

UNIVERSIDADE TECNOLÓGICA FEDERAL DO PARANÁ
DEPARTAMENTO ACADÊMICO DE CONSTRUÇÃO CIVIL
CURSO DE ENGENHARIA CIVIL

MOACYR DIAS BAPTISTA NETO

**MODELO NUMÉRICO DA INTERFACE AÇO E CONCRETO EM
SITUAÇÃO DE INCÊNDIO**

TRABALHO DE CONCLUSÃO DE CURSO

CURITIBA

2017

MOACYR DIAS BAPTISTA NETO

**MODELO NUMÉRICO DA INTERFACE AÇO E CONCRETO EM
SITUAÇÃO DE INCÊNDIO**

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado ao Departamento Acadêmico de Construção Civil da Universidade Tecnológica Federal do Paraná como requisito parcial para obtenção do título de “Engenheiro Civil”.

Orientador: Prof. Erica Fernanda Aiko Kimura

CURITIBA

2017



Ministério da Educação

UNIVERSIDADE TECNOLÓGICA FEDERAL DO PARANÁ
Campus Curitiba – Sede Ecoville
Departamento Acadêmico de Construção Civil
Curso de Engenharia Civil

FOLHA DE APROVAÇÃO

MODELO NUMÉRICO DA INTERFACE AÇO E CONCRETO EM SITUAÇÃO DE INCÊNDIO

Por

MOACYR DIAS BAPTSITA NETO

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado ao Curso de Engenharia Civil da Universidade Tecnológica Federal do Paraná, defendido no primeiro semestre de 2017 e aprovado pela seguinte banca de avaliação:

Orientadora – Profa. Erica Fernanda Aiko Kimura, Dra.
UTFPR

Profa. Renata Sá Brito Stramandinoli, Dra.
UTFPR

Prof. João Elias Abdalla Filho, Dr.
UTFPR

OBS.: O documento assinado encontra-se em posse da coordenação do curso.

RESUMO

BAPTISTA, Moacyr. MODELO NUMÉRICO DA INTERFACE AÇO E CONCRETO EM SITUAÇÃO DE INCÊNCIDO. 65 f. Trabalho de Conclusão de Curso – Curso de Engenharia Civil, Universidade Tecnológica Federal do Paraná. Curitiba, 2017.

Este trabalho apresenta um estudo, no contexto de uma análise numérica utilizando o software *ANSYS Workbench* versão 16.0, no qual o principal objetivo foi conduzido para obter o campo de temperatura em um estrutura mista de aço e concreto utilizada para caracterização de conectores de cisalhamento. Neste tipo de estrutura, os conectores de cisalhamento são componentes fundamentais para assegurar a eficiência do trabalho conjunto dos materiais e a transferência de forças de cisalhamento na interface aço concreto. Esse comportamento geralmente é caracterizado pela curva deslocamentos versus carregamentos obtida em ensaios experimentais do tipo *push-out*. Sob ação de um incêndio, o desempenho dos materiais diminui significativamente. A elevação da temperatura, determinada por equação proposta pela norma brasileira ABNT NBR 14432:2001, foi aplicada à um modelo numérico de um ensaio do tipo *push-out*.

Palavras-chave: temperaturas elevadas; conectores de cisalhamento; vigas mistas; aço e concreto; análise numérica

ABSTRACT

BAPTISTA, Moacyr. STEEL AND CONCRETE INTERFACE NUMERICAL MODEL UNDER FIRE. 65 f. Trabalho de Conclusão de Curso – Curso de Engenharia Civil, Universidade Tecnológica Federal do Paraná. Curitiba, 2017.

This research presents a study, within the context of numerical analysis with ANSYS Workbench version 16.0, in which main goal has been driven to obtain the temperature field in a composite structure used to shear connector characterization. In this type of structure, shear connectors are key components to ensure the efficient composite action and satisfactory transfer of shear forces at the steel-concrete interface in composite beam. This behavior is generally characterized by the load-slip curve obtained from experimental push-out tests. Under fire the performance of materials significantly decreases. The rising of temperature, determined by normative equations proposed in Brazilian standard ABNT NBR 14432:2001, was applied in a push-out numerical model.

Keywords: high temperatures; shear connectors; composite beam; steel and concrete; numerical analysis

LISTA DE FIGURAS

FIGURA 1	–	Viga mista.	9
FIGURA 2	–	Conector de cisalhamento tipo U.	10
FIGURA 3	–	Tipos usuais de seções mistas.	16
FIGURA 4	–	Tipos usuais de conectores.	16
FIGURA 5	–	Curva força escorregamento para conectores de cisalhamento.	17
FIGURA 6	–	Equilíbrio longitudinal de forças.	17
FIGURA 7	–	Tensões e deformações na seção mista em função do grau de interação. ..	18
FIGURA 8	–	Configuração deformada de uma viga mista simplesmente apoiada sob ação de cargas gravitacionais.	20
FIGURA 9	–	Interação aço e concreto no comportamento de vigas mistas.	21
FIGURA 10	–	Esquema do ensaio tipo <i>push-out</i>	22
FIGURA 11	–	Determinação da capacidade de deslocamento em correspondência ao carregamento aplicado.	22
FIGURA 12	–	Tranferência de calor por condução.	24
FIGURA 13	–	Tranferência de calor por convecção.	25
FIGURA 14	–	Reflexão, transmissão e absorção de radiação.	27
FIGURA 15	–	Curva temperatura-tempo típica de um incêndio real.	28
FIGURA 16	–	Modelo do incêndio natural.	29
FIGURA 17	–	Modelo do incêndio-padrão.	29
FIGURA 18	–	Curvas temperatura-tempo padronizadas.	30
FIGURA 19	–	Variação dos fatores de redução para a resistência ao escoamento e o módulo de elasticidade dos aços com a temperatura.	32
FIGURA 20	–	Variação dos fatores de redução dos concretos com a temperatura.	33
FIGURA 21	–	Condutividade térmica do aço em função da temperatura.	34
FIGURA 22	–	Condutividade térmica do concreto em função da temperatura.	34
FIGURA 23	–	Calor específico do aço em função da temperatura.	35
FIGURA 24	–	Alongamento do aço em função da temperatura.	36
FIGURA 25	–	Alongamento do concreto (NC) em função da temperatura.	37
FIGURA 26	–	Divisão do componente de aço em perfil I para distribuição de temperatura	38
FIGURA 27	–	Interface dos dados de engenharia no software <i>ANSYS Workbench</i>	40
FIGURA 28	–	Variação da massa específica do concreto devido a variação de temperatura.	41
FIGURA 29	–	Variação da condutividade térmica do concreto devido a variação de temperatura.	41
FIGURA 30	–	Variação do calor específico do concreto devido a variação de temperatura.	42
FIGURA 31	–	Variação da condutividade térmica do aço devido a variação de temperatura.	42
FIGURA 32	–	Variação do calor específico do aço devido a variação de temperatura. ...	43
FIGURA 33	–	Geometria Proposta.	43
FIGURA 34	–	Interface do software <i>ANSYS DesignModeler 16.0</i>	44
FIGURA 35	–	Geometria do modelo.	44

FIGURA 36	– Seção transversal perfil I e parâmetros adotados.	45
FIGURA 37	– Formato da viga de aço.	45
FIGURA 38	– Processo de construção dos conectores de cisalhamento.	46
FIGURA 39	– Viga e conectores de cisalhamento.	46
FIGURA 40	– Desenho da laje superior e parâmetros adotados.	46
FIGURA 41	– Desenho da laje inferior e parâmetros adotados.	47
FIGURA 42	– Seccionamento da geometria.	47
FIGURA 43	– Superfície exposta ao incêndio em amarelo.	48
FIGURA 44	– Superfície de troca de calor com o ambiente em azul.	48
FIGURA 45	– Malha com 41.598 nós e 10.638 elementos.	50
FIGURA 46	– Temperatura mínima global.	50
FIGURA 47	– Malha com 191.333 nós e 50.178 elementos.	51
FIGURA 48	– Temperaturas mínima global após ajustes na malha.	52
FIGURA 50	– Curvas da evolução da temperatura global do modelo versus tempo.	54
FIGURA 51	– Campo de temperaturas correspondente a um tempo (TRRF) de 60 minutos.	54
FIGURA 52	– Curvas da evolução da temperatura do concreto versus tempo.	55
FIGURA 53	– Campo de temperaturas do concreto correspondente a um tempo (TRRF) de 60 minutos.	56
FIGURA 54	– Curvas da evolução da temperatura do aço versus tempo.	56
FIGURA 55	– Campo de temperaturas do aço correspondente a um tempo (TRRF) de 60 minutos.	57
FIGURA 56	– Curvas da evolução da temperatura do conector de cisalhamento versus tempo.	57
FIGURA 57	– Campo de temperaturas do conector de cisalhamento correspondente a um tempo (TRRF) de 60 minutos.	58
FIGURA 58	– Comparação de valores na interface entre a viga de aço e a laje de concreto.	59
FIGURA 59	– Comparação de valores na interface entre o conector de cisalhamento e a laje.	59
FIGURA 60	– Comparação da evolução da temperatura entre o método simplificado e o método numérico.	60

SUMÁRIO

1 INTRODUÇÃO	9
1.1 OBJETIVOS	11
1.1.1 Objetivo Geral	11
1.1.2 Objetivos Específicos	11
1.2 JUSTIFICATIVA	11
1.3 TRABALHOS CORRELATADOS	12
2 FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA	14
2.1 ANÁLISE ESTRUTURAL	14
2.2 VIGAS MISTAS AÇO E CONCRETO	15
2.2.1 Conectores de cisalhamento	15
2.2.2 Comportamento estrutural da viga mista	16
2.2.2.1 Grau de Interação	17
2.3 ENSAIO TIPO <i>PUSH-OUT</i>	21
2.3.1 Procedimentos do teste <i>push-out</i>	21
2.3.2 Avaliação dos resultados do teste <i>push-out</i>	23
2.4 TRANSFERÊNCIA DE CALOR	23
2.4.1 Condução de calor	24
2.4.2 Convecção de calor	25
2.4.3 Radiação de calor	26
2.5 ESTRUTURAS EM SITUAÇÃO DE INCÊNDIO	26
2.5.1 Curva "temperatura x tempo" de um incêndio real	27
2.5.2 Modelos idealizados de Incêndio natural e incêndio-padrão	28
2.5.3 Diferentes curvas de incêndio padrão	29
2.6 EFEITOS DA TEMPERATURA E ALTERAÇÃO DAS PROPRIEDADES DO AÇO E DO CONCRETO	31
2.6.1 Massa específica	31
2.6.2 Propriedades mecânicas	31
2.6.3 Propriedades Térmicas	33
2.6.3.1 Condutividade Térmica	33
2.6.3.2 Calor Específico	34
2.6.3.3 Alongamento relativo	35
2.7 MODELO SIMPLIFICADO DE CÁLCULO	36
3 METODOLOGIA	39
3.1 PROPRIEDADES DOS MATERIAIS	39
3.2 GEOMETRIA	43
3.3 CONFIGURAÇÕES DA ANÁLISE TÉRMICA TRANSIENTE	47
3.4 TESTE DE CONVERGÊNCIA DO MODELO	49
4 RESULTADOS	53
4.1 SIMULAÇÃO NUMÉRICA	53
4.2 COMPARAÇÃO DO MÉTODO NUMÉRICO COM O MÉTODO SIMPLIFICADO	58
5 CONCLUSÕES	61

REFERÊNCIAS	64
--------------------------	-----------

1 INTRODUÇÃO

A opção por sistemas estruturais metálicos tem cada vez mais se tornado uma alternativa recorrente nas obras de engenharia civil. A construção em aço possibilita menor tempo de execução devido a fabricação industrial e seriada dos perfis, maior limpeza na obra devido à ausência de entulhos e maior facilidade de transporte e manuseio entre outras vantagens.

Com o aumento do uso do aço na construção civil novas formas construtivas foram incorporadas. Um exemplo são as vigas mistas aço e concreto exemplificadas na figura 1. As vigas mistas aço e concreto surgiram inicialmente da utilização de vigas de aço sob lajes de concreto. Posteriormente, percebeu-se a possibilidade de haver um trabalho conjunto entre a viga de aço e a laje de concreto, caracterizando um sistema misto.



Figura 1: Viga-mista.

Fonte: Amon Engenharia e Incorporações Ltda, <http://www.amon.com.br/>

Todavia, para que os materiais distintos que compõem o sistema trabalhem de forma conjunta, faz-se necessário a utilização de elementos de ligação denominados conectores de cisalhamento, apresentados na figura 2. Os conectores de cisalhamento têm a função de restringir o deslocamentos relativos entre a mesa da viga de aço e a laje de concreto.



Figura 2: Conector de cisalhamento do tipo U.

Fonte: Souza (2014).

Como todo material empregado de forma estrutural na construção civil, questionamentos são levantados a fim de determinar o desempenho desse material nas possíveis situações de sinistro que possam ocorrer. Dentre essas situações está a de incêndio. No âmbito de projetos essa situação é tratada como uma ação excepcional.

Os principais documentos nacionais existentes relativos à segurança contra incêndio são a Norma de Procedimento Técnico 002 – Adaptação às normas de segurança contra incêndio, pertencente ao Corpo de Bombeiros do Paraná; ABNT NBR 14323:2013 – Projeto de estruturas de aço e de estruturas mistas de aço e concreto de edifícios em situação de incêndio, ABNT NBR 15200:2012 – Projeto de estruturas de concreto em situação de incêndio e ABNT NBR 14432:2001 – Exigências de resistência ao fogo de elementos construtivos de edificações – Procedimento, pertencentes à Associação Brasileira de Normas Técnicas (ABNT).

Em situação de incêndio, o desempenho do aço e do concreto são afetados pela elevação da temperatura. Nesse contexto, os perfis metálicos têm a capacidade resistente afetada pela redução de sua resistência ao escoamento (f_y) e do módulo de elasticidade (E). Já o concreto sofre redução da resistência a compressão característica (f_{ck}) e também do módulo de elasticidade. Em estruturas com vínculos redundantes, pode ocorrer o surgimento de esforços adicionais induzidos pela restrição à expansão e o surgimento de tensões secundárias devido às

deformações provocadas pelo aumento da temperatura.

Dentre as abordagens possíveis para análise do desempenho da interface aço e concreto em vigas mistas destaca-se a análise numérica desenvolvida com base no Método dos Elementos Finitos. Atualmente há uma variedade de pacotes computacionais comerciais disponíveis que facilitam esse tipo de abordagem, possibilitando reproduzir numericamente o comportamento de uma estrutura em situação de incêndio. Este recurso evita custos relacionados a realização de ensaios.

1.1 OBJETIVOS

1.1.1 OBJETIVO GERAL

O presente trabalho tem como objetivo o desenvolvimento de uma análise térmica transiente via modelagem numérica para obter o campo térmico da interface de cisalhamento de estruturas de aço e concreto.

1.1.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS

- Elaborar um modelo numérico com base no Método dos Elementos Finitos de estruturas mistas de aço e concreto.
- Obter, através da análise térmica transiente, um campo térmico do material estrutural decorrente de uma ação térmica;

1.2 JUSTIFICATIVA

O desempenho da interface de cisalhamento é um fator determinante para que ocorra a interação dos elementos que compõe uma viga mista. Logo os dispositivos de ligação, denominados conectores de cisalhamento, são de grande importância e interesse. Como dito anteriormente, as propriedades mecânicas dos materiais (aço e concreto) são reduzidas quando expostas a elevadas temperaturas (como ilustrado em 2.6.2 posteriormente). Essa situação pode ocasionar um colapso estrutural em um intervalo de tempo que pode não ser suficiente para garantir a desocupação da edificação. Além disso, devido ao fato de o aço e o concreto possuírem dilatações térmicas distintas, a exposição de vigas mistas à elevadas temperaturas pode comprometer a interface de cisalhamento.

1.3 TRABALHOS CORRELATADOS

Em 1990, na Escola de Engenharia de São Carlos da Universidade de São Paulo, a dissertação de mestrado de Maximiliano Malite realiza um estudo de vigas mistas aço concreto de edifícios fornecendo uma visão geral do assunto no tocante ao seu dimensionamento e aos seus aspectos construtivos (MALITE, 1990). Neste trabalho foi apresentado o estudo sobre resistência de seções transversais mistas segundo a norma brasileira ABNT NBR 8800 - Projeto e execução de Estruturas de aço de edifícios, vigente na época.

Em Malite (1993), o autor apresentou novamente os aspectos gerais de dimensionamento de vigas mistas aço-concreto, porém, incluindo resultados de ensaios em quatro vigas mistas. Foi apresentado também considerações teóricas sobre conectores de cisalhamento, incluindo resultados de ensaios do tipo *push-out* de alguns tipos de conectores.

Outro estudo foi o de Tristão (2002). Seu trabalho apresentou uma visão geral do comportamento de vigas mistas aço-concreto, principalmente o estudo do comportamento estrutural de conectores de cisalhamento. Foi realizada simulação numérica dos conectores tipo pino com cabeça e perfil "U" formado a frio, por meio da modelagem do ensaio experimental tipo *push-out*, cujo resultados foram confrontados com valores experimentais obtidos em ensaios realizados em laboratório.

Em Kotinda (2006), modelos tridimensionais de vigas mistas a fim de simular o comportamento estrutural, principalmente no referente à interface entre a viga de aço e a laje de concreto. Os modelos foram constituídos por vigas mistas simplesmente apoiadas com laje de faces planas e conectores de cisalhamento do tipo pino com cabeça. As simulações foram realizadas por meio do software ANSYS versão 8.0.

Regobello (2007) apresentou um estudo de caráter essencialmente numérico da elevação de temperatura em seções transversais de elementos estruturais de aço e mistros de aço e concreto. Realizou uma avaliação das equações propostas pela ABNT NBR 14323:1999, em especial, para situações em que não ocorra aquecimento uniforme por todos os lados do elemento.

Em Chen, *et al.* (2016), descrevem um extensivo estudo, experimental e numérico, com o intuito de avaliar a resposta termo-estrutural de conectores de cisalhamento embutidos em lajes mistas com forma de aço incorporada, com foco em perfis trapezoidais abertos. Para esse propósito, foram realizados oito testes do tipo *push-out* com diferentes níveis de temperatura. Um modelo tridimensional de elementos finitos foi desenvolvido no software *Abaqus*, cuja acurácia dos resultados foi validada através da comparação com os resultados do

estudo experimental. Os resultados de ambos os estudos, numéricos e experimentais, foram usados para avaliar a acurácia dos métodos, propostos por normas europeias, utilizados para prever a capacidade de conectores de cisalhamento expostos à temperaturas elevadas. Por fim, uma nova equação foi proposta para calcular o coeficiente de degradação da resistência do conector de cisalhamento para diferentes níveis de temperaturas.

Shahabi, (2016), apresenta uma revisão dos estudos, realizados na última década, sobre o comportamento de conectores de cisalhamento expostos à elevadas temperaturas. São destacados estudos experimentais de testes do tipo *push-out* e a modelagem de conectores de cisalhamento utilizando o método dos elementos finitos. O estudo ainda conclui que, comparado com o volume publicado sobre conectores de cisalhamentos em temperatura ambiente, há a necessidade de aumentar o número de pesquisas sobre o comportamento de conectores de cisalhamento em situação de incêndio.

2 FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

2.1 ANÁLISE ESTRUTURAL

A análise estrutural é uma etapa fundamental do projeto estrutural portando deve atender necessidades de aspectos construtivos e respeitar restrições legais satisfazendo questões de segurança, condições de utilização, condições econômicas e questões ambientais (MARTHA, 2010).

A análise de um sistema, na engenharia, consiste na idealização de forma que seja possível formular equações que governam o equilíbrio deste sistema idealizado, a solução destas equações, e a interpretação dos resultados (BATHE, 1982). De uma maneira geral, a análise estrutural tem como objetivo a determinação de esforços e tensões internas, bem como de deslocamentos globais e deformações(MARTHA, 2010).

A idealização da estrutura real consiste na criação de um modelo estrutural, também denominado modelo analítico ou modelo matemático. Tal modelo consiste na união de elementos que se aproximem da realidade do comportamento da estrutura real quando submetida aos carregamentos observados na análise. A conspeção desses elementos baseia-se em teorias físicas e resultados experimentais e estatísticos além da adoção de hipóteses simplificadoras.

Segundo Martha (2010) as hipóteses simplificadoras podem ser divididas nos seguintes tipos:

- Hipóteses sobre a geometria do modelo;
- Hipóteses sobre as condições de suporte (ligação com o meio externo, por exemplo com o solo);
- Hipóteses sobre o comportamento dos materiais;
- Hipóteses sobre as solicitações que agem sobre a estrutura (cargas de ocupação ou pressão de vento, por exemplo).

Tais hipóteses devem levar em consideração o modelo matemático que será utilizada na análise. Duas categorias de modelos são consideradas: o modelo contínuo e o modelo discreto.

O modelo contínuo é regido por equações diferenciais que fornecem a solução exata para as equações de equilíbrio obtidas no modelo estrutural. Essa solução exata satisfaz todas as condições de contorno impostas porém sua utilização só é possível em problemas relativamente simples. É comum realizar estratégias numéricas que fornecem uma solução aproximada das equações de equilíbrio, porém, satisfatória para a realização da análise. Para isso é realizada a discretização do sistema contínuo, possibilitando que a solução das equações de equilíbrio seja obtida através da resolução de um sistema finito de variáveis discretas. Essa é a abordagem utilizada neste trabalho para obtenção de campos de temperatura e, posteriormente, tensões e deformações no sistema misto.

2.2 VIGAS MISTAS AÇO E CONCRETO

Vigas mistas de aço e concreto consistem em uma associação de uma viga de aço de perfil “I” com uma laje de concreto, com ou sem forma incorporada. Os tipos usuais de seções mistas são apresentados na figura 3. Para que ambos os elementos trabalhem como um conjunto quando solicitados é necessário a realização de uma ligação entre a viga de aço e a laje de concreto que garanta a resistência à flexão em torno de um eixo perpendicular ao plano médio da alma na viga. Essa ligação é estabelecida por meio de elementos metálicos denominados conectores de cisalhamento.

2.2.1 CONECTORES DE CISALHAMENTO

Segundo Tristão (2002) os conectores de cisalhamento cumprem a função de absorver os esforços de cisalhamento longitudinais do concreto para o aço, na interface da viga mista, e impedem a separação vertical entre a laje de concreto e o perfil de aço, movimento denominado uplift. A figura 4 ilustra os tipos mais usuais de conectores.

De acordo com Alva e Malite (2005) os conectores classificam-se em flexíveis e rígidos. O conceito de rigidez, neste caso, está relacionado com a capacidade de restrição ao escorregamento imposto pela ligação entre a viga de aço e a laje de concreto.

A característica estrutural mais importante dos conectores de cisalhamento é a relação existente entre a força transmitida para o conector e o escorregamento relativo na interface aço concreto, como ilustrado na figura 5.

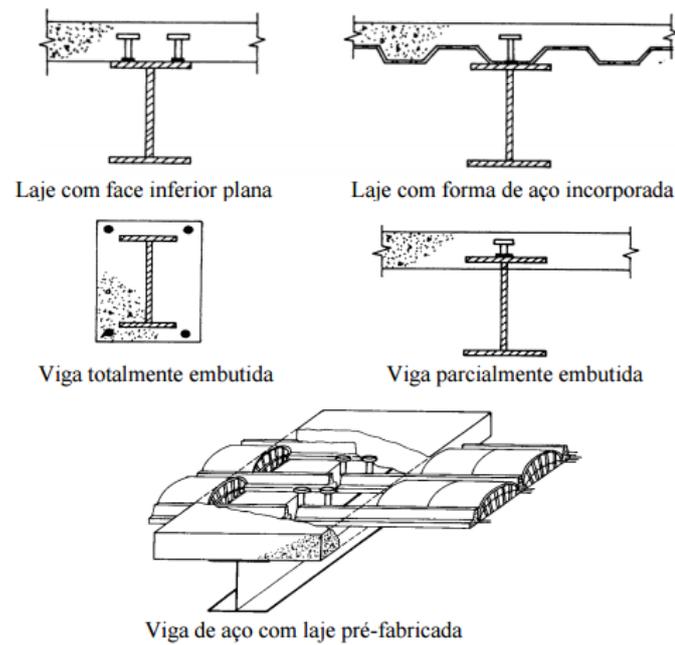


Figura 3: Tipos usuais de seções mistas.
 Fonte: Malite (1990)

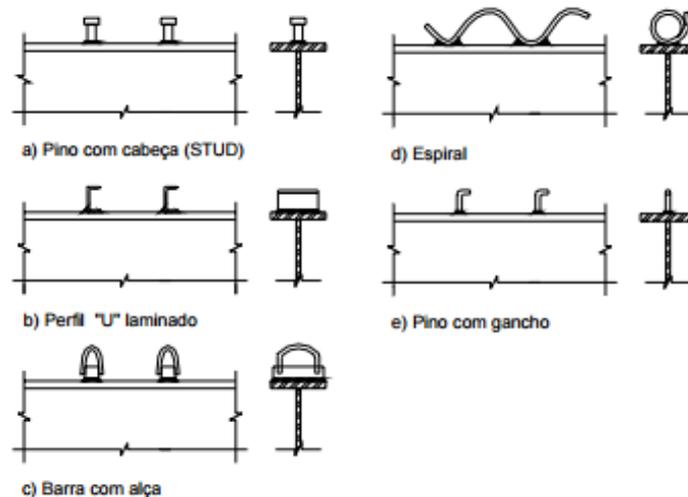


Figura 4: Tipos usuais de conectores.
 Fonte:Alva e Malite (2005)

2.2.2 COMPORTAMENTO ESTRUTURAL DA VIGA MISTA

Para o estudo do comportamento da viga mista de aço concreto é necessário a observação de algumas particularidades que surgem como consequência da interface entre a viga de aço e a laje de concreto. Para garantir que ambos os materiais trabalhem em conjunto deve-se compreender o conceito grau de interação.

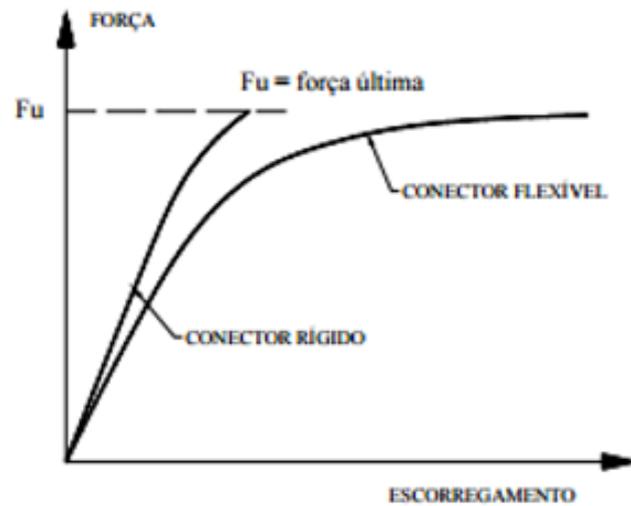


Figura 5: Curva força escorregamento para conectores de cisalhamento.
 Fonte: Alva e Malite (2005)

2.2.2.1 GRAU DE INTERAÇÃO

Consideremos uma viga mista de aço e concreto simplesmente apoiada sob o efeito do peso próprio dos elementos que a compõem, conforme ilustra a figura 6. O modo em que ocorre a distribuição das tensões normais à seção transversal da viga mista depende do grau de interação entre a viga de aço e a laje de concreto.

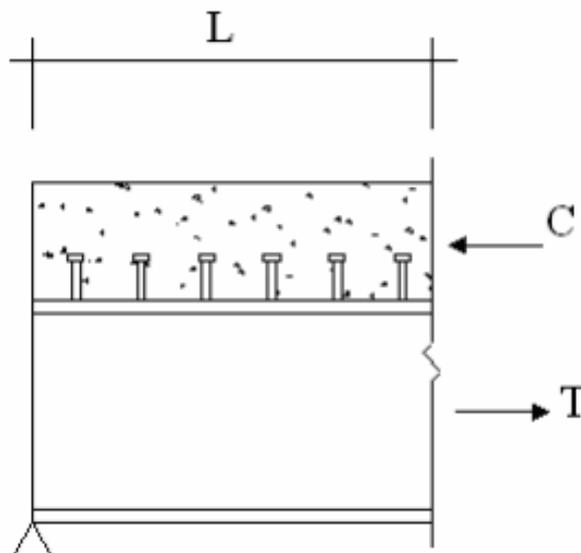


Figura 6: Equilíbrio longitudinal de forças.
 Fonte: Kotinda (2006)

Seja uma viga mista cuja capacidade resistente da viga de aço é de F_s e da laje de

concreto é de F_c . Consideremos também capacidade resistente da conexão, dada pelo número de conectores em meio vão analisado multiplicado pela resistência de cada um, denominada F_{sh} (KOTINDA, 2006). A figura 7 ilustra os três casos possíveis, considerando uma viga de alma compacta.

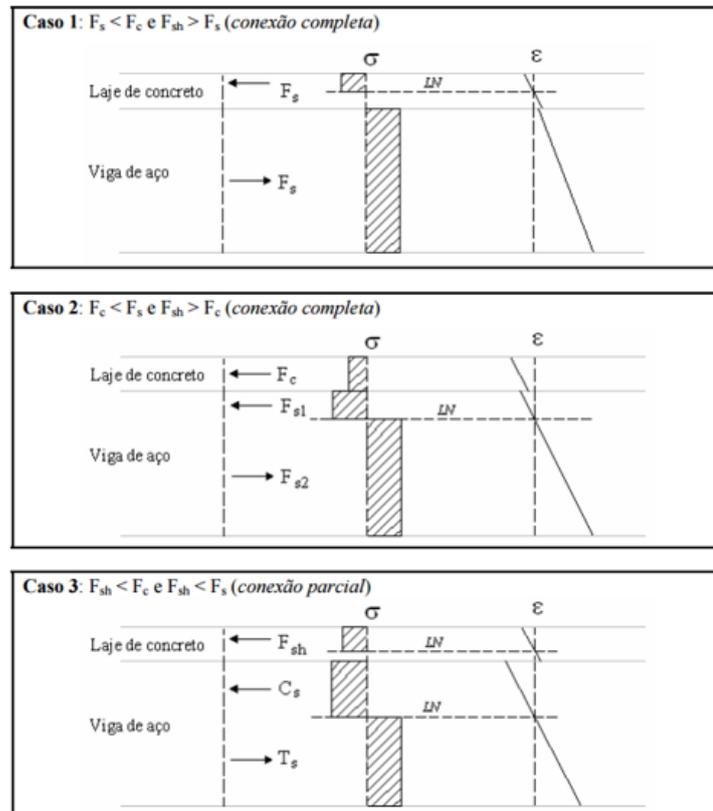


Figura 7: Tensões e deformações na seção mista em função do grau de interação.
Fonte: Oehlers e Bradford (1995)

Para o caso 1, o limitante é a resistência da viga de aço, desse modo o equilíbrio longitudinal de forças ocorre quando $T = F_s$ e $C = F_s$. Para o caso 2, o limitante é a resistência da laje de concreto, o equilíbrio longitudinal de forças é atingido quando $C = (F_c + F_{s1})$ e $T = F_{s2}$. Uma outra situação possível de ocorrer e não ilustrada é $F_c = F_s$, o equilíbrio de forças é verificado quando $T = F_s = F_c$ e $C = F_s = F_c$.

Assim uma conexão é denominada completa quando é verificado que existe uma quantidade de conectores, tal que o aumento no número de conectores ou na resistência desses conectores não implica em um aumento da resistência à flexão da viga mista.

Para o caso 3, a capacidade de resistência dos conectores ao cisalhamento é menor que as capacidades da viga de aço e da laje de concreto. Nesse caso o fator limitante da resistência à flexão da viga passa a ser a capacidade de os conectores resistirem ao cisalhamento. Esse caso é observado quando a quantidade de conectores é menor do que a mínima estabelecida para que

ocorra a conexão completa.

O grau de interação de cisalhamento é determinado pela equação 1.

$$\eta = \frac{F_{sh}}{F_{sh,mín}} \quad (1)$$

Onde

η grau da conexão de cisalhamento;

F_{sh} é a resistência da conexão de cisalhamento e

$F_{sh,mín}$ é a resistência mínima da conexão de cisalhamento para que se obtenha uma conexão completa.

Caso o grau de interação seja maior ou igual à unidade um, o somatório das resistências dos conectores de cisalhamento é maior ou igual a menor das capacidades resistentes da viga de aço à tração ou da laje de concreto à compressão. Portanto temos a viga com interação completa (ou ligação total).

Em caso contrário, em que o grau de interação seja menor que um, o somatório das resistências dos conectores é menor do que as capacidades resistentes da viga de aço à tração e da laje de concreto à compressão. Portanto temos a viga mista com conexão parcial (ou ligação parcial). A ABNT NBR 8800:2008 - Projeto de estruturas de aço e de estruturas mistas de aço e concreto de edifícios, determina um valor mínimo para o grau de interação (η) nesses casos:

1. quando os perfis de aço componentes da viga mista têm mesas de áreas iguais:

(a) Para $L_e \leq 25m$ $\eta_{mín} = 1 - (E/578f_y)(0,75 - 0,03L_e) \geq 0,4$

(b) Para $L_e > 25m$, o dimensionamento deve ser feito para conexão completa: $\eta = 1$

2. quando os perfis de aço componentes da viga mista têm mesas de áreas diferentes, com a área da mesa inferior ou igual a três vezes a área da mesa superior:

(a) Para $L_e \leq 20m$ $\eta_{mín} = 1 - (E/578f_y)(0,30 - 0,0315L_e) \geq 0,4$

(b) Para $L_e > 20m$, o dimensionamento deve ser feito para conexão completa: $\eta = 1$

3. para situações intermediárias entre as previstas, pode-se efetuar interpolação linear (outras situações não são previstas).

O parâmetro L_e é o comprimento do trecho de momento positivo (distante entre pontos de momento nulo), em metros.

Segundo Malite (1990) a deformação dos conectores está associada à ocorrência de escorregamento relativo entre o aço e o concreto. Este fenômeno afeta a distribuição de tensões na seção, a distribuição longitudinal do fluxo de cisalhamento e conseqüentemente a deformação global da viga.

Em uma viga mista de aço e concreto biapoiada e apenas sob o efeito de cargas gravitacionais, como demonstrado na figura 8, o comportamento dos materiais na interface aço e concreto pode ter três tipos de comportamentos possíveis, dependendo do modo como a ligação entre eles é realizada.

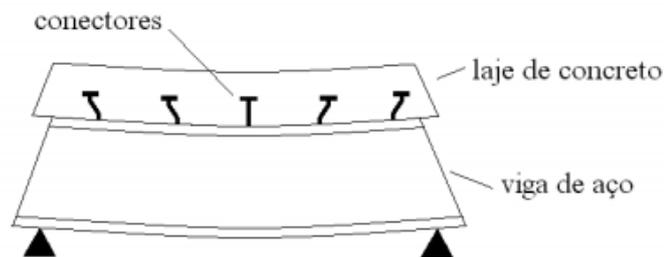


Figura 8: Configuração deformada de uma viga mista simplesmente apoiada sob ação de cargas gravitacionais.

Fonte: Adaptada de Oehlers e Bradford (1995)

A primeira situação possível é não ocorrer nenhuma ação de forças que restrinja a deformação dos materiais, desde modo ambos os materiais trabalhariam de forma independente um do outro. Essa configuração é denominada interação nula, o que não representa o sistema misto.

A segunda situação possível é a interação parcial. Nesse caso ocorreriam deslocamentos relativos entre o aço e o concreto na região de maior tensão de cisalhamento na viga. As fibras de aço adjacentes à interface são tracionadas enquanto as fibras de concreto são comprimidas, fazendo com que os conectores se deformem.

A terceira é a interação total. Nessa configuração a deformação relativa na interface é totalmente impedida, como resultado o aço e concreto resistem aos esforços de flexão de forma conjunta trabalhando como um único elemento.

Ainda segundo Malite (1990), não é possível restringir na totalidade a deformação relativa entre o aço e o concreto na prática. Porém para deslocamentos muito pequenos o efeito pode ser desprezado. A figura 9 apresenta os diagramas relativos as configurações citadas.

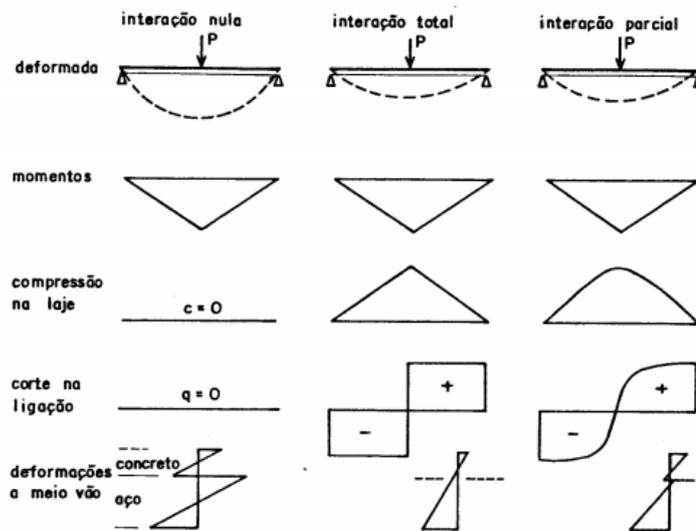


Figura 9: Interação aço e concreto no comportamento de vigas mistas.
Fonte: Malite (1990)

2.3 ENSAIO TIPO *PUSH-OUT*

A resistência ao cisalhamento e os deslocamentos devido a cargas aplicadas são as características mais importantes a serem consideradas no projeto de estruturas mistas. O método mais adequado para determinar essa relação consiste em realizar ensaios em uma viga mista em escala real, porém isso representaria um grande custo de recursos e tempo. Para conseguir uma avaliação favorável dessa relação sem desprender desses recursos pode-se utilizar dos ensaios tipo *push-out*.

Os ensaios *push-out* utilizam um segmento de uma viga de aço cujas duas mesas são conectadas a lajes de concreto por meio de conectores de cisalhamento. As lajes são cobertas por argamassa e posicionadas na vertical apoiadas em uma superfície, a carga é aplicada na parte superior da viga, como ilustrado na figura 10. Os deslocamentos entre as duas lajes de concreto e a viga de aço são registrados a cada incremento no carregamento. Os valores médios são plotados em um gráfico de carregamento aplicado versus deslocamentos obtidos, como ilustra a figura 11.

2.3.1 PROCEDIMENTOS DO TESTE *PUSH-OUT*

As dimensões e o processo do teste são padronizados pela norma estrangeira *Eurocode 4: Design of composite steel and concrete structures - Part 1-2: General rules - Structural fire design*. Primeiramente o carregamento é aplicado em incrementos iguais até atingir 40%

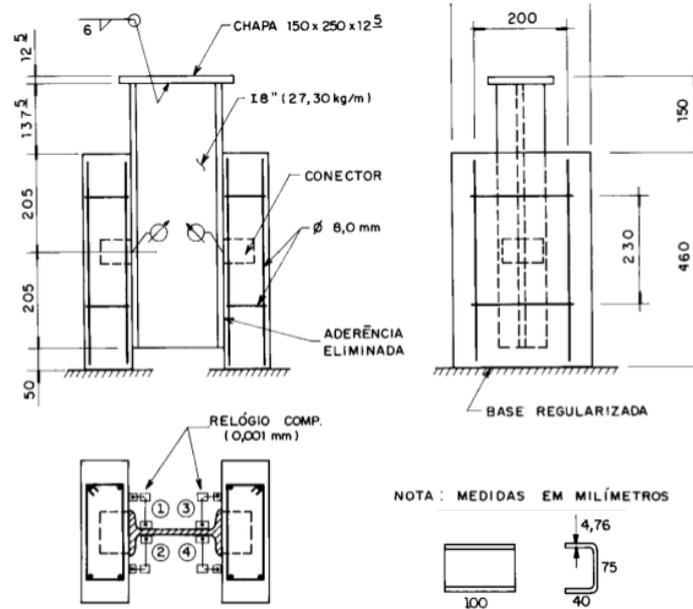


Figura 10: Esquema do ensaio tipo *push-out*.

Fonte: Malite (1993)

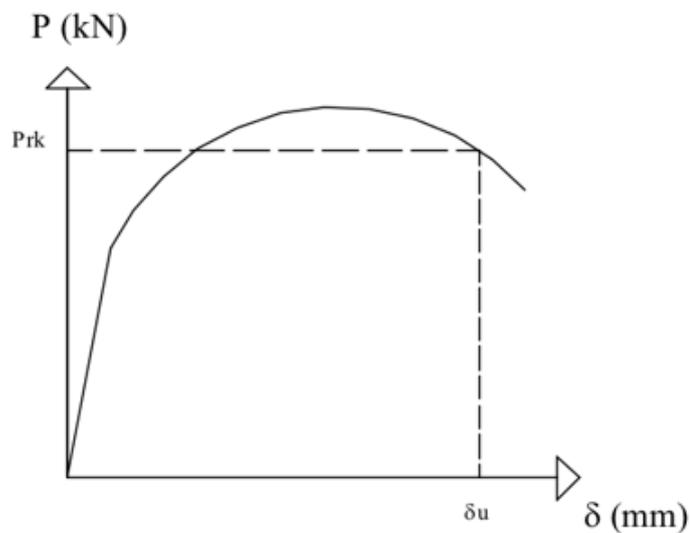


Figura 11: Determinação da capacidade de deslocamento em correspondência ao carregamento aplicado.

Fonte: Tristão (2002)

da carga de ruptura esperada, após essa etapa é necessário realizar 25 ciclos entre 5% e 40% da carga de ruptura esperada. Subsequentemente os incrementos no carregamento devem ser realizados de modo que a ruptura não ocorra em um período de tempo inferior a 15 minutos.

O deslocamento horizontal entre cada laje de concreto e a seção de aço devem ser medidos constantemente durante o carregamento ou a cada incremento no carregamento. Os deslocamentos devem ser medidos no mínimo até que o carregamento atinja 80% da carga

de ruptura. Deve se medir também, se possível, para cada grupo de conectores a separação transversal entre a seção de aço e cada laje de concreto.

2.3.2 AVALIAÇÃO DOS RESULTADOS DO TESTE *PUSH-OUT*

Devem ser realizados três testes com especificações e carregamentos idênticos e o desvio de qualquer um dos valores obtidos de todos os testes não pode exceder 10%. Caso essas exigências forem respeitadas a resistência de projeto pode ser determinada como:

- A resistência característica P_{Rk} deve ser tomada como a carga mínima de ruptura (dividida pelo número de conectores) reduzida de 10%.
- A resistência de projeto P_{Rd} pode ser calculada conforme a equação 2

$$P_{Rd} = \frac{f_u}{f_{ut}} \frac{P_{Rk}}{\gamma_V} \leq \frac{P_{Rk}}{\gamma_V} \quad (2)$$

Onde

f_u é a resistência última especificada do aço do conector;

f_{ut} é a resistência última do aço do conector obtida no teste;

γ_V é o coeficiente de segurança para conexão de cisalhamento.

O deslocamento máximo δ_u deve ser tomado como o máximo deslocamento medido durante o processo de caracterização da resistência característica, como mostrado na figura 11. A capacidade característica de deslocamento é o valor mínimo obtido de δ_u reduzido de 10% ou determinado através de avaliação estatística.

2.4 TRANSFERÊNCIA DE CALOR

O fluxo de calor entre materiais está presente a todo instante. O sentido desse fluxo de calor se dá da região de maior temperatura para a de menor temperatura, a diferença entre as temperaturas num sistema resulta em um gradiente de temperaturas.

O estudo de como ocorre esse fluxo de calor é de interesse de várias áreas da ciência como a física, a química, a biologia, a engenharia entre outras. Mais precisamente dentro do campo de estudos de sistemas estruturais na engenharia civil, o entendimento desse fenômeno

possibilita prever como os materiais se comportarão caso ocorra um aumento significativo do gradiente de temperatura.

Nesse caso os materiais podem sofrer alterações em suas propriedades e conseqüentemente as hipóteses simplificadoras utilizadas na idealização do modelo estrutural podem não estar mais condizentes com a realidade. Este cenário recai na necessidade de um estudo direcionado para tal situação. Porém antes de aprofundar nesse assunto faz-se oportuno uma revisão dos mecanismos envolvidos na transferência de calor.

A transferência de calor ocorre por três mecanismos distintos: condução, convecção e radiação.

2.4.1 CONDUÇÃO DE CALOR

Condução é processo em que a transferência de calor ocorre devido à colisão de moléculas de diferentes vibrações. A vibração de uma molécula está relacionada a sua temperatura, pois quanto maior a energia contida na molécula maior será a sua vibração. Se considerarmos dois corpos de mesma natureza com massa e volume semelhante e temperaturas diferentes, ao aproximá-los, as moléculas do corpo de maior temperatura irão colidir com as moléculas do corpo de menor temperatura. Esse processo continua até que essa transferência de energia cinética faça com que todas as moléculas vibrem na mesma velocidade, atingindo o equilíbrio. Nesse caso, a transferência de calor ocorre sem a necessidade de transferência de massa, mas sim apenas pelo contato físico entre os corpos. O fenômeno é ilustrado pela figura 12.

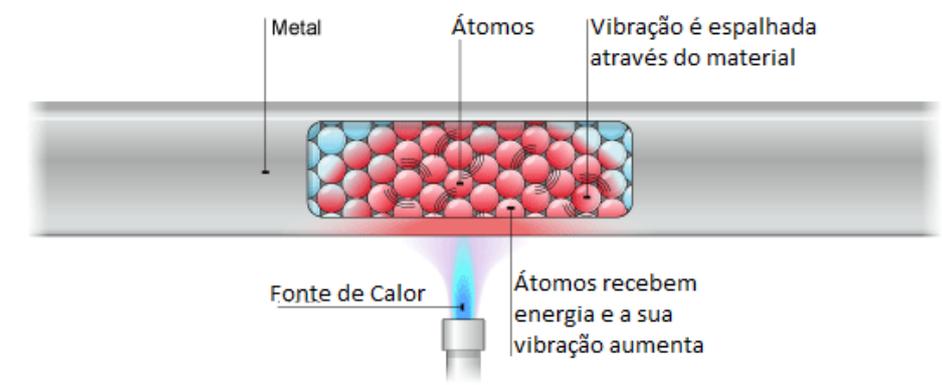


Figura 12: Transferência de calor por condução.

Fonte: Adaptado de GCSE Bitesize, <http://www.bbc.co.uk/schools/gcsebitesize>

O fluxo de calor resultante da condução térmica, descrito pela lei de Fourier, é proporcional à magnitude do gradiente de temperatura e oposto a este em sinal conforme

apresentado na equação 3.

$$q = -k \frac{dT}{dx} \quad (3)$$

Onde

q é o fluxo de calor (W/m^2),

k é constante denominada condutividade térmica do material (W/mK) e

dT/dx é o gradiente de temperatura na direção do fluxo de calor (K/m).

2.4.2 CONVECÇÃO DE CALOR

A convecção é a forma de transferência de calor que ocorre principalmente em fluidos. Conforme a massa do fluido recebe calor, ocorre um aumento na vibração das suas moléculas. Como resultado, as moléculas acabam se afastando umas das outras. A massa mais aquecida, menos densa do fluido, tende a sofrer um movimento de ascensão ocupando o lugar da massa mais densa, de menor temperatura do fluido. A repetição desse fenômeno dá origem às correntes de convecção que mantêm o fluido em circulação. O fenômeno é ilustrado pela figura 13.

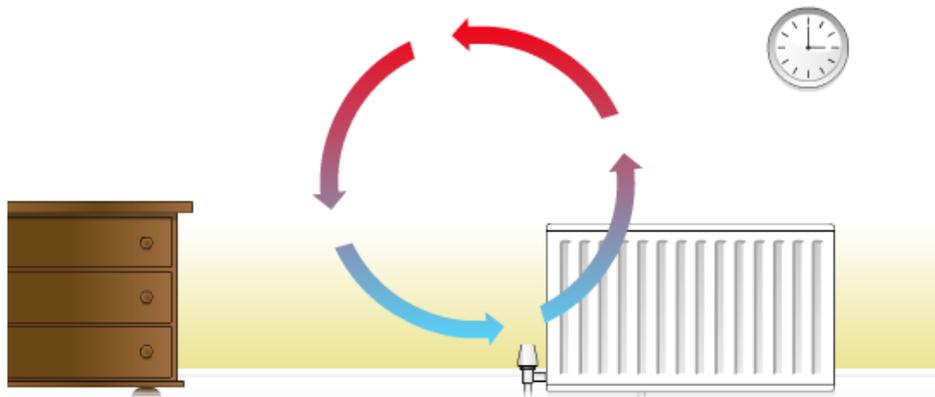


Figura 13: Transferência de calor por convecção.

Fonte: GCSE Bitesize, <http://www.bbc.co.uk/schools/gcsebitesize>

Quando um fluido de menor temperatura entra em contato com um sólido de maior temperatura, o fluido adjacente ao sólido forma uma fina região de velocidade reduzida denominada camada limite. O calor é conduzido para esta camada, que acaba se afastando do sólido dando vez a outra parte do fluido, criando assim uma corrente. A situação descrita é ilustrada pela seguinte equação 4.

$$\frac{dT_{sólido}}{dt} \simeq T_{sólido} - T_{\infty} \quad (4)$$

Onde

$T_{sólido}$ é a temperatura do sólido e

T_{∞} é a temperatura do fluido em movimento nas adjacências do sólido, ambas com unidade Kelvin (k).

Se a temperatura do sólido for constantemente reabastecida, como se houvesse geração de calor interno, ela será constante. Então é possível reescrever a equação 4 em termo do fluxo de calor q , apresentado pela equação 5

$$q = \alpha_c (T_{sólido} - T_{\infty}) \quad (5)$$

Onde

α_c é o coeficiente de transferência de calor por convecção (W/m^2K).

2.4.3 RADIAÇÃO DE CALOR

Radiação é a transferência de calor entre corpos por meio de ondas eletromagnéticas. Este é o principal mecanismo de transferência de calor em situações de elevadas temperaturas. Nesse fenômeno não há o envolvimento de partículas, diferentemente da condução e da convecção, logo a radiação pode ocorrer no vácuo.

A radiação depende principalmente das características da superfície onde emanam as ondas eletromagnéticas. Quando um corpo recebe radiação pode ocorrer três diferentes possibilidades, a citar transmissão (Q_t), em que a radiação incidente atravessa o corpo; reflexão (Q_r), em que a radiação incidente é devolvida para o meio de onde veio; e absorção (Q_a), em que a radiação incidente é absorvida pelo corpo. A figura 14 ilustra as três possibilidades.

2.5 ESTRUTURAS EM SITUAÇÃO DE INCÊNDIO

O aumento da temperatura nos materiais decorrente da ação do incêndio provoca reduções nas resistências e na rigidez dos materiais utilizados em sistemas estruturais. Como dito anteriormente, se faz necessário, portanto, um estudo do comportamento da estrutura para garantir a segurança na evacuação dos usuários caso ocorra um incêndio.

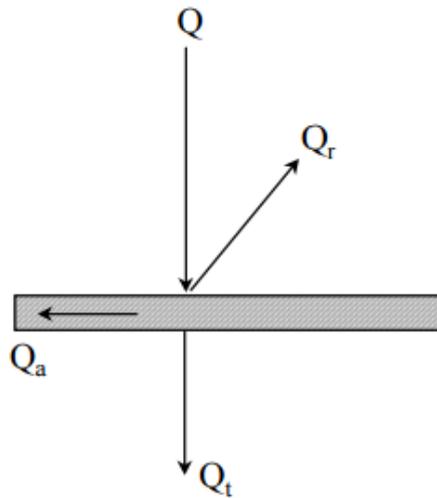


Figura 14: Reflexão, transmissão e absorção de radiação.

Segundo Regobello (2007), a principal característica da ação térmica que atua em uma estrutura é a curva que fornece a temperatura dos gases em função do tempo de incêndio. A partir dessa curva, é possível determinar a máxima temperatura atingida pelas peças estruturais e a resistência apresentada nessas temperaturas.

2.5.1 CURVA "TEMPERATURA X TEMPO" DE UM INCÊNDIO REAL

A ocorrência de um incêndio se dá através de três fatores necessários: fonte de calor, comburente e material combustível. Com a existência simultânea desses três fatores e havendo combustão, está deflagrado a situação de incêndio.

Segundo Silva (2002) embora não existam duas combustões iguais, torna-se importante e também necessário avaliar e determinar as condições usadas para a padronização dos resultados obtidos durante o período de incêndio, sendo considerado diferentes estágios durante o processo de combustão. Diante disso é apresentado na figura 15 a curva de um incêndio real em um compartimento.

Na primeira fase, denominada ignição, é possível notar que as temperaturas não são elevadas, não gerando alterações nas propriedades dos elementos estruturais. Devido à esta fase não influenciar no comportamento estrutural ela pode ser desconsiderada nas análises realizadas. Porém, vale ressaltar que do ponto de vista da segurança a vida humana essa é a fase mais crítica pois, durante sua ocorrência são produzidos os gases tóxicos presentes em um incêndio.

Na fase seguinte, de aquecimento, é notado um incremento acentuado na temperatura.

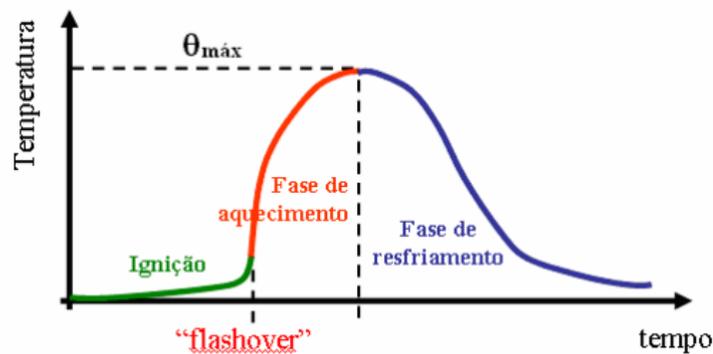


Figura 15: Curva temperatura-tempo típica de um incêndio real.
Fonte:Regobello (2007)

Esse incremento de temperatura acentuado é denominado *flashover*. Após esse período ocorre o completo desenvolvimento do incêndio, o processo de combustão se estende por todo o compartimento e a temperatura média do compartimento atinge valores elevados. Segundo Silva (2002) o instante de *flashover* pode ser definido como o período máximo de tempo em que os ocupantes do compartimento têm para desocupá-lo ou serem salvos.

A última fase é o período de resfriamento, que se inicia após toda carga combustível ter sido consumida, quando o valor da temperatura média do compartimento atinge valor próximo a 80% do valor da máxima temperatura do compartimento.

2.5.2 MODELOS IDEALIZADOS DE INCÊNDIO NATURAL E INCÊNDIO-PADRÃO

Para representar uma situação de incêndio, é possível simplificar o modelo de incêndio real sem prejudicar a análise de desempenho da estrutura. O modelo conhecido como incêndio natural é caracterizado por uma curva "temperatura tempo" conforme a figura 16. De acordo com Silva (2002) esse modelo foi baseado em ensaios que simulam situações reais de incêndio. O modelo do incêndio natural é caracterizado por dois ramos um ascendente e outro descendente, tornando possível determinar a temperatura máxima do incêndio.

Segundo Regobello (2007) a curva "temperatura x tempo" difere a cada situação de incêndio estudada. Por isso ocorreu a necessidade de convencionar curvas padronizadas para fins de análise de estruturas e materiais de revestimento térmico. Em tais modelos, conhecidos como modelos incêndio padrão, há apenas o ramo ascendente. As curvas de incêndio padrão descrevem a temperatura dos gases no compartimento em função do tempo ($\theta(t)$). O gradiente de temperatura tem um valor inicial elevado e, portanto, com pouca probabilidade de ser atingida durante a vida útil da edificação, para qualquer carga de incêndio e intensidade de ventilação que possa ocorrer num caso real. O modelo de incêndio-padrão é caracterizado pela

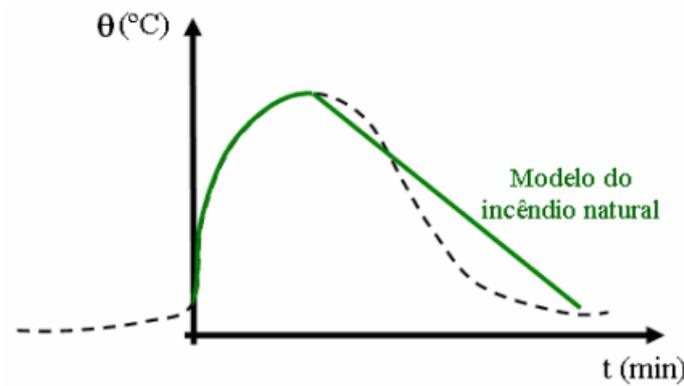


Figura 16: Modelo do incêndio natural.
Fonte: Regobello (2007)

figura.

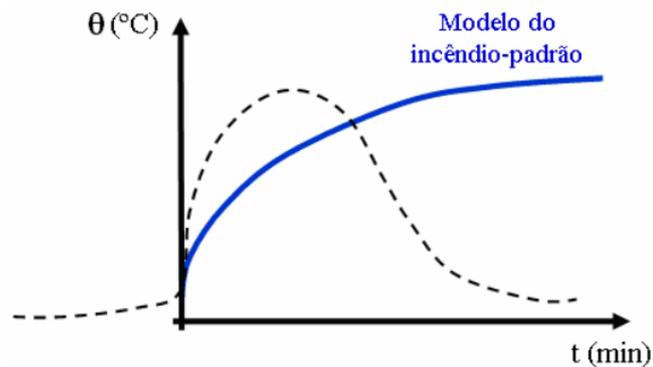


Figura 17: Modelo do incêndio-padrão.
Fonte: Regobello (2007)

2.5.3 DIFERENTES CURVAS DE INCÊNDIO PADRÃO

A curva de incêndio padrão dada pela Associação Brasileira de Normas Técnicas é dada pela equação 6. A curva adotada pela ABNT NBR 14432:2001 é a mesma usada pela ISO 834:1999.

$$\theta_g = \theta_0 + 345 \log(8t + 1) \quad (6)$$

Onde

t é o tempo mínimo em minutos;

θ_0 é a temperatura ambiente antes do início do aquecimento, em graus Celsius,

geralmente tomada igual a 20°C;

θ_g é a temperatura dos gases, em graus Celsius, no instante t.

A *American Society Testing and Materials* através da *ASTM E119 16a - Standard Test Methods for Fire Tests of Building Construction and Materials* traz os valores da curva "temperatura tempo" tabelados para o modelo de incêndio padrão. Regobello (2007), por meio de regressão não linear, estabeleceu a equação 7 para representar os valores tabelados.

$$\theta_g = \theta_0 + 750[1 - e^{-3,79533\sqrt{t}}] + 170 * 41\sqrt{t} \quad (7)$$

Ambas as curvas são apresentadas na figura 18.

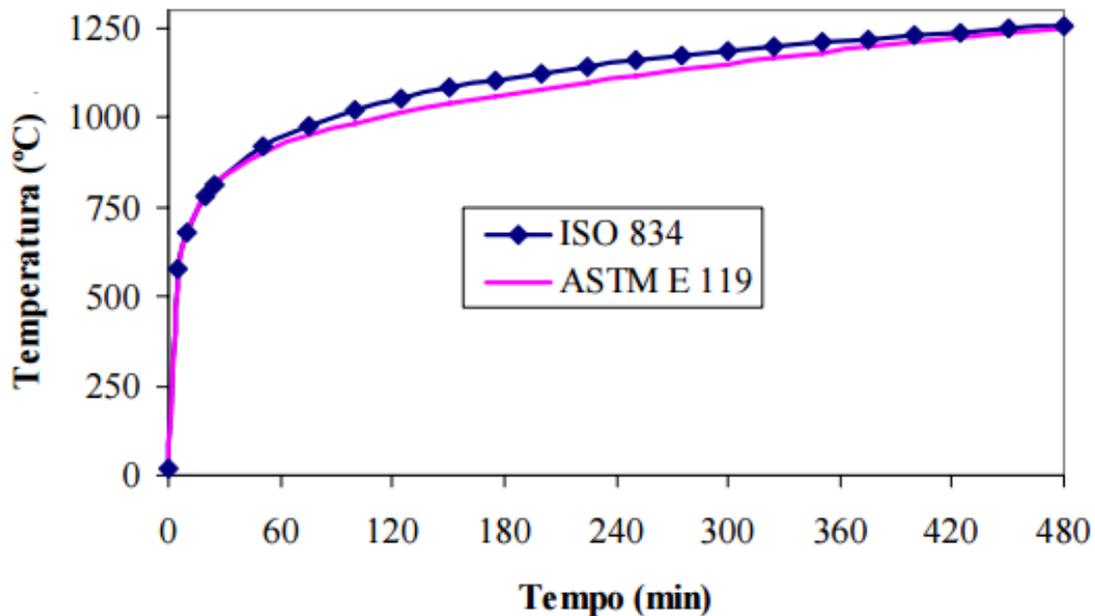


Figura 18: Curvas temperatura-tempo padronizadas.

Fonte: Regobello (2007)

Em um projeto estrutural em que se contempla a verificação da ação do incêndio, a segurança é atendida quando os elementos construtivos resistem a um determinado tempo antes de apresentar colapso. Nesse contexto, o critério de resistência implica em se manter estanque, íntegro e isolante durante tal período de tempo.

Este tempo é denominado Tempo requerido de Resistência ao Fogo (TRRF). Os valores de TRRFs para os diferentes materiais e estruturas são estabelecidos pelas Instruções técnicas do Corpo de Bombeiros e pela norma brasileira ABNT NBR 14432:2001 – Exigências de resistência ao fogo dos elementos construtivos das edificações. O TRRF é um valor adotado

em consenso com a sociedade.

2.6 EFEITOS DA TEMPERATURA E ALTERAÇÃO DAS PROPRIEDADES DO AÇO E DO CONCRETO

Em altas temperaturas as propriedades mecânicas e térmicas do aço e do concreto sofrem alterações. Isso ocorre devido a degeneração das características físico-químicas dos materiais. A deterioração do material depende do gradiente de temperatura e do carregamento aplicado no elemento estrutural. Esse efeito pode levar ao colapso da estrutura devido a incapacidade de o elemento sustentar o carregamento aplicado.

2.6.1 MASSA ESPECÍFICA

Segundo a Eurocode 4 Part 1-2, a massa específica do aço, ρ_a , pode ser considerada como independente da temperatura do aço, e seu valor pode ser tomado como 7850 kg/m^3 . Já a massa específica do concreto, ρ_c , pode variar em função da temperatura do concreto simples, θ_c . Seu valor pode ser calculado através da equação 8.

$$\rho_{c;\theta} = 2354 - (\theta_c/100) \quad (8)$$

2.6.2 PROPRIEDADES MECÂNICAS

O efeito de altas temperaturas faz com que aço sofra redução da resistência ao escoamento e do módulo de elasticidade. Para dimensionamento de estruturas feitas em aço expostas a altas temperaturas a ABNT NBR 14323:2013 estabelece fatores de redução. Sendo que para taxas de aquecimento entre $2^\circ\text{C}/\text{min}$ e $50^\circ\text{C}/\text{min}$ os fatores de redução, relativos aos valores a 20°C , para a resistência ao escoamento dos aços e o módulo de elasticidade dos aços em temperatura elevada, são representados respectivamente por $k_{y,\theta}$, $k_{E,\theta}$ e representados nas equações 9 e 10. A variação dos fatores de redução do aço com a temperatura é ilustrado na figura 19.

$$k_{y,\theta} = \frac{f_{y,\theta}}{f_y} \quad (9)$$

$$k_{E,\theta} = \frac{E_\theta}{E} \quad (10)$$

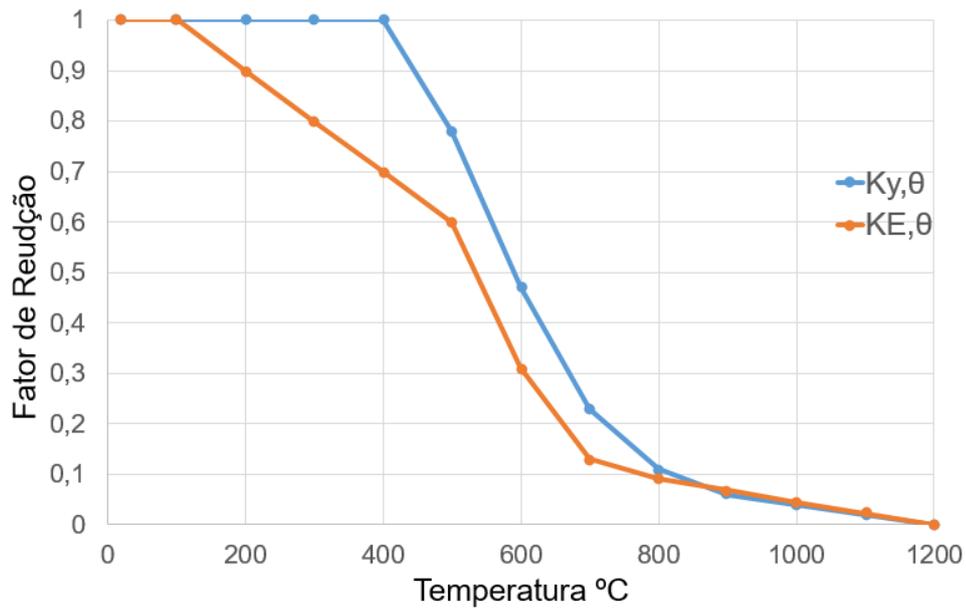


Figura 19: Variação dos fatores de redução para a resistência ao escoamento e o módulo de elasticidade dos aços com a temperatura.

Onde,

$f_{y,\theta}$ é a resistência ao escoamento dos aços a uma temperatura θ_a ;

f_y é a resistência ao escoamento do aço a 20°C;

E_θ é o módulo de elasticidade dos de aços a uma temperatura θ_a ;

E é o módulo de elasticidade de todos os aços a 20°C.

Assim como o aço o concreto também sofre redução na resistência característica a compressão. A Eurocode 4 Part 1-2 estabelece fatores de redução que variam com a temperatura sendo para o concreto de densidade normal $k_{c,\theta}$ e para o concreto de baixa densidade $k_{cb,\theta}$, representados pelas equações 11 e 12 respectivamente. A variação dos fatores de redução do concreto com a temperatura é ilustrado na figura 20.

$$k_{c,\theta} = \frac{f_{ck,\theta}}{f_{ck}} \quad (11)$$

$$k_{cb,\theta} = \frac{f_{ckb,\theta}}{f_{ckb}} \quad (12)$$

Onde

$f_{ck,\theta}$ é a resistência característica à compressão do concreto de densidade normal a

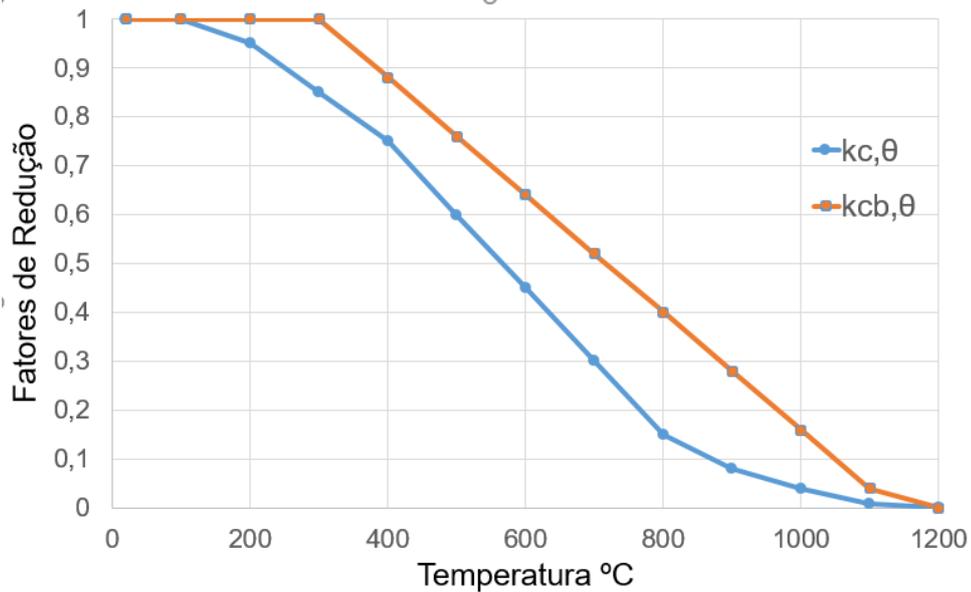


Figura 20: Variação dos fatores de redução dos concretos com a temperatura.

uma temperatura θ_c ;

f_{ck} é a resistência característica à compressão do concreto de densidade normal a 20°C ;

$f_{ckb,\theta}$ é a resistência característica à compressão do concreto de baixa densidade a uma temperatura θ_c ;

f_{ckb} é a resistência característica à compressão do concreto de baixa densidade a 20°C .

2.6.3 PROPRIEDADES TÉRMICAS

2.6.3.1 CONDUTIVIDADE TÉRMICA

Condutividade térmica é uma propriedade física dos materiais que mede a facilidade que o material tem de conduzir o calor. A ABNT NBR 14323:2013 permite usar uma condutividade térmica constante de $45\text{W}/(\text{m}^\circ\text{C})$ para o aço. A condutividade térmica do concreto é fornecido pela Eurocode 4 Part 1-2. Esses valores devem ser adotados para o método simplificado de cálculo. Para outros casos a condutividade térmica do aço λ_a (equação 13), a condutividade térmica do concreto de densidade normal λ_{cn} (equação 14) e a condutividade térmica do concreto de baixa densidade λ_{cb} (equação 15) devem ser obtidas. As figuras 21 e 22 ilustram a condutividade térmica do aço e do concreto, respectivamente, em função da temperatura.

$$\lambda_a = \begin{cases} 54 - 3,33 * 10^{-2}(\theta_a); & \text{para } 20^{\circ}\text{C} \leq \theta_a < 800^{\circ}\text{C} \\ 27,3; & \text{para } 800^{\circ}\text{C} \leq \theta_a < 1200^{\circ}\text{C} \end{cases} \quad (13)$$

$$\lambda_{cn} = 2 - 0,2451 \left(\frac{\theta_c}{100} \right) + 0,0107 \left(\frac{\theta_c}{100} \right)^2; \quad \text{para } 20^{\circ}\text{C} \leq \theta_c < 1200^{\circ}\text{C} \quad (14)$$

$$\lambda_{cb} = \begin{cases} 1 - \left(\frac{\theta_c}{1600} \right); & \text{para } 20^{\circ}\text{C} \leq \theta_c < 800^{\circ}\text{C} \\ 0,5; & \text{para } \theta_c > 800^{\circ}\text{C} \end{cases} \quad (15)$$

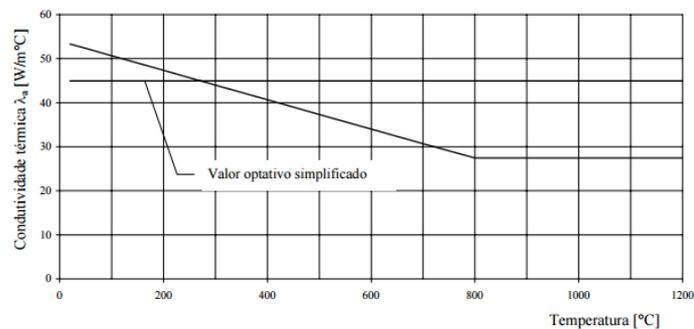


Figura 21: Condutividade térmica do aço em função da temperatura.
Fonte: ABNT NBR 14323:2013

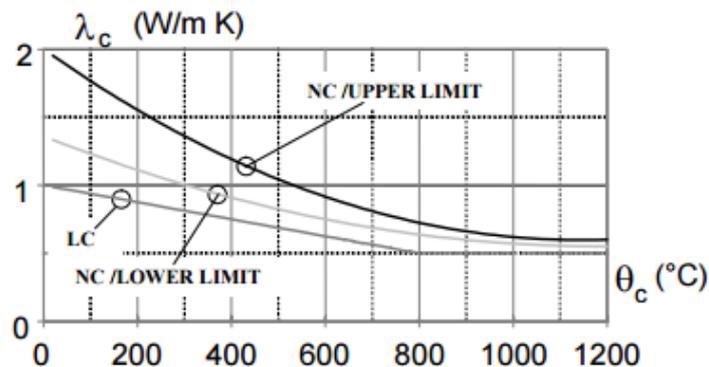


Figura 22: Condutividade térmica do concreto em função da temperatura.
Fonte: Eurocode 4 Part 1-2

2.6.3.2 CALOR ESPECÍFICO

A quantidade de calor necessária para elevar em uma unidade de temperatura uma unidade de massa de um dado material é denominada de calor específico. A ABNT NBR

14323:2013 também permite adotar valor constante de $600\text{J}/\text{kg}^\circ\text{C}$ para o calor específico de aços estruturais quando considerado o método simplificado de cálculo. Para outros casos a norma considera uma variação do calor específico do aço (c_a) conforme a equação 16, em $\text{J}/\text{kg}^\circ\text{C}$. A figura 23 ilustra a variação do calor específico do aço em função da temperatura.

Segundo a Eurocode 4 Part 1-2, a variação do calor específico do concreto com a elevação da temperatura (c_c) pode ser obtido conforme a equação 17, em $\text{J}/\text{kg}^\circ\text{C}$.

$$c_a = \begin{cases} 425 + 7,73 * 10^{-1}(\theta_a) - 1,69 * 10^{-3}(\theta_a)^2 + 2,22 * 10^{-6}(\theta + a)^3; & \text{para } 20^\circ\text{C} \leq \theta_a < 600^\circ\text{C} \\ 666 + \left(\frac{13002}{738 - \theta_a}\right); & \text{para } 600^\circ\text{C} \leq \theta_a < 735^\circ\text{C} \\ 545 + \left(\frac{17820}{\theta_a - 731}\right); & \text{para } 735^\circ\text{C} \leq \theta_a < 900^\circ\text{C} \\ 650; & \text{para } \theta_a > 900^\circ\text{C} \end{cases} \quad (16)$$

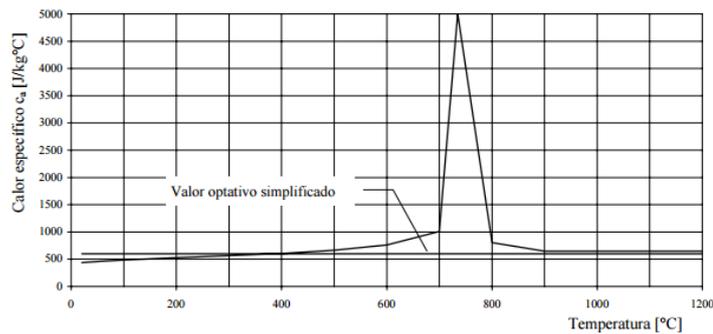


Figura 23: Calor específico do aço em função da temperatura.
Fonte: ABNT NBR 14323:2013

$$c_c = \begin{cases} 900; & \text{para } 20^\circ\text{C} \leq \theta_c < 100^\circ\text{C} \\ 900 + (\theta_c - 100); & \text{para } 100^\circ\text{C} \leq \theta_c < 200^\circ\text{C} \\ 1000 + \left(\frac{\theta_c - 200}{2}\right); & \text{para } 200^\circ\text{C} \leq \theta_c < 400^\circ\text{C} \\ 1100; & \text{para } \theta_c > 400^\circ\text{C} \end{cases} \quad (17)$$

2.6.3.3 ALONGAMENTO RELATIVO

Quando submetido ao aumento de temperatura o aço e concreto sofrem alterações em suas dimensões. O alongamento relativo do aço ($\frac{\Delta l_a}{l_a}$) é apresentado na equação 18, onde l_a é o comprimento a 20°C , Δl_a é a expansão térmica provocada pela temperatura θ_a do aço. O

alongamento relativo do concreto de densidade normal ($\frac{\Delta l_c}{l_c}$) é apresentado na equação 19, onde l_c é o comprimento a $20^\circ C$, Δl_c é a expansão térmica provocada pela temperatura θ_c do aço. As figuras 24 e 25 ilustram a condutividade térmica do aço e do concreto, respectivamente, em função da temperatura.

$$\frac{\Delta l_a}{l_a} = \begin{cases} 1,2 * 10^{-5}(\theta_a) + 0,4 * 10^{-8}(\theta_a)^2 - 2,416 * 10^{-4}; & \text{para } 20^\circ C \leq \theta_a < 750^\circ C \\ 1,1 * 10^{-2}; & \text{para } 750^\circ C \leq \theta_a < 860^\circ C \\ 2 * 10^{-5}(\theta_a) - 6,2 * 10^{-3}; & \text{para } 860^\circ C \leq \theta_a < 1200^\circ C \end{cases} \quad (18)$$

$$\frac{\Delta l_c}{l_c} = \begin{cases} -1,8 * 10^{-4} + 9 * 10^{-6}(\theta_c) + 2,3 * 10^{-11}(\theta_c)^3; & \text{para } 20^\circ C \leq \theta_c < 700^\circ C \\ 14 * 10^{-3}; & \text{para } 700^\circ C \leq \theta_c < 1200^\circ C \end{cases} \quad (19)$$

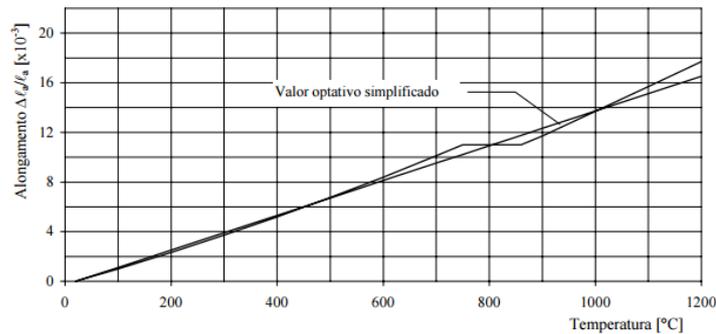


Figura 24: Alongamento do aço em função da temperatura.

Fonte: ABNT NBR 14323:2013

2.7 MODELO SIMPLIFICADO DE CÁLCULO

No caso de elementos comuns de aço, expostos ao fogo, é possível utilizar o método simplificado, proposto pela ABNT NBR 14323:2013, para obter o campo térmico. Segundo a norma, para uma distribuição uniforme de temperatura na seção transversal, a elevação de temperatura $\Delta\theta_{a,t}$, em graus Celsius, de um elemento estrutural de aço sem revestimento contra o fogo, pode ser determinada por:

$$\Delta\theta_{a,t} = K_{sh} \frac{(u/Ag)}{c_a \rho_a} * \varphi \Delta t \quad (20)$$

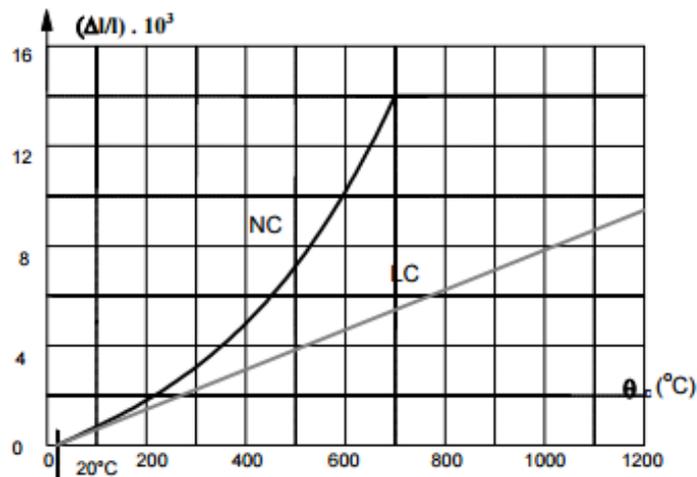


Figura 25: Alongamento do concreto (NC) em função da temperatura.

Fonte: Eurocode 4 Part 1-2

Onde

K_{sh} é um fator de correção para o efeito de sombreamento;

u/Ag é o fator de massividade para elementos estruturais de aço sem revestimento contra o fogo, expresso em metros a menos um (m^{-1}), para seções prismáticas;

u é o perímetro exposto ao incêndio do elemento estrutural de aço, expresso em metros (m);

Ag é a área bruta da seção transversal do elemento estrutural, expressa em metros quadrados (m^2);

ρ_a é a massa específica do aço, expressa em quilogramas por metro cúbico (kg/m^3);

c_a é o calor específico do aço, expresso em joules por quilograma e por grau Célsius ($J/kg/^\circ C$);

φ é o valor do fluxo de calor por unidade de área, expresso em watts por metro quadrado (W/m^2);

Δt é o intervalo de tempo, expresso em segundos (s).

A equação do fluxo de calor é descrita pela equação 21. Aonde a parcela φ_c é o componente do fluxo de calor devido à convecção (W/m^2) e φ_r é o componente de calor devido à radiação (W/m^2), representado respectivamente pelas equações 22 e 23.

$$\varphi = \varphi_c + \varphi_r \quad (21)$$

$$\varphi_c = \alpha_c(\theta_g - \theta_a) \quad (22)$$

$$\varphi_r = 5,67 \times 10^{-8} * \varepsilon_{res} [(\theta_g + 273)^4 - (\theta_a + 273)^4] \quad (23)$$

Nas equações 22 e 23, α_c é o coeficiente de transferência de calor por convecção, θ_g é a temperatura dos gases (em °C), θ_a é a temperatura na superfície do aço (em °C) e ε_{res} é a emissividade resultante.

Para vigas mistas de aço e concreto a norma brasileira NBR 14323:2013, prevê que quando a viga mista possui componente de aço em perfil I, sem revestimento contra fogo, a distribuição de temperatura nesse perfil pode ser tomada como não uniforme. A seção transversal do perfil pode ser dividida em três partes, mesa inferior, alma e mesa superior, conforme ilustra a figura 26.

Para esse caso considera-se que:

- não ocorre transferência de calor entre essas partes e nem entre a mesa superior e a laje de concreto;
- o fator de sombreamento pode ser tomado igual a 1,0 e o fator de massividade igual a:
 - para a mesa inferior: $2(b_{fi} + t_{fi})/b_{fi}t_{fi}$
 - para a mesa superior sobreposta por laje maciça: $(b_{fs} + 2t_{fs})/b_{fs}t_{fs}$
 - para a alma: $2/t_w$

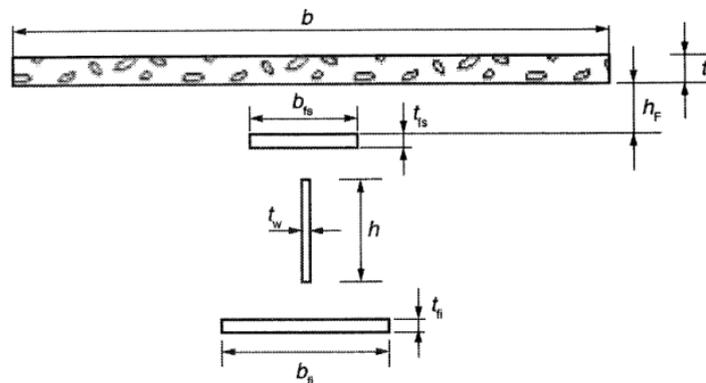


Figura 26: Divisão do componente de aço em perfil I para distribuição de temperatura
Fonte: ABNT NBR 14323:2013

3 METODOLOGIA

O presente capítulo descreve a metodologia utilizada na construção do modelo numérico para análise de um transiente térmico. A análise numérica foi realizada em campo tridimensional, utilizando o software *ANSYS Workbench* versão 16.0, o qual é formulado com base no Método dos Elementos Finitos.

O programa *ANSYS* permite realizar dois tipos de análise térmica. A análise térmica estacionária, que determina a distribuição de temperaturas e outras grandezas térmicas sob condições de carregamento estacionário. E a análise térmica transiente, que determina a distribuição de temperatura e outras grandezas térmicas em condições que variam num dado período de tempo.

Neste trabalho foi realizado um análise térmica transiente. As temperaturas obtidas da análise térmica transiente poderão ser usadas futuramente como entrada em uma análise estrutural para avaliar a influência dessa variação de temperatura nos esforços resistentes do concreto e do aço.

Uma análise de um transiente térmico pode ser linear ou não linear. As propriedades dos materiais (condutividade térmica, calor específico ou densidade), ou efeitos devidos a coeficientes de convecção ou radiação podem resultar em uma análise não linear que requer um processo iterativo. Como visto anteriormente na seção 2.6, no presente trabalho foi realizada uma análise não linear.

As unidades utilizadas para a entrada de dados no programa foram configuradas para atenderem o sistema internacional, com exceção da temperatura cuja unidade utilizada foi graus Celsius [$^{\circ}\text{C}$].

3.1 PROPRIEDADES DOS MATERIAIS

Como o enfoque deste trabalho é a análise térmica transiente, foram definidas as propriedades térmicas do concreto e do aço necessárias para a obtenção do campo de

temperaturas. Sendo elas a massa específica, a condutividade térmica e o calor específico. Os valores adotados estão em conformidade com a Eurocode 4 Part 1-2 1994 e a ABNT NBR 14323:2013 como descrito no capítulo anterior.

A interface do software *ANSYS Workbench*, ilustrada na figura 27 permite a entrada de dados em forma de tabelas contendo no máximo 100 linhas. Devido a essa limitação foi criada uma tabela contendo os valores das propriedades dos materiais variando de 20°C até 1200°C, com incrementos de 10°C até o valor de 800°C e com incrementos de 20°C entre os valores de 800°C e 1200°C. Com a exceção da massa específica do aço a qual, segundo a ABNT NBR 14323:2013, pode ser considerada independente da temperatura e igual a 7.850 kg/m³.

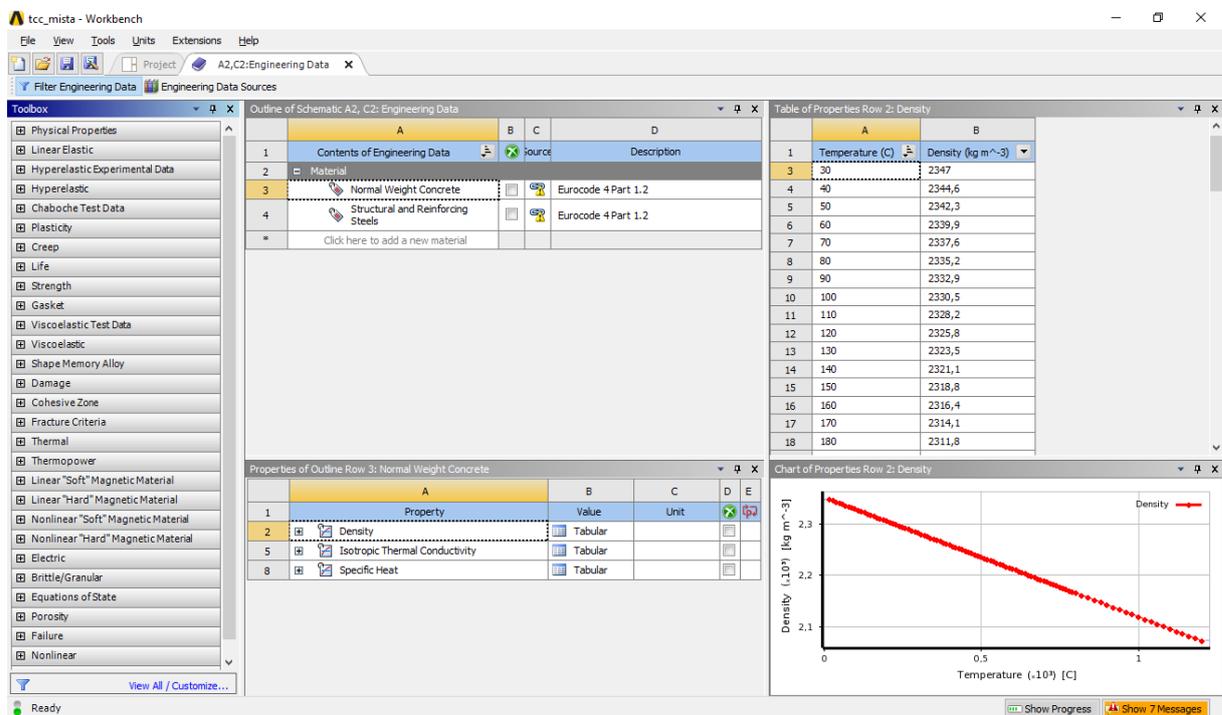


Figura 27: Interface dos dados de engenharia no software ANSYS Workbench.

Os valores das propriedades do concreto devido a variação da temperatura são apresentadas nas figuras 28, 29 e 30, sendo respectivamente, a variação da massa específica, a variação da condutividade térmica e a variação do calor específico. Os valores foram adotados conforme as equações apresentadas na seção 2.6.

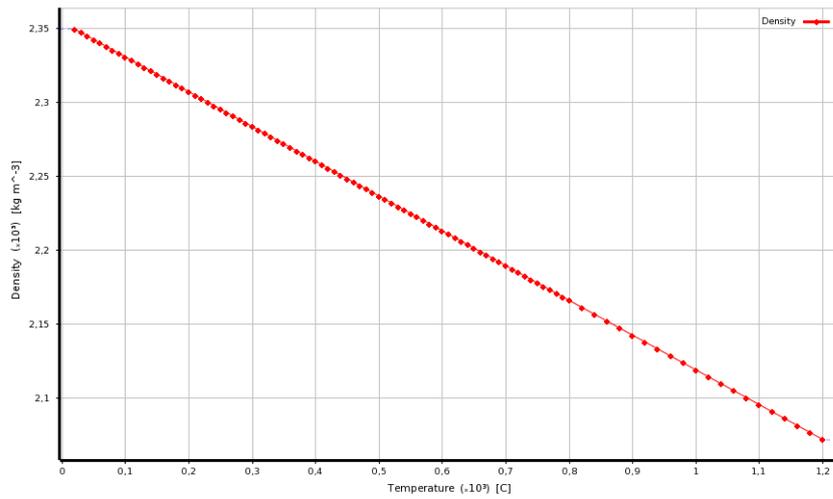


Figura 28: Variação da massa específica do concreto devido a variação de temperatura.

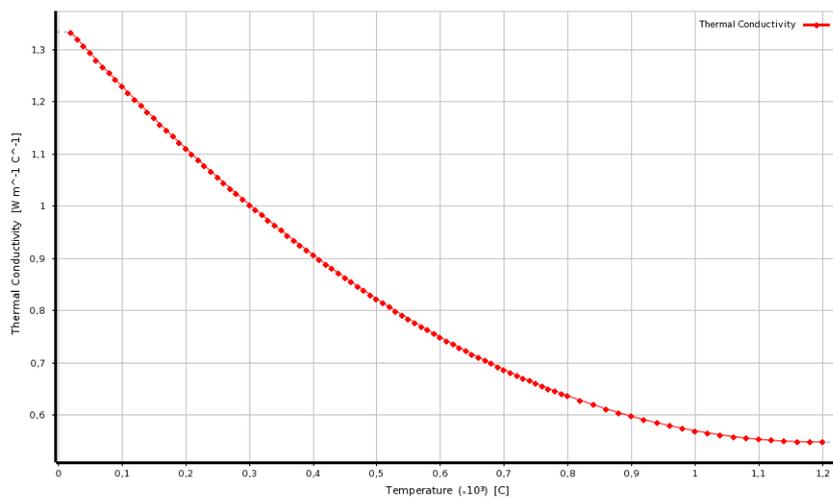


Figura 29: Variação da condutividade térmica do concreto devido a variação de temperatura.

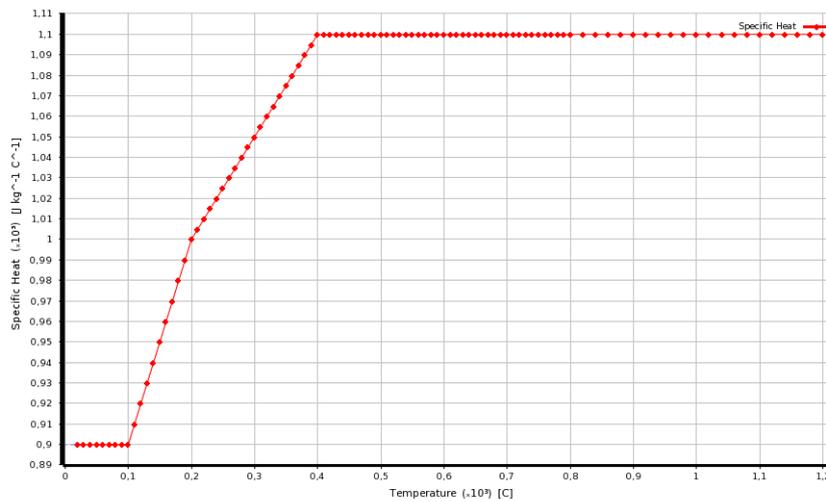


Figura 30: Variação do calor específico do concreto devido a variação de temperatura.

Os valores das propriedades do aço devido a variação da temperatura são apresentadas nas figuras 31 e 32, sendo respectivamente, a variação da condutividade térmica e a variação do calor específico. Os valores foram adotados conforme as equações apresentadas na seção 2.6.

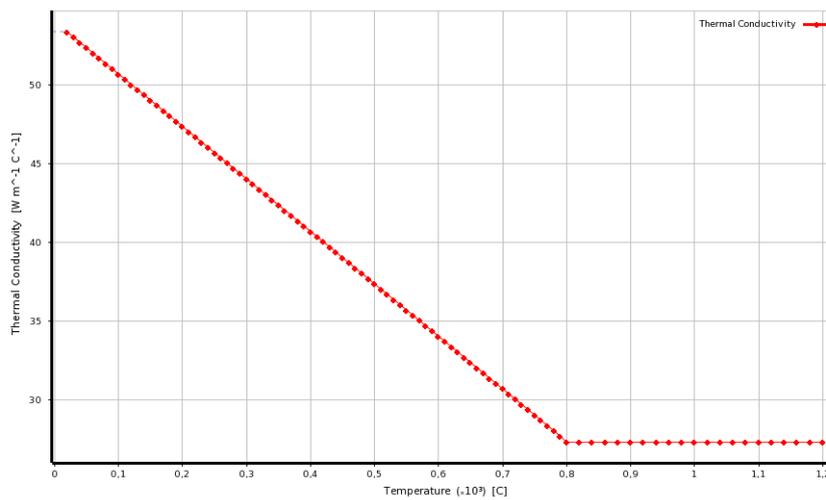


Figura 31: Variação da condutividade térmica do aço devido a variação de temperatura.

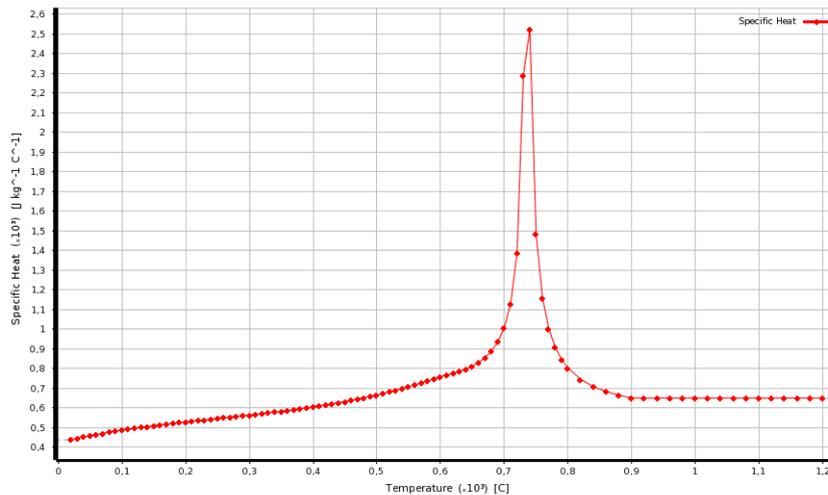


Figura 32: Variação do calor específico do aço devido a variação de temperatura.

3.2 GEOMETRIA

Na confecção da geometria proposta, esquematizada na figura 33, foi tomado como base o ensaio de caracterização do conector de cisalhamento proposto por Tristão (2002). Foi utilizado o software *ANSYS DesignModeler 16.0*, o qual a interface é apresentado na figura 34. É possível utilizar outros softwares do tipo CAD (*Computer aided design* - Desenho assistido por computador) para confeccionar a geometria do modelo, como por exemplo *AutoCad*, *BladeGen* e *SolidWorks*. Porém foi dada preferência ao *DesignModeler*, que faz parte do pacote computacional *ANSYS*, a fim de evitar possíveis incompatibilidade que podem surgir ao importar a geometria de softwares de outras desenvolvedoras. O resultado dos processos descritos a seguir é apresentado na figura 35.

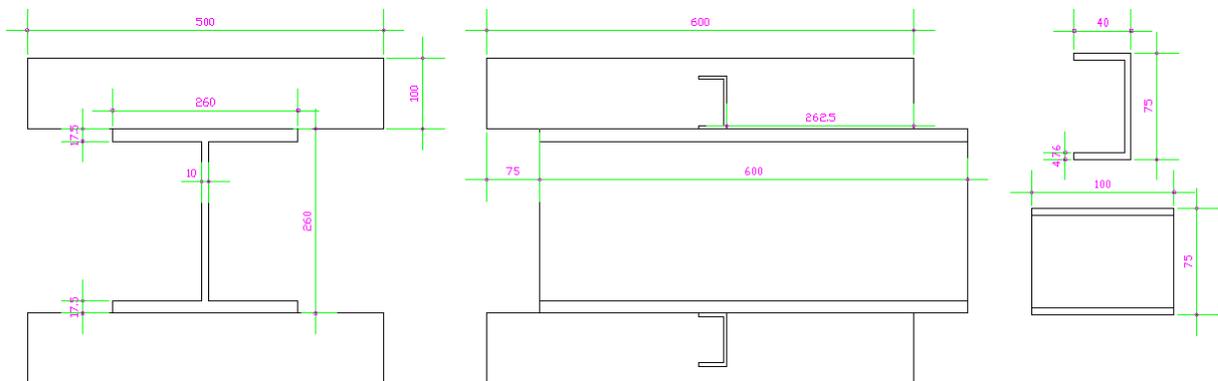


Figura 33: Geometria proposta, unidades em milímetros.

A primeira parte desenhada foi a viga. O software possibilita a criação de várias tipos

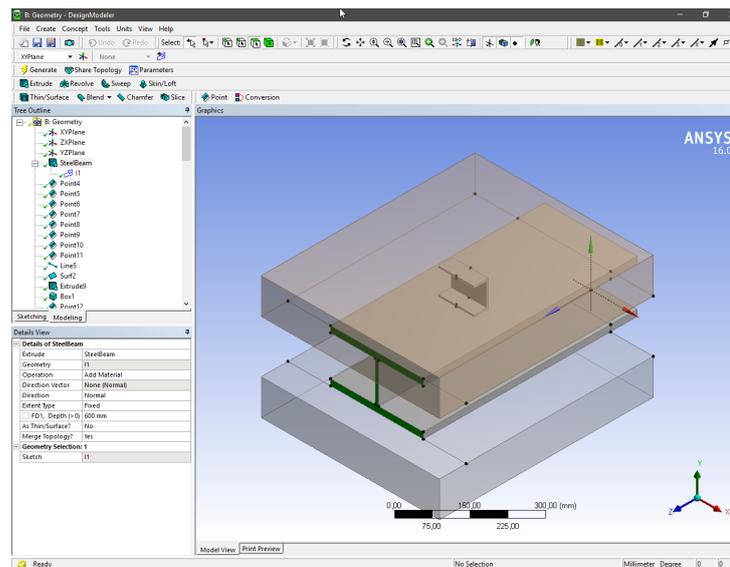


Figura 34: Interface do software *ANSYS DesignModeler 16.0*.

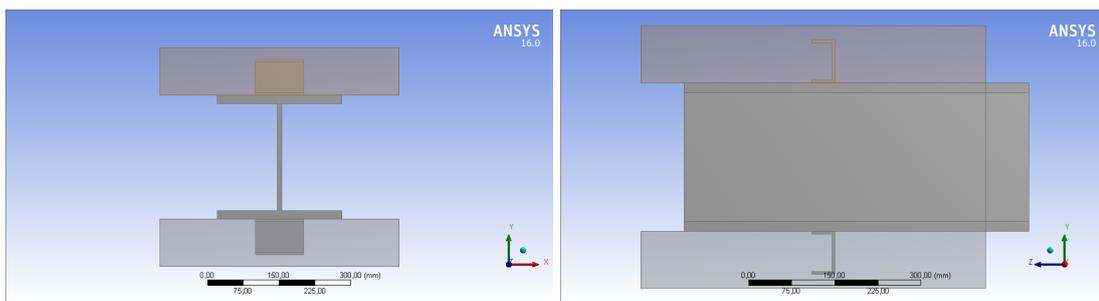


Figura 35: Geometria do modelo.

de seções transversais (*cross section*). Adicionada a seção transversal ao desenho basta editar as propriedades dessa seção, que contém os parâmetros que caracterizam as dimensões das seções. Utilizando-se dessa ferramenta, foi adicionado ao desenho uma seção transversal de perfil I. Seções transversais de perfil I contém 6 parâmetros de dimensões W_1 , W_2 , W_3 , t_1 , t_2 e t_3 . As duas primeiras dimensões referem-se a comprimento da mesa inferior e ao comprimento da mesa superior. A dimensão W_3 refere-se a altura total da seção transversal. As dimensões t_1 e t_2 referem-se as espessuras das mesas inferior e superior. Por fim, a dimensão t_3 refere-se a espessura da alma da seção. O desenho da seção e os valores adotados para cada parâmetro são apresentados na figura 36.

Após criada a seção transversal da viga, foi realizada uma extrusão (*extrude*) da seção. No software é possível atribuir uma geometria às propriedades da extrusão. Logo, foi atribuído a seção transversal criada anteriormente e realizado uma extrusão com profundidade de 600mm, resultando no formato apresentado na figura 37.

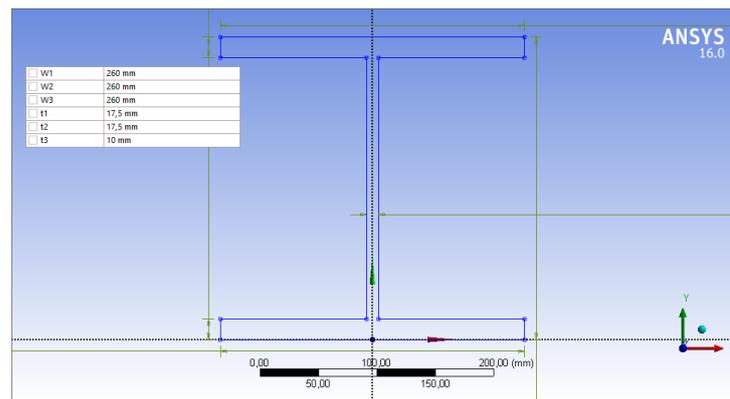


Figura 36: Seção transversal perfil I e parâmetros adotados.

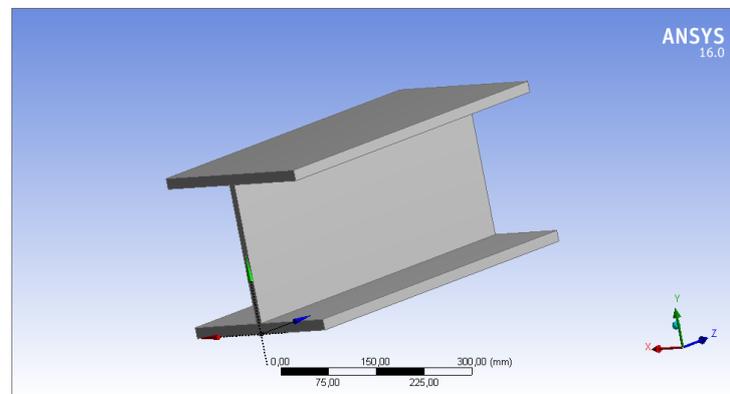


Figura 37: Formato da viga de aço.

Os conectores de cisalhamento foram desenhados utilizando pontos de construção. Foram criados 8 pontos para cada conector. Esses pontos consistem nos vértices da seção transversal do conector, localizada no seu centro. As coordenadas de cada ponto foram inseridas manualmente. Logo após, foi criado uma superfície (*surf*), atribuindo como propriedade de vértices os oito pontos criados. Por último, de forma análoga ao que foi feito na construção da viga, foi realizada uma extrusão dessa superfície. O processo de construção dos conectores de cisalhamento é apresentado na figura 38. A forma da geometria após esse processo é ilustrada na figura 39.

Ambas as lajes foram desenhadas utilizando a ferramenta caixa (*box*). Uma caixa pode ser definida por dois pontos que representam dois vértices opostos da caixa. Logo, para desenhar as lajes, foi necessário adicionar as coordenadas de dois vértices opostos nas propriedades de uma caixa. Foram criadas duas caixas, uma para a laje superior, ilustrada na figura 40, e outra para a laje inferior, ilustrada na figura 41.

Por fim as faces foram divididas para que, posteriormente, as variações de temperaturas

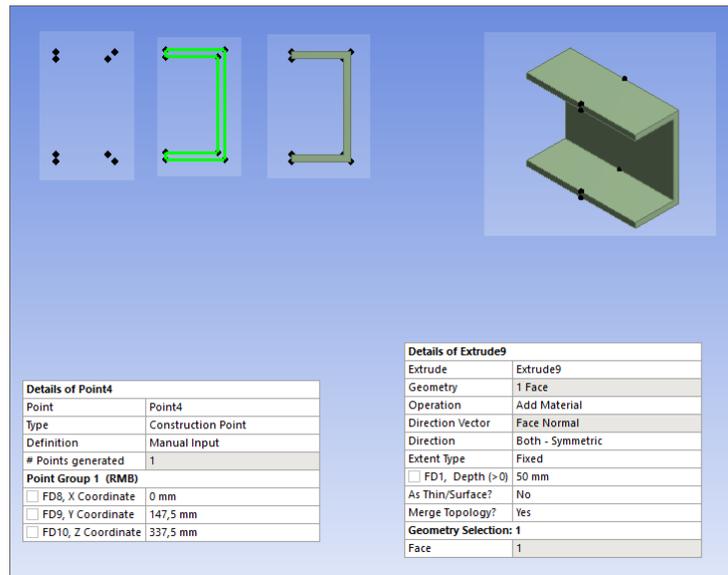


Figura 38: Processo de construção dos conectores de cisalhamento.

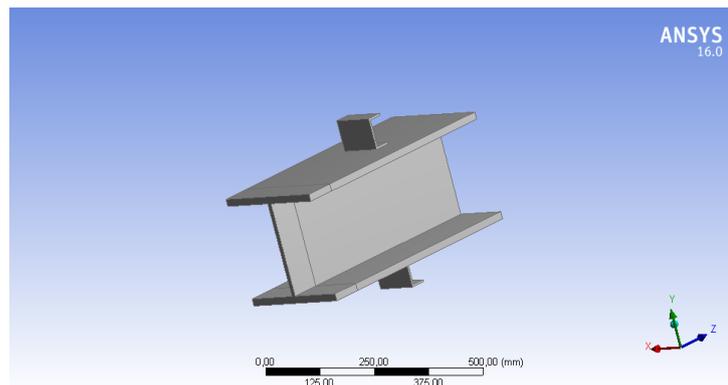


Figura 39: Viga e conectores de cisalhamento.

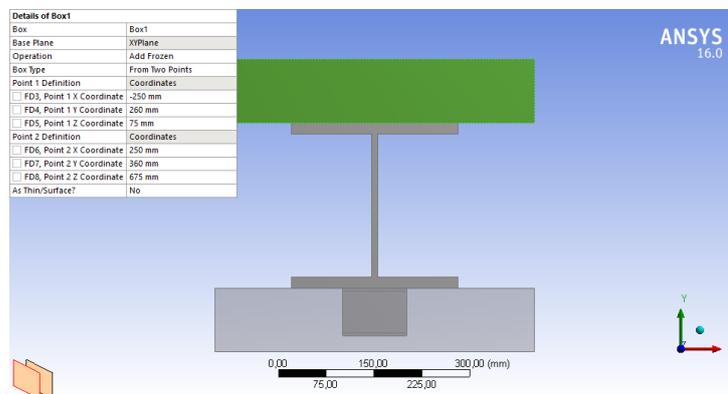


Figura 40: Desenho da laje superior e parâmetros adotados.

possam ser inseridas. Esse seccionamento foi realizado de modo que as áreas em que existe

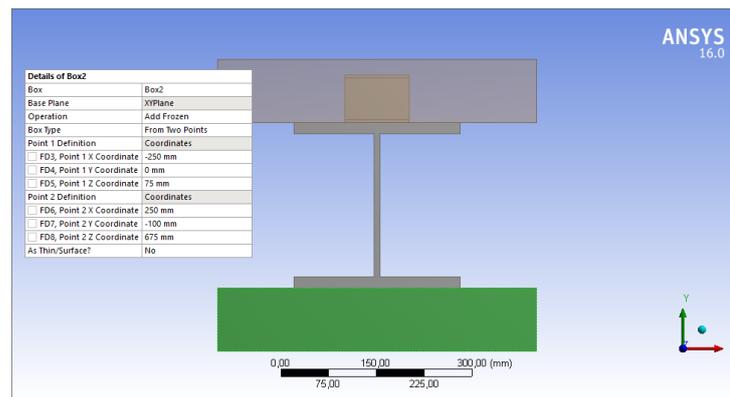


Figura 41: Desenho da laje inferior e parâmetros adotados.

o contato entre o aço e o concreto, que irão receber a variação de temperatura, possam ser selecionadas individualmente como apresentado na figura 42.

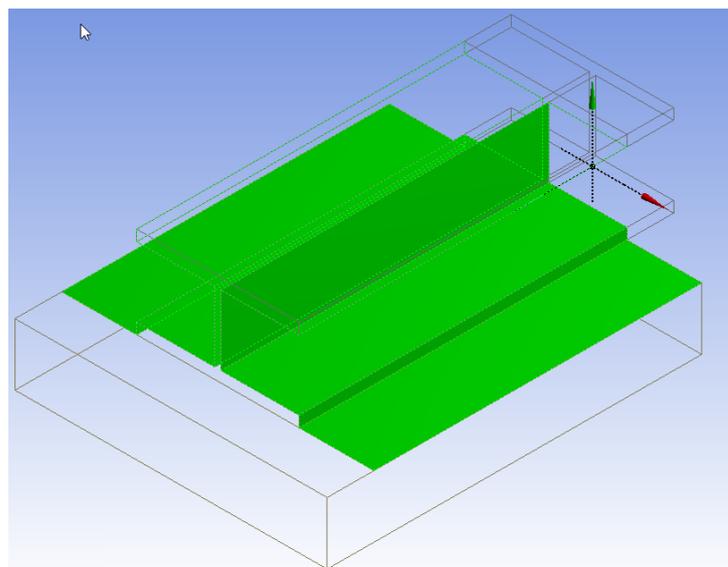


Figura 42: Seccionamento da geometria.

3.3 CONFIGURAÇÕES DA ANÁLISE TÉRMICA TRANSIENTE

Para a realização da análise térmica transiente o programa foi configurado para executar 60 passos. Cada passo representa 60 segundos, totalizando o total de 3600 segundos de simulação. O software subdivide esses passos automaticamente, sendo o menor incremento dessa subdivisão 0,06 segundos, e o maior incremento 6 segundos.

Além disso, foi configurada a temperatura inicial do ambiente, tomada como 20°C, e introduzidos quatro carregamentos. Dois carregamentos que simulam a troca de calor por

convecção e dois carregamentos que simulam a troca de calor por radiação. Especificamente um par, convecção e radiação, para simular a ação do incêndio e outro par para simular a troca de calor para o ambiente. O par de ações que simula o efeito do incêndio foi aplicado na área da superfície que estaria exposta a ação térmica no caso de um sinistro, ilustrado na figura 43. E o par de ações que simula a troca de calor para o ambiente foi aplicado na maior face de cada laje que não está em contato com a viga de aço, ilustrado na figura 44.

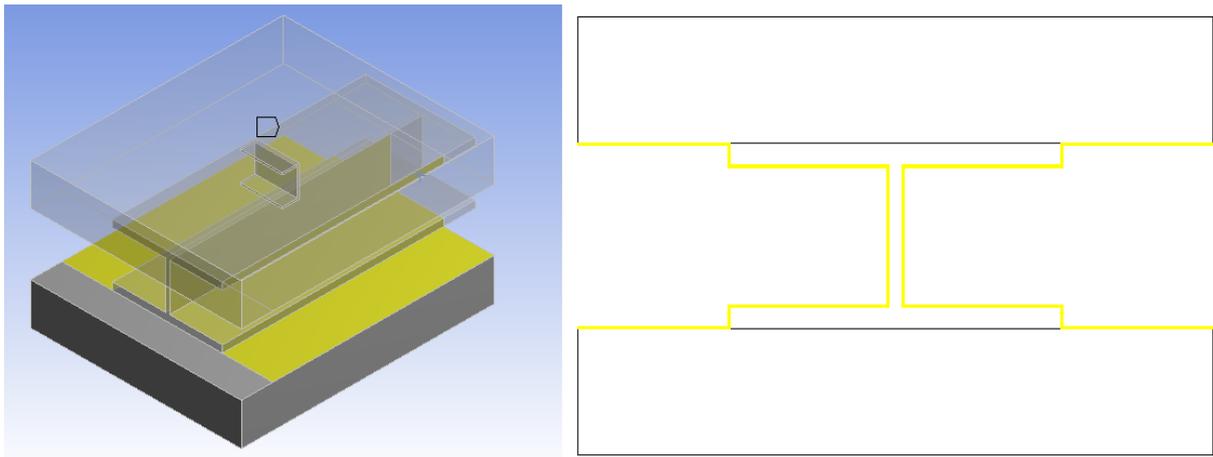


Figura 43: Superfície exposta ao incêndio em amarelo.

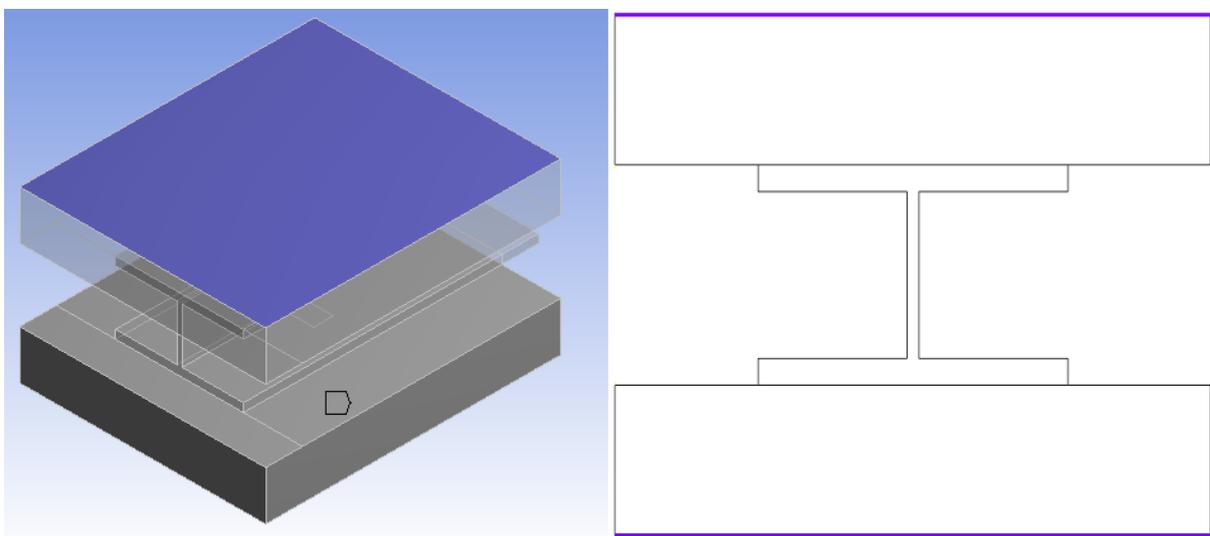


Figura 44: Superfície de troca de calor com o ambiente em azul.

As variáveis desses carregamentos foram definidas com base na norma estrangeira pertencente ao *European Committee for Standardization* denominada *Eurocode 1: Actions on structures—Part 1-2: General actions—Actions on structures exposed to fire*. O coeficiente da transferência de calor e a temperatura ambiente são as variáveis do carregamento que simula a troca de calor por convecção. Na superfície exposta ao incêndio, o valor do coeficiente foi

tomado como $25 \text{ W/m}^2\text{°C}$ e a temperatura ambiente variou com o tempo simulado seguindo a curva de incêndio padrão representada na equação 6. Já na superfície que simula a troca de calor para o ambiente o coeficiente foi tomado como $4 \text{ W/m}^2\text{°C}$ e a temperatura ambiente foi fixada como 20°C .

Para os carregamentos que simulam a transferência por radiação as variáveis são o fator de emissividade e a temperatura ambiente. A temperatura ambiente foi definida do mesmo modo descrito para a convecção e o fator de emissividade foi tomado como 0,7.

Vale ressaltar que a transferência de calor por condução também é simulada. As variáveis desse carregamento são as propriedades dos materiais que fornecidas ao programa, como descrito na seção 3.1.

3.4 TESTE DE CONVERGÊNCIA DO MODELO

Esse é o processo no qual a geometria é discretizada em elementos e nós. A malha, juntamente com as propriedades do material, é usada para representar matematicamente a rigidez e a distribuição de massa da estrutura. O software *ANSYS* realiza a confecção da malha do modelo automaticamente durante a resolução. Dois elementos finitos foram selecionados pelo programa, um tetraédrico com 10 nós e outro hexaédrico com 20 nós. O tamanho padrão dos elementos são determinados com base em uma série de fatores, incluindo o tamanho geral do modelo, a proximidade entre as topologias, a curvatura do corpo, e a complexidade do modelo. Se necessário, a malha é refinada durante o processo para que ocorra a convergência do modelo.

Numa primeira análise, foi utilizado os parâmetros padrões do software para a solução de problemas de natureza mecânica, resultando em uma malha contendo 41.323 nós e 10.474 elementos, ilustrada na figura 45¹.

Contudo, o modelo convergiu apenas aos 716 segundos do tempo de incêndio simulado, demonstrado na figura 46. Como a temperatura ambiente inicia em 20°C o modelo não deveria apresentar temperaturas inferiores. Porém como dito anteriormente o software refina a malha durante o processo para que ocorra a convergência do modelo. Por esse motivo, essa parcela, onde ocorre temperaturas inferiores à temperatura inicial, deve ser descartada da análise.

Consequentemente, foi necessário realizar um refino da malha, para diminuir o erro

¹A laje superior foi suprimida da figura, possibilitando melhor visualização da malha principalmente na região do conector

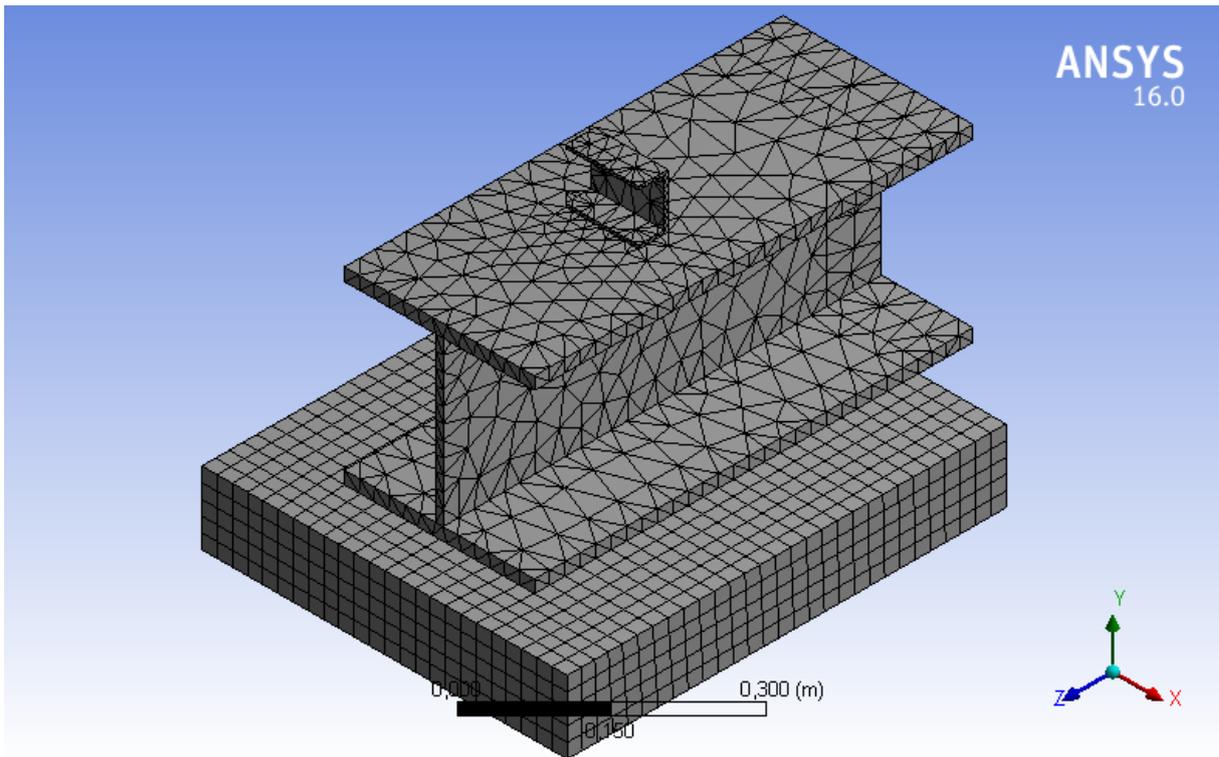


Figura 45: Malha com 41.598 nós e 10.638 elementos.

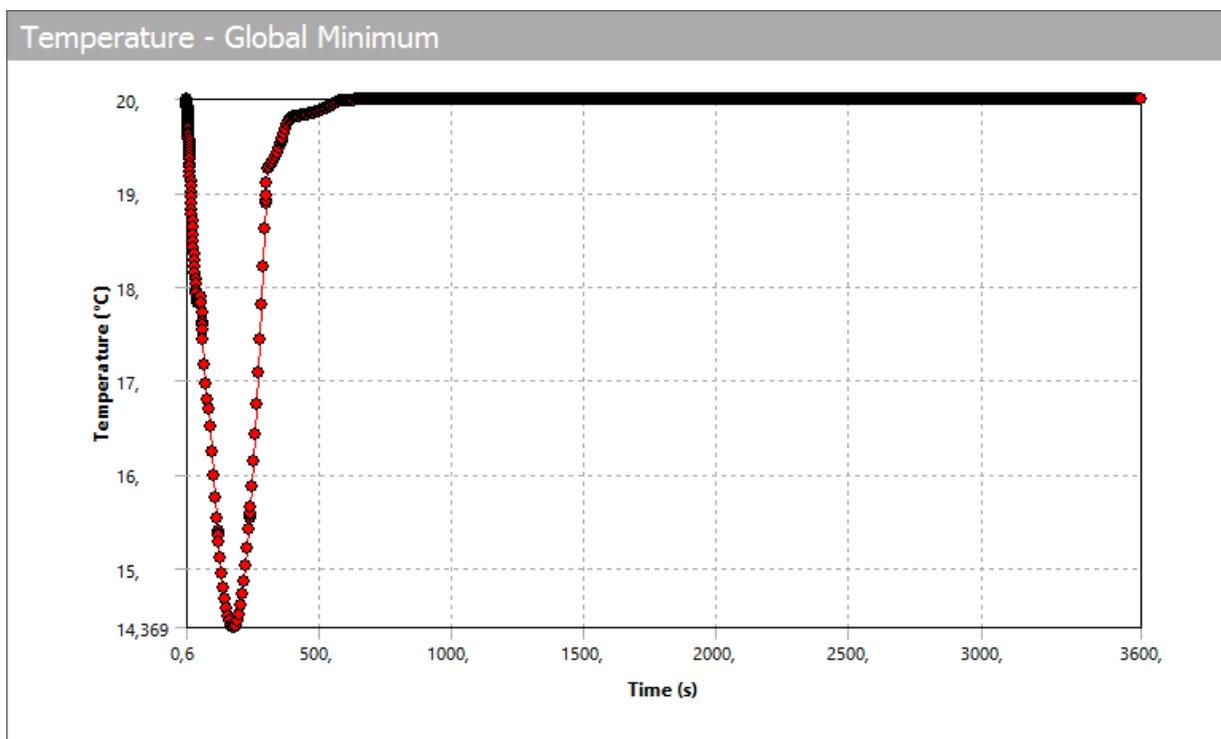


Figura 46: Temperatura mínima global, modelo converge em 710 segundos.

no valor do campo térmico. Para tal foi modificado o parâmetro relevância (*relevance*) das propriedades da malha. O parâmetro relevância permite controlar a densidade da malha no modelo. Pode-se indicar uma preferência por alta velocidade de processamento, diminuindo o parâmetro, ou uma preferência por maior acurácia nas soluções, aumentando o parâmetro. Quando mais fina, ou densa, é a malha maior é a acurácia do modelo, porém, maior será o tempo de processamento demandado. O valor padrão do parâmetro relevância é 0 e foi modificado para 100, seu valor máximo.

Com a nova configuração foi obtido uma malha formada por 191.333 nós e 50.178 elementos, apresentada na figura 47. Nessa configuração o modelo convergiu aos 255 segundos da simulação como pode ser observado na figura 48. Como o tempo total simulado foi de 3600 segundos considerou-se que esse novo modelo é satisfatório para a análise.

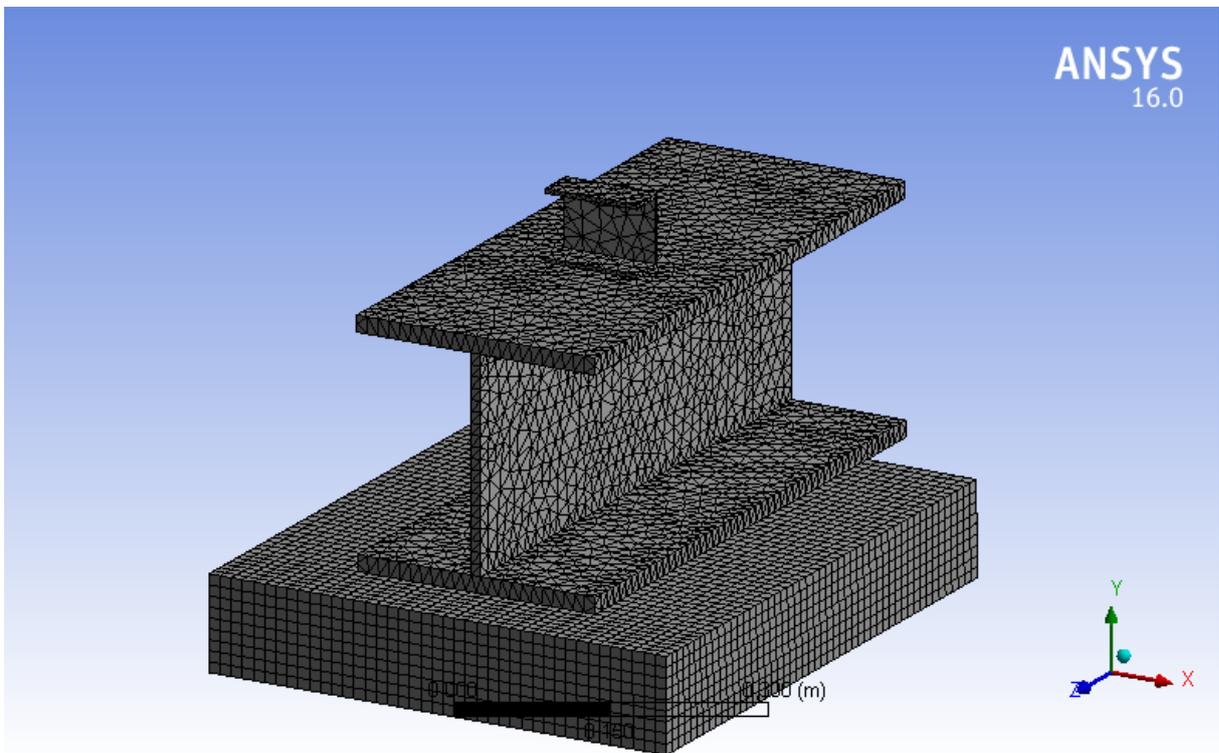


Figura 47: Malha com 191.846 nós e 50.743 elementos.

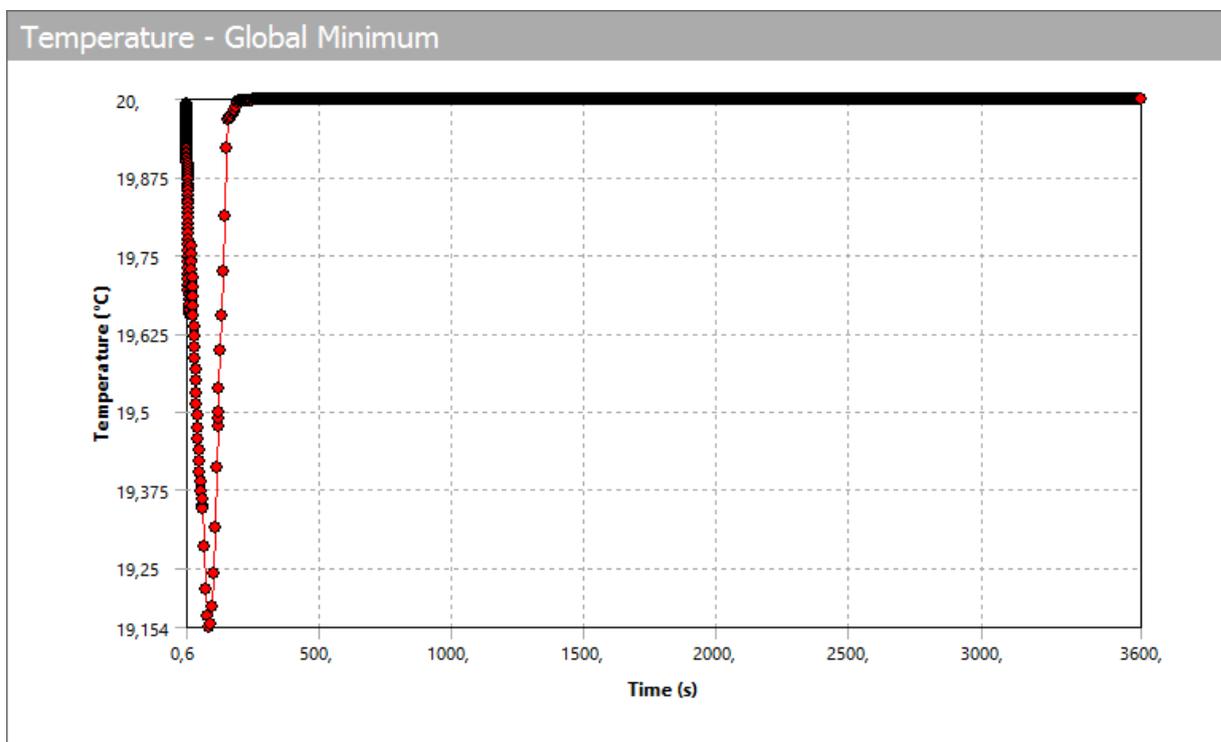


Figura 48: Temperaturas mínima global após ajustes na malha.

4 RESULTADOS

Neste capítulo são apresentados os resultados obtidos por meio de simulação numérica com a utilização do programa *ANSYS Workbench 16.0*. Os resultados consistem basicamente da determinação da evolução da temperatura, considerando as temperaturas máximas e mínimas, e do campo de temperatura obtido nos elementos, viga e lajes, quando submetidos à exposição da curva de incêndio padrão, equação 6.

A determinação do Tempo Requerido de Resistência ao Fogo (TRRF), segundo a norma brasileira ABNT NBR 14432:2001, depende de particularidades da edificação como o tipo de uso ou ocupação, altura da edificação e profundidade do subsolo. Tais particularidades não são tratadas no presente trabalho. Por isso, foi tomada a liberdade de se adotar um TRRF de 60 minutos de exposição ao incêndio-padrão.

4.1 SIMULAÇÃO NUMÉRICA

Os resultados globais do modelo, obtidos via modelo numérico, são apresentados nas figuras 50 e 51. Na figura 50 estão apresentados as curvas de temperatura global máxima, de temperatura global mínima e a curva de incêndio-padrão. O campo de temperaturas correspondente a um TRRF de 60 minutos de exposição ao incêndio-padrão pode ser observado na figura 51. A temperatura global mínima ficou próxima à temperatura ambiente inicial de 20°C , tendo o pico de 37°C . A região onde ocorreu as menores temperaturas na simulação foi o extremo da face da laje de concreto de maior área que não foi exposta ao incêndio-padrão. Vale ressaltar que nessa região foi simulada a perda de calor para o ambiente. Já as maiores temperaturas foram localizada na alma da viga de aço. Também é possível perceber que o comportamento da curva de temperatura máxima global assemelhou-se à curva de incêndio-padrão.

As ações térmicas e o campo de temperaturas referente ao concreto são apresentados nas figuras 52 e 53. Na figura 52 estão apresentadas as curvas de temperatura máxima, de temperatura mínima e a curva de incêndio-padrão. O campo de temperaturas correspondente

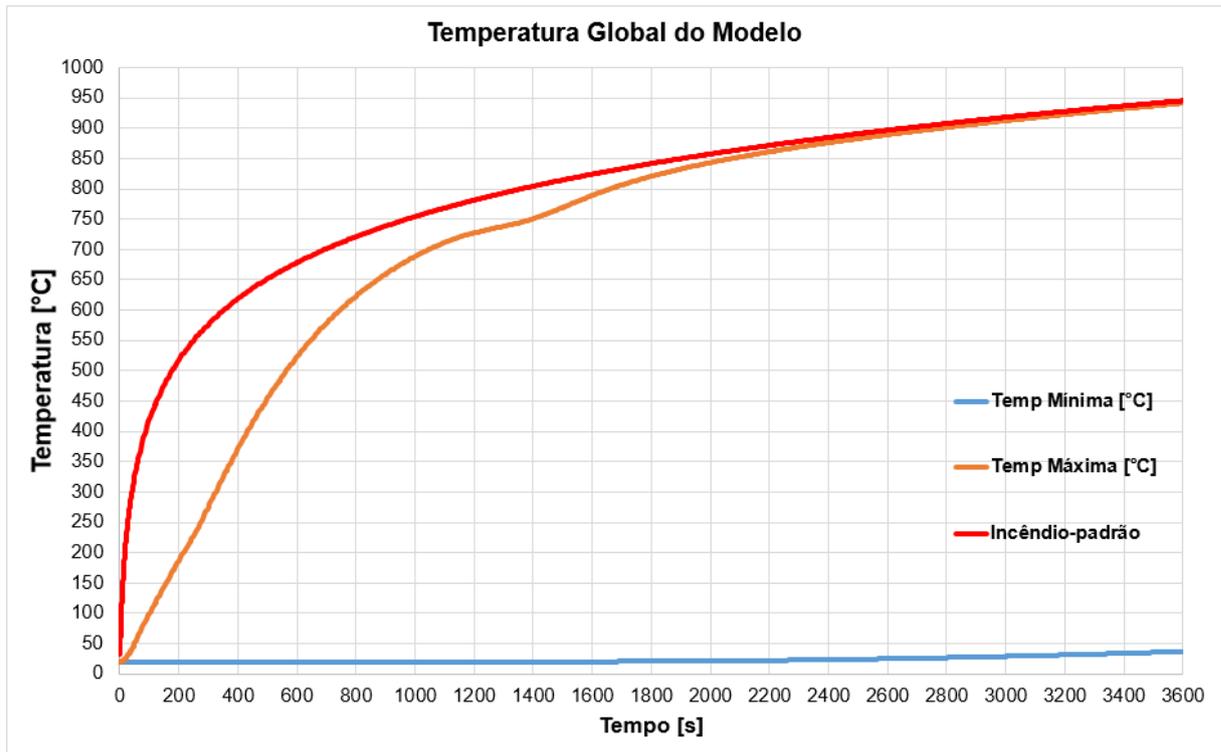


Figura 50: Curvas da evolução da temperatura global do modelo versus tempo.

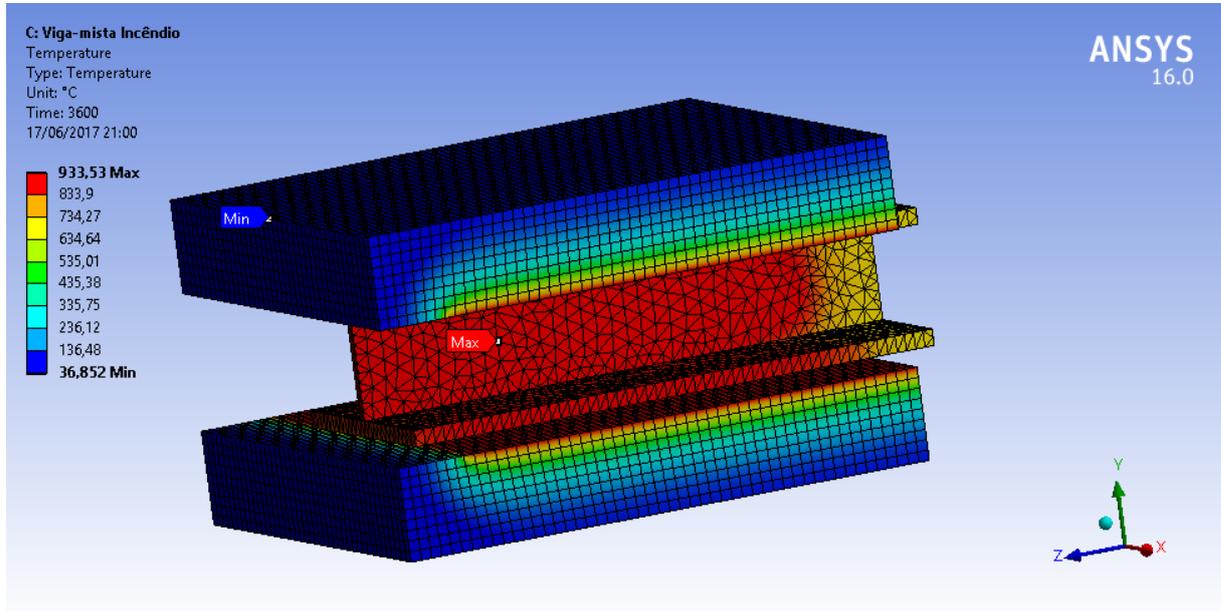


Figura 51: Campo de temperaturas correspondente a um tempo (TRRF) de 60 minutos.

a um TRRF de 60 minutos de exposição do concreto ao incêndio-padrão pode ser observado na figura 53. Observa-se uma grande variação entre as temperaturas máximas e temperaturas mínimas. As temperaturas máximas ocorrem na região exposta ao incêndio padrão, atingindo

897 °C no tempo de simulação de 60 minutos. Já as temperaturas mínimas variam pouco e ficam em torno da temperatura ambiente inicial do modelo, atingindo o máximo de 37°C aos 60 minutos. Essa diferença de temperatura entre a área exposta ao incêndio-padrão e área que perde calor para o ambiente é justificada pela baixa capacidade do concreto de transferir calor por meio de condução.

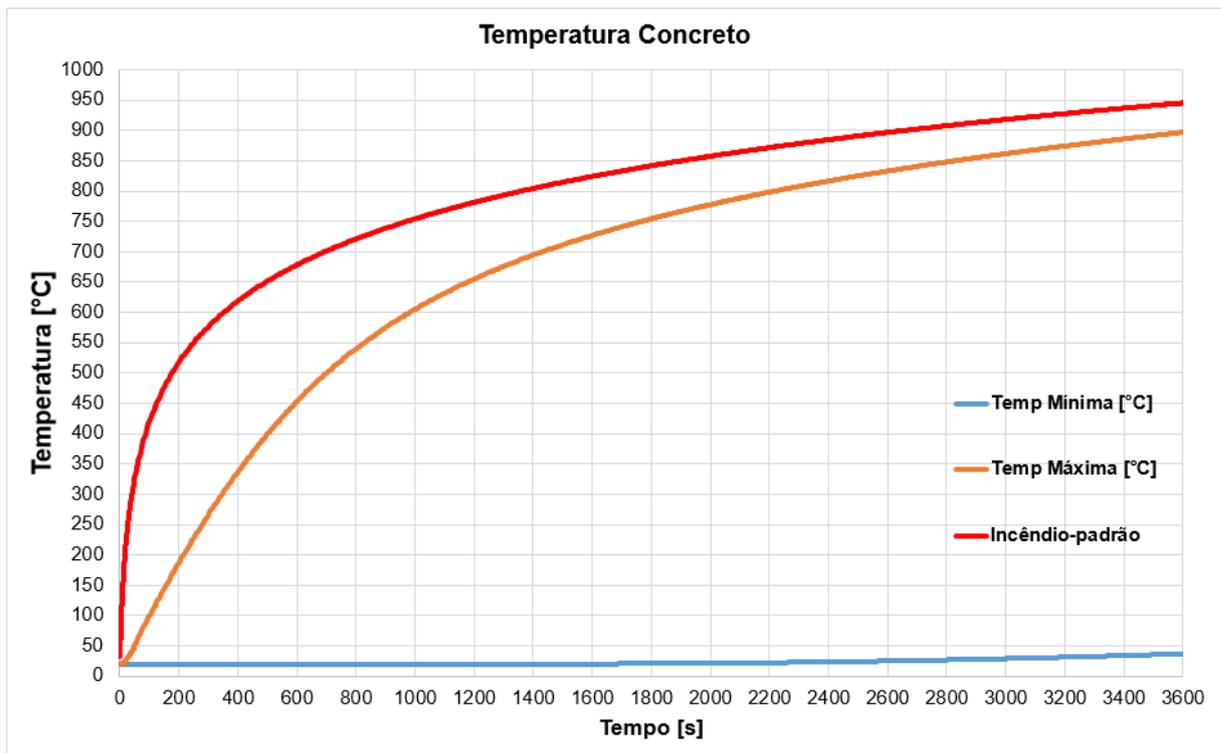


Figura 52: Curvas da evolução da temperatura do concreto versus tempo.

As ações térmicas e o campo de temperaturas referente ao aço são apresentados nas figuras 54 e 55. Na figura 54 estão apresentadas as curvas de temperatura máxima, de temperatura mínima e a curva de incêndio-padrão. O campo de temperaturas correspondente a um TRRF de 60 minutos de exposição do aço ao incêndio-padrão pode ser observado na figura 55. É possível observar que as maiores temperaturas ocorrem na alma da viga, enquanto as menores ocorrem na extremidade do conector de cisalhamento.

As ações térmicas e o campo de temperaturas referente ao conector de cisalhamento são apresentados nas figuras 56 e 57. Na figura 56 estão apresentadas as curvas de temperatura máxima, de temperatura mínima e a curva de incêndio-padrão. O campo de temperaturas correspondente a um TRRF de 60 minutos de exposição do aço ao incêndio-padrão pode ser observado na figura 57. É possível observar que as maiores temperaturas ocorrem na região do conector em contato com a viga, enquanto as menores ocorrem na extremidade do conector de cisalhamento embutida no concreto.

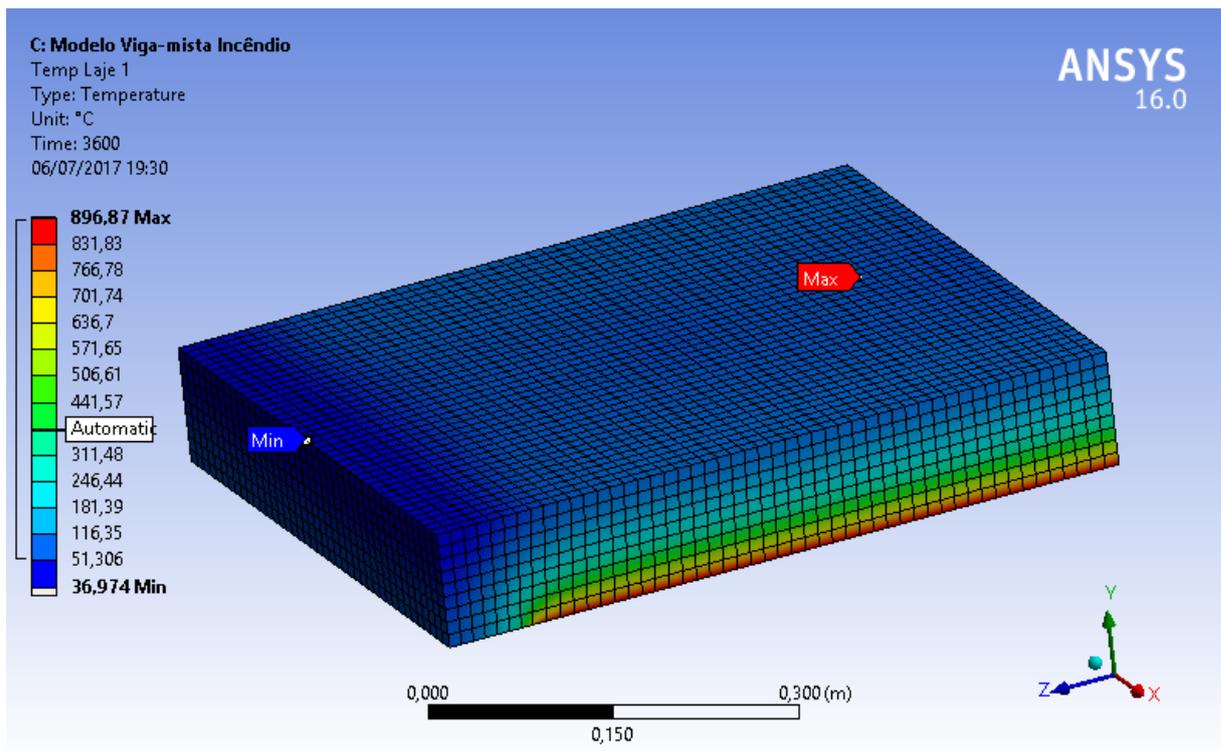


Figura 53: Campo de temperaturas do concreto correspondente a um tempo (TRRF) de 60 minutos.

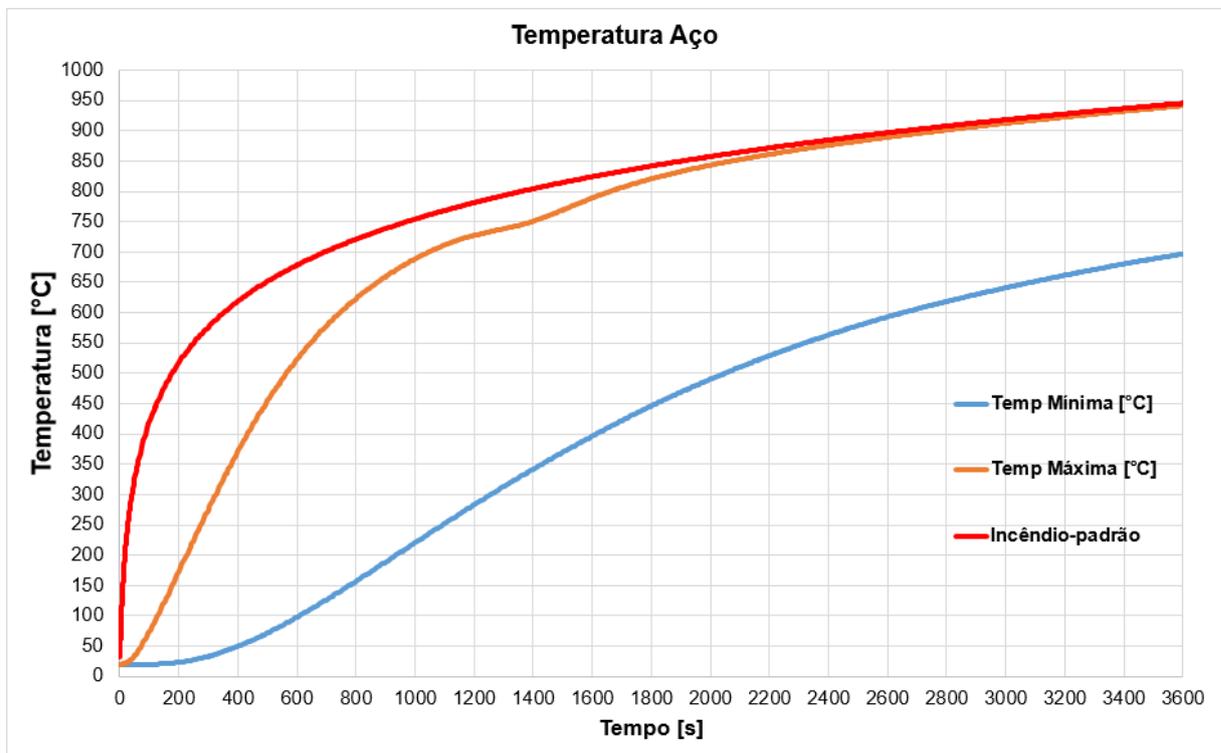


Figura 54: Curvas da evolução da temperatura do aço versus tempo.

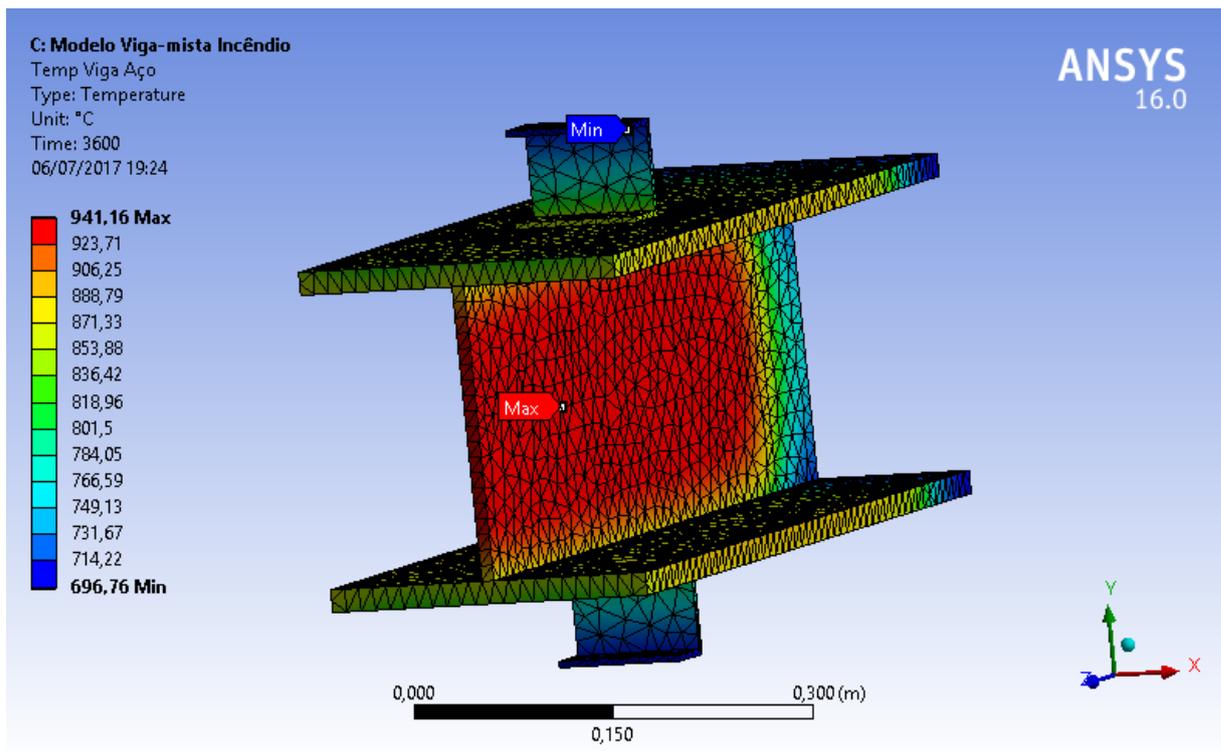


Figura 55: Campo de temperaturas do aço correspondente a um tempo (TRRF) de 60 minutos.

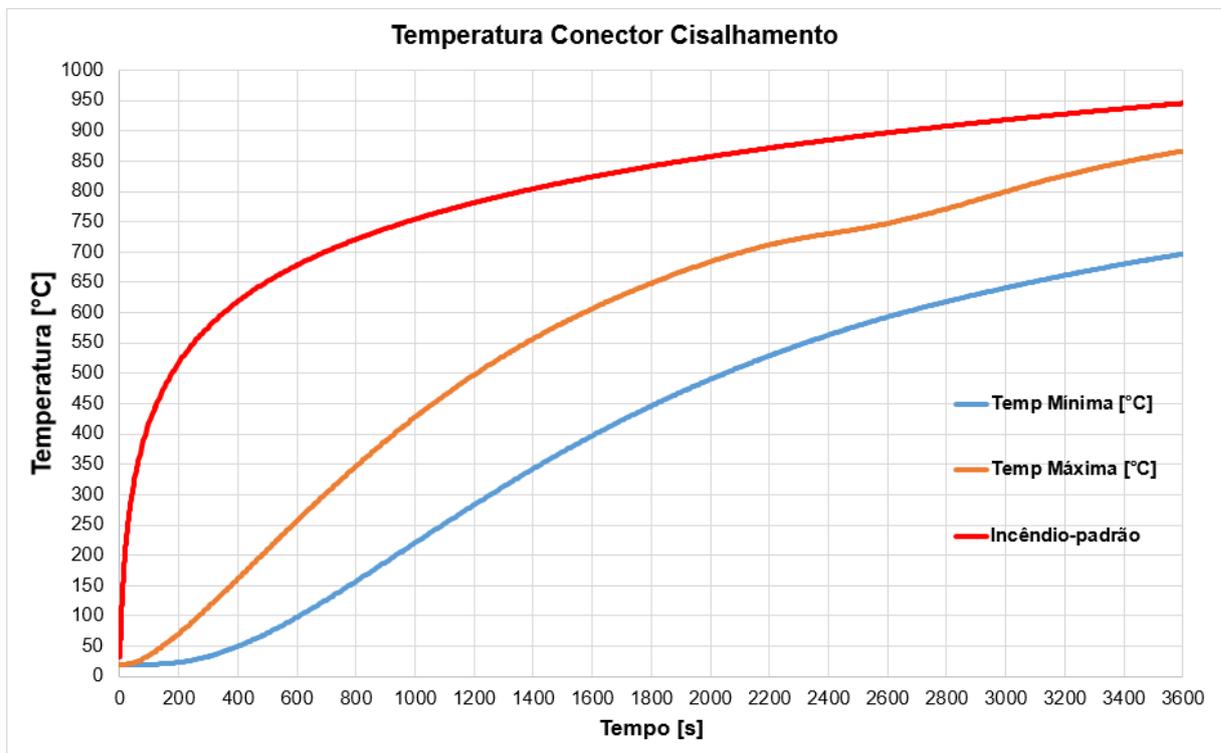


Figura 56: Curvas da evolução da temperatura do conector de cisalhamento versus tempo.

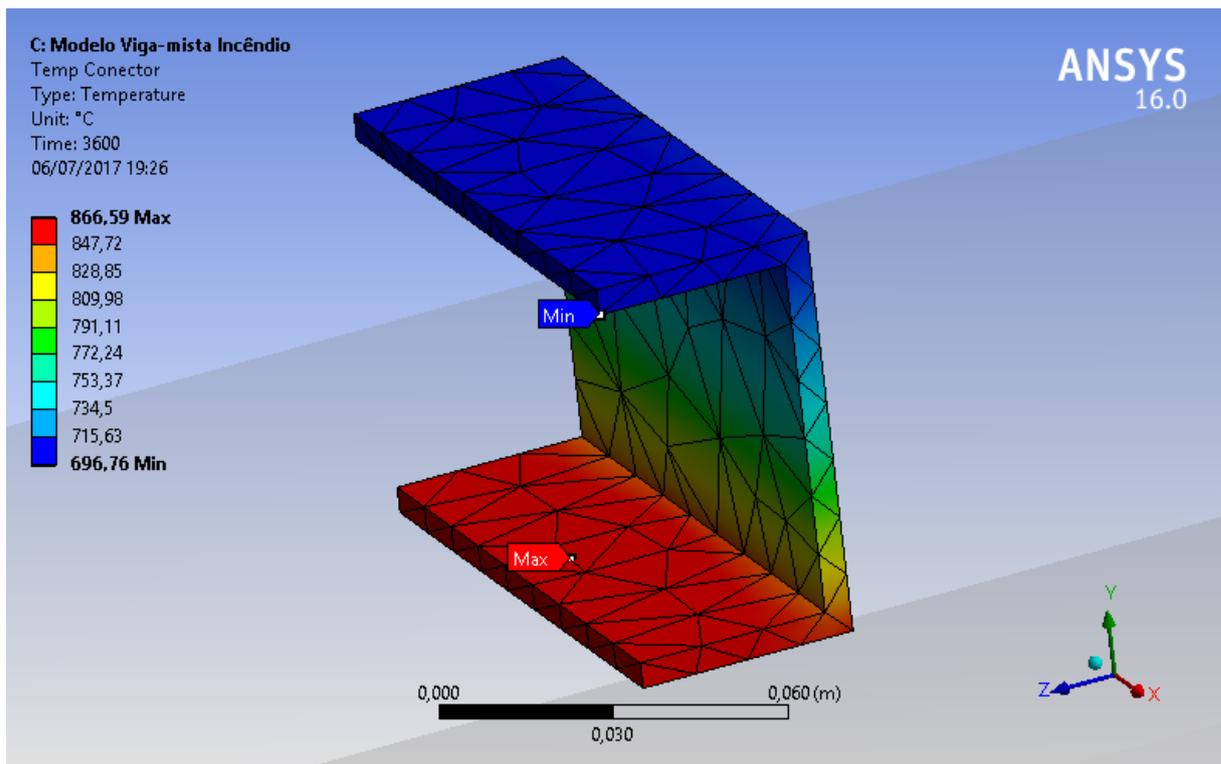


Figura 57: Campo de temperaturas do conector de cisalhamento correspondente a um tempo (TRRF) de 60 minutos.

A figura 58 apresenta a comparação das curvas de temperatura obtidas em dois pontos pertencentes interface entre a viga de aço e a laje de concreto. Foi selecionado dois pontos próximos, um pertencente à viga de aço e um outro pertencente à laje de concreto. Nota-se uma boa aproximação entre os valores obtidos, sendo a maior diferença de 0,22 °C aos 620 segundos.

A figura 59 apresenta a comparação das curvas de temperatura obtidas em dois pontos pertencentes interface entre o conector de cisalhamento e a laje. Foi selecionados dois pontos próximos, um pertencente ao conector de cisalhamento e outro pertencente à laje. Nota-se uma boa aproximação entre os valores obtidos, sendo a maior diferença de 0,08 °C aos 300 segundos.

4.2 COMPARAÇÃO DO MÉTODO NUMÉRICO COM O MÉTODO SIMPLIFICADO

Na figura 60 têm-se a comparação entre os resultados obtidos via o programa ANSYS e os obtidos por meio do modelo simplificado de cálculo da norma ABNT NBR 14323:2013, descrito na seção 2.7. O modelo simplificado foi elaborado considerando um perfil I de aço cujas mesas estão sobrepostas por lajes maciças e seguindo as dimensões apresentadas na figura 33. Os valores dos fatores de massividades adotados para a mesa e para a alma do perfil são,

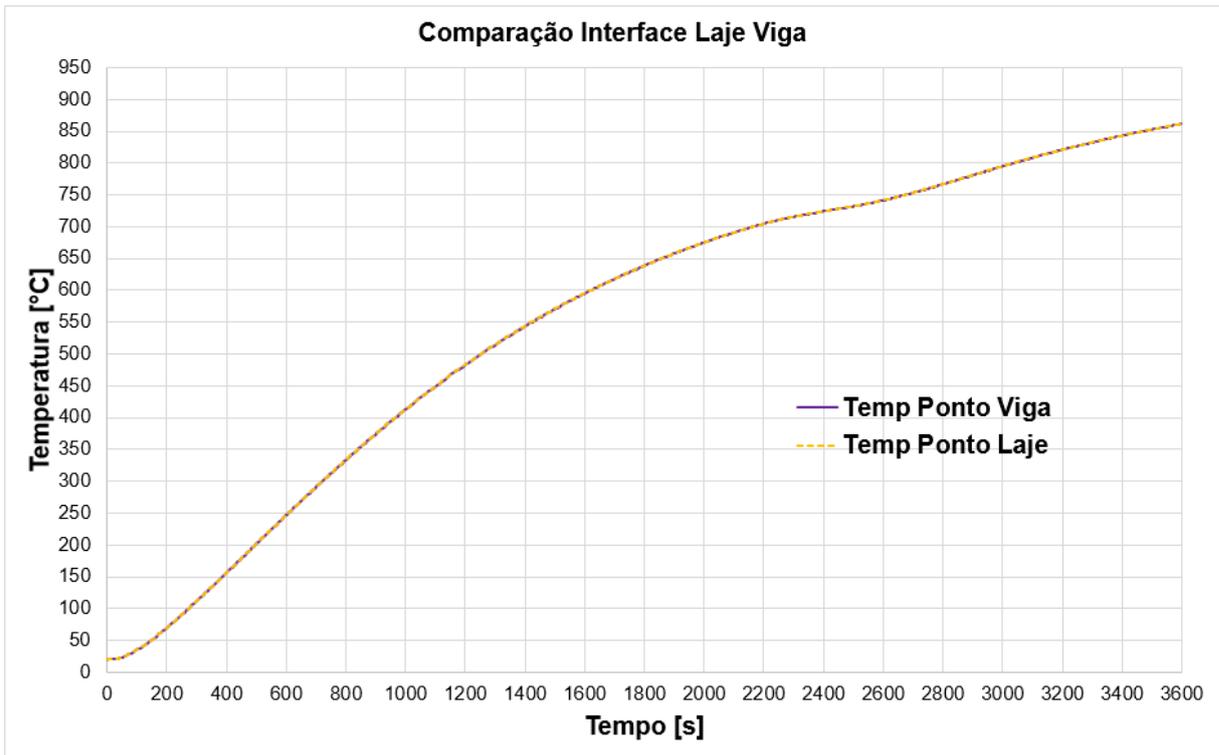


Figura 58: Comparação de valores na interface entre a viga de aço e a laje de concreto.

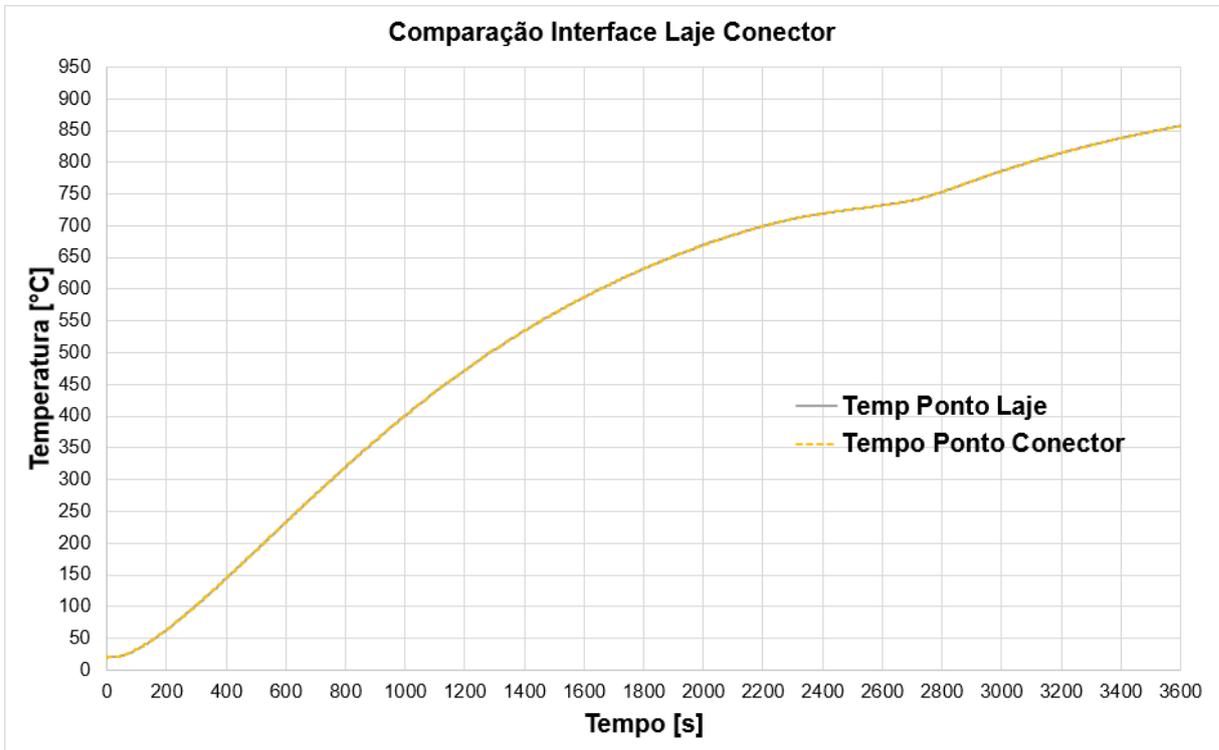


Figura 59: Comparação de valores na interface entre o conector de cisalhamento e a laje.

respectivamente, $64,84 \text{ m}^{-1}$ e 200 m^{-1} . O valor do coeficiente de transferência de calor por convecção foi tomado como $25 \text{ W/m}^2\text{°C}$, e o fator de emissividade 0,7. O calor específico e a massa específica do aço seguiram os valores apresentados na seção 2.6. Os valores das variáveis foram selecionados de modo a aproximar o máximo possível o modelo simplificado do modelo numérico. Pode-se observar que as curvas apresentam um comportamento análogo. Porém, as temperaturas obtidas pelo método simplificado resultam superiores às obtidas com a simulação numérica.

Vale ressaltar que o modelo simplificado de cálculo aborda a situação apresentada na figura 26, ou seja, uma viga metálica e apenas uma laje de concreto, diferentemente do modelo abordado que tem duas lajes de concreto. Por isso foi comparado a temperatura apenas da mesa superior do modelo simplificado que é a que está em contato direto com a laje de concreto.

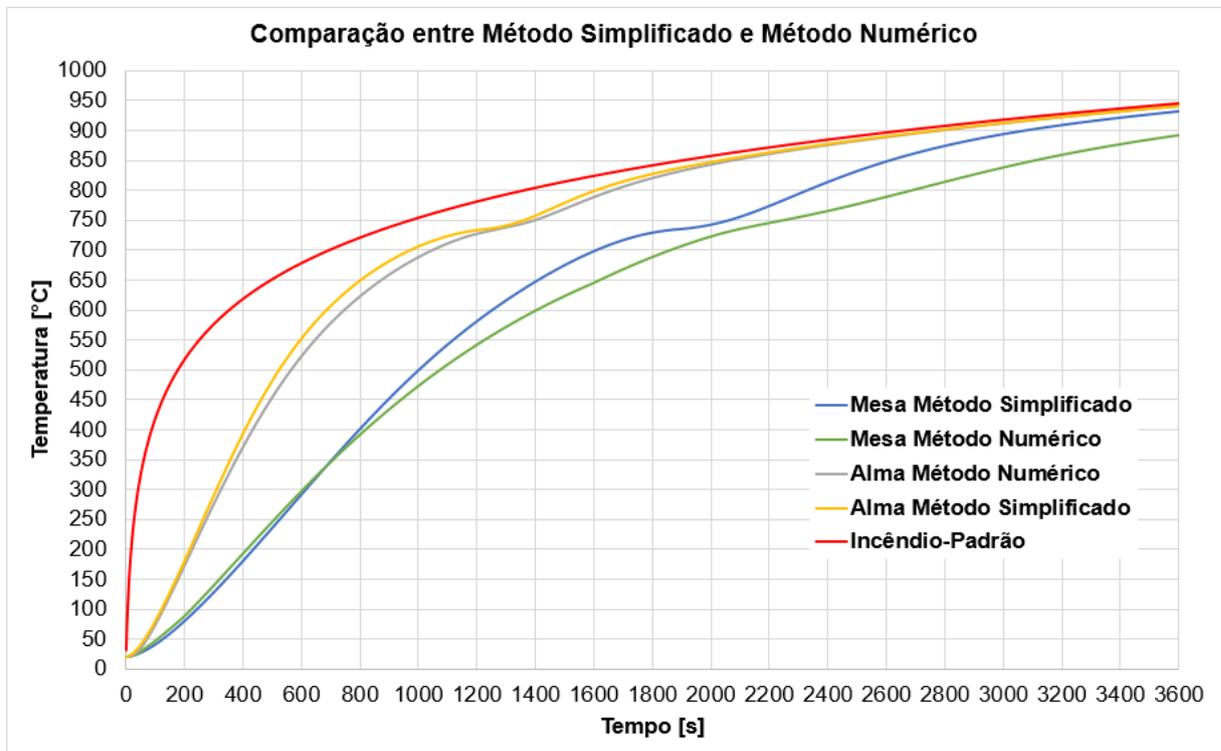


Figura 60: Comparação da evolução da temperatura entre o método simplificado e o método numérico.

5 CONCLUSÕES

O presente trabalho apresentou um estudo sobre o campo térmico gerado em uma viga mista aço concreto submetida à elevadas temperaturas. Neste estudo foi abordado à exposição de um modelo, baseado no ensaio tipo *push-out*, à curva de incêndio padrão adotada pela ABNT NBR 14432:2001, apresentada na equação 6.

No capítulo 2 foi realizada uma revisão dos conceitos teóricos necessários para a realização do trabalho. Ainda neste capítulo, foi realizada uma breve introdução ao Método dos Elementos Finitos, apresentados os conceitos de conectores de cisalhamento e do comportamento estrutural de vigas mistas, foi realizada uma descrição do ensaio do tipo *push-out*, foi apresentado os mecanismos de transferência de calor e os tipos de curvas temperatura versus tempo, finalmente foi apresentado os efeitos da temperatura nos materiais aço e concreto e apresentado o modelo simplificado de cálculo adotado pela norma brasileira ABNT NBR 14323:2013.

No capítulo 3 é apresentada a metodologia utilizada ao longo do presente trabalho. Neste capítulo basicamente é descrito o modo como foi obtido o campo de temperatura no software *ANSYS Workbench 16.0*. Primeiramente foi apresentado como os parâmetros referente as propriedades dos materiais foram adicionadas ao software. Em seguida, foi apresentado a elaboração da geometria proposta, e as configurações realizadas para obter-se a análise térmica transiente como a disposição e os parâmetros dos carregamentos térmicos aplicados, finalmente, foi descrito a obtenção da malha de elementos finitos utilizada na análise. Por meio dos testes de convergência, é possível observar p refinamento da malha pode influenciar nos resultados para descrever um meio contínuo.

No capítulo 4 são apresentados os resultados obtidos através da análise térmica transiente e é feita uma comparação entre as curvas de temperatura, da mesa e da alma do perfil metálico, obtidas através da simulação com o método simplificado de cálculo adotado pela ABNT NBR 14432:2001. A figura 51 apresenta o campo de temperatura obtido para um Tempo Requerido de Resistência ao Fogo de 60 minutos. Pode-se observar que o aço

é o material com maior elevação de temperatura, como esperado pois apresenta valores de condutividade térmica elevados quando comparado com o concreto. Além disso, a viga de aço tem uma parcela maior de sua superfície exposta a ação do incêndio padrão do que as lajes de concreto. Tais conclusões são reforçadas pelas figuras 53 e 55. É possível observar que a temperatura atinge uma variação alta na laje de concreto, isso deve-se ao fato de que uma face está exposta diretamente ao incêndio-padrão enquanto a face oposta está localizada junto com os carregamentos que simulam a perda de calor para o ambiente.

Ainda no capítulo 4, é abordado o campo de temperatura resultante no conector de cisalhamento, figura 57. A parcela do conector que está em contato direto com a viga de aço apresenta os maiores valores de temperatura. De certa forma o concreto da laje trabalha como se fosse um material de revestimento contra o fogo no conector, diminuindo a temperatura em torno de 170 °C no outro extremo do conector. A figura 58 apresenta a curva de dois pontos próximos, porém, um pertencente a laje de concreto superior e outro pertencente a face da viga de aço em contato com esta laje. A figura 59 apresenta a curva de dois pontos próximos, porém, um pertencente a laje de concreto superior e outro pertencente ao conector de cisalhamento. Nota-se que as curvas de temperaturas nos pontos completamente se sobrepõe. Logo, é possível afirmar que existe a interação térmica entre ambos os materiais na interface.

Por fim, na figura 60, é realizada uma comparação entre os resultados obtidos via o programa *ANSYS* e os obtidos por meio do modelo simplificado de cálculo da norma ABNT NBR 14323:2013. Apesar do comportamento análogo, os resultados obtidos pelo método simplificado resultam superiores às obtidas com a simulação numérica. No caso do modelo simplificado a norma ressalta que não ocorre transferência de calor entre as partes constituintes do perfil metálico (mesas e alma) e nem entre a mesa superior e laje de concreto. Diferentemente do modelo numérico que, além de haver a transferência de calor entre as partes do perfil metálico e a laje de concreto, foi simulado uma perda de calor para o ambiente nas faces da laje de maior área que não estão em contato com a viga de aço. Esse pode ser o motivo pelo qual os valores obtidos pela análise numérica resultem menores que ao do método simplificado de cálculo.

O que não foi realizado neste trabalho é o acoplamento do campo térmico obtido em uma análise estrutural do modelo proposto. Assim adicionando os efeitos da temperatura, abordados na seção 2.6, à uma simulação estrutural do ensaio tipo *push-out*, seria possível obter os deslocamentos dos conectores de cisalhamento e descobrir se a elevação da temperatura, ocasionada por um incêndio, pode produzir um modo de falha precoce quando comparado com o comportamento da estrutura em temperaturas normais. Porém, é possível obter a resistência ao escoamento e módulo de elasticidade por meio da figura 19, estima-se que o conector de

cisalhamento tenha $f_{y,\theta}$ em torno de 9% e 23% de f_y e E_θ em torno de 9% e 13% de E .

REFERÊNCIAS

- ABNT. Associação brasileira de normas técnicas nbr 14432. **Exigências de resistência ao fogo de elementos construtivos de edificações - Procedimento**, 2001.
- ABNT. Associação brasileira de normas técnicas nbr 8800. **Projeto de estruturas de aço e de estruturas mistas de aço e concreto de edifícios**, 2008.
- ABNT. Associação brasileira de normas técnicas nbr 15200. **Projeto de estruturas de concreto em situação de incêndio**, 2012.
- ABNT. Associação brasileira de normas técnicas nbr 14323. **Dimensionamento de estruturas de aço de edifícios em situação de incêndio**, 2013.
- ALVA, G. M. S.; MALITE, M. Comportamento estrutural e dimensionamento de elementos mistos aço-concreto. **Cadernos de Engenharia de Estruturas São Carlos**, v. 7, n. 25, p. 51–84, 2005.
- BATHE, K.-J. **Finite element procedures in engineering analysis**. New Jersey: Prentice-Hall, Inc., 1982.
- CHEN, L.-Z. et al. Performance and design of shear connectors in composite beams with parallel profiled sheeting at elevated temperatures. **International Journal of Steel Structures**, Korean Society of Steel Construction, v. 16, n. 1, p. 217–229, 2016.
- DESIGNATION, A. E119-16a—standard test methods for fire tests of building construction and materials. **West Conshohocken, PA: American Society for Testing and Materials (ASTM) International**, 2016.
- KOTINDA, T. I. **Modelagem numérica de vigas mistas aço-concreto simplesmente apoiadas: ênfase ao estudo da interface laje-viga**. Dissertação (Mestrado) — Universidade de São Paulo, Escola de Engenharia de São Carlos, 2006.
- MALITE, M. **Sobre o cálculo de vigas mistas aço-concreto: Ênfase em edifícios**. Dissertação (Mestrado) — Universidade de São Paulo, Escola de Engenharia de São Carlos, 1990.
- MALITE, M. **Análise do comportamento estrutural de vigas mistas de aço-concreto constituídas por perfis de chapa dobrada**. Tese (Doutorado) — Universidade de São Paulo, Escola de Engenharia de São Carlos, 1993.
- MARTHA, L. F. **Métodos Básicos da Análise de Estruturas**. Rio de Janeiro - RJ: Editora Campus/Elsevier, 2010.
- PARANÁ. Corpo de bombeiros do, npt 002. **Adaptação às normas de segurança contra incêndio**, 2011.

REGOBELLO, R. **Análise Numérica de Seções Transversais e de Elementos Estruturais de Aço e Mistos de Aço e Concreto em Situação de Incêndio**. Dissertação (Mestrado) — Universidade de São Paulo, Escola de Engenharia de São Carlos, 2007.

SHAHABI, S. et al. Performance of shear connectors at elevated temperatures—a review. **Steel and Composite Structures**, Techno-Press, v. 20, n. 1, p. 185–203, 2016.

SILVA, C. J. da. **Comportamento de estruturas metálicas e mistas em situação de incêndio. Modelagem e aplicações**. Dissertação (Mestrado) — Universidade Federal do Espírito Santo, Vitória, 2002.

SOUZA, D. A. de. Estruturas mistas de aço e concreto. **56 Congresso Brasileiro de Concreto**, 2014.

STANDARD, B. Eurocode 1: Actions on structures—part 1-2: General actions—actions on structures exposed to fire. **BS EN**, 1991.

STANDARD, B. Eurocode 4—design of composite steel and concrete structures—part 1-2: General rules—structural fire design. **BS EN**, p. 1–2, 1994.

TRISTÃO, G. A. **Comportamento de conectores de cisalhamento em vigas mistas aço-concreto com análise da resposta numéricas**. Dissertação (Mestrado) — Universidade de São Paulo, Escola de Engenharia de São Carlos, 2002.