

# ASPECTOS RELEVANTES PARA MODELAGEM COMPUTACIONAL DE VIGAS MISTAS EM SITUAÇÃO DE INCÊNDIO: UMA ABORDAGEM BASEADA NA INTERAÇÃO ENTRE AÇO-CONCRETO E NO COMPORTAMENTO MECÂNICO DOS MATERIAIS

Relevant aspects for computational modeling of composite beams in fire situations: an approach based on the interaction between steel-concrete and the mechanical behavior of the materials

Leonardo Carvalho Mesquita<sup>1</sup>, Letícia Vinhal Pereira<sup>2</sup> e Gabriela Silveira Brandão<sup>3</sup>



## PALAVRAS CHAVE:

Estruturas mistas;  
Elevadas temperaturas;  
Interface aço-concreto;  
Abaqus;  
Método dos elementos finitos;

## KEYWORDS:

Composite structures;  
Elevated temperatures;  
Steel-concrete interface;  
Abaqus;  
Finite element method.

**RESUMO:** O presente trabalho propõe uma metodologia de modelagem de vigas mistas de aço e concreto em situações de incêndio com ênfase no tratamento computacional da interface aço-concreto e no comportamento mecânico dos materiais em elevadas temperaturas. Para isso, foram desenvolvidos três estudos abordando a análise mecânica, térmica e termomecânica de vigas mistas. Em todos os estudos, os resultados obtidos apresentaram boa concordância com os resultados experimentais e numéricos de referência, evidenciando que as estratégias empregadas para simular os conectores de cisalhamento e o comportamento mecânico dos materiais, tanto em temperatura ambiente quanto em elevadas temperaturas, são apropriadas. Apesar da compreensão do comportamento de estruturas mistas em situações de incêndio ser desafiadora devido às inúmeras incertezas associadas aos fenômenos de transferência de calor e aos testes reais em elevadas temperaturas, o modelo computacional desenvolvido foi capaz de representar adequadamente o comportamento termomecânico da viga mista de aço e concreto analisada. A metodologia de modelagem computacional proposta neste trabalho pode auxiliar no desenvolvimento de novos estudos na área.

**ABSTRACT:** The present work proposes a methodology for modeling steel and concrete composite beams in fire situations, emphasizing the computational treatment of the steel-concrete interface and the mechanical behavior of the materials at high temperatures. For this, three studies were developed covering the mechanical, thermal, and thermomechanical analysis of steel and concrete composite beams. In all studies, the results obtained showed good agreement with the experimental and numerical reference results, indicating that the strategies used to simulate the shear connectors and the mechanical behavior of the materials, both at room temperature and at elevated temperatures, are appropriate. Although understanding the behavior of composite structures in fire situations is challenging due to the numerous uncertainties associated with heat transfer phenomena and accurate tests at high temperatures, the computational model developed could adequately represent the thermomechanical behavior of the composite beam analyzed. The computational modeling methodology proposed in this work can assist in developing new studies in the area.

\* Contato com os autores:

Publicado em 19 de setembro de 2024

<sup>1</sup> e-mail: [Leonardo.mesquita@ufv.br](mailto:Leonardo.mesquita@ufv.br) ( L. C. Mesquita )

Engenheiro Civil, Doutor em Engenharia Civil (Estruturas), Professor Adjunto, Universidade Federal de Viçosa Campus Rio Paranaíba.

<sup>2</sup> e-mail: [levipe10@hotmail.com](mailto:levipe10@hotmail.com) ( L. V. Pereira )

Engenheira Civil, Mestranda em Engenharia de Estruturas, Universidade de São Paulo.

<sup>3</sup> e-mail: [gabisbrandao12@hotmail.com](mailto:gabisbrandao12@hotmail.com) ( G. S. Brandão )

Engenheira Civil, Universidade Federal de Viçosa Campus Rio Paranaíba.

## 1. INTRODUÇÃO

A ocorrência de incêndios descontrolados, presente ao longo da história, é responsável por grandes catástrofes, inclusive em contextos estruturais. Suas consequências frequentemente geram significativos prejuízos financeiros e até mesmo a perda de vidas humanas. Ao longo da história, existem inúmeros casos de incêndios que ilustram essas perdas. Entre eles, é importante destacar o grande incêndio de Londres, na Inglaterra. Conforme descrito por Rocha (2012), este incêndio teve início em uma padaria em 1666 e rapidamente se alastrou por toda a cidade. O desastre resultou em mais de 100 mil pessoas desabrigadas, além da destruição de mais de 13.200 casas, 87 igrejas, incluindo a Catedral de Saint Paul, e várias construções administrativas. Segundo Kirchhof *et al.* (2005), esta catástrofe foi fundamental para impulsionar as primeiras medidas de proteção contra incêndios.

Em âmbito nacional, destaca-se o incêndio no edifício Andraus em São Paulo, ocorrido em 1972, conforme relatado por Santos (2014). Neste incidente, a falta de sistemas de segurança adequados, como alarmes e sinalização, dificultou a desocupação do local, resultando em 16 mortes. De maneira similar, em 1974, o Edifício Joelma, também em São Paulo, sofreu um grave incêndio. Neste caso, a cobertura do prédio, feita de placas de amianto, impossibilitou o pouso de helicópteros de resgate, levando a 179 mortes e 300 feridos. Outra tragédia marcante foi o incêndio na boate Kiss, na madrugada do dia 27 de janeiro de 2013, na cidade de Santa Maria, Rio Grande do Sul. Este desastre vitimou 242 pessoas e deixou 680 feridos.

Tendo em vista as diversas tragédias e prejuízos causados pelos incêndios ao longo dos últimos anos, a preocupação com a ação do fogo nas estruturas tornou-se essencial, como aponta Santos (2014). Contudo, conforme Martins (2000) destaca, foi somente a partir de 1995 que algumas universidades brasileiras iniciaram o desenvolvimento de estudos e pesquisas sobre este tema. Esse movimento acadêmico foi crucial para a elaboração de normas brasileiras relacionadas à segurança contra incêndios. Dentre elas, tem-se a ABNT NBR 14323:2013 intitulada “Projeto de estruturas de aço e mistas de aço e concreto de edifícios em situação de incêndio”.

No entanto, as normas nacionais e internacionais que tratam deste assunto muitas vezes não representam o real comportamento dos materiais. Além disso, os métodos simplificados adotados nessas normas podem levar a “projetos antieconômicos e inflexíveis”. Esta situação é, em parte, consequência dos resultados de ensaios nos quais as prescrições normativas são baseadas, que são usualmente realizados com elementos isolados em fornos padronizados (ROCHA, 2012). Por essa razão, os comitês internacionais têm se empenhado em basear suas normativas em procedimentos que consideram o desempenho de estruturas em situações reais de incêndio. Com isso, a temperatura crítica deixa de ser a única variável no projeto de estruturas, tornando-se apenas uma dentre várias considerações importantes (SANTOS, 2014). Entretanto, visto que a realização de ensaios em estruturas completas e em escala real é extremamente trabalhosa e custosa, pacotes computacionais têm sido amplamente utilizados para simular as condições de interesse. Essas simulações vão desde a modelagem dos campos térmicos em cada elemento estrutural até a avaliação do impacto do aumento de temperatura no comportamento global do sistema estrutural, como indicam estudos de Wald *et al.* (2006), Hozian *et al.* (2011), Li *et al.* (2017) e Davoodnabi *et al.* (2021). Neste contexto, um modelo computacional devidamente validado pode simular de forma satisfatória o comportamento estrutural de um elemento misto, com um custo significativamente menor do que os experimentos reais.

## 2. OBJETIVO

Este trabalho tem como objetivo propor uma metodologia de modelagem computacional de vigas mistas de aço e concreto em situação de incêndio, dando ênfase no tratamento computacional da interface entre aço-concreto e no comportamento mecânico dos materiais.

## 3. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

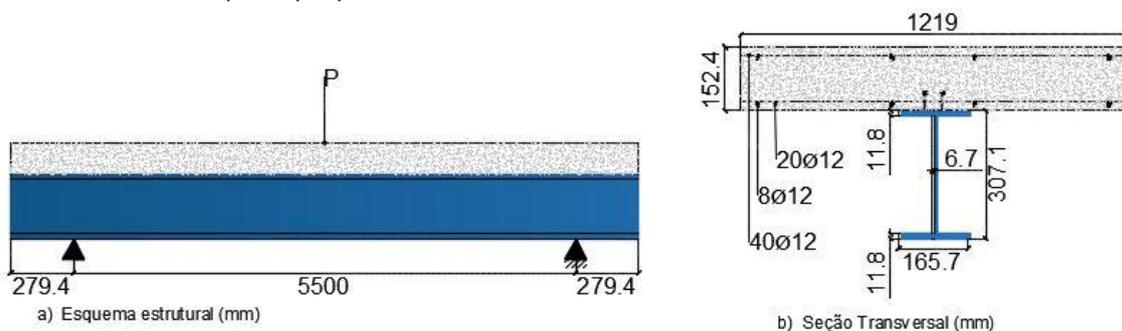
Em razão das transformações no campo da computação, nas últimas duas décadas houve uma expansão das pesquisas associadas ao comportamento de elementos mistos de aço e concreto em situações de incêndio. Para se ter uma ideia desse avanço, consultando a base de dados Scopus com as palavras-chave 'FIRE' e 'COMPOSITE BEAM', entre os anos de 1985 e 2000 encontramos 35 trabalhos indexados. Já entre os anos de 2001 e 2023, encontramos 488 trabalhos.

Os primeiros trabalhos realizados nesta área, como, por exemplo, o estudo de Chapman e Balakrishnan (1964) e o de Kordina e Droese (1987), utilizaram protótipos reais como objeto de pesquisa. Conforme mencionado anteriormente, devido às dificuldades e complexidades inerentes à condução desses trabalhos, os autores enfrentavam limitações para expandir o escopo de aplicação das observações encontradas. Essa dificuldade foi superada com o aprimoramento e a ampliação da aplicabilidade do método dos elementos finitos. Com um modelo computacional calibrado, tornou-se possível analisar diversos problemas de maneira mais acessível. Os trabalhos de Mirza e Uy (2009) e Shahabi *et al.* (2016), que tratam do comportamento de conectores de cisalhamento em elevadas temperaturas, Davoodnabi *et al.* (2021), que aborda a modelagem de vigas mistas com conectores do tipo cantoneira em elevadas temperaturas, e Peng e Zhou (2023), que analisam o comportamento de vigas de alma senoidal expostas a incêndios concentrados, representam este avanço.

Diante deste contexto, o presente trabalho apresenta uma metodologia de modelagem para a análise computacional de vigas mistas de aço e concreto em situações de incêndio. Para alcançar esse propósito, os estudos de referência detalhados a seguir serão empregados para validar as estratégias computacionais adotadas no desenvolvimento desta pesquisa.

### 3.1 ESTUDO DE REFERÊNCIA 1: VIGA MISTA EM TEMPERATURA AMBIENTE

O Estudo de Referência 1 é fundamentado no trabalho experimental de Chapman e Balakrishnan (1964) e no trabalho computacional desenvolvido por Huang, Burgess e Plank (1999). Este estudo abrange duas vigas mistas de aço e concreto, nas quais o comportamento misto entre o aço e o concreto é ocasionado por conectores de cisalhamento do tipo pino de cabeça (*stud bolt*). Ambas possuem as mesmas dimensões de seção transversal, comprimento, carga e apoios (Figura 1). Os modelos se distinguem pelo número de conectores e pelas propriedades dos materiais, conforme detalhado na Tabela 1.



**FIGURA 1:** Características geométricas e de ensaio das vigas mistas ensaiadas por Chapman e Balakrishnan (1964).

**FONTE:** Adaptado de Huang, Burgess e Plank (1999).

O estudo de Huang, Burgess e Plank (1999) teve como objetivo estudar o comportamento estrutural de conectores de cisalhamento em situações de incêndio. Para isso, os autores desenvolveram uma formulação matemática, que foi implementada no software de elementos finitos VULCAN. Os resultados obtidos demonstraram boa concordância com os resultados experimentais de Chapman e Balakrishinan (1964). No presente trabalho, os resultados obtidos por esses pesquisadores foram utilizados para validar as estratégias de modelagem adotadas para simular tais conectores.

**TABELA 1:** Propriedades dos modelos experimentais ensaiados por Chapman e Balakrishinan (1964).

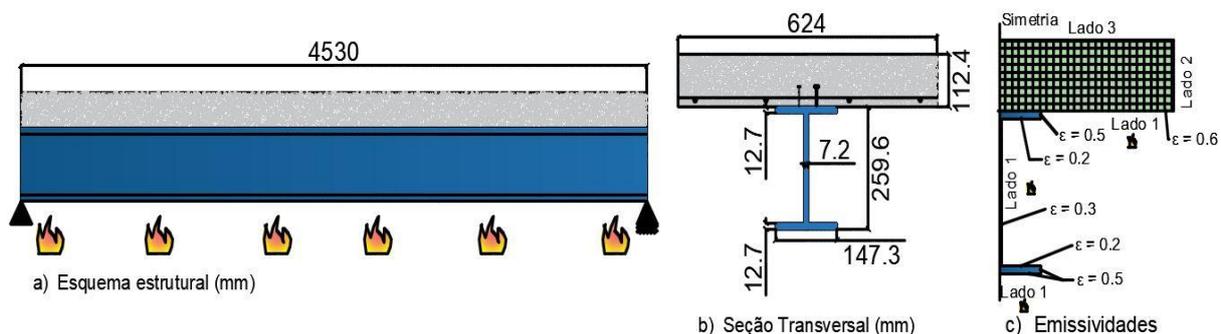
Viga	$f_{yb}$ [MPa]	$f_{cm}$ [MPa]	$f_{yr}$ [MPa]	Número de conectores	$d$ [mm]	$f_u$ [MPa]
A3	302	27	600	68	19	600
A5	290	43	600	44	19	600

FONTE: Adaptado de Huang, Burgess e Plank (1999).

Nesta tabela,  $f_{yb}$  representa a resistência ao escoamento do perfil metálico,  $f_{cm}$  é a resistência de compressão na laje de concreto,  $f_{yr}$  é a resistência de escoamento nas barras de aço,  $d$  é o diâmetro conector e  $f_u$  é a resistência última do conector.

### 3.2 ESTUDO DE REFERÊNCIA 2: ANÁLISE TÉRMICA DE UMA VIGA MISTA

O Estudo de Referência 2 baseia-se na pesquisa computacional de Hozjan *et al.* (2011), e tem como objetivo determinar os gradientes de temperatura ao longo da seção transversal da viga mista de aço e concreto representada na Figura 2.



**FIGURA 2:** Características geométricas da viga mista simulada por Hozjan *et al.* (2011).

FONTE: Adaptado de Hozjan *et al.* (2011).

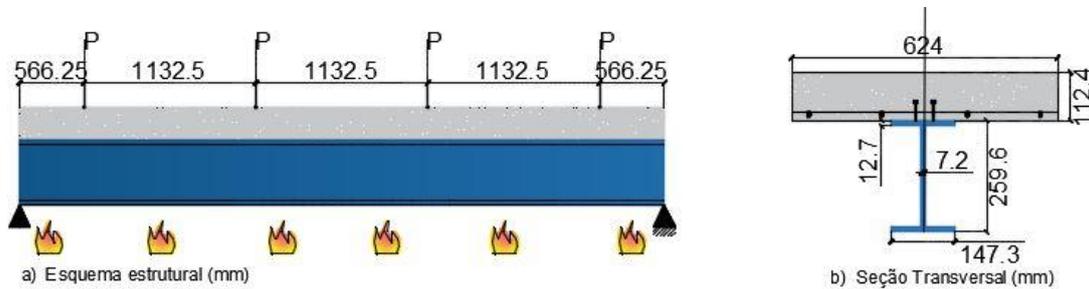
A transmissão de calor na viga mista ocorre por condução, convecção e radiação. Para a transferência de calor por radiação, os autores adotaram uma emissividade de 0,6 na superfície inferior do concreto e diferentes emissividades ao longo das superfícies do perfil de aço, conforme ilustrado na Figura 2. O fator de convecção adotado para toda a superfície exposta ao aquecimento (superfície inferior) é de 25 W/m<sup>2</sup>K. Na região mais fria, especificamente na superfície superior do concreto, os autores utilizaram um fator de convecção de 9 W/m<sup>2</sup>K e desconsideraram a radiação nessa face.

### 3.3 ESTUDO DE REFERÊNCIA 3: VIGA MISTA EM SITUAÇÃO DE INCÊNDIO

O Estudo de Referência 3 fundamenta-se na pesquisa de Wainman e Kirby (1988), que analisou experimentalmente duas vigas mistas de aço e concreto em situação de incêndio.

O esquema estrutural dos dois protótipos testados pelos autores corresponde a uma viga mista biapoiada com 4530 mm de vão, sujeita a quatro cargas concentradas de 32,47 kN para o primeiro caso

(Protótipo S1) e 62,36 kN para o segundo caso (Protótipo S2) (Figura 3). Simultaneamente à ação das cargas, a viga foi submetida a uma ação térmica representada pela curva de incêndio padrão ISO 834. O comportamento misto entre aço e concreto foi obtido por meio de 32 conectores de cisalhamento do tipo pino com cabeça, espaçados uniformemente.



**FIGURA 3:** Características geométricas das vigas mistas ensaiadas por Wainman e Kirby (1988).

**FONTE:** Adaptado de Wainman e Kirby (1988).

As propriedades mecânicas dos materiais utilizados na fabricação dos protótipos experimentais são apresentadas na Tabela 2.

**TABELA 2:** Propriedades mecânicas protótipos ensaiados por Wainman e Kirby (1988).

Viga	$P$ [kN]	$f_{yb}$ [MPa]	$f_{cm}$ [MPa]	$f_{yr}$ [MPa]	Número de conectores	$d$ [mm]	$f_u$ [MPa]
S1	32,47	255	30	600	32	19	350
S2	62,36	255	30	600	32	19	350

**FONTE:** Adaptado de Wainman e Kirby (1988).

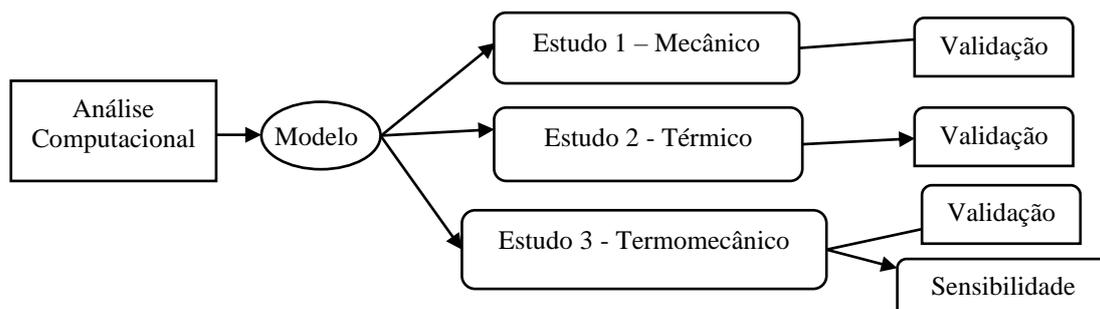
Nesta tabela,  $f_{yb}$  representa a resistência ao escoamento do perfil metálico,  $f_{cm}$  é a resistência de compressão na laje de concreto,  $f_{yr}$  é a resistência de escoamento nas barras de aço,  $d$  é o diâmetro conector e  $f_u$  é a resistência última do conector de cisalhamento.

## 4. METODOLOGIA

Nesta seção, serão apresentados conceitos gerais sobre a validação e o desenvolvimento dos modelos computacionais de elementos finitos com auxílio do *software Abaqus* (DESSAULT SYSTÈMES, 2012). Detalhes específicos sobre as análises mecânica, térmica e termomecânica serão abordados nas seções subsequentes.

### 4.1 ETAPAS PARA VALIDAÇÃO DAS ESTRATÉGIAS COMPUTACIONAIS ADOTADAS

Para validar as estratégias computacionais adotadas na representação da interface aço-concreto e nas propriedades mecânicas dos materiais, seguiram-se as etapas ilustradas na Figura 4.



**FIGURA 4:** Etapas utilizadas para validar as estratégias computacionais adotadas.

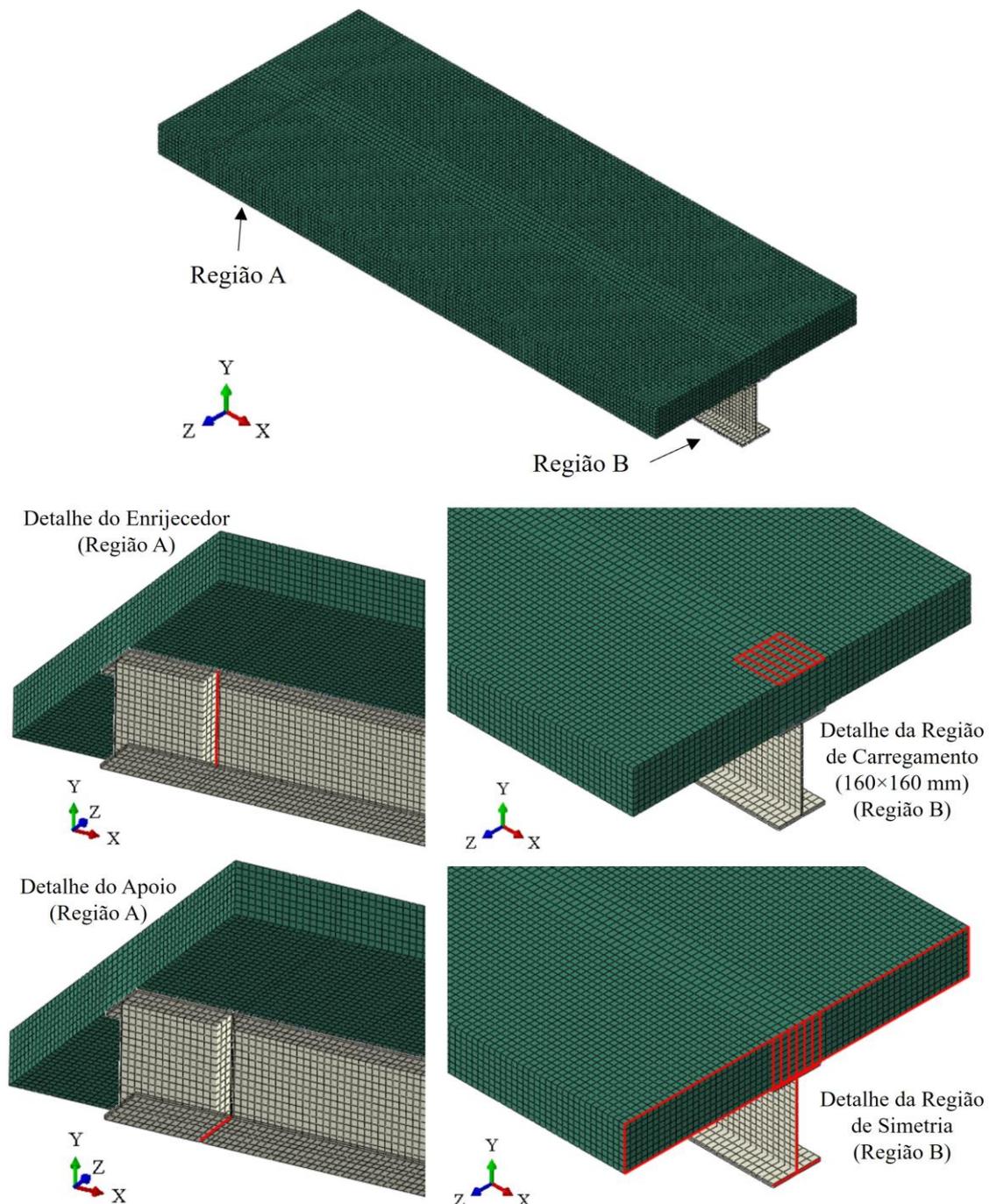
**FONTE:** Autores.

A primeira etapa, simbolizada pelo Estudo 1 na Figura 4, corresponde à análise mecânica dos modelos de elementos finitos em temperatura ambiente. Nesta etapa, foram desenvolvidos e validados dois modelos computacionais, utilizando as propriedades e os resultados experimentais apresentados por Huang, Burgess e Plank (1999), que são descritos na Seção 3.1. Na segunda etapa, Estudo 2, realizou-se a análise térmica do modelo computacional. Nesta etapa, a distribuição de temperatura ao longo da seção transversal dos modelos foi comparada com os resultados obtidos por Hozjan *et al.* (2011), apresentados na Seção 3.2. Na terceira etapa, Estudo 3, realizou-se a análise termomecânica do modelo computacional, que foi validada a partir de resultados experimentais obtidos por Wainman e Kirby (1988), descritos na Seção 3.3. Por fim, com as estratégias computacionais validadas, realizou-se um estudo de sensibilidade para avaliar o desempenho estrutural da viga mista em função do tipo de interação entre aço e concreto.

## 4.2 DESENVOLVIMENTO DOS MODELOS COMPUTACIONAIS

### 4.2.1 Geometria e condições de contorno dos modelos computacionais

Em função do plano de simetria (plano Y-Z, conforme mostrado na Figura 5), localizado na seção central das vigas mistas, optou-se por modelar apenas a metade da viga. Para isso, aplicou-se como condição de contorno do tipo *Encastre* na direção do eixo X (XSYMM). Por meio desta condição de contorno, admitiu-se que tanto a translação ao longo do eixo X quanto as rotações em torno dos eixos Y e Z estavam restringidas. A fim de evitar a concentração de tensões e problemas de instabilidade local, enrijecedores foram empregados na região do apoio. Para complementar essa estratégia, aplicou-se na mesma região a condição de contorno do tipo *Displacement*, que impediu a translação dos modelos na direção do eixo Y. As cargas foram aplicadas diretamente sobre a laje dos modelos, utilizando a opção *Pressure*.



**FIGURA 5:** Geometria, condições de contorno e condições de carregamento utilizadas nos modelos computacionais desenvolvidos.

**FONTE:** Autores.

#### 4.2.2 Malha de elementos finitos

Para a discretização das regiões que compõem a viga mista (perfil metálico, enrijecedores e laje de concreto), foram utilizados elementos finitos do tipo *solid mechanical* hexaédrico (C3D8) nos Estudos 1 e 3, e elementos do tipo *solid heat transfer* (DC3D8) no Estudo 2. Ambos os tipos de elementos possuem oito nós e três graus de liberdade por nó. Em todos os modelos, a malha de elementos finitos foi gerada automaticamente pelo software Abaqus (DESSAULT SYSTÈMES, 2012), com uma dimensão máxima de 20 milímetros.

## 4.2.3 Comportamento mecânico do aço e do concreto

### 4.2.3.1 Aço

O comportamento mecânico do aço estrutural foi simulado utilizando os modelos constitutivos *Elasticity* e *Plasticity* disponíveis na biblioteca do Abaqus (DESSAULT SYSTÈMES, 2012). Para isso, as curvas de tensão *versus* deformação, que descrevem o comportamento do aço em temperatura ambiente (Figura 6.A) e em elevadas temperaturas (Figura 6.B), foram informadas aos modelos constitutivos. Estas curvas foram definidas seguindo as prescrições do Eurocode 3 (EN 1993-1-2:2005) e adaptadas conforme as recomendações de Byfield (2002) para o comportamento em temperatura ambiente, e de Maraveas, Swailes e Wang (2012) para o comportamento em elevadas temperaturas. Tais adaptações visam reduzir o tempo de processamento dos modelos e minimizar possíveis problemas de convergência durante a análise.

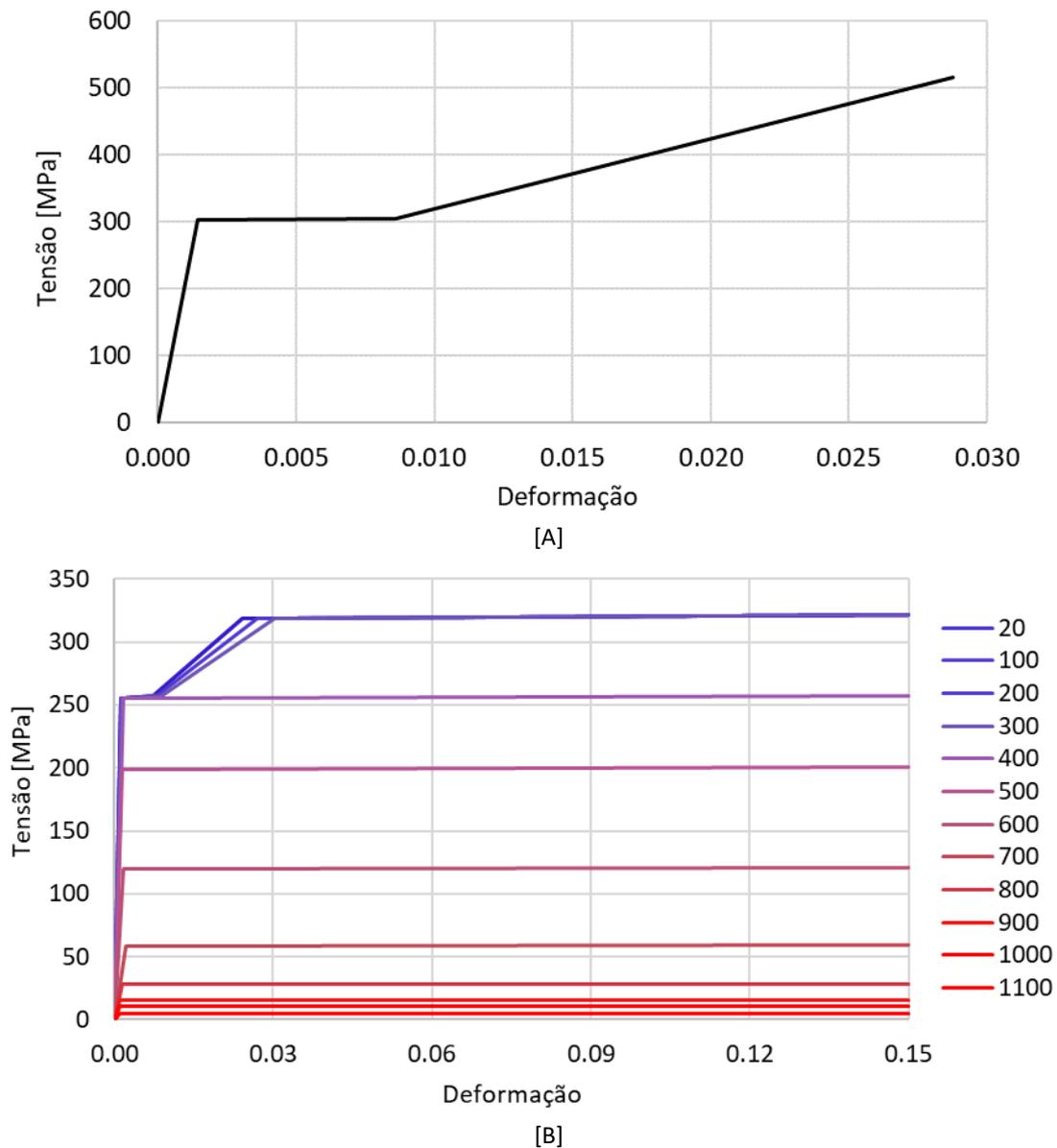


FIGURA 6: [A] Comportamento mecânico do aço em temperatura ambiente e [B] elevadas temperaturas (°C).

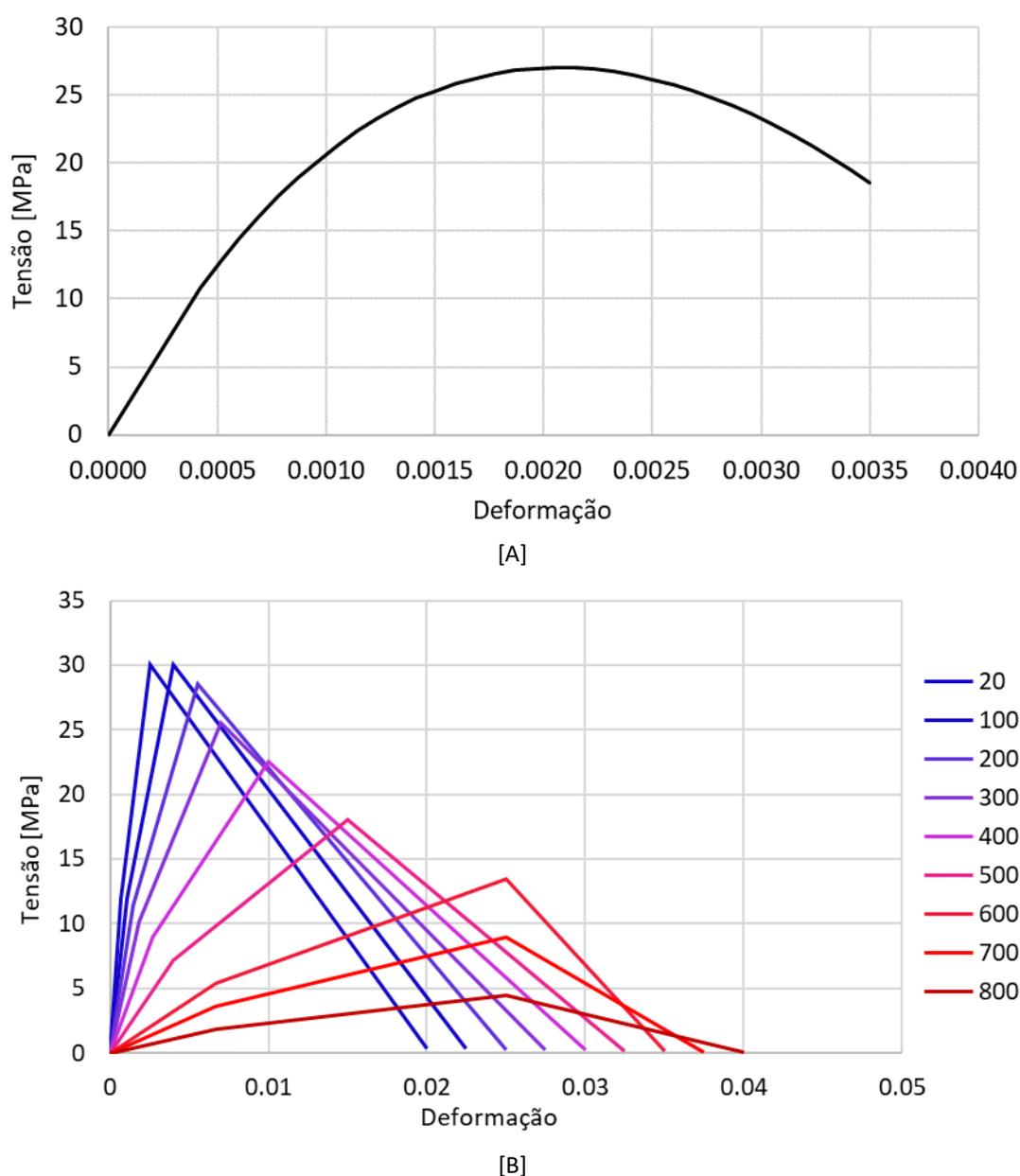
FONTE: EN 1993-1-2:2005, Byfield (2002) e Maraveas, Swailes e Wang (2012).

As demais propriedades mecânicas do aço utilizadas incluem: massa específica igual a  $7850 \text{ kg/m}^3$ , coeficiente de dilatação térmica de  $1,2 \times 10^{-5} \text{ }^\circ\text{C}^{-1}$ , coeficiente de Poisson de 0,3 e módulo de elasticidade de 210 GPa.

#### 4.2.3.2 Concreto

O comportamento mecânico do concreto, tanto em temperatura ambiente quanto em altas temperaturas, foi simulado utilizando os modelos constitutivos *Elasticity* e *Concrete Damaged Plasticity* (CDP), disponíveis na biblioteca do Abaqus (DESSAULT SYSTÈMES, 2012). Assim, as curvas que descrevem o comportamento do concreto sob compressão e tração em diferentes temperaturas foram inseridas no software.

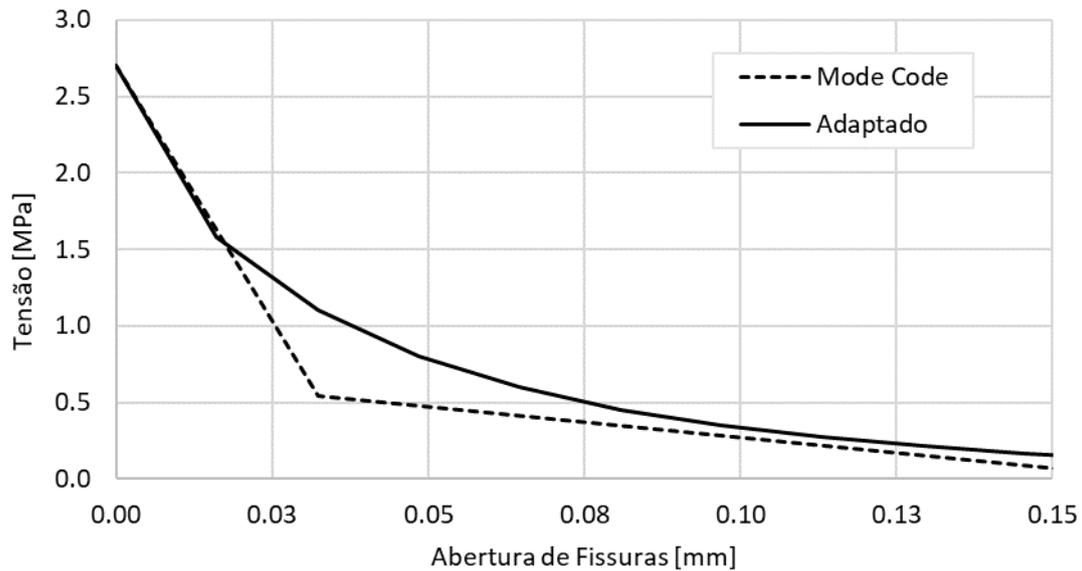
O comportamento mecânico do concreto comprimido, tanto em temperatura ambiente quanto em elevadas temperaturas, é descrito pelas curvas de tensão *versus* deformação apresentadas na Figura 7, as quais foram estabelecidas de acordo com o Eurocode 4 (EN 1994-1-2:2005).



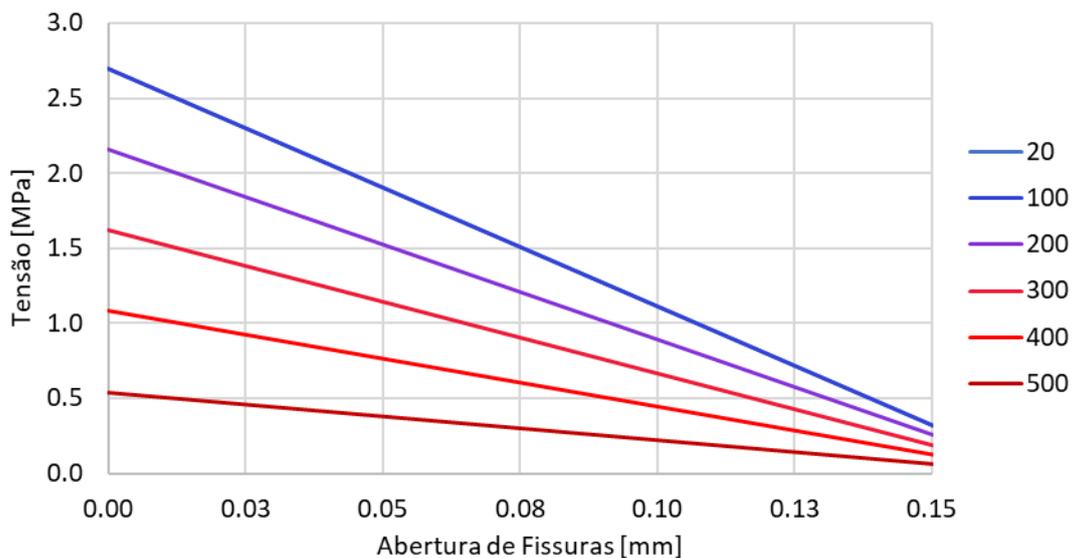
**FIGURA 7:** [A] Comportamento mecânico do concreto comprimido em temperatura ambiente e [B] elevadas temperaturas ( $^\circ\text{C}$ )

**FONTE:** EN 1994-1-2:2005 e Maraveas, Swailes e Wang (2012).

O comportamento mecânico do concreto tracionado, tanto em temperatura ambiente quanto em elevadas temperaturas, é descrito pelas curvas de tensão *versus* abertura de fissuras apresentadas na Figura 8. Essas curvas foram definidas utilizando as prescrições do Model Code (FIB, 2010) e as recomendações de Maraveas, Swailes e Wang (2012).



[A]



[B]

**FIGURA 8:** [A] Comportamento mecânico do concreto tracionado em temperatura ambiente e [B] elevadas temperaturas (°C)

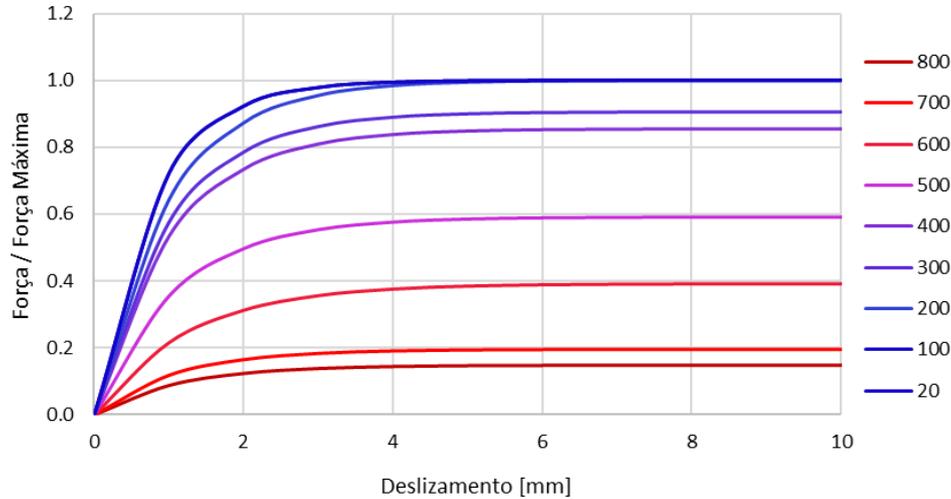
**FONTE:** FIB Model Code (2010) e Maraveas, Swailes e Wang (2012).

As demais propriedades mecânicas do concreto utilizadas incluem: massa específica igual a  $2400 \text{ kg/m}^3$ , coeficiente de dilatação térmica de  $1,0 \times 10^{-5} \text{ }^\circ\text{C}^{-1}$  e coeficiente de Poisson de 0,2.

#### 4.2.3.3 Conectores de cisalhamento

Os conectores de cisalhamento do tipo pino com cabeça (*stud bolt*) foram simulados usando elementos de conexão não-lineares do tipo CONN3D2. O comportamento mecânico desses elementos pode

ser definido no Abaqus (DESSAULT SYSTÈMES, 2012) por meio da curva Força-Deslizamento do conector, que pode ser obtida a partir de ensaios de cisalhamento direto do tipo push-out. Neste estudo, para descrever o comportamento mecânico dos conectores de cisalhamento em temperatura ambiente e em elevadas temperaturas, foram empregadas as curvas apresentadas na Figura 9. Essas curvas foram derivadas das equações propostas por Huang, Burgess e Plank (1999).



**FIGURA 9:** Comportamento mecânico dos conectores de cisalhamento em temperatura ambiente (20°C) e elevadas temperaturas (°C).

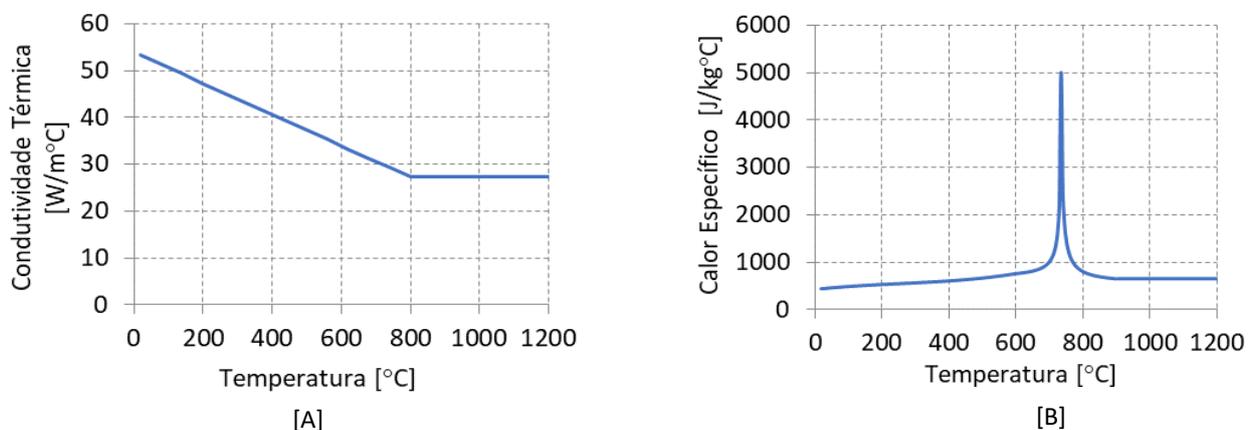
**FONTE:** Adaptado de Huang, Burgess e Plank (1999).

#### 4.2.4 Comportamento térmico do aço e do concreto

Para realizar a análise térmica do modelo computacional, é necessário fornecer ao software Abaqus (DASSAULT SYSTÈMES, 2012) os parâmetros que caracterizam o comportamento térmico do aço e do concreto (condutividade térmica e calor específico). O Eurocode 3 (EN 1993-1-2:2005) e o Eurocode 4 (EN 1994-1-2:2005) apresentam as curvas que descrevem esses parâmetros em função da temperatura para o aço e o concreto, respectivamente.

##### 4.2.4.1 Aço

Para caracterizar o comportamento térmico do aço, as curvas de Condutividade Térmica *versus* Temperatura e Calor Específico *versus* Temperatura, apresentadas na Figura 10, foram informadas ao software Abaqus (DASSAULT SYSTÈMES, 2012).

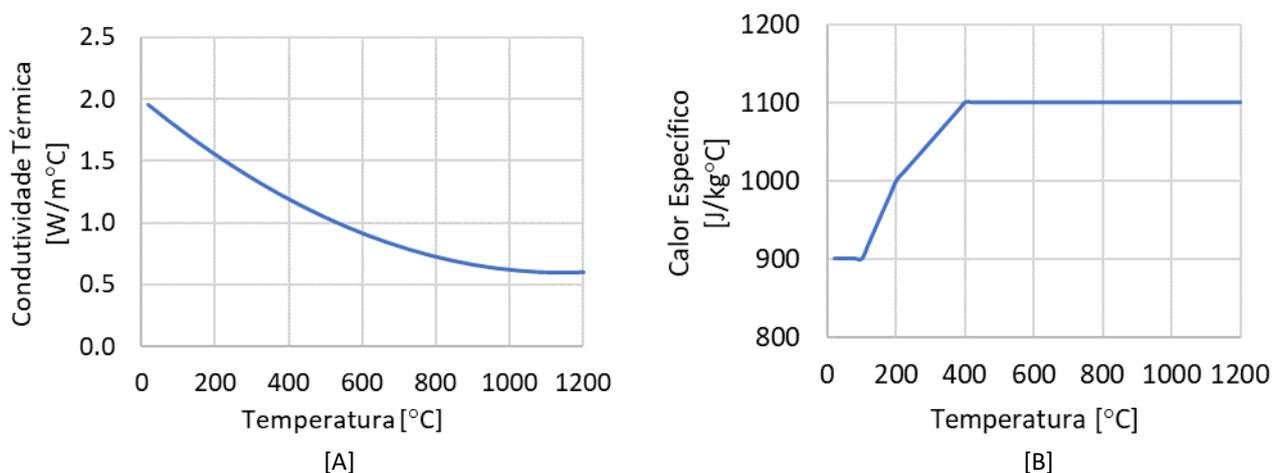


**FIGURA 10:** [A] Condutividade Térmica *versus* Temperatura e [B] Calor Específico *versus* Temperatura para o aço estrutural.

**FONTE:** Autores.

#### 4.2.4.2 Concreto

Para caracterizar o comportamento térmico do concreto, as curvas de Condutividade Térmica *versus* Temperatura e Calor Específico *versus* Temperatura, apresentadas na Figura 11, foram informadas ao software Abaqus (DASSAULT SYSTÈMES, 2012).

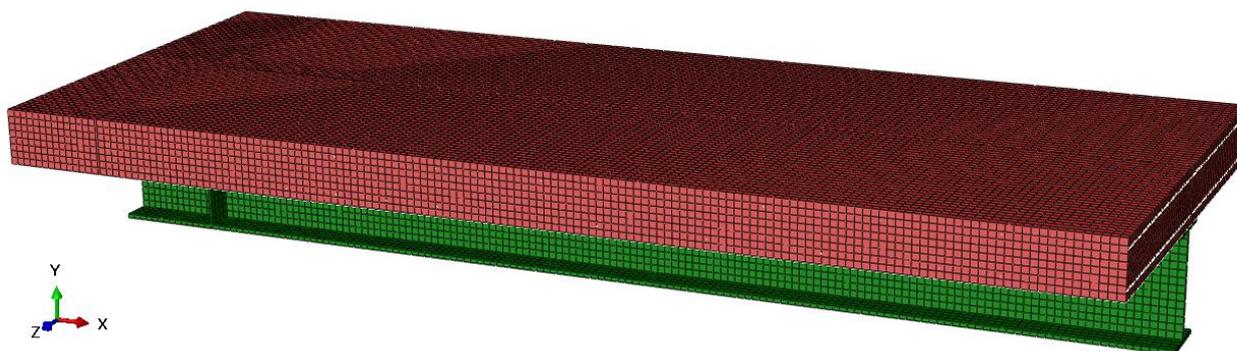


**FIGURA 11:** [A] Condutividade Térmica *versus* Temperatura e [B] Calor Específico *versus* Temperatura para o concreto.  
**FONTE:** Autores.

### 5. ESTUDO 1: VALIDAÇÃO DA ANÁLISE MECÂNICA EM TEMPERATURA AMBIENTE

Para simular o comportamento da viga mista de aço e concreto biapoiada em temperatura ambiente, foram desenvolvidos dois modelos computacionais de elementos finitos com características semelhantes às dos modelos experimentais testados por Chapman e Balakrishnan (1964), descrito na Seção 3.1.

Além dos elementos do tipo *Solid* (C3D8), citados na Seção 4.2.2, neste estudo, utilizou-se elementos do tipo *Beam* (B31) para discretizar a armadura de aço presente na laje de concreto. A malha de elementos finitos, para ambos os modelos, é formada por 79.152 elementos finitos do tipo C3D8 e 3.038 elementos finitos do tipo B31, totalizando 82.190 elementos finitos e 98.756 nós (Figura 12).



**FIGURA 12:** Malha de elementos finitos adotada para discretizar as vigas mistas A3 e A5 ensaiadas por Chapman e Balakrishnan (1964).

**FONTE:** Autores.

Para garantir o trabalho conjunto entre as barras de aço (elementos tipo *Beam*) e a laje (elementos tipo *Solid*), utilizou-se a restrição *Embedded*. Esse tipo de restrição considera a armadura como um elemento imerso na laje e garante a compatibilidade de deslocamentos entre as duas partes. Os conectores de cisalhamento foram simulados utilizando elementos de conexão não-lineares denominados

*Fasteners* do tipo *Point-Based*. Assim, no modelo A3, foram utilizados 68 elementos de conexão igualmente espaçados, ao passo que no modelo A5, foram utilizados 44 elementos.

## 5.1 RESULTADOS

Na Figura 13, apresentam-se os resultados *Carga versus Flecha* na seção central da viga mista obtidos experimentalmente por Chapman e Balakrishnan (1964), pelos modelos computacionais desenvolvidos por Huang, Burgess e Plank (1999), e pelos modelos computacionais desenvolvidos no presente trabalho. Nesta figura, o resultado “Huang, Burgess e Plank (1999) - Total” representa a condição de iteração total, na qual os conectores de cisalhamento são capazes de suportar todos os esforços de cisalhamento que surgem na interface de contato entre o aço e o concreto. Já o resultado “Huang, Burgess e Plank (1999) - Parcial” representam a condição de iteração parcial, na qual os conectores de cisalhamento não são capazes de resistir a todos os esforços de cisalhamento que surgem na interface aço-concreto.

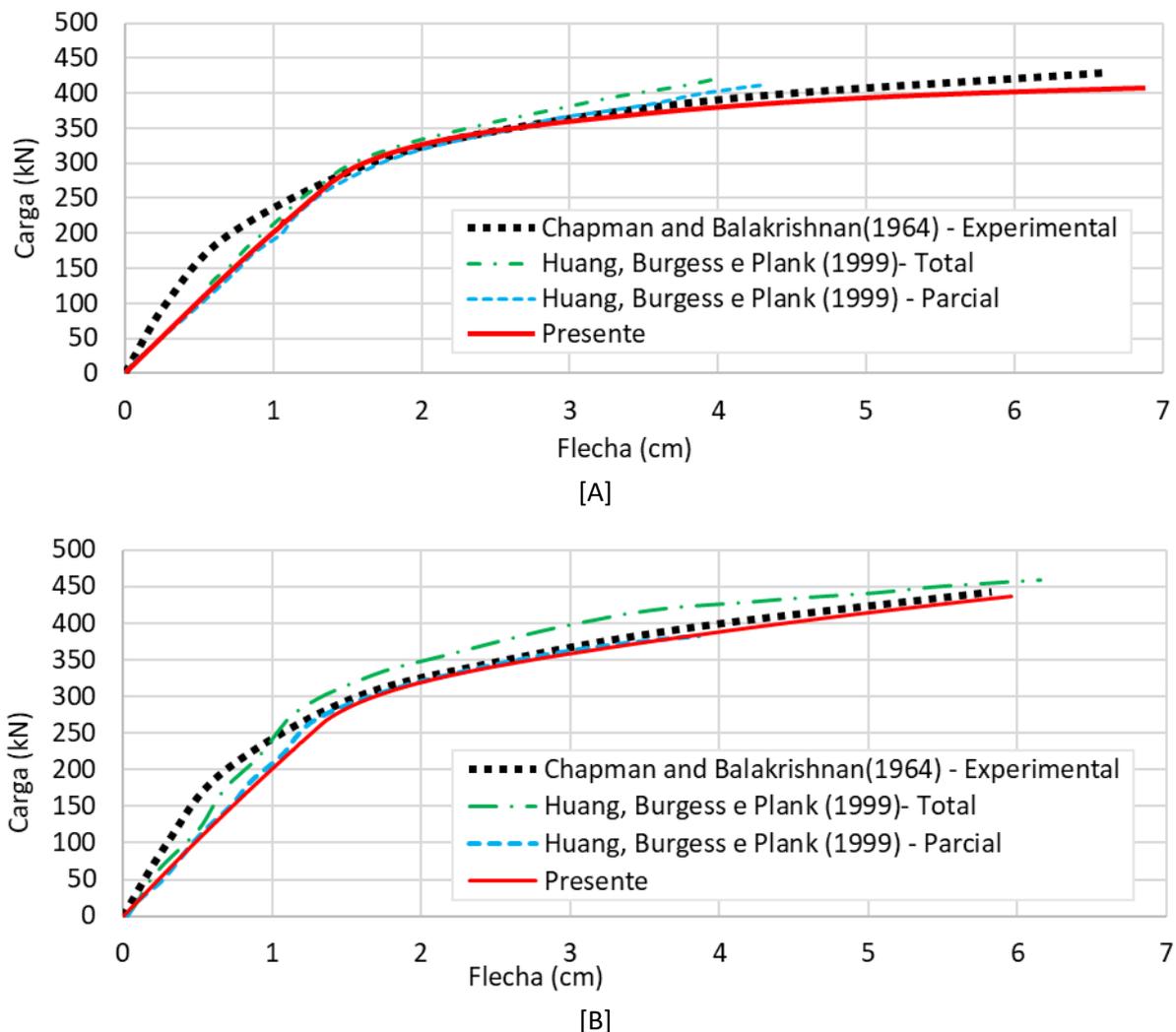


FIGURA 13: [A] Resultados obtidos pelo modelo A3 e [B] resultados obtidos pelo modelo A5.

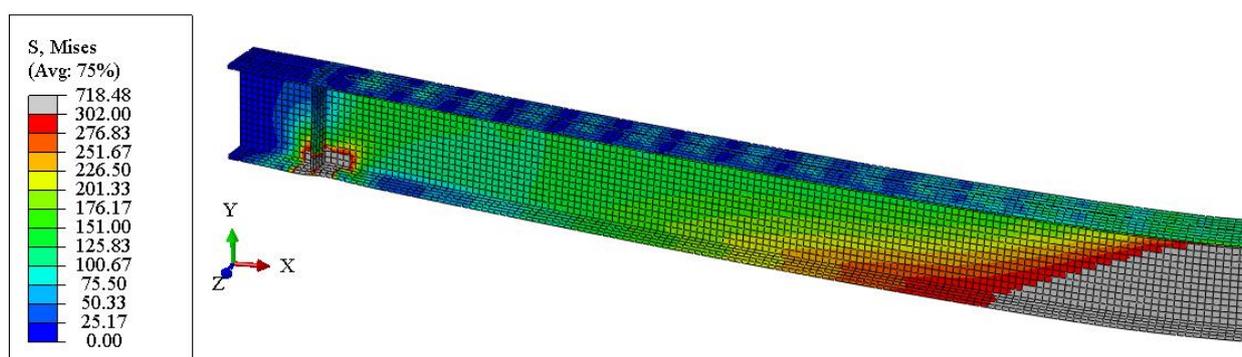
FONTE: Autores.

## 5.2 DISCUSSÃO

Analisando os resultados apresentados anteriormente, é possível avaliar a capacidade do modelo computacional em representar o comportamento estrutural de vigas mistas de aço e concreto. Ao comparar os diagramas *Carga versus Flecha* exibidos na Figura 13 nota-se uma significativa concordância entre os resultados obtidos a partir do modelo computacional desenvolvido e os resultados experimentais

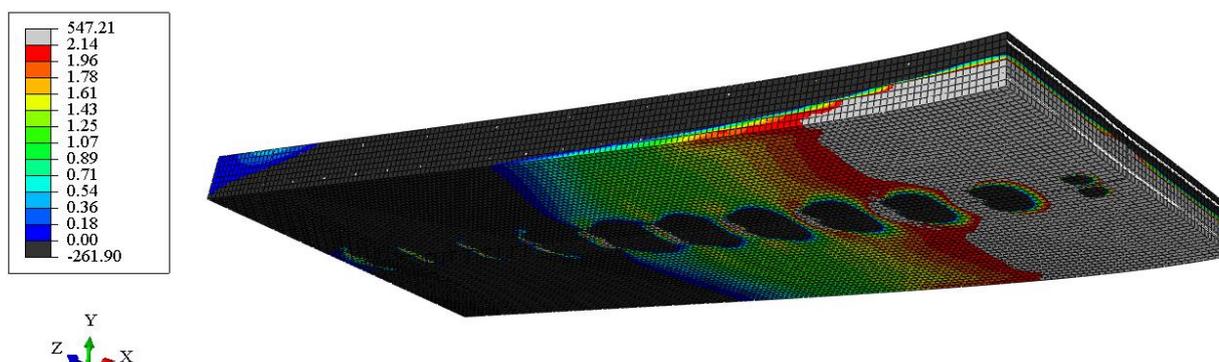
encontrados por Chapman e Balakrishnan (1964). Isso indica que o modelo numérico é capaz de representar os diversos fenômenos que ocorrem na viga mista de aço e concreto à medida que esta é carregada, tais como a fissuração do concreto, a plastificação dos materiais e o deslizamento na interface aço-concreto. Observa-se também que os resultados obtidos pelos modelos computacionais desenvolvidos são semelhantes aos resultados computacionais encontrados por Huang, Burgess e Plank (1999) considerando a viga mista em regime de interação parcial. Isso sugere que as estratégias adotadas para representar os conectores de cisalhamento mecânicos podem ser aplicadas para simular diferentes graus de interação.

Ao analisar a distribuição de tensões próxima à carga máxima, em ambos os casos, verifica-se a formação de uma rótula plástica no meio do vão e a plastificação na região dos apoios (Figura 14). Para esse mesmo nível de carga, torna-se visível a fissuração do concreto, conforme ilustrado na Figura 15.



**FIGURA 14:** Tensões de von Mises [MPa] no perfil de aço do modelo A3, em cinza região plastificada.

**FONTE:** Autores.



**FIGURA 15:** Tensões normais na direção X [MPa] da laje de concreto do modelo A3, em cinza região com fissuras.

**FONTE:** Autores.

## 6. ESTUDO 2: VALIDAÇÃO DA ANÁLISE TÉRMICA

O modelo computacional deste estudo foi desenvolvido com base nos parâmetros de condução, convecção e radiação adotados por Hozjan *et al.* (2011), conforme apresentado na Seção 3.2. Além disso, optou-se por desconsiderar a presença de armaduras na laje de concreto. O modelo desenvolvido conta com um total de 36.402 nós e 28.260 elementos DC3D8, sendo que a laje possui 25.172 elementos e o perfil metálico 3.088.

Para representar o aquecimento da viga mista, foi adotada a curva de incêndio proposta por Hozjan *et al.* (2011), com uma duração de 3600 segundos (Figura 16). A representação do fluxo de calor foi realizada por meio de condições de contorno, utilizando três tipos de interação. A primeira, do tipo *Surface-to-Surface Contact*, foi aplicada entre o aço e o concreto para garantir contato total e transferência de calor por condução. A segunda, do tipo *Surface Film Condition*, representou a convecção e foi aplicada na superfície superior da laje com um fator de convecção de  $9 \text{ W/m}^2\text{K}$ , e ao redor do perímetro da viga mista com um fator de convecção de  $25 \text{ W/m}^2\text{K}$ . Por fim, a terceira interação, do tipo *Surface Radiation*, foi aplicada utilizando o fator de emissividade mostrado na Figura 2.

## 6.1 RESULTADOS

Na Figura 16 são apresentados os resultados Temperatura *versus* Tempo, em minutos, obtidos computacionalmente por Hozjan *et al.* (2011) e os resultados do modelo computacional desenvolvido no presente trabalho.

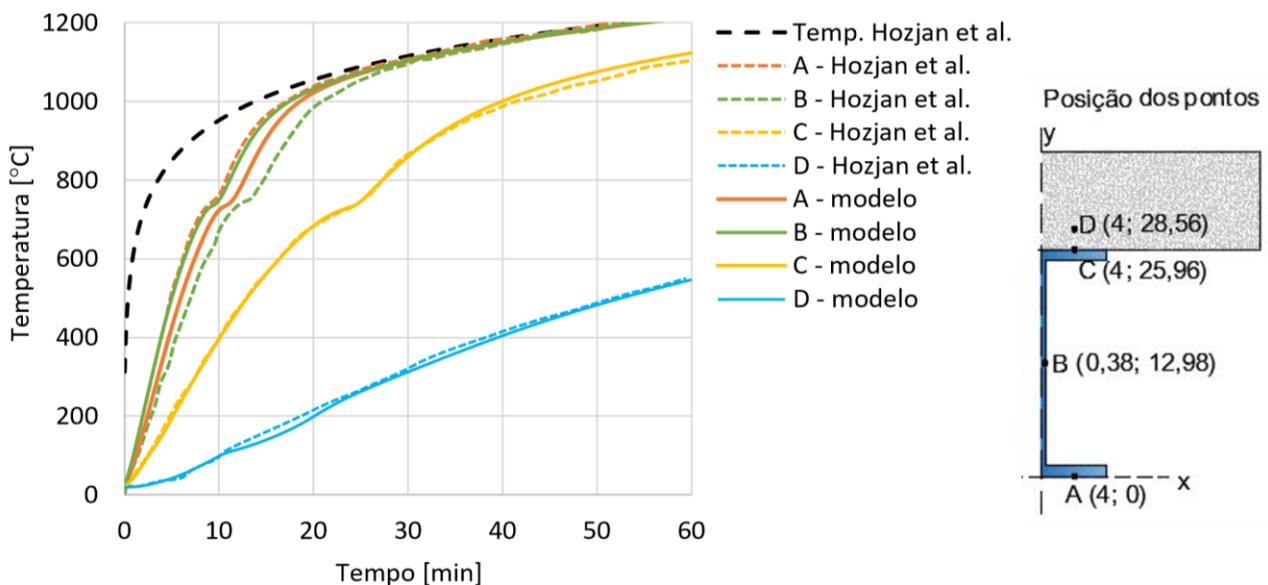


FIGURA 16: Resultados obtidos por Hozjan *et al.* (2011) e pelo modelo computacional desenvolvido.

FONTE: Autores.

## 6.2 DISCUSSÃO

Ao analisar os resultados obtidos, é possível verificar a acurácia do modelo computacional desenvolvido. De maneira geral, nota-se que, para todos os pontos e tempos, os resultados obtidos foram próximos dos encontrados por Hozjan *et al.* (2011). Contudo, observa-se que o aquecimento no ponto B apresentou temperaturas mais elevadas em comparação com os resultados obtidos por Hozjan *et al.* (2011). Uma das possíveis causas para essa variação pode ser atribuída às diferenças nos algoritmos de cálculo adotados pelo software Abaqus (DESSAULT SYSTÈMES, 2012) e por Hozjan *et al.* (2011). Outra possibilidade refere-se às condições de contorno utilizadas; o autor adotou dois planos de simetria no modelo da viga mista, enquanto neste trabalho optou-se por apenas um plano. Apesar das diferenças nas curvas, especialmente no ponto B, acredita-se que, devido à menor emissividade desta região, ela libera

menos energia e, devido à menor espessura da alma em comparação com a mesa, ocorre maior absorção de energia, resultando em um maior aquecimento nesse ponto.

Os resultados nos pontos A, C e D demonstraram uma correspondência muito satisfatória com o estudo de referência. A precisão no ponto A reflete a representatividade confiável do comportamento do modelo computacional na mesa inferior da viga mista. O ponto C, por sua vez, confirma a capacidade do modelo computacional em representar a transferência de calor na interface aço-concreto. O desempenho da transferência de calor no interior da laje de concreto é evidenciado pela semelhança nos resultados do ponto D. Com base nesses resultados, é possível afirmar a confiabilidade do modelo desenvolvido em simular a transferência de calor por toda a viga mista.

## 7. ESTUDO 3: VALIDAÇÃO DA ANÁLISE TERMOMECÂNICA E ESTUDO DE SENSIBILIDADE

Para simular o comportamento termomecânico das vigas mistas S1 e S2 estudadas por Wainman e Kirby (1988), as análises termomecânicas via método dos elementos finitos realizadas nesta Seção foram conduzidas em dois passos. A fim de obter as temperaturas nodais em diferentes momentos de exposição à curva de incêndio padrão ISO 834 (ref.), o modelo computacional foi inicialmente (Passo 1) submetido a uma análise térmica. Para tanto, foram empregados os métodos de transferência de calor e as propriedades térmicas apresentadas no Estudo 2. Com as temperaturas nodais conhecidas, no Passo 2, efetuou-se a análise termomecânica do modelo desenvolvido. Inicialmente, aplicaram-se as forças concentradas definidas na Seção 3.3, mantendo a condição de temperatura ambiente (20°C), de maneira semelhante ao que foi realizado no Estudo 1. Posteriormente, as temperaturas nodais foram alteradas a fim de simular a condição de aquecimento.

Assim como no Estudo 1, o comportamento mecânico do aço estrutural foi simulado utilizando os modelos constitutivos *Elasticity* e *Plasticity*, enquanto o comportamento mecânico do concreto foi simulado com os modelos constitutivos *Elasticity* e *CDP*. Em ambos os casos, as curvas que definem o comportamento dos materiais em elevadas temperaturas (Figuras 6.B, 7.B, 8.B e 9) foram informadas ao software Abaqus (DASSAULT SYSTÈMES, 2012).

A fim de realizar uma análise de sensibilidade do modelo computacional quanto à influência da interação aço-concreto no comportamento estrutural da viga mista, foram estabelecidos dois tipos de interação: total e parcial. A interação total foi implementada no modelo por meio da restrição do tipo *Tie* entre as superfícies de contato do perfil de aço com a laje de concreto. Para simular a interação parcial, optou-se por adotar *Fasteners* do tipo *Point-Based*, como descrito no Estudo 1.

### 7.1 RESULTADOS

Os resultados obtidos pelos modelos computacionais desenvolvidos, considerando diferentes tipos de interação, são apresentados na Figura 17, juntamente com os resultados de Wainman e Kirby (1988). Para efeito de comparação, também foram incluídos os resultados computacionais de Huang, Burges e Plank (1999) e de Hozjan *et al.* (2011) ao simularem o mesmo problema.

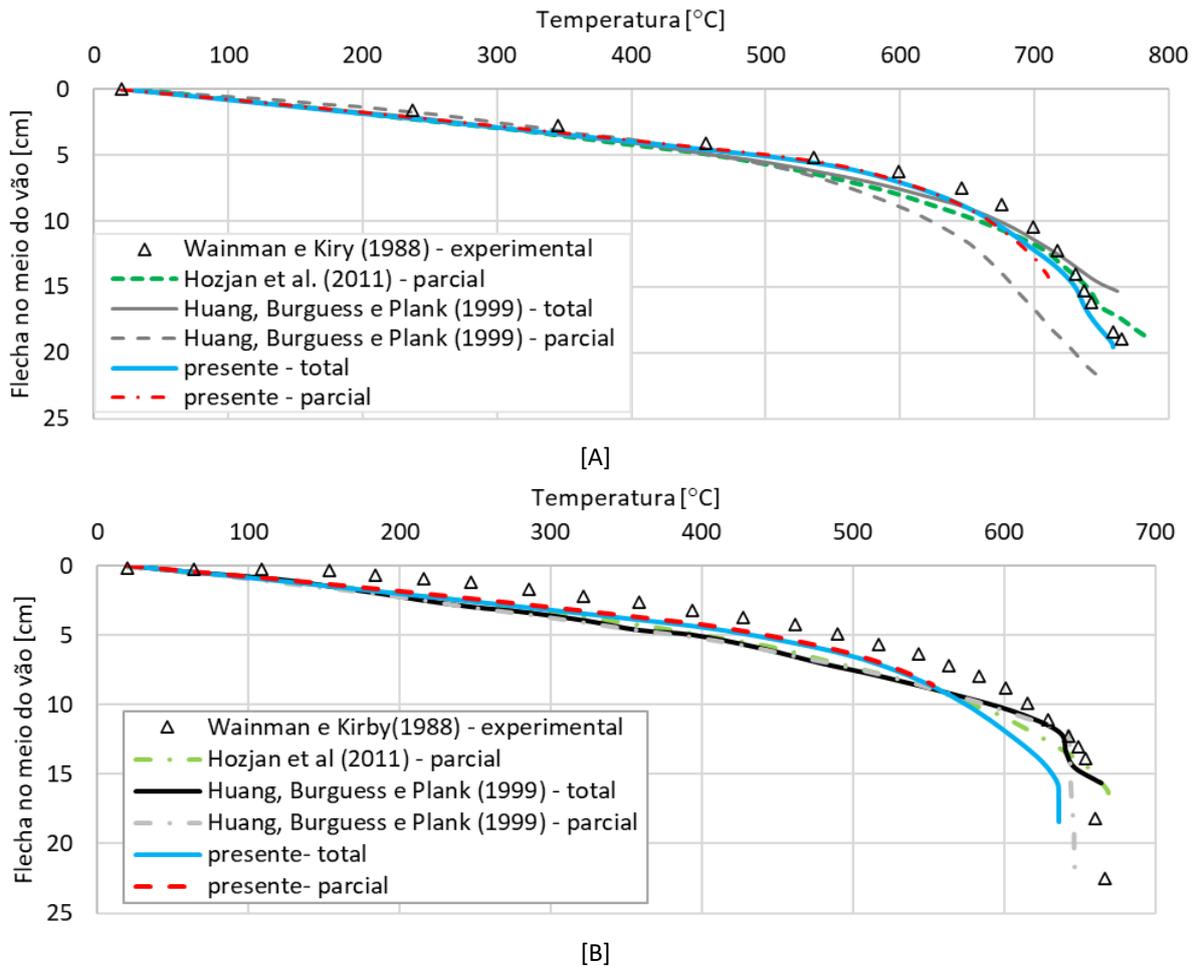


FIGURA 17: [A] Resultados obtidos pelo modelo S1 e [B] resultados obtidos pelo modelo S2.

FONTE: Autores.

## 7.2 DISCUSSÃO

Comparando os resultados obtidos com os resultados de referência, nota-se que os modelos desenvolvidos foram capazes de representar o comportamento observado nas vigas mistas reais em situação de incêndio. Em ambos os casos, é possível observar que os resultados computacionais encontrados neste trabalho se aproximam mais dos resultados experimentais de Wainman e Kirby (1988) do que os resultados computacionais obtidos por outros autores. Isso indica que as estratégias adotadas para simular a interface aço-concreto e o comportamento mecânico dos materiais são adequadas.

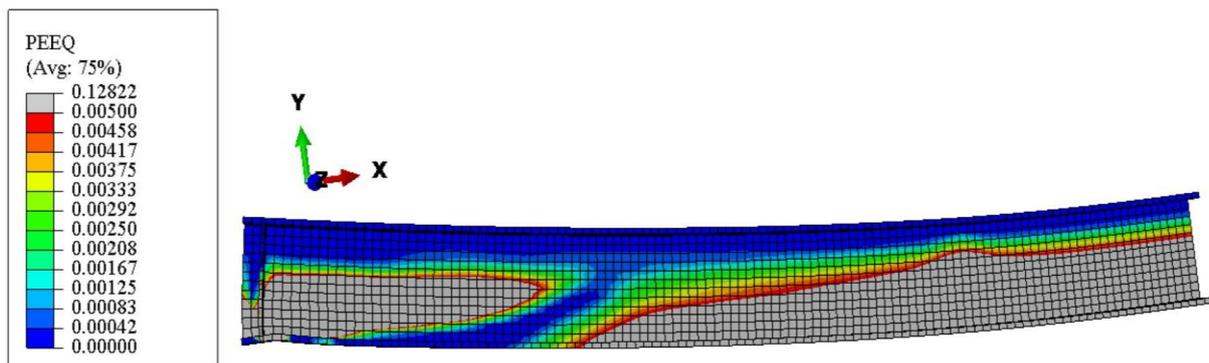
Ao analisar os resultados para o modelo S1 com interação total, observa-se um rápido aumento da flecha no centro da viga a partir da temperatura de 700°C, ponto crítico também identificado por Hozjan *et al.* (2011). A ruptura da viga mista experimental ocorreu aproximadamente a 765°C, enquanto o modelo desenvolvido rompeu por volta de 760°C. Em ambos os casos, a flecha máxima apresentada foi de 19 cm e o Tempo de Resistência ao Fogo foi de 29 minutos.

O modelo S1 com interação parcial apresentou um comportamento semelhante ao modelo com interação total, assim como observado no estudo de Huang, Burgess e Plank (1999). No entanto, a flecha no ponto central da viga mista começou a aumentar significativamente a partir da temperatura de 600°C. A ruptura ocorreu por volta de 710°C, com uma flecha máxima de 14 cm. O TRF apresentado pelo modelo foi de 22 minutos, valor abaixo do necessário (30 minutos) para um edifício residencial de até 12 metros de

altura (ABNT NBR 14432:2000). É importante salientar que o modelo analisa o elemento estrutural de maneira isolada e não o sistema estrutural global. Dessa forma, a ruptura precoce da viga mista não necessariamente acarreta a ruptura do sistema como um todo.

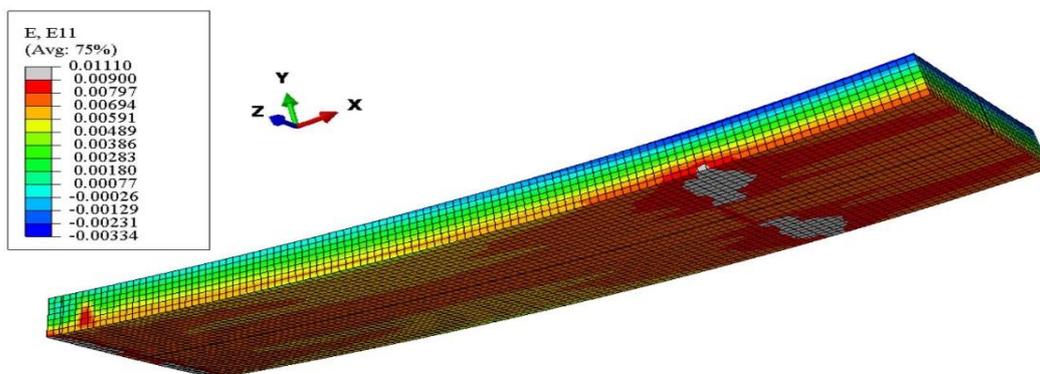
Ao analisar o modelo S2, percebe-se que as curvas obtidas pelos modelos com interação total e parcial se sobrepõem. Ambas se aproximaram mais da curva experimental do que os demais modelos referenciados, especialmente até a temperatura de aproximadamente 550°C. No entanto, o modelo S2 com interação parcial interrompeu prematuramente a análise, atingindo temperatura máxima igual a 552°C. Por outro lado, a ruptura do modelo S2 com interação total foi evidente, apresentando uma queda brusca na flecha próxima à temperatura de 635°C, com um TRF de aproximadamente 16 minutos.

As propriedades mecânicas do aço quando submetido a elevadas temperaturas são definidas a partir de um número reduzido de parâmetros, enquanto que, para o concreto, o número de parâmetros é grande, permitindo importantes variações dentro de uma mesma classe do material (HUANG, BURGUESS; PLANK, 1999). Assim, o motivo da ruptura dos modelos S1 e S2 é difícil de ser determinado com exatidão, podendo estar relacionado com um dos seguintes critérios: ruptura no perfil metálico devido à plastificação (Figura 18), ruptura na laje de concreto por fissuração (Figura 19) e/ou ruptura nos conectores em função dos esforços cisalhantes que surgem na interface aço concreto.



**FIGURA 18:** Deformações plásticas no perfil da aço do modelo S1 com interação completa para um TRF próximo ao colapso estrutural, em cinza região plastificada.

**FONTE:** Autores.



**FIGURA 19:** Deformações normais na direção X da laje de concreto do modelo S1 com interação completa, em cinza região fissurada.

**FONTE:** Autores.

## 8. CONCLUSÕES

O presente trabalho apresentou uma metodologia de modelagem computacional de vigas mistas de aço e concreto em situação de incêndio, dando ênfase no tratamento computacional da interface entre aço-concreto e no comportamento mecânico dos materiais. Para validar as estratégias computacionais utilizadas, foram desenvolvidos três estudos abordando aspectos importantes para a modelagem numérica de vigas mistas.

O primeiro estudo correspondeu a uma simulação do comportamento mecânico de vigas mistas de aço e concreto em temperatura ambiente. Neste estudo, a interface aço-concreto foi simulada usando elementos de conexão (molas) não-lineares, onde cada um representou um conector de cisalhamento do tipo pino com cabeça (stud bolt). O comportamento mecânico desses conectores foi informado aos elementos de conexão por meio da curva característica Força versus Deslizamento, determinada a partir de ensaios de cisalhamento direto do tipo push-out. Os resultados obtidos foram similares aos resultados experimentais de Chapman e Balakrishnan (1964) para vigas mistas com interação total ou parcial. Isso demonstra que as estratégias computacionais utilizadas são capazes de simular a ação dos conectores de cisalhamento em vigas mistas e podem ser empregadas para construir modelos com diferentes graus de interação.

O segundo estudo tratou da análise térmica de vigas mistas de aço e concreto. Neste estudo, os mecanismos de transferência de calor (convecção, condução e radiação) foram empregados nas superfícies do modelo computacional a fim de conhecer a distribuição de temperatura ao longo da seção transversal do modelo. De forma geral, os resultados obtidos apresentaram boa concordância com os resultados computacionais de Hozjan *et al.* (2011), o que demonstra que as estratégias adotadas para transferência de calor são adequadas.

Por fim, no terceiro estudo, desenvolveu-se um modelo computacional capaz de simular o comportamento termomecânico da viga mista de aço e concreto em condições de incêndio, utilizando os pontos-chave tratados nos estudos anteriores. Adicionalmente, foram analisados aspectos relacionados à sensibilidade na interação aço-concreto. Os resultados computacionais obtidos mostraram consistência com os resultados experimentais e numéricos de referência, permitindo concluir que a metodologia e as estratégias utilizadas para simular o comportamento da viga mista são válidas. No que diz respeito à análise de sensibilidade da interface aço-concreto, observou-se semelhança no comportamento estrutural ao empregar interação total e parcial, o que também foi identificado por Huang, Burgess e Plank (1999).

Ressalta-se que, embora a compreensão do comportamento de estruturas mistas de aço e concreto em situações de incêndio seja desafiadora devido às inúmeras incertezas associadas aos fenômenos de transferência de calor e aos testes reais em elevadas temperaturas, o modelo computacional desenvolvido foi capaz de representar adequadamente o comportamento da viga mista de aço e concreto analisada. A metodologia de modelagem computacional proposta neste trabalho pode auxiliar no desenvolvimento de novos estudos na área, tais como a análise de vigas mistas com proteção, estudos de variação da espessura da laje, das dimensões do perfil metálico, variações do tipo e intensidade das cargas, bem como o uso de diferentes conectores em vigas mistas.

## 9. AGRADECIMENTOS

Os autores gostariam de agradecer à Universidade Federal de Viçosa pela estrutura fornecida para a realização do trabalho.

## 10. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 14323: Projeto de estruturas de aço e de estruturas mistas de aço e concreto de edifícios em situação de incêndio**. 2 ed. Rio de Janeiro: 2013.89 p.
- BYFIELD, M. P.; DHANALAKSHMI, M. **Analysis of strain hardening in steel beams using mill tests**. In: *Advances in Steel Structures (ICASS'02)*. Elsevier, 2002. p. 139-146. <https://doi.org/10.1016/B978-008044017-0/50015-9>.
- CHAPMAN, J. C.; BALAKRISHNAN, S. **Experiments on composite beams**. *The Structural Engineer*, v. 42, n. 11, p. 369-383, 1964.
- COMITÊ EUROPEU DE NORMALIZAÇÃO. **EN-1993-1-2: Eurocode 3: Design of Steel Structures**. Brussels, Belgium, 2004. 78 p.
- COMITÊ EUROPEU DE NORMALIZAÇÃO. **EN-1994-1-2: Eurocode 4: Design of Composite Steel and Concrete Structures**. Brussels, Belgium, 2004. 109 p.
- DASSAULT SYSTÈMES. **ABAQUS** (DESSAULT SYSTÈMES, 2012) 6.12. Providence, RI, USA. 2012 (Software).
- DAVOODNABI, Seyed Mehdi; MIRHOSSEINI, Seyed Mohammad; SHARIATI, Mahdi. **Analyzing shear strength of steel-concrete composite beam with angle connectors at elevated temperature using finite element method**. *Steel and Composite Structures, An International Journal*, v. 40, n. 6, p. 853-868, 2021. <https://doi.org/10.12989/scs.2021.40.6.853>.
- FEDERAÇÃO INTERNACIONAL DO BETÃO. **Model Code 2010: final draft**. Lausanne (Suíça), 2011. 656 p.
- HOZJAN, T., SAJE, M., SRPČIČ, S., PLANINC, I. **Fire analysis of steel–concrete composite beam with interlayer slip**. *Computers & structures*, v. 89, n. 1-2, p. 189-200, 2011. <https://doi.org/10.1016/j.compstruc.2010.09.004>
- HUANG, Zhaohui; BURGESS, Ian W.; PLANK, Roger J. **The influence of shear connectors on the behavior of composite steel-framed buildings in fire**. *Journal of Construction Steel Research*, [S.l.], v. 51, p.219-237, 2011. [https://doi.org/10.1016/S0143-974X\(99\)00028-0](https://doi.org/10.1016/S0143-974X(99)00028-0).
- KIRCHHOF, Larissa Degliuomini; NETO, Jorge Munaiar; MALITE, Maximiliano; GONÇALVES, Roberto Martins. **Análise numérica de viga mistas aço-concreto em temperatura ambiente e em situação de incêndio**. *Semana: Ciências Exatas e Tecnológica*, Londrina, v. 26, n. 1, p. 69-82, 2005.
- KORDINA, K.; DROESE, S. **Versuche Mit Form Stahlbewehrten Stahlbetonbalken**. *BAUINGENIEUR, DER*, v. 62, n. 3, 1987.
- LI, Guo-Qiang; ZHANG, Nasi; JIANG, Jian. **Experimental investigation on thermal and mechanical behaviour of composite floors exposed to standard fire**. *Fire Safety Journal*, v. 89, p. 63-76, 2017. <https://doi.org/10.1016/j.firesaf.2017.02.009>.
- MARAVEAS, Chrysanthos; SWAILES, Thomas; WANG, Yong. **A detailed methodology for the finite element analysis of asymmetric slim floor beams in fire**. *Steel Construction*, v. 5, n. 3, p. 191-198, 2012. <https://doi.org/10.1002/stco.201210024>.
- MARTINS, Michele Mendonça. **Dimensionamento de estruturas de aço em situação de incêndio**. 232 p. Dissertação (Mestrado) Escola de Engenharia, Universidade Federal de Minas Gerais. Belo Horizonte, Minas Gerais, 2000.
- MIRZA, Olivia; UY, Brian. **Behaviour of headed stud shear connectors for composite steel–concrete beams at elevated temperatures**. *Journal of Constructional Steel Research*, v. 65, n. 3, p. 662-674, 2009. <https://doi.org/10.1016/j.jcsr.2008.03.008>.

PENG, Xing; ZHOU, Man. **Thermo-mechanical behavior of composite beams with corrugated steel webs exposed to localized fire.** Journal of Constructional Steel Research, v. 211, p. 108180, 2023. <https://doi.org/10.1016/j.jcsr.2023.108180>.

ROCHA, P.A.S.; SILVA, K.I. **Estudo do desempenho de vigas em situação de incêndio a partir do modelo de fibras.** Revista Internacional de Métodos Numéricos Para Cálculo y Diseño En Ingeniería, Ouro Pedro, v. 1-2, n. 33, p.65-71, 2017.

SANTOS, Daniel Bonfim Rocha. **Modelagem numérica de lajes mistas de aço e concreto em situação de incêndio.** 2014. 243 p. Dissertação (Mestrado) – Escola de Engenharia de São Carlos da Universidade de São Paulo, Departamento de Engenharia de Estruturas, Universidade de São Paulo, São Carlos, 2014.

SHAHABI, S., SULONG, N., SHARIATI, M., SHAH, S. **Performance of shear connectors at elevated temperatures-A review.** Steel Composite Structures, 20(1), 185-203, 2016. <http://dx.doi.org/10.12989/scs.2016.20.1.185>.

WAINMAN, D.E.; KIRBY, B.R. **Compendium of UK standard fire test data, unprotected structural steel 1.** Ref. No RS/RSC/S10328/1/87/B. Rotherham (UK): Swiden Laboratories, British Steel Corporation, 1988.

WALD, F., DA SILVA, L. S., MOORE, D. B., LENNON, T., CHLADNA, M., SANTIAGO, A., BORGES, L. **Experimental behaviour of a steel structure under natural fire.** Fire Safety Journal, v. 41, n. 7, p. 509-522, 2006. <https://doi.org/10.1016/j.firesaf.2006.05.006>.