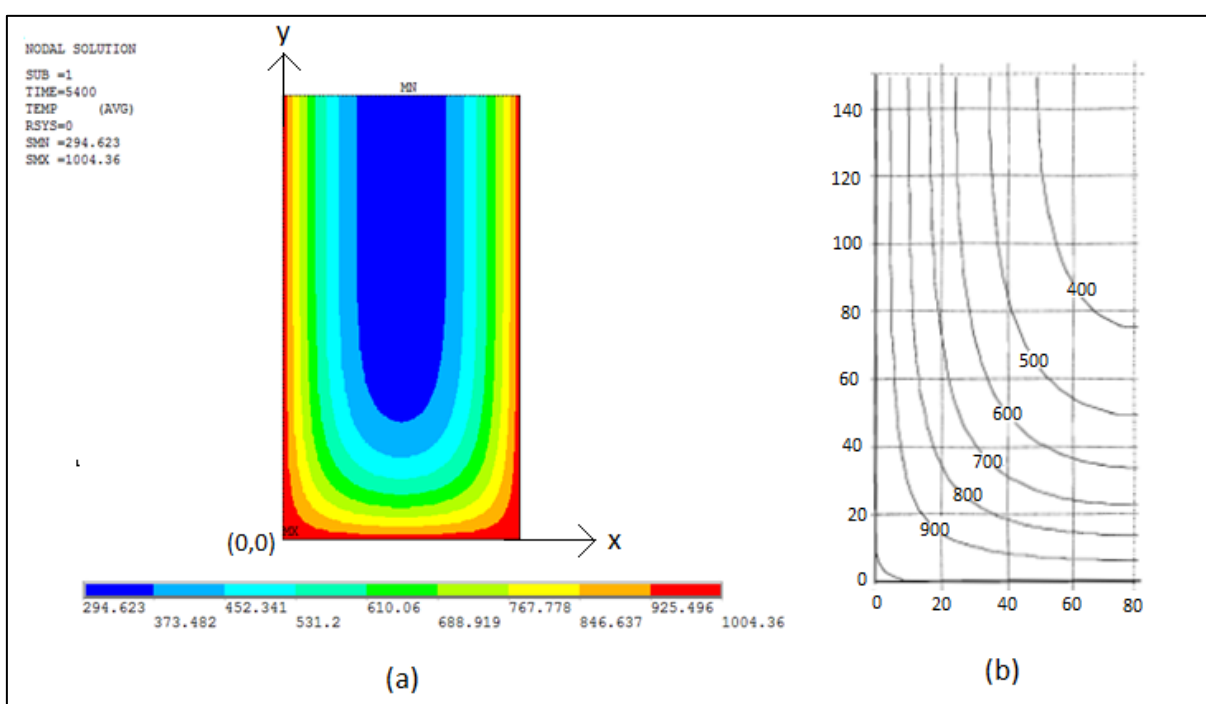


Figura 5.1: distribuição de temperatura para uma seção de dimensões de 16x30 cm de concreto simples exposta a um incêndio de 90 min (a) pelo ANSYS (b) Figura A.5 extraída de EN 1992-1-2 (2004).

(Fonte: Elaborada pelo autor)

Na Tabela 5.1 estão expostas as dimensões das vigas analisadas, os resultados obtidos com o modelo criado, bem como a comparação da distribuição térmica em alguns pontos específicos com os valores extraídos de EN 1992-1-2 (2004). Salienta-se que os pontos de análises são definidos pelos afastamentos em x e y a partir da face exposta ao incêndio, o sistema local de coordenadas para análise dos pontos pode ser verificado na Figura 5.1(a).

Tabela 5.1: comparação da distribuição de térmica.

Incêndio padrão [min]	Dimensões da viga		Pontos de análise		Temperatura [°C]		Erro [%]
	b [cm] eixo x	h [cm] eixo y	Afastamento em x [cm]	Afastamento em y [cm]	EN 1992-1-2 (2004)	ANSYS	
30	16	30	2	2	550	512,27	6,86
30	16	30	2	4	420	401,20	4,48
30	16	30	4	4	280	247,59	11,58
30	16	30	6	6	130	115,49	11,16
60	16	30	2	2	750	735,74	1,90
60	16	30	2	4	650	629,36	3,18
60	16	30	4	4	500	474,62	5,08
60	16	30	6	6	320	301,51	5,78
90	16	30	2	2	860	853,23	0,79
90	16	30	2	4	780	763,13	2,16
90	16	30	4	4	650	626,33	3,64
90	16	30	6	6	480	455,50	5,10
60	30	60	2	2	750	734,05	2,13
60	30	60	2	4	650	626,37	3,64
60	30	60	4	4	490	466,55	4,79
60	30	60	6	6	280	276,29	1,32
90	30	60	2	2	850	848,32	0,20
90	30	60	2	4	780	754,24	3,30
120	30	60	2	2	920	922,37	0,26
120	30	60	2	4	850	840,16	1,16
120	30	60	4	4	700	705,03	0,72
120	30	60	6	6	510	503,75	1,23

(Fonte: Elaborada pelo autor)

Percebe-se na tabela exposta acima, em geral, uma boa aproximação dos resultados. Somente nos pontos mais internos (afastamento de 4 cm e 6 cm) da viga com dimensões 16x30 cm, exposta ao incêndio padrão por 30 minutos, têm-se erros que ultrapassam 11%. No restante das situações analisadas, observam-se aproximações muito satisfatórias tendendo, inclusive, em alguns casos, a erros praticamente inexistentes.

Salienta-se que, realizando uma análise térmica em um concreto simples (sem armadura), como os exemplos expostos neste item, pode-se adotar a distribuição térmica obtida para prever a temperatura do aço em uma estrutura de concreto armado. Isto porque, conforme apontado por Albuquerque (2012), devido à massa do concreto ser muito superior à massa das barras de aço, faz-se razoável admitir que o aço absorva instantaneamente a temperatura do concreto. Sendo

assim, de acordo com Lie e Lin (1985), basta assumir para o aço a mesma temperatura do concreto em sua adjacência. Atenta-se que esta abordagem é simplificada e acumula erros em suas respostas, sendo aconselhável utilizar este recurso somente em situações onde não se tenha a disponibilidade de analisar a estrutura completa.

5.2 ANÁLISE TÉRMICA TRIDIMENSIONAL

Com o objetivo de verificar a metodologia criada para avaliação tridimensional da distribuição térmica em pilares de concreto armado, foi escolhido o estudo experimental realizado por Bolina (2016) em sua dissertação de mestrado. Nos próximos subitens será apresentada uma breve descrição do programa experimental, bem como os aspectos do modelo numérico. A forma de implementar as estratégias adotadas utilizando o ANSYS pode ser consultada no *script* elaborado em linguagem APDL exposto no apêndice A.2. Ressalta-se que o *script* se refere à coluna C1 deste item, para a coluna C2 é possível utilizar o mesmo código desde que os dados de entrada sejam adequados.

5.2.1 Breve descrição do programa experimental

Bolina (2016) analisou 16 pilares, 4 para cada classe de agressividade previstas pela NBR 6118:2014, com seção transversal 25x25 cm e altura de 300 cm. Os pilares foram fabricados com as diferentes classes de agressividade ambiental (I, II, III e IV) e expostos ao fogo por 240 minutos com 28 dias de idade. Os experimentos não contaram com carregamento mecânico, foram verificados em uma análise puramente térmica respeitando o incêndio padrão ISO 834:2014. Os pilares foram instalados em pórticos móveis e submetidos ao ensaio em um forno vertical. As temperaturas foram medidas por termopares tipo K 8 AWG, de 3,26 mm de diâmetro, com temperatura máxima admissível de 1260°C, localizados nas faces e no interior da peça bem como nas armaduras longitudinais. Maiores informações sobre os procedimentos adotados no programa experimental podem ser obtidas consultando a dissertação de mestrado do autor supracitado. Faz-se importante ressaltar que os pilares são não simétricos devido a utilização de barras de aço longitudinais apresentarem diferentes diâmetros.

5.2.2 Aspectos do modelo numérico

Para a validação, optou-se pelos modelos fabricados conforme dimensionamento dado pela classe de agressividade ambiental 2 (CAA2) e 3 (CAA3) extraídos de Bolina (2016). Algumas informações necessárias para realizar a análise térmica estão expostas na Tabela 5.2. Além disso, pode-se visualizar, de maneira gráfica, na Figura 5.2 o detalhamento geral dos pilares.

Tabela 5.2: informações complementares das colunas estudadas para validação estrutural.

Parâmetro	Coluna C1	Coluna C2
Denominação de referência do pilar	T2P2	T4P4
Dimensões (largura x altura x comprimento) - cm	25 x 25 x 300	25 x 25 x 300
Cobrimento do concreto (c) - cm	3,0	5,0
Armadura longitudinal superior	2 ϕ 8 mm	2 ϕ 8 mm
Armadura longitudinal inferior	1 ϕ 16 mm + 1 ϕ 10 mm	1 ϕ 16 mm + 1 ϕ 10 mm
Taxa de armadura - %	0,53	0,53
Armadura transversal	ϕ 6,3 c. 15 cm	ϕ 6,3 c. 15 cm
Tipo de agregado	Silicoso	Silicoso

(Fonte: Elaborada pelo autor)

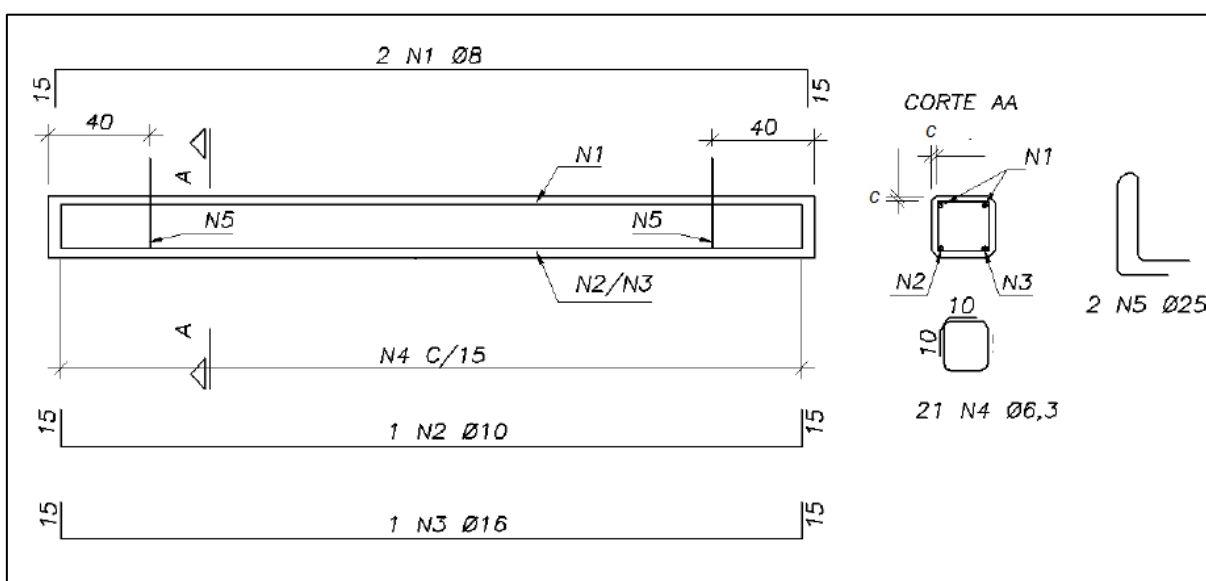


Figura 5.2: detalhamento estrutural geral dos pilares analisados [cm].

(Adaptado de: BOLINA, 2016)

Além das informações expostas na tabela acima, para concluir a criação do modelo numérico do pilar de concreto armado, deve-se incluir as seguintes considerações:

- a) escolha dos elementos finitos para análise térmica 3D: SOLID70, LINK33 e SURF152 (veja item 4.2.4);
- b) definição da malha: a malha utilizada para análise foi feita manualmente, dividindo a região transversal do cobrimento e do núcleo de concreto de maneira que o maior lado do elemento não exceda 1 cm;
- c) massa específica: para o aço, adotou-se 7850 kg/m^3 conforme item 3.1.1.4. Para o concreto foi adotada conforme equação 3.19, admitindo a massa específica do concreto armado em temperatura ambiente de 2500 kg/m^3 ;
- d) condutividade térmica: utilizou-se o limite inferior apresentado no item 3.2.1.3 para o concreto e, para o aço, procedeu-se conforme item 3.1.1.3;
- e) calor específico: foi adotado conforme apresentado no item 3.1.1.2 para concretos com teor de umidade de 1,5% e para o aço, procedeu-se conforme item 3.1.1.2;
- f) coeficiente de transferência de calor por convecção: $25 \text{ W}/(\text{m}^2 \cdot \text{K})$;
- g) emissividade resultante: 0,7 (EN 1992-1-2:2004);
- h) constante de Stefan-Boltzmann: $5,6704 \cdot 10^{-8} \text{ W}/(\text{m}^2 \cdot \text{K}^4)$;
- i) condições de contorno: devido ao pilar não possuir simetria no arranjo das armaduras (veja Figura 5.2), foi modelado o volume inteiro do elemento estrutural. Os pilares possuem chanfros de $2 \times 2 \text{ cm}$ nos seus vértices. Aplicou-se, ao nó extra do elemento SURF152, a curva padrão de incêndio ISO 834 (2014) conforme equação 2.12 exposta no item 2.6.3. As quatro faces do pilar foram consideradas expostas ao incêndio;
- j) opções de solução: foi utilizado o método explícito default para resolver as equações diferenciais do problema (TRNOPT, FULL), a estrutura foi submetida à um incêndio de 4hs divididos em 3 passos de carga. Este artifício de dividir em passos é atribuído a necessidade de um número maior de subpassos para a

convergência quando a elevação da temperatura começa a alcançar a região da armadura. O critério de tolerância para convergência adotado para temperatura foi de 1% da norma do vetor. Os aspectos supracitados podem ser melhor visualizados no item A.2 (Anexo A).

5.2.3 Resultados da validação

Neste subitem, apresentam-se os resultados obtidos com o modelo numérico térmico tridimensional proposto. Tais resultados incluem a elevação da temperatura no concreto de acordo com a profundidade medida a partir da face do pilar na linha média da seção transversal – 0 mm, 25 mm, 30 mm, 40 mm, 50 mm e 100 mm - (Figuras 5.3 e 5.4) e a elevação da temperatura nas barras de aço com diâmetros de 10 mm e 16 mm (Figura 5.5 e 5.6), ambas as análises para os dois pilares modelados.

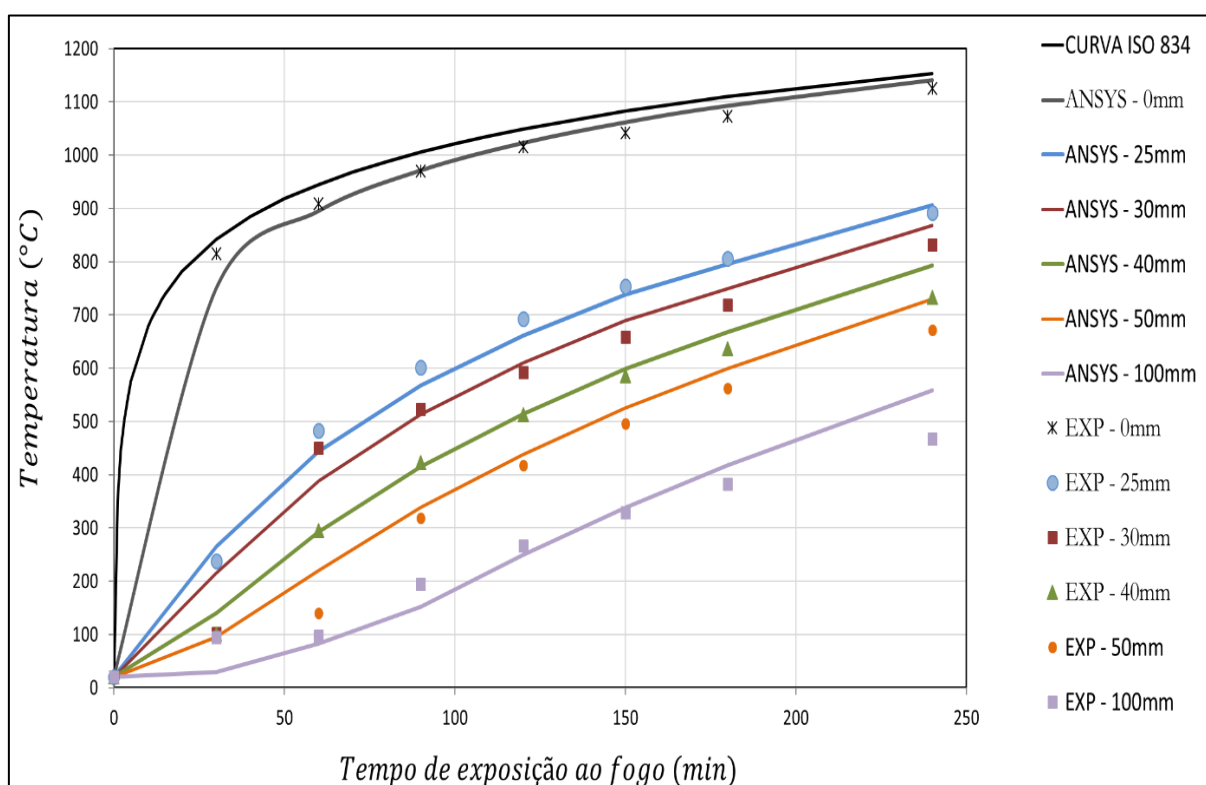


Figura 5.3: comparação entre os valores experimentais e numéricos da elevação da temperatura no concreto para a coluna C1.

(Fonte: Elaborada pelo autor)

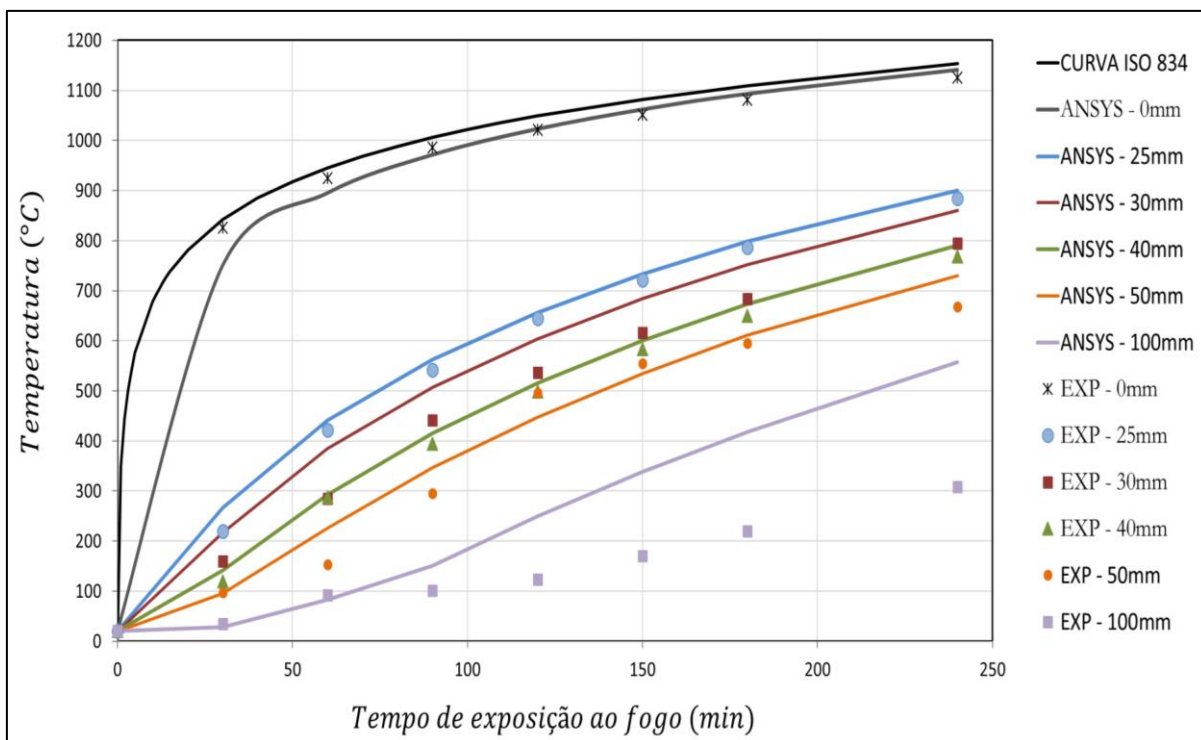


Figura 5.4: comparação entre os valores experimentais e numéricos da elevação da temperatura no concreto para a coluna C2.

(Fonte: Elaborada pelo autor)

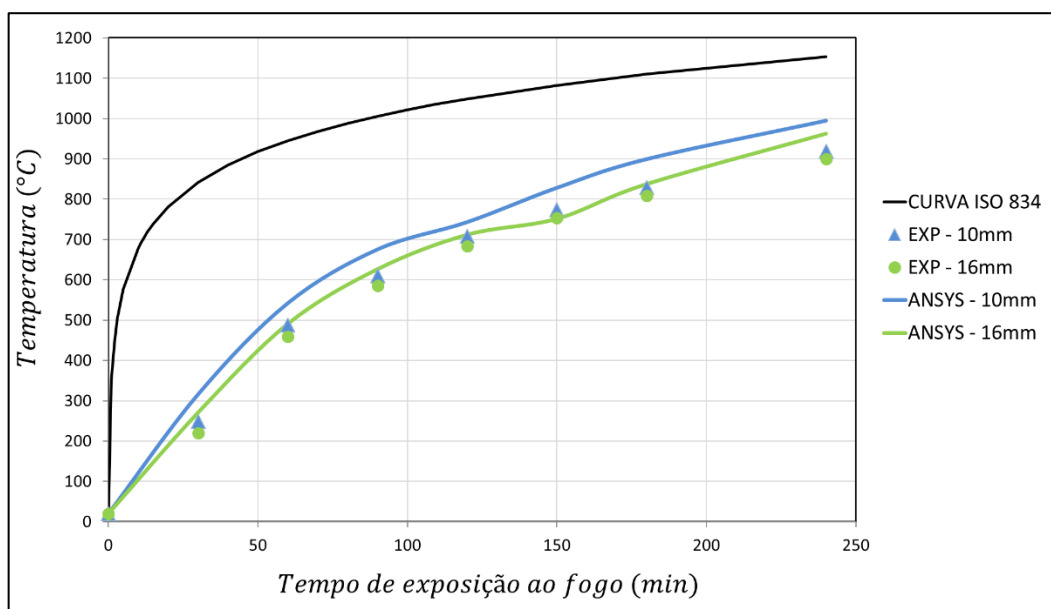


Figura 5.5: comparação entre os valores experimentais e numéricos da elevação da temperatura nas armaduras principais da coluna C1.

(Fonte: Elaborada pelo autor)

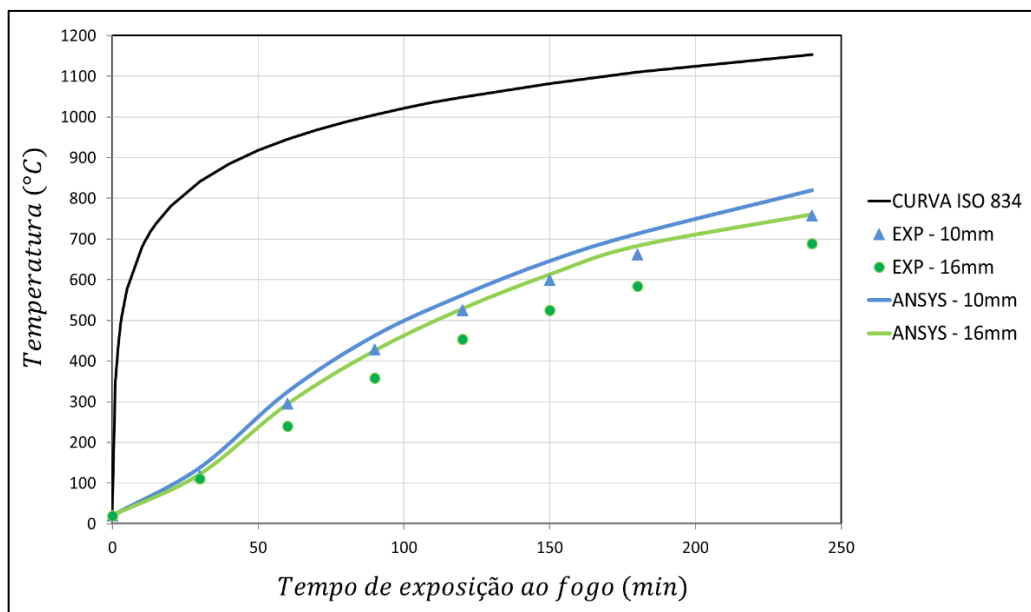


Figura 5.6: comparação entre os valores experimentais e numéricos da elevação da temperatura nas armaduras principais da coluna C2.
(Fonte: Elaborada pelo autor)

As Figuras 5.3 e 5.4 apontam uma boa aproximação entre os valores das temperaturas durante o incêndio padrão no concreto, sendo a resposta numérica um pouco mais severa que a experimental na maioria dos pontos analisados. Percebe-se que para a coluna C2, diferentemente do observado na coluna C1, os pontos mais internos da seção (mais distantes à face exposta ao incêndio) apresentam divergências acentuadas entre os resultados da análise numérica e experimental. Este fato pode estar relacionado ao elevado número de variáveis que o problema envolve, bem como a diversos fatores não considerados pelo *software* ou pelas especificações normativas utilizadas, tais como: a migração da água presente no concreto, o traço do concreto utilizado, entre outros. Todavia, devido ao modelo se mostrar eficiente para a grande maioria dos casos estudados, optou-se por tratar esta comparação em específico como um ponto fora da curva e dar continuidade às validações.

Nas Figuras 5.4 e 5.5, encontra-se uma aproximação ainda maior nos resultados. Sabendo o que o aço é o material mais sensível à variação da temperatura, de uma maneira geral, comprova-se que o gradiente térmico obtido indica uma convergência satisfatória com o campo experimental e que o modelo numérico pode ser considerado favorável à segurança.

5.3 ANÁLISE ESTRUTURAL EM TEMPERATURA AMBIENTE

Para validar o modelo estrutural em temperatura ambiente e os critérios adotados no presente estudo, foi escolhido o estudo realizado por Ramos e Giongo (2005). Nos próximos subitens será apresentada uma breve descrição do programa experimental, bem como os aspectos do modelo numérico. A forma de implementar as estratégias adotadas utilizando o ANSYS pode ser consultada nos *scripts* elaborados em linguagem APDL expostos nos apêndices A.3 e A.4. Ressalta-se que o *script* se refere à coluna C3 deste item, para a coluna C4 é possível utilizar o mesmo código desde que os dados de entrada sejam adequados.

5.3.1 Breve descrição do programa experimental

Ramos e Giongo (2005) analisaram 16 pilares de resistência normal considerando a variação nos seguintes parâmetros: dimensões geométricas do elemento estrutural, taxa de armadura longitudinal, o espaçamento e a configuração da armadura transversal. Os testes foram realizados em uma máquina hidráulica servo-controlada que possibilita a aplicação de carga com controle de deslocamento. O monitoramento das deformações nas armaduras foi realizado por meio de extensômetros elétricos fixados nas barras de aço e nas faces dos pilares na seção média do pilar. Defletômetros localizados nas faces dos pilares mediram os deslocamentos impostos pela força de compressão. Maiores detalhes sobre os procedimentos adotados no programa experimental podem ser obtidos consultando a referência supracitada.

5.3.2 Aspectos do modelo numérico

Para a validação, optou-se pelos modelos P1-10-120 e P1-12,5-100 extraídos de Ramos e Giongo (2005). Algumas informações necessárias para realizar a análise mecânica estão expostas na Tabela 5.3. Além disso, pode-se visualizar, de maneira gráfica, na Figura 5.7 o detalhamento geral dos pilares.

Tabela 5.3: informações complementares das colunas estudadas.

Parâmetro	Coluna C3	Coluna C4
Denominação de referência do pilar	P1-10-120	P1-12,5-100
Dimensões (largura x altura x comprimento) - cm	20 x 20 x 120	20 x 20 x 120
Cobrimento do concreto - cm	1,5	1,5
Armadura Longitudinal	4 ϕ 10 mm	4 ϕ 12,5 mm
Taxa de armadura - %	0,79	1,23
Armadura transversal	ϕ 5 c. 12 cm	ϕ 6,3 c. 10 cm
Resistência à compressão média uniaxial do concreto - MPa	23,7	27,1
Resistência de escoamento do aço - MPa	611	561
Tipo de agregado	Silicoso	Silicoso
Ruptura experimental da Coluna - kN	1072	1292

(Fonte: Elaborada pelo autor)

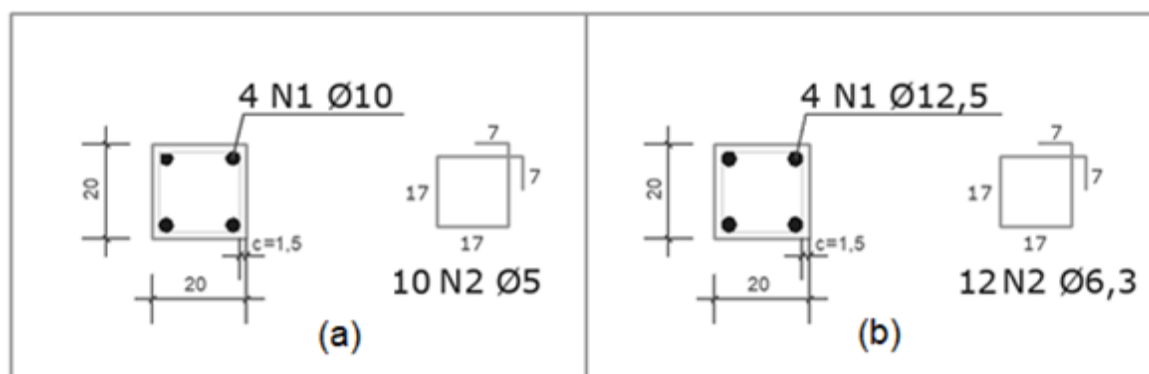


Figura 5.7: detalhamento estrutural geral das colunas C3 (a) e C4 (b) [cm].

(Fonte: Elaborada pelo autor)

Além das informações expostas, para concluir a criação do modelo numérico do pilar em concreto armado, deve-se incluir as seguintes considerações:

- escolha dos elementos finitos: SOLID65 e LINK180 (veja item 4.3.3);
- definição da malha: a malha utilizada para análise foi feita manualmente, dividindo a região transversal do cobrimento e do núcleo de concreto de maneira que o maior lado do elemento não exceda 1 cm;

- c) propriedades mecânicas e relações constitutivas dos materiais: veja itens 3.1.2 e 3.2.2 para o aço e concreto respectivamente. Ressalta-se que para facilitar a convergência numérica, os diagramas tensão-deformação foram simplificados, ambos foram idealizados sem o ramo descendente resultando em materiais com comportamento elastoplástico perfeito. Além disso, para o aço, adotou-se um diagrama bilinear delimitado pela sua resistência ao escoamento e o seu módulo de elasticidade longitudinal. Salienta-se que, para a presente análise em temperatura ambiente, faz-se necessário somente os parâmetros à 20 °C como dados de entrada do modelo;
- d) condições de contorno: devido ao pilar possuir dupla simetria, foi modelado apenas um quarto do seu volume. Para garantir a simulação adequada, os nós tiveram o movimento restringido na direção perpendicular ao plano de simetria. Além disso, os movimentos de corpo rígido foram restringidos nos nós pertencentes à base da estrutura. Para os nós pertencentes ao topo, apenas o deslocamento na direção de aplicação da carga é permitido. O carregamento foi imposto de maneira distribuída aos nós da seção superior da estrutura. Ademais, foram inseridas chapas extremamente rígidas no topo e na base do modelo possibilitando assim, a uniformização do carregamento nos nós e evitando deformações plásticas localizadas devido ao deslocamento diferenciado entre os mesmos;
- e) opções de solução: o carregamento foi aplicado de maneira incremental (incremento de força) em um número total de 200 *substeps*, possibilitando o *software* a usar um número mínimo e máximo de 100 e 500 *substeps* respectivamente, conforme dificuldade encontrada para convergência. Considerou-se a não linearidade geométrica através do comando NLGEOM, ON. Os critérios de tolerância para convergência adotados para força e deslocamento foram de 5% da norma do vetor. A solução foi dada através do método iterativo Newton-Raphson completo.

Na Figura 5.8 é apresentado um modelo genérico de pilar que permite observar os critérios descritos neste item.

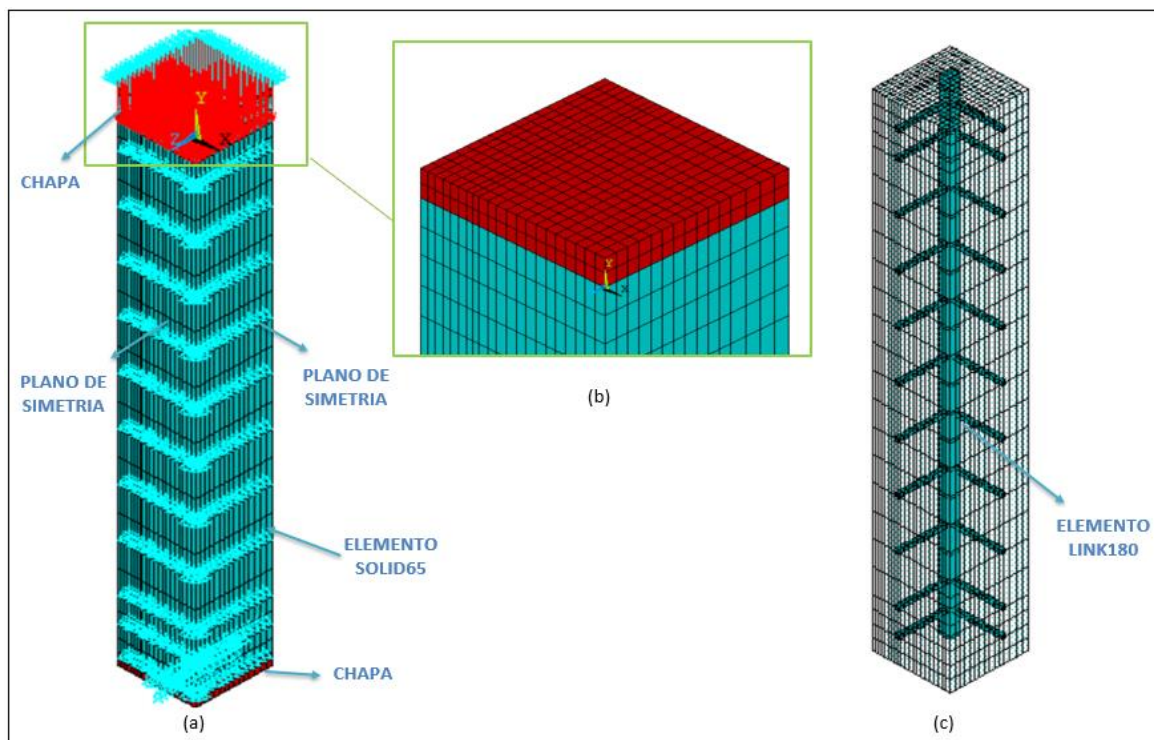


Figura 5.8: (a) modelo mecânico/termomecânico genérico (b) detalhe da chapa de topo (c) posicionamento das armaduras.

(Fonte: Elaborada pelo autor)

5.3.3 Resultados da validação

A primeira análise que pode ser observada é a divergência entre os diagramas tensão-deformação sugeridos pelo Código Modelo *fib* (2010) e pelo EN 1992-1-2 (veja apêndices A.3 e A.4 respectivamente). Percebe-se, através dos resultados obtidos para o P1-10-120 expostos na Figura 5.9, uma boa diferença entre as curvas propostas, sendo que a *fib* (2010) apresentou um comportamento mais próximo do encontrado no campo experimental em temperatura ambiente.

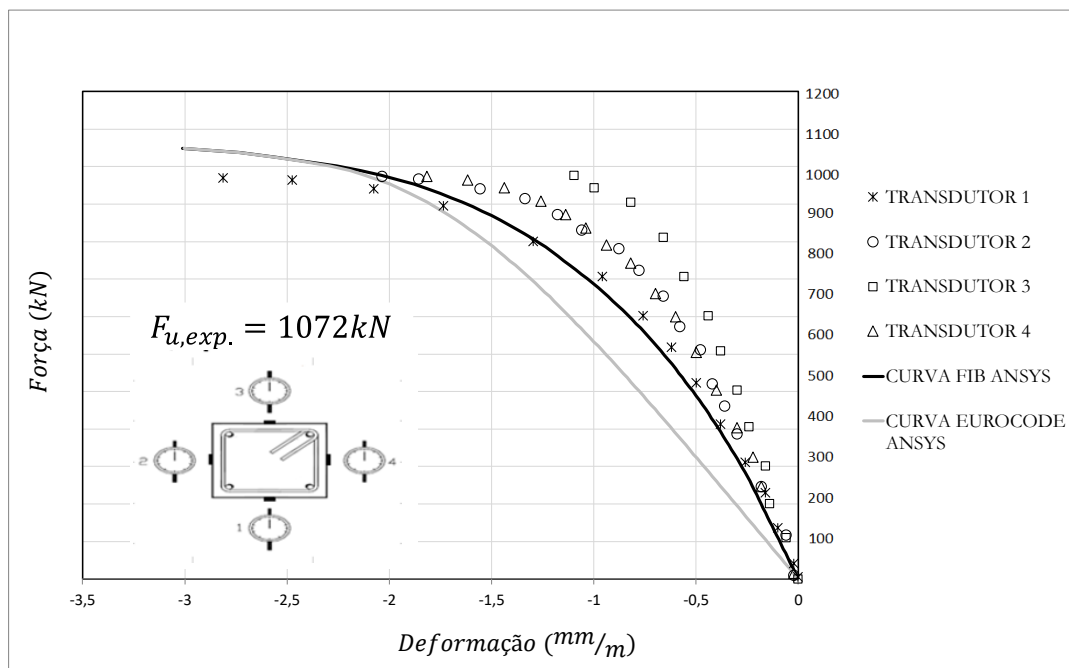


Figura 5.9: comparação dos resultados para a coluna C3.

(Fonte: Elaborada pelo autor)

Para o exemplo apresentado na Figura 5.9, onde se tem uma resistência à compressão média uniaxial de 23,7 MPa, verificando a tensão encontrada para uma deformação reduzida de 0,000025 mm/m, tem-se pelo EN 1992-1-2 (2004), veja eq. 3.27, uma tensão de 0,355 MPa. Por outro lado, por *fib* (2010), veja eq. 3.28, tem-se uma deformação de 0,707 MPa. Considerando que para baixas tensões o material se encontra no regime elástico, obtêm-se dividindo as tensões pela deformação, módulos de 14219,993 MPa e 28280,80 MPa respectivamente.

Calculando o módulo de elasticidade tangente inicial do concreto conforme equação 3.25, encontra-se o valor de 28665,174 MPa. Logo, conclui-se que o módulo obtido por EN 1992-1-2 (2004) é aproximadamente 51% inferior a este valor, enquanto o diagrama apresentado por *fib* (2010) fornece um módulo apenas 1,34% inferior. De acordo com esta comparação, pode-se atribuir a diferença encontrada na Figura 5.9 ao não cumprimento do módulo de elasticidade tangente inicial do concreto pela curva sugerida por EN 1992-1-2 (2004).

Ao final da análise estrutural em temperatura ambiente, conclui-se que as Figuras 5.9 e 5.10 indicam uma boa concordância tanto no comportamento da coluna de concreto armado submetida à compressão axial, quanto na força necessária para ruptura da mesma. Para o pilar P1-10-120, com a simulação numérica, obteve-se um força última de 1149 kN, representando

um erro de 2,96% apenas. O modelo numérico para P1-12,5-100, por sua vez, apresentou uma força última equivalente a 1376,25 kN, o que representa um erro de 6,52%. Diante disso, pode-se afirmar que a estratégia adotada e descrita no item 4.3, possibilitou a obtenção de resultados consistentes para as análises realizadas.

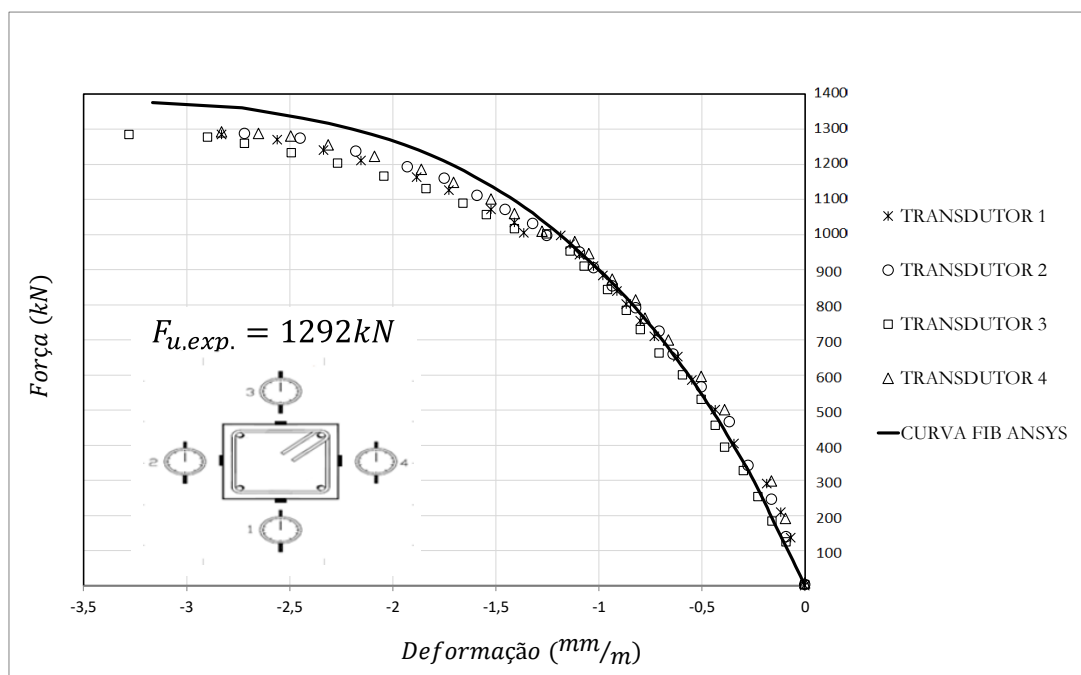


Figura 5.10: comparação dos resultados para a coluna C4.

(Fonte: Elaborada pelo autor)

5.4 ANÁLISE TERMOMECÂNICA

O modelo numérico foi comparado com resultados obtidos por testes experimentais elaborados por Wu e Lie (1992) e por resultados analíticos publicados em um estudo posterior realizado por Zhu e Lie (1993) utilizando os mesmos pilares. Dessa maneira, verifica-se, tanto com resultados experimentais quanto analíticos, a validade e a eficácia do modelo proposto em prever o comportamento termomecânico das colunas de concreto armado. A forma de implementar as estratégias adotadas para criação do modelo térmico e termomecânico utilizando o ANSYS estão descritos nos *scripts* elaborados em linguagem APDL expostos nos apêndices A.5 e A.6 deste trabalho. Os *scripts* são referentes à coluna C5 deste item, para a coluna C6 é possível utilizar o mesmo código desde que os dados de entrada sejam atualizados.

5.4.1 Breve descrição do programa experimental

Wu e Lie (1992) realizaram um programa experimental incluindo 7 colunas de concreto armado expostas ao incêndio com o objetivo de fornecer dados práticos e reais para validar métodos de cálculos que estavam sendo elaborados na época. Os pilares foram construídos com agregados silicosos e calcáreos e as variáveis estudadas foram: dimensões geométricas do elemento estrutural e tipos de carregamento (centrado e excêntrico).

Os experimentos foram realizados expondo as colunas ao fogo, fixadas no topo e na base, em um forno especialmente construído para avaliar pilares pré-carregados. Para carregamento centrado, a aplicação da carga prescrita é feita por um macaco hidráulico localizado embaixo do pilar. Após a estabilização da deformação oriunda deste carregamento, o elemento estrutural é exposto ao fogo de maneira controlada respeitando a curva padrão ISO 834 que segue inalterada até os dias atuais na sua última versão publicada em 2014.

As temperaturas do concreto e do aço foram obtidas utilizando termopares Tipo K (Cromel/Alumel) localizados nos pontos de interesse previamente definidos. Os deslocamentos axiais das colunas foram medidos através de transdutores que monitoravam o movimento do macaco hidráulico durante o ensaio com uma precisão de 0,002 mm. Maiores informações sobre os procedimentos e instrumentos adotados no programa experimental podem ser obtidas em Wu e Lie (1992).

5.4.2 Breve descrição do método analítico

O método analítico estabelecido por Zhu e Lie (1993) é constituído por diferentes passos, envolvendo além do cálculo de temperatura, o cálculo das deformações médias e da resistência apresentada pelas colunas em situação de incêndio.

Primeiramente, definem-se as temperaturas subdividindo o domínio da seção transversal da estrutura usando o Método das Diferenças Finitas. O número de elementos é estabelecido de forma que possibilite arranjar-los em uma malha triangular dentro dos limites da seção. Os métodos utilizados para derivar a equação de transferência de calor e determinar as temperaturas nas colunas de concreto armado foram publicados em trabalhos anteriores Zhu e Lie (1993).

Em um segundo momento, os autores apresentam a metodologia utilizada para determinação das deformações, tensões e resistência das colunas. Onde, a malha triangular anteriormente

utilizada é substituída por uma quadrada. Para obter a resistência, os autores utilizam um método baseado na análise de deflexão e carga (*load deflection analysis*), idealizando os pilares com as extremidades rotuladas ao invés de fixas como estavam no experimento. A partir da curvatura, determina-se a resistência da coluna para cada temperatura. As deformações são obtidas para o concreto e aço em função da parcela de deformação mecânica, curvatura do elemento e das suas propriedades referentes à expansão térmica. Com os valores das deformações, através do diagrama tensão-deformação, finalmente é possível determinar as tensões atuantes na estrutura. Maiores informações sobre os métodos e parâmetros adotados para o cálculo analítico podem ser obtidas em Zhu e Lie (1993).

5.4.3 Aspectos do modelo numérico

Com o intuito de proceder com a validação, foram selecionadas as colunas 1 e 3 apresentadas em Wu e Lie (1992) e Zhu e Lie (1993). A motivação em escolher estas colunas em específico é devido ao fato de serem constituídas por agregados silicosos, material mais utilizado no território brasileiro.

Algumas informações necessárias referentes às propriedades e características dos pilares podem ser visualizadas na Tabela 5.4 e na Figura 5.11, onde é apresentada a disposição construtiva dos elementos. As demais informações estão elencadas ao longo do presente item.

Tabela 5.4: informações complementares das colunas estudadas para validação termoestrutural.

Parâmetro	Coluna C5	Coluna C6
Denominação de referência do pilar	<i>Column 1</i>	<i>Column 3</i>
Dimensões (largura x altura x comprimento) - cm	30,5 x 30,5 x 380	30,5 x 30,5 x 350
Cobrimento do concreto - cm	4,8	4,8
Armadura Longitudinal	4 ϕ 22 mm	4 ϕ 22 mm
Taxa de armadura - %	1,66	1,66
Armadura transversal	ϕ 8 c. 30 cm	ϕ 8 c. 30 cm
Resistência à compressão média uniaxial do concreto - MPa	30,2	23,4
Resistência de escoamento do aço - MPa	340	340
Tipo de agregado	Silicoso	Silicoso
Carga aplicada – kN	1180	1180
Ruptura experimental da Coluna – min	97	109

(Fonte: Elaborada pelo autor)

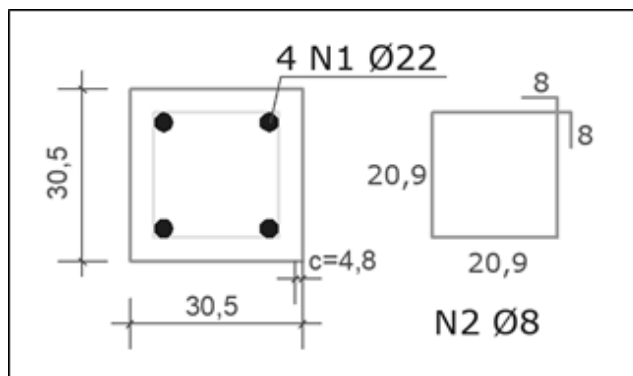


Figura 5.11: detalhamento estrutural geral da coluna C5 e C6 [cm].

(Fonte: Elaborada pelo autor)

Além das informações expostas na tabela acima, para concluir a criação do modelo numérico, faz-se necessário outras informações, tais como:

- a) escolha dos elementos finitos para análise térmica 3D: SOLID70, LINK33 e SURF152 (veja item 4.2.4);
- b) escolha dos elementos finitos para análise termomecânica 3D: SOLID65 e LINK180 (veja item 4.3.3);
- c) definição da malha: a malha utilizada para análise foi feita manualmente, dividindo a região transversal do cobrimento e do núcleo de concreto de maneira que o maior lado do elemento não exceda 1 cm;
- d) massa específica: para o aço, adotou-se 7850 kg/m^3 conforme item 3.1.1.4. Para o concreto foi adotada conforme equação 3.19, admitindo a massa específica do concreto armado em temperatura ambiente de 2500 kg/m^3 ;
- e) condutividade térmica: utilizou-se o limite inferior apresentado no item 3.2.1.3 para o concreto e, para o aço, procedeu-se conforme item 3.1.1.3;
- f) calor específico: foi adotado conforme apresentado no item 3.1.1.2 para concretos com teor de umidade de 1,5% e para o aço, procedeu-se conforme item 3.1.1.2;
- g) coeficiente de transferência de calor por convecção: $25 \text{ W}/(\text{m}^2.\text{k})$;
- h) emissividade resultante: 0,7 (EN 1992-1-2:2004);

- i) constante de Stefan-Boltzmann: $5,6704 \cdot 10^{-8} \text{ W}/(\text{m}^2 \cdot \text{K}^4)$;
- j) propriedades mecânicas e relações constitutivas dos materiais: veja itens 3.1.2 e 3.2.2 para o aço e concreto respectivamente. Ressalta-se que para facilitar a convergência numérica, os diagramas tensão-deformação foram simplificados, ambos foram idealizados sem o ramo descendente resultando em materiais com comportamento elastoplástico perfeito. Além disso, para o aço, adotou-se um diagrama bilinear delimitado pela sua resistência ao escoamento e o seu módulo de elasticidade longitudinal. Salienta-se que, para a presente análise em situação de incêndio, como dados de entrada do modelo, faz-se necessário diferentes curvas tensão-deformação variando conforme a faixa de temperatura;
- k) condições de contorno gerais: devido aos pilares possuírem dupla simetria, foi modelado apenas um quarto do seu volume;
- l) determinação das condições de contorno para análise térmica: aplicou-se, ao nó extra do elemento SURF152, a curva padrão de incêndio ISO 834 (2014) conforme equação 2.12 exposta no item 2.6.3. As quatro faces do pilar foram expostas ao incêndio, porém, devido à adoção da dupla simetria, apenas as faces que não representam os dois planos de simetria foram expostas (veja Figura 5.12). Além disso, salienta-se que foi modelado um volume adicional tanto na base quanto no topo dos pilares com espessura de 2,5 cm. Estes volumes representam a chapa rígida que será utilizada para aplicação da carga na análise termomecânica. Partindo da premissa que a temperatura é uniforme longitudinalmente este volume adicional, que para a análise térmica recebe as propriedades idênticas ao concreto, não altera a distribuição térmica na estrutura. Este artifício é necessário, pois a malha da análise termomecânica deve ser compatível com a térmica, de modo que não é possível considerar os volumes referentes as placas rígidas somente na segunda análise;
- m) determinação das condições de contorno para análise estrutural (termomecânica): mesmos critérios adotados em 5.2.2 com a adição do comando LREAD para incorporar as temperaturas da análise térmica;

n) opções de solução: para análise térmica foi utilizado o método explícito *default* para resolver as equações diferenciais do problema (TRNOPT, FULL), as estrutura foram submetidas à um incêndio de 6600s divididos em 3 passos de carga pelo mesmo motivo exposto no item 5.2.2. O critério de tolerância para convergência adotado para temperatura foi de 1% da norma do vetor. Para a análise termomecânica, os critérios estabelecidos em 5.2.2 foram mantidos.

Na Figura 5.12 é apresentado um modelo genérico de análise térmica do pilar que permite observar os critérios descritos neste item, a ilustração do modelo termomecânico pode ser observada na Figura 5.8, visto que o modelo termomecânico é o mesmo modelo utilizado para análises puramente mecânicas.

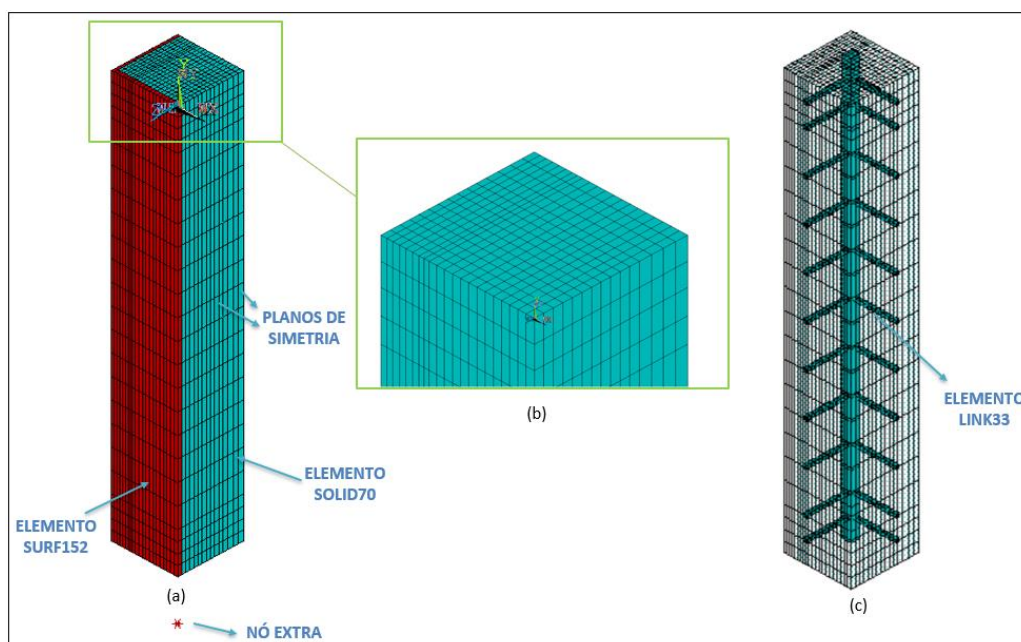


Figura 5.12: (a) modelo térmico genérico (b) detalhe da malha utilizada (c) posicionamento das armaduras.

(Fonte: Elaborada pelo autor)

5.4.4 Resultados da validação

Neste subitem, apresentam-se os resultados obtidos com o modelo numérico termomecânico proposto. Tais resultados incluem a elevação da temperatura no concreto de acordo com a profundidade medida a partir da face do pilar na linha média da seção transversal – 12 mm, 38 mm, 63 mm e 152 mm - (Figura 5.13), elevação da temperatura nas barras de aço longitudinais

(Figuras 5.14) e, por fim, a análise termomecânica representada pelo deslocamento axial dos pilares durante o tempo de exposição ao fogo (Figuras 5.15 e 5.16).

Ressalta-se que, devido a semelhança entre a geometria e as condições de contorno térmicas das duas colunas analisadas, fez-se uma média entre as temperaturas obtidas experimentalmente nos quatro pontos das seções de concreto e nas barras de aço para comparar com as obtidas pelo modelo numérico. Este procedimento também foi adotado e apresentado por Maximiano (2018) e anteriormente por Bamonte e LoMonte (2015).

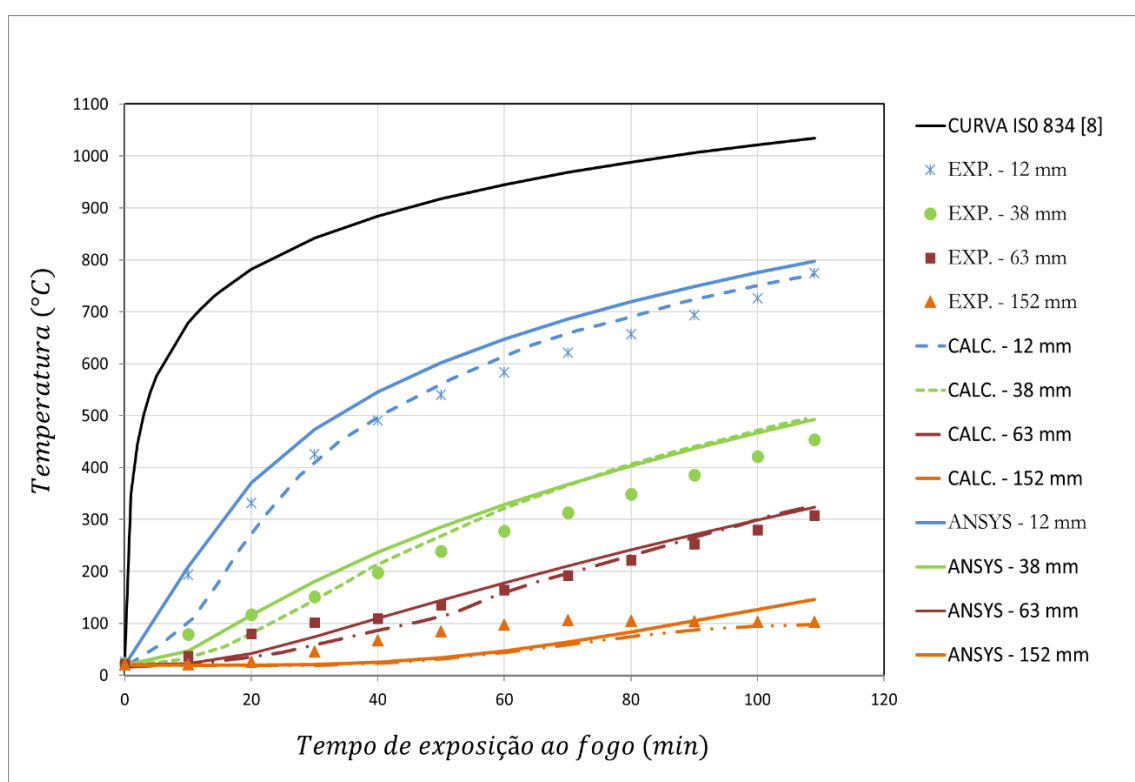


Figura 5.13: comparação entre os valores experimentais, calculados e numéricos da elevação da temperatura no concreto.

(Fonte: Elaborada pelo autor)

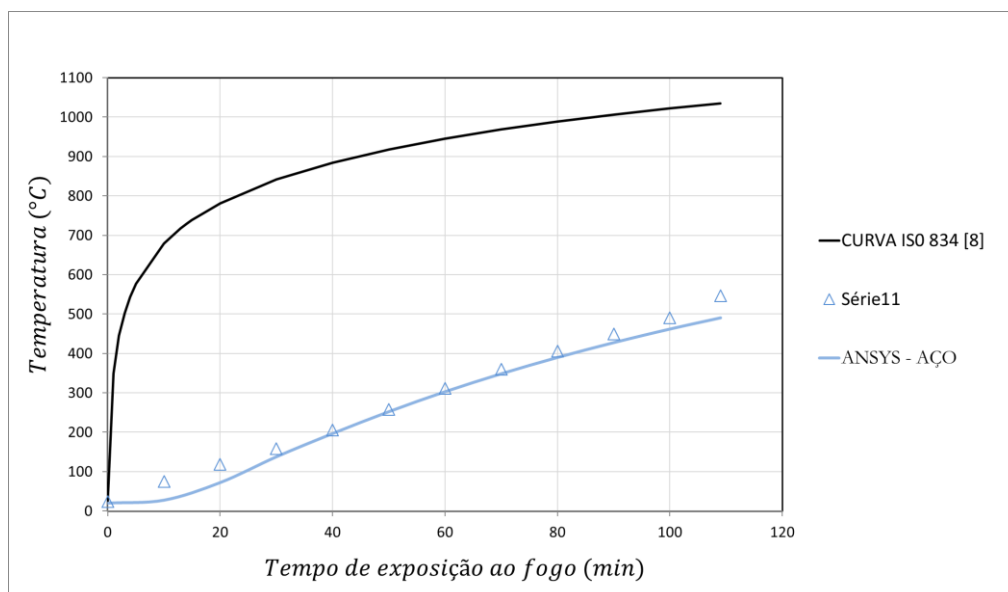


Figura 5.14: comparação entre os valores experimentais e numéricos da elevação da temperatura na armadura principal.

(Fonte: Elaborada pelo autor)

As Figuras 5.13 e 5.14 evidenciam a boa convergência de valores nas temperaturas durante o incêndio padrão. Ressalta-se que o modelo numérico fornece, para o aço, valores, em geral, praticamente coincidentes com aqueles encontrados experimentalmente evidenciando a boa representatividade obtida com a simulação computacional.

Na Figura 5.16, apresenta-se uma análise comparativa entre os modelos numéricos utilizando os diagramas tensão-deformação sugeridos pelo Código Modelo *fib* (2010) e pelo EN 1992-1-2. Percebe-se que diferentemente do item 5.3.3 (referente aos resultados do modelo mecânico em temperatura ambiente), tratando-se de situação de incêndio a curva EN 1992-1-2 apresenta um comportamento mais próximo do encontrado no campo experimental. Por este motivo, esta curva foi adotada para as demais análises termomecânicas.

As validações termomecânicas expostas nas Figuras 5.15 e 5.16, apesar das simulações numéricas apresentarem resultados maiores de deslocamentos axiais, demonstram principalmente uma boa concordância no comportamento geral das colunas quando expostas ao incêndio. Além disso, fornecem resultados muito próximos do experimental para o tempo de resistência ao fogo, sendo de 102 min para a Coluna C5 e 103 min para a Coluna C6. Estes valores representam uma diferença de aproximadamente 5% do valor encontrado no laboratório (97 min e 109 min respectivamente).

Ressalta-se que, conforme a descrição do programa experimental exposto no item 5.4.1, os pilares são pré-carregados e posteriormente expostos ao incêndio. Assim, antes de observar um comportamento de expansão da estrutura devido ao aumento da temperatura, tem-se um deslocamento axial no sentido negativo (compressão). No entanto, este deslocamento de compressão inicial foi desprezado, pois o objetivo do ensaio experimental, bem como do modelo numérico, é analisar o comportamento da estrutura durante o período de incêndio.

Os altos valores dos deslocamentos dos pilares observados ao final das análises (aproximadamente 10 mm) estão atribuídos ao aumento da capacidade de deformação do concreto a altas temperaturas, conforme já apresentado na Tabela 3.7.

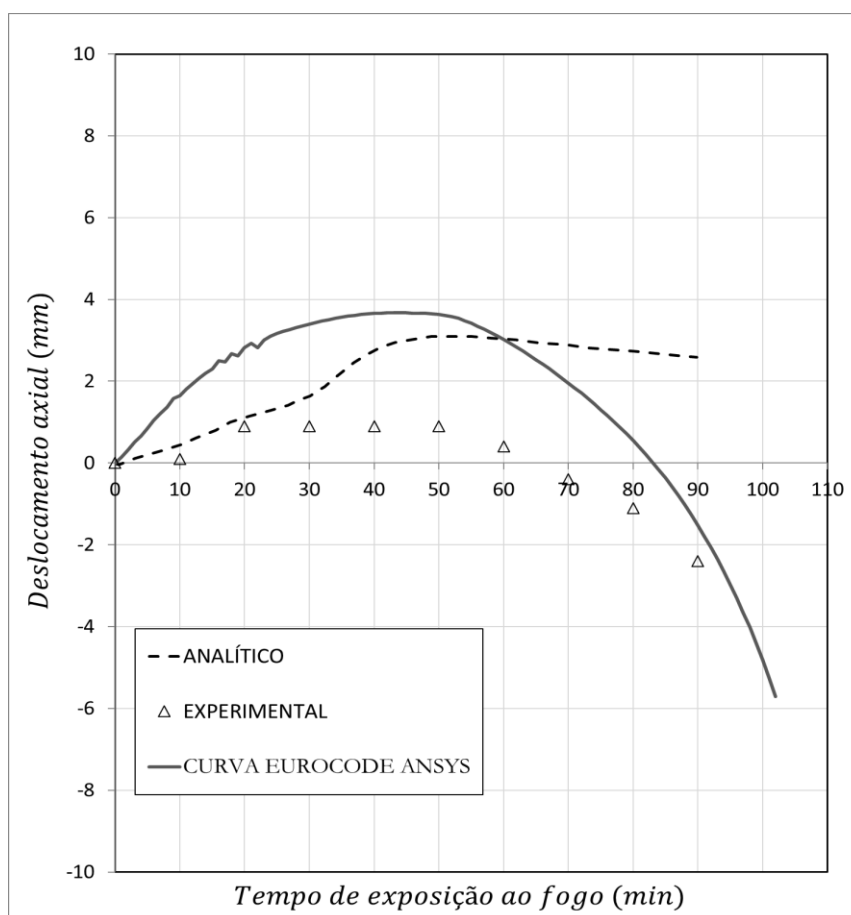


Figura 5.15: comparação deslocamento axial da coluna C5.

(Fonte: Elaborada pelo autor)

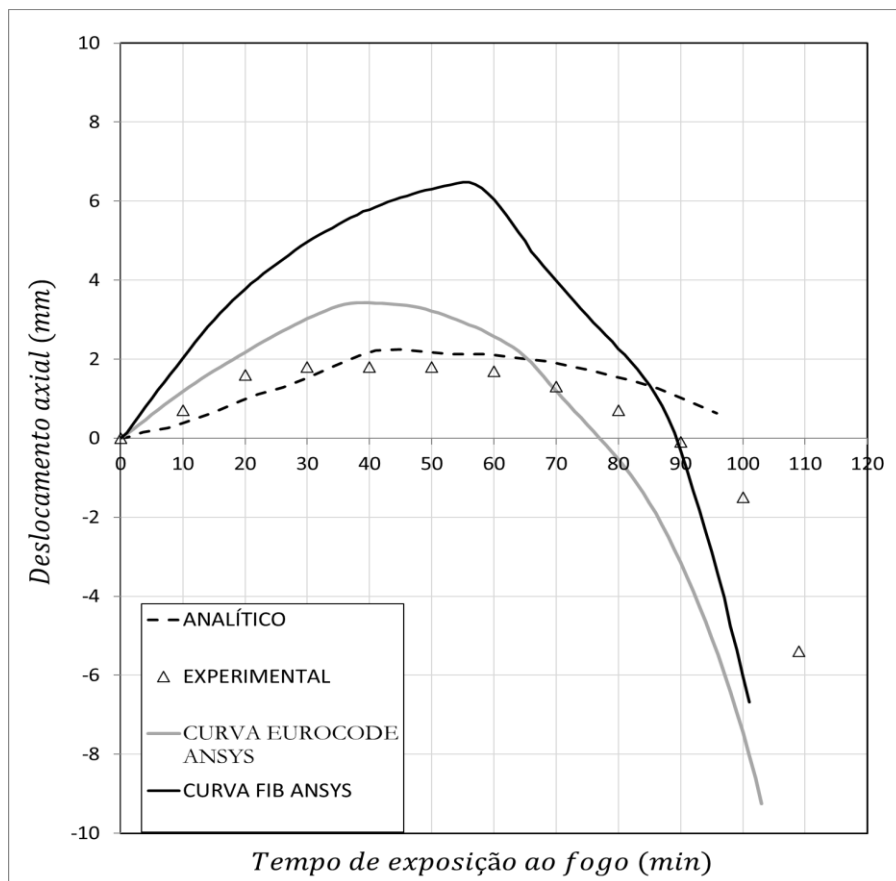


Figura 5.16: comparação deslocamento axial da coluna C6.

(Fonte: Elaborada pelo autor)

Para concluir a análise dos resultados termomecânicos, utiliza-se como parâmetro a deformação axial da estrutura. Esta, por sua vez, representa a relação entre a variação do deslocamento axial com o comprimento dos pilares estudados. Para a Coluna C6 que possui comprimento de 3,5m e deslocamentos máximos de 3,4mm numericamente e 1,8mm experimentalmente, observa-se uma divergência na deformação axial de apenas 0,0005 m/m ou 0,5 mm/m. Esta pequena diferença pode ser considerada pouco representativa, ao considerar todas as variáveis envolvidas no problema termoestrutural e a complexidade da determinação exata do comportamento das estruturas de concreto armado sob altas temperaturas.

Cabe ainda ressaltar que em estudos anteriores, como por exemplo, os elaborados por Maximiano (2018) e Bamonte e Lo Monte (2015), esta divergência entre os valores numéricos e experimentais são comuns. Pilares sujeitos a carregamentos centrados e expostos ao incêndio apresentaram, segundo os autores supracitados, deslocamentos praticamente duas vezes maiores daqueles encontrados em laboratório.

6 APLICAÇÃO PARA VERIFICAÇÃO DO DIMENSIONAMENTO DE PILARES SEGUNDO AS NORMAS BRASILEIRAS

O exemplo prático estudado nesta seção se refere à uma situação hipotética de dimensionamento de pilar que pode ser facilmente encontrado em uma solução estrutural de um edifício para fins residenciais ou comerciais. Ao decorrer deste item será apresentado o dimensionamento deste pilar respeitando as especificações da NBR 6118:2014 para a temperatura ambiente, a verificação do dimensionamento para atender o tempo requerido de resistência ao fogo (TRRF) em situação de incêndio pela NBR 15200:2012 e uma análise numérica para comparar as duas situações e determinar a segurança oferecida à estrutura pelas especificações normatizadas correntes.

6.1 DIMENSIONAMENTO CONFORME A NBR 6118:2014

Antes de apresentar o dimensionamento da coluna, alguns parâmetros devem ser determinados.

6.1.1 Parâmetros de resistência

A coluna de concreto armado possui resistência característica de compressão (f_{ck}) de 25 MPa e o aço CA-50 possui resistência característica ao escoamento (f_{yk}) de 500 MPa. Os coeficientes para majoração das cargas (γ_f) e minoração das resistências características do concreto (γ_c) e do aço (γ_s) para projeto são: $\gamma_f=1,4$; $\gamma_c=1,4$; $\gamma_s=1,15$. Sendo assim, a resistência a compressão do concreto (f_{cd}) para projeto é de 17,86 MPa e a resistência ao escoamento do aço (f_{yd}) para projeto é de 43,48 MPa. Sabendo que a resistência do concreto sofre uma redução em virtude da duração do carregamento (efeito Rüsçh), no dimensionamento dos elementos estruturais, deve-se considerar uma resistência de cálculo $\sigma_{cd} = 0,85 \cdot f_{cd}$ para concretos com $f_{ck} \leq 50\text{MPa}$. (ARAÚJO, 2014a)

Além disso, utilizou-se para fins de determinação analítica da resistência do aço, considerando o pilar submetido à compressão centrada, $\sigma_{sd} = 0,002 \cdot E_{aço}$, sendo 0,002 a deformação correspondente à resistência máxima do concreto e $E_{aço}$ o módulo de elasticidade do aço correspondente à 210 GPa.

6.1.2 Geometria da coluna

A coluna possui seção de 30 cm x 40 cm e comprimento de cálculo (l_e) de 260 cm. O cobrimento da armadura é dado pela classe ambiental, neste caso, adota-se 2,5 cm. Considera-se como b (ou h_x) e h (ou h_y) a menor e a maior dimensão da coluna respectivamente.

6.1.3 Classificação e carregamento da coluna

Por se tratar de uma coluna intermediária devido a não existência de vigas terminando nela, os momentos iniciais nas duas direções (x e y) oriundos destas vigas podem ser desprezados no dimensionamento.

O carregamento da coluna é constituído pelas reações das vigas que nela chegam e do carregamento acumulado dos pilares superiores. Para este exemplo, a carga aplicada no pilar (P_k) é de 1500 kN.

6.1.4 Dimensionamento da armadura longitudinal

A situação de projeto para o caso apresentado é a de compressão centrada, com a força atuando no centroide do pilar. Logo, para o dimensionamento, as situações de cálculo são de flexo-compressão normal, com a força agindo no eixo x e y conforme excentricidades que serão calculadas a seguir. Deve-se iniciar o dimensionamento pela direção de maior esbeltez, atribuindo à outra situação de cálculo essencialmente a função de verificação e de complementação da envoltória de momentos resistentes. Os eixos, bem como a nomeação dos elementos geométricos do pilar podem ser observados na Figura 6.1.

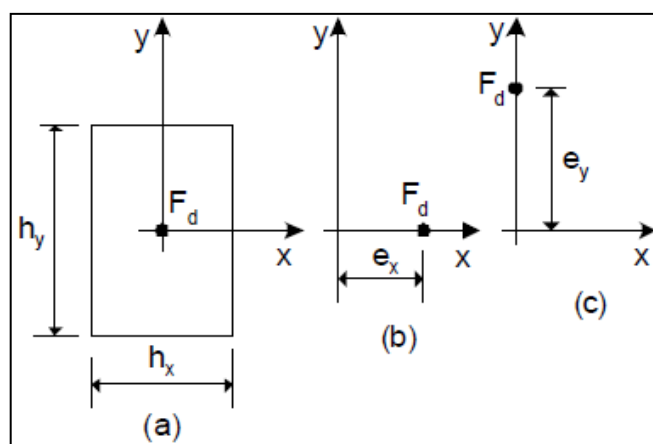


Figura 6.1: situação do pilar intermediário e hipóteses de cálculo

(Fonte: Araújo, 2014c)

Para prosseguir com o dimensionamento, primeiramente, deve-se ter em posse o valor do índice de esbeltez. Para um pilar de seção retangular, este valor pode ser determinado conforme a equação 6.1.

$$\lambda = \frac{l_e \cdot \sqrt{12}}{h} \quad (6.1)$$

Logo, têm-se para x e y respectivamente:

$$\lambda_x = \frac{2,60m \cdot \sqrt{12}}{0,30m} = 30,0$$

$$\lambda_y = \frac{2,60m \cdot \sqrt{12}}{0,40m} = 22,5$$

A excentricidade de primeira ordem (e_1) deve ser igual ao maior dos dois termos descritos na equação 6.2 abaixo:

$$e_1 \geq \begin{cases} e_{1,calc} \\ e_{1,min} \end{cases} \quad (6.2)$$

Onde:

$$e_{1,calc} = e_i + e_a;$$

e_i é a excentricidade inicial na seção intermediária do pilar [cm];

$e_{1,min}$ é a excentricidade mínima [cm].

Como o pilar intermediário não possui momento significativo aplicado, a excentricidade inicial será igual a zero. A excentricidade acidental, que leva em conta as imperfeições do eixo do pilar, é dada pela equação 6.3.

$$e_a = \frac{l_e}{400} \quad (6.3)$$

Logo, tanto para x quanto para y, a excentricidade acidental é:

$$e_{ax} = e_{ay} = \frac{260cm}{400} = 0,65cm$$

A excentricidade mínima de primeira ordem, que cobre a simplificação feita ao desprezar os possíveis momentos iniciais existentes, é calculada de acordo com a equação 6.4 abaixo:

$$e_{1,m\hat{m}} = 1,5 + 0,03 \cdot h \quad (6.4)$$

Logo:

$$e_{1x,m\hat{m}} = 1,5 + 0,03 \cdot 30cm = 2,40cm$$

$$e_{1y,m\hat{m}} = 1,5 + 0,03 \cdot 40cm = 2,70cm$$

Retornando à equação 6.2, têm-se:

$$e_{1x} \geq \begin{cases} 0 + 0,65cm \\ 2,40cm \end{cases} \therefore e_{1x} = 2,40cm$$

$$e_{1y} \geq \begin{cases} 0 + 0,65cm \\ 2,70cm \end{cases} \therefore e_{1y} = 2,70cm$$

Para verificar se o pilar em análise é esbelto ou curto, faz-se necessário a determinação do coeficiente λ_1 em relação aos eixos. O coeficiente λ_1 depende principalmente de fatores como: a excentricidade relativa de 1ª ordem; a vinculação dos extremos da coluna isolada; e a forma do diagrama do momento de 1ª ordem. Tal coeficiente pode ser calculado pela equação 6.5.

$$\lambda_1 = \frac{25 + 12,5 \cdot e_i/h}{\alpha_b} \quad (6.5)$$

Onde:

$\alpha_b = 1$ para pilares biapoiados, sem cargas transversais, apresentando momentos menores do que o momento mínimo estabelecido no item 11.3.3.4.3 da NBR 6118:2014.

Assim, conforme a equação 6.5 e as considerações feitas anteriormente sobre a excentricidade inicial, $\lambda_1=25$ para as duas direções. No entanto, segundo a NBR 6118:2014, λ_1 deve respeitar a condição de, no mínimo, ser igual à 35 e, no máximo, ser igual à que 90. Diante disso, assume-se 35 como o valor final de λ_1 .

Percebe-se que os valores de λ_x e λ_y não superam λ_1 , logo o pilar em estudo se refere a um pilar curto. Esta situação dispensa a necessidade da incorporação dos efeitos de segunda ordem no dimensionamento. Assim, tem-se:

$$e_{2x} = e_{2y} = 0cm$$

Além das excentricidades supracitadas, a excentricidade de fluência (e_{cc}) também compõe o cálculo da excentricidade total. No entanto, de acordo com o apontado pela NBR 6118:2014, como o índice de esbeltez não superou 90, ela pode ser desprezada. Desta maneira, as excentricidades totais em x e y são:

$$e_x = 2,40\text{cm}$$

$$e_y = 2,70\text{cm}$$

De posse das excentricidades, determina-se a armadura necessária para cada situação de cálculo. Para isto, faz-se necessário o cálculo dos esforços:

$$N_d = 1,4 \cdot 1500 \text{ kN}$$

$$N_d = 2100 \text{ kN}$$

$$M_{dx} = 2100 \text{ kN} \cdot 2,40 \text{ cm} \therefore 5040 \text{ kNcm}$$

$$M_{dy} = 2100 \text{ kN} \cdot 2,70 \text{ cm} \therefore 5670 \text{ kNcm}$$

Para a direção x, têm-se $d = 25\text{cm}$ e $d' = 5\text{cm}$, verificando a necessidade de uma área de aço (A_s) de $8,21\text{cm}^2$, representando uma taxa de armadura de $0,684\%$, o que respeita o valor de taxa de armadura mínima exigido de $0,604\%$ (veja equação 6.6) e o valor de taxa de armadura máxima.

$$\rho_{min} = 0,15 \cdot \frac{f_{cd}}{f_{yd}} \cdot v_o \geq 0,40\% \quad (6.6)$$

Onde:

$$v_o = \frac{N_d}{A_c \cdot f_{cd}} \geq 0,5 \therefore \frac{1,4 \cdot 1500\text{kN}}{(0,30\text{m} \cdot 0,40\text{m}) \cdot 17860 \frac{\text{kN}}{\text{m}^2}} \geq 0,5 \therefore v_o = 0,980$$

Para a direção y, por sua vez, têm-se $d = 35\text{cm}$ e $d' = 5\text{cm}$, verificando a necessidade de uma área de aço (A_s) de $7,18\text{cm}^2$. Logo, a primeira situação de cálculo apresentada é a que governa o dimensionamento do pilar.

Adota-se, como solução, 4 barras com diâmetro de 25 mm cada (20 cm^2), o que representa uma alternativa usual e suficiente para cumprir com as exigências normatizadas. Além disto, para respeitar o espaçamento máximo entre os eixos das barras longitudinais e o espaçamento livre

mínimo na seção do pilar, adotou-se neste primeiro momento a disposição construtiva exposta na Figura 6.2.

6.1.5 Disposição da armadura transversal

Os estribos adotados possuem diâmetro de 5 mm. A regra para o espaçamento dos estribos é dada de forma que o mesmo seja inferior à 20 cm, à 12 vezes o valor do diâmetro da armadura longitudinal (30 cm) e à menor dimensão externa da seção da peça (30 cm). No entanto, como o diâmetro do estribo adotado é menor que um quarto do diâmetro da armadura longitudinal, utiliza-se o espaçamento máximo conforme a relação exposta na equação 6.7 extraída do item 18.4.3 da NBR 6118:2014.

$$\frac{90000}{f_{yk}} \cdot \frac{\phi_t^2}{\phi_l} \therefore \frac{90000}{500} \cdot \frac{0,5^2}{2,5} = 18cm \quad (6.7)$$

Considerando que o comprimento do pilar é de 2,60m. Para suprir com as especificações da norma, optou-se para uma armadura transversal 15 estribos com diâmetro de 5 mm cada espaçados de 18cm.

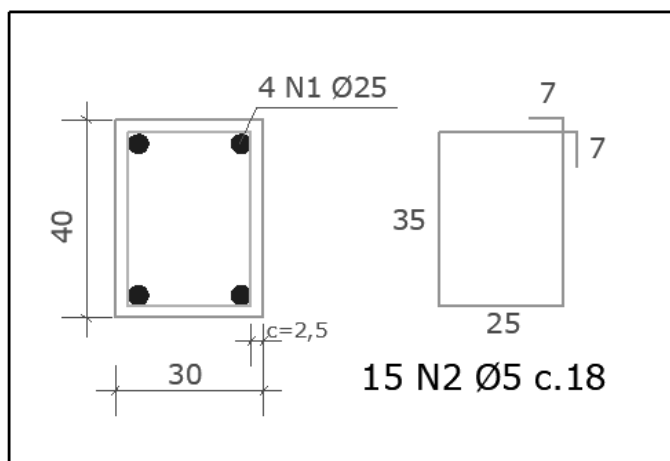


Figura 6.2: disposição construtiva preliminar [cm].

(Fonte: Elaborada pelo autor)

6.2 VERIFICAÇÃO DO DIMENSIONAMENTO PARA ATENDER O TRRF CONFORME A NBR 15200:2012

Para proceder com a verificação do dimensionamento do pilar, utiliza-se o gráfico G.1 do Anexo G da NBR 15200:2012 que apresenta as dimensões mínimas do pilar considerando o

TRF, a menor dimensão da seção e o valor da distância do eixo da armadura longitudinal até a face exposta ao fogo (c_1), sendo 4,25 cm (2,5 cm+0,5 cm+1,25cm) para a presente análise.

O gráfico é elaborado conforme o Método analítico para pilares (item 8.3 da respectiva norma) e engloba situações em que os pilares tenham mais de uma face exposta ao fogo. Para o uso do gráfico, algumas limitações devem ser respeitadas:

$$a) \frac{A_s}{A_c} \leq 0,04 \therefore \frac{20 \text{ cm}^2}{30 \text{ cm} \cdot 40 \text{ cm}} = 0,017$$

$$b) h > b \therefore 40 \text{ cm} > 30 \text{ cm}$$

$$c) e_1 < 0,15 \cdot b \therefore 0,65 \text{ cm} < 4,5 \text{ cm}$$

$$d) l_{ef,fi} \leq 4m \therefore 2,6 \text{ m} < 4 \text{ m}$$

$$e) \mu_{fi} \leq 0,7 \therefore \frac{N_{sd,fi}}{N_{rd}} \leq 0,7 \therefore \frac{N_{sd,fi}}{A_c \cdot \sigma_{cd} + A_s \cdot \sigma_{sd}} = \frac{1500 \text{ kN}}{3448,03 \text{ kN}} = 0,435 \leq 0,7$$

Onde:

A_c é área da seção de concreto [cm²].

Partindo da confirmação de cumprimento das limitações, pode-se, através da leitura do gráfico, verificar o dimensionamento. Verifica-se que para um pilar com a menor dimensão de 300 mm para um TRRF de 90 minutos considerando uma edificação residencial com altura maior que 23 m (NBR 14432:2001), necessita-se que c_1 seja, no mínimo, igual à aproximadamente 5,6 cm. Logo, para atender as especificações da norma, deve-se aumentar o cobrimento adotado no começo do estudo, alterando-o para 4,0 cm com c_1 de 5,75 cm. Para concluir, faz-se imprescindível retornar à NBR 6118:2014 e verificar se o novo dimensionamento respeita as especificações de espaçamento máximo e mínimo, verificação esta que foi devidamente realizada. Na Figura 6.3, pode-se observar a disposição construtiva final do pilar.

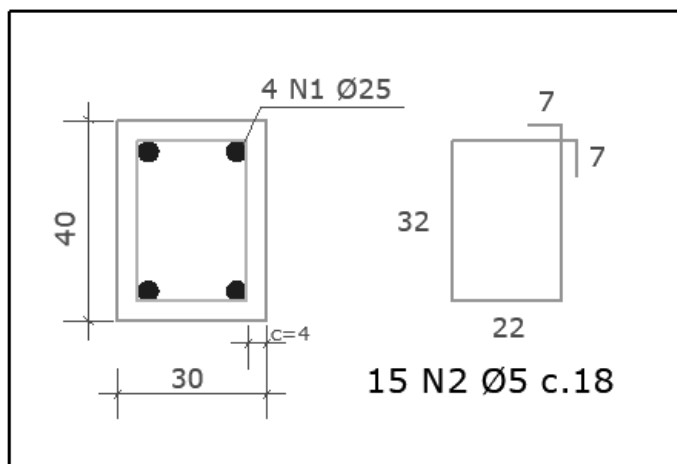


Figura 6.3: disposição construtiva final [cm].

(Fonte: Elaborada pelo autor)

6.3 ANÁLISE NUMÉRICA DA COLUNA PELO MODELO CRIADO NO ANSYS

Neste subitem, apresenta-se a simulação numérica do pilar dimensionado conforme a normatização nacional. Primeiramente, a estrutura foi exposta ao incêndio por 150 min, adotou-se um tempo maior que o estabelecido pelo TRRF (90 min) por não saber previamente quanto tempo os pilares resistiriam na análise termomecânica. Após, verificou-se a segurança do elemento estrutural para suportar o carregamento de serviço estabelecido com os efeitos das altas temperaturas aplicados simultaneamente. Salienta-se que, para fins comparativos, as análises térmica e termomecânica foram feitas para o pilar sem e com a verificação proposta pela NBR 15200:2012.

Na Figura 6.5, pode-se observar a elevação da temperatura no concreto de acordo com a profundidade medida a partir da face exposta, na linha média da seção transversal (0 mm, 25 mm, 35 mm, 50 mm, 100 mm e 150 mm). Através da Figura 6.6, apresenta-se a elevação da temperatura nas barras de aço longitudinais.

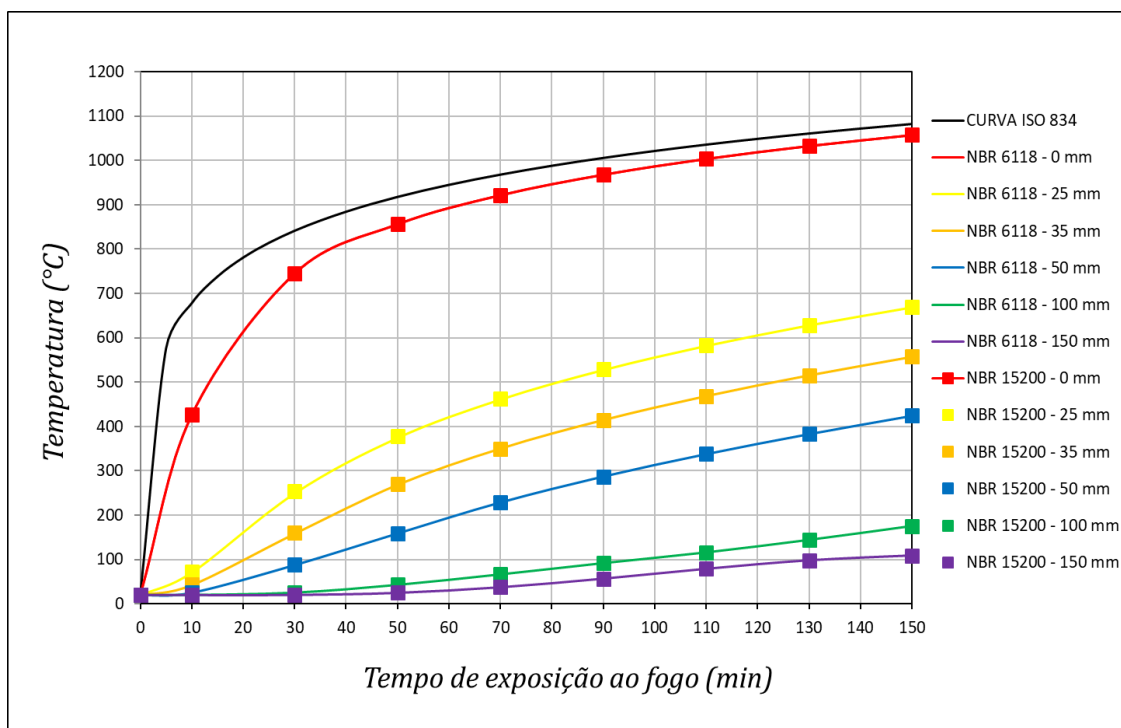


Figura 6.4: comparação entre os valores da elevação da temperatura no concreto obtidas pelo pilar com e sem verificação.

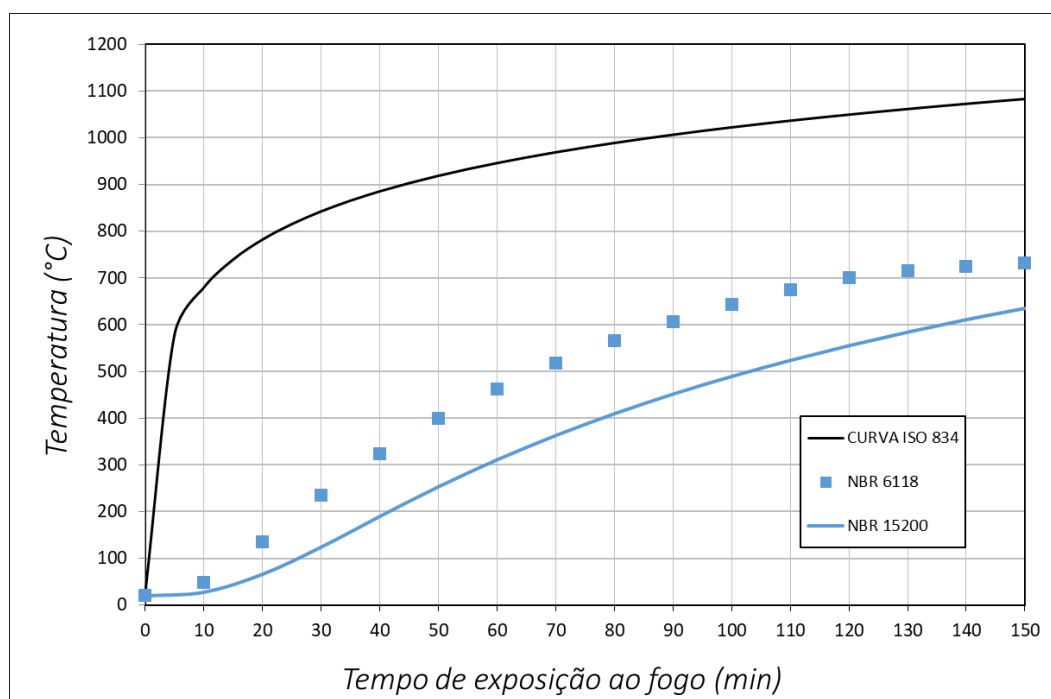


Figura 6.5: comparação entre os valores da elevação da temperatura no aço obtidas pelo pilar com e sem verificação.

Verifica-se com a Figura 6.5 que a posição da armadura pouco ou nada altera a distribuição de temperatura no concreto. A máxima diferença encontrada foi de 2,7% para um afastamento de 25 mm aos 10 minutos de incêndio. Isto reforça a ideia mencionada no item 3.1.1 de que a área das barras de aço em comparação à de concreto é muito reduzida e a temperatura em suas seções uniformiza-se rapidamente.

Percebe-se na Figura 6.6 e com auxílio da Tabela 6.1 que a peça não verificada exibe uma temperatura nas barras de aço de 607,2°C para um tempo de incêndio de 90 minutos enquanto a peça verificada apresenta uma temperatura de 452,0°C, o que representa uma redução de aproximadamente 34% na temperatura.

De acordo com o apontado por Caldas e Fakury (2006), tradicionalmente se assume que elementos de aço sem proteção falham para temperaturas entre 550 °C e 650°C, sendo esta considerada uma faixa de temperatura crítica em que o aço perderia completamente sua capacidade resistente. Com isso, conclui-se que, ao contrário do dimensionamento feito sem o uso da NBR 15200:2012, o aço no pilar dimensionado considerando o incêndio está seguro.

Tabela 6.1: comparação entre os valores da elevação da temperatura no concreto obtidas pelo pilar com e sem verificação

Tempo de incêndio (min)	Temperatura do aço [°C]		Redução da temperatura (%)
	NBR 6118	NBR 15200	
0	20,0	20,0	0
10	48,8	27,8	76
20	135,8	66,4	105
30	234,9	124,6	89
40	323,3	190,3	70
50	398,7	253,7	57
60	462,9	311,5	49
70	518,1	363,4	43
80	565,6	410,0	38
90	607,2	452,0	34
100	642,9	489,8	31
110	673,9	524,2	29
120	701,5	555,7	26
130	715,4	584,6	22
140	724,4	611,4	18
150	731,9	635,5	15

Por fim, com a Figura 6.7, faz-se possível, através do deslocamento axial pelo tempo de incêndio, analisar o comportamento termomecânico dos pilares. Verifica-se através desta análise que tanto o pilar verificado com a NBR 15200:2012 quanto o não verificado atingem e ultrapassam o TRRF de 90 minutos. Isto evidencia que a norma para projetos de estruturas em situação de incêndio é conservadora para a situação analisada neste exemplo. Apontando que a única preocupação da mesma ao aumentar o cobrimento de concreto é proteger as barras de aço de modo que apresentem temperaturas menos elevadas e, com isso, situações mais seguras.

Para a análise termomecânica, considerando o aumento do cobrimento de concreto em 1,5 cm conforme se o gráfico G.1 do Anexo G da NBR 15200:2012, tem-se um TRF de 130 minutos, enquanto que o pilar dimensionado apenas conforme a NBR 6118:2014 apresenta um TRF de 125 min. Isto representa um ganho de apenas 3,85% no tempo de resistência ao fogo do pilar em questão. Este ganho reduzido já era esperado visto que a temperatura no concreto não varia com a mudança de posição das barras de aço e o pilar em estudo está submetido a um carregamento centrado.

Em suma, tanto a análise térmica quanto a termomecânica permitem concluir que o dimensionamento feito pela NBR 6118:2014 em conjunto com a NBR 15200:2012 oferece maior segurança aos pilares em concreto armado. No entanto, estudos mais aprofundados são necessários, incluindo um maior número de casos, variando seções dos pilares, intensidade de carregamentos, excentricidades, propriedades resistentes, entre outros.

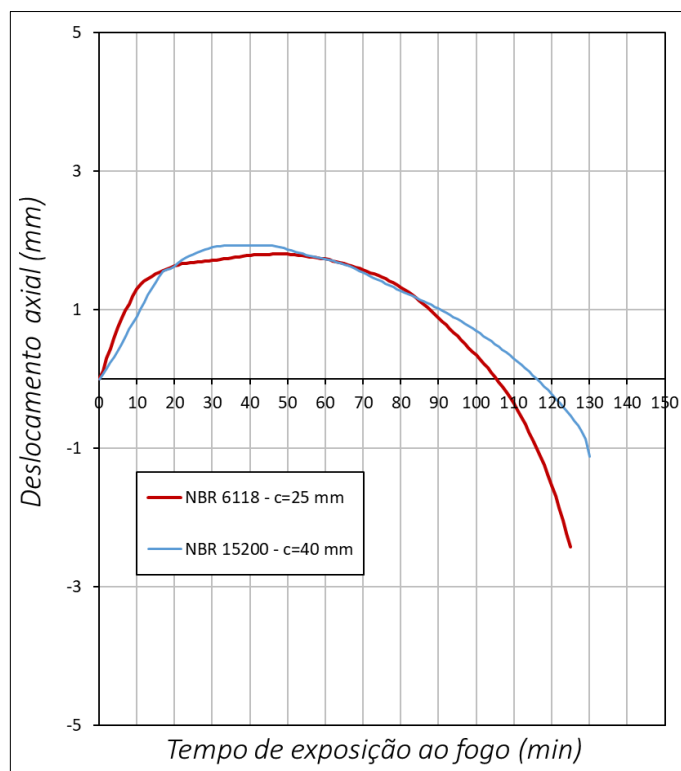


Figura 6.6: deslocamento axial da coluna em função do aumento da temperatura.

7 CONSIDERAÇÕES FINAIS

No trabalho realizado, um modelo numérico tridimensional capaz de simular o comportamento térmico e termomecânico de colunas de concreto armado expostas ao incêndio foi proposto. O modelo foi desenvolvido através *scripts* elaborados na linguagem APDL do *software* ANSYS 19.1 e embasado no método dos elementos finitos. No contexto dessa pesquisa, é oportuno ressaltar que a proposta da dissertação incluiu considerações como: modelo não linear dos materiais constituintes do concreto armado; não linearidade geométrica das colunas; adoção da análise no regime transiente com as propriedades dos materiais variando em função da temperatura.

O modelo criado permitiu a avaliação térmica e termomecânica em qualquer ponto das colunas para qualquer incremento de tempo. As temperaturas em cada nó do elemento obtidas com a análise térmica foram utilizadas como carregamento na análise estrutural através do comando LREAD, possibilitando assim a variação das propriedades dos materiais e o acoplamento dos dois campos de análises.

Para o concreto, utilizou-se o modelo proposto por Willam e Warnke (1975), tal modelo é disponibilizado pelo próprio pacote computacional ANSYS. Considerações foram feitas para facilitar a convergência, adotando como critério de fissuração a superfície de falha de Willam e Warnke (1975) e como critério de esmagamento do concreto a relação constitutiva apresentada pelo EN 1992-1-2 (2004). Utilizou-se para o aço o modelo de armadura discreta, para isso se fez necessário a coincidência entre os nós pertinentes as malhas das armaduras e do concreto.

7.1 CONCLUSÕES

O capítulo 5, referente à validação do modelo desenvolvido, possibilita avaliar a eficaz convergência entre os resultados numéricos, analíticos e experimentais. Apresentam-se diversas comparações com estudos encontrados na bibliografia.

Nesta dissertação, a estratégia adotada é validar o modelo numérico de forma progressiva, começando por análises mais simples e menos complexas, com o objetivo de evoluir para atingir a etapa final que se refere à análise termomecânica tridimensional.

Inicialmente, no item 5.1, expõem-se diversas comparações para análise térmica bidimensional, desprezando a presença do aço e variando a seção da coluna conforme as dimensões apresentadas pelo Anexo A do EN 1992-1-2 (2004). Os resultados desta análise foram, em geral, extremamente próximos aos resultados expostos pela norma europeia. Tal coincidência de resultados já era esperada, visto que se trata de um modelo simples que permite uma maior calibração e controle das variáveis envolvidas. Esta afirmação é atribuída ao fato de que a norma expõe todos os valores adotados por ela para cada variável que contribui com o problema.

No item 5.2, tem-se o segundo passo da concepção do modelo, referindo-se à análise térmica tridimensional. Adotaram-se pilares testados recentemente por Bolina (2016) no *itt Performance*/UNISINOS para validação do modelo numérico. A metodologia desta análise é a mesma utilizada para a análise bidimensional ao utilizar elementos de superfície para simular a colaboração da radiação e convecção no incremento térmico. As grandes diferenças consistem na possibilidade de avaliar o volume inteiro do pilar e incorporar a armadura à análise. Ainda que a temperatura seja homogênea no eixo longitudinal do elemento estrutural, a análise tridimensional é essencial para proceder com a análise acoplada.

Os resultados encontrados na verificação tridimensional são satisfatórios, pois o comportamento das curvas de evolução térmica converge com o encontrado experimentalmente. Todavia, devido ao concreto ser um material heterogêneo de difícil previsão exata do seu comportamento, existe, ainda que pequena, uma diferença entre os valores encontrados. Contudo, a resposta numérica sendo um pouco mais severa que a experimental na maioria dos pontos analisados, permite-se concluir que o modelo proposto é capaz de oferecer uma resposta próxima da experimental e favorável à segurança.

Apresenta-se na validação da análise estrutural (item 5.3) uma importante conclusão que consiste na comparação, à temperatura ambiente, entre respostas obtidas utilizando as relações constitutivas do concreto indicadas pelo EN 1992-1-2 (2004) e pelo Código Modelo *fib* (2010). Conclui-se, ao comparar com resultado experimental, que o proposto por *fib* (2010) simula melhor o comportamento do concreto em temperatura ambiente.

Além disso, a validação da análise estrutural permite avaliar os critérios adotados para concepção do modelo estrutural que engloba, entre outros, fatores como: aplicação do carregamento; condições de contorno; definição da malha; propriedades mecânicas dos materiais; e opções de solução.

Com a concordância tanto no comportamento da coluna de concreto armado submetida à compressão axial, quanto na força necessária para ruptura da mesma, conclui-se que o modelo desenvolvido é consistente e apto para prever o comportamento mecânico das peças estruturais.

Por último, no desenvolvimento da metodologia, uma vez que se tem o modelo estrutural e o térmico validados e funcionando de forma separada, acoplam-se as análises através de ferramentas disponibilizadas pelo *software*. No item 5.4, apresenta-se então a validação do modelo final termomecânico com resultados experimentais e analíticos amplamente utilizados em pesquisas anteriores encontradas durante a pesquisa.

Os resultados expostos evidenciam a boa convergência de valores nas temperaturas durante o incêndio padrão tanto para o concreto quanto pro aço. Nas análises termomecânicas, apresentam-se validações consistentes, pois se tem um bom comportamento numérico da estrutura e tempos de ruptura muito próximos do encontrado em laboratório (cerca de 5%). Além disso, tem-se novamente uma análise comparativa entre os modelos numéricos utilizando os diagramas tensão-deformação sugeridos pelo Código Modelo *fib* (2010) e pelo EN 1992-1-2 (2004). Conclui-se que diferentemente do modelo em temperatura ambiente, tratando-se de situação de incêndio a curva EN 1992-1-2 (2004) apresenta um comportamento mais próximo do encontrado no campo experimental. Por este motivo, esta curva foi adotada para todas as análises termomecânicas seguintes.

Ao final da dissertação, expõe-se uma aplicação prática de um pilar dimensionado pela NBR 6118:2014 e verificado pela norma de incêndio NBR 15200:2012. Com este estudo, evidencia-se que a norma de projetos de estruturas de concreto em situação de incêndio é genérica e conservadora. As prescrições da norma NBR 15200:2012 se atentam somente à espessura de cobertura de concreto e às dimensões da seção demonstrando que a maior preocupação é a proteção das barras de aço, com o intuito de que as mesmas apresentem temperaturas menos severas. Isto de fato é comprovado através da análise térmica apresentada, onde se notabiliza uma redução de 34% na temperatura do aço ao utilizar o revestimento proposto para a situação de incêndio.

Por outro lado, pela a análise termomecânica se percebe que apesar do pilar verificado possuir maior tempo de resistência, o dimensionamento realizado somente pela NBR 6118:2012 já seria suficiente para atingir o tempo de resistência ao fogo definido pela NBR 14432:2001. Para o

estudo apresentado, tem-se um ganho reduzido de tempo de resistência ao fogo obedecendo as verificações da NBR 15200:2012.

Diante disso, conclui-se que estudos mais aprofundados como, por exemplo, análises de confiabilidade estrutural em situação de incêndio, são necessários. Através destes estudos, com uma amostragem capaz de assegurar o comportamento de pilares de concreto armado expostos às altas temperaturas em diversas situações de cálculo diferentes, faz-se possível conceder à NBR 15200:2012 uma melhor calibração em suas especificações, tornando-a menos conservadora e mais específica para cada situação.

Por fim, conclui-se que o objetivo principal bem como os secundários traçados inicialmente foram alcançados. A revisão bibliográfica realizada possibilitou a definição adequada da metodologia a ser utilizada para criação no modelo numérico. Com isso, fez-se possível desenvolver um modelo capaz de avaliar o comportamento de colunas de concreto armado em situação de incêndio viabilizando a extrapolação de análises realizadas previamente em laboratório.

7.2 SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS

A temática incêndio em elementos estruturais ainda requer aprimoramento e ampliação do conhecimento técnico e científico tanto no cenário nacional quanto internacional. A partir do modelo numérico criado no presente trabalho, pode-se evoluir em diversas questões, tais como:

- a) adequação do modelo para análise de outros elementos estruturais como vigas, lajes e pórticos;
- b) desenvolvimento de análises paramétricas variando, por exemplo, dimensões das peças estruturais, diâmetros das barras de aço, cobertura do concreto, teor de umidade e propriedades resistentes, em prol de um maior entendimento da importância de cada variável para a resposta termoestrutural;
- c) incorporação de um material definido pelo usuário (*Usermat*), para contornar os problemas encontrados com o modelo do concreto oferecido pelo ANSYS;
- d) incorporação do fenômeno de *spalling* às análises termomecânicas, considerando a degradação da estrutura durante o incêndio. Entendendo o

concreto como um material multifásico, um meio poroso onde a água desempenha um papel fundamental na criação de tensões internas que implicam no deslocamento de porções de concreto;

- e) desenvolvimento de modelos probabilísticos para incertezas e suas aplicações à segurança e a confiabilidade de estruturas em situação de incêndio;
- f) extensão da estratégia adotada para avaliar o comportamento termomecânico de materiais novos que vêm sendo inseridos no mercado da construção civil como, por exemplo, elementos de concreto armado reforçados por fibras estruturais e materiais inovadores como o concreto têxtil.

8 REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ABAQUS. **Abaqus User's Manual**. Documentation, 2014.

ALBUQUERQUE, G. B. M. L., **Dimensionamento de vigas de concreto armado em situação de incêndio**. Dissertação (Mestrado) - Escola Politécnica da Universidade de São Paulo. Departamento de Engenharia de Estruturas e Geotécnica. São Paulo, 2012.

AMERICAN SOCIETY TESTING AND MATERIALS. ASTM E119: **Standard test methods for fire tests of building construction and materials**. West Conshohocken, 2000.

Anderberg, Y. **TCD 5.0 - User's Manual. Fire Safety Design**, Lund, 1997.

ANSYS INC. **Ansys Release 10.0** – Documentation, 2016.

ARAÚJO, J. M. (a) **Curso de Concreto Armado**. 4º ed. Rio grande: Dunas, 2014. v. 1.

ARAÚJO, J. M. (b) **Curso de Concreto Armado**. 4º ed. Rio grande: Dunas, 2014. v. 3.

ARAÚJO, J. M. (c) **Curso de Concreto Armado**. 3º ed. Rio grande: Dunas, 2014. v. 4.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. Dimensionamento de estruturas de aço de edifícios em situação de incêndio – Procedimento: **NBR 14323**. Rio de Janeiro, 2013.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. Exigências de resistência ao fogo de elementos construtivos de edificações - Procedimento: **NBR-14432**. Rio de Janeiro, 2001.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. Projeto de estruturas de concreto em situação de incêndio. **NBR-15200**. Rio de Janeiro, 2012.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. Componentes construtivos estruturais - determinação da resistência ao fogo: **NBR-5628**. Rio de Janeiro, 2001.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. Projeto de estruturas de concreto: **NBR-6118**. Rio de Janeiro, 2014.

BALAJI, A.; NAGARAJAN, P.; PILLAI, M. **Validation of Indian standard code provisions for fire resistance of flexural** . Songklanakarin Journal of Science and Technology, Vol. 37 (2), 183-192, 2015.

BAMONTE, P.; LOMONTE, F. **Reinforced concrete columns exposed to standard fire: Comparison among different constitutive models for concrete at high temperature.** Fire Safety Journal, Vol. 71, 310-323, 2015.

BOLINA, F.L. **Avaliação experimental da influência dos requisitos de durabilidade na segurança contra incêndio de protótipos de pilares pré-fabricados de concreto armado.** Dissertação (Mestrado) – Unidade Acadêmica de Pesquisa e Pós-Graduação, Universidade do Vale do Rio dos Sinos, São Leopoldo, 2016.

BRATINA, S.; CAS, B.; SAJE, M.; PLANINC, I. **Numerical modelling of behaviour of reinforced concrete columns in fire and comparison with Eurocode 2.** International Journal of Solids and Structures, Vol. 42, 5715-5733, 2005.

BUCHANAN, A. H.; ABU, A. K. **Structural design for fire safety.** Second edition. | Chichester, West Sussex, United Kingdom: John Wiley & Sons Inc., 2017.

BULLETIN D'INFORMATION [du] COMITÉ EURO-INTERNACIONAL DU BÉTON. **Design of Concrete Structures for Fire Resistance – Preliminary draft on na Appendix to the CEB-FIP Model Code for Concrete Structures.** Lausanne: CEB/FIP, n. 145, 1982.

CALDAS, R. B.; FAKURY, R. H. **Análise numérica de pilares mistos tubulares de aço preenchidos com concreto em situação de incêndio.** XXVII Iberian Latin American Congress on Computational Methods in Engineering, 2006.

CALDAS, R. B. **Análise numérica de estruturas de aço, concreto e mistas em situação de incêndio.** Tese (Doutorado) - Escola de Engenharia, Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte, 2008.

CÁNOVAS, F.M. **Patologia e Terapia do Concreto Armado.** São Paulo: Pini, 1988.

COOK, R. D. ; YUNUS, S. M.; PAWLAK, T. P. **Solid Elements with Rotational Degrees of Freedom Part 1 and Part 2.** International Journal for Numerical Methods in Engineering, Vol. 31, 573-610, 1991.

COSTA, C. N. **Dimensionamento de elementos de concreto armado em situação de incêndio.** Tese (Doutorado) - Escola Politécnica, Universidade de São Paulo. Departamento de Engenharia de Estruturas e Geotécnica. São Paulo, 2008.

COSTA, C. N.; SILVA, V. P. **Estruturas de concreto em situação de incêndio.** XXX Jornadas Sul-Americanas de Engenharia Estrutural, 2002.

DIANA. **User's Manual - Release 10.2** – Documentation, 2017.

DING, J.; WANG, Y. **Realistic modelling of thermal and structural behavior of unprotected concrete filled tubular columns in fire.** Journal of Constructional Steel Research, Vol. 64, 1086-1102, 2008.

DOTREPPE, J. C.; FRANSSSEN, J. M. **The use of numerical models for the fire analysis of reinforced concrete and composite structures.** Engineering Analysis, v. 2, n. 2, 1985.

EUROPEAN COMMITTEE FOR STANDARDIZATION. **EN 1991-1-2:** Eurocode 1: actions on structures - part 1.2: general actions - actions on structures exposed to fire. Brussels: CEN, 2002.

EUROPEAN COMMITTEE FOR STANDARDIZATION. **EN 1992-1-1:** Eurocode 2: design of concrete structures - part 1.1: general rules and rules for buildings. Brussels: CEN, 2004.

EUROPEAN COMMITTEE FOR STANDARDIZATION. **EN 1992-1-2:** Eurocode 2: design of concrete structures - part 1.2: general rules – structural fire design. Brussels: CEN, 2004.

EUROPEAN COMMITTEE FOR STANDARDIZATION. **EN 1993-1-2:** Eurocode 3: design of steel Structures. part 1-2: General rules – Structural Fire Design. Brussels: CEN, 2005.

FÉDÉRATION INTERNATIONALE [du] BÉTON (*fib*). **Fire design of concrete structures: materials, structures and modeling.** Lausanne: International Federation for Structural Concrete, 2007. (Bulletin. *fib*; 38)

FÉDÉRATION INTERNATIONALE [du] BÉTON (*fib*). **Model Code 2010.** Vol.1. Lausanne: International Federation for Structural Concrete, 2010. (Bulletin. *fib*; 55)

FENG, M.; WANG, Y. C.; DAVIES, J. M. **Axial strength of cold-formed thin-walled steel channels under non-uniform temperatures in fire.** Fire Safety Journal, Vol. 38, 679-707, 2003.

FERNANDES, F. P. D. **Análise numérica de vigas mistas de madeira e concreto em situação de incêndio.** Dissertação (Mestrado) - Escola de engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Carlos, 2018.

FURUMURA, F.; SHINOHARA, Y. **Inelastic Behavior of Protected Steel beams and Frames in Fire.** Report of the Research Laboratory of Engineering Materials, 1-14, 1978.

GERKEN, A. L. R. **Materiais de proteção térmica para sistemas construtivos de baixo custo estruturados em aço.** Dissertação (Mestrado) - Escola de Engenharia, Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte, 2007.

INCROPERA, F. P.; DEWITT, D. P.; BERGMAN, T. L. e LAVINE, A. S. **Fundamentos de Transferência de Calor e Massa,** 6º Ed., LTC, 2008.

INTERNATIONAL ORGANIZATION FOR STANDARDIZATION. **ISO 834:** Fire resistance tests elements of building construction. Geneva, 2014.

JACOB, B; BALAJI, A.; JOHN, E. **Behaviour of concrete structures under fire – a comparative study between IS 456:2000 and finite element software ANSYS.** American Journal of Engineering Research (AJER), Vol. 3, 62-66, 2013.

JAIN, P.; RAO, R. **Analysis of Steel Frames Under Fire Environment.** International Journal for Numerical Methods in Engineering, Vol. 19, 1467-1478, 1983.

JEFFERS, A. e SOTELINO, E. **Modeling the response of structures in fire using fiber-based structural and thermal finite elements.** In: Anais do XXXII CILAMCE, Ouro Preto, Minas Gerais, 2011.

KIMURA, E. F. A. **Análise termoestrutural de pilares de aço em situação de incêndio.** Dissertação (Mestrado) - Escola de engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Carlos, 2009.

KIRCHHOF, L. D. **Estudo teórico-experimental da influência do teor de umidade no fenômeno de *spalling* explosivo em concretos expostos a elevadas temperaturas.** Tese (Doutorado) - Escola de Engenharia, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2010.

KODUR, V.K.R.; DWAIKAT, M. M. S. **Response of steel beam-columns exposed to fire.** Engineering Structures, Vol. 31, 369-379, 2009.

KODUR, V.K.R.; DWAIKAT, M. M. S. **A simplified approach for predicting temperature profile in steel members with locally damaged fire protection.** Fire Technology, Vol. 48, 493-512, 2012.

KODUR, V.K.R.; HARMATHY, T.Z. **Properties of Building Materials.** SFPE, Handbook of Fire Protection Eng., 3rd ed, 2002.

KOTINDA, T. I. **Modelagem numérica de vigas mistas aço-concreto simplesmente apoiadas: ênfase ao estudo da interface laje-viga.** Dissertação (Mestrado) - Escola de engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Carlos, 2006.

KRISHNA, D.A.; NARAYANAN, S.; PRIYADARSHINI, R.S. **FE Analysis of Reinforced Concrete Frames Exposed to Fire.** International Journal of Innovate Research in Science, Engineering and Technology (IJIRSET), Vol. 5, special issue 14, 2016.

KUMAR, P.; KODUR, V.K.R. **Modeling the behavior of load bearing concrete walls under fire exposure.** Construction and Building Materials, Vol. 154, 993-1003, 2017.

LANDESMANN, A. **Modelo Não-Linear Inelástico para Análise de Estruturas Metálicas Aporticadas em Condições de Incêndio.** Tese (Doutorado) - Programa de Engenharia Civil, COPPE/UFRJ, Rio de Janeiro, 2003.

LANDI, F. R. **Ação do incêndio sobre as estruturas de concreto armado**. São Paulo: EPUSP, 1986. (Boletim Técnico BT / PCC - 86 / 001).

LEMOS, P. S. B. **Estudo de estruturas de concreto sob altas temperaturas através do método dos elementos finitos**. Dissertação (Mestrado) - Escola de Engenharia, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2011.

LEONHARDT, F.; MONNING, E. **Estructuras de Hormigón Armado: Bases para el dimensionado de estructuras de hormigón armado**. 2º ed. Buenos Aires: El Ateneo, Vol. 3, 1988.

LIE, T. T.; LIN, T.D. **Fire Performance of Reinforced Concrete Columns**. Fire safety: Science and Engineering, ASTM, STP 882, 176-205, 1985.

LIENHARD IV, J. H.; LIENHARD V, J. H. **A heat transfer textbook**. 4º ed. Cambridge: Phlogiston Press, 2017.

LOMBA, N. C. F. **Resistência residual de vigas de betão armado após incêndio**. Dissertação (Mestrado) – Departamento de Engenharia Civil, Universidade de Aveiro, Aveiro, 2011.

LOURENÇO, L.; RODRIGUES, J.; BARROS, J.; SANTOS, S.; ALVES, A. **Betão Fibroso de Comportamento Melhorado ao fogo**. 4ª Jornadas Portuguesas de Engenharia de Estruturas. 2006.

MADENCI E.; GUVEN, I. **The finite element method and applications in engineering using ANSYS®**. New York: Springer; 2006.

MAXIMIANO, D. P. **Análise numérica avançada de estruturas de aço e de concreto armado em situação de incêndio**. Tese (Doutorado) - Escola de Minas, Universidade Federal de Ouro Preto, Ouro Preto, 2018.

RAMOS, R.F.; GIONGO, J.S. **Pilares de concreto armado sob ação centrada com resistência do concreto de 25 MPa**. Caderno de Engenharias de Estruturas, São Carlos, Vol. 7, n.27, 59-92, 2005.

REGOBELLO, R. **Análise numérica de seções transversais e de elementos estruturais de aço e concreto em situação de incêndio**. Dissertação (Mestrado) - Escola de engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Carlos, 2007.

RODRIGUES, J. P. C. **Recuperação de estruturas danificadas por incêndio – propriedades mecânicas residuais do aço e do betão**. Dissertação (Mestrado) - Universidade de Coimbra, Coimbra, 1994.

SANAD, A.M.; ROTTER, J. M.; USMANI, A.S.; O'CONNOR, M.A. **Composite Beams in Large Buildings under Fire – Numerical Modelling and Structural Behaviour**. Fire Safety Journal, Vol. 35, 165-188, 2000.

SANTOS, R. T. **Modelos numéricos de pilares mistos curtos de seções circulares de aço preenchidos com concreto em situação de incêndio**, Dissertação (Mestrado) - Escola de engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Carlos, 2009.

SARRAJ, M.; BURGESS, I.W.; DAVISON, J.; PLANK, R. **Finite element modelling of steel fin plate connections in fire**. Fire Safety Journal, Vol. 42, 408-415, 2007.

SILVA, V. P. ; SEITO, A. I.; GIL, A. A.; PANNONI, F. D., SILVA, R. O. S. B.; CARLO, U. D. **Segurança contra incêndio no Brasil**. São Paulo: Projeto Editora, 2008.

SILVA, V. P. **Estruturas de aço em situação de incêndio**. Tese (Doutorado) - Escola Politécnica, Universidade de São Paulo, São Paulo, 1997.

SILVA, V. P. **Projeto de estruturas de concreto em situação de incêndio**. São Paulo: Editora Blücher, 2012.

SILVA, J. C. G.; LANDESMANN, A.; RIBEIRO, F. L. B. **Procedimento para análise termomecânica inelástica de estruturas em situação de incêndio**. In: Anais do XXXIV CILAMCE, Pirenópolis, Goiás, 2013.

SOUZA JUNIOR, V. **Simulação computacional do comportamento de estruturas de aço sob incêndio**. Tese (Doutorado) - Escola de Engenharia, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2004.

TAYLOR, R. L.; BERESFORD, P. J.; WILSON, E. L. **A Non-Conforming Element for Stress Analysis**. International Journal for Numerical Methods in Engineering, Vol. 10, 1211-1219, 1976.

WANG, Y. C. **Steel and Composite Structures - Behavior and Design for Fire Safety**. London: Spon Press, 2002.

WANG, Y. C.; DAVIES, J. M. **An experimental study of non-sway loaded and rotationally restrained steel column assemblies under fire conditions: analysis of test results and design calculations**. Journal of constructional steel research, Vol. 59, 291-313, 2003.

WILLAM, K.J; WARNKE, E.P. **Constitutive model for triaxial behaviour of concrete**, International association of bridge and structural engineering conference, Vol. 19, Bergamo, Italy, 1975.

WILSON, E. L.; TAYLOR, R. L.; DOHERTY, W. P.; GHABOUSSI, J. **Incompatible Displacement Models**. Numerical and Computer Methods in Structural Mechanics. Editado por: Fenves, S. J.; et al. Academic Press, 43-57, 1973.

WU, H.J.; LIE, T.T. **Fire Resistance of Reinforced Concrete Columns: Experimental Studies**. Institute for Research in Construction Internal Report. No. 632, National Research Council Canada, Ottawa, 1992.

ZANG, C.; SILVA, J. C. G.; WEINSCHENK, C.; KAMIKAWA, D.; HASEMI, Y. **Simulation Methodology for Coupled Fire-Structure Analysis: Modeling localized fire tests on a steel column**. Fire Technology, Vol. 52, 239-262, 2016.

ZHU, H.L.; LIE, T.T. **Fire Resistance Evaluation of Reinforced Concrete Columns**. Institute for Research in Construction Internal Report. No. 639, National Research Council Canada, Ottawa, 1993.

APÊNDICE A – *Scripts* ANSYS APDL 19.1

A.1) Exemplo de *script* para análise térmica da Seção 16x30 cm (EN 1992-1-2 (2004))

```

!=====  

!  

!=====
! DEFINIÇÕES INICIAIS
!=====
!  

FINISH
/CLEAR
/GRA,POWER
/GST,ON
/PLO,INFO,3
/GRO,CURL,ON
/CPLANE,1
/RELOT,RESIZE
WPSTYLE,,,,,,,,,0
/RELOT,RESIZE
!  

/PREP7
/title, Analise termica bidimensional - SECAO 16X30cm (EN 1992-1-2 (2004))
!  

!-----
! ELEMENTOS
!-----
!  

ET,1,55      ! CONCRETO
!  

ET,2,151     ! ELEMENTO DE SUPERFICIE PARA CONVECCAO
KEYOPT,2,4,1
KEYOPT,2,5,1
KEYOPT,2,6,0
KEYOPT,2,8,5
KEYOPT,2,9,0
!  

ET,3,151     ! ELEMENTO DE SUPERFICIE PARA RADIACAO
KEYOPT,3,4,1
KEYOPT,3,5,1
KEYOPT,3,8,0
KEYOPT,3,9,1
!  

!-----
! CONSTANTES REAIS
!-----
!  

R,1,         ! CONCRETO
!  

R,2,         ! CONVECCAO
!  

!
```

R,3,1,5.67E-8 ! RADIACAO

!

=====

! PROPRIEDADES DOS MATERIAIS

=====

!

!-----

! CONCRETO

!-----

!

MPTEMP,,,,,,,, ! DENSIDADE, kg/m3

MPTEMP,1,20

MPTEMP,2,115

MPTEMP,3,200

MPTEMP,4,400

MPTEMP,5,1200

MPDATA,DENS,1,,2400

MPDATA,DENS,1,,2400

MPDATA,DENS,1,,2352

MPDATA,DENS,1,,2280

MPDATA,DENS,1,,2112

!

MPTEMP,,,,,,,, ! CALOR ESPECIFICO, J/(kg.°C)

MPTEMP,1,20

MPTEMP,2,80

MPTEMP,3,100

MPTEMP,4,101

MPTEMP,5,115

MPTEMP,6,120

MPTEMP,7,140

MPTEMP,8,160

MPTEMP,9,180

MPTEMP,10,200

MPTEMP,11,220

MPTEMP,12,240

MPTEMP,13,260

MPTEMP,14,280

MPTEMP,15,300

MPTEMP,16,320

MPTEMP,17,340

MPTEMP,18,360

MPTEMP,19,380

MPTEMP,20,400

MPTEMP,21,1200

MPDATA,C,1,,900

MPDATA,C,1,,900

MPDATA,C,1,,900

MPDATA,C,1,,1470

MPDATA,C,1,,1470

MPDATA,C,1,,1442.4

MPDATA,C,1,,1331.8
MPDATA,C,1,,1221.2
MPDATA,C,1,,1110.6
MPDATA,C,1,,1000
MPDATA,C,1,,1010
MPDATA,C,1,,1020
MPDATA,C,1,,1030
MPDATA,C,1,,1040
MPDATA,C,1,,1050
MPDATA,C,1,,1060
MPDATA,C,1,,1070
MPDATA,C,1,,1080
MPDATA,C,1,,1090
MPDATA,C,1,,1100
MPDATA,C,1,,1100

!

MPTEMP,,,,,,,, ! CONDUTIVIDADE TERMICA, W/(m.°C)

MPTEMP,1,20
MPTEMP,2,40
MPTEMP,3,60
MPTEMP,4,80
MPTEMP,5,100
MPTEMP,6,120
MPTEMP,7,140
MPTEMP,8,160
MPTEMP,9,180
MPTEMP,10,200
MPTEMP,11,220
MPTEMP,12,240
MPTEMP,13,260
MPTEMP,14,280
MPTEMP,15,300
MPTEMP,16,320
MPTEMP,17,340
MPTEMP,18,360
MPTEMP,19,380
MPTEMP,20,400
MPTEMP,21,420
MPTEMP,22,440
MPTEMP,23,460
MPTEMP,24,480
MPTEMP,25,500
MPTEMP,26,520
MPTEMP,27,540
MPTEMP,28,560
MPTEMP,29,580
MPTEMP,30,600
MPTEMP,31,620
MPTEMP,32,640
MPTEMP,33,660

MPTEMP,34,680
MPTEMP,35,700
MPTEMP,36,720
MPTEMP,37,740
MPTEMP,38,760
MPTEMP,39,780
MPTEMP,40,800
MPTEMP,41,820
MPTEMP,42,840
MPTEMP,43,860
MPTEMP,44,880
MPTEMP,45,900
MPTEMP,46,920
MPTEMP,47,940
MPTEMP,48,960
MPTEMP,49,980
MPTEMP,50,1000
MPTEMP,51,1020
MPTEMP,52,1200
MPDATA,KXX,1,,1.333
MPDATA,KXX,1,,1.3065
MPDATA,KXX,1,,1.2805
MPDATA,KXX,1,,1.2548
MPDATA,KXX,1,,1.2297
MPDATA,KXX,1,,1.205
MPDATA,KXX,1,,1.1808
MPDATA,KXX,1,,1.157
MPDATA,KXX,1,,1.1337
MPDATA,KXX,1,,1.1108
MPDATA,KXX,1,,1.0884
MPDATA,KXX,1,,1.0664
MPDATA,KXX,1,,1.0449
MPDATA,KXX,1,,1.0239
MPDATA,KXX,1,,1.0033
MPDATA,KXX,1,,0.98317
MPDATA,KXX,1,,0.96349
MPDATA,KXX,1,,0.94427
MPDATA,KXX,1,,0.92551
MPDATA,KXX,1,,0.9072
MPDATA,KXX,1,,0.88935
MPDATA,KXX,1,,0.87195
MPDATA,KXX,1,,0.85501
MPDATA,KXX,1,,0.83853
MPDATA,KXX,1,,0.8225
MPDATA,KXX,1,,0.80693
MPDATA,KXX,1,,0.79181
MPDATA,KXX,1,,0.77715
MPDATA,KXX,1,,0.76295
MPDATA,KXX,1,,0.7492
MPDATA,KXX,1,,0.73591


```

MPDATA,KXX,1,,0.72307
MPDATA,KXX,1,,0.71069
MPDATA,KXX,1,,0.69877
MPDATA,KXX,1,,0.6873
MPDATA,KXX,1,,0.67629
MPDATA,KXX,1,,0.66573
MPDATA,KXX,1,,0.65563
MPDATA,KXX,1,,0.64599
MPDATA,KXX,1,,0.6368
MPDATA,KXX,1,,0.62807
MPDATA,KXX,1,,0.61979
MPDATA,KXX,1,,0.61197
MPDATA,KXX,1,,0.60461
MPDATA,KXX,1,,0.5977
MPDATA,KXX,1,,0.59125
MPDATA,KXX,1,,0.58525
MPDATA,KXX,1,,0.57971
MPDATA,KXX,1,,0.57463
MPDATA,KXX,1,,0.57
MPDATA,KXX,1,,0.56583
MPDATA,KXX,1,,0.548800
!
MP,EMISS,1,0.7          ! EMISSIVIDADE
!
!
TOFFST,273.15          ! CONVERTER UNIDADE DE TEMPERATURA DO SOFTWARE DE
KELVIN PARA CELSIUS
!
!
!=====
! G E R A C A O D A G E O M E T R I A
!=====
!
/PREP7
RECTNG,0,0.16,-0.15,0.15,
!
ALLSEL,ALL
!
!-----
! MESHING
!-----
!
AATT,1
APLOT
/AUTO,1
/REP,FAST
!
!
esize,0.002
!
MSHAPE,0,2D

```

```

MSHKEY,1
AMESH,ALL
!
ALLSEL,ALL
!
GPLOT
!
NUMMRG,NODE,, , ,LOW ! Merge itens (prevalece os números menores)
NUMCMP,NODE
NUMCMP,ELEM
!
allsel,all
!
!-----
! EFEITOS DE SUPERFICIE
!-----
!
N,10000000,0,-.5,0          ! CRIACAO DO NO EXTRA
!
! CONVECCAO
!
TYPE,2
MAT,1
REAL,2
LSEL,S,EXT
lsel,u,line,,3
NSLL,S,1
ESURF,10000000
!
! RADIACAO
!
TYPE,3
REAL,3
MAT,1
LSEL,S,EXT
lsel,u,line,,3
NSLL,S,1
ESURF,10000000
ALLSEL,ALL
/REPLOT
!
!-----
! CURVA DE INCENDIO PADRAO ISO 834
!-----
!
*DEL,_FNCNAME
*DEL,_FNCMTID
*SET,_FNCNAME,'NBR14432'
!/INPUT,NBR14432.func
*DIM,%_FNCNAME%,TABLE,6,12,1

```

```

!
! Begin of equation: 20+345*log(8*{TIME}/60+1)
*SET,%_FNCNAME%(0,0,1), 0.0, -999
*SET,%_FNCNAME%(2,0,1), 0.0
*SET,%_FNCNAME%(3,0,1), 0.0
*SET,%_FNCNAME%(4,0,1), 0.0
*SET,%_FNCNAME%(5,0,1), 0.0
*SET,%_FNCNAME%(6,0,1), 0.0
*SET,%_FNCNAME%(0,1,1), 1.0, -1, 0, 8, 0, 0, 1
*SET,%_FNCNAME%(0,2,1), 0.0, -2, 0, 1, -1, 3, 1
*SET,%_FNCNAME%(0,3,1), 0, -1, 0, 60, 0, 0, -2
*SET,%_FNCNAME%(0,4,1), 0.0, -3, 0, 1, -2, 4, -1
*SET,%_FNCNAME%(0,5,1), 0.0, -1, 0, 1, 0, 0, -3
*SET,%_FNCNAME%(0,6,1), 0.0, -2, 0, 1, -3, 1, -1
*SET,%_FNCNAME%(0,7,1), 0.0, -1, 6, 1, -2, 0, 0
*SET,%_FNCNAME%(0,8,1), 0.0, -2, 0, 345, 0, 0, -1
*SET,%_FNCNAME%(0,9,1), 0.0, -3, 0, 1, -2, 3, -1
*SET,%_FNCNAME%(0,10,1), 0.0, -1, 0, 20, 0, 0, -3
*SET,%_FNCNAME%(0,11,1), 0.0, -2, 0, 1, -1, 1, -3
*SET,%_FNCNAME%(0,12,1), 0.0, 99, 0, 1, -2, 0, 0
! End of equation: 20+345*log(8*{TIME}/60+1)
!-->
FINISH
!
!=====
! S O L U C A O
!=====
!
/SOLU
!
!-----
! OPÇÕES
!-----
!
ANTYPE,TRANS      ! Análise transiente
!
IC,ALL,TEMP,20    ! Temperatura inicial dos materiais
!
ESEL,S,REAL,,2
EPLT
SFE,ALL,1,CONV,,25, ! Conveccao
!
ALLSEL,ALL
/REPLOT
!
D,10000000,TEMP,%NBR14432%
!
KBC,1
!
TRNOPT,FULL

```

```

LUMPM,0
!
!
CNVTOL,TEMP, ,0.0001,1, ,
!
AUTOTS,0
DELTIM,5,1,5
LNSRCH,0
PRED,0
TIME,5400
NEQIT,50
OUTRES,ALL,ALL
!
!-----
! RESOLVER
!-----
!
SOLVE
FINISH
!
!=====

```

A.2) Exemplo de *script* para análise térmica tridimensional da coluna C1.

```

!=====  

!  

!=====
! DEFINIÇÕES INICIAIS
!=====
!  

FINISH  

/CLEAR  

!  

/GRA,POWER  

/GST,ON  

/PLO,INFO,3  

/GRO,CURL,ON  

/CPLANE,1  

/REPLOT,RESIZE  

WPSTYLE,,,,,,,,,0  

/REPLOT,RESIZE  

!  

/PREP7  

/title, Analise termica tridimensional - COLUNA C1 BOLINA (2016)  

!  

!-----  

! PARAMETROS INICIAIS  

!-----  

!  

!DIMENSOES [m]  

h=25/100  

b=25/100  

l=300/100  

c=3/100           ! cobrimento de concreto  

ch=2/100          ! medida do lado do chanfro  

!  

!-----  

! ELEMENTOS  

!-----  

!  

ET,1,SOLID70      ! CONCRETO  

!  

ET,2,LINK33       ! BARRAS DE ACO  

!  

ET,3,SURF152      ! ELEMENTO DE SUPERFICIE PARA CONVECCAO  

KEYOPT,3,4,1  

KEYOPT,3,5,1  

KEYOPT,3,6,0  

KEYOPT,3,8,5  

KEYOPT,3,9,0  

!
```

```

ET,4,SURF152      ! ELEMENTO DE SUPERFICIE PARA RADIAAO
KEYOPT,4,4,1
KEYOPT,4,5,1
KEYOPT,4,8,0
KEYOPT,4,9,1
!
!-----
! CONSTANTES REAIS
!-----
!
R,1,              ! CONCRETO
!
R,2,0.0002010619, , ! ARMADURA LONGITUDINAL INFERIOR
!
R,3,0.0000311725, , ! ESTRIBOS
!
R,4,              ! CONVECCAO
!
R,5,1,5.67E-8     ! RADIAAO
!
R,6,0.0000785398, , ! ARMADURA LONGITUDINAL INFERIOR
!
R,7,0.0000502655, , ! ARMADURA LONGITUDINAL SUPERIOR
!
!=====
! PROPRIEDADES DOS MATERIAIS
!=====
!
!-----
! CONCRETO
!-----
!
MPTEMP,,,,,,,,    ! DENSIDADE, kg/m3
MPTEMP,1,20
MPTEMP,2,115
MPTEMP,3,200
MPTEMP,4,400
MPTEMP,5,1200
MPDATA,DENS,1,,2500
MPDATA,DENS,1,,2500
MPDATA,DENS,1,,2450
MPDATA,DENS,1,,2375
MPDATA,DENS,1,,2200
!
MPTEMP,,,,,,,,    ! CALOR ESPECIFICO, J/(kg.°C)
MPTEMP,1,20
MPTEMP,2,99
MPTEMP,3,100
MPTEMP,4,115
MPTEMP,5,200

```

MPTEMP,6,400
MPTEMP,7,1200
MPDATA,C,1,,900
MPDATA,C,1,,900
MPDATA,C,1,,1470
MPDATA,C,1,,1470
MPDATA,C,1,,1000
MPDATA,C,1,,1100
MPDATA,C,1,,1100

!

MPTEMP,,,,,,,,

! CONDUTIVIDADE TERMICA, W/(m.°C)

MPTEMP,1,20
MPTEMP,2,40
MPTEMP,3,60
MPTEMP,4,80
MPTEMP,5,100
MPTEMP,6,120
MPTEMP,7,140
MPTEMP,8,160
MPTEMP,9,180
MPTEMP,10,200
MPTEMP,11,220
MPTEMP,12,240
MPTEMP,13,260
MPTEMP,14,280
MPTEMP,15,300
MPTEMP,16,320
MPTEMP,17,340
MPTEMP,18,360
MPTEMP,19,380
MPTEMP,20,400
MPTEMP,21,420
MPTEMP,22,440
MPTEMP,23,460
MPTEMP,24,480
MPTEMP,25,500
MPTEMP,26,520
MPTEMP,27,540
MPTEMP,28,560
MPTEMP,29,580
MPTEMP,30,600
MPTEMP,31,620
MPTEMP,32,640
MPTEMP,33,660
MPTEMP,34,680
MPTEMP,35,700
MPTEMP,36,720
MPTEMP,37,740
MPTEMP,38,760
MPTEMP,39,780

MPTEMP,40,800
MPTEMP,41,820
MPTEMP,42,840
MPTEMP,43,860
MPTEMP,44,880
MPTEMP,45,900
MPTEMP,46,920
MPTEMP,47,940
MPTEMP,48,960
MPTEMP,49,980
MPTEMP,50,1000
MPTEMP,51,1020
MPTEMP,52,1200
MPDATA,KXX,1,,1.333
MPDATA,KXX,1,,1.3065
MPDATA,KXX,1,,1.2805
MPDATA,KXX,1,,1.2548
MPDATA,KXX,1,,1.2297
MPDATA,KXX,1,,1.205
MPDATA,KXX,1,,1.1808
MPDATA,KXX,1,,1.157
MPDATA,KXX,1,,1.1337
MPDATA,KXX,1,,1.1108
MPDATA,KXX,1,,1.0884
MPDATA,KXX,1,,1.0664
MPDATA,KXX,1,,1.0449
MPDATA,KXX,1,,1.0239
MPDATA,KXX,1,,1.0033
MPDATA,KXX,1,,0.98317
MPDATA,KXX,1,,0.96349
MPDATA,KXX,1,,0.94427
MPDATA,KXX,1,,0.92551
MPDATA,KXX,1,,0.9072
MPDATA,KXX,1,,0.88935
MPDATA,KXX,1,,0.87195
MPDATA,KXX,1,,0.85501
MPDATA,KXX,1,,0.83853
MPDATA,KXX,1,,0.8225
MPDATA,KXX,1,,0.80693
MPDATA,KXX,1,,0.79181
MPDATA,KXX,1,,0.77715
MPDATA,KXX,1,,0.76295
MPDATA,KXX,1,,0.7492
MPDATA,KXX,1,,0.73591
MPDATA,KXX,1,,0.72307
MPDATA,KXX,1,,0.71069
MPDATA,KXX,1,,0.69877
MPDATA,KXX,1,,0.6873
MPDATA,KXX,1,,0.67629
MPDATA,KXX,1,,0.66573

MPDATA,KXX,1,,0.65563
 MPDATA,KXX,1,,0.64599
 MPDATA,KXX,1,,0.6368
 MPDATA,KXX,1,,0.62807
 MPDATA,KXX,1,,0.61979
 MPDATA,KXX,1,,0.61197
 MPDATA,KXX,1,,0.60461
 MPDATA,KXX,1,,0.5977
 MPDATA,KXX,1,,0.59125
 MPDATA,KXX,1,,0.58525
 MPDATA,KXX,1,,0.57971
 MPDATA,KXX,1,,0.57463
 MPDATA,KXX,1,,0.57
 MPDATA,KXX,1,,0.56583
 MPDATA,KXX,1,,0.548800

!

MP,EMISS,1,0.7 ! EMISSIVIDADE

!

!-----

! ACO

!-----

!

MPTEMP,,,,,, ! DENSIDADE, kg/m³

MPTEMP,1,20

MPDATA,DENS,2,,7850

!

MPTEMP,,,,,, ! CALOR ESPECIFICO, J/(kg.°C)

MPTEMP,1,20

MPTEMP,2,100

MPTEMP,3,200

MPTEMP,4,300

MPTEMP,5,400

MPTEMP,6,500

MPTEMP,7,600

MPTEMP,8,700

MPTEMP,9,735

MPTEMP,10,736

MPTEMP,11,800

MPTEMP,12,900

MPTEMP,13,1000

MPTEMP,14,1200

MPDATA,C,2,,439.80

MPDATA,C,2,,487.62

MPDATA,C,2,,529.76

MPDATA,C,2,,564.74

MPDATA,C,2,,605.88

MPDATA,C,2,,666.5

MPDATA,C,2,,759.92

MPDATA,C,2,,1008.158

MPDATA,C,2,,5000

```

MPDATA,C,2,,4109
MPDATA,C,2,,803.2609
MPDATA,C,2,,650.4438
MPDATA,C,2,,650
MPDATA,C,2,,650
!
MPTEMP,,,,,,,,           ! CONDUCTIVIDADE TERMICA, W/(m.°C)
MPTEMP,1,20
MPTEMP,2,100
MPTEMP,3,200
MPTEMP,4,300
MPTEMP,5,400
MPTEMP,6,500
MPTEMP,7,600
MPTEMP,8,700
MPTEMP,9,735
MPTEMP,10,800
MPTEMP,11,1200
MPDATA,KXX,2,,53.33
MPDATA,KXX,2,,50.67
MPDATA,KXX,2,,47.34
MPDATA,KXX,2,,44.01
MPDATA,KXX,2,,40.68
MPDATA,KXX,2,,37.35
MPDATA,KXX,2,,34.02
MPDATA,KXX,2,,30.69
MPDATA,KXX,2,,29.5245
MPDATA,KXX,2,,27.3
MPDATA,KXX,2,,27.3
!
MP,EMISS,2,0.7           ! EMISSIVIDADE
!
!
TOFFST,273.15           ! CONVERTER UNIDADE DE TEMPERATURA DO SOFTWARE DE
KELVIN PARA CELSIUS
!
!
!=====
! GERACAO DA GEOMETRIA
!=====
!
/PREP7
BLOCK,-b/2+ch,b/2-ch,0,-1,-h/2+ch,h/2-ch,
BLOCK,-b/2+ch,b/2-ch,0,-1,-h/2+ch,-h/2,
BLOCK,-b/2+ch,b/2-ch,0,-1,h/2-ch,h/2
BLOCK,-b/2+ch,-b/2,0,-1,-h/2+ch,h/2-ch
BLOCK,b/2-ch,b/2,0,-1,-h/2+ch,h/2-ch
!
asel,s,loc,y,0
!

```

```

FLST,2,3,3
FITEM,2,24
FITEM,2,32
FITEM,2,8
A,P51X
FLST,2,3,3
FITEM,2,23
FITEM,2,7
FITEM,2,39
A,P51X
FLST,2,3,3
FITEM,2,35
FITEM,2,11
FITEM,2,3
A,P51X
FLST,2,3,3
FITEM,2,1
FITEM,2,25
FITEM,2,9
A,P51X
aplot
FLST,2,4,5,ORDE,2
FITEM,2,31
FITEM,2,-34
VEXT,P51X, , ,0,-1,0,,,
allsel,all
vplot
VGLUE,all
!
WPCSYS,-1,0      ! divisão dos volumes para compatibilizar malha
/VIEW,1,,1
/ANG,1
/REP,FAST
VSEL,ALL
wpoff,-(b/2)+c,0,0
wpoff,0,0,-h/2+c
VSBW,all
wprota,,,90
VSBW,all
wpoff,0,0,+b-2*c
wpoff,-h+2*c,0,0
VSBW,all
wprota,,, -90
VSBW,all
WPCSYS,-1,0
VGLUE,all
WPCSYS,-1,0
VSEL,ALL
wpoff,0.075,0,0
wprota,,,90

```

VSBW,all
 wpoff,0,0,0.010
 VSBW,all
 wpoff,0,0,0.015
 VSBW,all
 WPCSYS,-1,0
 VSEL,ALL
 wpoff,-0.075,0,0
 wprota,,,90
 VSBW,all
 wpoff,0,0,-0.010
 VSBW,all
 wpoff,0,0,-0.015
 VSBW,all
 WPCSYS,-1,0
 /VIEW,1,,,1
 /ANG,1
 /REP,FAST
 VSEL,ALL
 wpoff,0,-c,0
 wprota,,,90,
 VSBW,all
 wpoff,0,0,12/100
 VSBW,all
 wpoff,0,0,15/100
 VSBW,all
 wpoff,0,0,15/100
 VSBW,all
 wpoff,0,0,15/100
 VSBW,all
 wpoff,0,0,15/100
 VSBW,all
 wpoff,0,0,15/100
 VSBW,all
 wpoff,0,0,15/100
 VSBW,all
 wpoff,0,0,15/100
 VSBW,all
 wpoff,0,0,15/100
 VSBW,all
 !
 wpoff,0,0,15/100
 VSBW,all
 wpoff,0,0,15/100
 VSBW,all
 wpoff,0,0,15/100
 VSBW,all
 wpoff,0,0,15/100

```

VSBW,all
wpoff,0,0,15/100
VSBW,all
wpoff,0,0,15/100
VSBW,all
wpoff,0,0,15/100
VSBW,all
wpoff,0,0,15/100
VSBW,all
wpoff,0,0,15/100
VSBW,all
wpoff,0,0,15/100
VSBW,all
wpoff,0,0,12/100
VSBW,all
WPCSYS,-1,1
VGLUE,all
!
wprota,,90
VSBW,all
WPCSYS,-1,1
VGLUE,all
!
!-----
! DIVISAO DAS LINHAS
!-----
!
/VIEW,1,1,1,1
/ANG,1
/REPLOT
/AUTO,1
/REP,FAST
!
LSEL,ALL
LESIZE,ALL, , ,1, ,1, , ,1,
!
ALLSEL,ALL
lsel,all
lplot
!
LSEL,S,LOC,x,-b/2-0.0001,-b/2+c+0.00001,
LSEL,a,LOC,x,b/2+0.0001,b/2-c-c-0.000001,
LSEL,a,LOC,x,-b/2-0.0001,-b/2+c+c+0.000001,
LSEL,a,LOC,x,0+0.0001,0-0.000001,
LSEL,U,LOC,Z,-h/2+c+0.00001,h/2-c-0.00001
LESIZE,ALL, , ,2, ,1, , ,1,
!
LSEL,S,LOC,x,-b/2-0.0001,-b/2+c+0.00001,
LSEL,a,LOC,x,b/2+0.0001,b/2-c-c-0.000001,
LSEL,a,LOC,x,-b/2-0.0001,-b/2+c+c+0.000001,
LSEL,a,LOC,x,0+0.0001,0-0.000001,
LSEL,U,LOC,Z,-h/2+c+0.00001,h/2-c-0.00001

```

```

LSEL,U,LOC,Y,-0.00001,+0.0001
LSEL,U,LOC,Y,-c-0.0001 ,-c+0.0001
LSEL,U,LOC,Y,-15/100-0.0001,-15/100+0.0001
LSEL,U,LOC,Y,-30/100-0.0001,-30/100+0.0001
LSEL,U,LOC,Y,-45/100-0.0001,-45/100+0.0001
LSEL,U,LOC,Y,-60/100-0.0001,-60/100+0.0001
LSEL,U,LOC,Y,-75/100-0.0001,-75/100+0.0001
LSEL,U,LOC,Y,-90/100-0.0001,-90/100+0.0001
LSEL,U,LOC,Y,-105/100-0.0001,-105/100+0.0001
LSEL,U,LOC,Y,-120/100-0.0001,-120/100+0.0001
LSEL,U,LOC,Y,-135/100-0.0001,-135/100+0.0001
LSEL,U,LOC,Y,-150/100-0.0001,-150/100+0.0001
LSEL,U,LOC,Y,-165/100-0.0001,-165/100+0.0001
LSEL,U,LOC,Y,-180/100-0.0001,-180/100+0.0001
LSEL,U,LOC,Y,-195/100-0.0001,-195/100+0.0001
LSEL,U,LOC,Y,-210/100-0.0001,-210/100+0.0001
LSEL,U,LOC,Y,-225/100-0.0001,-225/100+0.0001
LSEL,U,LOC,Y,-240/100-0.0001,-240/100+0.0001
LSEL,U,LOC,Y,-255/100-0.0001,-255/100+0.0001
LSEL,U,LOC,Y,-270/100-0.0001,-270/100+0.0001
LSEL,U,LOC,Y,-285/100-0.0001,-285/100+0.0001
LSEL,U,LOC,Y,-1+c-0.0001,-1+c+0.0001
LSEL,U,LOC,Y,-1-0.0001,-1+0.0001
LESIZE,ALL, , ,3, ,1, , ,1,
!
LSEL,S,LOC,x,-b/2-0.0001,-b/2+c+0.00001,
LSEL,a,LOC,x,b/2+0.0001,b/2-c-c-0.000001,
LSEL,a,LOC,x,-b/2-0.0001,-b/2+c+c+0.000001,
LSEL,a,LOC,x,0+0.0001,0-0.000001,
LSEL,U,LOC,Z,-h/2+c+0.00001,h/2-c-0.00001
LSEL,INVE
LESIZE,ALL, , ,10, ,1, , ,1,
!
LSEL,S,LOC,x,-b/2-0.0001,-b/2+c+0.00001,
LSEL,a,LOC,x,b/2+0.0001,b/2-c-c-0.000001,
LSEL,a,LOC,x,-b/2-0.0001,-b/2+c+c+0.000001,
LSEL,a,LOC,x,0+0.0001,0-0.000001,
LSEL,U,LOC,Z,-h/2+c+0.00001,h/2-c-0.00001
LSEL,INVE
LSEL,u,LOC,x,-5/100+0.0001,-b/2-0.00001,
LSEL,u,LOC,x,5/100-0.0001,b/2+0.00001,
LSEL,u,LOC,x,0-0.0001,0+0.00001,
LESIZE,ALL, , ,3, ,1, , ,1,
!
LSEL,ALL
LPLOT
!
!-----
! MESHING
!-----

```

```

!
VSEL, ALL
VPLOT
vATT,1,1,1,0
!
VSEL,S,LOC,x,-b/2-0.0001,-b/2+c+0.00001,
VSEL,a,LOC,x,b/2+0.0001,b/2-c-0.00001,
VSEL,U,LOC,Z,-h/2+c+0.00001,h/2-c-0.0001
VSEL,INVE
MSHAPE,0,3D
MSHKEY,1
VMESH,ALL
!
VSEL, ALL
VPLOT
VSEL,S,LOC,x,-b/2-0.0001,-b/2+c+0.00001,
VSEL,a,LOC,x,b/2+0.0001,b/2-c-0.00001,
VSEL,U,LOC,Z,-h/2+c+0.00001,h/2-c-0.0001
!
MSHAPE,0,3D
MSHKEY,1
VMESH,ALL
ALLSEL,ALL
!
NUMMRG,NODE, , , ,LOW
!
LPLOT
!
LSEL,S,LOC,Y,0,-1
LSEL,U,LOC,X,-b/2+c-0.00001,-b/2
LSEL,U,LOC,X,-b/2+c+0.00001,b/2-c-0.0001
LSEL,U,LOC,Z,-h/2+0.00001,-h/2-0.0001
LSEL,U,LOC,Z,-h/2+0.00001,-h/2+C-0.0001
LSEL,U,LOC,Z,-h/2+c+0.00001,h/2-c-0.0001
LSEL,U,LOC,Z,h/2+0.00001,h/2-0.0001
LSEL,U,LOC,Z,h/2+0.00001,h/2-C+0.0001
LSEL,U,LOC,X,b/2+1/100,b/2-c+1/100
LSEL,U,LOC,X,-b/2-1/100,-b/2+c-1/100
LSEL,U,LOC,Z,-h/2-0.00001,0
LSEL,U,LOC,X,b/2+0.00001,0+0.00001
LATT,2,6,2,0
LMESH,ALL
!
LPLOT
LSEL,S,LOC,Y,0,-1
LSEL,U,LOC,X,-b/2+c-0.00001,-b/2
LSEL,U,LOC,X,b/2-c+0.00001,b/2
LSEL,U,LOC,X,-b/2+c+0.00001,b/2-c-0.0001
LSEL,U,LOC,Z,-h/2+0.00001,-h/2-0.0001
LSEL,U,LOC,Z,-h/2+0.00001,-h/2+C-0.0001

```

```

LSEL,U,LOC,Z,-h/2+c+0.00001,h/2-c-0.0001
LSEL,U,LOC,Z,h/2+0.00001,h/2-0.0001
LSEL,U,LOC,Z,h/2+0.00001,h/2-C+0.0001
LSEL,U,LOC,X,b/2+1/100,b/2-c+1/100
LSEL,U,LOC,X,-b/2-1/100,-b/2+c-1/100
LSEL,U,LOC,Z,-h/2-0.00001,0
LSEL,U,LOC,X,-b/2-0.00001,0-0.00001
LATT,2,2,2,0
LMESH,ALL
!
LSEL,S,LOC,Y,0,-1
LSEL,U,LOC,X,b/2-c+0.00001,b/2
LSEL,U,LOC,X,-b/2+c-0.00001,-b/2
LSEL,U,LOC,X,-b/2+c+0.00001,b/2-c-0.0001
LSEL,U,LOC,Z,-h/2+0.00001,-h/2-0.0001
LSEL,U,LOC,Z,-h/2+0.00001,-h/2+C-0.0001
LSEL,U,LOC,Z,-h/2+c+0.00001,h/2-c-0.0001
LSEL,U,LOC,Z,h/2+0.00001,h/2-0.0001
LSEL,U,LOC,Z,h/2+0.00001,h/2-C+0.0001
LSEL,U,LOC,X,b/2+1/100,b/2-c+1/100
LSEL,U,LOC,X,-b/2-1/100,-b/2+c-1/100
LSEL,U,LOC,Z,h/2+0.00001,0
LATT,2,7,2,0
LMESH,ALL
!
ALLSEL,ALL
!
LSEL,S,LOC,Y,-C,-((L-C))
LSEL,U,LOC,X,-b/2+1/100,-b/2
LSEL,U,LOC,X,-b/2+c+0.00001,b/2-c-0.0001
LSEL,U,LOC,Z,-h/2+0.00001,-h/2-0.0001
LSEL,U,LOC,Z,-h/2+0.00001,-h/2+C-0.0001
LSEL,a,LOC,Z,-h/2+C+0.00001,-h/2+C-0.0001
LSEL,a,LOC,Z,h/2-C-0.00001,h/2-C+0.0001
LSEL,U,LOC,X,-b/2-1/100,-b/2+c-1/1000000
LSEL,U,LOC,X,b/2-1/100,b/2
LSEL,U,LOC,X,b/2+1/100,b/2-c+1/1000000
LSEL,U,LOC,Z,h/2+0.00001,h/2-C+0.0001
LSEL,U,LOC,Y,0.00001,-c+0.0001
LSEL,U,LOC,Y,0-C-0.0001,0-15/100+0.0001
LSEL,U,LOC,Y,0-15/100-0.0001,0-30/100+0.0001
LSEL,U,LOC,Y,0-30/100-0.0001,0-45/100+0.0001
LSEL,U,LOC,Y,0-45/100-0.0001,0-60/100+0.0001
LSEL,U,LOC,Y,0-60/100-0.0001,0-75/100+0.0001
LSEL,U,LOC,Y,0-75/100-0.0001,0-90/100+0.0001
LSEL,U,LOC,Y,0-90/100-0.0001,0-105/100+0.0001
LSEL,U,LOC,Y,0-105/100-0.0001,0-120/100+0.0001
LSEL,U,LOC,Y,0-120/100-0.0001,0-135/100+0.0001
LSEL,U,LOC,Y,0-135/100-0.0001,0-150/100+0.0001
LSEL,U,LOC,Y,0-150/100-0.0001,0-165/100+0.0001

```



```

LSEL,U,LOC,Y,0-165/100-0.0001,0-180/100+0.0001
LSEL,U,LOC,Y,0-180/100-0.0001,0-195/100+0.0001
LSEL,U,LOC,Y,0-195/100-0.0001,0-210/100+0.0001
LSEL,U,LOC,Y,0-210/100-0.0001,0-225/100+0.0001
LSEL,U,LOC,Y,0-225/100-0.0001,0-240/100+0.0001
LSEL,U,LOC,Y,0-240/100-0.0001,0-255/100+0.0001
LSEL,U,LOC,Y,0-255/100-0.0001,0-270/100+0.0001
LSEL,U,LOC,Y,0-270/100-0.0001,0-285/100+0.0001
LSEL,U,LOC,Y,0-285/100-0.0001,-1+c+0.0001
LSEL,U,LOC,Y,-1+c-0.0001,-1-0.0001
LATT,2,3,2,0
LMESH,ALL
!
ALLSEL,ALL
!
NUMMRG,NODE, , , ,LOW
NUMMRG,kp, , , ,LOW
!
allsel,all
!
!-----
! EFEITOS DE SUPERFICIE
!-----
!
N,100000000,,-1-10/100,0  ! CRIACAO DO NO EXTRA
!
! CONVECCAO
!
TYPE,3
MAT,1
REAL,4
allsel,all
aplot,all
!
ASEL,S,EXT
ASEL,U,LOC,Y,0-0.0001,0+0.0001
ASEL,U,LOC,Y,-1-0.0001,-1+0.0001
nset,s,node,,100000000
NSLA,a,1
ESURF,100000000
!
! RADIACAO
!
TYPE,4
REAL,5
MAT,1
allsel,all
aplot,all
!
ASEL,S,EXT

```

```

ASEL,U,LOC,Y,0-0.0001,0+0.0001
ASEL,U,LOC,Y,-1-0.0001,-1+0.0001
nset,s,node,,100000000
NSLA,a,1
ESURF,100000000
!
ALLSEL,ALL
!
NUMMRG,NODE, , , ,LOW
!
/replot,resize
/AUTO,1
/REP,FAST
!
!-----
! CURVA DE INCENDIO PADRAO ISO 834
!-----
!
*DEL,_FNCNAME
*DEL,_FNCMTID
*DEL,_FNCCSYS
*SET,_FNCNAME,'CURVAISO'
*SET,_FNCCSYS,0
!/INPUT,CURVAISO.func,,,1
*DIM,%_FNCNAME%,TABLE,6,12,1,,,%_FNCCSYS%
!
! Begin of equation: 20+345*log(8*{TIME}/60+1)
*SET,%_FNCNAME%(0,0,1), 0.0, -999
*SET,%_FNCNAME%(2,0,1), 0.0
*SET,%_FNCNAME%(3,0,1), 0.0
*SET,%_FNCNAME%(4,0,1), 0.0
*SET,%_FNCNAME%(5,0,1), 0.0
*SET,%_FNCNAME%(6,0,1), 0.0
*SET,%_FNCNAME%(0,1,1), 1.0, -1, 0, 8, 0, 0, 1
*SET,%_FNCNAME%(0,2,1), 0.0, -2, 0, 1, -1, 3, 1
*SET,%_FNCNAME%(0,3,1), 0, -1, 0, 60, 0, 0, -2
*SET,%_FNCNAME%(0,4,1), 0.0, -3, 0, 1, -2, 4, -1
*SET,%_FNCNAME%(0,5,1), 0.0, -1, 0, 1, 0, 0, -3
*SET,%_FNCNAME%(0,6,1), 0.0, -2, 0, 1, -3, 1, -1
*SET,%_FNCNAME%(0,7,1), 0.0, -1, 6, 1, -2, 0, 0
*SET,%_FNCNAME%(0,8,1), 0.0, -2, 0, 345, 0, 0, -1
*SET,%_FNCNAME%(0,9,1), 0.0, -3, 0, 1, -2, 3, -1
*SET,%_FNCNAME%(0,10,1), 0.0, -1, 0, 20, 0, 0, -3
*SET,%_FNCNAME%(0,11,1), 0.0, -2, 0, 1, -1, 1, -3
*SET,%_FNCNAME%(0,12,1), 0.0, 99, 0, 1, -2, 0, 0
! End of equation: 20+345*log(8*{TIME}/60+1)
!-->
FINISH
!
!=====

```

! SOLUCAO

```

=====
!
/SOLU
!
!-----
! OPÇÕES
!-----
!
ANTYPE,TRANS
!
TUNIF,20,
TREF,20,
!
ESEL,S,type,,3
EPLOT
SFE,ALL,1,CONV,,25,
!
ALLSEL,ALL
/REPLOT
!
D,100000000,TEMP,%CURVAISO%
!
KBC,1
!
TRNOPT,FULL
LUMPM,0
!
CNVTOL,TEMP, ,0.01,1, ,
!
AUTOTS,0
DELTIM,5,.1,60
LNSRCH,0
PRED,0
TIME,140
NEQIT,25
OUTRES,ALL,ALL
LSWRITE,1
!
CNVTOL,TEMP, ,0.01,1, ,
!
AUTOTS,0
DELTIM,1,.1,1
LNSRCH,0
PRED,0
TIME,180
NEQIT,25
OUTRES,ALL,ALL
LSWRITE,2
!

```

```
CNVTOL,TEMP, ,0.01,1, ,
!  
AUTOTS,0  
DELTIM,5,.1,60  
LNSRCH,0  
PRED,0  
TIME,14400  
NEQIT,25  
OUTRES,ALL,ALL  
LSWRITE,3  
!  
!-----  
! RESOLVER  
!-----  
!  
LSSOLVE,1,3,1  
FINISH  
!  
!=====
```

A.3) Exemplo de *script* para análise estrutural da coluna C3 em temperatura ambiente usando o diagrama tensão-deformação proposto pelo Código Modelo *fib* (2010).

```

!=====  

!  

!=====
! DEFINIÇÕES INICIAIS
!=====
!  

FINISH  

/CLEAR  

!  

/VIEW,1,1,1,1  

/ANG,1  

/UIS,MSGPOP,3  

/PBC,ALL,,1  

/REP,FAST  

/CONFIG,NOELDB,1  

!  

/PREP7  

/title, Análise estrutural em temp ambiente - P110120 (fib(2010))  

!  

!-----
! PARAMETROS INICIAIS
!-----
!  

fcm= 23700           ! resistencia a compressao do concreto - 20°C, kN/m^2  

fctm= 2475.26       ! resistencia a tracao do concreto pela - 20°C, kN/m^2  

MEC=28665173.5     ! módulo de elasticidade do concreto - 20°C, kN/m^2  

alphaE=1           ! coeficiente para calculo do MEC - Conc Silicoso  

fys=611000         ! tensão de escoamento do aço - 20°C, kN/m^2  

MES=205000000     ! módulo de elasticidade do aço - 20°C, kN/m^2  

!  

!DIMENSOES [m]  

h=20/100  

b=20/100  

l=120/100  

c=1.5/100         ! cobrimento de concreto  

tch=2.5/100      ! espessura da chapa  

!  

! CARGA A SER APLICADA [kN]  

Q=1200/4  

!  

!-----
! ELEMENTOS
!-----
!  

ET,1,SOLID65      ! CONCRETO  

KEYOPT,1,1,0  

KEYOPT,1,2,0  

KEYOPT,1,4,0  

KEYOPT,1,5,0  

KEYOPT,1,6,0  

!  

ET,2,LINK180     ! BARRAS DE AÇO  

!
```

```

ET,3,SOLID65          ! CHAPA
KEYOPT,1,1,0
KEYOPT,1,2,0
KEYOPT,1,4,0
KEYOPT,1,5,0
KEYOPT,1,6,0
!
!-----
! CONSTANTES REAIS
!-----
!
R,1, , , , , ,      ! CONCRETO
RMORE, , , , , ,
RMORE,0.01,
!
R,2,                ! CHAPA
RMORE, , , , , ,
RMORE,0.01,
!
!-----
! SECOES DAS BARRAS
!-----
!
SECTYPE,1,LINK
SECDATA,0.000078539816,
SECCONTROL,,
!
SECTYPE,2,LINK
SECDATA,0.0000196,
SECCONTROL,,
!
!=====
! PROPRIEDADES DOS MATERIAIS
!=====
!
MPTEMP, , , , , ,      ! CONCRETO
MPTEMP,1,20
MPDATA,EX,1,,MEC
MPDATA,PRXY,1,,0.2
!
TB,CONC,1,1,9,
TBTEMP,20
TBDATA,,0.53,0.98,fctm,-1,,
!
TBDE,MELAS,1,,
TB,MELAS,1,1,22,0
TBTEMP,20
epsilo_c1theta = 0.0025
epsilo_cu1theta = 0.02
kapa_ctheta = 1
EC1=(fcm*(kapa_ctheta))/epsilo_c1theta
kapa_MEC=1
TBPT,,epsilo_c1theta/10,((fcm*(kapa_ctheta))*(((MEC/EC1)*((epsilo_c1theta/10)/epsilo_c1theta))-
(((epsilo_c1theta/10)/epsilo_c1theta)**2))/(1+(((MEC/EC1)-2)*((epsilo_c1theta/10)/epsilo_c1theta))))
TBPT,,epsilo_c1theta/8,((fcm*(kapa_ctheta))*(((MEC/EC1)*((epsilo_c1theta/8)/epsilo_c1theta))-
(((epsilo_c1theta/8)/epsilo_c1theta)**2))/(1+(((MEC/EC1)-2)*((epsilo_c1theta/8)/epsilo_c1theta))))
TBPT,,epsilo_c1theta/6,((fcm*(kapa_ctheta))*(((MEC/EC1)*((epsilo_c1theta/6)/epsilo_c1theta))-
(((epsilo_c1theta/6)/epsilo_c1theta)**2))/(1+(((MEC/EC1)-2)*((epsilo_c1theta/6)/epsilo_c1theta))))

```

```

TBPT,,epsilo_c1theta/5,((fcm*(kapa_ctheta))*(((MEC/EC1)*((epsilo_c1theta/5)/epsilo_c1theta))-
(((epsilo_c1theta/5)/epsilo_c1theta)**2))/(1+(((MEC/EC1)-2)*((epsilo_c1theta/5)/epsilo_c1theta))))
TBPT,,epsilo_c1theta/4,((fcm*(kapa_ctheta))*(((MEC/EC1)*((epsilo_c1theta/4)/epsilo_c1theta))-
(((epsilo_c1theta/4)/epsilo_c1theta)**2))/(1+(((MEC/EC1)-2)*((epsilo_c1theta/4)/epsilo_c1theta))))
TBPT,,epsilo_c1theta/3.5,((fcm*(kapa_ctheta))*(((MEC/EC1)*((epsilo_c1theta/3.5)/epsilo_c1theta))-
(((epsilo_c1theta/3.5)/epsilo_c1theta)**2))/(1+(((MEC/EC1)-2)*((epsilo_c1theta/3.5)/epsilo_c1theta))))
TBPT,,epsilo_c1theta/3,((fcm*(kapa_ctheta))*(((MEC/EC1)*((epsilo_c1theta/3)/epsilo_c1theta))-
(((epsilo_c1theta/3)/epsilo_c1theta)**2))/(1+(((MEC/EC1)-2)*((epsilo_c1theta/3)/epsilo_c1theta))))
TBPT,,epsilo_c1theta/2.5,((fcm*(kapa_ctheta))*(((MEC/EC1)*((epsilo_c1theta/2.5)/epsilo_c1theta))-
(((epsilo_c1theta/2.5)/epsilo_c1theta)**2))/(1+(((MEC/EC1)-2)*((epsilo_c1theta/2.5)/epsilo_c1theta))))
TBPT,,epsilo_c1theta/2,((fcm*(kapa_ctheta))*(((MEC/EC1)*((epsilo_c1theta/2)/epsilo_c1theta))-
(((epsilo_c1theta/2)/epsilo_c1theta)**2))/(1+(((MEC/EC1)-2)*((epsilo_c1theta/2)/epsilo_c1theta))))
TBPT,,epsilo_c1theta/1.9,((fcm*(kapa_ctheta))*(((MEC/EC1)*((epsilo_c1theta/1.9)/epsilo_c1theta))-
(((epsilo_c1theta/1.9)/epsilo_c1theta)**2))/(1+(((MEC/EC1)-2)*((epsilo_c1theta/1.9)/epsilo_c1theta))))
TBPT,,epsilo_c1theta/1.8,((fcm*(kapa_ctheta))*(((MEC/EC1)*((epsilo_c1theta/1.8)/epsilo_c1theta))-
(((epsilo_c1theta/1.8)/epsilo_c1theta)**2))/(1+(((MEC/EC1)-2)*((epsilo_c1theta/1.8)/epsilo_c1theta))))
TBPT,,epsilo_c1theta/1.7,((fcm*(kapa_ctheta))*(((MEC/EC1)*((epsilo_c1theta/1.7)/epsilo_c1theta))-
(((epsilo_c1theta/1.7)/epsilo_c1theta)**2))/(1+(((MEC/EC1)-2)*((epsilo_c1theta/1.7)/epsilo_c1theta))))
TBPT,,epsilo_c1theta/1.6,((fcm*(kapa_ctheta))*(((MEC/EC1)*((epsilo_c1theta/1.6)/epsilo_c1theta))-
(((epsilo_c1theta/1.6)/epsilo_c1theta)**2))/(1+(((MEC/EC1)-2)*((epsilo_c1theta/1.6)/epsilo_c1theta))))
TBPT,,epsilo_c1theta/1.5,((fcm*(kapa_ctheta))*(((MEC/EC1)*((epsilo_c1theta/1.5)/epsilo_c1theta))-
(((epsilo_c1theta/1.5)/epsilo_c1theta)**2))/(1+(((MEC/EC1)-2)*((epsilo_c1theta/1.5)/epsilo_c1theta))))
TBPT,,epsilo_c1theta/1.4,((fcm*(kapa_ctheta))*(((MEC/EC1)*((epsilo_c1theta/1.4)/epsilo_c1theta))-
(((epsilo_c1theta/1.4)/epsilo_c1theta)**2))/(1+(((MEC/EC1)-2)*((epsilo_c1theta/1.4)/epsilo_c1theta))))
TBPT,,epsilo_c1theta/1.3,((fcm*(kapa_ctheta))*(((MEC/EC1)*((epsilo_c1theta/1.3)/epsilo_c1theta))-
(((epsilo_c1theta/1.3)/epsilo_c1theta)**2))/(1+(((MEC/EC1)-2)*((epsilo_c1theta/1.3)/epsilo_c1theta))))
TBPT,,epsilo_c1theta/1.2,((fcm*(kapa_ctheta))*(((MEC/EC1)*((epsilo_c1theta/1.2)/epsilo_c1theta))-
(((epsilo_c1theta/1.2)/epsilo_c1theta)**2))/(1+(((MEC/EC1)-2)*((epsilo_c1theta/1.2)/epsilo_c1theta))))
TBPT,,epsilo_c1theta/1.1,((fcm*(kapa_ctheta))*(((MEC/EC1)*((epsilo_c1theta/1.1)/epsilo_c1theta))-
(((epsilo_c1theta/1.1)/epsilo_c1theta)**2))/(1+(((MEC/EC1)-2)*((epsilo_c1theta/1.1)/epsilo_c1theta))))
TBPT,,epsilo_c1theta,(fcm*(kapa_ctheta))
TBPT,,epsilo_cU1theta,(fcm*(kapa_ctheta))+((epsilo_cU1theta-epsilo_c1theta)*0.001)
!
MPTEMP,,,,,,,,                !ACO
MPTEMP,1,20
MPDATA,EX,2,,MES
MPDATA,PRXY,2,,0.3
!
TBDE,MISO,2,,
TB,MISO,2,1,3,0
TBTEMP,20
fy_theta = fys
ME_theta = MES
epsilo_fy = 0.02
epsilo_u = 0.2
TBPT,,fy_theta/ME_theta,fy_theta
TBPT,,epsilo_fy,fy_theta
TBPT,,epsilo_u,fy_theta+(0.15-.02)*0.001
!
MPTEMP,,,,,,,,                !CHAPA DE TOPO
MPTEMP,1,20
MPDATA,EX,3,,10E3*MEs
MPDATA,PRXY,3,,0.3
!
TBDE,MISO,3,,
TB,MISO,3,1,3,0
TBTEMP,20

```

```

fy_theta = 10E3*fys
ME_theta = 10E3*MES
epsilo_fy = 10E3*0.02
epsilo_u = 10E3*0.2
TBPT, ,fy_theta/ME_theta,fy_theta
TBPT, ,epsilo_fy,fy_theta
TBPT, ,epsilo_u,fy_theta+(0.15-.02)*0.001
!
!=====
! G E R A C A O D A G E O M E T R I A
!=====
!
BLOCK, -b/2,0,0+TCH, -1-TCH, -h/2,0,
!
WPCSYS, -1,0
/VIEW, 1,,1
/ANG, 1
/REP, FAST
VSEL, ALL
VSBW, all
wprota, ,,90
VSBW, all
WPCSYS, -1,0
wpoff, -(b/2)+c, 0,0
wpoff, 0,0, -h/2+c
VSBW, all
wprota, ,,90
VSBW, all
wpoff, 0,0, +b-2*c
wpoff, -h+2*c, 0,0
VSBW, all
wprota, ,, -90
VSBW, all
WPCSYS, -1,0
VGLUE, all
WPCSYS, -1,0
/VIEW, 1,,1
/ANG, 1
/REP, FAST
VSEL, ALL
wprota, ,,90,
VSBW, all
WPCSYS, -1,0
/VIEW, 1,,1
/ANG, 1
/REP, FAST
VSEL, ALL
!
wpoff, 0, -c, 0
wprota, ,,90,
VSBW, all
wpoff, 0,0, (12/100)-c
VSBW, all
wpoff, 0,0, 12/100
VSBW, all
wpoff, 0,0, 12/100
VSBW, all

```

! divisão dos volumes para compatibilizar malha


```

wpoff,0,0,12/100
VSBW,all
wpoff,0,0,12/100
VSBW,all
wpoff,0,0,12/100
VSBW,all
wpoff,0,0,12/100
VSBW,all
wpoff,0,0,12/100
VSBW,all
wpoff,0,0,12/100
VSBW,all
wpoff,0,0,12/100
VSBW,all
wpoff,0,0,(12/100)-c
VSBW,all
WPCSYS,-1,1
VGLUE,all
!
! DIVISAO DAS LINHAS
!
/VIEW,1,1,1,1
/ANG,1
/REPLOT
/AUTO,1
/REP,FAST
!
LSEL,ALL
LPLOT
LSEL,S,LOC,X,-b/2-1/1000,-b/2+1/1000
LSEL,A,LOC,X,-b/2+C-1/1000,-b/2+C+1/1000
LSEL,A,LOC,X,0-1/1000,0+1/1000
LSEL,U,LOC,Z,-H/2-1/1000,-H/2+C+1/1000
LSEL,U,LOC,Z,0+1/1000,0-1/1000
LESIZE,ALL,,,11,1,1,,,0,
!
LSEL,ALL
LPLOT
LSEL,s,LOC,Z,-H/2-1/1000,-H/2+1/1000
LSEL,A,LOC,Z,-H/2+C-1/1000,-H/2+C+1/1000
LSEL,A,LOC,Z,0-1/1000,0+1/1000
LSEL,U,LOC,X,-B/2-1/1000,-B/2+C+1/1000
LSEL,U,LOC,X,0+1/1000,0-1/1000
LESIZE,ALL,,,11,1,1,,,0,
!
LSEL,INVE
LPLOT
LSEL,U,LOC,Z,-H/2+C+1/1000,0-1/1000
LSEL,U,LOC,Z,H/2-C-1/1000,0+1/1000
LESIZE,ALL,,,4,1,1,,,0,
!
LSEL,S,LOC,Y,TCH,-1-TCH
LSEL,U,LOC,Y,TCH-0.0001,TCH+0.0001
LSEL,U,LOC,Y,0-0.0001,0+0.0001
LSEL,U,LOC,Y,-C-0.0001,-C+0.0001
LSEL,U,LOC,Y,-12/100-0.0001,-12/100+0.0001
LSEL,U,LOC,Y,-24/100-0.0001,-24/100+0.0001
LSEL,U,LOC,Y,-36/100-0.0001,-36/100+0.0001
LSEL,U,LOC,Y,-48/100-0.0001,-48/100+0.0001

```

```

LSEL,U,LOC,Y,-60/100-0.0001,-60/100+0.0001
LSEL,U,LOC,Y,-72/100-0.0001,-72/100+0.0001
LSEL,U,LOC,Y,-84/100-0.0001,-84/100+0.0001
LSEL,U,LOC,Y,-96/100-0.0001,-96/100+0.0001
LSEL,U,LOC,Y,-108/100-0.0001,-108/100+0.0001
LSEL,U,LOC,Y,-L+C-0.0001,-L+C+0.0001
LSEL,U,LOC,Y,-L-0.0001,-L+0.0001
LSEL,U,LOC,Y,-L-TCH-0.0001,-L-TCH+0.0001
LESIZE,ALL,,,2,1,1,,,0,
!
ALLSEL,ALL
LPLOT
!
! MESHING
!
MSHAPE,0,3D          !0- quadrilateral 1-triang
MSHKEY,1             !0- free 1-mesh
!
VSEL, ALL
vSEL,r,LOC,Y,0+0.000001,-1-0.0000001
VPLOT
vATT,1,1,1,0         ! atribui material 1 ao CONCRETO
VMESH,ALL
!
vsel,invE
VPLOT
vATT,3,2,3,0         ! atribui material 3 a CHAPA DE TOPO
VMESH,ALL
ALLSEL,ALL
!
LPLOT
!
LSEL,S,LOC,X,-b/2+c+0.00001,-b/2+c-0.00001
LSEL,U,LOC,Z,-h/2+0.00001,-h/2-0.0001
LSEL,U,LOC,Z,-h/2+0.00001,-h/2+C-0.0001
LSEL,U,LOC,Z,-h/2+C+0.00001,0+0.00001
ISEL,r,LOC,Y,0+0.000001,-1-0.0000001
LATT,2,,2, , , 1     ! atribui material 2 ao ACO
LMESH,ALL
!
LPLOT
LSEL,S,LOC,Y,-C,-((L-C))
LSEL,U,LOC,X,-b/2+1/100,-b/2
LSEL,U,LOC,X,-b/2+c+0.00001,b/2-c-0.0001
LSEL,U,LOC,Z,-h/2+0.00001,-h/2-0.0001
LSEL,U,LOC,Z,-h/2+0.00001,-h/2+C-0.0001
LSEL,a,LOC,Z,-h/2+C+0.00001,-h/2+C-0.0001
LSEL,U,LOC,X,-b/2-1/100,-b/2+c-1/1000000
LSEL,U,LOC,Y,TCH+0.00001,0-C+0.0001
LSEL,U,LOC,Y,0-C-0.0001,0-10/100+0.0001
LSEL,U,LOC,Y,0-12/100-0.0001,0-24/100+0.0001
LSEL,U,LOC,Y,0-24/100-0.0001,0-36/100+0.0001
LSEL,U,LOC,Y,0-36/100-0.0001,0-48/100+0.0001
LSEL,U,LOC,Y,0-48/100-0.0001,0-60/100+0.0001
LSEL,U,LOC,Y,0-60/100-0.0001,0-72/100+0.0001
LSEL,U,LOC,Y,0-72/100-0.0001,0-84/100+0.0001
LSEL,U,LOC,Y,0-84/100-0.0001,0-96/100+0.0001

```

```

LSEL,U,LOC,Y,0-96/100-0.0001,0-108/100+0.0001
LSEL,U,LOC,Y,0-108/100-0.0001,-1+c+0.0001
LSEL,U,LOC,Y,-1+c-0.0001,-1-TCH-0.0001
LATT,2,, , ,2          ! atribui material 3 ao ACO
LMESH,ALL
!
ALLSEL,ALL
!
NUMMRG,KP, , , ,LOW
NUMMRG,NODE, , , ,LOW
!
=====
! VINCULOS (APOIOS)
=====
!
-----
! VINCULOS REFERENTES A SIMETRIA DO PROLEMA
-----!
NSEL,S,LOC,X,-0.0001,0.0001
NSEL,R,LOC,y,TCH-0.0001,-1-TCH+0.0001
nplot
D,ALL,UX,0,
!
NSEL,S,LOC,Z,-0.0001,0.0001
NSEL,R,LOC,y,TCH-0.0001,-1-TCH+0.0001
nplot
D,ALL,UZ,0,
!
-----
! ENGASTE FIXO E MOVEL
-----!
NSEL,S,LOC,y,-1-TCH-0.0001,-1-TCH+0.0001
NSEL,R,LOC,x,-B/2-0.0001,0+0.0001
nplot
D,ALL,UX,0,
D,ALL,UY,0,
D,ALL,UZ,0,
!
NSEL,S,LOC,y,TCH-0.0001,TCH+0.0001
NSEL,R,LOC,x,-B/2-0.0001,0+0.0001
nplot
D,ALL,UX,0,
D,ALL,UZ,0,
!
allsel,all
-----
! APLICAÇÃO DA CARGA DISTRIBUÍDA
-----
!
NSEL,S,LOC,y,TCH-0.0001,TCH+0.0001
NSEL,R,LOC,x,-B/2-0.0001,0+0.0001
NPLLOT,ALL
/REPLOT
/RESIZE
*GET,nn,NODE,0,COUNT
NPLLOT
F,ALL,FY,-Q/nn

```

```

ALLSEL,ALL
/REPLOT
EPLOT
SAVE
FINISH
!
!=====
! S O L U C A O
!=====
!
!-----
! OPÇÕES
!-----
!
/SOLU
!
TUNIF,20
TREF,20
!
!carregamento 1_FORCA MECANICA
!
ANTYPE,0
NLGEOM,Off
LNSRCH,ON
TIME,0.1
NSUBSET,200,500,100
OUTRES,ERASE
OUTRES,ALL,ALL
CNVTOL,F,,0.05,2,,
CNVTOL,U,,0.05,2,,

ALLSEL,ALL
/REPLOT
LSWRITE,1,
!
!-----
! RESOLVER
!-----
!
/solu
LSSOLVE,1,1,1
FINISH
!
!/=/=/=/=/=/=/=/=/=/=/=/=/=/=/=/=/=/=/=/=/=/=/=/=/=/=/=/=/=/=/=/=/=/=/=/=/=/=/=/=/=/=/=/=/=/=/=/=/=/=/=/=/=/=/=/=

```

A.4) Exemplo de *script* para análise estrutural da coluna C3 em temperatura ambiente usando o diagrama tensão-deformação proposto pelo EN 1992-1-2.

```

!=====  

!  

!=====
! DEFINIÇÕES INICIAIS
!=====
!  

FINISH  

/CLEAR  

!  

/VIEW,1,1,1,1  

/ANG,1  

/UIS,MSGPOP,3  

/PBC,ALL,,1  

/REP,FAST  

/CONFIG,NOELDB,1  

!  

/PREP7  

/title, Analise estrutural em temp ambiente - P110120 (EN 1992-1-2)  

!  

!-----  

! PARAMETROS INICIAIS
!-----  

!  

fcm= 23700           ! resistencia a compressao do concreto - 20°C, kN/m^2  

fctm= 2475.26       ! resistencia a tracao do concreto pela - 20°C, kN/m^2  

MEC=28665173.5     ! módulo de elasticidade do concreto - 20°C, kN/m^2  

alphaE=1           ! coeficiente para calculo do MEc - Conc Silicoso  

fys=611000         ! tensão de escoamento do aço - 20°C, kN/m^2  

MES=205000000     ! módulo de elasticidade do aço - 20°C, kN/m^2  

!  

!DIMENSOES [m]  

h=20/100  

b=20/100  

l=120/100  

c=1.5/100         ! cobrimento de concreto  

tch=2.5/100      ! espessura da chapa  

!  

! CARGA A SER APLICADA [kN]  

Q=1200/4  

!  

!-----  

! ELEMENTOS
!-----  

!  

ET,1,SOLID65       ! CONCRETO  

KEYOPT,1,1,0  

KEYOPT,1,2,0  

KEYOPT,1,4,0  

KEYOPT,1,5,0  

KEYOPT,1,6,0  

!  

ET,2,LINK180       ! BARRAS DE ACO

```

```

!
ET,3,SOLID65          ! CHAPA
KEYOPT,1,1,0
KEYOPT,1,2,0
KEYOPT,1,4,0
KEYOPT,1,5,0
KEYOPT,1,6,0
!
!-----
! CONSTANTES REAIS
!-----
!
R,1,,,,,,           ! CONCRETO
RMORE,,,,,,
RMORE,0.01,
!
R,2,                ! CHAPA
RMORE,,,,,,
RMORE,0.01,
!
!-----
! SECOES DAS BARRAS
!-----
!
SECTYPE,1,LINK
SECDATA,0.000078539816,
SECCONTROL,,
!
SECTYPE,2,LINK
SECDATA,0.0000196,
SECCONTROL,,
!
!=====
! PROPRIEDADES DOS MATERIAIS
!=====
!
MPTEMP,,,,,,       ! CONCRETO
MPTEMP,1,20
MPDATA,EX,1,,MEC
MPDATA,PRXY,1,,0.2
!
TB,CONC,1,1,9,
TBTEMP,20
TBDATA,,0.53,0.98,fctm,-1,,
!
TBDE,MELAS,1,,
TB,MELAS,1,1,22,0
TBTEMP,20
epsilo_c1theta = 0.0025          !deformacao limite
epsilo_cu1theta = 0.02          !deformacao ultima
kapa_ctheta = 1                  !redutor de resistencia
EC1=(fcm*(kapa_ctheta))/epsilo_c1theta
kapa_MEC=1

TBPT,,epsilo_c1theta/100,(fcm*(kapa_ctheta*(3*(epsilo_c1theta/100))))/(epsilo_c1theta*(2+((1/100)**3))
)
TBPT,,epsilo_c1theta/20,(fcm*(kapa_ctheta*(3*(epsilo_c1theta/20))))/(epsilo_c1theta*(2+((1/20)**3)))
TBPT,,epsilo_c1theta/10,(fcm*(kapa_ctheta*(3*(epsilo_c1theta/10))))/(epsilo_c1theta*(2+((1/10)**3)))

```

```

TBPT,,epsilo_c1theta/8,(fcm*(kapa_ctheta*(3*(epsilo_c1theta/8)))/(epsilo_c1theta*(2+((1/8)**3)))
TBPT,,epsilo_c1theta/6,(fcm*(kapa_ctheta*(3*(epsilo_c1theta/6)))/(epsilo_c1theta*(2+((1/6)**3)))
TBPT,,epsilo_c1theta/5,(fcm*(kapa_ctheta*(3*(epsilo_c1theta/5)))/(epsilo_c1theta*(2+((1/5)**3)))
TBPT,,epsilo_c1theta/4,(fcm*(kapa_ctheta*(3*(epsilo_c1theta/4)))/(epsilo_c1theta*(2+((1/4)**3)))
TBPT,,epsilo_c1theta/3.5,(fcm*(kapa_ctheta*(3*(epsilo_c1theta/3.5)))/(epsilo_c1theta*(2+((1/3.5)**3)))
TBPT,,epsilo_c1theta/3,(fcm*(kapa_ctheta*(3*(epsilo_c1theta/3)))/(epsilo_c1theta*(2+((1/3)**3)))
TBPT,,epsilo_c1theta/2.5,(fcm*(kapa_ctheta*(3*(epsilo_c1theta/2.5)))/(epsilo_c1theta*(2+((1/2.5)**3)))
TBPT,,epsilo_c1theta/2,(fcm*(kapa_ctheta*(3*(epsilo_c1theta/2)))/(epsilo_c1theta*(2+((1/2)**3)))
TBPT,,epsilo_c1theta/1.9,(fcm*(kapa_ctheta*(3*(epsilo_c1theta/1.9)))/(epsilo_c1theta*(2+((1/1.9)**3)))
TBPT,,epsilo_c1theta/1.8,(fcm*(kapa_ctheta*(3*(epsilo_c1theta/1.8)))/(epsilo_c1theta*(2+((1/1.8)**3)))
TBPT,,epsilo_c1theta/1.7,(fcm*(kapa_ctheta*(3*(epsilo_c1theta/1.7)))/(epsilo_c1theta*(2+((1/1.7)**3)))
TBPT,,epsilo_c1theta/1.6,(fcm*(kapa_ctheta*(3*(epsilo_c1theta/1.6)))/(epsilo_c1theta*(2+((1/1.6)**3)))
TBPT,,epsilo_c1theta/1.5,(fcm*(kapa_ctheta*(3*(epsilo_c1theta/1.5)))/(epsilo_c1theta*(2+((1/1.5)**3)))
TBPT,,epsilo_c1theta/1.4,(fcm*(kapa_ctheta*(3*(epsilo_c1theta/1.4)))/(epsilo_c1theta*(2+((1/1.4)**3)))
TBPT,,epsilo_c1theta/1.3,(fcm*(kapa_ctheta*(3*(epsilo_c1theta/1.3)))/(epsilo_c1theta*(2+((1/1.3)**3)))
TBPT,,epsilo_c1theta/1.2,(fcm*(kapa_ctheta*(3*(epsilo_c1theta/1.2)))/(epsilo_c1theta*(2+((1/1.2)**3)))
TBPT,,epsilo_c1theta/1.1,(fcm*(kapa_ctheta*(3*(epsilo_c1theta/1.1)))/(epsilo_c1theta*(2+((1/1.1)**3)))
TBPT,,epsilo_c1theta,(fcm*(kapa_ctheta))
TBPT,,epsilo_cU1theta,(fcm*(kapa_ctheta))+((epsilo_cU1theta-epsilo_c1theta)*0.001)
!
MPTEMP,,,,,,,,          !ACO
MPTEMP,1,20
MPDATA,EX,2,,MES
MPDATA,PRXY,2,,0.3
!
TBDE,MISO,2,,
TB,MISO,2,1,3,0
TBTEMP,20
fy_theta = fys
ME_theta = MES
epsilo_fy = 0.02
epsilo_u = 0.2
TBPT,,fY_theta/ME_theta,fy_theta
TBPT,,epsilo_fy,fy_theta
TBPT,,epsilo_u,fy_theta+(0.15-.02)*0.001
!
MPTEMP,,,,,,,,          !CHAPA DE TOPO
MPTEMP,1,20
MPDATA,EX,3,,10E3*MEs
MPDATA,PRXY,3,,0.3
!
TBDE,MISO,3,,
TB,MISO,3,1,3,0
TBTEMP,20
fy_theta = 10E3*fys
ME_theta = 10E3*MES
epsilo_fy = 10E3*0.02
epsilo_u = 10E3*0.2
TBPT,,fY_theta/ME_theta,fy_theta
TBPT,,epsilo_fy,fy_theta
TBPT,,epsilo_u,fy_theta+(0.15-.02)*0.001
!
!=====
! G E R A C A O D A G E O M E T R I A
!=====
!
BLOCK,-b/2,0,0+TCH,-1-TCH,-h/2,0,

```

```

!
WPCSYS,-1,0
/VIEW,1,,1
/ANG,1
/REP,FAST
VSEL,ALL
VSBW,all
wprota,,90
VSBW,all
WPCSYS,-1,0
wpoff,-(b/2)+c,0,0
wpoff,0,0,-h/2+c
VSBW,all
wprota,,90
VSBW,all
wpoff,0,0,+b-2*c
wpoff,-h+2*c,0,0
VSBW,all
wprota,,-90
VSBW,all
WPCSYS,-1,0
VGLUE,all
WPCSYS,-1,0
/VIEW,1,,,1
/ANG,1
/REP,FAST
VSEL,ALL
wprota,,90,
VSBW,all
WPCSYS,-1,0
/VIEW,1,,,1
/ANG,1
/REP,FAST
VSEL,ALL
!
wpoff,0,-c,0
wprota,,90,
VSBW,all
wpoff,0,0,(12/100)-c
VSBW,all
wpoff,0,0,12/100
VSBW,all
wpoff,0,0,12/100
VSBW,all
wpoff,0,0,12/100
VSBW,all
wpoff,0,0,12/100
VSBW,all
wpoff,0,0,12/100
VSBW,all
wpoff,0,0,12/100
VSBW,all
wpoff,0,0,12/100
VSBW,all
wpoff,0,0,12/100
VSBW,all
wpoff,0,0,12/100
VSBW,all
wpoff,0,0,(12/100)-c

```

! divisão dos volumes para compatibilizar malha


```

VSBW,all
WPCSYS,-1,1
VGLUE,all
!
! DIVISAO DAS LINHAS
!
/VIEW,1,1,1,1
/ANG,1
/REPLOT
/AUTO,1
/REP,FAST
!
LSEL,ALL
LPLOT
LSEL,S,LOC,X,-b/2-1/1000,-b/2+1/1000
LSEL,A,LOC,X,-b/2+C-1/1000,-b/2+C+1/1000
LSEL,A,LOC,X,0-1/1000,0+1/1000
LSEL,U,LOC,Z,-H/2-1/1000,-H/2+C+1/1000
LSEL,U,LOC,Z,0+1/1000,0-1/1000
LESIZE,ALL,,,11,1,1,,,0,
!
LSEL,ALL
LPLOT
LSEL,s,LOC,Z,-H/2-1/1000,-H/2+1/1000
LSEL,A,LOC,Z,-H/2+C-1/1000,-H/2+C+1/1000
LSEL,A,LOC,Z,0-1/1000,0+1/1000
LSEL,U,LOC,X,-B/2-1/1000,-B/2+C+1/1000
LSEL,U,LOC,X,0+1/1000,0-1/1000
LESIZE,ALL,,,11,1,1,,,0,
!
LSEL,INVE
LPLOT
LSEL,U,LOC,Z,-H/2+C+1/1000,0-1/1000
LSEL,U,LOC,Z,H/2-C-1/1000,0+1/1000
LESIZE,ALL,,,4,1,1,,,0,
!
LSEL,S,LOC,Y,TCH,-1-TCH
LSEL,U,LOC,Y,TCH-0.0001,TCH+0.0001
LSEL,U,LOC,Y,0-0.0001,0+0.0001
LSEL,U,LOC,Y,-C-0.0001,-C+0.0001
LSEL,U,LOC,Y,-12/100-0.0001,-12/100+0.0001
LSEL,U,LOC,Y,-24/100-0.0001,-24/100+0.0001
LSEL,U,LOC,Y,-36/100-0.0001,-36/100+0.0001
LSEL,U,LOC,Y,-48/100-0.0001,-48/100+0.0001
LSEL,U,LOC,Y,-60/100-0.0001,-60/100+0.0001
LSEL,U,LOC,Y,-72/100-0.0001,-72/100+0.0001
LSEL,U,LOC,Y,-84/100-0.0001,-84/100+0.0001
LSEL,U,LOC,Y,-96/100-0.0001,-96/100+0.0001
LSEL,U,LOC,Y,-108/100-0.0001,-108/100+0.0001
LSEL,U,LOC,Y,-L+C-0.0001,-L+C+0.0001
LSEL,U,LOC,Y,-L-0.0001,-L+0.0001
LSEL,U,LOC,Y,-L-TCH-0.0001,-L-TCH+0.0001
LESIZE,ALL,,,2,1,1,,,0,
!
ALLSEL,ALL
LPLOT
!

```

```

! MESHING
!
MSHAPE,0,3D      !0- quadrilateral 1-triang
MSHKEY,1        !0- free 1-mesh
!
VSEL, ALL
vSEL,r,LOC,Y,0+0.000001,-1-0.0000001
VPLOT
vATT,1,1,1,0    ! atribui material 1 ao CONCRETO
VMESH,ALL
!
vsel,invE
VPLOT
vATT,3,2,3,0    ! atribui material 3 a CHAPA DE TOPO
VMESH,ALL
ALLSEL,ALL
!
LPPLOT
!
LSEL,S,LOC,X,-b/2+c+0.00001,-b/2+c-0.00001
LSEL,U,LOC,Z,-h/2+0.00001,-h/2-0.0001
LSEL,U,LOC,Z,-h/2+0.00001,-h/2+C-0.0001
LSEL,U,LOC,Z,-h/2+C+0.00001,0+0.00001
ISEL,r,LOC,Y,0+0.000001,-1-0.0000001
LATT,2,, , , 1    ! atribui material 2 ao ACO
LMESH,ALL
!
LPPLOT
LSEL,S,LOC,Y,-C,-((L-C))
LSEL,U,LOC,X,-b/2+1/100,-b/2
LSEL,U,LOC,X,-b/2+c+0.00001,b/2-c-0.0001
LSEL,U,LOC,Z,-h/2+0.00001,-h/2-0.0001
LSEL,U,LOC,Z,-h/2+0.00001,-h/2+C-0.0001
LSEL,a,LOC,Z,-h/2+C+0.00001,-h/2+C-0.0001
LSEL,U,LOC,X,-b/2-1/100,-b/2+c-1/1000000
LSEL,U,LOC,Y,TCH+0.00001,0-C+0.0001
LSEL,U,LOC,Y,0-C-0.0001,0-10/100+0.0001
LSEL,U,LOC,Y,0-12/100-0.0001,0-24/100+0.0001
LSEL,U,LOC,Y,0-24/100-0.0001,0-36/100+0.0001
LSEL,U,LOC,Y,0-36/100-0.0001,0-48/100+0.0001
LSEL,U,LOC,Y,0-48/100-0.0001,0-60/100+0.0001
LSEL,U,LOC,Y,0-60/100-0.0001,0-72/100+0.0001
LSEL,U,LOC,Y,0-72/100-0.0001,0-84/100+0.0001
LSEL,U,LOC,Y,0-84/100-0.0001,0-96/100+0.0001
LSEL,U,LOC,Y,0-96/100-0.0001,0-108/100+0.0001
LSEL,U,LOC,Y,0-108/100-0.0001,-1+c+0.0001
LSEL,U,LOC,Y,-1+c-0.0001,-1-TCH-0.0001
LATT,2,, , , 2    ! atribui material 3 ao ACO
LMESH,ALL
!
ALLSEL,ALL
!
NUMMRG,KP, , , ,LOW
NUMMRG,NODE, , , ,LOW
!
!=====
! V I N C U L O S   ( A P O I O S )

```

```

=====
!
!-----
! VINCULOS REFERENTES A SIMETRIA DO PROLEMA
!-----!
NSEL,S,LOC,X,-0.0001,0.0001
NSEL,R,LOC,y,TCH-0.0001,-1-TCH+0.0001
nplot
D,ALL,UX,0,
!
NSEL,S,LOC,Z,-0.0001,0.0001
NSEL,R,LOC,y,TCH-0.0001,-1-TCH+0.0001
nplot
D,ALL,UZ,0,
!
!-----
! ENGASTE FIXO E MOVEL
!-----!
NSEL,S,LOC,y,-1-TCH-0.0001,-1-TCH+0.0001
NSEL,R,LOC,x,-B/2-0.0001,0+0.0001
nplot
D,ALL,UX,0,
D,ALL,UY,0,
D,ALL,UZ,0,
!
NSEL,S,LOC,y,TCH-0.0001,TCH+0.0001
NSEL,R,LOC,x,-B/2-0.0001,0+0.0001
nplot
D,ALL,UX,0,
D,ALL,UZ,0,
!
allsel,all
!-----
! APLICAÇÃO DA CARGA DISTRIBUÍDA
!-----
!
NSEL,S,LOC,y,TCH-0.0001,TCH+0.0001
NSEL,R,LOC,x,-B/2-0.0001,0+0.0001
NPLOTT,ALL
/REPLOT
/RESIZE
*GET,nn,NODE,0,COUNT
NPLOT
F,ALL,FY,-Q/nn
ALLSEL,ALL
/REPLOT
EPLOT
SAVE
FINISH
!
=====
! S O L U C A O
=====
!
!-----
! OPÇÕES
!-----

```

```

!
/SOLU
!
TUNIF,20
TREF,20
!
!carregamento 1_FORCA MECANICA
!
ANTYPE,0
NLGEOM,Off
LNSRCH,ON
TIME,0.1
NSUBSET,200,500,100
OUTRES,ERASE
OUTRES,ALL,ALL
CNVTOL,F,,0.05,2,,
CNVTOL,U,,0.05,2,,

ALLSEL,ALL
/REPLOT
LSWRITE,1,
!
!-----
! RESOLVER
!-----
!
/solu
LSSOLVE,1,1,1
FINISH
!/=/=/=/=/=/=/=/=/=/=/=/=/=/=/=/=/=/=/=/=/=/=/=/=/=/=/=/=/=/=/=/=/=/=/=/

```

A.5) Exemplo de *script* para análise térmica tridimensional da coluna C5.

```

!=====
!
!=====
! DEFINIÇÕES INICIAIS
!=====
!
FINISH
/CLEAR
!
/GRA,POWER
/GST,ON
/PLO,INFO,3
/GRO,CURL,ON
/CPLANE,1
/RELOT,RESIZE
WPSTYLE,,,,,,,,0
/RELOT,RESIZE
!
/PREP7
/title, Analise termica tridimensional - COLUNA C5 WU E LIE (1992)
!
!-----
! PARAMETROS INICIAIS
!-----
!
!DIMENSOES [m]
h=30.5/100
b=30.5/100
l=380/100
c=4.8/100           ! cobrimento de concreto
tch=2.5/100         ! espessura da chapa
!
!-----
! ELEMENTOS
!-----
!
ET,1,SOLID70       ! CONCRETO
!
ET,2,LINK33        ! BARRAS DE ACO
!
ET,3,SURF152       ! ELEMENTO DE SUPERFICIE PARA CONVECCAO
KEYOPT,3,4,1
KEYOPT,3,5,1
KEYOPT,3,6,0
KEYOPT,3,8,5
KEYOPT,3,9,0
!
ET,4,SURF152       ! ELEMENTO DE SUPERFICIE PARA RADIACAO
KEYOPT,4,4,1
KEYOPT,4,5,1
KEYOPT,4,8,0
KEYOPT,4,9,1
!
!-----
! CONSTANTES REAIS

```

```

!-----
!
R,1,                ! CONCRETO
!
R,2,0.000380132711, , ! ARMADURA LONGITUDINAL INFERIOR
!
R,3,0.0000503, ,    ! ESTRIBOS
!
R,4,                ! CONVECCAO
!
R,5,1,5.67E-8       ! RADIACAO
!
=====
! PROPRIEDADES DOS MATERIAIS
=====
!
!-----
! CONCRETO
!-----
!
MPTEMP,,,,,,,,      ! DENSIDADE, kg/m3
MPTEMP,1,20
MPTEMP,2,115
MPTEMP,3,200
MPTEMP,4,400
MPTEMP,5,1200
MPDATA,DENS,1,,2500
MPDATA,DENS,1,,2500
MPDATA,DENS,1,,2450
MPDATA,DENS,1,,2375
MPDATA,DENS,1,,2200
!
MPTEMP,,,,,,,,      ! CALOR ESPECIFICO, J/(kg.°C)
MPTEMP,1,20
MPTEMP,2,99
MPTEMP,3,100
MPTEMP,4,115
MPTEMP,5,200
MPTEMP,6,400
MPTEMP,7,1200
MPDATA,C,1,,900
MPDATA,C,1,,900
MPDATA,C,1,,2020
MPDATA,C,1,,2020
MPDATA,C,1,,1000
MPDATA,C,1,,1100
MPDATA,C,1,,1100
!
MPTEMP,,,,,,,,      ! CONDUTIVIDADE TERMICA, W/(m.°C)
MPTEMP,1,20
MPTEMP,2,40
MPTEMP,3,60
MPTEMP,4,80
MPTEMP,5,100
MPTEMP,6,120
MPTEMP,7,140
MPTEMP,8,160

```

MPTEMP,9,180
MPTEMP,10,200
MPTEMP,11,220
MPTEMP,12,240
MPTEMP,13,260
MPTEMP,14,280
MPTEMP,15,300
MPTEMP,16,320
MPTEMP,17,340
MPTEMP,18,360
MPTEMP,19,380
MPTEMP,20,400
MPTEMP,21,420
MPTEMP,22,440
MPTEMP,23,460
MPTEMP,24,480
MPTEMP,25,500
MPTEMP,26,520
MPTEMP,27,540
MPTEMP,28,560
MPTEMP,29,580
MPTEMP,30,600
MPTEMP,31,620
MPTEMP,32,640
MPTEMP,33,660
MPTEMP,34,680
MPTEMP,35,700
MPTEMP,36,720
MPTEMP,37,740
MPTEMP,38,760
MPTEMP,39,780
MPTEMP,40,800
MPTEMP,41,820
MPTEMP,42,840
MPTEMP,43,860
MPTEMP,44,880
MPTEMP,45,900
MPTEMP,46,920
MPTEMP,47,940
MPTEMP,48,960
MPTEMP,49,980
MPTEMP,50,1000
MPTEMP,51,1020
MPTEMP,52,1200
MPDATA,KXX,1,,1.333
MPDATA,KXX,1,,1.3065
MPDATA,KXX,1,,1.2805
MPDATA,KXX,1,,1.2548
MPDATA,KXX,1,,1.2297
MPDATA,KXX,1,,1.205
MPDATA,KXX,1,,1.1808
MPDATA,KXX,1,,1.157
MPDATA,KXX,1,,1.1337
MPDATA,KXX,1,,1.1108
MPDATA,KXX,1,,1.0884
MPDATA,KXX,1,,1.0664
MPDATA,KXX,1,,1.0449

MPDATA,KXX,1,,1.0239
 MPDATA,KXX,1,,1.0033
 MPDATA,KXX,1,,0.98317
 MPDATA,KXX,1,,0.96349
 MPDATA,KXX,1,,0.94427
 MPDATA,KXX,1,,0.92551
 MPDATA,KXX,1,,0.9072
 MPDATA,KXX,1,,0.88935
 MPDATA,KXX,1,,0.87195
 MPDATA,KXX,1,,0.85501
 MPDATA,KXX,1,,0.83853
 MPDATA,KXX,1,,0.8225
 MPDATA,KXX,1,,0.80693
 MPDATA,KXX,1,,0.79181
 MPDATA,KXX,1,,0.77715
 MPDATA,KXX,1,,0.76295
 MPDATA,KXX,1,,0.7492
 MPDATA,KXX,1,,0.73591
 MPDATA,KXX,1,,0.72307
 MPDATA,KXX,1,,0.71069
 MPDATA,KXX,1,,0.69877
 MPDATA,KXX,1,,0.6873
 MPDATA,KXX,1,,0.67629
 MPDATA,KXX,1,,0.66573
 MPDATA,KXX,1,,0.65563
 MPDATA,KXX,1,,0.64599
 MPDATA,KXX,1,,0.6368
 MPDATA,KXX,1,,0.62807
 MPDATA,KXX,1,,0.61979
 MPDATA,KXX,1,,0.61197
 MPDATA,KXX,1,,0.60461
 MPDATA,KXX,1,,0.5977
 MPDATA,KXX,1,,0.59125
 MPDATA,KXX,1,,0.58525
 MPDATA,KXX,1,,0.57971
 MPDATA,KXX,1,,0.57463
 MPDATA,KXX,1,,0.57
 MPDATA,KXX,1,,0.56583
 MPDATA,KXX,1,,0.548800

!
 MP,EMISS,1,0.7 ! EMISSIVIDADE

!
 !-----
 ! ACO
 !-----

!
 MPTEMP,,,,, ! DENSIDADE, kg/m3

MPTEMP,1,20
 MPDATA,DENS,2,,7850

!
 MPTEMP,,,,, ! CALOR ESPECIFICO, J/(kg.°C)

MPTEMP,1,20
 MPTEMP,2,100
 MPTEMP,3,200
 MPTEMP,4,300
 MPTEMP,5,400
 MPTEMP,6,500

MPTEMP,7,600
 MPTEMP,8,700
 MPTEMP,9,735
 MPTEMP,10,736
 MPTEMP,11,800
 MPTEMP,12,900
 MPTEMP,13,1000
 MPTEMP,14,1200
 MPDATA,C,2,,439.80
 MPDATA,C,2,,487.62
 MPDATA,C,2,,529.76
 MPDATA,C,2,,564.74
 MPDATA,C,2,,605.88
 MPDATA,C,2,,666.5
 MPDATA,C,2,,759.92
 MPDATA,C,2,,1008.158
 MPDATA,C,2,,5000
 MPDATA,C,2,,4109
 MPDATA,C,2,,803.2609
 MPDATA,C,2,,650.4438
 MPDATA,C,2,,650
 MPDATA,C,2,,650

!

MPTEMP,,,,,,,,

! CONDUTIVIDADE TERMICA, W/(m.°C)

MPTEMP,1,20

MPTEMP,2,100

MPTEMP,3,200

MPTEMP,4,300

MPTEMP,5,400

MPTEMP,6,500

MPTEMP,7,600

MPTEMP,8,700

MPTEMP,9,735

MPTEMP,10,800

MPTEMP,11,1200

MPDATA,KXX,2,,53.33

MPDATA,KXX,2,,50.67

MPDATA,KXX,2,,47.34

MPDATA,KXX,2,,44.01

MPDATA,KXX,2,,40.68

MPDATA,KXX,2,,37.35

MPDATA,KXX,2,,34.02

MPDATA,KXX,2,,30.69

MPDATA,KXX,2,,29.5245

MPDATA,KXX,2,,27.3

MPDATA,KXX,2,,27.3

!

MP,EMISS,2,0.7

! EMISSIVIDADE

!

!

TOFFST,273.15

! CONVERTER UNIDADE DE TEMPERATURA DO SOFTWARE DE
KELVIN PARA CELSIUS

!

!

=====

! G E R A C A O D A G E O M E T R I A

=====

```

!
/PREP7
BLOCK,-b/2,0,0+TCH,-1-TCH,-h/2,0,    ! VOLUME DE CONCRETO
!
WPCSYS,-1,0                            ! divisão dos volumes para compatibilizar malha
/VIEW,1,,1
/ANG,1
/REP,FAST
VSEL,ALL
!
VSBW,all
wprota,,90
VSBW,all
WPCSYS,-1,0
wpoff,-(b/2)+(25/1000),0,0
VSBW,all
wprota,,90
VSBW,all
WPCSYS,-1,0
wpoff,-(b/2)+(38/1000),0,0
VSBW,all
wprota,,90
VSBW,all
WPCSYS,-1,0
wpoff,-(b/2)+(63/1000),0,0
VSBW,all
wprota,,90
VSBW,all
WPCSYS,-1,0
wpoff,-(b/2)+(12/1000),0,0
VSBW,all
wprota,,90
VSBW,all
!
WPCSYS,-1,0
wpoff,-(b/2)+c,0,0
wpoff,0,0,-h/2+c
VSBW,all
wprota,,90
VSBW,all
wpoff,0,0,+b-2*c
wpoff,-h+2*c,0,0
VSBW,all
wprota,,-90
VSBW,all
WPCSYS,-1,0
VGLUE,all
!
WPCSYS,-1,0
/VIEW,1,,1
/ANG,1
/REP,FAST
VSEL,ALL
!
wprota,,90,
VSBW,all
WPCSYS,-1,0

```

```

/VIEW,1,,1
/ANG,1
/REP,FAST
VSEL,ALL
wpoff,0,-c,0
wprota,,90,
VSBW,all
wpoff,0,0,(10/100)-C
VSBW,all
wpoff,0,0,10/100
VSBW,all
wpoff,0,0,10/100
VSBW,all
wpoff,0,0,10/100
VSBW,all
wpoff,0,0,10/100
VSBW,all
wpoff,0,0,10/100
VSBW,all
wpoff,0,0,10/100
VSBW,all
wpoff,0,0,10/100
VSBW,all
wpoff,0,0,10/100
VSBW,all
wpoff,0,0,10/100
VSBW,all
wpoff,0,0,10/100
VSBW,all
wpoff,0,0,10/100
VSBW,all
wpoff,0,0,10/100
VSBW,all
wpoff,0,0,10/100
VSBW,all
wpoff,0,0,10/100
VSBW,all
wpoff,0,0,10/100
VSBW,all
wpoff,0,0,10/100
VSBW,all
wpoff,0,0,10/100
VSBW,all
wpoff,0,0,10/100
VSBW,all
wpoff,0,0,10/100
VSBW,all
wpoff,0,0,5/100
VSBW,all
wpoff,0,0,5/100
VSBW,all
wpoff,0,0,10/100
VSBW,all
wpoff,0,0,10/100
VSBW,all
wpoff,0,0,10/100
VSBW,all
wpoff,0,0,10/100
VSBW,all
wpoff,0,0,10/100
VSBW,all
wpoff,0,0,10/100
VSBW,all
wpoff,0,0,10/100
VSBW,all

```

```

wpoff,0,0,10/100
VSBW,all
wpoff,0,0,10/100
VSBW,all
wpoff,0,0,10/100
VSBW,all
wpoff,0,0,10/100
VSBW,all
wpoff,0,0,10/100
VSBW,all
wpoff,0,0,10/100
VSBW,all
wpoff,0,0,10/100
VSBW,all
wpoff,0,0,10/100
VSBW,all
wpoff,0,0,10/100
VSBW,all
wpoff,0,0,10/100
VSBW,all
wpoff,0,0,10/100
VSBW,all
wpoff,0,0,10/100
VSBW,all
wpoff,0,0,10/100
VSBW,all
wpoff,0,0,(10/100)-C
VSBW,all
wpoff,0,0,C
VSBW,all
WPCSYS,-1,1
VGLUE,all
!
!-----
! DIVISAO DAS LINHAS
!-----
!
/VIEW,1,1,1,1
/ANG,1
/REPLOT
/AUTO,1
/REP,FAST
!
LSEL,ALL
LPLOT
LSEL,S,LOC,X,-b/2-1/1000,-b/2+1/1000
LSEL,A,LOC,X,-b/2+C-1/1000,-b/2+C+1/1000
LSEL,A,LOC,X,0-1/1000,0+1/1000
LSEL,A,LOC,X,-(b/2)+(25/1000)-1/1000,-(b/2)+(25/1000)+1/1000
LSEL,A,LOC,X,-(b/2)+(38/1000)-1/1000,-(b/2)+(38/1000)+1/1000
LSEL,A,LOC,X,-(b/2)+(63/1000)-1/1000,-(b/2)+(63/1000)+1/1000
LSEL,A,LOC,X,-(b/2)+(12/1000)-1/1000,-(b/2)+(12/1000)+1/1000
LSEL,U,LOC,Z,-H/2-1/1000,-H/2+C+1/1000
LSEL,U,LOC,Z,0+1/1000,0-1/1000
LESIZE,ALL,,,11,1,1,,,0
!
LSEL,ALL

```

```

L PLOT
LSEL,s,LOC,Z,-H/2-1/1000,-H/2+1/1000
LSEL,A,LOC,Z,-H/2+C-1/1000,-H/2+C+1/1000
LSEL,A,LOC,Z,0-1/1000,0+1/1000
LSEL,U,LOC,X,-B/2-1/1000,-B/2+C+1/1000
LSEL,U,LOC,X,0+1/1000,0-1/1000
LSEL,U,LOC,X,-(b/2)+(25/1000)-1/1000,-(b/2)+(25/1000)+1/1000
LSEL,u,LOC,X,-(b/2)+(38/1000)-1/1000,-(b/2)+(38/1000)+1/1000
LSEL,U,LOC,X,-(b/2)+(63/1000)-1/1000,-(b/2)+(63/1000)+1/1000
LSEL,U,LOC,X,-(b/2)+(12/1000)-1/1000,-(b/2)+(12/1000)+1/1000
LESIZE,ALL,,11,1,1,,0,
!
LSEL,INVE
L PLOT
LSEL,U,LOC,Z,-H/2+C+1/1000,0-1/1000
LSEL,U,LOC,Z,H/2-C-1/1000,0+1/1000
LESIZE,ALL,,4,1,1,,0,
!
LSEL,S,LOC,Y,TCH,-1-TCH
LSEL,U,LOC,Y,TCH-0.0001,TCH+0.0001
LSEL,U,LOC,Y,0-0.0001,0+0.0001
LSEL,U,LOC,Y,-C-0.0001,-C+0.0001
LSEL,U,LOC,Y,-10/100-0.0001,-10/100+0.0001
LSEL,U,LOC,Y,-20/100-0.0001,-20/100+0.0001
LSEL,U,LOC,Y,-30/100-0.0001,-30/100+0.0001
LSEL,U,LOC,Y,-40/100-0.0001,-40/100+0.0001
LSEL,U,LOC,Y,-50/100-0.0001,-50/100+0.0001
LSEL,U,LOC,Y,-60/100-0.0001,-60/100+0.0001
LSEL,U,LOC,Y,-70/100-0.0001,-70/100+0.0001
LSEL,U,LOC,Y,-80/100-0.0001,-80/100+0.0001
LSEL,U,LOC,Y,-90/100-0.0001,-90/100+0.0001
LSEL,U,LOC,Y,-100/100-0.0001,-100/100+0.0001
LSEL,U,LOC,Y,-110/100-0.0001,-110/100+0.0001
LSEL,U,LOC,Y,-120/100-0.0001,-120/100+0.0001
LSEL,U,LOC,Y,-130/100-0.0001,-130/100+0.0001
LSEL,U,LOC,Y,-140/100-0.0001,-140/100+0.0001
LSEL,U,LOC,Y,-150/100-0.0001,-150/100+0.0001
LSEL,U,LOC,Y,-160/100-0.0001,-160/100+0.0001
LSEL,U,LOC,Y,-170/100-0.0001,-170/100+0.0001
LSEL,U,LOC,Y,-175/100-0.0001,-175/100+0.0001
LSEL,U,LOC,Y,-180/100-0.0001,-180/100+0.0001
LSEL,U,LOC,Y,-190/100-0.0001,-190/100+0.0001
LSEL,U,LOC,Y,-200/100-0.0001,-200/100+0.0001
LSEL,U,LOC,Y,-210/100-0.0001,-210/100+0.0001
LSEL,U,LOC,Y,-220/100-0.0001,-220/100+0.0001
LSEL,U,LOC,Y,-230/100-0.0001,-230/100+0.0001
LSEL,U,LOC,Y,-240/100-0.0001,-240/100+0.0001
LSEL,U,LOC,Y,-250/100-0.0001,-250/100+0.0001
LSEL,U,LOC,Y,-260/100-0.0001,-260/100+0.0001
LSEL,U,LOC,Y,-270/100-0.0001,-270/100+0.0001
LSEL,U,LOC,Y,-280/100-0.0001,-280/100+0.0001
LSEL,U,LOC,Y,-290/100-0.0001,-290/100+0.0001
LSEL,U,LOC,Y,-300/100-0.0001,-300/100+0.0001
LSEL,U,LOC,Y,-310/100-0.0001,-310/100+0.0001
LSEL,U,LOC,Y,-320/100-0.0001,-320/100+0.0001
LSEL,U,LOC,Y,-330/100-0.0001,-330/100+0.0001
LSEL,U,LOC,Y,-340/100-0.0001,-340/100+0.0001

```

```

LSEL,U,LOC,Y,-350/100-0.0001,-350/100+0.0001
LSEL,U,LOC,Y,-360/100-0.0001,-360/100+0.0001
LSEL,U,LOC,Y,-370/100-0.0001,-370/100+0.0001
LSEL,U,LOC,Y,-L+C-0.0001,-L+C+0.0001
LSEL,U,LOC,Y,-L-0.0001,-L+0.0001
LSEL,U,LOC,Y,-L-TCH-0.0001,-L-TCH+0.0001
LESIZE,ALL,,,2,1,1,,,0,
!
LSEL,ALL
LPLOT
LSEL,S,LOC,X,-b/2+1/1000,-(b/2)+(12/1000)-1/1000
LSEL,A,LOC,X,-(b/2)+(12/1000)+1/1000,-(b/2)+(25/1000)-1/1000
LSEL,A,LOC,X,-(b/2)+(25/1000)+1/1000,-(b/2)+(38/1000)-1/1000
LSEL,A,LOC,X,-(b/2)+(38/1000)+1/1000,-b/2+C-1/1000
LSEL,A,LOC,X,-b/2+C+1/1000,-(b/2)+(63/1000)-1/1000
LESIZE,ALL,,,2,1,1,,,0,
!
ALLSEL,ALL
LPLOT
!
!-----
! MESHING
!-----
!
MSHAPE,0,3D    !0- quadrilateral 1-triang
MSHKEY,1      !0- free 1-mesh
VSEL, ALL
VPLOT
vATT,1,1,1,0    ! atribui material 1 ao CONCRETO
VMESH,ALL
!
ALLSEL,ALL
LPLOT
!
LSEL,S,LOC,X,-b/2+c+0.00001,-b/2+c-0.00001
LSEL,U,LOC,Z,-h/2+0.00001,-h/2-0.0001
LSEL,U,LOC,Z,-h/2+0.00001,-h/2+C-0.0001
LSEL,U,LOC,Z,-h/2+C+0.00001,0+0.00001
ISEL,r,LOC,Y,0+0.000001,-1-0.000001
LATT,2,2,2, , , ,    ! atribui material 2 ao ACO
LMESH,ALL
!
LSEL,S,LOC,Y,-C,-((L-C))
LSEL,U,LOC,X,-b/2+1/100,-b/2
LSEL,U,LOC,X,-b/2+c+0.00001,b/2-c-0.0001
LSEL,U,LOC,Z,-h/2+0.00001,-h/2-0.0001
LSEL,U,LOC,Z,-h/2+0.00001,-h/2+C-0.0001
LSEL,a,LOC,Z,-h/2+C+0.00001,-h/2+C-0.0001
LSEL,U,LOC,X,-b/2-1/100,-b/2+c-1/1000000
LSEL,U,LOC,Y,TCH+0.00001,0-C+0.0001
LSEL,U,LOC,Y,0-C-0.0001,0-10/100+0.0001
LSEL,U,LOC,Y,0-10/100-0.0001,0-40/100+0.0001
LSEL,U,LOC,Y,0-40/100-0.0001,0-70/100+0.0001
LSEL,U,LOC,Y,0-70/100-0.0001,0-100/100+0.0001
LSEL,U,LOC,Y,0-100/100-0.0001,0-130/100+0.0001
LSEL,U,LOC,Y,0-130/100-0.0001,0-160/100+0.0001
LSEL,U,LOC,Y,0-160/100-0.0001,0-190/100+0.0001

```

```

LSEL,U,LOC,Y,0-190/100-0.0001,0-220/100+0.0001
LSEL,U,LOC,Y,0-220/100-0.0001,0-250/100+0.0001
LSEL,U,LOC,Y,0-250/100-0.0001,0-280/100+0.0001
LSEL,U,LOC,Y,0-280/100-0.0001,0-310/100+0.0001
LSEL,U,LOC,Y,0-310/100-0.0001,0-340/100+0.0001
LSEL,U,LOC,Y,0-340/100-0.0001,0-370/100+0.0001
LSEL,U,LOC,Y,0-370/100-0.0001,-1+c+0.0001
LSEL,U,LOC,Y,-1+c-0.0001,-1-TCH-0.0001
LATT,2,3,2, , , ,      ! atribui material 3 ao ACO
LMESH,ALL
!
ALLSEL,ALL
NUMMRG,ALL, , , ,LOW
!
!-----
! EFEITOS DE SUPERFICIE
!-----
!
N,100000000,,-1-10/100,0  ! CRIACAO DO NO EXTRA
!
! CONVECCAO
!
TYPE,3
MAT,1
REAL,4
allsel,all
aplot,all
!
ASEL,S,EXT
ASEL,U,LOC,X,-0.0001,+0.0001
ASEL,U,LOC,z,-0.0001,+0.0001
ASEL,U,LOC,Y,TCH-0.0001,TCH+0.0001
ASEL,U,LOC,Y,-1-TCH-0.0001,-1-TCH+0.0001
LSEL,u,LOC,Y,TCH-0.0001,TCH+0.0001
LSEL,U,LOC,Y,-1-TCH-0.0001,-1-TCH+0.0001
nset,s,node,,100000000
NSLA,a,1      !SELECIONA OS NÓS ASSOCIADOS AS AREAS SELECIONADAS
ESURF,100000000
!
! RADIACAO
!
TYPE,4
REAL,5
MAT,1
allsel,all
aplot,all
!
ASEL,S,EXT
ASEL,U,LOC,X,-0.0001,+0.0001
ASEL,U,LOC,z,-0.0001,+0.0001
ASEL,U,LOC,Y,TCH-0.0001,TCH+0.0001
ASEL,U,LOC,Y,-1-TCH-0.0001,-1-TCH+0.0001
LSEL,u,LOC,Y,TCH-0.0001,TCH+0.0001
LSEL,U,LOC,Y,-1-TCH-0.0001,-1-TCH+0.0001
nset,s,node,,100000000
NSLA,a,1
ESURF,100000000

```

```

!
ALLSEL,ALL
NUMMRG,NODE, , , ,LOW
!
/replot,resize
/AUTO,1
/REP,FAST
!
!-----
! CURVA DE INCENDIO PADRAO ISO 834
!-----
!
*DEL,_FNCNAME
*DEL,_FNCMTID
*DEL,_FNCCSYS
*SET,_FNCNAME,'CURVAISO'
*SET,_FNCCSYS,0
!/INPUT,CURVAISO.func,,1
*DIM,%_FNCNAME%,TABLE,6,12,1,,,,%_FNCCSYS%
!
! Begin of equation: 20+345*log(8*{TIME}/60+1)
*SET,%_FNCNAME%(0,0,1), 0.0, -999
*SET,%_FNCNAME%(2,0,1), 0.0
*SET,%_FNCNAME%(3,0,1), 0.0
*SET,%_FNCNAME%(4,0,1), 0.0
*SET,%_FNCNAME%(5,0,1), 0.0
*SET,%_FNCNAME%(6,0,1), 0.0
*SET,%_FNCNAME%(0,1,1), 1.0, -1, 0, 8, 0, 0, 1
*SET,%_FNCNAME%(0,2,1), 0.0, -2, 0, 1, -1, 3, 1
*SET,%_FNCNAME%(0,3,1), 0, -1, 0, 60, 0, 0, -2
*SET,%_FNCNAME%(0,4,1), 0.0, -3, 0, 1, -2, 4, -1
*SET,%_FNCNAME%(0,5,1), 0.0, -1, 0, 1, 0, 0, -3
*SET,%_FNCNAME%(0,6,1), 0.0, -2, 0, 1, -3, 1, -1
*SET,%_FNCNAME%(0,7,1), 0.0, -1, 6, 1, -2, 0, 0
*SET,%_FNCNAME%(0,8,1), 0.0, -2, 0, 345, 0, 0, -1
*SET,%_FNCNAME%(0,9,1), 0.0, -3, 0, 1, -2, 3, -1
*SET,%_FNCNAME%(0,10,1), 0.0, -1, 0, 20, 0, 0, -3
*SET,%_FNCNAME%(0,11,1), 0.0, -2, 0, 1, -1, 1, -3
*SET,%_FNCNAME%(0,12,1), 0.0, 99, 0, 1, -2, 0, 0
! End of equation: 20+345*log(8*{TIME}/60+1)
!-->
FINISH
!
!=====
! S O L U C A O
!=====
!
/SOLU
!
!-----
! OPÇÕES
!-----
!
ANTYPE,TRANS
!
TUNIF,20,
TREF,20,

```



```

!
ESEL,S,type,,3
EPlot
SFE,ALL,1,CONV,,25,      ! film convection
!
ALLSEL,ALL
/REPLOT
!
D,100000000,TEMP,%CURVAISO%
!
KBC,1
!
TRNOPT,FULL
LUMPM,0
!
CNVTOL,TEMP, ,0.01,1, ,
!
AUTOTS,0
DELTIM,5,,1,60
LNSRCH,0
PRED,0
TIME,120
NEQIT,25
OUTRES,ALL,ALL
LSWRITE,1
!
CNVTOL,TEMP, ,0.01,1, ,
!
AUTOTS,0
DELTIM,1,,1,1
LNSRCH,0
PRED,0
TIME,180
NEQIT,25
OUTRES,ALL,ALL
LSWRITE,2
!
CNVTOL,TEMP, ,0.01,1, ,
!
AUTOTS,0
DELTIM,5,,1,60
LNSRCH,0
PRED,0
TIME,7200
NEQIT,25
OUTRES,ALL,ALL
LSWRITE,3
!
!-----
! RESOLVER
!-----
!
LSSOLVE,1,3,1
FINISH
!
!=====

```

A.6) Exemplo de *script* para análise termomecânica tridimensional da coluna C5.

```

!=====  

!  

!=====
! DEFINIÇÕES INICIAIS
!=====
!  

FINISH
/CLEAR
!  

/VIEW,1,1,1,1
/ANG,1
/UIS,MSGPOP,3
/PBC,ALL,,1
/REP,FAST
/CONFIG,NOELDB,1
!  

/PREP7
/title, Analise termomecânica tridimensional - COLUNA C5 WU E LIE (1992)
!  

!-----
! PARAMETROS INICIAIS
!-----
!  

fcm= 30200           ! resistencia a compressao do concreto - 20°C, kN/m^2
fctm= 2369.681098   ! resistencia a tracão do concreto pela - 20°C, kN/m^2
MEC=31077120.7      ! módulo de elasticidade do concreto - 20°C, kN/m^2
alphaE=1            ! coeficiente para calculo do MEc - Conc Silicoso
fys=340000          ! tensão de escoamento do aço - 20°C, kN/m^2
MES=210000000       ! módulo de elasticidade do aço - 20°C, kN/m^2
!  

!DIMENSOES [m]
h=30.5/100
b=30.5/100
l=380/100
c=4.8/100           ! cobrimento de concreto
tch=2.5/100        ! espessura da chapa
!  

! CARGA A SER APLICADA [kN]
Q=1180/4
!  

!-----
! ELEMENTOS
!-----
!  

ET,1,SOLID65        ! CONCRETO
KEYOPT,1,1,0
KEYOPT,1,2,0
KEYOPT,1,4,0
KEYOPT,1,5,0
KEYOPT,1,6,0
!  

ET,2,LINK180        ! BARRAS DE AÇO
!  

ET,3,SOLID65        ! CHAPA

```

```

KEYOPT,1,1,0
KEYOPT,1,2,0
KEYOPT,1,4,0
KEYOPT,1,5,0
KEYOPT,1,6,0
!
!-----
! CONSTANTES REAIS
!-----
!
R,1, , , , , ,          !CONCRETO
RMORE, , , , , ,
RMORE,0.01,
!
R,2, , , , , ,          !CHAPA
RMORE, , , , , ,
RMORE,0.01,
!
!-----
! SECOES DAS BARRAS
!-----
!
SECTYPE,1,LINK
SECDATA,0.000380132711,
SECCONTROL,,
!
SECTYPE,2,LINK
SECDATA,0.0000503,
SECCONTROL,,
!
!=====
! PROPRIEDADES DOS MATERIAIS
!=====
!
MPTEMP, , , , , ,          ! CONCRETO
MPTEMP,1,20
MPTEMP,2,100
MPTEMP,3,200
MPTEMP,4,300
MPTEMP,5,400
MPTEMP,6,500
MPTEMP,7,600
MPTEMP,8,700
MPTEMP,9,800
MPTEMP,10,900
MPTEMP,11,1000
MPTEMP,12,1100
MPDATA,EX,1,,1*MEC
MPDATA,EX,1,,1*MEC
MPDATA,EX,1,,0.9025*MEC
MPDATA,EX,1,,0.7225*MEC
MPDATA,EX,1,,0.5625*MEC
MPDATA,EX,1,,0.36*MEC
MPDATA,EX,1,,0.2025*MEC
MPDATA,EX,1,,0.09*MEC
MPDATA,EX,1,,0.0225*MEC
MPDATA,EX,1,,0.0064*MEC

```

MPDATA,EX,1,,88000 !Ajuste necessario nas temperaturas 1000 e 1100 para que o modulo de de elasticidade do diagrama tensao-deformacao nao seja maior que o modulo de elasticidade inicial elástico.

MPDATA,EX,1,,22000

MPDATA,PRXY,1,,0.2

MPDATA,PRXY,1,,0.2

MPDATA,PRXY,1,,0.2

MPDATA,PRXY,1,,0.2

MPDATA,PRXY,1,,0.2

MPDATA,PRXY,1,,0.2

MPDATA,PRXY,1,,0.2

MPDATA,PRXY,1,,0.2

MPDATA,PRXY,1,,0.2

MPDATA,PRXY,1,,0.2

MPDATA,PRXY,1,,0.2

MPDATA,PRXY,1,,0.2

MPDATA,PRXY,1,,0.2

!

TB,CONC,1,1,9,

TBTEMP,20

TBDATA,,0.53,0.98,1*fctm,-1,,

TBTEMP,100

TBDATA,,0.53,0.98,1*fctm,-1,,

TBTEMP,200

TBDATA,,0.53,0.98,0.8*fctm,-1,,

TBTEMP,500

TBDATA,,0.53,0.98,0.2*fctm,-1,,

TBTEMP,600

TBDATA,,0.53,0.98,0.05*fctm,-1,,

TBTEMP,1100

TBDATA,,0.53,0.98,0.05*fctm,-1,,

!

TBDE,MELAS,1,,

TB,MELAS,1,12,22,0 !diagrama tensao deformacao do concreto a altas temperaturas

!

TBTEMP,20

epsilo_c1theta = 0.0025 !deformacao limite

epsilo_cu1theta = 0.02 !deformacao ultima

kapa_ctheta = 1 !reductor de resistencia

EC1=(fcm*(kapa_ctheta))/epsilo_c1theta

kapa_MEC=1

!

TBPT,,epsilo_c1theta/100,(fcm*(kapa_ctheta*(3*(epsilo_c1theta/100)))/(epsilo_c1theta*(2+((1/100)**3)))

)

TBPT,,epsilo_c1theta/20,(fcm*(kapa_ctheta*(3*(epsilo_c1theta/20)))/(epsilo_c1theta*(2+((1/20)**3)))

TBPT,,epsilo_c1theta/10,(fcm*(kapa_ctheta*(3*(epsilo_c1theta/10)))/(epsilo_c1theta*(2+((1/10)**3)))

TBPT,,epsilo_c1theta/8,(fcm*(kapa_ctheta*(3*(epsilo_c1theta/8)))/(epsilo_c1theta*(2+((1/8)**3)))

TBPT,,epsilo_c1theta/6,(fcm*(kapa_ctheta*(3*(epsilo_c1theta/6)))/(epsilo_c1theta*(2+((1/6)**3)))

TBPT,,epsilo_c1theta/5,(fcm*(kapa_ctheta*(3*(epsilo_c1theta/5)))/(epsilo_c1theta*(2+((1/5)**3)))

TBPT,,epsilo_c1theta/4,(fcm*(kapa_ctheta*(3*(epsilo_c1theta/4)))/(epsilo_c1theta*(2+((1/4)**3)))

TBPT,,epsilo_c1theta/3.5,(fcm*(kapa_ctheta*(3*(epsilo_c1theta/3.5)))/(epsilo_c1theta*(2+((1/3.5)**3)))

TBPT,,epsilo_c1theta/3,(fcm*(kapa_ctheta*(3*(epsilo_c1theta/3)))/(epsilo_c1theta*(2+((1/3)**3)))

TBPT,,epsilo_c1theta/2.5,(fcm*(kapa_ctheta*(3*(epsilo_c1theta/2.5)))/(epsilo_c1theta*(2+((1/2.5)**3)))

TBPT,,epsilo_c1theta/2,(fcm*(kapa_ctheta*(3*(epsilo_c1theta/2)))/(epsilo_c1theta*(2+((1/2)**3)))

TBPT,,epsilo_c1theta/1.9,(fcm*(kapa_ctheta*(3*(epsilo_c1theta/1.9)))/(epsilo_c1theta*(2+((1/1.9)**3)))

TBPT,,epsilo_c1theta/1.8,(fcm*(kapa_ctheta*(3*(epsilo_c1theta/1.8)))/(epsilo_c1theta*(2+((1/1.8)**3)))

TBPT,,epsilo_c1theta/1.7,(fcm*(kapa_ctheta*(3*(epsilo_c1theta/1.7)))/(epsilo_c1theta*(2+((1/1.7)**3)))

TBPT,,epsilo_c1theta/1.6,(fcm*(kapa_ctheta*(3*(epsilo_c1theta/1.6)))/(epsilo_c1theta*(2+((1/1.6)**3)))

TBPT,,epsilo_c1theta/1.5,(fcm*(kapa_ctheta*(3*(epsilo_c1theta/1.5)))/(epsilo_c1theta*(2+((1/1.5)**3)))

TBPT,,epsilo_c1theta/1.4,(fcm*(kapa_ctheta*(3*(epsilo_c1theta/1.4)))/(epsilo_c1theta*(2+((1/1.4)**3)))
 TBPT,,epsilo_c1theta/1.3,(fcm*(kapa_ctheta*(3*(epsilo_c1theta/1.3)))/(epsilo_c1theta*(2+((1/1.3)**3)))
 TBPT,,epsilo_c1theta/1.2,(fcm*(kapa_ctheta*(3*(epsilo_c1theta/1.2)))/(epsilo_c1theta*(2+((1/1.2)**3)))
 TBPT,,epsilo_c1theta/1.1,(fcm*(kapa_ctheta*(3*(epsilo_c1theta/1.1)))/(epsilo_c1theta*(2+((1/1.1)**3)))
 TBPT,,epsilo_c1theta,(fcm*(kapa_ctheta))
 TBPT,,epsilo_cU1theta,(fcm*(kapa_ctheta))+((epsilo_cU1theta-epsilo_c1theta)*0.001)
 !
 TBTEMP,100
 epsilo_c1theta = 0.004
 epsilo_cu1theta = 0.0225
 kapa_ctheta = 1
 EC1=(fcm*(kapa_ctheta))/epsilo_c1theta
 kapa_MEC=1
 !
 TBPT,,epsilo_c1theta/100,(fcm*(kapa_ctheta*(3*(epsilo_c1theta/100)))/(epsilo_c1theta*(2+((1/100)**3)))
)
 TBPT,,epsilo_c1theta/20,(fcm*(kapa_ctheta*(3*(epsilo_c1theta/20)))/(epsilo_c1theta*(2+((1/20)**3)))
 TBPT,,epsilo_c1theta/10,(fcm*(kapa_ctheta*(3*(epsilo_c1theta/10)))/(epsilo_c1theta*(2+((1/10)**3)))
 TBPT,,epsilo_c1theta/8,(fcm*(kapa_ctheta*(3*(epsilo_c1theta/8)))/(epsilo_c1theta*(2+((1/8)**3)))
 TBPT,,epsilo_c1theta/6,(fcm*(kapa_ctheta*(3*(epsilo_c1theta/6)))/(epsilo_c1theta*(2+((1/6)**3)))
 TBPT,,epsilo_c1theta/5,(fcm*(kapa_ctheta*(3*(epsilo_c1theta/5)))/(epsilo_c1theta*(2+((1/5)**3)))
 TBPT,,epsilo_c1theta/4,(fcm*(kapa_ctheta*(3*(epsilo_c1theta/4)))/(epsilo_c1theta*(2+((1/4)**3)))
 TBPT,,epsilo_c1theta/3.5,(fcm*(kapa_ctheta*(3*(epsilo_c1theta/3.5)))/(epsilo_c1theta*(2+((1/3.5)**3)))
 TBPT,,epsilo_c1theta/3,(fcm*(kapa_ctheta*(3*(epsilo_c1theta/3)))/(epsilo_c1theta*(2+((1/3)**3)))
 TBPT,,epsilo_c1theta/2.5,(fcm*(kapa_ctheta*(3*(epsilo_c1theta/2.5)))/(epsilo_c1theta*(2+((1/2.5)**3)))
 TBPT,,epsilo_c1theta/2,(fcm*(kapa_ctheta*(3*(epsilo_c1theta/2)))/(epsilo_c1theta*(2+((1/2)**3)))
 TBPT,,epsilo_c1theta/1.9,(fcm*(kapa_ctheta*(3*(epsilo_c1theta/1.9)))/(epsilo_c1theta*(2+((1/1.9)**3)))
 TBPT,,epsilo_c1theta/1.8,(fcm*(kapa_ctheta*(3*(epsilo_c1theta/1.8)))/(epsilo_c1theta*(2+((1/1.8)**3)))
 TBPT,,epsilo_c1theta/1.7,(fcm*(kapa_ctheta*(3*(epsilo_c1theta/1.7)))/(epsilo_c1theta*(2+((1/1.7)**3)))
 TBPT,,epsilo_c1theta/1.6,(fcm*(kapa_ctheta*(3*(epsilo_c1theta/1.6)))/(epsilo_c1theta*(2+((1/1.6)**3)))
 TBPT,,epsilo_c1theta/1.5,(fcm*(kapa_ctheta*(3*(epsilo_c1theta/1.5)))/(epsilo_c1theta*(2+((1/1.5)**3)))
 TBPT,,epsilo_c1theta/1.4,(fcm*(kapa_ctheta*(3*(epsilo_c1theta/1.4)))/(epsilo_c1theta*(2+((1/1.4)**3)))
 TBPT,,epsilo_c1theta/1.3,(fcm*(kapa_ctheta*(3*(epsilo_c1theta/1.3)))/(epsilo_c1theta*(2+((1/1.3)**3)))
 TBPT,,epsilo_c1theta/1.2,(fcm*(kapa_ctheta*(3*(epsilo_c1theta/1.2)))/(epsilo_c1theta*(2+((1/1.2)**3)))
 TBPT,,epsilo_c1theta/1.1,(fcm*(kapa_ctheta*(3*(epsilo_c1theta/1.1)))/(epsilo_c1theta*(2+((1/1.1)**3)))
 TBPT,,epsilo_c1theta,(fcm*(kapa_ctheta))
 TBPT,,epsilo_cU1theta,(fcm*(kapa_ctheta))+((epsilo_cU1theta-epsilo_c1theta)*0.001)
 !
 TBTEMP,200
 epsilo_c1theta = 0.0055
 epsilo_cu1theta = 0.025
 kapa_ctheta = 0.95
 EC1=(fcm*(kapa_ctheta))/epsilo_c1theta
 kapa_MEC=0.9025
 !
 TBPT,,epsilo_c1theta/100,(fcm*(kapa_ctheta*(3*(epsilo_c1theta/100)))/(epsilo_c1theta*(2+((1/100)**3)))
)
 TBPT,,epsilo_c1theta/20,(fcm*(kapa_ctheta*(3*(epsilo_c1theta/20)))/(epsilo_c1theta*(2+((1/20)**3)))
 TBPT,,epsilo_c1theta/10,(fcm*(kapa_ctheta*(3*(epsilo_c1theta/10)))/(epsilo_c1theta*(2+((1/10)**3)))
 TBPT,,epsilo_c1theta/8,(fcm*(kapa_ctheta*(3*(epsilo_c1theta/8)))/(epsilo_c1theta*(2+((1/8)**3)))
 TBPT,,epsilo_c1theta/6,(fcm*(kapa_ctheta*(3*(epsilo_c1theta/6)))/(epsilo_c1theta*(2+((1/6)**3)))
 TBPT,,epsilo_c1theta/5,(fcm*(kapa_ctheta*(3*(epsilo_c1theta/5)))/(epsilo_c1theta*(2+((1/5)**3)))
 TBPT,,epsilo_c1theta/4,(fcm*(kapa_ctheta*(3*(epsilo_c1theta/4)))/(epsilo_c1theta*(2+((1/4)**3)))
 TBPT,,epsilo_c1theta/3.5,(fcm*(kapa_ctheta*(3*(epsilo_c1theta/3.5)))/(epsilo_c1theta*(2+((1/3.5)**3)))
 TBPT,,epsilo_c1theta/3,(fcm*(kapa_ctheta*(3*(epsilo_c1theta/3)))/(epsilo_c1theta*(2+((1/3)**3)))
 TBPT,,epsilo_c1theta/2.5,(fcm*(kapa_ctheta*(3*(epsilo_c1theta/2.5)))/(epsilo_c1theta*(2+((1/2.5)**3)))
 TBPT,,epsilo_c1theta/2,(fcm*(kapa_ctheta*(3*(epsilo_c1theta/2)))/(epsilo_c1theta*(2+((1/2)**3)))

```

TBPT,,epsilo_c1theta/1.9,(fcm*(kapa_ctheta*(3*(epsilo_c1theta/1.9)))/(epsilo_c1theta*(2+((1/1.9)**3)))
TBPT,,epsilo_c1theta/1.8,(fcm*(kapa_ctheta*(3*(epsilo_c1theta/1.8)))/(epsilo_c1theta*(2+((1/1.8)**3)))
TBPT,,epsilo_c1theta/1.7,(fcm*(kapa_ctheta*(3*(epsilo_c1theta/1.7)))/(epsilo_c1theta*(2+((1/1.7)**3)))
TBPT,,epsilo_c1theta/1.6,(fcm*(kapa_ctheta*(3*(epsilo_c1theta/1.6)))/(epsilo_c1theta*(2+((1/1.6)**3)))
TBPT,,epsilo_c1theta/1.5,(fcm*(kapa_ctheta*(3*(epsilo_c1theta/1.5)))/(epsilo_c1theta*(2+((1/1.5)**3)))
TBPT,,epsilo_c1theta/1.4,(fcm*(kapa_ctheta*(3*(epsilo_c1theta/1.4)))/(epsilo_c1theta*(2+((1/1.4)**3)))
TBPT,,epsilo_c1theta/1.3,(fcm*(kapa_ctheta*(3*(epsilo_c1theta/1.3)))/(epsilo_c1theta*(2+((1/1.3)**3)))
TBPT,,epsilo_c1theta/1.2,(fcm*(kapa_ctheta*(3*(epsilo_c1theta/1.2)))/(epsilo_c1theta*(2+((1/1.2)**3)))
TBPT,,epsilo_c1theta/1.1,(fcm*(kapa_ctheta*(3*(epsilo_c1theta/1.1)))/(epsilo_c1theta*(2+((1/1.1)**3)))
TBPT,,epsilo_c1theta,(fcm*(kapa_ctheta))
TBPT,,epsilo_cU1theta,(fcm*(kapa_ctheta))+((epsilo_cU1theta-epsilo_c1theta)*0.001)
!
TBTEMP,300
epsilo_c1theta = 0.007
epsilo_cu1theta = 0.0275
kapa_ctheta = 0.85
EC1=(fcm*(kapa_ctheta))/epsilo_c1theta
kapa_MEC=0.7225
!
TBPT,,epsilo_c1theta/100,(fcm*(kapa_ctheta*(3*(epsilo_c1theta/100)))/(epsilo_c1theta*(2+((1/100)**3)))
)
TBPT,,epsilo_c1theta/20,(fcm*(kapa_ctheta*(3*(epsilo_c1theta/20)))/(epsilo_c1theta*(2+((1/20)**3)))
TBPT,,epsilo_c1theta/10,(fcm*(kapa_ctheta*(3*(epsilo_c1theta/10)))/(epsilo_c1theta*(2+((1/10)**3)))
TBPT,,epsilo_c1theta/8,(fcm*(kapa_ctheta*(3*(epsilo_c1theta/8)))/(epsilo_c1theta*(2+((1/8)**3)))
TBPT,,epsilo_c1theta/6,(fcm*(kapa_ctheta*(3*(epsilo_c1theta/6)))/(epsilo_c1theta*(2+((1/6)**3)))
TBPT,,epsilo_c1theta/5,(fcm*(kapa_ctheta*(3*(epsilo_c1theta/5)))/(epsilo_c1theta*(2+((1/5)**3)))
TBPT,,epsilo_c1theta/4,(fcm*(kapa_ctheta*(3*(epsilo_c1theta/4)))/(epsilo_c1theta*(2+((1/4)**3)))
TBPT,,epsilo_c1theta/3.5,(fcm*(kapa_ctheta*(3*(epsilo_c1theta/3.5)))/(epsilo_c1theta*(2+((1/3.5)**3)))
TBPT,,epsilo_c1theta/3,(fcm*(kapa_ctheta*(3*(epsilo_c1theta/3)))/(epsilo_c1theta*(2+((1/3)**3)))
TBPT,,epsilo_c1theta/2.5,(fcm*(kapa_ctheta*(3*(epsilo_c1theta/2.5)))/(epsilo_c1theta*(2+((1/2.5)**3)))
TBPT,,epsilo_c1theta/2,(fcm*(kapa_ctheta*(3*(epsilo_c1theta/2)))/(epsilo_c1theta*(2+((1/2)**3)))
TBPT,,epsilo_c1theta/1.9,(fcm*(kapa_ctheta*(3*(epsilo_c1theta/1.9)))/(epsilo_c1theta*(2+((1/1.9)**3)))
TBPT,,epsilo_c1theta/1.8,(fcm*(kapa_ctheta*(3*(epsilo_c1theta/1.8)))/(epsilo_c1theta*(2+((1/1.8)**3)))
TBPT,,epsilo_c1theta/1.7,(fcm*(kapa_ctheta*(3*(epsilo_c1theta/1.7)))/(epsilo_c1theta*(2+((1/1.7)**3)))
TBPT,,epsilo_c1theta/1.6,(fcm*(kapa_ctheta*(3*(epsilo_c1theta/1.6)))/(epsilo_c1theta*(2+((1/1.6)**3)))
TBPT,,epsilo_c1theta/1.5,(fcm*(kapa_ctheta*(3*(epsilo_c1theta/1.5)))/(epsilo_c1theta*(2+((1/1.5)**3)))
TBPT,,epsilo_c1theta/1.4,(fcm*(kapa_ctheta*(3*(epsilo_c1theta/1.4)))/(epsilo_c1theta*(2+((1/1.4)**3)))
TBPT,,epsilo_c1theta/1.3,(fcm*(kapa_ctheta*(3*(epsilo_c1theta/1.3)))/(epsilo_c1theta*(2+((1/1.3)**3)))
TBPT,,epsilo_c1theta/1.2,(fcm*(kapa_ctheta*(3*(epsilo_c1theta/1.2)))/(epsilo_c1theta*(2+((1/1.2)**3)))
TBPT,,epsilo_c1theta/1.1,(fcm*(kapa_ctheta*(3*(epsilo_c1theta/1.1)))/(epsilo_c1theta*(2+((1/1.1)**3)))
TBPT,,epsilo_c1theta,(fcm*(kapa_ctheta))
TBPT,,epsilo_cU1theta,(fcm*(kapa_ctheta))+((epsilo_cU1theta-epsilo_c1theta)*0.001)
!
TBTEMP,400
epsilo_c1theta = 0.01
epsilo_cu1theta = 0.03
kapa_ctheta = 0.75
EC1=(fcm*(kapa_ctheta))/epsilo_c1theta
kapa_MEC=0.5625
!
TBPT,,epsilo_c1theta/100,(fcm*(kapa_ctheta*(3*(epsilo_c1theta/100)))/(epsilo_c1theta*(2+((1/100)**3)))
)
TBPT,,epsilo_c1theta/20,(fcm*(kapa_ctheta*(3*(epsilo_c1theta/20)))/(epsilo_c1theta*(2+((1/20)**3)))
TBPT,,epsilo_c1theta/10,(fcm*(kapa_ctheta*(3*(epsilo_c1theta/10)))/(epsilo_c1theta*(2+((1/10)**3)))
TBPT,,epsilo_c1theta/8,(fcm*(kapa_ctheta*(3*(epsilo_c1theta/8)))/(epsilo_c1theta*(2+((1/8)**3)))
TBPT,,epsilo_c1theta/6,(fcm*(kapa_ctheta*(3*(epsilo_c1theta/6)))/(epsilo_c1theta*(2+((1/6)**3)))
TBPT,,epsilo_c1theta/5,(fcm*(kapa_ctheta*(3*(epsilo_c1theta/5)))/(epsilo_c1theta*(2+((1/5)**3)))

```

TBPT,,epsilo_c1theta/4,(fcm*(kapa_ctheta*(3*(epsilo_c1theta/4)))/(epsilo_c1theta*(2+((1/4)**3)))
 TBPT,,epsilo_c1theta/3.5,(fcm*(kapa_ctheta*(3*(epsilo_c1theta/3.5)))/(epsilo_c1theta*(2+((1/3.5)**3)))
 TBPT,,epsilo_c1theta/3,(fcm*(kapa_ctheta*(3*(epsilo_c1theta/3)))/(epsilo_c1theta*(2+((1/3)**3)))
 TBPT,,epsilo_c1theta/2.5,(fcm*(kapa_ctheta*(3*(epsilo_c1theta/2.5)))/(epsilo_c1theta*(2+((1/2.5)**3)))
 TBPT,,epsilo_c1theta/2,(fcm*(kapa_ctheta*(3*(epsilo_c1theta/2)))/(epsilo_c1theta*(2+((1/2)**3)))
 TBPT,,epsilo_c1theta/1.9,(fcm*(kapa_ctheta*(3*(epsilo_c1theta/1.9)))/(epsilo_c1theta*(2+((1/1.9)**3)))
 TBPT,,epsilo_c1theta/1.8,(fcm*(kapa_ctheta*(3*(epsilo_c1theta/1.8)))/(epsilo_c1theta*(2+((1/1.8)**3)))
 TBPT,,epsilo_c1theta/1.7,(fcm*(kapa_ctheta*(3*(epsilo_c1theta/1.7)))/(epsilo_c1theta*(2+((1/1.7)**3)))
 TBPT,,epsilo_c1theta/1.6,(fcm*(kapa_ctheta*(3*(epsilo_c1theta/1.6)))/(epsilo_c1theta*(2+((1/1.6)**3)))
 TBPT,,epsilo_c1theta/1.5,(fcm*(kapa_ctheta*(3*(epsilo_c1theta/1.5)))/(epsilo_c1theta*(2+((1/1.5)**3)))
 TBPT,,epsilo_c1theta/1.4,(fcm*(kapa_ctheta*(3*(epsilo_c1theta/1.4)))/(epsilo_c1theta*(2+((1/1.4)**3)))
 TBPT,,epsilo_c1theta/1.3,(fcm*(kapa_ctheta*(3*(epsilo_c1theta/1.3)))/(epsilo_c1theta*(2+((1/1.3)**3)))
 TBPT,,epsilo_c1theta/1.2,(fcm*(kapa_ctheta*(3*(epsilo_c1theta/1.2)))/(epsilo_c1theta*(2+((1/1.2)**3)))
 TBPT,,epsilo_c1theta/1.1,(fcm*(kapa_ctheta*(3*(epsilo_c1theta/1.1)))/(epsilo_c1theta*(2+((1/1.1)**3)))
 TBPT,,epsilo_c1theta,(fcm*(kapa_ctheta))
 TBPT,,epsilo_cU1theta,(fcm*(kapa_ctheta))+((epsilo_cU1theta-epsilo_c1theta)*0.001)
 !
 TBTEMP,500
 epsilo_c1theta = 0.015
 epsilo_cu1theta = 0.0325
 kapa_ctheta = 0.6
 EC1=(fcm*(kapa_ctheta))/epsilo_c1theta
 kapa_MEC=0.36
 !
 TBPT,,epsilo_c1theta/100,(fcm*(kapa_ctheta*(3*(epsilo_c1theta/100)))/(epsilo_c1theta*(2+((1/100)**3)))
)
 TBPT,,epsilo_c1theta/20,(fcm*(kapa_ctheta*(3*(epsilo_c1theta/20)))/(epsilo_c1theta*(2+((1/20)**3)))
 TBPT,,epsilo_c1theta/10,(fcm*(kapa_ctheta*(3*(epsilo_c1theta/10)))/(epsilo_c1theta*(2+((1/10)**3)))
 TBPT,,epsilo_c1theta/8,(fcm*(kapa_ctheta*(3*(epsilo_c1theta/8)))/(epsilo_c1theta*(2+((1/8)**3)))
 TBPT,,epsilo_c1theta/6,(fcm*(kapa_ctheta*(3*(epsilo_c1theta/6)))/(epsilo_c1theta*(2+((1/6)**3)))
 TBPT,,epsilo_c1theta/5,(fcm*(kapa_ctheta*(3*(epsilo_c1theta/5)))/(epsilo_c1theta*(2+((1/5)**3)))
 TBPT,,epsilo_c1theta/4,(fcm*(kapa_ctheta*(3*(epsilo_c1theta/4)))/(epsilo_c1theta*(2+((1/4)**3)))
 TBPT,,epsilo_c1theta/3.5,(fcm*(kapa_ctheta*(3*(epsilo_c1theta/3.5)))/(epsilo_c1theta*(2+((1/3.5)**3)))
 TBPT,,epsilo_c1theta/3,(fcm*(kapa_ctheta*(3*(epsilo_c1theta/3)))/(epsilo_c1theta*(2+((1/3)**3)))
 TBPT,,epsilo_c1theta/2.5,(fcm*(kapa_ctheta*(3*(epsilo_c1theta/2.5)))/(epsilo_c1theta*(2+((1/2.5)**3)))
 TBPT,,epsilo_c1theta/2,(fcm*(kapa_ctheta*(3*(epsilo_c1theta/2)))/(epsilo_c1theta*(2+((1/2)**3)))
 TBPT,,epsilo_c1theta/1.9,(fcm*(kapa_ctheta*(3*(epsilo_c1theta/1.9)))/(epsilo_c1theta*(2+((1/1.9)**3)))
 TBPT,,epsilo_c1theta/1.8,(fcm*(kapa_ctheta*(3*(epsilo_c1theta/1.8)))/(epsilo_c1theta*(2+((1/1.8)**3)))
 TBPT,,epsilo_c1theta/1.7,(fcm*(kapa_ctheta*(3*(epsilo_c1theta/1.7)))/(epsilo_c1theta*(2+((1/1.7)**3)))
 TBPT,,epsilo_c1theta/1.6,(fcm*(kapa_ctheta*(3*(epsilo_c1theta/1.6)))/(epsilo_c1theta*(2+((1/1.6)**3)))
 TBPT,,epsilo_c1theta/1.5,(fcm*(kapa_ctheta*(3*(epsilo_c1theta/1.5)))/(epsilo_c1theta*(2+((1/1.5)**3)))
 TBPT,,epsilo_c1theta/1.4,(fcm*(kapa_ctheta*(3*(epsilo_c1theta/1.4)))/(epsilo_c1theta*(2+((1/1.4)**3)))
 TBPT,,epsilo_c1theta/1.3,(fcm*(kapa_ctheta*(3*(epsilo_c1theta/1.3)))/(epsilo_c1theta*(2+((1/1.3)**3)))
 TBPT,,epsilo_c1theta/1.2,(fcm*(kapa_ctheta*(3*(epsilo_c1theta/1.2)))/(epsilo_c1theta*(2+((1/1.2)**3)))
 TBPT,,epsilo_c1theta/1.1,(fcm*(kapa_ctheta*(3*(epsilo_c1theta/1.1)))/(epsilo_c1theta*(2+((1/1.1)**3)))
 TBPT,,epsilo_c1theta,(fcm*(kapa_ctheta))
 TBPT,,epsilo_cU1theta,(fcm*(kapa_ctheta))+((epsilo_cU1theta-epsilo_c1theta)*0.001)
 !
 TBTEMP,600
 epsilo_c1theta = 0.025
 epsilo_cu1theta = 0.035
 kapa_ctheta = 0.45
 EC1=(fcm*(kapa_ctheta))/epsilo_c1theta
 kapa_MEC=0.2025
 !
 TBPT,,epsilo_c1theta/100,(fcm*(kapa_ctheta*(3*(epsilo_c1theta/100)))/(epsilo_c1theta*(2+((1/100)**3)))
)

```

TBPT,,epsilo_c1theta/20,(fcm*(kapa_ctheta*(3*(epsilo_c1theta/20)))/(epsilo_c1theta*(2+((1/20)**3)))
TBPT,,epsilo_c1theta/10,(fcm*(kapa_ctheta*(3*(epsilo_c1theta/10)))/(epsilo_c1theta*(2+((1/10)**3)))
TBPT,,epsilo_c1theta/8,(fcm*(kapa_ctheta*(3*(epsilo_c1theta/8)))/(epsilo_c1theta*(2+((1/8)**3)))
TBPT,,epsilo_c1theta/6,(fcm*(kapa_ctheta*(3*(epsilo_c1theta/6)))/(epsilo_c1theta*(2+((1/6)**3)))
TBPT,,epsilo_c1theta/5,(fcm*(kapa_ctheta*(3*(epsilo_c1theta/5)))/(epsilo_c1theta*(2+((1/5)**3)))
TBPT,,epsilo_c1theta/4,(fcm*(kapa_ctheta*(3*(epsilo_c1theta/4)))/(epsilo_c1theta*(2+((1/4)**3)))
TBPT,,epsilo_c1theta/3.5,(fcm*(kapa_ctheta*(3*(epsilo_c1theta/3.5)))/(epsilo_c1theta*(2+((1/3.5)**3)))
TBPT,,epsilo_c1theta/3,(fcm*(kapa_ctheta*(3*(epsilo_c1theta/3)))/(epsilo_c1theta*(2+((1/3)**3)))
TBPT,,epsilo_c1theta/2.5,(fcm*(kapa_ctheta*(3*(epsilo_c1theta/2.5)))/(epsilo_c1theta*(2+((1/2.5)**3)))
TBPT,,epsilo_c1theta/2,(fcm*(kapa_ctheta*(3*(epsilo_c1theta/2)))/(epsilo_c1theta*(2+((1/2)**3)))
TBPT,,epsilo_c1theta/1.9,(fcm*(kapa_ctheta*(3*(epsilo_c1theta/1.9)))/(epsilo_c1theta*(2+((1/1.9)**3)))
TBPT,,epsilo_c1theta/1.8,(fcm*(kapa_ctheta*(3*(epsilo_c1theta/1.8)))/(epsilo_c1theta*(2+((1/1.8)**3)))
TBPT,,epsilo_c1theta/1.7,(fcm*(kapa_ctheta*(3*(epsilo_c1theta/1.7)))/(epsilo_c1theta*(2+((1/1.7)**3)))
TBPT,,epsilo_c1theta/1.6,(fcm*(kapa_ctheta*(3*(epsilo_c1theta/1.6)))/(epsilo_c1theta*(2+((1/1.6)**3)))
TBPT,,epsilo_c1theta/1.5,(fcm*(kapa_ctheta*(3*(epsilo_c1theta/1.5)))/(epsilo_c1theta*(2+((1/1.5)**3)))
TBPT,,epsilo_c1theta/1.4,(fcm*(kapa_ctheta*(3*(epsilo_c1theta/1.4)))/(epsilo_c1theta*(2+((1/1.4)**3)))
TBPT,,epsilo_c1theta/1.3,(fcm*(kapa_ctheta*(3*(epsilo_c1theta/1.3)))/(epsilo_c1theta*(2+((1/1.3)**3)))
TBPT,,epsilo_c1theta/1.2,(fcm*(kapa_ctheta*(3*(epsilo_c1theta/1.2)))/(epsilo_c1theta*(2+((1/1.2)**3)))
TBPT,,epsilo_c1theta/1.1,(fcm*(kapa_ctheta*(3*(epsilo_c1theta/1.1)))/(epsilo_c1theta*(2+((1/1.1)**3)))
TBPT,,epsilo_c1theta,(fcm*(kapa_ctheta))
TBPT,,epsilo_cU1theta,(fcm*(kapa_ctheta))+((epsilo_cU1theta-epsilo_c1theta)*0.001)
!
TBTEMP,700
epsilo_c1theta = 0.025
epsilo_cu1theta = 0.0375
kapa_ctheta = 0.3
EC1=(fcm*(kapa_ctheta))/epsilo_c1theta
kapa_MEC=0.09
!
TBPT,,epsilo_c1theta/100,(fcm*(kapa_ctheta*(3*(epsilo_c1theta/100)))/(epsilo_c1theta*(2+((1/100)**3)))
)
TBPT,,epsilo_c1theta/20,(fcm*(kapa_ctheta*(3*(epsilo_c1theta/20)))/(epsilo_c1theta*(2+((1/20)**3)))
TBPT,,epsilo_c1theta/10,(fcm*(kapa_ctheta*(3*(epsilo_c1theta/10)))/(epsilo_c1theta*(2+((1/10)**3)))
TBPT,,epsilo_c1theta/8,(fcm*(kapa_ctheta*(3*(epsilo_c1theta/8)))/(epsilo_c1theta*(2+((1/8)**3)))
TBPT,,epsilo_c1theta/6,(fcm*(kapa_ctheta*(3*(epsilo_c1theta/6)))/(epsilo_c1theta*(2+((1/6)**3)))
TBPT,,epsilo_c1theta/5,(fcm*(kapa_ctheta*(3*(epsilo_c1theta/5)))/(epsilo_c1theta*(2+((1/5)**3)))
TBPT,,epsilo_c1theta/4,(fcm*(kapa_ctheta*(3*(epsilo_c1theta/4)))/(epsilo_c1theta*(2+((1/4)**3)))
TBPT,,epsilo_c1theta/3.5,(fcm*(kapa_ctheta*(3*(epsilo_c1theta/3.5)))/(epsilo_c1theta*(2+((1/3.5)**3)))
TBPT,,epsilo_c1theta/3,(fcm*(kapa_ctheta*(3*(epsilo_c1theta/3)))/(epsilo_c1theta*(2+((1/3)**3)))
TBPT,,epsilo_c1theta/2.5,(fcm*(kapa_ctheta*(3*(epsilo_c1theta/2.5)))/(epsilo_c1theta*(2+((1/2.5)**3)))
TBPT,,epsilo_c1theta/2,(fcm*(kapa_ctheta*(3*(epsilo_c1theta/2)))/(epsilo_c1theta*(2+((1/2)**3)))
TBPT,,epsilo_c1theta/1.9,(fcm*(kapa_ctheta*(3*(epsilo_c1theta/1.9)))/(epsilo_c1theta*(2+((1/1.9)**3)))
TBPT,,epsilo_c1theta/1.8,(fcm*(kapa_ctheta*(3*(epsilo_c1theta/1.8)))/(epsilo_c1theta*(2+((1/1.8)**3)))
TBPT,,epsilo_c1theta/1.7,(fcm*(kapa_ctheta*(3*(epsilo_c1theta/1.7)))/(epsilo_c1theta*(2+((1/1.7)**3)))
TBPT,,epsilo_c1theta/1.6,(fcm*(kapa_ctheta*(3*(epsilo_c1theta/1.6)))/(epsilo_c1theta*(2+((1/1.6)**3)))
TBPT,,epsilo_c1theta/1.5,(fcm*(kapa_ctheta*(3*(epsilo_c1theta/1.5)))/(epsilo_c1theta*(2+((1/1.5)**3)))
TBPT,,epsilo_c1theta/1.4,(fcm*(kapa_ctheta*(3*(epsilo_c1theta/1.4)))/(epsilo_c1theta*(2+((1/1.4)**3)))
TBPT,,epsilo_c1theta/1.3,(fcm*(kapa_ctheta*(3*(epsilo_c1theta/1.3)))/(epsilo_c1theta*(2+((1/1.3)**3)))
TBPT,,epsilo_c1theta/1.2,(fcm*(kapa_ctheta*(3*(epsilo_c1theta/1.2)))/(epsilo_c1theta*(2+((1/1.2)**3)))
TBPT,,epsilo_c1theta/1.1,(fcm*(kapa_ctheta*(3*(epsilo_c1theta/1.1)))/(epsilo_c1theta*(2+((1/1.1)**3)))
TBPT,,epsilo_c1theta,(fcm*(kapa_ctheta))
TBPT,,epsilo_cU1theta,(fcm*(kapa_ctheta))+((epsilo_cU1theta-epsilo_c1theta)*0.001)
!
TBTEMP,800
epsilo_c1theta = 0.025
epsilo_cu1theta = 0.04
kapa_ctheta = 0.15

```


! Coeficientes para expansao termica (concreto)

!

MPDE,THSX,1

MPTEMP,,,,,,,,

MPTEMP,1,20

MPTEMP,2,100

MPTEMP,3,200

MPTEMP,4,300

MPTEMP,5,400

MPTEMP,6,500

MPTEMP,7,600

MPTEMP,8,700

MPTEMP,9,1100

UIMP,1,REFT,,20

MPDATA,THSX,1,,0.0000002

MPDATA,THSX,1,,0.000743

MPDATA,THSX,1,,0.0018040

MPDATA,THSX,1,,0.0031410

MPDATA,THSX,1,,0.0048920

MPDATA,THSX,1,,0.0071950

MPDATA,THSX,1,,0.0101880

MPDATA,THSX,1,,0.0140000

MPDATA,THSX,1,,0.0140000

!

MPTEMP,,,,,,,,

!ACO

MPTEMP,1,20

MPTEMP,2,100

MPTEMP,3,200

MPTEMP,4,300

MPTEMP,5,400

MPTEMP,6,500

MPTEMP,7,600

MPTEMP,8,700

MPTEMP,9,800

MPTEMP,10,900

MPTEMP,11,1000

MPTEMP,12,1100

MPDATA,EX,2,,MES

MPDATA,EX,2,,MES

MPDATA,EX,2,,0.9*MES

MPDATA,EX,2,,0.8*MES

MPDATA,EX,2,,0.7*MES

MPDATA,EX,2,,0.6*MES

MPDATA,EX,2,,0.31*MES

MPDATA,EX,2,,0.13*MES

MPDATA,EX,2,,0.09*MES

MPDATA,EX,2,,0.0675*MES

MPDATA,EX,2,,0.045*MES

MPDATA,EX,2,,0.0225*MES

MPDATA,PRXY,2,,0.3

MPDATA,PRXY,2,,0.3

MPDATA,PRXY,2,,0.3

MPDATA,PRXY,2,,0.3

MPDATA,PRXY,2,,0.3

MPDATA,PRXY,2,,0.3

MPDATA,PRXY,2,,0.3

MPDATA,PRXY,2,,0.3

```

MPDATA,PRXY,2,,0.3
MPDATA,PRXY,2,,0.3
MPDATA,PRXY,2,,0.3
MPDATA,PRXY,2,,0.3
!
TBDE,MISO,2,,
TB,MISO,2,12,3,0
!

TBTEMP,20
fy_theta = fys                                !RESISTENCIA RESPECTIVA A TEMPERATURA
ME_theta = MES                                !MODULO DE ELASTICIDADE RESPECTIVA A TEMPERATURA
epsilo_fy = 0.02                              !DEFORMACAO RESPECTIVA A RESISTENCIA CARACTERISTICA
epsilo_u = 0.2                                !DEFORMACAO ULTIMA
!
TBPT,,fy_theta/ME_theta,fy_theta
TBPT,,epsilo_fy,fy_theta
TBPT,,epsilo_u,fy_theta+(0.15-.02)*0.001
!
TBTEMP,100
fy_theta = fys
ME_theta = MES
epsilo_fy = 0.02
epsilo_u = 0.2
!
TBPT,,fy_theta/ME_theta,fy_theta
TBPT,,epsilo_fy,fy_theta
TBPT,,epsilo_u,fy_theta+(0.15-.02)*0.001
!
TBTEMP,200
fy_theta = fys
ME_theta = 0.9*MES
epsilo_fy = 0.02
epsilo_u = 0.2
!
TBPT,,fy_theta/ME_theta,fy_theta
TBPT,,epsilo_fy,fy_theta
TBPT,,epsilo_u,fy_theta+(0.15-.02)*0.001
!
TBTEMP,300
fy_theta = fys
ME_theta = 0.8*MEs
epsilo_fy = 0.02
epsilo_u = 0.2
!
TBPT,,fy_theta/ME_theta,fy_theta
TBPT,,epsilo_fy,fy_theta
TBPT,,epsilo_u,fy_theta+(0.15-.02)*0.001
!
TBTEMP,400
fy_theta = fys
ME_theta = 0.70*MEs
epsilo_fy = 0.02
epsilo_u = 0.2
!
TBPT,,fy_theta/ME_theta,fy_theta
TBPT,,epsilo_fy,fy_theta

```

```

TBPT,,epsilo_u,fy_theta+(0.15-.02)*0.001
!
TBTEMP,500
fy_theta = 0.78*fys
ME_theta = 0.60*MEs
epsilo_fy = 0.02
epsilo_u = 0.2
!
TBPT,,fY_theta/ME_theta,fy_theta
TBPT,,epsilo_fy,fy_theta
TBPT,,epsilo_u,fy_theta+(0.15-.02)*0.001
!
TBTEMP,600
fy_theta = 0.47*fys
ME_theta = 0.31*MEs
epsilo_fy = 0.02
epsilo_u = 0.2
!
TBPT,,fY_theta/ME_theta,fy_theta
TBPT,,epsilo_fy,fy_theta
TBPT,,epsilo_u,fy_theta+(0.15-.02)*0.001
!
TBTEMP,700
fy_theta = 0.23*fys
ME_theta = 0.13*MEs
epsilo_fy = 0.02
epsilo_u = 0.2
!
TBPT,,fY_theta/ME_theta,fy_theta
TBPT,,epsilo_fy,fy_theta
TBPT,,epsilo_u,fy_theta+(0.15-.02)*0.001
!
TBTEMP,800
fy_theta = 0.11*fys
ME_theta = 0.09*MEs
epsilo_fy = 0.02
epsilo_u = 0.2
!
TBPT,,fY_theta/ME_theta,fy_theta
TBPT,,epsilo_fy,fy_theta
TBPT,,epsilo_u,fy_theta+(0.15-.02)*0.001
!
TBTEMP,900
fy_theta = 0.06*fys
ME_theta = 0.0675*MEs
epsilo_fy = 0.02
epsilo_u = 0.2
!
TBPT,,fY_theta/ME_theta,fy_theta
TBPT,,epsilo_fy,fy_theta
TBPT,,epsilo_u,fy_theta+(0.15-.02)*0.001
!
TBTEMP,1000
fy_theta = 0.04*fys
ME_theta = 0.045*MEs
epsilo_fy = 0.02
epsilo_u = 0.2

```

```

!
TBPT,,fy_theta/ME_theta,fy_theta
TBPT,,epsilo_fy,fy_theta
TBPT,,epsilo_u,fy_theta+(0.15-.02)*0.001
!
TBTEMP,1100
fy_theta = 0.02*fys
ME_theta = 0.0225*MEs
epsilo_fy = 0.02
epsilo_u = 0.2
!
TBPT,,fy_theta/ME_theta,fy_theta
TBPT,,epsilo_fy,fy_theta
TBPT,,epsilo_u,fy_theta+(0.15-.02)*0.001
!
! Coeficientes para expansao termica (aco)
!
MPDE,THSX,2
MPTEMP,,,,,,,,
MPTEMP,1,20
MPTEMP,2,300
MPTEMP,3,500
MPTEMP,4,750
MPTEMP,5,860
MPTEMP,6,900
MPTEMP,7,1100
UIMP,2,REFT,,20
MPDATA,THSX,2,,0
MPDATA,THSX,2,,0.0037184
MPDATA,THSX,2,,0.0067584
MPDATA,THSX,2,,0.011
MPDATA,THSX,2,,0.011
MPDATA,THSX,2,,0.0118
MPDATA,THSX,2,,0.0158
!
MPTEMP,,,,,,,,           !CHAPA DE TOPO
MPTEMP,1,20
MPDATA,EX,3,,10E3*MEs
MPDATA,PRXY,3,,0.3
!
TBDE,MISO,3,,
TB,MISO,3,1,3,0
TBTEMP,20
fy_theta = 10E3*fys
ME_theta = 10E3*MES
epsilo_fy = 10E3*0.02
epsilo_u = 10E3*0.2
!
TBPT,,fy_theta/ME_theta,fy_theta
TBPT,,epsilo_fy,fy_theta
TBPT,,epsilo_u,fy_theta+(0.15-.02)*0.001
!
!
=====
! G E R A C A O D A G E O M E T R I A (igual ao termico)
=====
!

```

BLOCK,-b/2,0,0+TCH,-1-TCH,-h/2,0,

!

WPCSYS,-1,0

! divisão dos volumes para compatibilizar malha

/VIEW,1,,1

/ANG,1

/REP,FAST

VSEL,ALL

VSBW,all

wprota,,90

VSBW,all

WPCSYS,-1,0

wpoff,-(b/2)+(25/1000),0,0

VSBW,all

wprota,,90

VSBW,all

WPCSYS,-1,0

wpoff,-(b/2)+(38/1000),0,0

VSBW,all

wprota,,90

VSBW,all

WPCSYS,-1,0

wpoff,-(b/2)+(63/1000),0,0

VSBW,all

wprota,,90

VSBW,all

WPCSYS,-1,0

wpoff,-(b/2)+(12/1000),0,0

VSBW,all

wprota,,90

VSBW,all

!

WPCSYS,-1,0

wpoff,-(b/2)+c,0,0

wpoff,0,0,-h/2+c

VSBW,all

wprota,,90

VSBW,all

wpoff,0,0,+b-2*c

wpoff,-h+2*c,0,0

VSBW,all

wprota,,-90

VSBW,all

WPCSYS,-1,0

VGLUE,all

!

WPCSYS,-1,0

/VIEW,1,,,1

/ANG,1

/REP,FAST

VSEL,ALL

wprota,,90,

VSBW,all

!

WPCSYS,-1,0

/VIEW,1,,,1

/ANG,1

/REP,FAST

VSEL,ALL
!
wpoff,0,-c,0
wprota,,90,
VSBW,all
wpoff,0,0,(10/100)-C
VSBW,all
wpoff,0,0,10/100
VSBW,all
wpoff,0,0,10/100
VSBW,all
wpoff,0,0,10/100
VSBW,all
wpoff,0,0,10/100
VSBW,all
wpoff,0,0,10/100
VSBW,all
wpoff,0,0,10/100
VSBW,all
wpoff,0,0,10/100
VSBW,all
wpoff,0,0,10/100
VSBW,all
wpoff,0,0,10/100
VSBW,all
wpoff,0,0,10/100
VSBW,all
wpoff,0,0,10/100
VSBW,all
wpoff,0,0,10/100
VSBW,all
wpoff,0,0,10/100
VSBW,all
wpoff,0,0,10/100
VSBW,all
wpoff,0,0,10/100
VSBW,all
wpoff,0,0,10/100
VSBW,all
wpoff,0,0,5/100
VSBW,all
wpoff,0,0,5/100
VSBW,all
wpoff,0,0,10/100
VSBW,all
wpoff,0,0,10/100
VSBW,all
wpoff,0,0,10/100
VSBW,all
wpoff,0,0,10/100
VSBW,all
wpoff,0,0,10/100
VSBW,all
wpoff,0,0,10/100
VSBW,all
wpoff,0,0,10/100
VSBW,all
wpoff,0,0,10/100
VSBW,all
wpoff,0,0,10/100
VSBW,all


```

wpoff,0,0,10/100
VSBW,all
wpoff,0,0,10/100
VSBW,all
wpoff,0,0,10/100
VSBW,all
wpoff,0,0,10/100
VSBW,all
wpoff,0,0,10/100
VSBW,all
wpoff,0,0,10/100
VSBW,all
wpoff,0,0,10/100
VSBW,all
wpoff,0,0,10/100
VSBW,all
wpoff,0,0,10/100
VSBW,all
wpoff,0,0,10/100
VSBW,all
wpoff,0,0,10/100
VSBW,all
wpoff,0,0,(10/100)-C
VSBW,all
wpoff,0,0,C
VSBW,all
WPCSYS,-1,1
VGLUE,all
!
! DIVISAO DAS LINHAS
!
/VIEW,1,1,1,1
/ANG,1
/REPLOT
/AUTO,1
/REP,FAST
!
LSEL,ALL
LPLOT
LSEL,S,LOC,X,-b/2-1/1000,-b/2+1/1000
LSEL,A,LOC,X,-b/2+C-1/1000,-b/2+C+1/1000
LSEL,A,LOC,X,0-1/1000,0+1/1000
LSEL,A,LOC,X,-(b/2)+(25/1000)-1/1000,-(b/2)+(25/1000)+1/1000
LSEL,A,LOC,X,-(b/2)+(38/1000)-1/1000,-(b/2)+(38/1000)+1/1000
LSEL,A,LOC,X,-(b/2)+(63/1000)-1/1000,-(b/2)+(63/1000)+1/1000
LSEL,A,LOC,X,-(b/2)+(12/1000)-1/1000,-(b/2)+(12/1000)+1/1000
LSEL,U,LOC,Z,-H/2-1/1000,-H/2+C+1/1000
LSEL,U,LOC,Z,0+1/1000,0-1/1000
LESIZE,ALL,,,11,1,1,,,0,
!
LSEL,ALL
LPLOT
LSEL,s,LOC,Z,-H/2-1/1000,-H/2+1/1000
LSEL,A,LOC,Z,-H/2+C-1/1000,-H/2+C+1/1000
LSEL,A,LOC,Z,0-1/1000,0+1/1000

```

```

LSEL,U,LOC,X,-B/2-1/1000,-B/2+C+1/1000
LSEL,U,LOC,X,0+1/1000,0-1/1000
LSEL,U,LOC,X,-(b/2)+(25/1000)-1/1000,-(b/2)+(25/1000)+1/1000
LSEL,u,LOC,X,-(b/2)+(38/1000)-1/1000,-(b/2)+(38/1000)+1/1000
LSEL,U,LOC,X,-(b/2)+(63/1000)-1/1000,-(b/2)+(63/1000)+1/1000
LSEL,U,LOC,X,-(b/2)+(12/1000)-1/1000,-(b/2)+(12/1000)+1/1000
LESIZE,ALL,,11,1,1,,0,
!
LSEL,INVE
LPLOT
LSEL,U,LOC,Z,-H/2+C+1/1000,0-1/1000
LSEL,U,LOC,Z,H/2-C-1/1000,0+1/1000
LESIZE,ALL,,4,1,1,,0,
!
LSEL,S,LOC,Y,TCH,-1-TCH
LSEL,U,LOC,Y,TCH-0.0001,TCH+0.0001
LSEL,U,LOC,Y,0-0.0001,0+0.0001
LSEL,U,LOC,Y,-C-0.0001,-C+0.0001
LSEL,U,LOC,Y,-10/100-0.0001,-10/100+0.0001
LSEL,U,LOC,Y,-20/100-0.0001,-20/100+0.0001
LSEL,U,LOC,Y,-30/100-0.0001,-30/100+0.0001
LSEL,U,LOC,Y,-40/100-0.0001,-40/100+0.0001
LSEL,U,LOC,Y,-50/100-0.0001,-50/100+0.0001
LSEL,U,LOC,Y,-60/100-0.0001,-60/100+0.0001
LSEL,U,LOC,Y,-70/100-0.0001,-70/100+0.0001
LSEL,U,LOC,Y,-80/100-0.0001,-80/100+0.0001
LSEL,U,LOC,Y,-90/100-0.0001,-90/100+0.0001
LSEL,U,LOC,Y,-100/100-0.0001,-100/100+0.0001
LSEL,U,LOC,Y,-110/100-0.0001,-110/100+0.0001
LSEL,U,LOC,Y,-120/100-0.0001,-120/100+0.0001
LSEL,U,LOC,Y,-130/100-0.0001,-130/100+0.0001
LSEL,U,LOC,Y,-140/100-0.0001,-140/100+0.0001
LSEL,U,LOC,Y,-150/100-0.0001,-150/100+0.0001
LSEL,U,LOC,Y,-160/100-0.0001,-160/100+0.0001
LSEL,U,LOC,Y,-170/100-0.0001,-170/100+0.0001
LSEL,U,LOC,Y,-175/100-0.0001,-175/100+0.0001
LSEL,U,LOC,Y,-180/100-0.0001,-180/100+0.0001
LSEL,U,LOC,Y,-190/100-0.0001,-190/100+0.0001
LSEL,U,LOC,Y,-200/100-0.0001,-200/100+0.0001
LSEL,U,LOC,Y,-210/100-0.0001,-210/100+0.0001
LSEL,U,LOC,Y,-220/100-0.0001,-220/100+0.0001
LSEL,U,LOC,Y,-230/100-0.0001,-230/100+0.0001
LSEL,U,LOC,Y,-240/100-0.0001,-240/100+0.0001
LSEL,U,LOC,Y,-250/100-0.0001,-250/100+0.0001
LSEL,U,LOC,Y,-260/100-0.0001,-260/100+0.0001
LSEL,U,LOC,Y,-270/100-0.0001,-270/100+0.0001
LSEL,U,LOC,Y,-280/100-0.0001,-280/100+0.0001
LSEL,U,LOC,Y,-290/100-0.0001,-290/100+0.0001
LSEL,U,LOC,Y,-300/100-0.0001,-300/100+0.0001
LSEL,U,LOC,Y,-310/100-0.0001,-310/100+0.0001
LSEL,U,LOC,Y,-320/100-0.0001,-320/100+0.0001
LSEL,U,LOC,Y,-330/100-0.0001,-330/100+0.0001
LSEL,U,LOC,Y,-340/100-0.0001,-340/100+0.0001
LSEL,U,LOC,Y,-350/100-0.0001,-350/100+0.0001
LSEL,U,LOC,Y,-360/100-0.0001,-360/100+0.0001
LSEL,U,LOC,Y,-370/100-0.0001,-370/100+0.0001
LSEL,U,LOC,Y,-L+C-0.0001,-L+C+0.0001

```

```

LSEL,U,LOC,Y,-L-0.0001,-L+0.0001
LSEL,U,LOC,Y,-L-TCH-0.0001,-L-TCH+0.0001
LESIZE,ALL,,,2,1,1,,,0,
!
LSEL,ALL
LSPLOT
LSEL,S,LOC,X,-b/2+1/1000,-(b/2)+(12/1000)-1/1000
LSEL,A,LOC,X,-(b/2)+(12/1000)+1/1000,-(b/2)+(25/1000)-1/1000
LSEL,A,LOC,X,-(b/2)+(25/1000)+1/1000,-(b/2)+(38/1000)-1/1000
LSEL,A,LOC,X,-(b/2)+(38/1000)+1/1000,-b/2+C-1/1000
LSEL,A,LOC,X,-b/2+C+1/1000,-(b/2)+(63/1000)-1/1000
LESIZE,ALL,,,2,1,1,,,0,
!
ALLSEL,ALL
LSPLOT
!
! MESHING
!
MSHAPE,0,3D      !0- quadrilateral 1-triang
MSHKEY,1        !0- free 1-mesh
!
VSEL, ALL
vSEL,r,LOC,Y,0+0.000001,-1-0.000001
VSPLOT
vATT,1,1,1,0    ! atribui material 1 ao CONCRETO
VMESH,ALL
!
vsel,invE
VSPLOT
vATT,3,2,3,0    ! atribui material 3 a CHAPA DE TOPO
VMESH,ALL
ALLSEL,ALL
!
LSPLOT
!
LSEL,S,LOC,X,-b/2+c+0.00001,-b/2+c-0.00001
LSEL,U,LOC,Z,-h/2+0.00001,-h/2-0.0001
LSEL,U,LOC,Z,-h/2+0.00001,-h/2+C-0.0001
LSEL,U,LOC,Z,-h/2+C+0.00001,0+0.00001
ISEL,r,LOC,Y,0+0.000001,-1-0.000001
LATT,2,,2, , , 1    ! atribui material 2 ao ACO
LMESH,ALL
!
LSPLOT
LSEL,S,LOC,Y,-C,-((L-C))
LSEL,U,LOC,X,-b/2+1/100,-b/2
LSEL,U,LOC,X,-b/2+c+0.00001,b/2-c-0.0001
LSEL,U,LOC,Z,-h/2+0.00001,-h/2-0.0001
LSEL,U,LOC,Z,-h/2+0.00001,-h/2+C-0.0001
LSEL,a,LOC,Z,-h/2+C+0.00001,-h/2+C-0.0001
LSEL,U,LOC,X,-b/2-1/100,-b/2+c-1/1000000
LSEL,U,LOC,Y,TCH+0.00001,0-C+0.0001
LSEL,U,LOC,Y,0-C-0.0001,0-10/100+0.0001
LSEL,U,LOC,Y,0-10/100-0.0001,0-40/100+0.0001
LSEL,U,LOC,Y,0-40/100-0.0001,0-70/100+0.0001
LSEL,U,LOC,Y,0-70/100-0.0001,0-100/100+0.0001
LSEL,U,LOC,Y,0-100/100-0.0001,0-130/100+0.0001

```

```

LSEL,U,LOC,Y,0-130/100-0.0001,0-160/100+0.0001
LSEL,U,LOC,Y,0-160/100-0.0001,0-190/100+0.0001
LSEL,U,LOC,Y,0-190/100-0.0001,0-220/100+0.0001
LSEL,U,LOC,Y,0-220/100-0.0001,0-250/100+0.0001
LSEL,U,LOC,Y,0-250/100-0.0001,0-280/100+0.0001
LSEL,U,LOC,Y,0-280/100-0.0001,0-310/100+0.0001
LSEL,U,LOC,Y,0-310/100-0.0001,0-340/100+0.0001
LSEL,U,LOC,Y,0-340/100-0.0001,0-370/100+0.0001
LSEL,U,LOC,Y,0-370/100-0.0001,-1+c+0.0001
LSEL,U,LOC,Y,-1+c-0.0001,-1-TCH-0.0001
LATT,2,,2, , ,2          ! atribui material 3 ao ACO
LMESH,ALL
!
ALLSEL,ALL
!
NUMMRG,KP, , , ,LOW
NUMMRG,NODE, , , ,LOW
!
=====
! VINCULOS (APOIOS)
=====
!
-----
! VINCULOS REFERENTES A SIMETRIA DO PROLEMA
-----!
!
NSEL,S,LOC,X,-0.0001,0.0001
NSEL,R,LOC,y,TCH-0.0001,-1-TCH+0.0001
nplot
D,ALL,UX,0,
!
NSEL,S,LOC,Z,-0.0001,0.0001
NSEL,R,LOC,y,TCH-0.0001,-1-TCH+0.0001
nplot
D,ALL,UZ,0,
!
-----
! ENGASTE FIXO E MOVEL
-----!
!
NSEL,S,LOC,y,-1-TCH-0.0001,-1-TCH+0.0001
NSEL,R,LOC,x,-B/2-0.0001,0+0.0001
nplot
D,ALL,UX,0,
D,ALL,UY,0,
D,ALL,UZ,0,
!
NSEL,S,LOC,y,TCH-0.0001,TCH+0.0001
NSEL,R,LOC,x,-B/2-0.0001,0+0.0001
nplot
D,ALL,UX,0,
D,ALL,UZ,0,
!
allsel,all
!
-----
! APLICAÇÃO DA CARGA DISTRIBUÍDA

```

```

!-----
!
!
NSEL,S,LOC,y,TCH-0.0001,TCH+0.0001
NSEL,R,LOC,x,-B/2-0.0001,0+0.0001
NPLOT,ALL
/REPLOT
/RESIZE
*GET,nn,NODE,0,COUNT
NPLOT
F,ALL,FY,-Q/nn
ALLSEL,ALL
/REPLOT
EPLOT
SAVE
FINISH
!
!=====
! S O L U C A O
!=====
!
/SOLU
!
!-----
! OPÇÕES
!-----
!
TUNIF,20           ! Temperatura uniforme em todos os nós
TREF,20           ! Temperatura de referência
!
!CARREGAMENTO 1_PRE-CARREGAMENTO_FORCA MECANICA
!
ANTYPE,0
NLGEOM,ON
TIME,0.1
NSUBSET,25,50,10
OUTRES,ERASE
OUTRES,ALL,ALL
CNVTOL,F,,1,2,,
CNVTOL,U,,1,2,,
!
ALLSEL,ALL
/REPLOT
LSWRITE,1,
!
!CARREGAMENTO 2 A 121_INCENDIO
!
*DO,i,1,120,1
  AUTOTS,1
  TIME,i
  DELTIM,,1,0.05,,5
  OUTRES,ERASE
  OUTRES,ALL,last
  RESCONTRL,DEFINE,ALL,last
  CNVTOL,F,,1,2,,
  CNVTOL,U,,1,2,,
  ALLSEL,ALL

```

```

!
!Ler os resultados do arquivo de análise térmica e aplicá-los como carregamento
!MULTIPLICA-SE POR 60 PARA APLICAR A VARIACAO DE TEMP A CADA 1 MINUTO
!
  LDREAD,TEMP,,i*60,,'TERMOC5',,rth,'D:\ANSYS\TERMOC5'   !Nome do arquivo e diretorio
  LSWRITE,i+1,
*ENDDO
!
!-----
! RESOLVER
!-----
!
/SOLU
LSSOLVE,1,121,1
FINISH
!=====

```