LUCAS COSCIA ROMAGNOLI

ANÁLISE DE VIGAS MISTAS DE AÇO E CONCRETO SEMICONTÍNUAS EM SITUAÇÃO DE INCÊNDIO

São Paulo

2018

LUCAS COSCIA ROMAGNOLI

ANÁLISE DE VIGAS MISTAS DE AÇO E CONCRETO SEMICONTÍNUAS EM SITUAÇÃO DE INCÊNDIO

Dissertação apresentada à Escola Politécnica da Universidade de São Paulo para obtenção do título de Mestre em Ciências.

São Paulo

2018

LUCAS COSCIA ROMAGNOLI

ANÁLISE DE VIGAS MISTAS DE AÇO E CONCRETO SEMICONTÍNUAS EM SITUAÇÃO DE INCÊNDIO

Dissertação apresentada à Escola Politécnica da Universidade de São Paulo para obtenção do título de Mestre em Ciências.

Área de concentração:
Engenharia de Estruturas

Orientador:
Prof. Dr. Valdir Pignatta e Silva

São Paulo

2018

Este exemplar foi revisado e alterado em relação à versão original, sob responsabilidade única do autor e com a anuência de seu orientador.

São Paulo, 15 de agosto de 2018

Lucas Coscia Romagnoli

Prof. Dr. Valdir Pignatta e Silva

Catalogação-na-publicação

Romagnoli, Lucas Coscia

Análise de vigas mistas de aço e concreto semicontínuas em situação de incêndio / L. C. Romagnoli – versão corr. -- São Paulo, 2018.

301 p.

Dissertação (Mestrado) - Escola Politécnica da Universidade de São Paulo. Departamento de Engenharia de Estruturas e Geotécnica.

1.incêndio 2.estruturas de aço 3.estruturas mistas 4.vigas I.Universidade de São Paulo. Escola Politécnica. Departamento de Engenharia de Estruturas e Geotécnica II.t.

AGRADECIMENTOS

À Universidade e a seu corpo docente por fornecer as ferramentas e conhecimentos necessários para me tornaram um profissional capaz de praticar engenharia com ética e qualidade.

A meu orientador Valdir por seu tempo e dedicação nas correções, incentivos e esclarecimentos que tornaram possível a conclusão dos estudos.

A minha família e amigos pelo apoio e presença constantes em minha vida.

RESUMO

Na Dissertação de Mestrado foi realizado um estudo sobre o comportamento de vigas mistas de aço e concreto biapoiadas sob iteração completa, compostas por perfis classificados como compactos em situação de incêndio. Apesar de ditas biapoiadas, a ideia principal da Dissertação é considerar, na análise em situação de incêndio, a reserva de capacidade existente nas extremidades dessas vigas, usualmente desprezada no dimensionamento à temperatura ambiente, provinda da continuidade da armadura longitudinal negativa presente na laje de concreto, sendo possível dispensar o revestimento contra fogo nesses elementos.

Serão abordados, de início, os métodos de dimensionamento ao Estado-Limite Último de vigas mistas à temperatura ambiente, a fim de explicar o comportamento estrutural desse tipo de elemento, dando base para a posterior análise térmica. A análise térmica foi realizada, em uma primeira etapa, por métodos simplificados segundo normas vigentes e tomando hipóteses simplificadoras em que se desprezam esforços indiretos provocados pela dilatação térmica e gradiente térmico, sendo possível aplicar os conceitos no dia a dia de projeto.

Numa segunda etapa foi realizada análise termestrutural com modelos numéricos para estudar o comportamento e colapso da viga, sendo os resultados suficientes para validar os valores de TRF encontrados por análise simplificada seguindo métodos normativos.

Como conclusão, o ganho de capacidade estrutural da viga, proporcionado pela adoção da ligação mista no apoio, foi suficiente para situações de TRRFs entre 15 min e 21 min, no caso de perfis mais leves, com geometria própria para serem utilizados como vigas de piso de edifícios. Análises mostraram que não é possível justificar a ausência de revestimento contra incêndio para TRRFs de 30 min ou superiores. Tempos inferiores podem ser adotados de acordo com o denominado método do tempo equivalente, limitado a 15 min e são mais usuais para edificações de pequeno porte.

Palavras-Chave: incêndio; estruturas metálicas; estruturas mistas de aço e concreto; análise termestrutural; vigas semicontínuas.

ABSTRACT

A study will be carried out on the behavior of simply supported, full interaction composite steel and concrete beams composed by compact profiles in fire situation. Despite being designed as simply supported, the main idea is to consider, in the fire situation analysis, the moment resistance capacity reserve on the beam supports, usually neglected during room temperature design, due to the upper longitudinal reinforcement present in the concrete slab, being possible to dispense fireproof coating in these elements.

First, room temperature design procedures of composite beams will be approached in order to explain the structural behavior of this type of elements, providing a basis for subsequent thermal analysis. The thermal analysis will be carried out, in a first stage, by simplified methods according to design procedures and adopting simplifying hypotheses in which indirect stresses caused by thermal expansion and thermal gradient are neglected, being possible to apply those concepts in structural design offices.

In a second step, thermal stress analyses were performed with aid of numerical models to study the structural behavior and collapse time of the beam. The results were sufficient to validate the fire resistance time values found by the simplified analysis following design methods.

As a conclusion, the structural capacity increase of the beam, provided by the adoption of the composite connection at the support in case of lighter steel profiles usually chosen to be used as buildings floor beams, was sufficient for situations of standard fire resistance requirements between 15 min and 21 min. Analyzes have shown that it is not possible to justify the absence of fire resistant coating for standard fire resistance requirements of 30 min or higher. Lower times can be adopted according to the so-called equivalent time method, limited to 15 min, which are more common for small buildings.

Key-words: fire; steel structures; composite steel and concrete structures; thermal structure analysis; semicontinuous beams.

LISTA DE SIMBOLOS

a- espessura da região comprimida da laje

b - largura efetiva da laje de concreto

b_f - largura da mesa do perfil de aço

b_{fc} - a largura da mesa comprimida

b_{fi} - largura da mesa inferior da seção

b_{fs} - largura da mesa superior da seção

b_F - largura média da nervura da fôrma de aço situada sobre o perfil

c - calor específico

$\mathrm{c_a}$ - calor específico do aço

$\mathrm{c_c}$ - calor específico do concreto

c_1 - distância da face superior da laje ao C.G. da armadura passiva

d - altura total da seção transversal

d^n - distância do C.G. de cada fatia comprimida à face superior da laje

d_s - distância do C.G. da armadura longitudinal à face superior do perfil de aço

d_{inf} - distância entre o centro geométrico da seção de aço isolada até a face externa da mesa inferior do perfil

d_{sup} - distância entre o centro geométrico da seção de aço isolada até a face externa da mesa superior do perfil

e - distância entre os centros geométricos da seção de aço e da seção de concreto

e_{mh}- distância da borda do fuste do conector de cisalhamento à alma da nervura da fôrma de aço, medida à meia altura da nervura e no sentido do cisalhamento que atua no conector

f - deslocamento vertical no meio do vão (flecha)

f_{cd} - resistência à compressão de cálculo do concreto

$f_{cd,\theta}$ - resistência à compressão de cálculo do concreto em função da temperatura

f_{ck} - resistência à compressão característica do concreto

f_{sd} - resistência ao escoamento de cálculo do aço da armadura passiva

$f_{sd,\theta}$ - resistência ao escoamento de cálculo do aço da armadura passiva em função da temperatura

f_{sk}- resistência ao escoamento característica do aço da armadura passiva

f_{ucs} - resistência à ruptura do aço do conector de cisalhamento

f_y - resistência ao escoamento característica do aço

f_{yd} - resistência ao escoamento de cálculo do aço

$f_{yd,\theta}$ - resistência ao escoamento de cálculo do aço em função da temperatura

h - altura da alma do perfil de aço; altura do forno

h^n - espessura de cada fatia “n” de laje considerada

h_c - duas vezes a distância do centro geométrico da seção à face interna da mesa comprimida

h_p - duas vezes a distância da linha neutra plástica da seção à face interna da mesa comprimida

h_{ef} - altura efetiva da laje exposta ao incêndio

h_w - altura da alma do perfil de aço

h_F - espessura da pré-laje pré-moldada de concreto ou a altura das nervuras da laje em fôrma de aço incorporada

k_c - fator aplicado ao estado limite FLM de perfis soldados

$k_{c,\theta}$ - fator de redução para a resistência à compressão característica do concreto

$k_{E,\theta}$ - fator de redução para o módulo de elasticidade do aço

$k_{s,\theta}$ - fator de redução para a resistência do aço da armadura passiva

$k_{y,\theta}$ - fator de redução para a resistência ao escoamento do aço

$k_{\sigma,\theta}$ - fator de redução para elementos esbeltos de aço

k_{sh} - fator de sombreamento

k_v - coeficiente para consideração de enrijecedores transversais

m_a - massa de aço

n_b - número de parafusos

n_{cs} - número de conectores de cisalhamento

p - carregamento uniformemente distribuído

p_0 - máximo carregamento distribuído à temperatura ambiente

p_{fi} - máximo carregamento distribuído em situação de incêndio

q - fluxo de calor; carregamento uniformemente distribuído

r - fluxo de calor externo

s - espaçamento transversal das barras da armadura

t - tempo

t_c - altura da laje colaborante de concreto

t_f - espessura da mesa do perfil de aço

t_{fc} - espessura da mesa comprimida

t_{fi} - espessura da mesa inferior da seção

t_{fs} - espessura da mesa superior da seção

t_w - espessura da alma do perfil de aço

u_{exp} - perímetro exposto

w - largura do forno

x - vetor de coordenadas

y - distância entre o topo do perfil de aço e o centro geométrico da armadura passiva na laje de concreto

y_a - distância entre a linha neutra da seção mista e o centro geométrico do perfil de aço isolado

y_c - distância entre a linha neutra da seção mista e o centro geométrico da laje

y_p - distância da LNP relativa à face superior do perfil de aço

A - área

A_a - área da seção de aço isolada

A_c - área da seção de concreto isolada

A_{cs} - área da seção transversal do conector de cisalhamento

A_{exp} - área exposta

$A_{f,inf}$ - área da mesa inferior do perfil de aço

$A_{f,sup}$ - área da mesa superior do perfil de aço

A_L - a área da aba da cantoneira inferior

A_{sl} - área total de armadura longitudinal na largura efetiva da laje de concreto

A_m - área da seção mista

A_w - área da alma

C_b - coeficiente de diagrama de momento não-uniforme

$C_{ad,fi}$ - força de compressão no perfil de aço em situação de incêndio

$C_{cd,fi}$ - força de compressão na laje de concreto em situação de incêndio

E - módulo de elasticidade do aço

E_{CS} - módulo de elasticidade secante do concreto

F - fator de massividade

F_b - fator de massividade de uma caixa hipotética envolvendo o perfil de aço

$F_{b,Rd}$ - força resistente de cálculo do parafuso

$F_{cs,Rd}$ - força resistente dos conectores de cisalhamento

F_{hd} - força solicitante dos conectores entre a seção de momento nulo e a seção de momento máximo

$F_{i,Rd}$ - força resistente de cálculo da mesa inferior do perfil na região da ligação

$F_{L,yd}$ - força resistente de cálculo ao escoamento da cantoneira inferior

$F_{s,Rd}$ - força resistente da armadura negativa

I_a - momento principal de inércia da seção de aço isolada

I_c- momento principal de inércia da seção de concreto isolada

I_{ef} - momento principal de inércia efetivo da seção mista

I_m - momento principal de inércia da seção mista

I_t- momento de inércia à torção da seção transversal

I_w - momento de inércia ao empenamento da seção transversal

I_y - menor momento de inércia da seção transversal

I_{yc} - momento de inércia da mesa comprimida em relação ao eixo de menor inércia da seção transversal

I_{yt} - momento de inércia da mesa tracionada em relação ao eixo de menor inércia da seção transversal

L - comprimento do vão; comprimento do forno

L_0 - comprimento inicial

L_b - comprimento destravado

L_e - distância entre pontos de momento fletor nulo

L_m - parâmetro associado ao comprimento do forno

M - momento fletor

M_{cr} - momento fletor crítico

M_{pl} - momento de plastificação

M_{Rd} - momento fletor negativo resistente de cálculo

$M_{Rd,0}$ - momento fletor resistente de cálculo à temperatura ambiente

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

Q_{abs} - calor absorvido

$\dot{Q}_{abs}$ - fluxo de calor absorvido

$\dot{Q}_{inc}$ - fluxo de calor incidente

Q_{Rd} - força resistente de cálculo do conector de cisalhamento

$Q_{Rd,fi}$ - força resistente de cálculo do conector de cisalhamento em situação de incêndio

R_g - coeficiente para consideração do efeito de atuação de grupos de conectores de cisalhamento

R_p - é um coeficiente para consideração da posição do conector de cisalhamento

S - área superficial

S_d - solicitações de cálculo à temperatura ambiente

$S_{d,fi}$ - solicitações de cálculo em situação de incêndio

T - temperatura em Kelvins

$T_{ad,fi}$ - força de tração no perfil de aço em situação de incêndio

T_{ds} - força de tração na armadura longitudinal da laje de concreto

T_g - temperatura dos gases, em Kelvins

T_s - temperatura na superfície, em Kelvins

V - volume

$V_{Rd,fi}$ - força cortante resistente de cálculo em situação de incêndio

W - módulo de resistência elástico

X_1 a X_5 - coeficiente para determinação da emissividade equivalente

Z - módulo de resistência plástico

α - coeficiente de dilatação térmica

α_c - coeficiente de transferência de calor por convecção

α_E - razão modular

α_g - coeficiente para determinação da emissividade equivalente

α_y - fator de assimetria da seção transversal

β_3 - fator para determinação do momento fletor crítico

γ - fator de proporcionalidade

γ_{cs} - coeficiente de ponderação para conectores de cisalhamento

δ - deslocamento no centro do vão

$\delta\theta$ - campo de temperatura arbitrário

ε_{eq} - emissividade equivalente

ε_g - coeficiente para determinação da emissividade equivalente

ε_{res} - emissividade resultante

η_i - grau de interação da viga mista

θ - temperatura; rotação no apoio

θ_0 - temperatura inicial

θ_g - temperatura dos gases

θ_h - temperatura do elemento de ligação localizado na altura h

θ_s - temperatura na superfície

κ - fator de correção para distribuição não uniforme de temperatura

λ - matriz de condutividade térmica ou parâmetro de esbeltez da alma do perfil de aço

λ_a - condutividade térmica do aço

λ_c - condutividade térmica do concreto

$\lambda_{0,fi}$ - índice de esbeltez reduzido em situação de incêndio

$\lambda_{p,fi}$ - esbeltez limite para o comportamento plástico em situação de incêndio

$\lambda_{r,fi}$ - esbeltez limite para o comportamento elástico em situação de incêndio

χ_{fi} - fator de redução de instabilidade em situação de incêndio

ρ - densidade; taxa de armadura

ρ_a - densidade do aço

σ - constante de Stefan-Boltzmann

τ_{ext} - trabalho externo

τ_{int} - trabalho interno

φ - fluxo de calor

φ_c - fluxo de calor devido à convecção

φ_{cond} - fluxo de calor por condução

φ_r - fluxo de calor por radiação

ΔL - variação de comprimento

Δt - intervalo de tempo

$\Delta\theta_a$ - variação da temperatura do aço

Σ - somatório

$\emptyset$ - diâmetro da barra de aço

SUMÁRIO

1 Introdução 17
1.1 Objetivos 17
1.2 Justificativas 20
1.3 Método 21
2 Estado da arte 22
3 Vigas Mistas Biapoiadas à Temperatura Ambiente 37
3.1 Introdução - Sistemas estruturais mistos de aço e concreto 37
3.1.1 Lajes mistas 38
3.1.2 Pilares mistos 40
3.1.3 Vigas mistas 41
3.2 Propriedades geométricas 44
3.2.1 Largura efetiva da laje colaborante 44
3.2.2 Seção transversal homogeneizada 46
3.2.3 Efeitos de longa duração do concreto 49
3.3 Conectores de cisalhamento 50
3.3.1 Interação parcial 50
3.3.2 Capacidade dos conectores 52
3.3.3 Cisalhamento longitudinal solicitante 57
3.4 Estado-Limite Último 60
3.4.1 Coeficientes de ponderação 61
3.4.2 Perfis compactos 61
3.4.3 Perfis "semiesbeltos" 62
3.4.4 Força cortante 63
3.5 Estado-Limite de Serviço 63
3.5.1 Coeficientes de ponderação 63
3.5.2 Deslocamentos 64
3.5.3 Validade da análise elástica 65
4 Caracterização do incêndio 67
4.1 Introdução 67
4.2 Transferência de calor 68
4.2.1 Condução 69
4.2.2 Convecção 73

4.2.3 Radiação 75
4.3 A ação do incêndio 77
4.3.1 Incêndio-padrão 78
4.3.2 Incêndio natural 80
4.3.3 Tempo requerido de resistência ao fogo (TRRF) 81
4.4 Aço e concreto submetidos a temperaturas elevadas 82
5 Vigas de aço biapoiadas em situação de incêndio 84
5.1 Introdução 84
5.2 Restrições de apoio 84
5.3 Temperatura no elemento de aço 86
5.3.1 Formulação 86
5.3.2 Roteiro de cálculo 89
5.4 Força cortante resistente 91
5.5 Momento fletor resistente 92
6 Vigas mistas de aço e concreto em situação de incêndio 93
6.1 Temperatura na seção transversal 93
6.1.1 Elementos de aço 93
6.1.2 Laje de concreto 94
6.2 Momento fletor resistente 95
6.2.1 Conectores de cisalhamento 96
6.2.2 Momentos fletores positivos 96
6.2.2.1 Linha neutra plástica na laje de concreto 98
6.2.2.2 Linha neutra plástica no perfil de aço 100
6.2.2.3 Interação parcial 102
6.2.3 Momentos fletores negativos 103
7 Ligações mistas semicontínuas 107
7.1 Introdução 107
7.2 Momento fletor resistente à temperatura ambiente 108
7.3 Momento fletor resistente em situação de incêndio 110
8 Análise plástica limite de viga semicontínua em situação de incêndio 114
8.1 Análise global plástica 114
8.1.1 Teorema cinemático 114
8.1.2 Viga biengastada com carregamento uniforme 115

8.2 Capacidade limite da viga mista semicontínua em situação de incêndio e fator de carga....116
9 Análise simplificada de vigas semicontínuas em situação de incêndio....118
9.1 TRRF de 30 min....118
9.1.1 Introdução....118
9.1.2 Exemplo de cálculo W310x32,7 com laje de 18 cm....119
9.1.2.1 Parâmetros de entrada....119
9.1.2.2 Análise à temperatura ambiente....120
9.1.2.3 Análise em situação de incêndio....122
9.1.2.4 Fator de carga....128
9.1.3 Análise dos perfis Gerdau....128
9.1.4 Conclusões....138
9.2 TRRF menores que 30 min....139
9.2.1 Introdução....139
9.2.2 Temperatura na laje de concreto....139
9.2.3 Resultados....143
9.2.4 Conclusões....175
10 Validação do modelo numérico....177
10.1 Introdução....177
10.2 Modelo numérico....180
10.3 Resultados....184
10.3.1 Ensaio 15....184
10.3.2 Ensaio 16....187
10.4 Conclusões....190
11 Análise do comportamento da viga semicontínua com auxílio de modelo numérico....192
11.1 Introdução....192
11.2 Modelos propostos....193
11.3 Geometria....197
11.3.1 Propriedade dos materiais....199
11.3.2 Interações e restrições....202
11.3.3 Condições de contorno....204
11.3.4 Malha de elementos finitos....206
11.3.5 Análises....207

11.4 Resultados 207
11.4.1 Análise térmica 208
11.4.2 Análise termo-estrutural 215
11.5 Conclusões a respeito da análise numérica 232
12 Conclusões 235
13 Referências 239
Anexo A - Momento fletor resistente de vigas mistas de aço e concreto segundo ABNT NBR 8800:2008 248
Anexo B -Tempos requeridos de resistência ao fogo (TRRF) segundo Corpo de Bombeiros - IT08:2011 255
Anexo C - Força cortante resistente de uma viga de aço à temperatura ambiente segundo ABNT NBR 8800:2008 262
Anexo D - Momento fletor resistente de uma viga de aço à temperatura ambiente segundo ABNT NBR 8800:2008 266
Anexo E - Características dos materiais em função da temperatura segundo ABNT NBR 14323:2013 e ABNT NBR 15200:2012 280
Anexo F - Método do tempo equivalente para redução do TRRF segundo Corpo de Bombeiros - IT08:2011 289
Anexo G - Força cortante resistente de uma viga de aço em situação de incêndio segundo ABNT NBR 14323:2013 294
Anexo H - Momento fletor resistente de uma viga de aço Em situação de incêndio segundo ABNT NBR 14323:2013 296

1 INTRODUÇÃO

1.1 Objetivos

O objetivo geral da Dissertação é compreender o comportamento de estruturas de aço e estruturas mistas de aço e concreto em situação de incêndio, sendo o objetivo específico relacionar a rigidez existente nos apoios das vigas biapoiadas, proporcionada pela adoção de ligação mista nos apoios, com o Estado-Limite Último em situação de incêndio, sendo possível, dessa forma, prescindir revestimento extra contra incêndio nesses elementos em específico.

Uma viga mista de aço e concreto biapoiada dimensionada para temperatura ambiente, quando analisada em situação de incêndio de acordo com os critérios da ABNT NBR 14323:2013, geralmente, não apresenta segurança estrutural suficiente a não ser que seja adotada a aplicação de revestimento contra fogo. Tal solução é responsável por elevar os custos relacionados à adoção do sistema misto.

Foi avaliado o comportamento de vigas mistas de aço e concreto em situação de incêndio, considerando a rigidez à rotação dos apoios proporcionada pela armadura negativa longitudinal presente na laje de concreto e pela restrição da mesa inferior do perfil de aço no apoio, formando uma ligação mista conforme ilustração da Figura 1.1 e garantindo um caráter semicontínuo à viga.

Caso uma viga tenha sido dimensionada como biapoiada à temperatura ambiente nota-se que será necessário acrescentar cantoneiras de apoio restringindo a mesa inferior do perfil de aço para consideração da semicontinuidade em uma análise em situação de incêndio, alterando o projeto inicial. No caso de avaliação de uma estrutura existente ainda é possível alterações em campo para instalação das cantoneiras ou uso de soldas para restrição da mesa inferior.

Nota-se que tal solução fica limitada a situações em que existem duas vigas adjacentes de mesma altura (ou alturas muito próximas), de modo a

não afetar a alma da viga de suporte. Para situações de perfis com diferentes alturas existe a necessidade de instalar enrijecedores na viga de suporte para transferência adequada do momento fletor negativo entre os perfis, aumentando a quantidade de intervenções em campo.

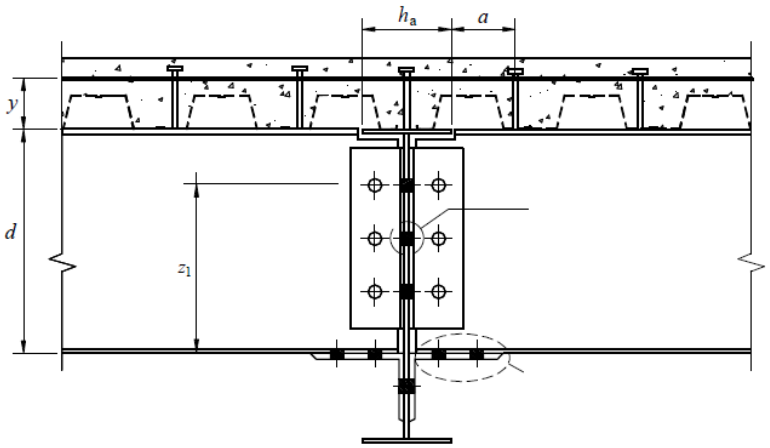


Figura 1.1 – Ligação mista nos apoios (Fonte: adaptado de ABNT NBR 8800:2008).

Foram estudadas diversas seções transversais mistas, percorrendo a variedade de perfis da marca Gerdau e espessuras de laje de 8 a 18 cm. Alguns perfis classificados como de mesa esbelta em situação de incêndio, ou seja, com relação entre largura e espessura superior a $0{,}32\sqrt{E/f_y}$, não foram considerados na análise.

O ganho de capacidade estrutural da viga, proporcionado pela adoção dessa solução, foi suficiente para situações de TRRFs entre 15 min e 21 min, no caso de perfis mais leves, com geometria própria para serem utilizados como vigas de piso de edifícios. Análises mostraram que não é possível justificar a ausência de revestimento contra incêndio para TRRFs de 30 min ou superiores. Tempos inferiores, podem ser adotados de acordo com o denominado método do tempo equivalente, limitado a 15 min.

Uma viga de aço sob laje de concreto suas faces não estão expostas de maneira igual à ação do incêndio já que a laje proporciona uma proteção parcial à mesa superior do perfil, levando a uma distribuição não uniforme da temperatura interna. Esse gradiente térmico ao longo da altura da seção

provoca deformações adicionais na viga e, no caso de estruturas hiperestáticas, esforços solicitantes indiretos devido à restrição de rotação nos apoios. A Figura 1.2 ilustra o fenômeno. Caso a estrutura já esteja sujeita a momentos fletores negativos no apoio, como no caso de vigas semicontínuas, esses podem vir a sofrer uma amplificação durante a exposição ao fogo.

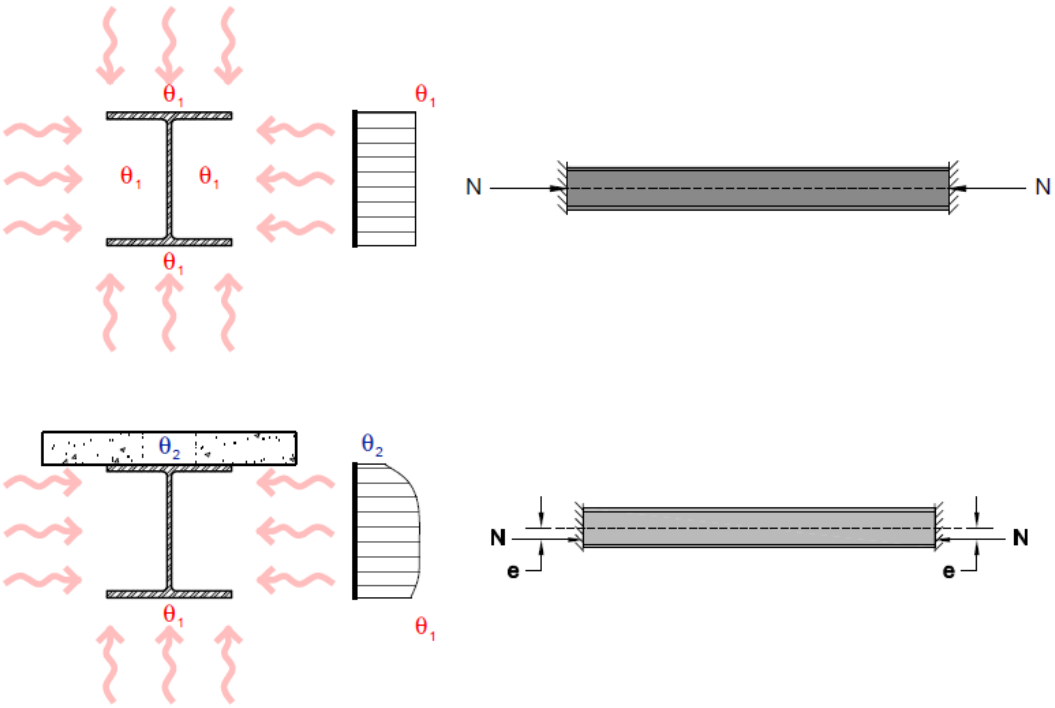


Figura 1.2 – Ilustração dos efeitos do gradiente térmico.

Esse efeito de amplificação foi desprezado na utilização de método simplificado e tal hipótese avaliada com auxílio de análise numérica termestrutural não linear. Os modelos avançados consideraram efeitos como esforços de catenária decorrentes das grandes deformações e comportamento não linear do material, que reduziram a influência das dilatações térmicas. Não foi necessário penalizar ainda mais o modelo simplificado que, visto considerar como Estado Limite Último a formação de rótulas plásticas, apresentou tempo de resistência inferior à análise numérica em todos os casos.

Vale ressaltar que para tomar proveito dos efeitos benéficos do comportamento não linear, a armadura longitudinal presente na laje deve se estender a todo comprimento da viga, e não apenas na região de momentos fletores negativos. Com isso a transferência dos esforços por efeito de catenária na laje fica garantida, sendo esse o principal mecanismo de equilíbrio do conjunto após perda de capacidade resistente do perfil de aço. Por esse motivo, a taxa de armadura calculada para cada caso pelo método simplificado deve ser aplicada à malha antifissuração, garantindo o equilíbrio durante as esperadas grandes deformações.

1.2 Justificativas

Quando projetadas à temperatura ambiente, as estruturas de aço, comparadas às estruturas convencionais de concreto armado, apresentam desempenho inferior em situação de incêndio, visto que os elementos estruturais de aço são mais esbeltos e o aço é melhor condutor térmico.

Essa desvantagem geralmente é contornada, por exemplo, aproveitando-se do contato com elementos mais robustos nas estruturas híbridas ou mistas, aumento da seção transversal dos elementos estruturais, ou uso de revestimentos contra fogo como argamassa projetada e tintas intumescentes. Os dois últimos métodos, obviamente, aumentam o custo final da construção.

Tendo em vista esse problema, estudou-se o comportamento sob ação do incêndio de vigas mistas de aço e concreto, sem instabilidades locais (ditas compactas), considerando a rigidez à flexão nos apoios fornecida pela armadura negativa longitudinal à viga, usualmente presente por meio de malhas antifissuração, e restrição da mesa inferior do perfil de aço, procedimento adicional necessário para desenvolvimento do momento fletor resistente no apoio. Geralmente as vigas mistas são dimensionadas à temperatura ambiente como biapoiadas e a semicontinuidade proporcionada por essa armadura longitudinal, se considerada em situação de incêndio, pode conduzir a uma alternativa para proteção contra fogo das vigas mistas.

O objetivo deste trabalho é verificar o ganho de resistência proporcionado por essa proposta, usando métodos simplificados.

O Estado-limite Último de formação de rótulas plásticas, em situação de incêndio, foi analisado por meio de método simplificado considerando as propriedades plásticas da seção transversal e desprezando esforços indiretos provenientes da dilatação térmica que serão estudados futuramente por meio de análise numérica não linear, verificando a aplicabilidade do método simplificado.

1.3 Método

A pesquisa inicia-se com o estudo do comportamento de estruturas de aço e estruturas mistas em situação de incêndio segundo bibliografias específicas. De início são apresentados os métodos de dimensionamento recomendados por normas brasileiras ou estrangeiras de vigas mistas biapoiadas à temperatura ambiente e a temperaturas elevadas, sem revestimento contra fogo, de modo a auxiliar o leitor na compreensão dos conceitos e teorias já desenvolvidas.

A próxima etapa propõe um modelo simplificado com base nos procedimentos normativos, capaz de considerar a rigidez nos apoios proporcionada pela armadura negativa da laje em vigas mistas biapoiadas, relacionando um aumento na resistência ao fogo desse tipo de peça estrutural.

O último passo envolve o desenvolvimento e validação de um modelo em elementos finitos com auxílio do programa de computador ABAQUS versão 6.12, capaz de realizar uma análise termestrutural e poder, assim, dar credibilidade ao modelo simplificado.

2 ESTADO DA ARTE

Usualmente a escolha por estruturas de aço é associada à necessidade imprescindível de adoção de revestimento contra fogo. Estudos na área de estruturas em situação de incêndio visam quebrar esse paradigma e compreender melhor os fenômenos associados ao incêndio em si ou ao comportamento de estruturas a temperaturas elevadas, permitindo, assim, edificações mais seguras e econômicas.

Wang (2002) afirma que o conceito de engenharia de segurança contra incêndio, pouco difundido no Brasil, teve início com os trabalhos de Pettersson et al. em 1976, com estudos sobre o desempenho de estruturas em aço durante um incêndio.

Procedimentos mais antigos de projeto de estruturas de aço em situação de incêndio se baseiam no denominado método prescritivo. Tal método propõe que os elementos de aço, para um dado TRRF (ver item 4.3.3), sejam limitados à temperatura de 550 ºC quando expostos ao incêndio-padrão, aceitando-se de maneira simplista que o aço pode não ser seguro em temperaturas superiores. A temperatura final do aço passa a ser o único fator a ser avaliado, sem qualquer consideração sobre o tipo de incêndio a que o edifício está exposto, as condições de carregamento ou a interação com outros elementos estruturais ou não, resultando, obviamente, em soluções extremamente conservadoras. Estudos atuais buscam avaliar todos esses parâmetros durante o projeto, de modo que a temperatura do aço quando exposto ao incêndio-padrão passa a ser apenas um deles.

Robinson e Latham (1986 apud Wang, 2002) apontam que em 1986 o uso de revestimentos contra fogo representava 30% do custo total de uma estrutura de aço, o que gerava uma enorme desvantagem em relação, principalmente, às estruturas de concreto. Com esse problema em mente, tanto a indústria do aço como a comunidade científica buscaram estudar o efeito do incêndio no comportamento das estruturas.

Nesse contexto deve-se mencionar o ensaio de grande escala realizado nos anos 90 no laboratório de Cardington, Reino Unido, de um

edifício misto de aço e concreto de oito andares submetido a um incêndio. Devido a restrições no orçamento poucos ensaios foram realizados, porém foram responsáveis por prover informações quantitativas de grande importância que deram base ao estudo do desempenho de estruturas em situação de incêndio. Ainda hoje os resultados do ensaio de Cardington servem de parâmetro para estudos e pesquisas na área de estruturas em situação de incêndio.

Figura 2.1 – Ensaio de Cardington (Fonte: Hera, Innovation in Metals[1])

Usmani et al. (2001) destacam que nos ensaios de Cardington foi constatada uma grande reserva de capacidade resistente na estrutura mista em comparação às recomendações normatizadas e observou a possibilidade de economia em materiais de revestimento contra fogo para esse tipo de sistema estrutural. Em seu trabalho enfatizam que a degradação das propriedades mecânicas do material e as ações gravitacionais não têm tanta importância quanto os efeitos da dilatação térmica e deformações na determinação dos esforços solicitantes das vigas

[1] Disponível em <https://www.hera.org.nz/images/structural_systems/8storey_testBlg.jpg>. Acesso em mar. 2017.

em situação de incêndio, que geralmente são desprezados pelos métodos simplificados normatizados. Com um modelo numérico de uma viga simples de aço biapoiada, restringida axialmente, mostra como a consideração de um gradiente térmico uniforme ao longo da altura da viga é suficiente para induzir esforços de tração e alterar o deslocamento no centro do vão. Na Figura 2.2 (a) nota-se que ao variar o gradiente térmico ao longo da altura de 1º C/mm até 10 ºC/mm o deslocamento no meio do vão possui uma característica não linear mesmo para temperaturas baixas, o que não ocorre quando não há consideração do gradiente térmico. A Figura 2.2 (b) mostra que para o modelo governado puramente pela dilatação térmica a força axial induzida na viga é puramente de compressão. Para o modelo com consideração de gradientes térmicos, essa força axial de compressão começa a diminuir, tornando-se tração para o gradiente de 10 ºC/mm.

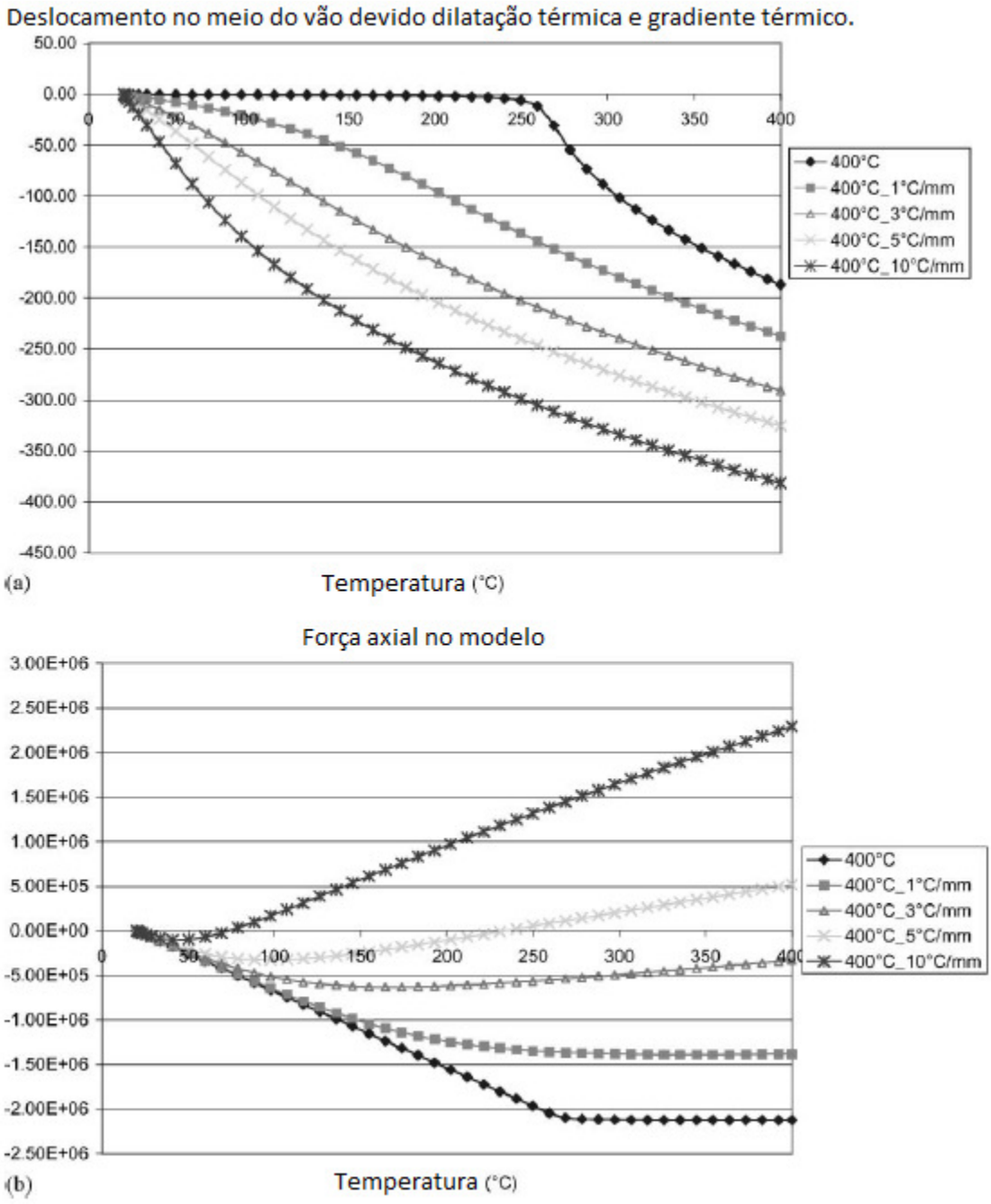


Figura 2.2 – Efeitos da dilatação térmica e gradiente térmico uniforme: a) deslocamento b) força axial (Fonte: adaptado de Usmani, 2001).

Comparando um modelo numérico de uma viga mista de aço e concreto a resultado dos ensaios de Cardington, ressalta novamente a importância de se considerar o coeficiente de dilatação térmica dos materiais para que os resultados sejam próximos da realidade (Figura 2.3), a curva denominada “modelo”, representa uma simulação considerando a dilatação térmica do aço e do concreto, enquanto as demais curvas representam

simulações que ignoram parte destes efeitos, gerando resultados inconsistentes ao teste experimental. Usmani et al. (2001) concluem também que as grandes deformações na laje de concreto induzem um comportamento de catenária, responsável por impedir seu colapso, destacando a importância da armadura passiva para resistir a esses efeitos, aumentando expressivamente a capacidade das vigas mistas.

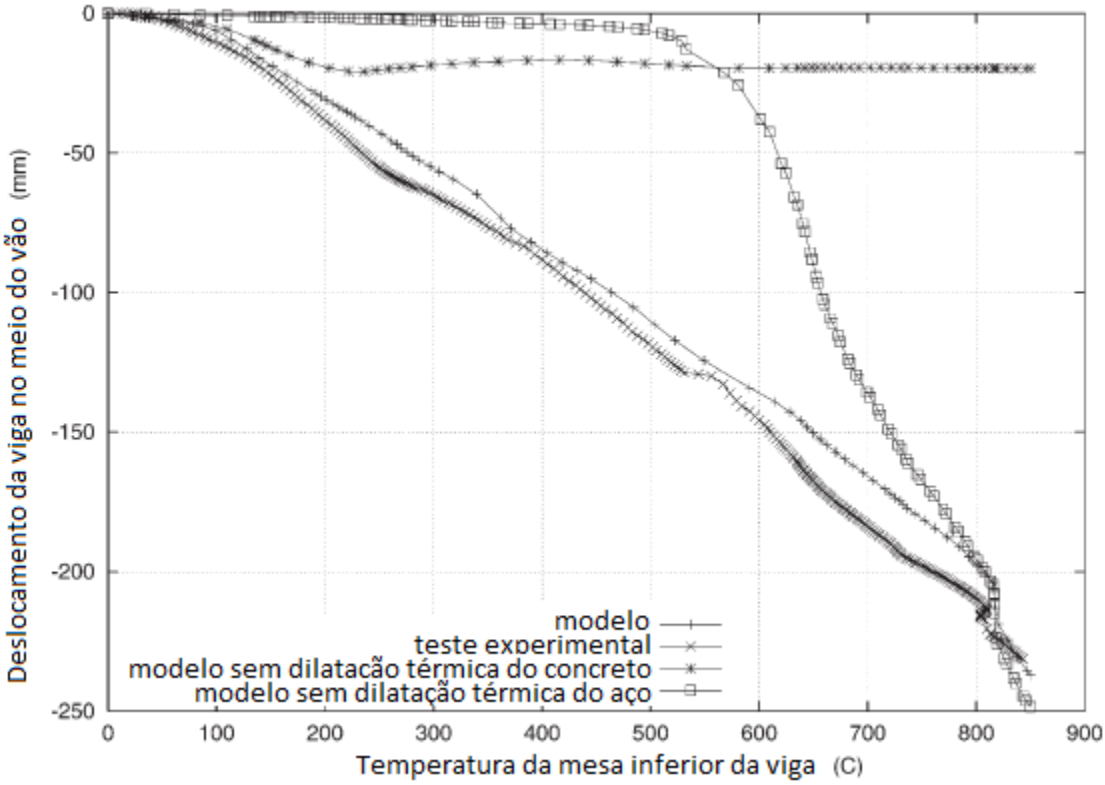


Figura 2.3 – Comparação do deslocamento quando não se consideram os coeficientes de dilatação térmica do aço ou do concreto (Fonte: adaptado de Usmani, 2001).

Wang et al. (2012) apresentam conclusões semelhantes a respeito da consideração dos coeficientes de dilatação térmica do aço. Em seus estudos comparam as deformações de um modelo numérico em elementos finitos de uma viga mista assimétrica exposta ao incêndio com resultados de ensaios experimentais. Ao utilizarem valores do coeficiente de dilatação térmica (denominado “a” na Figura 2.4) em função da temperatura recomendados pelo Eurocode (“EC4-1.2: a(T)”) e ASCE (“ASCE: a(T)”) concluem que o valor constante “a=14E-06” é suficiente para representar a resposta da viga,

porém ignorar o efeito da expansão térmica (“a=0”) leva a resultados inconsistentes, como pode ser observado na Figura 2.4.

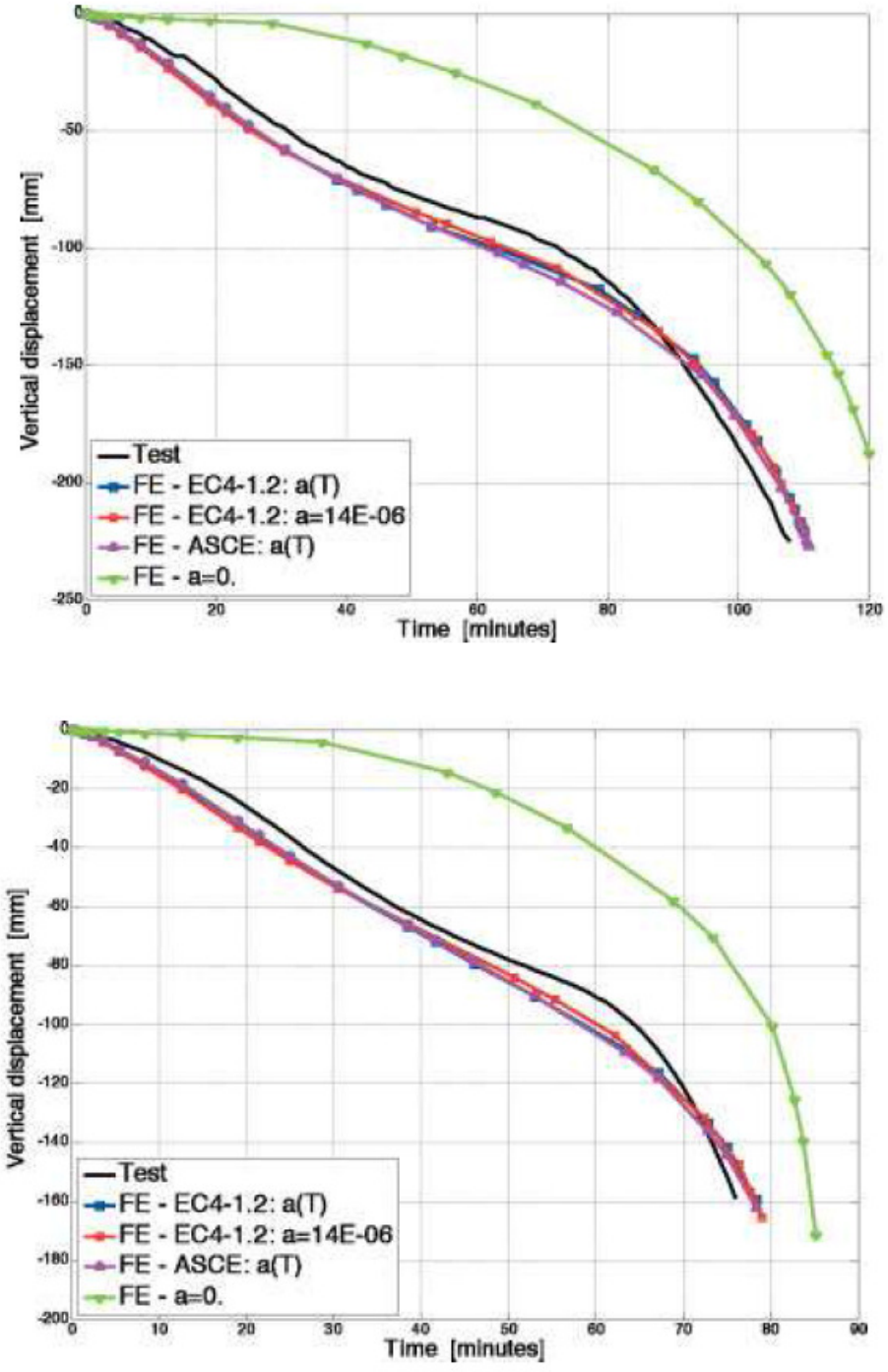


Figura 2.4 – Impacto do coeficiente de dilatação térmica do aço na análise numérica (Fonte: Wang, 2012).

Bailey et al. (1999 e 2000) investigaram os efeitos dos esforços de membrana no comportamento de lajes mistas em situação de incêndio por

meio de um experimento em laboratório de uma laje retangular com dimensões 9,5 m x 6,5 m apoiadas em suas quatro extremidades. Posteriormente propuseram uma formulação teórica capaz de incorporar esse efeito na avaliação do colapso estrutural da laje em situação de incêndio. A Figura 2.5 ilustra o efeito de membrana e os esforços solicitantes decorrentes das grandes deformações na laje.

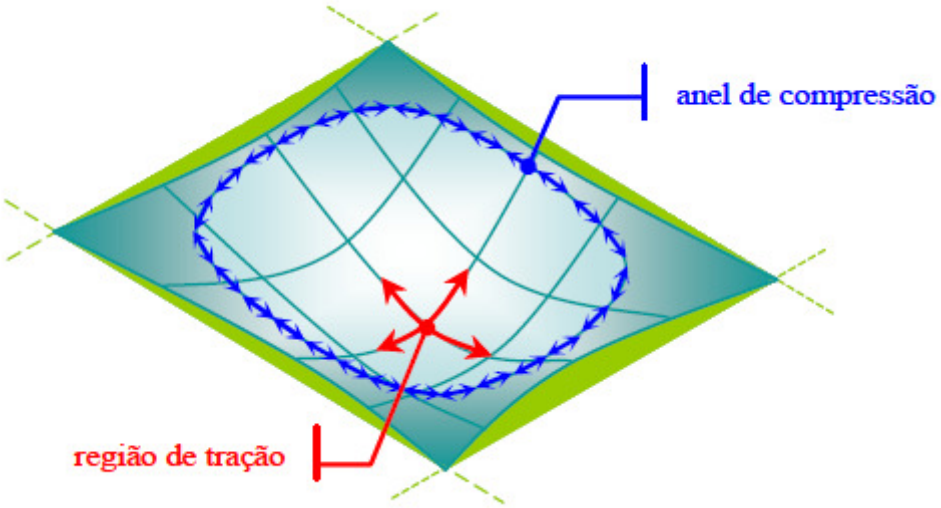


Figura 2.5 – Esforços de membrana para lajes com grandes deformações sem restrição horizontal (Fonte: Costa, 2008).

O centro da laje trabalha sob tração, sendo o carregamento vertical resistido pela armadura de aço. Caso os apoios das lajes não tenham rigidez suficiente para restringir a movimentação horizontal, um anel de compressão se desenvolve ao redor do perímetro garantindo o equilíbrio do sistema.

Lim et al., 2004, estudaram lajes apoiadas em apenas uma direção, concluindo que caso exista restrição horizontal nos apoios, as grandes deformações permitem a estrutura a se comportar de forma semelhante a um cabo, resistindo às ações verticais por meio de esforços de tração no plano médio da laje, caracterizando uma ação de catenária conforme Figura 2.6.

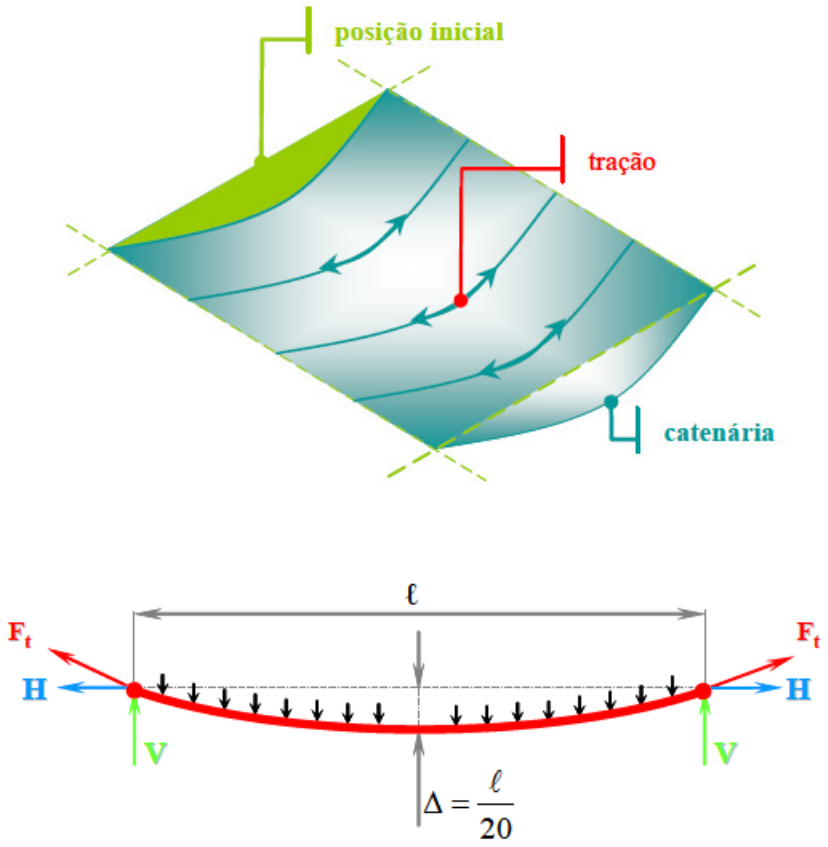


Figura 2.6 – Ação de catenária para lajes com grandes deformações (Fonte: Costa, 2008).

A ação de catenária, ao contrário do efeito de membrana, só pode ser equilibrada caso os apoios resistam aos esforços horizontais, mantendo-se fixos. Modelos numéricos avançados são beneficiados por esse efeito, pois incorporam a não linearidade geométrica. Ao considerar a semicontinuidade da laje o papel da armadura passiva nos apoios é fundamental para resistir a esses esforços horizontais, indicando que prover ligações mistas para as vigas secundárias pode resultar em aumento da capacidade resistente em situação de incêndio.

Kodur et al. (2013) observam a importância da consideração do efeito de membrana na laje de concreto na resistência em situação de incêndio de um piso ao comparar um modelo numérico com ensaios de laboratório de um sistema de piso simples, ilustrado na Figura 2.7.

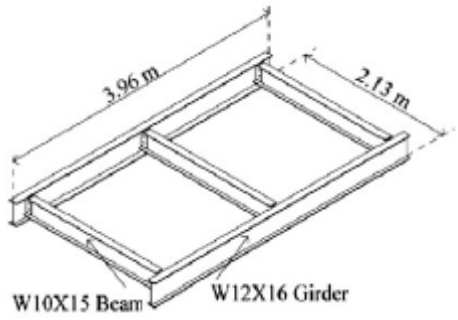


Figura 2.7 – Configuração das vigas do piso em análise (Fonte: Kodur, 2013).

As vigas internas não receberam revestimento contra fogo, enquanto as vigas externas de borda (que suportam as vigas internas) receberam revestimento para um TRRF de 60 min. Tanto na análise numérica como nos ensaios de laboratório o sistema resistiu a tempos superiores, variando de 85 a 110 min. A laje de concreto foi capaz de transferir as cargas das vigas internas enfraquecidas para as vigas externas.

Huang et al. (2015) ressaltam o papel da armadura passiva presente na laje de concreto para resistir aos esforços de membrana. Analisaram por meio de elementos finitos o impacto de três diferentes malhas de armadura, designadas A142, A252 e A393, presentes na laje expostas ao incêndio-padrão e ao incêndio natural (ver item 4.3). Os resultados estão reproduzidos na Figura 2.8.

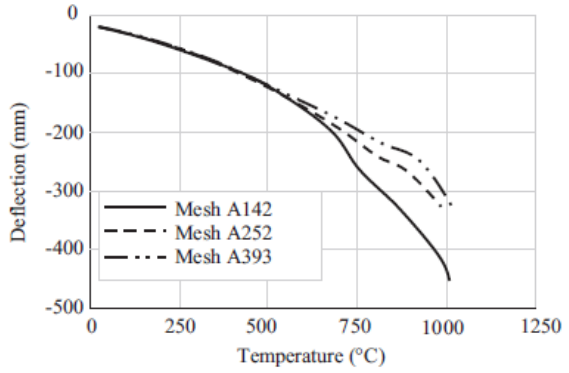


Fig. 15. Predicted deflections at position P3 under ISO Fire using different steel meshes.

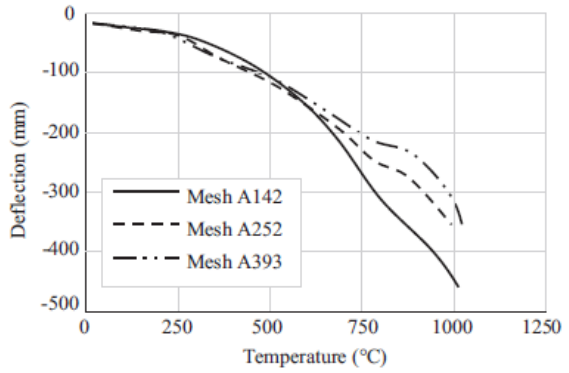


Fig. 16. Predicted deflections at position P4 under ISO Fire using different steel meshes.

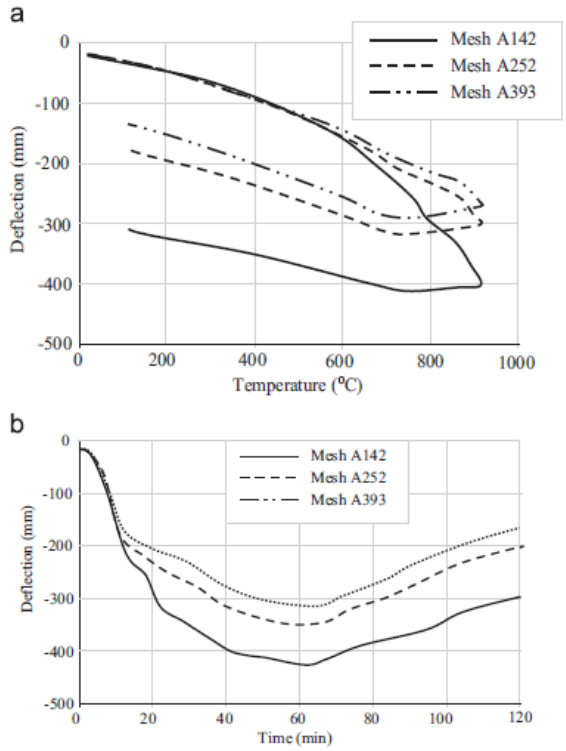


Fig. 17. Predicted deflections at position P3 under Natural Fire using different steel meshes: (a) deflection versus beam temperatures and (b) deflection versus time.

Figura 2.8 – Influência da malha de armadura para um pavimento exposto ao fogo (Fonte: Huang, 2015).

É possível notar que o impacto da armadura passiva passa a ser relevante após as vigas desprotegidas, que suportam o pavimento, atingirem uma temperatura de 500 ºC, quando o efeito de membrana é mobilizado pelas grandes deformações. O autor conclui que a capacidade última da laje de concreto, em situação de incêndio, tem dependência direta e significativa da configuração e resistência da malha de armadura passiva.

Nguyen e Tan (2015) alertam que as condições de contorno têm papel importante na mobilização do efeito de membrana. Em seus estudos concluem que à medida que a rigidez das vigas principais, protegidas contra fogo, aumenta, o colapso da laje ocorre para tempos superiores e que o fator principal do colapso é a falta de interação entre a laje e essas vigas principais que advém do aparecimento de fissuras sobre essas vigas, como pode ser observado na Figura 2.9. Vale ressaltar que em suas análises

numéricas devido à dificuldade de interpretar o tempo de ocorrência do colapso adotaram, assim como outros autores, que o colapso ocorre para (1) um deslocamento superior a L/20 ou (2) um deslocamento superior a L/30 combinado a uma taxa de deformação superior a ($L^2/9000h_s$), onde L é o vão da laje e h_s a altura da laje. Os estudos de Huang et al. (2015) apresentam conclusões semelhantes a respeito das vigas principais protegidas.

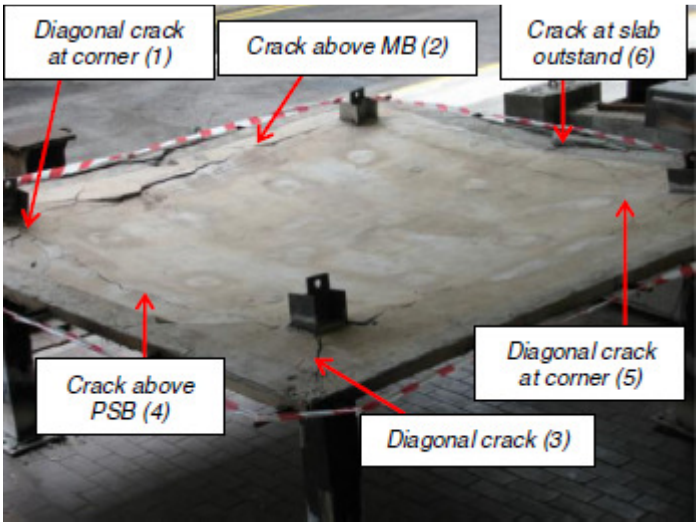


Figura 2.9 – Fissuras sobre as vigas principais protegidas contra fogo (Fonte: Nguyen, 2015).

Anderson e Najafi (1993) confirmam, por uma série de experimentos em laboratório, que, nas ligações mistas, o papel da armadura passiva exerce grande influência na capacidade resistente e de rotação do apoio. Em seus testes levaram o conjunto estrutural ilustrado na Figura 2.10 ao limite de ruptura, variando as taxas de armadura de 0,55% a 1,65%, a altura do perfil de aço e o tipo de chapa de extremidade.

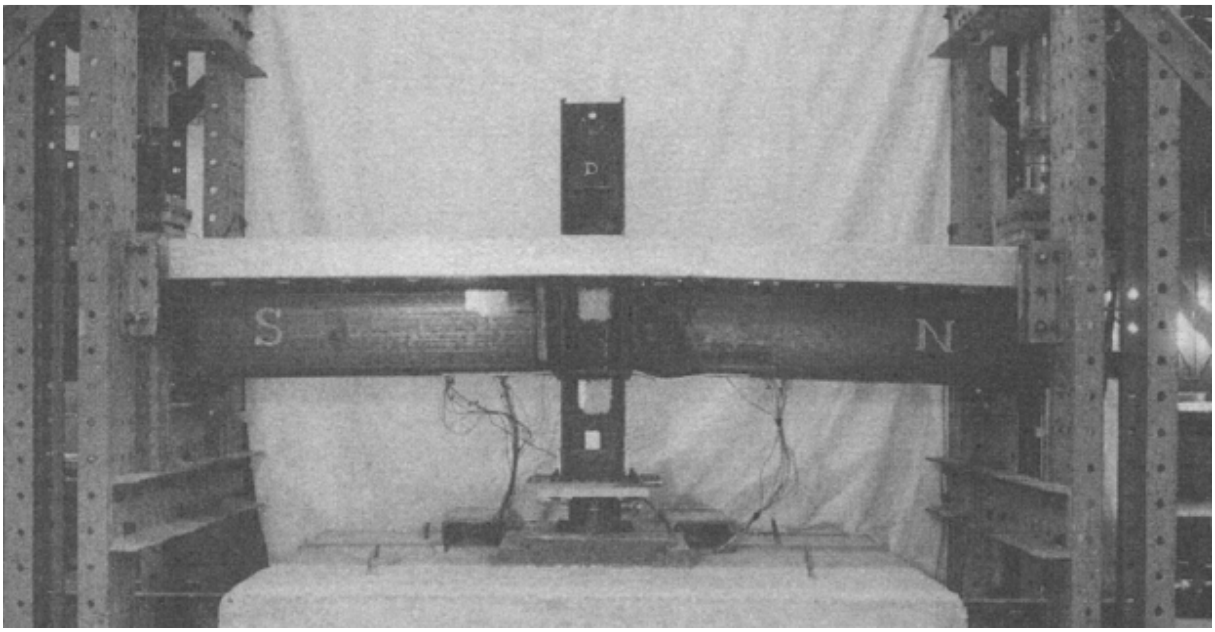


Figura 2.10 – Ensaio de ligação mista (Fonte: Anderson e Najafi, 1993).

Na maioria dos casos o critério de falha observado foi a ruptura das barras de aço presentes na laje, juntamente com a instabilidade local da mesa inferior da viga de aço. A Tabela 2.1 indica os momentos resistentes encontrados variando apenas a taxa de armadura dos experimentos, o modelo identificado como SBF representa o teste de uma ligação puramente de elementos de aço, sem presença de laje de concreto.

Tabela 2.1 – Momento resistente observado nos testes (Fonte: Anderson e Najafi, 1993).

Teste	Taxa de armadura	M (kN.m)
SBF	-	105
S4F	0,55%	179
S8F	1,10%	262
S12F	1,65%	302

Nota-se que a capacidade resistente da ligação mista pode ser cerca de 3 vezes superior ao de uma ligação puramente de aço, além de ser notável a influência da taxa de armadura.

Esses resultados indicam que investigar a influência da armadura para avaliar o comportamento da viga mista em situação de incêndio pode elevar consideravelmente sua capacidade resistente.

A consideração da semicontinuidade na análise da capacidade da viga mista em situação de incêndio já foi proposta por Ioannides e Mehta (1997) que adotaram como metodologia a análise das capacidades plásticas da seção transversal no meio do vão e nos apoios e afirmou, para o caso de adoção de revestimento contra fogo, que existe um ganho relevante na capacidade resistente da viga. Os autores afirmam que a maioria das vigas mistas é dimensionada à temperatura ambiente para atender aos limites de serviço e que existe uma reserva em sua capacidade resistente. Afirmam ainda que mesmo ligações simples (classificadas como articuladas) possuem uma capacidade a rotação que pode ser utilizada. Em suas conclusões propõe que a armadura passiva presente na laje de concreto deva ser considerada, na situação de incêndio, para promover um aumento da capacidade resistente ao momento fletor negativo da seção transversal.

Fakury et al. (2005) compararam os casos de vigas mistas biapoiadas e semicontínuas, com revestimento contra fogo, utilizando o método proposto pelo Eurocode EN 1994-1-2. Em seus estudos utilizaram as seguintes premissas de cálculo:

- Na determinação do momento fletor resistente de cálculo da seção transversal a laje de concreto, a mesa superior, alma e mesa inferior do perfil de aço são tratados como elementos isolados, ou seja, desprezando a transferência de calor entre eles;
- A degradação das propriedades mecânicas dos materiais foi tomada segundo recomendações do EN 1994-1-2;
- A viga semicontínua possui um momento resistente negativo nos apoios tomado como um binário de forças originado pela tração na armadura passiva presente na laje de concreto e pela compressão do perfil de aço;
- A região das conexões, de acordo com Liu (1998, apud Fakury, 2005), está sujeita a temperaturas inferiores à viga, pois não estão

expostas diretamente ao fogo, estão próximas a elementos de suporte mais frios (vigas principais ou pilares) e são compostas por um número maior de elementos como chapas, cantoneiras, soldas e parafusos, retardando o aquecimento.

Como conclusão encontraram um ganho de capacidade resistente de 116% a 123% da viga mista, protegida contra fogo, quando analisada como semicontínua em comparação da análise como biapoiada.

De acordo com Fischer e Varma (2017) durante um incêndio, devido às expansões e rotações no pavimento, as ligações articuladas projetadas para resistir a forças cortantes das vigas biapoiadas à temperatura ambiente, sofrem forças de compressão e tração. Em seus estudos analisaram modelos tridimensionais em elementos finitos de pórticos compostos por vigas mistas com ligações articuladas típicas (chapas de cisalhamento, cantoneiras simples e cantoneiras duplas), conforme ilustração da Figura 2.11.

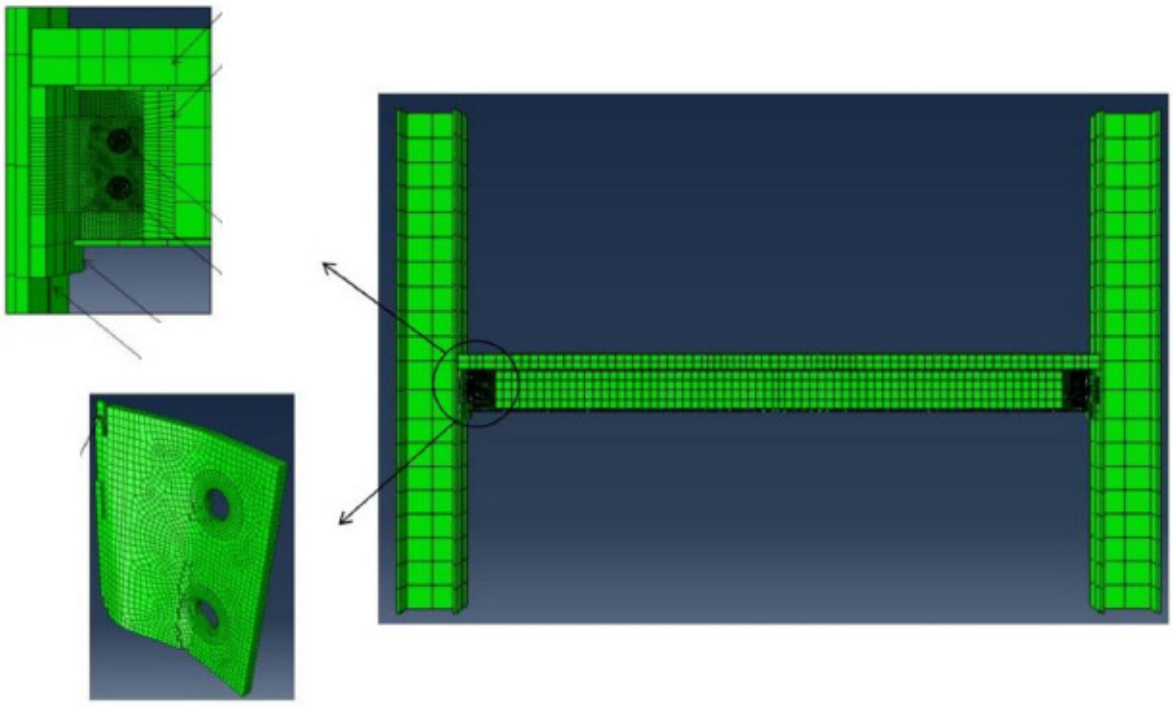


Figura 2.11 – Modelo em elementos finitos do pórtico analisado (Fonte: Fischer, 2017).

Fischer e Varma (2017) compararam o modelo de um pórtico simples com modelos considerando a continuidade da laje através do pavimento, existindo, assim, um momento fletor negativo resistente na região dos apoios (Figura 2.12).

Figura 2.12 – Consideração da continuidade da laje de concreto (Fonte: Fischer, 2017).

Como conclusão, afirmam que a continuidade da laje nos apoios e a armadura passiva presente na laje têm grande influência no comportamento da viga e das ligações durante o incêndio, concluindo também que não ocorreu falha prematura das conexões durante exposição ao fogo.

Os trabalhos mais recentes mostram o quão benéfico são os esforços de membrana/catenária que atuam na laje de concreto devido às grandes deformações decorrentes do aumento da temperatura no perfil de aço e que a armadura passiva tem impacto direto no comportamento das vigas mistas. Diversas conclusões indicam que os modelos lineares simplificados não representam bem o comportamento das estruturas em situação de incêndio devido à grande influência de fenômenos não lineares. Nesse sentido vê-se a importância de comparar qualquer resultado obtido de análises simplificadas com modelos mais avançados, que foram desenvolvidos no decorrer da Dissertação.

3 VIGAS MISTAS BIAPOIADAS À TEMPERATURA AMBIENTE

3.1 Introdução - Sistemas estruturais mistos de aço e concreto

A função dos sistemas estruturais é de transmitir as ações gravitacionais e variáveis de diferentes naturezas que podem ocorrer em uma edificação, determinadas de acordo com suas características de uso, às fundações. A fim de atingir esse objetivo, empregam-se elementos capazes de garantir a estabilidade do edifício, denominados elementos estruturais.

Os elementos estruturais básicos nas edificações são:

- Lajes - elementos planos horizontais que suportam diretamente as forças verticais do piso;
- Vigas - elementos de grande comprimento, geralmente horizontais, caracterizados por receber as ações das lajes;
- Pilares - elementos de grande comprimento, geralmente verticais, que fornecem apoio às vigas.

Os sistemas estruturais também são caracterizados de acordo com os materiais empregados na constituição de seus elementos. Os materiais mais corriqueiros são: aço, concreto e madeira, porém não se limitam a eles, podendo ser constituídos, para usos mais específicos, por outros materiais metálicos, tecidos, fibras de carbono, materiais cerâmicos, entre outros. A fim de aproveitar as vantagens de cada material é prática cada vez mais comum combiná-los para constituir elementos mais eficientes, garantindo redução do consumo e maior agilidade de execução.

No caso específico do uso de elementos de aço e concreto parte-se do princípio básico de que o concreto resiste bem às tensões de compressão e o aço às tensões de tração, sendo que a combinação de ambos gera um elemento estrutural com grande rigidez à flexão. Os primeiros usos de sistemas mistos de aço e concreto, datados de 1894 nos Estados Unidos, de acordo com Griffis (1994), utilizavam o concreto como revestimento contra fogo e corrosão de elementos estruturais de aço, sendo o primeiro registro de normatização do assunto em 1930 pelo New York City

Building Code. Nota-se que os fatores que influenciam a escolha de um sistema vão além do âmbito estrutural e englobam características multidisciplinares envolvendo os outros subsistemas do edifício (revestimento contra fogo, interferências com tubulações, elementos de vedação ou revestimentos, entre outros).

Dentre os elementos estruturais mistos de aço e concreto, destacam-se as lajes mistas, vigas mistas e pilares mistos. Os anexos O, P e Q da norma brasileira ABNT NBR 8800:2008 apresentam recomendações de dimensionamento e disposições geométricas para cada um desses elementos e controle de fissuras nas vigas e lajes.

3.1.1 Lajes mistas

Consistem em uma capa de concreto combinada ao uso de uma fôrma nervurada de aço que, além de ser capaz de resistir às tensões de tração causadas pelo momento fletor positivo, servirá de suporte para o concreto antes da cura. Com isso é possível reduzir a quantidade de armadura positiva na laje de concreto armado e eliminar o uso de fôrmas provisórias, visto que a fôrma de aço é parte integrante do sistema estrutural. A Figura 3.1 e a Figura 3.2 ilustram este elemento, que também recebe o nome comercial de "*Steel Deck*".

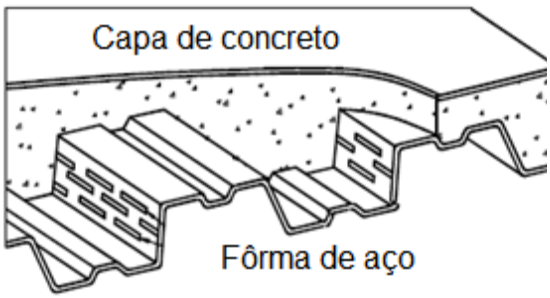


Figura 3.1 – Ilustração de uma laje mista (Fonte: Adaptado de ABNT NBR8800:2008).

Figura 3.2 – Vista inferior da laje mista (Fonte: Vão Livre Indústria e Construções[1]).

É usual que esses elementos sejam utilizados em conjunto com os elementos de vigas mistas. Desse modo a presença de conectores de cisalhamento nas vigas (discutidos mais adiante) garante que a laje trabalhe como um diafragma horizontal rígido, transmitindo os esforços laterais para todos os pórticos sem a necessidade de uma estrutura de contraventamento horizontal específica para cumprir tal papel.

Além disso, deve-se utilizar uma malha de aço eletrosoldada na camada superior da laje. Tal malha tem a função de minimizar as fissurações no concreto decorrentes de deformações térmicas e por retração.

Segundo Vasconcellos (2006) as vantagens durante a fase de construção consistem de que a fôrma de aço funciona como plataforma de trabalho e, geralmente, dispensa o escoramento da laje (se dimensionada para tal), facilitando as atividades de montagem e transporte de materiais, conforme ilustrado na Figura 3.3.

[1] Disponível em: <http://www.vaolivre.com.br/produtos.html> Acesso em out. 2015.

Figura 3.3 – Fôrma de aço como plataforma de trabalho (Fonte: PINI, Equipe de Obra[1]).

Vale ressaltar que o comportamento misto só é alcançado caso exista mecanismo adequado capaz de transmitir tensões cisalhantes longitudinais que surgem na interface da capa de concreto com a fôrma de aço, evitando o escorregamento entre os materiais. Tal mecanismo é criado por meio de saliências e reentrâncias, denominadas mossas, existentes na fôrma. De acordo com Sun e Mäkeläinen (1999) o principal modo de ruptura das lajes mistas está justamente associado à falha devido à tensão longitudinal de cisalhamento, o que ilustra a importância de tal fenômeno.

3.1.2 Pilares mistos

São constituídos por perfis de aço preenchidos ou revestidos, parcial ou totalmente por concreto. O revestimento contra a ação do fogo e corrosão permanece sendo uma das razões para adoção do sistema misto segundo Vasconsellos (2006), a diferença com relação ao início do século XX é de que, atualmente, o ganho de resistência e rigidez (principalmente à flexão) do elemento estrutural é considerado em projeto, contribuindo para a economia de material. Uma vantagem em relação ao elemento de concreto armado isolado é que a utilização do perfil de aço garante um comportamento mais dúctil da peça, facilitando a detecção de possíveis

[1] Disponível em <http://equipedeobra.pini.com.br/construcao-reforma/62/imagens/i390098.jpg> Acesso em out. 2015.

cargas não previstas no pilar, tornando a edificação mais segura. A Figura 3.4 indica as seções transversais mais usuais de pilares mistos.

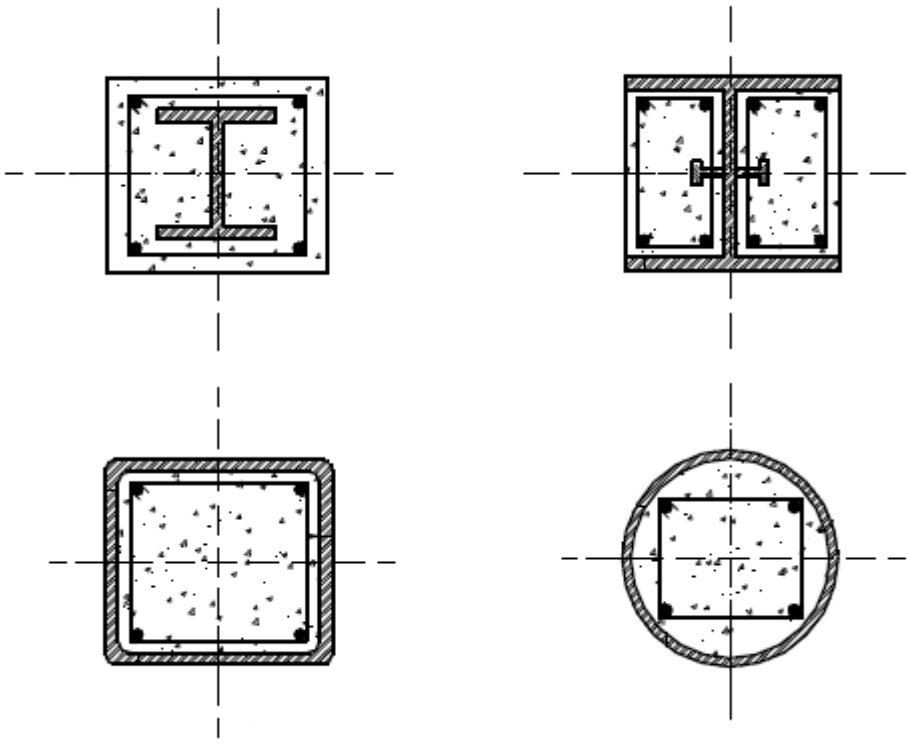


Figura 3.4 – Ilustração das seções típicas de pilares mistos (Fonte: Adaptado de ABNT NBR 8800:2008).

No caso do uso de seções tubulares de aço existe ainda a vantagem de eliminar a utilização de fôrmas provisórias, já que o próprio perfil metálico cumpre tal função gerando agilidade na execução. O efeito do confinamento do concreto também proporciona um aumento da resistência mecânica da seção transversal, principalmente na seção tubular circular.

3.1.3 Vigas mistas

São formadas pela combinação de um perfil de aço, geralmente com seção transversal tipo "I" simétrica ou monossimétrica, e uma laje colaborante de concreto solidarizadas por meio de conectores de

cisalhamento, que desempenham a mesma função das mossas presentes nas fôrmas das lajes mistas, ou seja, impedir o deslizamento da interface entre aço e concreto. A laje de concreto pode ser maciça ou nervurada moldada "in loco", com o uso ou não de fôrma de aço ("*Steel Deck*") ou também formada por pré-lajes de concreto pré-moldadas. O princípio teórico é de que a laje de concreto resiste aos esforços de compressão e o perfil de aço está submetido principalmente a esforços de tração, criando uma seção transversal com elevada rigidez à flexão, conforme ilustrado pela Figura 3.5. A Figura 3.6 ilustra uma seção transversal típica de uma viga mista. O termo "*Gap*" diz respeito à altura das nervuras de uma fôrma de aço ou a espessura de uma pré-laje de concreto (no caso de laje maciça essa dimensão é nula), visto que é prática comum de projeto desprezar esta área já que a mesma não é, necessariamente, constante ao longo da viga.

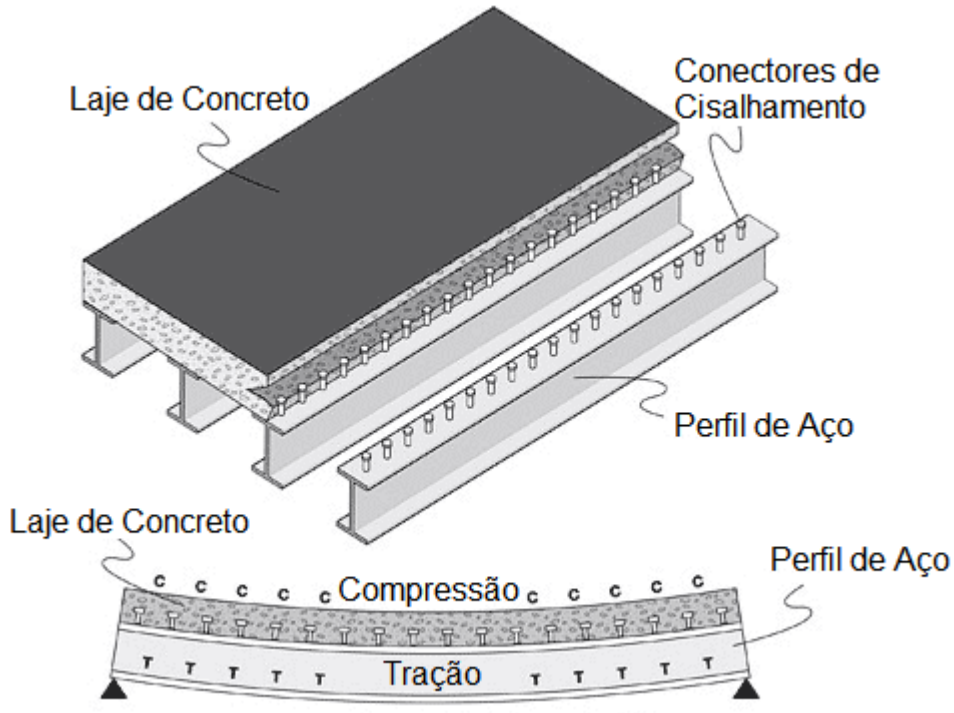


Figura 3.5 – Ilustração de uma viga mista (Fonte: Adaptado de REIDsteel[1]).

[1] Disponível em <http://www.steel-bridges.com/composite-beam-bridge.html> Acesso em out. 2015.

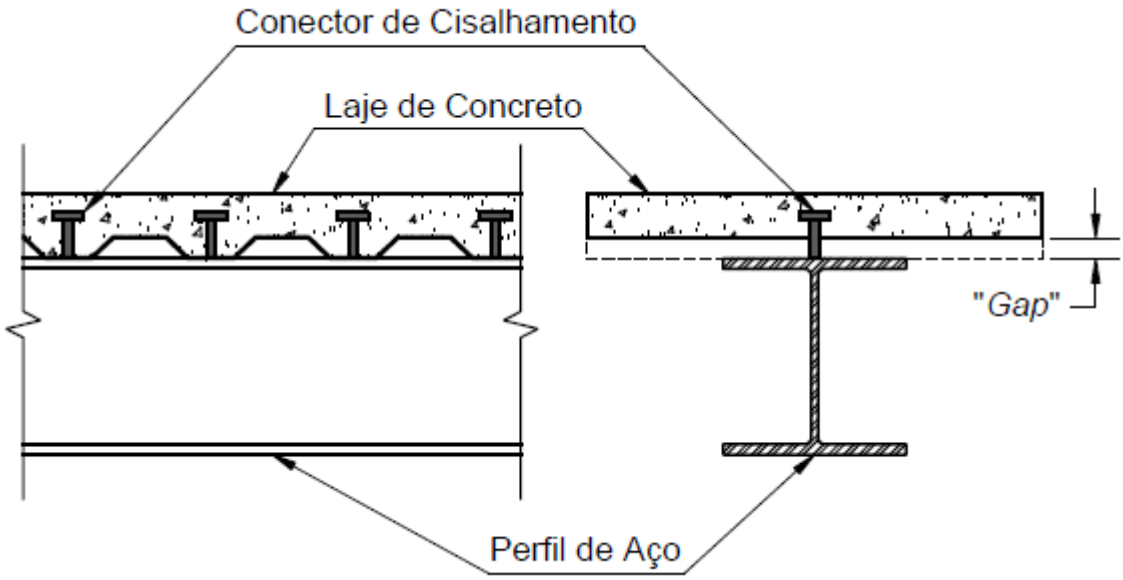


Figura 3.6 – Corte longitudinal e transversal de uma viga mista.

Nota-se que o uso de vigas mistas em regiões de momento positivo contribuiu muito mais para a rigidez do conjunto, enquanto em regiões de momento negativo, pelo fato de o concreto estar sob tensões de tração, não existe ganho significativo de rigidez. Por esse motivo é mais comum adotar a solução mista para vigas biapoiadas em comparação a regiões próximas de engastes.

Vasconcellos (2006) aponta que a grande vantagem da utilização de vigas mistas está no uso de elementos estruturais de menor altura e na redução do consumo de materiais. Ainda ressalta que é usual dispensar o escoramento dos elementos de viga durante a fase de construção, ganhando velocidade de execução, lembrando, porém, que é possível optar-se por escorar os perfis metálicos até a cura do concreto a fim de limitar as deformações do piso quando a seção transversal de aço, por si só, não possuí rigidez adequada.

3.2 Propriedades geométricas

Após apresentar os tipos de elementos estruturais mistos mais utilizados será dada ênfase às vigas por serem o escopo da Dissertação. De início é importante discutir as propriedades geométricas da seção transversal mista e os diversos fatores que influenciam sua rigidez e devem ser considerados em projeto.

3.2.1 Largura efetiva da laje colaborante

As teorias sobre o comportamento estrutural de barras mais utilizadas na engenharia de estruturas assumem que as seções transversais permanecem planas após a deformação. Essa hipótese cinemática, pela teoria da elasticidade linear, acaba por negligenciar certas deformações por cisalhamento que se acentuam quando a seção transversal possui uma largura muito grande. Para descrever as diferenças encontradas entre o modelo de cálculo aproximado e o comportamento real da estrutura utiliza-se o termo *"shearlag"*, justamente por estar associado a deformações por cisalhamento.

Segundo as teorias de barras elementares, as tensões normais geradas pela flexão variam linearmente na altura da seção transversal e são constantes ao longo da largura, porém, no caso de grandes dimensões, um comportamento mais realista indica que as tensões são máximas no eixo de simetria da barra e decaem à medida que se distanciam do eixo, conforme Figura 3.7.

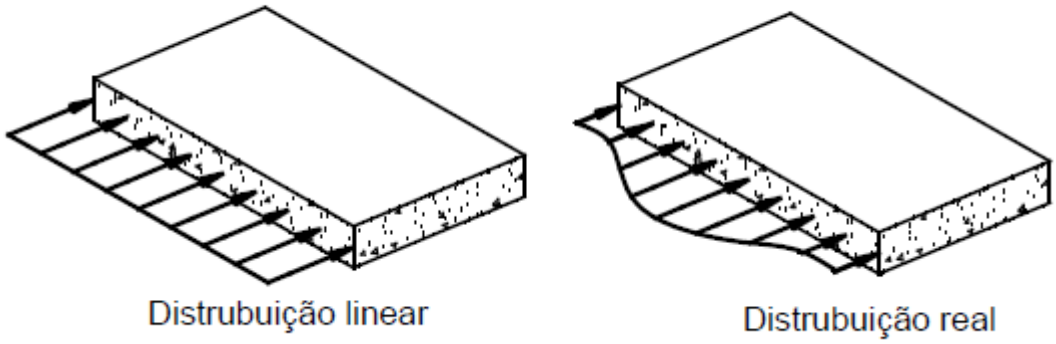


Figura 3.7 – Distribuição das tensões normais na laje de concreto devido à flexão.

Como consequência, a viga real tem comportamento mais flexível que o previsto pela teoria de flexão. O modo usual de tratar o problema é substituir a largura real da laje de concreto por uma largura reduzida, denominada largura efetiva.

Para corrigir o comportamento elástico de maneira exata é necessário, segundo Alva (2000), considerar fatores como as condições de apoio, tipo de carregamento, relação entre espessura da laje e altura da viga e a presença de armadura na laje, de forma que, para aplicação prática do problema, o processo torna-se muito trabalhoso. Devido a isso as recomendações de algumas normas, incluindo a ABNT NBR 8800:2008, determinam que a largura efetiva da laje colaborante de concreto satisfaça o menor dos seguintes valores para **cada lado** da laje segundo o eixo da viga:

a) 1/8 do vão da viga mista;
b) 1/2 da distância entre vigas adjacentes;
c) distância da viga à borda de uma laje em balanço.

Nota-se que apenas a condição a) leva em consideração o efeito *"shearlag"*, já que as condições b) e c) são simplesmente restrições geométricas. A norma mais antiga ABNT NBR 8800:1986 ainda incluía o limite para a largura efetiva de 16 vezes a espessura da laje, porém esse critério foi abandonado de maneira a tornar-se idêntico ao indicado pela norma norte-americana AISC-LRFD.

A Figura 3.8 ilustra de maneira resumida as condições recomendadas:

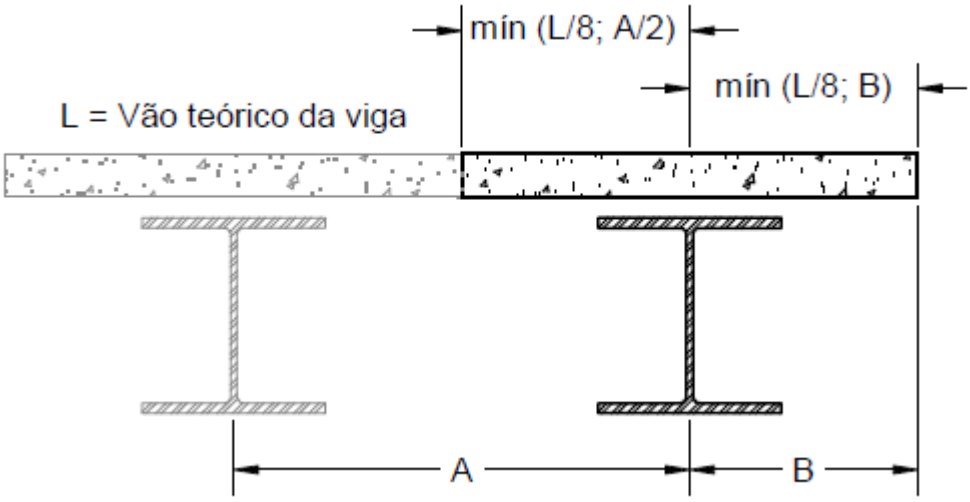


Figura 3.8 – Largura efetiva da laje colaborante segundo ABNT NBR8800:2008.

3.2.2 Seção transversal homogeneizada

Devido a viga mista de aço e concreto ser composta por dois materiais diferentes, é aplicado um processo de homogeneização da seção transversal para calcular suas propriedades geométricas admitindo um módulo de elasticidade único. Escolhendo o aço como material base define-se a razão modular na Equação (3.1).

$$\alpha_E = \frac{E_{aço}}{E_{concr.}} \tag{3.1}$$

O módulo de elasticidade do concreto a ser utilizado nas análises elásticas de projeto é, segundo ABNT NBT 6118:2014, o módulo secante dado pela Equação (3.2):

$$E_{concr.} = E_{CS} = 4760\sqrt{f_{ck}} \tag{3.2}$$

Na Equação (3.2):

E_{CS} é o módulo de elasticidade secante do concreto em MPa;

f_{ck} é a resistência característica do concreto à compressão em MPa.

A Figura 3.9 indica os parâmetros geométricos da seção mista, sendo os índices "m" referentes às propriedades da seção mista e os índices "c" e "a" referentes às propriedades do concreto e do aço, respectivamente, tratados de maneira isolada.

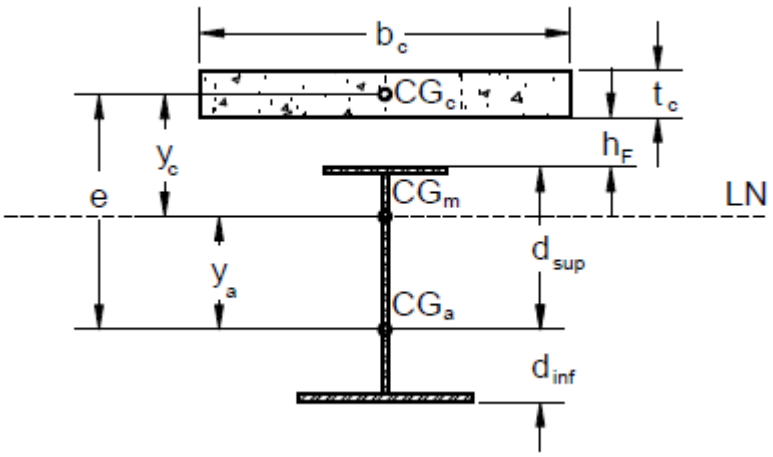


Figura 3.9 – Parâmetros geométricos da seção mista.

De maneira sistemática o momento de inércia da seção mista, dado pela Equação (3.7), é calculado:

$$A_m = A_a + \frac{A_c}{\alpha_E} \tag{3.3}$$

$$e = d_{sup} + h_F + \frac{t_c}{2} \tag{3.4}$$

$$y_c = \frac{A_a}{A_m} e \tag{3.5}$$

$$y_a = \frac{A_c}{\alpha_E A_m} e \tag{3.6}$$

$$I_m = I_a + \frac{I_c}{\alpha_E} + A_m y_c y_a \tag{3.7}$$

Nas Equações (3.3) a (3.7):

α_E a razão modular;

A_a área da seção de aço isolada;

A_c a área da seção de concreto isolada;

A_m a área da seção mista;

d_{sup} a distância entre o centro geométrico da seção de aço isolada até a face externa da mesa superior do perfil;

d_{inf} a distância entre o centro geométrico da seção de aço isolada até a face externa da mesa inferior do perfil;

e a distância entre os centros geométricos da seção de aço e da seção de concreto;

h_F a espessura da pré-laje pré-moldada de concreto ou a altura das nervuras da laje em fôrma de aço incorporada (no caso de laje maciça moldada in-loco esse valor é nulo);

I_a o momento principal de inércia da seção de aço isolada;

I_c o momento principal de inércia da seção de concreto isolada;

I_m o momento principal de inércia da seção mista.

t_c a altura da laje colaborante de concreto;

y_a a distância entre a linha neutra da seção mista e o centro geométrico do perfil de aço isolado;

y_c a distância entre a linha neutra da seção mista e o centro geométrico da laje colaborante de concreto.

No caso da linha neutra estar posicionada sobre a laje colaborante (ou seja, quando $y_a > d_{sup} + h_F$) é necessário ignorar a área tracionada de concreto. A Figura 3.10 indica os parâmetros geométricos da seção mista para a linha neutra cortando a laje de concreto.

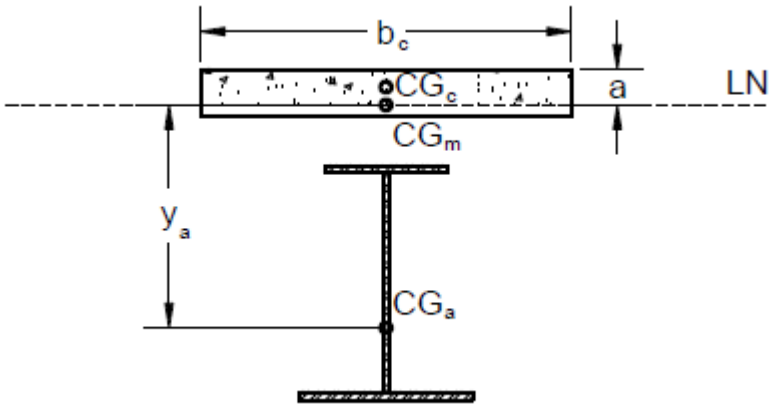


Figura 3.10 – Parâmetros geométricos da seção mista quando a linha neutra corta a laje de concreto.

O momento de inércia da seção mista passa a ser determinado pela Equação (3.10).

$$a = \frac{\alpha_E\, A_a}{b_c}\left[\sqrt{1 + \frac{2\, b_c}{\alpha_E\, A_a}\left(d_{sup} + h_F + t_c\right)} - 1\right] \tag{3.8}$$

$$y_a = d_{sup} + h_F + t_c - a \tag{3.9}$$

$$I_m = I_a + A_a y_a^2 + \frac{b_c a^3}{3\,\alpha_E} \tag{3.10}$$

Nas Equações (3.8) a (3.10) a é a espessura da região comprimida da laje.

Vale lembrar, já que o aço foi escolhido como o material base para determinar a inércia da seção mista, que no cálculo da rigidez da viga mista utiliza-se o módulo de elasticidade do aço e na determinação das tensões atuantes no concreto é necessário ainda dividir as tensões encontradas na seção homogeneizada pela razão modular α_E.

3.2.3 Efeitos de longa duração do concreto

Dos efeitos dependentes do tempo que atuam no concreto destaca-se a fluência e a retração.

A fluência é um fenômeno caracterizado pela deformação progressiva do material na atuação de uma tensão constante. No concreto, está fortemente ligado à sua estrutura granular e à presença de água capilar. De acordo com Catai (2005), a geometria da peça, o grau de agressividade do meio ambiente, a variação da umidade, a idade do concreto, as condições de cura, a exposição a altas temperaturas e a magnitude das tensões são fatores capazes de afetar o fenômeno.

Dá-se o nome de retração à redução de volume do concreto ocasionada pela perda de água ao longo do tempo. A geometria da peça, a idade do concreto, o fator água-cimento, a composição química do cimento, a quantidade de armadura, a presença de redutores de água e o processo de cura influenciam o fenômeno da retração.

A presença das armaduras superiores para controle de fissuração na laje geralmente é suficiente para controlar o fenômeno da retração, já com relação à fluência, a deformação lenta é responsável por diminuir o módulo de elasticidade do concreto e, como consequência, transferir as tensões da laje ao perfil de aço.

A norma brasileira ABNT NBR 8800:2008 recomenda que os efeitos de longa duração sejam levados em consideração, por simplicidade, **aumentando em três vezes a razão modular** α_E, ou seja, considerando que o módulo de elasticidade do concreto ao longo do tempo reduz até um terço de seu módulo de elasticidade secante. Para determinação mais precisa sobre esses efeitos, Catai (2005) apresenta métodos e bibliografias específicas sobre o assunto, que não são escopo desta Dissertação.

3.3 Conectores de cisalhamento

3.3.1 Interação parcial

Como já comentado, os conectores de cisalhamento são responsáveis por impedir o escorregamento na interface entre aço e concreto, resistindo aos esforços de cisalhamento longitudinal resultantes da flexão não uniforme e garantindo que a seção mista deforme como um plano

rígido. Entre os tipos mais comuns de conectores de cisalhamento encontram-se os pinos com cabeça, também chamados de "*stud*-bolts" (Figura 3.11) e o uso de perfis "U" laminados ou formados a frio (Figura 3.12).

Figura 3.11 – Conectores tipo "stud-bolt" soldados ao perfil de aço (Fonte: SWUK Ltd[1]).

Figura 3.12 – Conectores tipo perfil U formado a frio (Fonte: Adaptado de FAKURY, 2008).

Quando existe uma ligação entre o aço e o concreto suficientemente resistente dá-se o nome de **interação completa**. São previstas, porém, situações em que o escorregamento na interface não é nulo, havendo uma descontinuidade no diagrama de deformações, ocorrendo o que se chama de **interação parcial**. Na ausência de conectores de cisalhamento (interação nula) as seções de aço e de concreto se flexionam de maneira independente, apresentando rigidez à flexão muito inferior à seção mista. A Figura 3.13 ilustra o comportamento da seção transversal para tais situações.

[1] Disponível em <http://swuk.net/wp-content/uploads/2013/06/Bridge-beam-pic-2.jpg> Acesso em out. 2015.

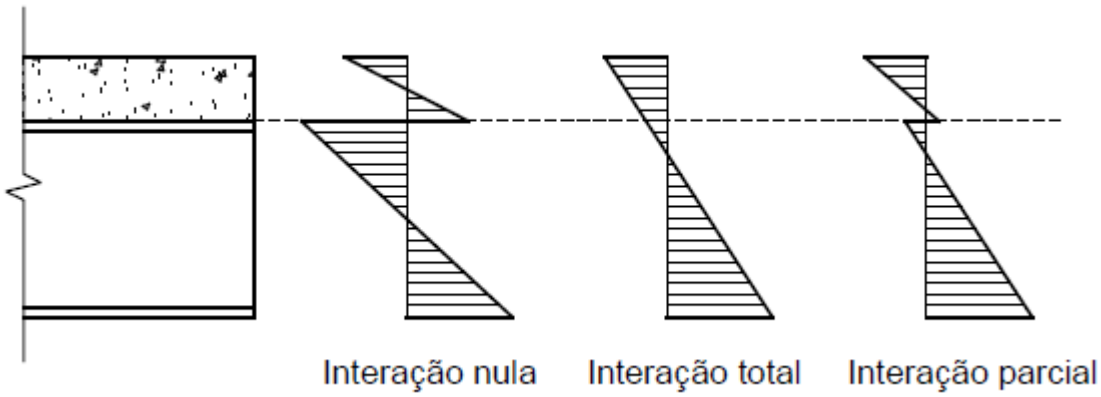


Figura 3.13 – Interação entre o aço e o concreto nas vigas mistas.

A norma brasileira ABNT NBR 8800:2008 trata da interação parcial definindo uma inércia efetiva da seção mista, que representa uma redução da inércia calculada em 3.2.2 segundo o grau de interação da viga mista (discutido adiante em 3.3.2), calculada conforme a Equação (3.11).

$$I_{ef} = I_a + \sqrt{\eta_i}(I_m - I_a) \tag{3.11}$$

Na Equação (3.11):

I_a é o momento principal de inércia da seção de aço isolada;

I_{ef} é o momento principal de inércia efetivo da seção mista;

I_m é o momento principal de inércia da seção mista;

η_i é o grau de interação da viga mista, discutido em 3.3.2.

3.3.2 Capacidade dos conectores

A relação entre a força transmitida ao conector de cisalhamento e o escorregamento detectado na interface entre o aço e o concreto é apresentada na Figura 3.14. Nota-se a existência de um patamar paralelo ao escorregamento, indicando um comportamento dúctil do conector, que recebe a classificação de **flexível**.

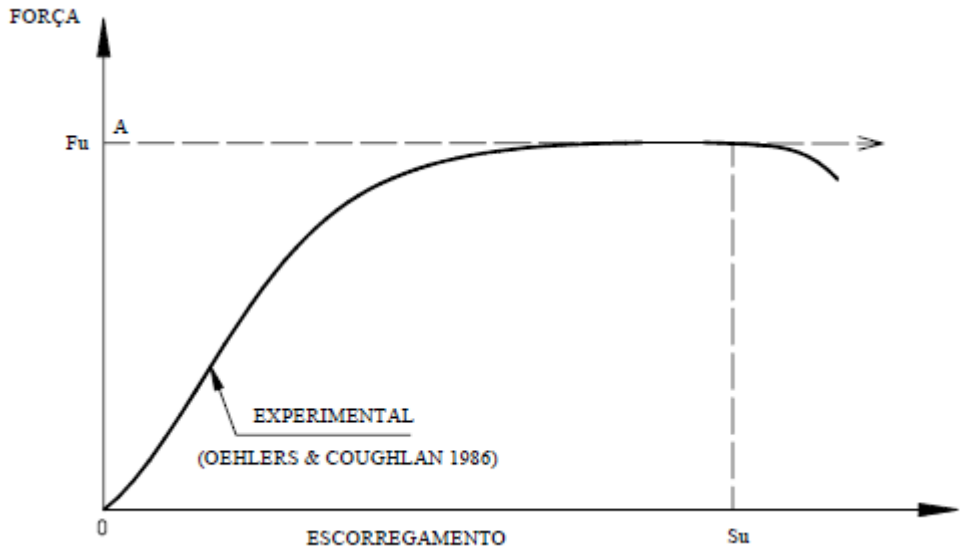


Figura 3.14 – Curva típica Força x Escorregamento de um conector flexível (Fonte: Adaptado de Alva, 2000).

Os possíveis modos de ruptura de um conector de cisalhamento estão ilustrados na Figura 3.15, onde é possível notar que existe dependência com as características mecânicas do concreto e inclusive a existência ou não de laje com fôrma de aço nervurada.

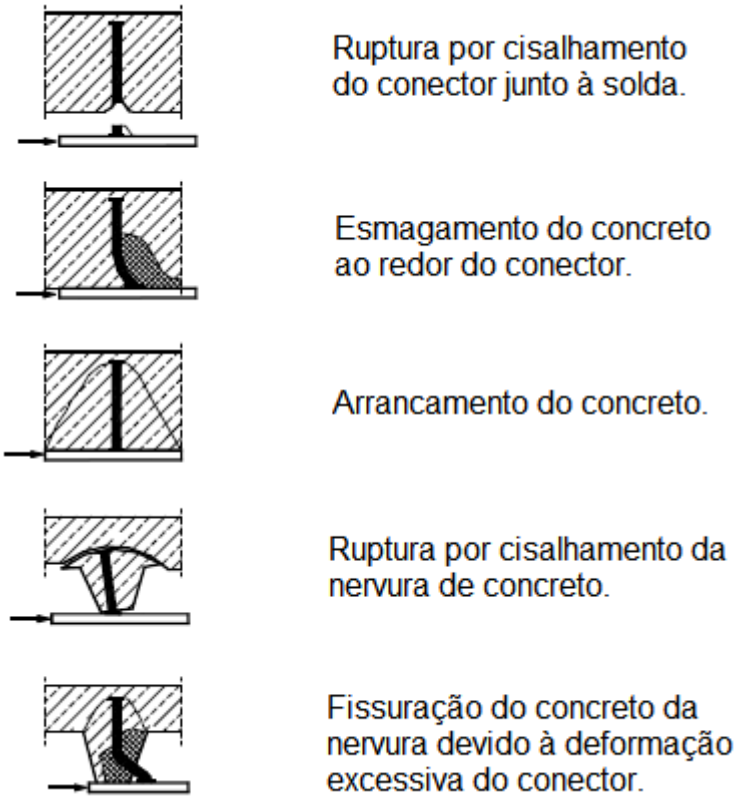


Figura 3.15 – Modos de ruptura dos conectores de cisalhamento (Fonte: Adaptado de Alva, 2000).

De acordo com a ABNT NBR 8800:2008 a força resistente de um conector do tipo pino com cabeça ("*stud bolt*") é dada pela Equação (3.12):

$$Q_{Rd} = mín \begin{cases} \frac{1}{2}\frac{A_{cs}\sqrt{f_{ck}\,E_{cs}}}{\gamma_{cs}} \\ \\ \frac{R_g R_p A_{cs} f_{ucs}}{\gamma_{cs}} \end{cases} \quad \textbf{(3.12)}$$

Na Equação (3.12):

Q_{Rd} é a força resistente de cálculo do conector de cisalhamento;

γ_{cs} é o coeficiente de ponderação, igual a 1,25 para combinações últimas normais, especiais ou de construção e igual a 1,10 para combinações excepcionais;

A_{cs} é a área da seção transversal do conector;

f_{ucs} é a resistência à ruptura do aço do conector;

E_{cs} é o módulo de elasticidade secante do concreto;

R_g é um coeficiente para consideração do efeito de atuação de grupos de conectores;

R_pé um coeficiente para consideração da posição do conector.

O coeficiente de redução R_g é determinado de acordo com o fluxograma apresentado na Figura 3.16 sendo os termos b_F e h_F conforme a Figura 3.17.

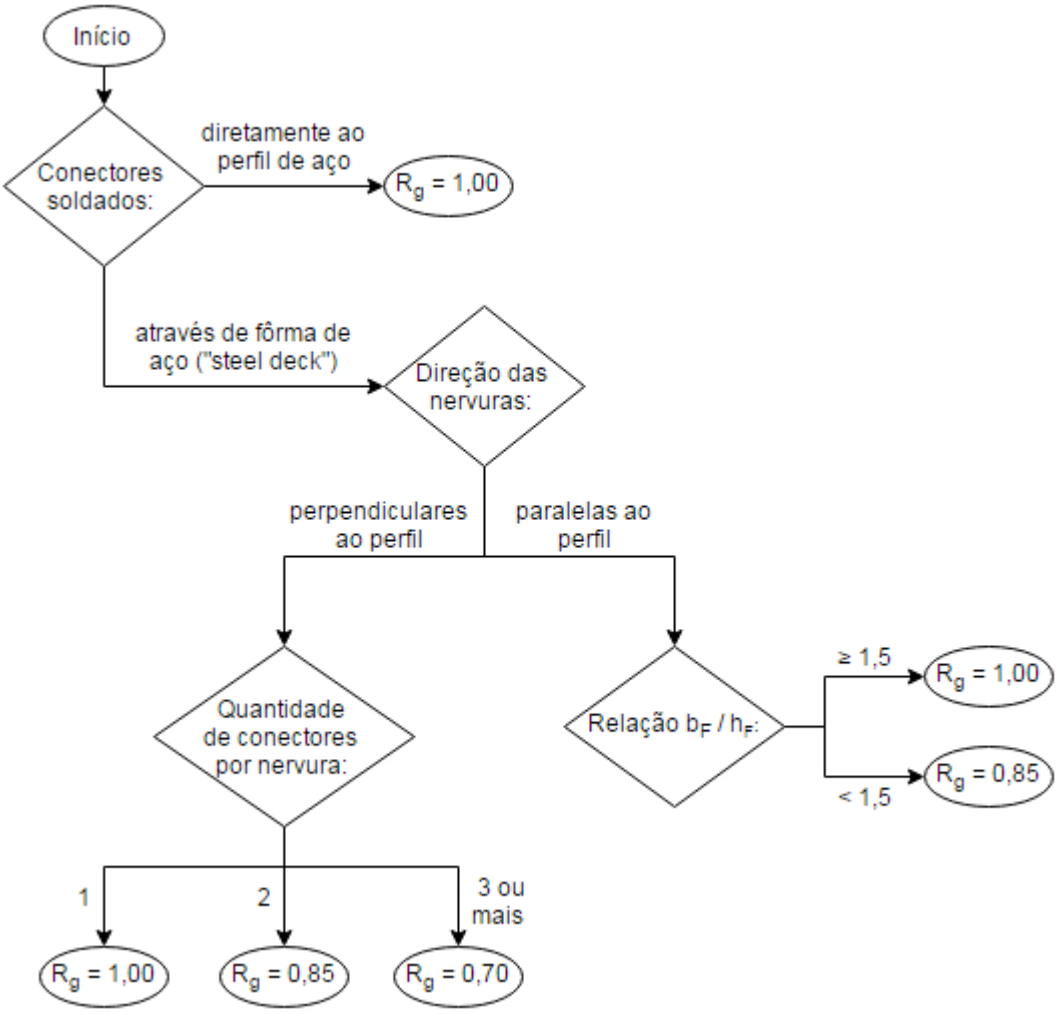


Figura 3.16 – Fluxograma para o coeficiente de redução R_g.

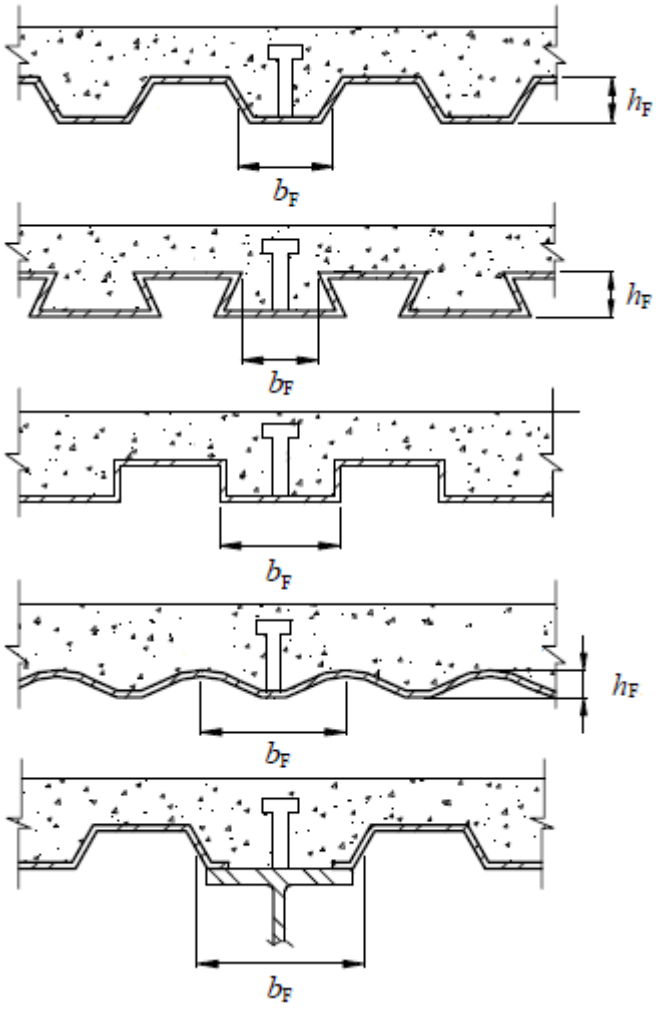


Figura 3.17 – Parâmetros b_F e h_F (Fonte: Adaptado de ABNT NBR8800:2008).

O coeficiente de redução R_p é determinado de acordo com o fluxograma apresentado na Figura 3.18 sendo o termo e_{mh} a distância da borda do fuste do conector à alma da nervura da fôrma de aço, medida à meia altura da nervura e no sentido do cisalhamento que atua no conector, conforme a Figura 3.19.

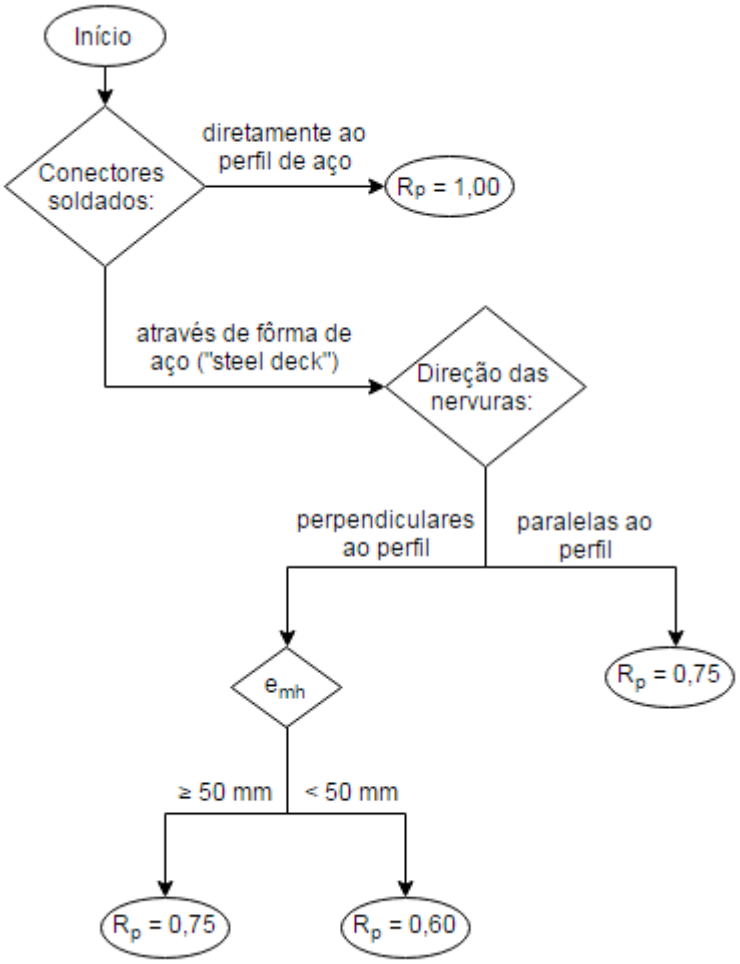


Figura 3.18 – Fluxograma para o coeficiente de redução R_p.

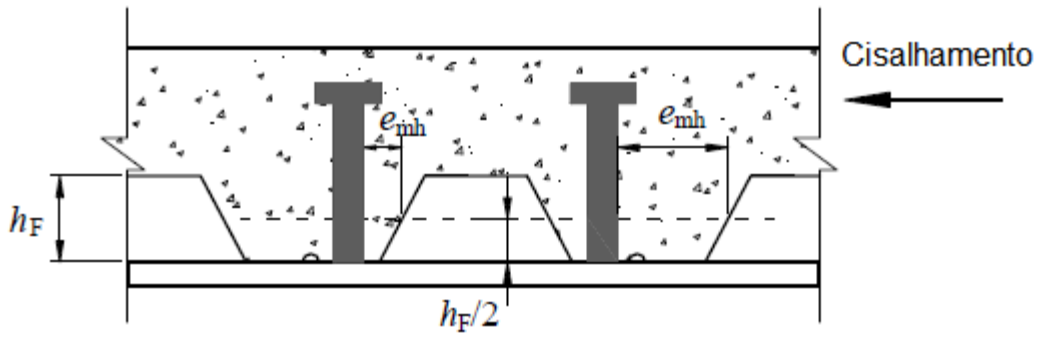


Figura 3.19 – Parâmetro e_{mh} (Fonte: Adaptado de ABNT NBR8800:2008).

3.3.3 Cisalhamento longitudinal solicitante

Sabe-se da resistência dos materiais que o cisalhamento longitudinal decorrente da flexão não uniforme é proporcional à força cortante atuando

na seção transversal. Imaginando um corte longitudinal na interface entre o concreto e o aço a distribuição do cisalhamento ocorre, para uma viga com carregamento distribuído uniforme, de acordo com a Figura 3.20.

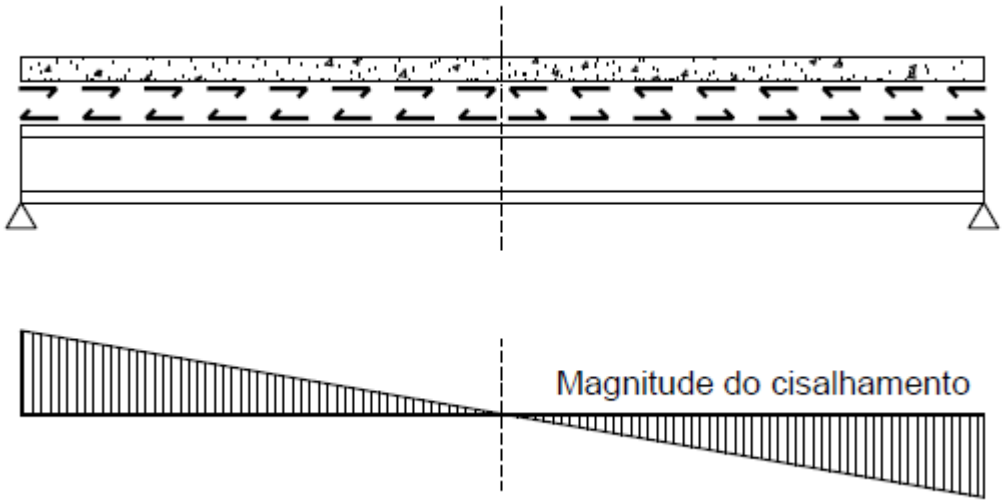


Figura 3.20 – Distribuição elástica do cisalhamento longitudinal para uma viga com carregamento uniformemente distribuído.

Em uma análise elástica fica evidente que os conectores mais próximos ao apoio são os mais solicitados pelo cisalhamento longitudinal, porém, devido ao comportamento dúctil dos conectores (Figura 3.14), as deformações plásticas que ocorrem acabam por redistribuir os esforços, de modo que é razoável considerar a hipótese de que, no estado-limite último, a força atuante em todos os conectores possuí a mesma magnitude. É importante ressaltar que a solicitação existente, mesmo considerando as deformações plásticas, continua invertendo o sentido após a seção de momento máximo, de forma a garantir o equilíbrio.

Torna-se conveniente considerar a capacidade plástica da seção transversal mista para determinar o máximo cisalhamento longitudinal solicitante que pode ocorrer na interface entre aço e concreto, admitindo que, na flexão, a seção de aço esteja completamente tracionada e a laje colaborante de concreto completamente comprimida. Assim a solicitação dos

conectores, **entre a seção de momento nulo e a seção de momento máximo** (onde existe a inversão no sentido do cisalhamento), passa a ser determinada pela Equação (3.13).

$$F_{hd} = mín\begin{cases} A_a f_{yd} \\ 0{,}85\, f_{cd} A_c \end{cases} \quad \textbf{(3.13)}$$

Na Equação (3.13), f_{cd} é a resistência à compressão de cálculo do concreto;

O coeficiente 0,85 corresponde ao efeito Rüsch, ao ganho de resistência do concreto ao longo do tempo e à correção devido aos ensaios utilizarem, na determinação de f_{ck}, corpos de prova cilíndricos de pequenas dimensões (FUSCO, 1995).

A partir da capacidade e da tensão solicitante nos conectores define-se o **grau de interação** da viga mista conforme Equação (3.14).

$$\eta_i = \frac{\sum Q_{Rd}}{F_{hd}} \leq 1{,}00 \quad \textbf{(3.14)}$$

Na Equação (3.14) $\sum Q_{Rd}$ é o somatório da resistência dos conectores de cisalhamento entre **a seção de momento positivo máximo e a seção adjacente de momento nulo**. A ABNT NBR 8800:2008 recomenda ainda respeitar um grau de interação mínimo da viga mista em função da assimetria do perfil de aço e da distância entre momentos nulos no diagrama. Para perfis em que a área da mesa inferior ($A_{f,inf}$) e a área da mesa superior ($A_{f,sup}$) são iguais ($A_{f,inf}/A_{f,sup} = 1$) valem as condições descritas na Equação (3.15).

$$Para\ L_e \leq 25\ \rightarrow\ \eta_{i,mín} = 1 - \frac{E}{578\, f_y}(0{,}75 - 0{,}03\, L_e) \geq 0{,}40$$
$$Para\ L_e > 25\ \rightarrow\ \eta_{i,mín} = 1{,}00 \quad \textbf{(3.15)}$$

Para perfis em que a área da mesa inferior é igual a três vezes a área da mesa superior ($A_{f,inf}/A_{f,sup} = 3$) valem as condições da Equação (3.16).

$$Para\ L_e \leq 20\ \rightarrow\ \eta_{i,mín} = 1 - \frac{E}{578\, f_y}(0{,}30 - 0{,}015\, L_e) \geq 0{,}40 \quad \textbf{(3.16)}$$

$$Para\ L_e > 20\ \rightarrow\ \eta_{i,mín} = 1{,}00$$

Nas Equações (3.15) e (3.16):

L_e a distância (em metros) entre pontos de momento fletor nulo;

E o módulo de elasticidade do aço;

f_y a resistência ao escoamento característica do aço.

Para situações intermediárias de assimetria entre as áreas das mesas do perfil ($1 < A_{f,inf}/A_{f,sup} < 3$), permite-se interpolar linearmente os valores de $\eta_{i,mín}$ de cada caso, sendo que outras condições de assimetria não são previstas por norma.

3.4 Estado-Limite Último

A ABNT NBR 8681:2003 define a ocorrência de um estado-limite último quando *"[...] pela sua simples ocorrência, determinam a paralisação, no todo ou em parte, do uso da construção"*, como: *"[...] perda de equilíbrio, global ou parcial, admitida a estrutura como um corpo rígido; ruptura ou deformação plástica excessiva dos materiais; transformação da estrutura, no todo ou em parte, em sistema hipostático; instabilidade por deformação; instabilidade dinâmica*.".

A segurança de uma peça estrutural é avaliada pelo método semiprobabilístico no qual, as ações e resistências características são, respectivamente, majoradas e minoradas por meio dos coeficientes de ponderação, comparando os denominados valores de cálculo. De acordo com Pantoja (2012), a determinação dos valores dos coeficientes de ponderação é baseada em dados estatísticos e conceitos probabilísticos, porém não se sabe, de maneira exata, qual a probabilidade de ruína de uma estrutura.

3.4.1 Coeficientes de ponderação

É importante definir aqui as combinações de cálculo e seus respectivos coeficientes de ponderação, visto que as ações de cálculo utilizadas para avaliação da segurança à temperatura ambiente são mais desfavoráveis que as utilizadas na avaliação em situação de incêndio (discutidas no capítulo 5), já que esta possui uma menor probabilidade de ocorrência.

As **combinações últimas normais** correspondem aos carregamentos normais previstos na construção da estrutura, relevantes no caso da análise do estado-limite último da viga mista à temperatura ambiente.

Nas **combinações últimas excepcionais** atuam os carregamentos excepcionais de caráter transitório e com duração extremamente curta que podem provocar efeitos catastróficos. A análise em situação de incêndio leva em consideração essa combinação, multiplicando ainda as ações variáveis por 0,7 de acordo com a nota 4 da tabela 6 da ABNT NBR 8681:2003.

Como alternativa, na ausência de qualquer solicitação gerada pelas deformações impostas em situação de incêndio, as solicitações de cálculo em situação de incêndio ($S_{d,fi}$) podem ser calculadas admitindo-as iguais a 70% das solicitações de cálculo à temperatura ambiente, tomando-se apenas as combinações de ações que não incluem o vento, ou seja, pode-se fazer: $S_{d,fi} = 0{,}70\, S_d$.

3.4.2 Perfis compactos

Denominam-se perfis compactos aqueles em que a relação entre a altura e a espessura da alma (h/t_w) é inferior ou igual a $3{,}76\sqrt{E/f_y}$. Em regiões de momento fletor positivo, ao obedecer tal relação, existe garantia de que a seção de aço é capaz de atingir a resistência ao escoamento antes que a alma sofra instabilidade local. Admite-se também que a conexão do perfil de aço à laje de concreto, admitida como um plano infinitamente rígido, garante a estabilidade local da mesa superior e a estabilidade lateral do conjunto.

Tendo em vista tais considerações o estado-limite último de uma viga mista compacta sob momento fletor positivo consiste na formação de uma rótula plástica entre as seções de momento nulo, sendo o momento fletor resistente dado pela total plastificação da seção mista, caracterizando uma análise plástica do problema.

O Anexo A apresenta uma rotina de cálculo sistemática para determinação do momento fletor resistente segundo ABNT NBR 8800:2008.

3.4.3 Perfis "semiesbeltos"

Denominam-se "semiesbeltos" os perfis de aço em que a relação entre a altura e a espessura da alma (h/t_w) é superior a $3{,}76\sqrt{E/f_y}$ e inferior ou igual a $5{,}70\sqrt{E/f_y}$. A ABNT NBR8800:2008 não apresenta procedimento de cálculo para vigas de alma esbelta, com (h/t_w) superior a $5{,}70\sqrt{E/f_y}$, considerando seu caráter misto. Apenas do perfil de aço trabalhando de maneira isolada.

O estado-limite último, para vigas de perfil "semiesbelto" sob momento fletor positivo, consiste no escoamento da fibra inferior do perfil metálico ou em tensões atuantes superiores à resistência à compressão do concreto na fibra superior da laje. Tais tensões são determinadas por análise elástica linear levando em consideração a inércia efetiva da seção homogeneizada (item 3.2) e os estágios de construção.

Por serem mais utilizados em pontes, passarelas e viadutos e pouco usuais em edifícios, onde a questão do incêndio torna-se relevante, essa categoria de perfil não fará parte do escopo da Dissertação e, portanto, não será detalhado o processo de dimensionamento apresentado pela ABNT NBR 8800:2008.

3.4.4 Força cortante

A ABNT NBR 8800:2008 recomenda que a força corante seja resistida apenas pelo perfil de aço isolado, sem qualquer contribuição da laje colaborante de concreto.

O Anexo C apresenta o método recomendado pela ABNT NBR 8800:2008 para determinar a força cortante resistente de cálculo de um perfil de seção I ou H.

3.5 Estado-Limite de Serviço

A ABNT NBR 8681:2003 define a ocorrência de um estado-limite de serviço (ou de utilização) quando *"[...] por sua simples ocorrência, repetição ou duração, causam efeitos estruturais que não respeitam as condições especificadas para o uso normal da construção, ou que são indícios de comprometimento da durabilidade da estruturas."*, como: *"[...] danos ligeiros ou localizados, que comprometam o aspecto estético da construção ou a durabilidade da estrutura; deformações excessivas que afetem a utilização normal da construção ou seu aspecto estético; vibração excessiva ou desconfortável*".

Na análise de um estado-limite de serviço os valores característicos dos carregamentos são reduzidos por meio de coeficientes segundo a ordem de grandeza do período de atuação dessa ação.

3.5.1 Coeficientes de ponderação

As combinações de cálculo para os estados-limites de serviço dividem-se em três grupos segundo o período de atuação dos carregamentos que agem sobre a estrutura. Definem-se as **combinações quase permanentes** aquelas que atuam grande parte do período de vida da estrutura, de acordo com a ABNT NBR 8681:2003, da ordem de metade desse período.

As **combinações frequentes** se repetem da ordem de 100.000 vezes em 50 anos ou podem atuar na estrutura por um período de cerca de 2,5 anos.

As **combinações raras** atuam apenas algumas horas durante o período de vida da estrutura, sendo utilizado o valor característico da ação variável considerada principal e aplicado coeficiente de redução nas demais.

A decisão de qual combinação de serviço deve ser utilizada para um estado-limite de serviço é, de certa forma, subjetiva, ficando a cargo do responsável técnico pelo projeto. Usualmente as combinações quase permanentes estão relacionadas à aparência da estrutura e as combinações frequentes ao funcionamento adequado de outros subsistemas dos edifícios como a inclinação adequada de calhas e coberturas ou controle de vibrações por exemplo. Já a combinação rara relaciona-se a possível danos irreversíveis em elementos não estruturais como revestimentos, alvenarias ou esquadrias.

Na ocorrência de uma ação excepcional, como o incêndio, não é necessário cumprir as exigências dos estados-limites de serviço da estrutura, sendo exclusivas para as condições normais de uso da edificação.

3.5.2 Deslocamentos

O campo de deslocamentos verticais de uma viga mista é determinado por análise elástica-linear, levando em consideração três etapas de carregamentos e três inércias à flexão da viga.

A primeira etapa engloba os carregamentos permanentes, tomados com seus valores característicos, que atuam na viga antes que o concreto que constituí a laje atinja 75% de sua resistência a compressão característica, segundo ABNT NBR8800:2008. Nesse caso a resposta elástica depende apenas da inércia do perfil de aço isolado, sem qualquer contribuição da laje de concreto. Usualmente nessa etapa atuam apenas o peso-próprio da viga de aço e da laje de concreto.

É possível que, na fase de construção, a viga de aço seja escorada durante o processo de cura do concreto, dessa forma considera-se que não existem deslocamentos associados à inércia do perfil de aço isolado.

Na segunda etapa atuam os carregamentos de longa duração, ou seja, os carregamento permanentes com seus valores característicos (que não foram levados em consideração na primeira etapa) e os carregamentos variáveis tomados com seus valores quase permanentes segundo item 3.5.1. Nesse caso os deslocamentos estão associadas à inércia efetiva da viga mista (I_{ef}) levando em consideração a razão modular associada aos efeitos de longa duração no concreto (item 3.2.3).

Na terceira etapa, consideram-se apenas carregamentos de curta duração, sendo possível tomar apenas a parcela dos carregamentos variáveis, com seus valores característicos ou frequentes (dependendo do estado-limite de serviço analisado), que não foram computadas na segunda etapa. A rigidez da viga mista nessa etapa é a mesma inércia efetiva utilizada na análise elástica para determinação dos esforços solicitantes (item 3.2.2).

Os deslocamentos totais da viga serão a simples combinação linear dos deslocamentos encontrados em cada etapa, podendo ainda ser descontado qualquer valor de contra-flecha aplicado ao perfil de aço durante sua fabricação.

3.5.3 Validade da análise elástica

A análise dos deslocamentos só pode ser validada caso se constate que a viga mista permaneça no regime elástico sob as ações de serviço, ou seja, que a tensão máxima na fibra inferior do perfil de aço, calculada com as mesmas combinações de serviço utilizadas na determinação da flecha, não ultrapasse a resistência ao escoamento do aço.

A tensão máxima é determinada pela divisão do momento fletor atuante em cada etapa de carregamento pelo módulo de resistência elástico

inferior da viga em cada etapa (M/W). As mesmas considerações feitas no item 3.5.2 são válidas aqui, incluindo o escoramento ou não da viga durante a cura do concreto e os efeitos de longa duração.

4 CARACTERIZAÇÃO DO INCÊNDIO

4.1 Introdução

Os projetos estruturais têm como objetivo conciliar segurança e economia, garantido a proteção de seus usuários e evitando desperdícios, seja de material ou de mão de obra. Essa linha de raciocínio pode ser estendida às análises de estruturas sob a ação do fogo, pois visam avaliar se a mesma é capaz de respeitar o tempo requerido de resistência ao fogo (TRRF) e, em termos de economia, a necessidade ou não de revestimento contra fogo adicional ou mesmo de aumentar as dimensões dos elementos estruturais.

As análises em situação de incêndio são indispensáveis em edifícios de grande porte onde a dificuldade de desocupação, a preservação da segurança dos usuários e equipe de combate e a redução de danos patrimoniais são questões de grande relevância. O anexo A da ABNT NBR 14432:2001 e as Instruções Técnicas dos Corpos de Bombeiros estaduais (IT 8:2011 em São Paulo) é responsável por classificar as edificações segundo os tempos requeridos de resistência ao fogo e definir edificações isentas de verificação, assunto abordado no item 4.3.3.

A questão do incêndio geralmente é vista como uma desvantagem das estruturas em aço quando feita a comparação a estruturas de concreto armado. Os métodos de verificação da segurança a temperaturas elevadas visam enfrentar tal problema de modo a tornar a escolha do aço como material estrutural mais atraente. Atualmente, segundo Fonseca (2015), a escolha por sistemas estruturais em aço representa 15% do setor de edificações no Brasil, porém ainda está longe de atingir o índice visto em países desenvolvidos onde, nos Estados Unidos por exemplo, atinge valores de cerca 50%, chegando até 70% como visto na Inglaterra.

No cenário nacional o primeiro estudo sobre o comportamento de estruturas a temperaturas elevadas, de acordo com Albuquerque (2012), é datado de 1949 e teve como motivação o incêndio de grandes proporções

que ocorreu durante a construção da Agência do Banco do Brasil em São Paulo em maio de 1947. Outros incêndios de grande impacto, devido ao elevado número de vítimas, como o do edifício Andraus em fevereiro de 1972 e o do edifício Joelma em fevereiro de 1974, foram responsáveis por aprimorar estudos sobre o assunto.

Em caso mais recente, no dia 21 de dezembro de 2015, um incêndio atingiu o Museu da Língua Portuguesa no edifício onde está localizada a estação da Luz, causando grandes prejuízos patrimoniais e fazendo uma vítima fatal.

No dia 1 de maio de 2018 um incêndio de proporções catastróficas causou o colapso total do edifício Wilton Paes de Almeida, de 24 andares, no centro de São Paulo. O edifício estava em estado de abandono, ocupado irregularmente por diversas famílias. O incidente deixou 7 mortos.

Tal fato deve nos alertar sobre a importância de estudar o assunto e que a possibilidade de ocorrência de um sinistro, por menor que seja, não pode ser completamente ignorada durante o cálculo estrutural.

4.2 Transferência de calor

Tipler e Mosca (2007) explicam que de acordo com as leis clássicas da termodinâmica, sem levar em consideração efeitos relativísticos e quânticos, a temperatura de um corpo é determinada segundo o grau de agitação de suas moléculas, átomos ou íons, determinando a energia cinética média ou energia térmica do corpo. A troca dessa energia interna entre sistemas físicos recebe o nome de transferência de calor, ocorrendo sempre do corpo de temperatura mais alta para outro de temperatura mais baixa. Essa energia em trânsito é responsável por alterar a energia interna de ambos os sistemas até ser atingido o denominado equilíbrio térmico.

4.2.1 Condução

Define-se condução térmica como a transferência de calor que ocorre dentro de um corpo ou no contato entre corpos pelo choque de partículas vizinhas, distribuindo a energia interna de um certo ponto até às demais regiões (TIPLER; MOSCA, 2007). O equilíbrio térmico ocorre quando, na ausência de cargas externas, todas as partículas em contato atingem a mesma temperatura, uniformizando a energia interna do sistema.

A Figura 4.1 indica de forma esquemática o processo de condução térmica. A extremidade próxima da fonte térmica transfere calor para a extremidade de temperatura mais baixa, de modo que com o passar do tempo ($t_1 < t_2 < t_3$) a energia térmica em toda barra passa a se elevar.

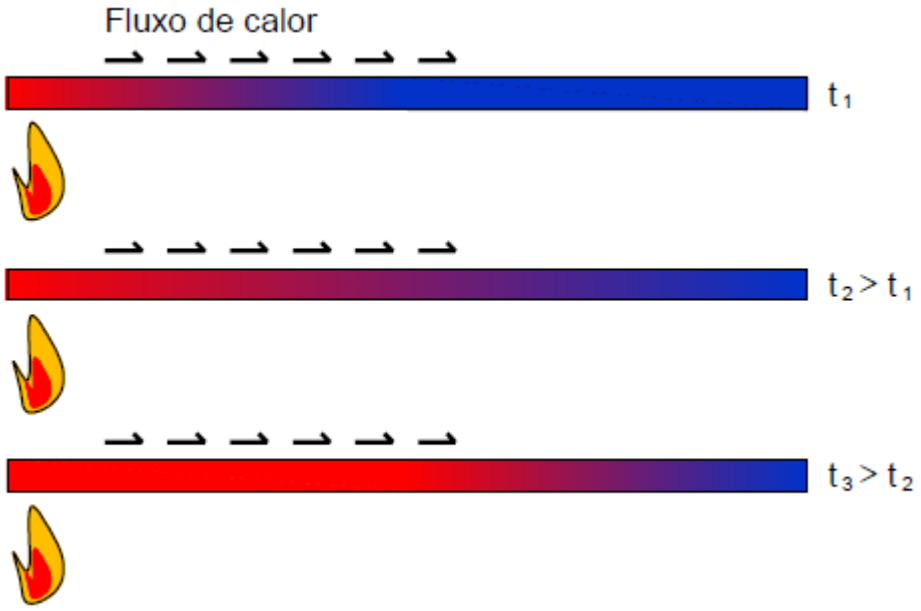


Figura 4.1 – Conceito de condução térmica.

Segundo Dassault Systèmes (2012) a Lei de Fourier, apresentada na Equação (4.1), é responsável por descrever tal fenômeno em sua forma diferencial.

$$\varphi_{cond} = -\lambda \frac{\partial \theta}{\partial x} \tag{4.1}$$

Na Equação (4.1):

φ_{cond}é o fluxo de calor por condução;

λé a matriz de condutividade térmica;

xé o vetor de coordenadas;

θé a temperatura.

A matriz de condutividade pode ser dependente da temperatura $\lambda = \lambda(\theta)$ de modo que o problema pode apresentar caráter não linear.

Ao abordar a forma variacional do problema relaciona-se o balanço de energia do sistema que é escrito conforme a Equação (4.2).

$$\int_V \rho\, c\, \frac{\partial \theta}{\partial t}\, \delta\theta\, dV + \int_V \lambda\, \frac{\partial \theta}{\partial x} \frac{\partial \delta\theta}{\partial x} dV = \int_V r\, \delta\theta\, dV + \int_S q\, \delta\theta\, dS \qquad \textbf{(4.2)}$$

Na Equação (4.2):

ρ a densidade do material;

V o volume do corpo;

S a área superficial do corpo;

q o fluxo de calor por unidade de área;

r o fluxo de calor externo por unidade de volume;

c o calor específico do material;

$\delta\theta$ um campo de temperatura arbitrário que satisfaz as condições de contorno do problema.

A solução de (4.2) é usualmente tratada pelo método dos elementos finitos, ou seja, a geometria do corpo é discretizada em formas simples representadas por nós e o campo de temperatura, dentro dos elementos, é interpolado segundo seus valores calculados nestes nós. O campo arbitrário $\delta\theta$ também é representado pela mesma função de interpolação, caracterizando a abordagem de Galerkin.

Outra característica da solução utilizada pelos programas de computador é de tratar o termo $\partial\theta/\partial t$ de forma incremental conforme Equação (4.3), discretizando o tempo em intervalos Δt de tal sorte a evitar instabilidades numéricas e acúmulo de erros e minimizar o custo computacional.

$$\frac{\partial\theta}{\partial t} = \frac{\theta_{t+\Delta t} - \theta_t}{\Delta t} \quad \textbf{(4.3)}$$

Na análise em situação de incêndio de elementos estruturais de aço isolados é usual tratar que os mesmos, por apresentarem seções transversais esbeltas, apresentam uma variação uniforme de temperatura (SILVA, 2001). Em outras palavras despreza-se o efeito da variação térmica no interior da seção transversal e, visto que é comum tratar que os gases dentro do ambiente onde ocorre o incêndio se aquecem de maneira uniforme (sem levar em consideração a proximidade com o local exato do foco), considera-se que o aquecimento no comprimento da barra também se dá por igual.

Admite-se que o aumento de temperatura é proporcional ao *fator de massividade* do corpo sob ação do fogo, definida na Equação (4.4).

$$F = \frac{A_{exp}}{V} \quad \textbf{(4.4)}$$

Na Equação (4.4):

A_{exp}é a área exposta à ação da temperatura externa;

Vé o volume do corpo aquecido.

No caso de uma barra prismática (com seção transversal constante) é possível simplificar a relação substituindo a área exposta pelo perímetro exposto (u_{exp}) e o volume do corpo pela área da seção transversal (A), resultando na Equação (4.5).

$$F = \frac{u_{exp}}{A} \quad \textbf{(4.5)}$$

A consideração de aquecimento uniforme, porém, não se verifica no caso de um elemento estrutural não isolado, pois estará sujeito a um gradiente térmico. A Figura 4.2 ilustra uma situação em que tal efeito ocorre.

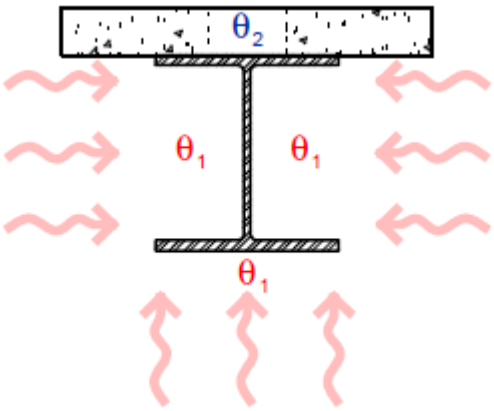


Figura 4.2 – Viga exposta a diferentes temperaturas.

Em uma viga de aço sob laje de concreto é possível notar que suas faces não estão expostas de maneira igual à ação do incêndio já que a laje proporciona uma proteção à mesa superior do perfil, levando a uma distribuição não uniforme da temperatura interna. Esse gradiente térmico ao longo da altura da seção provoca deformações adicionais na viga e, no caso de estruturas hiperestáticas, escopo desta Dissertação, esforços solicitantes indiretos devido à restrição de rotação nos apoios.

Silva (2001) mostra que, em uma análise em que se considera o comportamento do aço como material elástico-plástico perfeito e o diagrama tensão-deformação variável com a temperatura, tais esforços não afetam significativamente a segurança da estrutura. Em análises mais simples, como em modelos lineares, a consideração do gradiente leva a resultados muito antieconômicos, superestimando o valor do momento fletor solicitante. Apesar disso, Silva (2001) julga que o efeito do gradiente térmico deve ser mais bem estudado.

4.2.2 Convecção

Define-se convecção térmica como a transferência de calor devido à movimentação de fluídos (TIPLER; MOSCA, 2007).

Dá-se o nome de "convecção livre ou natural" quando a expansão térmica é o único mecanismo responsável por gerar um fluxo dentro do fluído. De forma simplificada as porções mais quentes, de maior densidade, tendem a subir e as porções mais frias, de menor densidade, tendem a descer, sendo a ação da gravidade a única responsável por provocar movimento. Chama-se de "convecção forçada" quando o movimento do fluído é causado por ações externas como, por exemplo, pela ação de uma bomba ou um ventilador. A Figura 4.3 ilustra o processo de convecção. As setas indicam o campo de velocidades do fluído gerado pelas diferenças térmicas representadas na escala de cores.

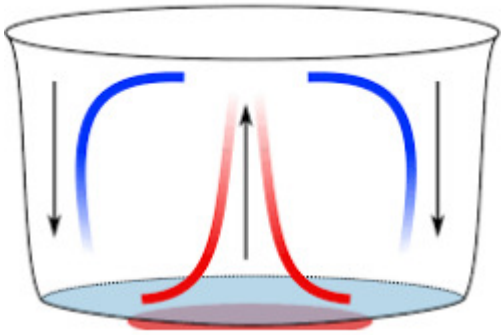


Figura 4.3 – Conceito de convecção térmica (Fonte: Max-Planck-Institut, 2017[1]).

A análise da convecção térmica pode ser realizada por meio do uso do método dos elementos finitos para solucionar a equação térmica de equilíbrio, de forma semelhante à condução térmica. Em uma análise de incêndio tal solução seria útil para, por exemplo, analisar a evolução e distribuição de temperatura e o fluxo dos gases presentes no

[1] Disponível em < http://www.mis.mpg.de/fileadmin/otto_img/convection_0_.png> Acesso em mar. 2017.

compartimento[1] onde ocorre o foco do sinistro de acordo com a geometria e ventilação dos cômodos, características físico-térmicas dos elementos de compartimentação e da carga de incêndio específica[2].

Tal solução não será vista em detalhe já que nesta Dissertação é adotada, por simplificação, uma distribuição uniforme da temperatura dos gases no ambiente do foco de incêndio, sendo o aquecimento dos elementos estruturais segundo a relação básica da transferência de calor ditada pela Lei de Arrefecimento de Newton, apresentada na Equação (4.6), que estabelece que a taxa de perda de calor de um corpo é proporcional à diferença de temperatura entre o corpo e seus arredores.

$$\varphi_c = \alpha_c(\theta_g - \theta_s) \quad \textbf{(4.6)}$$

Na Equação (4.6):

φ_c o fluxo de calor devido à convecção;

θ_g a temperatura dos gases em graus Celsius;

θ_s a temperatura na superfície da estrutura em graus Celsius;

α_c o coeficiente de transferência de calor por convecção.

Apesar de ser dependente da temperatura, a ABNT NBR 14323:2013 recomenda adotar o coeficiente α_c como igual a 25 W/(m² ºC) no caso de análise por exposição ao incêndio-padrão ou 35 W/(m² ºC), para incêndio natural (tais termos são definidos nos itens 4.3.1 e 4.3.2).

---

[1] Segundo ABNT NBR 14432:2001 compartimento é a edificação ou parte dela, compreendendo um ou mais cômodos, espaços ou pavimentos construídos para evitar a propagação do incêndio de dentro para fora de seus limites, incluindo a propagação entre edifícios adjacentes, quando aplicável.

[2] Define-se carga de incêndio específica como a soma das energias que poderiam ser liberadas pela combustão completa de todos os materiais combustíveis em um espaço (inclusive os revestimentos das paredes divisórias, pisos e tetos), divida pela área do piso considerado (ABNT NBR 14432:2001).

4.2.3 Radiação

Radiação térmica é o processo de transferência de calor por ondas eletromagnéticas resultantes da movimentação dos átomos e moléculas presentes em um corpo (TIPLER; MOSCA, 2007). Esse processo é o único que dispensa um meio material para ocorrer sendo responsável por transmitir calor através do vácuo.

Define-se um corpo negro como um corpo idealizado capaz de absorver toda radiação eletromagnética incidente sobre ele e, quando submetido a uma temperatura diferente do zero absoluto, irradia calor conforme a Lei de Stefan-Boltzmann, apresentada na Equação (4.7).

$$\varphi_r = \sigma T^4 \quad \textbf{(4.7)}$$

Na Equação (4.7):

φ_ré a potência irradiada pelo corpo;

σé a constante de Stefan-Boltzmann;

Té a temperatura do corpo (em Kelvins).

A potência eletromagnética emitida ocorre na forma de uma banda de diferentes comprimentos de onda, sendo um determinado comprimento responsável por transmitir a maior quantidade de energia. Tal fenômeno é responsável por explicar a mudança de coloração de um corpo quando aquecido, visto que o comprimento de onda principal é diferente para temperaturas distintas, segundo a Lei de Wien ilustrada na Figura 4.4. É possível notar que durante o aquecimento de um corpo o mesmo passa a emitir luz de coloração vermelha e, para temperaturas mais elevadas, luz de coloração azul.

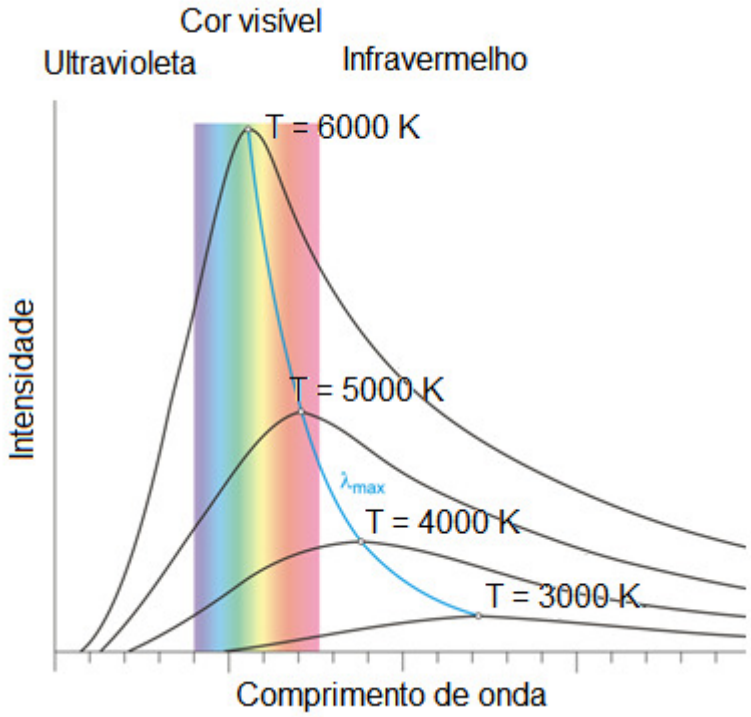


Figura 4.4 – Lei de Wien (Fonte: Adaptado de EniGeneralic[1]).

A troca de calor devido à radiação térmica entre o ambiente em incêndio e a superfície da estrutura é determinada pela diferença de temperatura, segundo Equação (4.8) já convertendo a temperatura para graus Celsius.

$$\varphi_r = \sigma\, \varepsilon_{res} \left[\left(\theta_g + 273\right)^4 - \left(\theta_s + 273\right)^4 \right] \qquad \textbf{(4.8)}$$

A constante de Stefan-Boltzmann σ vale 5,67x10^{-8} W/(m²^{o}C) e o coeficiente ε_{res} representa a emissividade resultante, indicativo da relação entre a potência irradiada por um determinado material e a potência irradiada por um corpo negro, que pode possuir valores entre 0 e 1. Para efeitos práticos a ABNT NBR 14323:2013 recomenda adotar ε_{res} igual a 0,7.

[1] Disponível em <http://glossary.periodni.com/glossary.php?en=blackbody+radiation> Acesso em jan. 2016.

4.3 A ação do incêndio

Segundo o NWCG (2012), o fogo decorre da reação termoquímica entre um material combustível e uma substância comburente (geralmente o oxigênio existente na atmosfera) na presença de calor, iniciando uma reação em cadeia. A extinção de qualquer um desses três elementos é suficiente para que o processo não ocorra ou, após iniciado, seja finalizado.

Silva (2001) explica que durante um incêndio as chamas que ocorrem em um compartimento são responsáveis, por meio do fluxo de calor por convecção e radiação, por provocar uma ação térmica nas faces expostas dos elementos estruturais, sendo que o aquecimento interno desses elementos ocorre pelo processo de condução.

A evolução da temperatura dos gases dentro de um compartimento onde ocorre o incêndio é o principal dado utilizado no estudo do impacto do sinistro nas estruturas. A curva temperatura-tempo é responsável por correlacionar tais dados e pode ser representada, de maneira genérica, pela Figura 4.5.

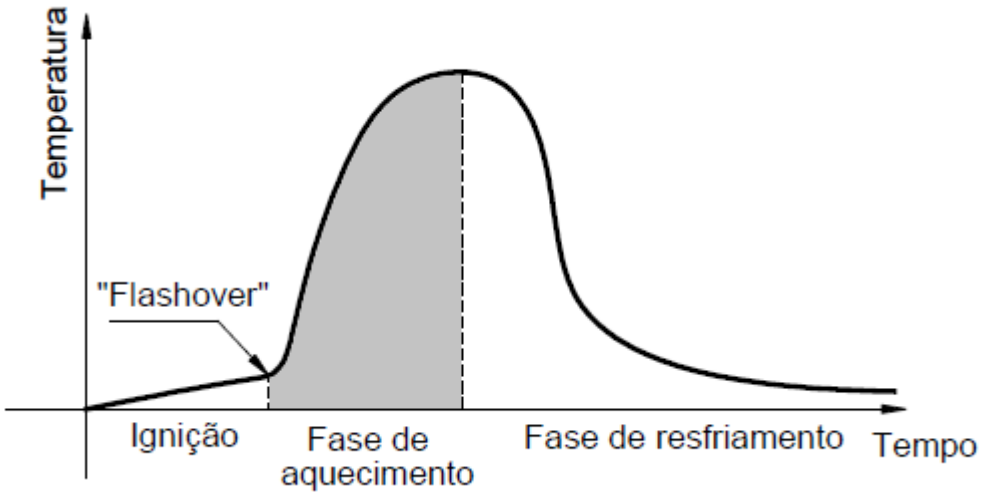


Figura 4.5 – Curva temperatura-tempo de um incêndio.

Nota-se que existe uma fase inicial, denominada ignição, onde as temperaturas se elevam de maneira lenta e é nesse intervalo onde a ação

de combate ao incêndio decorrente de sistemas de proteção denominados ativos (detectores de fumaça e calor, chuveiros automáticos, hidrantes, brigada de incêndio, entre outros) devem ser suficientes para extinguir o sinistro, evitando danos estruturais significativos na edificação.

Denomina-se inflamação generalizada ou "*flashover*" o instante em que há um aumento brusco da temperatura no ambiente, decorrente da ignição de toda carga combustível presente. As chamas já não podem ser controladas pelos sistemas de proteção ativos e os elementos estruturais passam a estar sujeitos a danos sérios e até mesmo ao colapso. Após ser atingida a temperatura máxima possível, o ambiente começa a se resfriar.

A evolução da temperatura em um ambiente é dependente, de acordo com Silva (2001), de inúmeras variáveis, sendo as principais: a carga de incêndio presente (material combustível), o grau de ventilação e as características físico-térmicas dos elementos de compartimentação. Com base em ensaios que simulam essas condições reais de incêndio são levantadas curvas temperatura-tempo que caracterizam um modelo de incêndio natural (item 4.3.2).

Com o objetivo de simplificar o processo de modelagem matemática da carga térmica, visto que o incêndio real é influenciado por diversas variáveis, adota-se uma curva padronizada, caracterizando um modelo de incêndio-padrão (item 4.3.1). Tal modelo é utilizado na ausência de estudos mais rigorosos sobre as condições a que o ambiente em análise está exposto e será o modelo utilizado nessa Dissertação.

4.3.1 Incêndio-padrão

Modelo de incêndio-padrão é o modelo de incêndio em que se utiliza uma curva temperatura-tempo padronizada. Isso significa que a evolução da temperatura dos gases no ambiente não representa uma situação real de incêndio. Sua utilização é justificada pelo fato de que, a fim de simplificar o modelo de cálculo, os métodos de dimensionamento associam a temperatura máxima atingida pelo elemento estrutural, tendo como base

essa curva-padrão, com tempos requeridos de resistência ao fogo, também padronizados (item 4.3.3) Esse processo prático, apesar de não simular a situação real, é aceito pelo meio técnico como suficiente para avaliar a segurança dos edifícios na ocorrência de um incêndio.

As curvas-padrão se caracterizam por possuir apenas um trecho ascendente, ou seja, a temperatura é sempre crescente com o tempo e não contempla a fase de resfriamento. Não existe relação da curva-padrão com a carga de incêndio, ventilação ou qualquer característica do ambiente onde ocorre o incêndio.

A ABNT NBR 14432:2001, seguindo a ISO 834-1-1999, recomenda o uso da expressão indicada na Equação (4.9) como curva temperatura-tempo padrão.

$$\theta_g = \theta_0 + 345\, log_{10}(8t + 1) \quad \textbf{(4.9)}$$

Na Equação (4.9):

té o tempo em minutos;

θ_gé a temperatura dos gases em graus Celsius;

θ_0é a temperatura dos gases no tempo $t = 0$, admitida usualmente como 20 ºC.

A aplicação da Equação (4.9) resulta na curva apresentada na Figura 4.6.

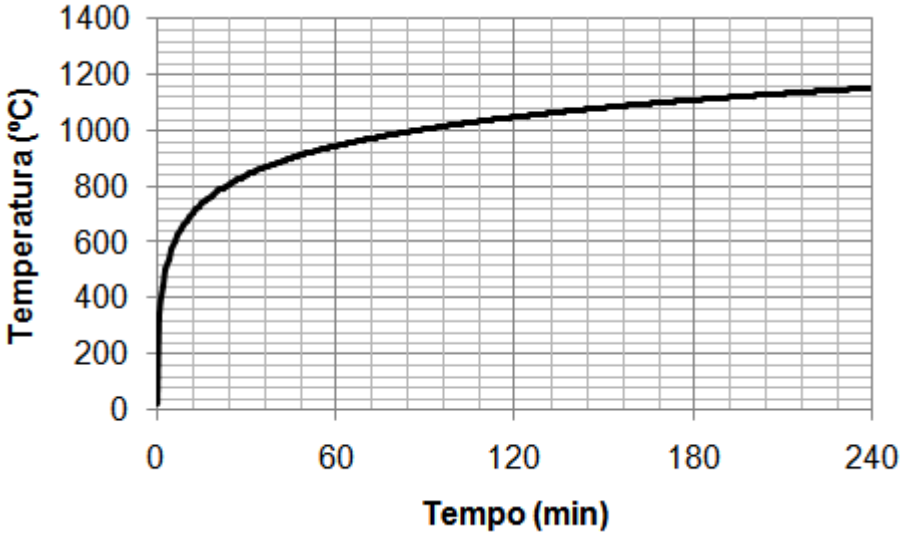


Figura 4.6 – Curva temperatura-tempo segundo ABNT NBR 14432:2001.

4.3.2 Incêndio natural

Segundo a ABNT NBR 14432:2001, um modelo de incêndio natural admite curvas temperatura-tempo construídas a partir de ensaios que simulam a evolução da temperatura real de um compartimento em chamas a partir de suas características geométricas, grau de ventilação, características físico-térmicas dos elementos de compartimentação e da carga de incêndio específica.

Diferente de um modelo de incêndio-padrão, a fase de resfriamento fica bem representada na curva, existindo um determinado momento em que a temperatura dos gases atinge um valor máximo. Define-se como duração do incêndio justamente o tempo em que esse valor máximo é atingido (SILVA, 2001).

O anexo A do Eurocode 1 EN 1991-1-2:2012 apresenta uma curva temperatura-tempo paramétrica que representa um modelo de incêndio natural. Na construção da curva são consideradas diversas características do compartimento em análise como:

- Densidade, calor específico e condutividade térmica dos elementos de compartimentação (incluindo também recomendações para superfícies compostas por diferentes materiais);

- Área do compartimento;
- Área total de aberturas;
- Altura média das janelas;
- Carga de incêndio específica;
- Taxa de crescimento do incêndio (segundo características do material inflamável presente).

Zehfuss e Hosser (2007) apresentam em seu trabalho uma curva paramétrica mais realista, denominada iBMB, adequada para edifícios residenciais e comerciais capaz de considerar as alterações das condições de ventilação e de fluxo de calor sofridas no decorrer do incêndio.

Nota-se que o tipo de informação necessária para caracterizar o incêndio é muito específica de cada projeto em análise e, portanto, não será adotada nessa Dissertação. Zehfuss e Hosser (2007) afirmam que, de maneira geral, os modelos de incêndio natural levam a resultados mais econômicos em comparação à adoção da curva ISO 834, apresentada na Equação (4.9).

Na adoção de um modelo de incêndio-padrão tais características são consideradas por meio do tempo requerido de resistência ao fogo, não tendo relação direta com a curva temperatura-tempo.

4.3.3 Tempo requerido de resistência ao fogo (TRRF)

Visto que na utilização do modelo de incêndio-padrão a temperatura dos gases se eleva continuamente, a temperatura máxima atuante nos elementos estruturais em situação de incêndio fica relacionada ao tempo requerido de resistência ao fogo (TRRF) por intermédio da utilização da curva-padrão. Em outras palavras, tendo o TRRF (tempo) como parâmetro de projeto de uma determinada edificação, a evolução da temperatura dos gases no compartimento em chamas será dada de acordo com a curva temperatura-tempo padrão, representada na Equação (4.9), tendo o TRRF como limite superiora fim de, por meio da análise de transferência de calor, determinar a evolução da temperatura do elemento estrutural.

O TRRF pode ser determinado pelo método, denominado método tabular, que consiste em apresentar valores de TRRF padronizados em função das dimensões e tipo de utilização do edifício. Tais valores foram concebidos de maneira empírica e demonstram-se eficientes na prática.

O Estado de São Paulo possui instrução técnica específica sobre o assunto regida pela IT08:2011 do Corpo de Bombeiros - Polícia Militar. No âmbito nacional os anexos A e B da ABNT NBR 14432:2001 são responsáveis por definir os valores de TRRF e classificar os edifícios, respectivamente. Nessa Dissertação será dada ênfase à IT08:2011 visto se tratar de um documento mais atual. As informações contidas na Instrução técnica estão reproduzidas no Anexo B.

4.4 Aço e concreto submetidos a temperaturas elevadas

Quando exposto a altas temperaturas o aço tem suas características físicas e químicas alteradas. Nas análises estruturais é importante avaliar a evolução da resistência ao escoamento e do módulo de elasticidade durante um incêndio, visto que os esforços resistentes se degradam com a elevação das temperaturas e, no caso de estruturas hiperestáticas, a diminuição da rigidez da peça estrutural altera ainda os esforços solicitantes causados pelas deformações térmicas restringidas e efeitos da não linearidade geométrica.

Na análise de estruturas de concreto armado sob a ação do incêndio considera-se a perda de resistência e rigidez do concreto e de resistência do aço das armaduras. Outro efeito importante de ser comentado é o fenômeno denominado "*spalling*" que ocorre, entre outras razões, devido à pressão interna exercida pela água presente no concreto quando aquecida acima de 100 ºC, ocasionando o desprendimento, muitas vezes explosivo, de camadas superficiais das peças de concreto armado. Albuquerque (2012) relata que apesar da importância de tal fenômeno, visto que o mesmo é responsável por causar redução da seção resistente de concreto e exposição da armadura ao fogo, atualmente não existe modelo de cálculo

capaz de prever a ocorrência do "*spalling"* já que, segundo Silva (2012), possuí natureza aleatória.

O Anexo E apresenta as recomendações da ABNT NBR 14323:2013 e ABNT NBR 15200:2012 para representar as propriedades térmicas e mecânicas do aço e concreto dependentes da temperatura.

5 VIGAS DE AÇO BIAPOIADAS EM SITUAÇÃO DE INCÊNDIO

5.1 Introdução

Neste capítulo será abordado o método simplificado normatizado pela ABNT NBR 14323:2013 para determinar o estado-limite último de uma viga de aço prismática isolada (sem laje de concreto colaborante) sem revestimento contra fogo sujeita somente a momento fletor positivo e força cortante em sua maior inércia. Como recomendação da norma não há a necessidade de verificar qualquer estado-limite de serviço decorrente das elevadas temperaturas, visto que o objetivo de um projeto em situação de incêndio é evitar o colapso estrutural capaz de prejudicar a fuga dos usuários do edifício em análise.

A determinação da temperatura do elemento de aço leva em consideração as simplificações relativas à transferência de calor por condução apresentadas em 4.2.1, ou seja, são adotadas as hipóteses de distribuição uniforme de temperatura na altura e comprimento da viga e na espessura das chapas que compõe o perfil de aço.

5.2 Restrições de apoio

As ligações articuladas mais comuns para vigas de piso nos edifícios com estrutura em aço são compostas por cantoneiras ou chapas responsáveis por fixar, por meio de soldas ou parafusos, somente a alma do perfil, conforme Figura 5.1.

Figura 5.1 – Exemplo de ligação articulada (Fonte: Universidade de Wyoming[1]).

Salvo folgas para montagem nota-se que em uma eventual elevação de temperatura não há espaço suficiente para acomodar dilatações térmicas, havendo restrição aos movimentos horizontais. Para aumentos relativamente baixos de temperatura tal restrição é responsável por gerar uma reação vincular horizontal e consequentes tensões de compressão na viga, segundo ilustrado pela Figura 5.2.

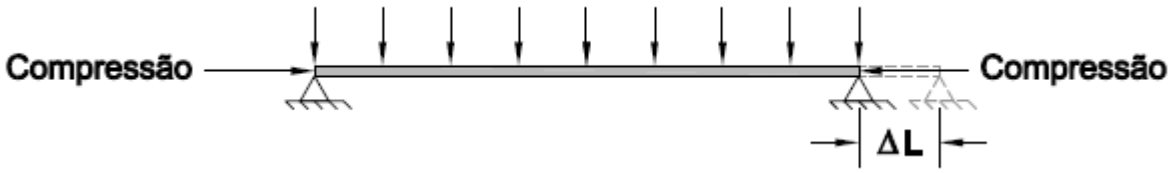


Figura 5.2 – Compressão na viga devido restrição da dilatação térmica.

Ocorre que para temperaturas muito altas a degradação do módulo de elasticidade do aço gera grandes deformações verticais e, ao considerar efeitos da não linearidade geométrica, tensões de tração no perfil, de forma semelhante ao calcular-se o equilíbrio de um cabo, conforme Figura 5.3. Tal efeito é denominado efeito catenária.

[1] Disponível em <http://www.uwyo.edu/ceas/current-students/classes/connections/images>. Acesso em abr. 2016.

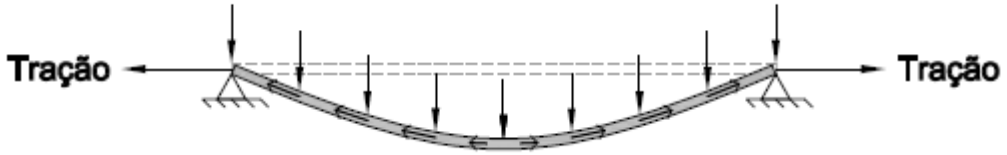


Figura 5.3 – Tração na viga para grandes deformações verticais (efeito catenária).

Silva (2001) mostra que para uma situação usual de carregamento vertical a reação horizontal de compressão atinge seu valor máximo em torno de 100 ºC e atinge valor nulo próximo aos 600 ºC quando inverte de sinal, passando a representar uma reação de tração. Tal fato resulta que os esforços indiretos causados pela restrição horizontal do apoio não são relevantes na análise da segurança da estrutura para temperaturas próximas da crítica.[1]

Silva (2001) também apresenta conclusões semelhantes para a análise de pórticos planos.

É justamente por esse fato que a ABNT NBR 14323:2013 recomenda que, ao aplicar o método do incêndio-padrão com as combinações últimas excepcionais (item 3.4.1), os esforços solicitantes sejam obtidos com as propriedades mecânicas do aço à temperatura ambiente, não havendo necessidade de considerar os efeitos das expansões térmicas.

5.3 Temperatura no elemento de aço

5.3.1 Formulação

Neste item será apresentado um método simplificado, recomendado pela ABNT NBR 14323:2013 para determinar a temperatura atingida por um elemento de aço sem revestimento contra fogo, quando submetido à ação do incêndio.

[1] Denomina-se **temperatura crítica** a temperatura em que ocorre o colapso estrutural do elemento em análise.

Como discutido em 4.3 há, durante um incêndio, um fluxo de calor por radiação e convecção entre o ambiente em chamas e o elemento estrutural de aço em análise. O método consiste em aplicar o equilíbrio térmico para pequenos intervalos de tempo, acompanhando a evolução da temperatura do incêndio.

Partindo-se das hipóteses de que o elemento estrutural esteja totalmente imerso no ambiente em chamas, de que a distribuição da temperatura no elemento estrutural seja uniforme, ou seja, a temperatura da superfície exposta ao fogo seja igual à média da temperatura do elemento de aço, válida para seções formadas por elementos de paredes delgadas e a favor da segurança para seções robustas (SILVA, 2001) e de que o fluxo de calor no elemento estrutural seja unidimensional.

O fluxo de calor emitido pelo ambiente em chamas é dado, em W/m², pela soma das parcelas de convecção e radiação, representadas pelas Equações (4.6) e (4.8) respectivamente. Multiplicando-se tal fluxo pela área exposta do elemento estrutural determina-se o fluxo de calor, em W, que incide sobre o aço durante um incêndio, segundo Equação (5.1).

$$\dot{Q}_{inc} = \varphi \, A_{exp} \tag{5.1}$$

Na Equação (5.1):

$\dot{Q}_{inc}$ o fluxo de calor que incide sobre o elemento estrutural [W];

$\varphi = (\varphi_c + \varphi_r)$ o fluxo de calor incidente por convecção e radiação [W/m²];

A_{exp} a área de aço exposta ao ambiente em chamas [m²].

A quantidade de energia necessária para elevar a temperatura do aço é avaliada segundo seu calor específico. A própria definição de calor específico é a energia necessária, em Joules, para elevar 1 quilograma de aço em 1 ºC, logo o calor absorvido por uma peça de aço que tem sua temperatura elevada em $\Delta\theta_a$ é dado multiplicando-se o calor específico do aço pela massa de aço e pela variação de temperatura, de acordo com a Equação (5.2).

$$Q_{abs} = m_a c_a \Delta\theta_a \quad \textbf{(5.2)}$$

Na Equação (5.2):

Q_{abs} é o calor absorvido pelo aço [J];

m_a é a massa aquecida de aço [kg];

c_a é o calor específico do aço [J/kg ºC];

$\Delta\theta_a$ é a variação de temperatura no aço [ºC].

Considerando uma variação de temperatura ocorrida dentro de um intervalo de tempo dt e tomando a massa de aço aquecida como o produto do volume de aço aquecido por sua massa específica é possível determinar o fluxo de calor absorvido $\dot{Q}_{abs}$, em W (ou J/s), pelo elemento estrutural, segundo Equação (5.3).

$$\dot{Q}_{abs} = V \rho_a c_a \frac{d\theta_a}{dt} \quad \textbf{(5.3)}$$

Na Equação (5.3):

$\dot{Q}_{abs}$ é o fluxo de calor absorvido pelo aço [W];

V é o volume aquecido de aço [m³];

ρ_a é a massa específica do aço [kg/m³].

O equilíbrio térmico fica representado igualando o fluxo de calor incidente, Equação (5.1), com o fluxo de calor absorvido pelo elemento estrutural de aço, Equação (5.2), resultando na Equação (5.4).

$$\varphi A_{exp} = V \rho_a c_a \frac{d\theta_a}{dt} \quad \textbf{(5.4)}$$

Tomando-se intervalos de tempos finitos Δt e considerando-se a definição de fator de massividade F apresentada na Equação (4.4), resulta-se na Equação (5.5).

$$\Delta\theta_a = \frac{F}{c_a \rho_a} \varphi \Delta t \quad \textbf{(5.5)}$$

Vale lembrar que no caso de uma barra prismática (seção transversal constante) o fator de massividade pode ser representado em termos do perímetro exposto ao fogo e da área da seção transversal, conforme Equação (4.5).

5.3.2 Roteiro de cálculo

A temperatura no elemento de aço segundo Equação (5.5) é determinada de maneira iterativa e, portanto, será dependente do intervalo de tempo Δt adotado. A ABNT NBR 14323:2013 **não permite** utilizar intervalos superiores a 5 segundos e valores de fator de massividade inferiores a 10 m^{-1}.

A norma admite ainda que o acréscimo de temperatura determinado pela Equação (5.5) seja multiplicado por um fator de correção k_{sh} para levar em consideração o efeito de sombreamento observado em seções do tipo I ou H dado pela Equação (5.6). Segundo Fransen e Zaharia (2005), a correção para o efeito de sombreamento decorre do fato que nos ensaios realizados em fornos, a seção de aço é aquecida principalmente pela radiação que se origina das paredes do forno e dos queimadores. Nesse caso, não pode haver mais energia que atinja a superfície do elemento do que aquela que atravessa a menor caixa que envolve a seção. Ainda segundo a última referência, a correção devido ao efeito de sombreamento deve ser aplicada somente na parte radioativa do fluxo de calor, contudo essa consideração é também aplicada à parte convectiva do fluxo. Essa aproximação é justificada porque para as temperaturas encontradas em um incêndio, a radiação é o fator de transferência de calor predominante.

$$k_{sh} = 0{,}9\,\frac{F_b}{F} \tag{5.6}$$

Na Equação (5.6):

F_b é o fator de massividade definido como a relação entre o perímetro exposto ao incêndio de uma caixa hipotética envolvendo o perfil e a área

total da seção transversal do perfil. De acordo com a Figura 5.4 esse perímetro teria o valor de $2(d + b)$ para o caso 1 e $2d + b$ para o caso 2.

Para perfis de seção transversal fechada o efeito de sombreamento não é considerado, ou seja, o fator k_{sh} deve ser tomado como unitário.

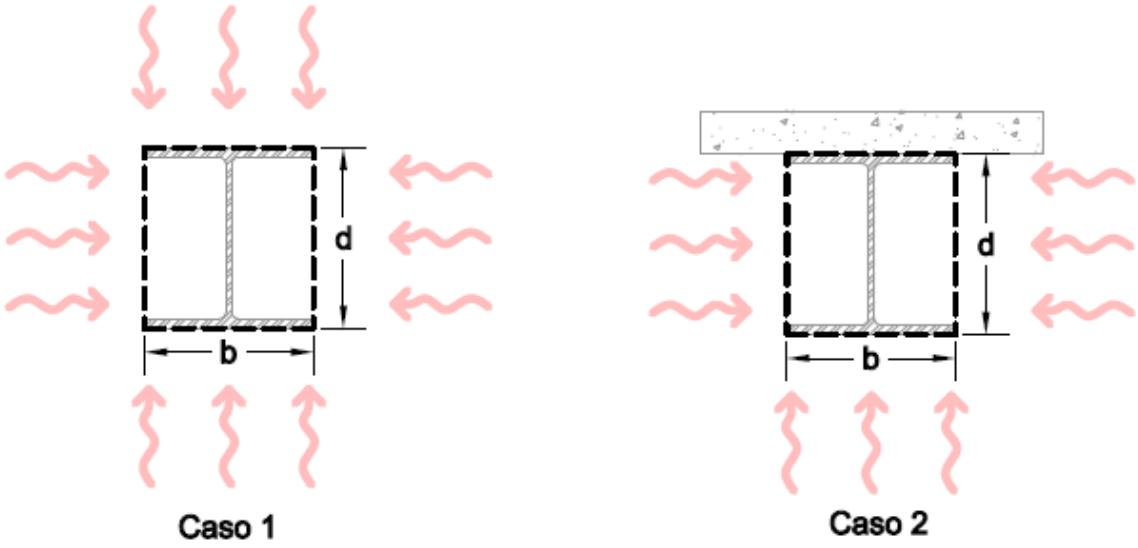


Figura 5.4 – Caixa hipotética para consideração do efeito de sombreamento.

A rotina de cálculo para o incêndio-padrão se segue conforme indicado por Silva (2001):

1. Admite-se a temperatura dos gases no ambiente e no aço para o instante $t = 0$ como ${\theta_a}^0 = {\theta_g}^0 = 20\ °C$;
2. Toma-se um intervalo de tempo de, por exemplo, 5 segundos ($\Delta t = \frac{5}{60}$ minutos);
3. Determina-se a temperatura dos gases no ambiente segundo a Equação (4.9) para o novo instante t (em minutos):
   ${\theta_g}^t = 20 + 345\ log_{10}(8t + 1)$;
4. Determina-se o fluxo de calor por radiação, segundo Equação (4.8), tomando a constante de Stefan-Boltzmann σ como 5,67x10^{-8} W/(m^2^{o}C) e o coeficiente ε_{res} como 0,7:

$\varphi_r = 5{,}67 \times 10^{-8} \,.\, 0{,}7 \left[\left({\theta_g}^t + 273 \right)^4 - \left({\theta_a}^{t-\Delta t} + 273 \right)^4 \right]$;

5. Determina-se o fluxo de calor por convecção conforme Equação (4.6), tomando o coeficiente α_c como 25 W/(m² ºC):
   $\varphi_c = 25 \left({\theta_g}^t - {\theta_a}^{t-\Delta t} \right)$;
6. O fluxo de total de calor é dado por:
   $\varphi = \varphi_r + \varphi_c$;
7. Finalmente determina-se a variação de temperatura no elemento de aço de acordo com a Equação (5.5) com Δt **em segundos**, lembrando que o calor específico c_a depende da temperatura do aço e é determinado pela Equação (E.3) ou, por simplificação, tomado constante e igual a 600 J/(kg ºC):
   $\Delta\theta_a = \dfrac{F}{c_a \rho_a} \varphi \, \Delta t$
8. A nova temperatura do aço no instante t é dada por:
9. ${\theta_a}^t = {\theta_a}^{t-1} + \Delta\theta_a$
10. Retorna-se ao passo 3 com o novo instante $t + \Delta t$.

5.4 Força cortante resistente

As recomendações da ABNT NBR 14323:2013 a respeito da determinação da força cortante resistente de cálculo em situação de incêndio de vigas de aço são baseadas na formulação descrita pela ABNT NBR 8800:2008 para uma viga à temperatura ambiente (descrita no Anexo C), porém com as seguintes recomendações:

1. Coeficiente de ponderação unitário;
2. Parâmetros de esbeltez limites reduzidos pelo fator 0,85;

Para estado-limite último em regime elasto-plástico, resistência ao escoamento reduzida pelo fator $k_{y,\theta}$ (Tabela E.1);

Para estado-limite último em regime elástico, resistência ao escoamento reduzida pelo fator $k_{\sigma,\theta}$ (Tabela E.1).

A formulação necessária para determinar a força cortante resistente de cálculo em situação de incêndio é apresentada no Anexo G.

5.5 Momento fletor resistente

A ABNT NBR 14323:2013 apresenta recomendações gerais para determinar o momento fletor resistente de uma viga de aço em situação de incêndio. Assim como no caso da força cortante resistente, grande parte da formulação para determinação dos parâmetros de esbeltez tem como base a situação à temperatura ambiente. O Anexo D descreve o procedimento recomendado pela ABNT NBR 8800:2008 para determinação do momento fletor resistente de vigas com seção transversal do tipo I ou H com dois ou apenas um eixo de simetria à temperatura ambiente e serve de auxílio para as definições descritas neste item.

A primeira recomendação, válida para todos os estados-limites últimos, é de minorar os parâmetros de esbeltez limites do comportamento plástico λ_p e totalmente elástico λ_r na situação de incêndio por um fator multiplicativo de 0,85.

Para os estados-limites últimos FLA e FLM (ver Anexo D para descrição dos estados-limites) quando em regime plástico ou elastoplástico, a resistência ao escoamento deve ser reduzida pelo fator $k_{y,\theta}$ (Tabela E.1) e, quando em regime totalmente elástico, pelo fator $k_{\sigma,\theta}$ (Tabela E.1).

Para o estado-limite FLT os efeitos de instabilidade global da peça são avaliados por meio da determinação de um fator de redução χ_{fi} associado a um índice de esbeltez reduzido $\lambda_{0,fi}$ de maneira análoga à determinação da força axial resistente de compressão.

A formulação necessária para determinar o momento fletor resistente de cálculo em situação de incêndio é apresentada no Anexo H.

6 VIGAS MISTAS DE AÇO E CONCRETO EM SITUAÇÃO DE INCÊNDIO

6.1 Temperatura na seção transversal

Na análise da capacidade resistente da seção mista de aço e concreto considera-se uma distribuição não uniforme da temperatura na altura da seção transversal. A recomendação da ABNT NBR 14323:2013 é de dividir a seção mista em cada um de seus componentes (Figura 6.1), sendo eles: a laje de concreto, a mesa superior, inferior e alma do perfil de aço. Nesta consideração fica adotada a hipótese simplificadora de que não ocorre transferência de calor entre essas partes.

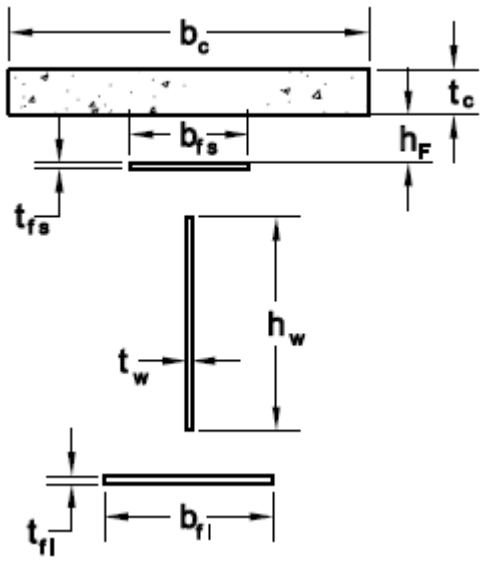


Figura 6.1 – Componentes da seção mista.

6.1.1 Elementos de aço

Nos elementos de aço, o acréscimo de temperatura de cada componente é determinado segundo o procedimento descrito no item 5.3.2 considerando o fator de massividade calculado para o elemento isolado, conforme Tabela 6.1. A ABNT NBR 14323:2013 permite considerar ainda o

efeito de sombreamento conforme Equação (5.6). O valor de k_{sh} deve ser avaliado para a seção transversal do perfil de aço como um todo e adotado como igual para todos os componentes isolados.

Tabela 6.1 – Fator de massividade de cada componente da seção mista segundo ABNT NBR 14323:2013.

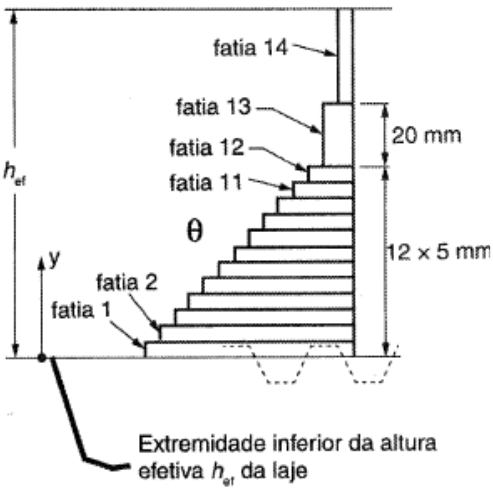
Componente	Fator de massividade
Mesa inferior	$F_{fi} = 2(b_{fi} + t_{fi})/(b_{fi}t_{fi})$
Mesa superior sob laje maciça	$F_{fs} = (b_{fs} + 2\,t_{fs})/(b_{fs}t_{fs})$
Mesa superior sob laje com fôrma de aço	$F_{fs} = 2(b_{fs} + t_{fs})/(b_{fs}t_{fs})$
Alma	$F_w = (2\,h_w)/(h_w t_w)$

6.1.2 Laje de concreto

Para avaliar a temperatura a que a laje de concreto da viga mista é submetida durante um incêndio a recomendação da ABNT NBR 14323:2013 é de discretizar a altura da laje em 14 fatias e atribuir uma temperatura para cada faixa de acordo com o TRRF (Tabela 6.2).

Tabela 6.2 – Distribuição de temperatura na altura das lajes de concreto (fonte: adaptado de ABNT NBR 14323:2013 e EN 1994-1-2:2005).

Fatia	Altura (y) mm	TRRF min					
		30	60	90	120	180	240
1	0 a 5	535	705	-	-	-	-
2	5 a 10	470	642	738	-	-	-
3	10 a 15	415	581	681	754	-	-
4	15 a 20	350	525	627	697	-	-
5	20 a 25	300	469	571	642	738	-
6	25 a 30	250	421	519	591	689	740
7	30 a 35	210	374	473	542	635	700
8	35 a 40	180	327	428	493	590	670
9	40 a 45	160	289	387	454	549	645
10	45 a 50	140	250	345	415	508	550
11	50 a 55	125	200	294	369	469	520
12	55 a 60	110	175	271	342	430	495
13	60 a 80	80	140	220	270	330	395
14	≥ 80	60	100	160	210	260	305



Para o caso de lajes de concreto maciças a altura h_{ef} é a altura total da laje, para lajes de concreto com pré-laje pré-moldada h_{ef} também é a altura total, incluindo a pré-laje. No caso de lajes com fôrma de aço incorporada h_{ef} é dado pela Equação (6.1) com os parâmetros definidos pela Figura 6.2.

$$Para\ \frac{h_F}{t_c} \leq 1{,}5\ e\ t_c > 40\ mm \rightarrow h_{ef} = t_c + \frac{h_F}{2}\left(\frac{b_1 + b_b}{b_1 + b_2}\right)$$

$$Para\ \frac{h_F}{t_c} > 1{,}5\ e\ t_c > 40\ mm \rightarrow h_{ef} = t_c\left(1 + 0{,}75\frac{b_1 + b_b}{b_1 + b_2}\right) \quad \textbf{(6.1)}$$

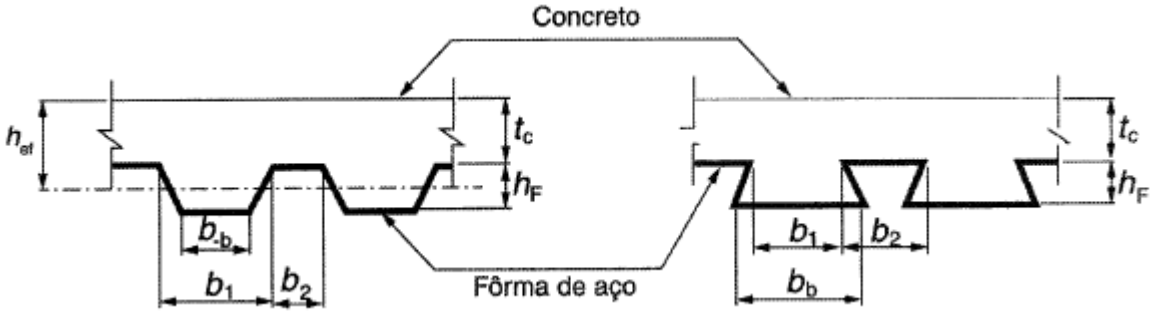


Figura 6.2 – Parâmetros para determinação de h_{ef} (fonte: ABNT NBR 14323:2013).

6.2 Momento fletor resistente

Neste item é apresentada a determinação do momento fletor resistente de uma viga mista de aço e concreto, formada por um perfil compacto de seção tipo I ou H. No caso para situação de incêndio classificam-se perfis compactos aqueles em que a relação entre a altura e a espessura da alma (h/t_w) é inferior ou igual a $3{,}20\sqrt{E/f_y}$, que representa o limite no caso de temperatura ambiente multiplicado por um fator de 0,85. A ABNT NBR 14323:2013 não explicita tal procedimento no anexo reservado para o dimensionamento de vigas mistas, porém é uma recomendação para a classificação de vigas isoladas expostas ao incêndio (item 5.5).

6.2.1 Conectores de cisalhamento

A ABNT NBR 14323:2013 recomenda que a força resistente de cálculo de um conector de cisalhamento seja determinada da mesma forma indicada pela ABNT NBR 8800:2008 tomando, porém, coeficiente de ponderação unitário, valores de resistência à compressão do concreto e módulo de elasticidade reduzidos por $k_{c,\theta}$ segundo Tabela E.3 para uma temperatura equivalente a 40% da temperatura da mesa superior do perfil de aço. Deve-se adotar, ainda, o valor da resistência à ruptura do aço do conector reduzido por 0,80 $k_{y,\theta}$ para uma temperatura equivalente a 80% da temperatura da mesa superior do perfil de aço.

A Equação (6.2) apresentada formulação já ajustada para a situação de incêndio.

$$Q_{Rd,fi} = mín \begin{cases} 0{,}50\ A_{cs} k_{c,\theta} \sqrt{f_{ck}\ E_{cs}} \\ 0{,}80\ k_{y,\theta}\ R_g R_p A_{cs} f_{ucs} \end{cases} \quad \textbf{(6.2)}$$

Os parâmetros são os mesmos já apresentados na Equação (3.12).

6.2.2 Momentos fletores positivos

O procedimento descrito pela ABNT NBR 14323:2013 limita-se às recomendações de se utilizar o método sugerido pela ABNT NBR 8800:2008 utilizando-se coeficientes de ponderação unitários e reduzindo as resistências do concreto e do aço pelos coeficientes $k_{c,\theta}$ e $k_{y,\theta}$, respectivamente. A determinação da temperatura de cada elemento já foi descrita em 6.1.

O procedimento da ABNT NBR 8800:2008 será apresentado aqui incluindo as recomendações da ABNT NBR 14323:2013 com maior detalhe. O fator 0,85 utilizado para determinar a máxima força de compressão na laje de concreto será adotado como 1,00 conforme recomendação do Boletim nº46 *fib*-CEB, 2008 (ALBUQUERQUE, 2012).

Dado um TRRF, a máxima força de compressão admissível na laje de concreto é determinada como a soma das forças de plastificação de cada fatia de temperatura (Tabela 6.2) multiplicada pelo fator $k_{c,\theta}$, segundo Equação (6.3). Seguindo recomendação da ABNT NBR 8800:2008 as fatias localizadas abaixo da espessura da pré-laje de concreto pré-moldada ou da altura das nervuras da fôrma de aço incorporada, apesar de serem consideradas na determinação da distribuição da temperatura na laje, serão desprezadas na determinação do momento fletor resistente.

$$C_{cd,fi}^{máx} = b f_{ck} \sum h^n k_{c,\theta}^n \quad \textbf{(6.3)}$$

Na Equação (6.3):

b é a largura efetiva da laje de concreto;

h^n é a espessura de cada fatia “n” de laje considerada (Tabela 6.2);

$k_{c,\theta}^n$ é o fator de redução (Anexo E) associado à temperatura de cada fatia “n” de laje conforme Tabela 6.2.

A máxima força de tração a que o perfil de aço pode ser submetido será a soma das forças de plastificação de cada elemento (mesa inferior, alma e mesa superior), segundo Equação (6.4), visto que cada elemento terá uma temperatura distinta conforme 6.1.1.

$$T_{ad,fi}^{máx} = f_y\left(A_w k_{y,\theta}^{w} + A_{fs} k_{y,\theta}^{fs} + A_{fi} k_{y,\theta}^{fi}\right) \quad \textbf{(6.4)}$$

Na Equação (6.4), o índice “w” corresponde à alma do perfil de aço, o índice “fs” à mesa superior e “fi” à mesa inferior.

Quando o somatório das forças resistentes dos conectores de cisalhamento, em situação de incêndio, entre a seção de momento positivo máximo e a seção adjacente de momento nulo $\sum Q_{Rd,fi}$ é superior ao menor dos valores entre $T_{ad,fi}^{máx}$ e $C_{cd,fi}^{máx}$ caracteriza-se a interação completa, para valores inferiores caracteriza-se a interação parcial.

6.2.2.1 Linha neutra plástica na laje de concreto

Na interação completa, quando $C_{cd,fi}^{máx} \geq T_{ad,fi}^{máx}$, a linha neutra plástica deve, por equilíbrio, estar na laje de concreto. Dessa forma, a força de tração no perfil de aço é dada pela Equação (6.5).

$$T_{ad,fi} = T_{ad,fi}^{máx} \tag{6.5}$$

A quantidade de fatias de laje a ser considerada deve ser tal que a força de compressão $C_{cd,fi}$ seja igual a $T_{ad,fi}$,para isso basta partir do topo da laje e encontrar qual o valor de a (Figura 6.3) que satisfaz a igualdade $C_{cd,fi} = T_{ad,fi}$.

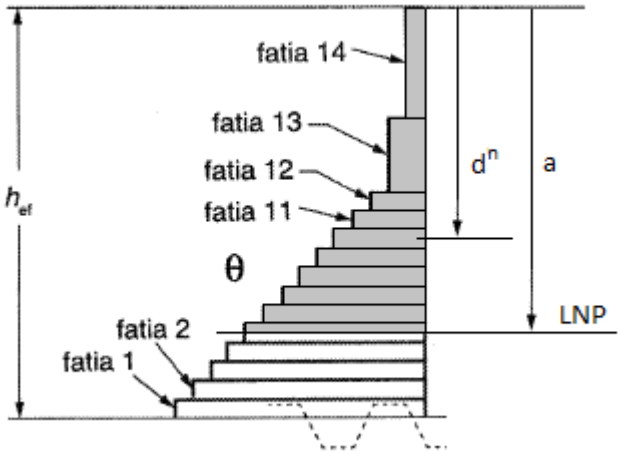


Figura 6.3 – Altura da laje comprimida a (fonte: adaptado de ABNT NBR 14323:2013).

O momento fletor resistente de cálculo deve ser determinado multiplicando a força de plastificação de cada elemento (mesas inferior e superior, alma e fatias de laje) pela distância do C.G. de cada elemento à LNP. As Equações (6.6) a (6.9) indicam as parcelas de contribuição de cada elemento (sendo os parâmetros conforme Figura 6.4).

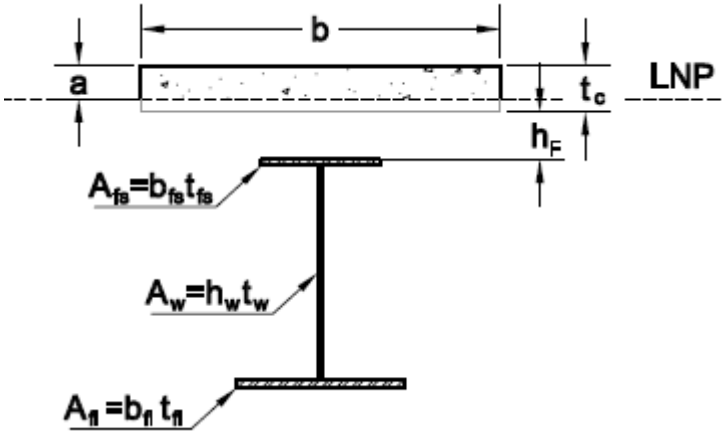


Figura 6.4 – Linha neutra plástica na laje de concreto.

$$M_{Rd,fi}^{fs} = f_y A_{fs} k_{y,\theta}^{fs} \left(\frac{t_{fs}}{2} + h_F + t_c - a \right) \quad \textbf{(6.6)}$$

$$M_{Rd,fi}^{w} = f_y A_w k_{y,\theta}^{w} \left(\frac{h_w}{2} + t_{fs} + h_F + t_c - a \right) \quad \textbf{(6.7)}$$

$$M_{Rd,fi}^{fi} = f_y A_{fi} k_{y,\theta}^{fi} \left(\frac{t_{fi}}{2} + h_w + t_{fs} + h_F + t_c - a \right) \quad \textbf{(6.8)}$$

$$M_{Rd,fi}^{c} = b f_{ck} \sum h^n k_{c,\theta}^{n} \, (a - d^n) \quad \textbf{(6.9)}$$

O parâmetro d^n representa a distância do C.G. de cada fatia comprimida à face superior da laje, segundo Figura 6.3.

O momento fletor resistente em situação de incêndio fica então definido pela Equação (6.10).

$$M_{Rd,fi} = M_{Rd,fi}^{c} + M_{Rd,fi}^{fs} + M_{Rd,fi}^{w} + M_{Rd,fi}^{fi} \quad \textbf{(6.10)}$$

6.2.2.2 Linha neutra plástica no perfil de aço

Na interação completa, quando $T_{ad,fi}^{máx} > C_{cd,fi}^{máx}$ a linha neutra plástica encontra-se no perfil de aço. A força de compressão na laje de concreto é dada pela Equação (6.11).

$$C_{cd,fi} = C_{cd,fi}^{máx} \tag{6.11}$$

A parcela de compressão do perfil de aço $C_{ad,fi}$ é dada pela Equação (6.12) de maneira a equilibrar as forças de tração e compressão na seção transversal.

$$C_{ad,fi} = \frac{1}{2}\left(T_{ad,fi}^{máx} - C_{cd,fi}\right) \tag{6.12}$$

Caso a força de compressão no perfil de aço for inferior à força de plastificação da mesa superior, ou seja, $C_{ad,fi} \leq f_y A_{fs} k_{y,\theta}^{fs}$, a LNP encontra-se na mesa superior e sua posição relativa à face superior do perfil de aço y_p é definida pela Equação (6.13).

$$y_p = \frac{C_{ad,fi}}{f_y A_{fs} k_{y,\theta}^{fs}} t_{fs} \tag{6.13}$$

As Equações (6.14) a (6.17) indicam as parcelas de contribuição para o momento fletor resistente de cada elemento, relativos à LNP. A Figura 6.5 ilustra a posição da linha neutra plástica.

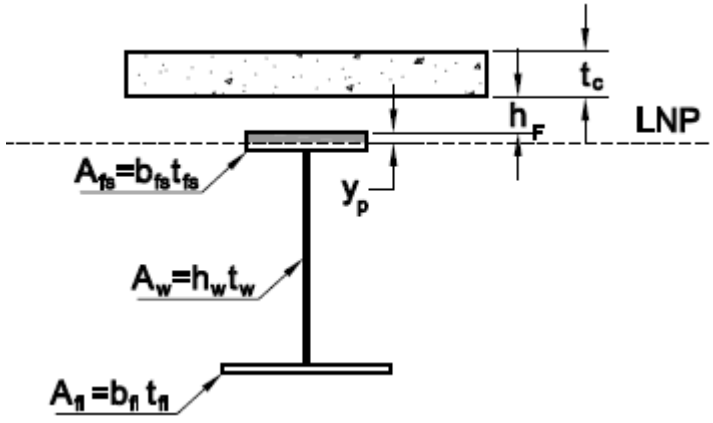


Figura 6.5 – Linha neutra plástica na mesa superior do perfil de aço.

$$M_{Rd,fi}^{fs} = \frac{f_y A_{fs} k_{y,\theta}^{fs}}{2t_{fs}} \left[{y_p}^2 + \left(t_{fs} - y_p \right)^2 \right] \quad \textbf{(6.14)}$$

$$M_{Rd,fi}^{w} = f_y A_w k_{y,\theta}^{w} \left(\frac{h_w}{2} + t_{fs} - y_p \right) \quad \textbf{(6.15)}$$

$$M_{Rd,fi}^{fi} = f_y A_{fi} k_{y,\theta}^{fi} \left(\frac{t_{fi}}{2} + h_w + t_{fs} - y_p \right) \quad \textbf{(6.16)}$$

$$M_{Rd,fi}^{c} = b f_{ck} \sum h^n k_{c,\theta}^{n} \left(t_c + h_F + y_p - d^n \right) \quad \textbf{(6.17)}$$

O parâmetro d^n representa a distância do C.G. de cada fatia comprimida à face superior da laje, segundo Figura 6.3.

Caso $C_{ad,fi} > f_y A_{fs} k_{y,\theta}^{fs}$ a linha neutra plástica encontra-se na alma do perfil de aço, com isso sua posição relativa à face superior do perfil de aço é dada pela Equação (6.18).

$$y_p = t_{fs} + h_w \left(\frac{C_{ad,fi} - A_{fs} f_y k_{y,\theta}^{fs}}{A_w f_y k_{y,\theta}^{w}} \right) \quad \textbf{(6.18)}$$

As Equações (6.19) a (6.22) indicam as parcelas de contribuição para o momento fletor resistente de cada elemento, relativos à LNP. A Figura 6.6 ilustra a posição da linha neutra plástica.

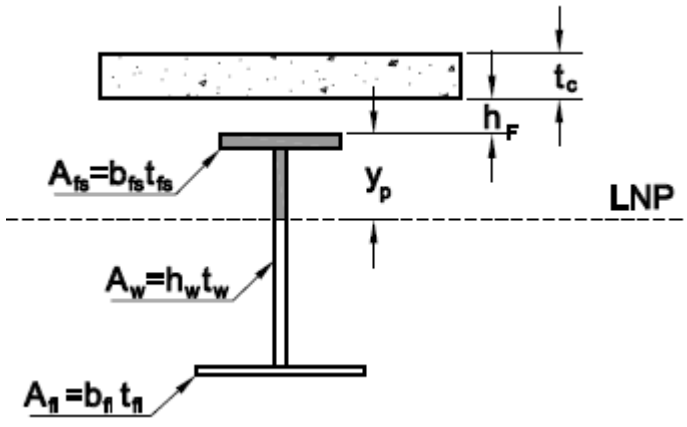


Figura 6.6 – Linha neutra plástica na alma do perfil de aço.

$$M_{Rd,fi}^{fs} = f_y A_{fs} k_{y,\theta}^{fs} \left(y_p - \frac{t_{fs}}{2} \right) \quad \textbf{(6.19)}$$

$$M_{Rd,fi}^{w} = \frac{f_y A_w k_{y,\theta}^{w}}{2h_w} \left[\left(y_p - t_{fs} \right)^2 + \left(h_w + t_{fs} - y_p \right)^2 \right] \quad \textbf{(6.20)}$$

$$M_{Rd,fi}^{fi} = f_y A_{fi} k_{y,\theta}^{fi} \left(\frac{t_{fi}}{2} + h_w + t_{fs} - y_p \right) \quad \textbf{(6.21)}$$

$$M_{Rd,fi}^{c} = b f_{ck} \sum h^n k_{c,\theta}^{n} \left(t_c + h_F + y_p - d^n \right) \quad \textbf{(6.22)}$$

O momento fletor resistente de cálculo em situação de incêndio fica definido como a soma das parcelas de cada elemento, conforme Equação (6.10).

6.2.2.3 Interação parcial

No caso de interação parcial adota-se a hipótese de que a maior força de compressão que poderá ser transmitida à laje de concreto será justamente o máximo esforço resistente dos conectores de cisalhamento valendo o descrito pela Equação (6.23).

$$C_{cd,fi} = \Sigma Q_{Rd,fi} \quad \textbf{(6.23)}$$

Por esse motivo, a laje de concreto não se encontra totalmente comprimida, sendo o parâmetro a (Figura 6.3, porém o valor não corresponderá à posição da LNP) tal que o somatório das fatias consideradas corresponda a $\Sigma\, Q_{Rd,fi}$.

Por tratar-se de interação parcial o esforço resistente dos conectores de cisalhamento é menor do que a máxima força de tração que o perfil de aço pode estar sujeito, ou seja, $C_{cd,fi} < T_{ad,fi}^{máx}$, caracterizando as mesmas expressões de $C_{ad,fi}$ e y_p definidas em 6.2.2.2, porém a parcela de

contribuição para o momento fletor resistente da laje de concreto $M_{fi,Rd}^{c}$ corresponderá apenas às fatias dentro da faixa comprimida a.

6.2.3 Momentos fletores negativos

A ABNT NBR 14323:2013 sugere que em regiões de momentos fletores negativos a laje de concreto e a armadura longitudinal presente na largura efetiva da laje sejam desprezados, resistindo apenas a seção transversal do perfil de aço e resultando, obviamente, em soluções bem conservadoras. Visto o objetivo da Dissertação ser justamente avaliar o papel da armadura longitudinal da laje nas regiões próximas aos apoios tal sugestão não será seguida, sendo o momento fletor resistente negativo em situação de incêndio determinado, conforme recomendação geral do EN-1994-1-2:2005, pela teoria da plasticidade levando em consideração a variação das propriedades dos materiais com a temperatura.

Devem ser observadas as recomendações, com seus devidos ajustes, da ABNT NBR 8800:2008 para vigas mistas sujeitas à momento fletor negativo à temperatura ambiente:

- A quantidade de conectores de cisalhamento presentes na região de momentos negativos deve ser suficiente para absorver a força de tração da armadura da laje, ou seja, $\sum Q_{Rd,fi} \geq T_{ds}$.
- A relação entre largura e espessura da mesa inferior (comprimida) do perfil de aço não pode ser superior a $0{,}32\sqrt{E/f_y}$, já considerando o fator 0,85 citado em 5.5.
- A relação entre duas vezes a altura da parte comprimida da alma (para perfis laminados desconta-se, ainda, duas vezes o raio de concordância entre a mesa e a alma) não pode ser superior a $3{,}20\sqrt{E/f_y}$.

Considerando as informações da Tabela 6.2 e Tabela E.6 é possível notar que a armadura situada próxima à camada superior da laje de concreto não sofrerá redução de sua capacidade resistente mesmo para valores muito altos de TRRF. A máxima força de tração admitida na armadura

longitudinal negativa dentro da largura efetiva de laje será a mesma para temperatura ambiente, sendo determinada pela Equação (6.24).

$$T_{ds} = A_{sl}\, f_{sd} \tag{6.24}$$

Sendo:

A_{sl} a área total de armadura longitudinal na largura efetiva da laje de concreto;

f_{sd} a resistência ao escoamento de cálculo do aço da armadura à temperatura ambiente.

Caso a taxa de armadura seja muito alta resultando em $T_{ds} \geq T_{ad,fi}^{máx}$, todo o perfil de aço estará comprimido sendo o momento fletor resistente resultado apenas do binário de forças entre a armadura e o perfil de aço. Para garantir que as formulações seguintes não resultem em valores negativos basta tomar $T_{ds} = T_{ad,fi}^{máx}$.

A parcela de tração do perfil de aço $T_{ad,fi}$ é dada pela Equação (6.25) de maneira a equilibrar as forças de tração e compressão na seção transversal.

$$T_{ad,fi} = \frac{1}{2}\left(T_{ad,fi}^{máx} - T_{ds}\right) \tag{6.25}$$

Caso a força de tração no perfil de aço seja inferior à força de plastificação da mesa superior, ou seja, $T_{ad,fi} \leq f_y A_{fs} k_{y,\theta}^{fs}$, a LNP encontra-se na mesa superior e sua posição relativa à face superior do perfil de aço y_p é definida pela Equação (6.26).

$$y_p = \frac{T_{ad,fi}}{f_y A_{fs} k_{y,\theta}^{fs}}\, t_{fs} \tag{6.26}$$

As Equações (6.27) a (6.30) indicam as parcelas de contribuição para o momento fletor resistente de cada elemento, relativos à LNP. A Figura 6.7 ilustra a posição da linha neutra plástica.

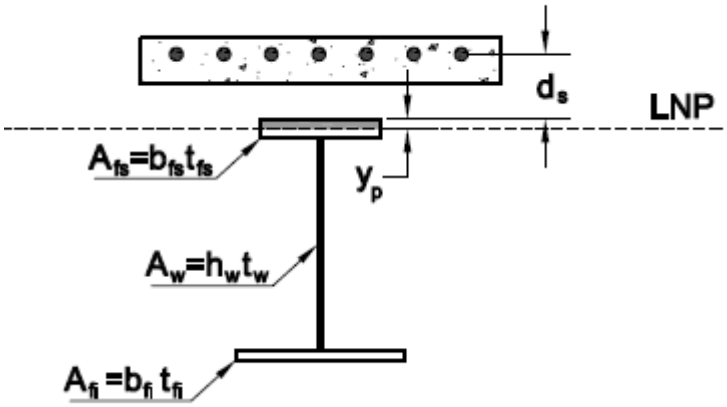


Figura 6.7 – Linha neutra plástica na mesa superior do perfil de aço, momento negativo.

$$M_{Rd,fi}^{fs} = \frac{f_y A_{fs} k_{y,\theta}^{fs}}{2t_{fs}} \left[{y_p}^2 + \left(t_{fs} - y_p\right)^2 \right] \quad \textbf{(6.27)}$$

$$M_{Rd,fi}^{w} = f_y A_w k_{y,\theta}^{w} \left(\frac{h_w}{2} + t_{fs} - y_p \right) \quad \textbf{(6.28)}$$

$$M_{Rd,fi}^{fi} = f_y A_{fi} k_{y,\theta}^{fi} \left(\frac{t_{fi}}{2} + h_w + t_{fs} - y_p \right) \quad \textbf{(6.29)}$$

$$M_{Rd,fi}^{sl} = T_{ds}\left(d_s + y_p\right) \quad \textbf{(6.30)}$$

Caso $T_{ad,fi} > f_y A_{fs} k_{y,\theta}^{fs}$ a linha neutra plástica encontra-se na alma do perfil de aço, com isso sua posição relativa à face superior do perfil de aço é dada pela Equação (6.31).

$$y_p = t_{fs} + h_w \left(\frac{T_{ad,fi} - A_{fs} f_y k_{y,\theta}^{fs}}{A_w f_y k_{y,\theta}^{w}} \right) \quad \textbf{(6.31)}$$

As Equações (6.32) a (6.35) indicam as parcelas de contribuição para o momento fletor resistente de cada elemento, relativos à LNP. A Figura 6.8 ilustra a posição da linha neutra plástica.

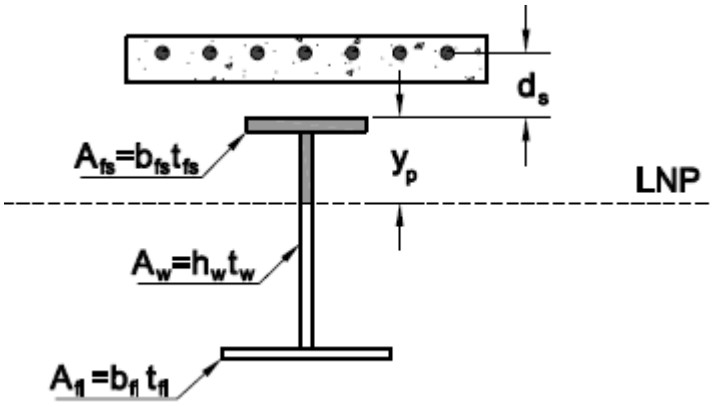


Figura 6.8 – Linha neutra plástica na alma do perfil de aço, momento negativo.

$$M_{Rd,fi}^{fs} = f_y A_{fs} k_{y,\theta}^{fs} \left(y_p - \frac{t_{fs}}{2} \right) \tag{6.32}$$

$$M_{Rd,fi}^{w} = \frac{f_y A_w k_{y,\theta}^{w}}{2h_w} \left[\left(y_p - t_{fs} \right)^2 + \left(h_w + t_{fs} - y_p \right)^2 \right] \tag{6.33}$$

$$M_{Rd,fi}^{fi} = f_y A_{fi} k_{y,\theta}^{fi} \left(\frac{t_{fi}}{2} + h_w + t_{fs} - y_p \right) \tag{6.34}$$

$$M_{Rd,fi}^{sl} = T_{ds} \left(d_s + y_p \right) \tag{6.35}$$

O momento fletor resistente de cálculo em situação de incêndio fica definido como a soma das parcelas de cada elemento, conforme Equação (6.36).

$$M_{Rd,fi} = M_{Rd,fi}^{sl} + M_{Rd,fi}^{fs} + M_{Rd,fi}^{w} + M_{Rd,fi}^{fi} \tag{6.36}$$

7 LIGAÇÕES MISTAS SEMICONTÍNUAS

7.1 Introdução

Como já explicado no item 1.1 da Dissertação será avaliado, para a situação de incêndio, o comportamento de vigas mistas de aço e concreto, considerando a rigidez à rotação dos apoios proporcionada pela armadura negativa longitudinal presente na laje de concreto e pela restrição da mesa inferior do perfil de aço no apoio, formando uma ligação mista semicontínua conforme ilustração da Figura 7.1. Caso uma viga tenha sido dimensionada como biapoiada à temperatura ambiente torna-se necessário acrescentar cantoneiras de apoio restringindo a mesa inferior do perfil de aço para consideração da semicontinuidade, alterando o projeto inicial. No caso de avaliação de uma estrutura existente são necessárias alterações em campo para instalação destas cantoneiras.

Nota-se que tal solução fica limitada a situações em que existem duas vigas adjacentes de mesma altura (ou alturas muito próximas), de modo a não afetar a alma da viga de suporte. Para situações de perfis com diferentes alturas existe a necessidade de instalar enrijecedores na viga de suporte para transferência adequada do momento fletor negativo entre os perfis, aumentando a quantidade de intervenções em campo.

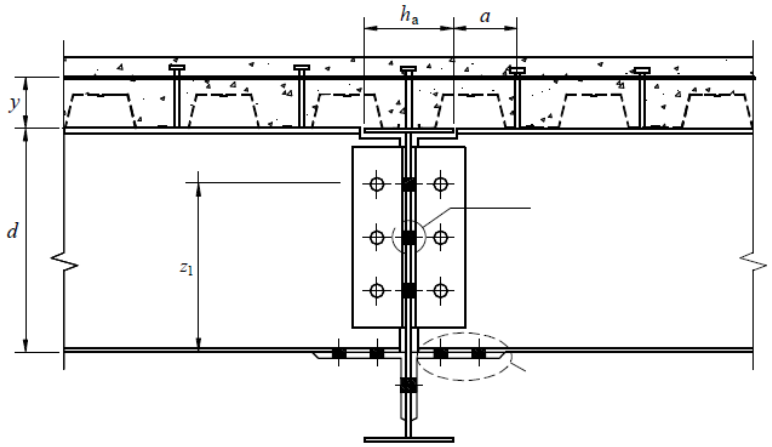


Figura 7.1 – Ligação mista nos apoios (Fonte: adaptado de ABNT NBR 8800:2008).

A ligação mista semicontínua é composta por três componentes gerais: a armadura negativa na laje de concreto situada na largura efetiva, os conectores de cisalhamento e a ligação do perfil de aço (ligação da alma e da mesa inferior). O nome semicontínua vem justamente do fato de não haver continuidade da mesa superior do perfil de aço. É usual admitir que a ligação da alma do perfil de aço é responsável por resistir exclusivamente ao esforço de força cortante, sendo o momento fletor resistente resultado do binário de forças da armadura negativa tracionada e da mesa inferior do perfil de aço, conforme ilustrado pela Figura 7.2.

Outra característica importante para esse tipo de ligação é de que ela usualmente apresenta, à temperatura ambiente, momento fletor negativo resistente inferior ao da viga mista suportada por ela, ou seja, caracteriza-se por ser uma ligação de capacidade parcial. Isso ocorre pelo fato de não existir continuidade da mesa superior do perfil de aço, havendo uma redução da seção transversal resistente na região do apoio.

Nesse capítulo será abordado inicialmente o método de dimensionamento para esse tipo de ligação à temperatura ambiente com o intuito de explicar seu mecanismo de funcionamento. Em seguida serão apresentadas as considerações para análise em situação de incêndio.

7.2 Momento fletor resistente à temperatura ambiente

Para determinar o momento fletor resistente da ligação mista semicontínua deve-se analisar a capacidade resistente de cada componente que forma a ligação, conforme Figura 7.2. A formulação apresentada neste item está de acordo com as recomendações do Anexo R da ABNT NBR 8800:2008.

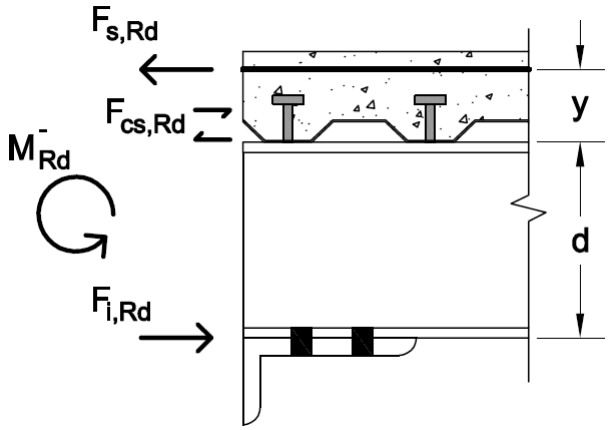


Figura 7.2 – Forças resistentes da ligação mista.

A força resistente da armadura negativa $F_{s,Rd}$ é determinada pelo escoamento de sua seção transversal, de acordo com a Equação (7.1).

$$F_{s,Rd} = f_{sd} A_{sl} \tag{7.1}$$

A força resistente dos conectores de cisalhamento $F_{cs,Rd}$ na região deve ser suficiente para transmitir a força de escoamento da armadura negativa, segundo Equação (7.2), sendo ΣQ_{Rd} o somatório das forças resistentes dos conectores de cisalhamento **na região de momentos fletores negativos**.

$$F_{cs,Rd} = \Sigma Q_{Rd} \geq F_{s,Rd} \tag{7.2}$$

A força resistente de cálculo da mesa inferior do perfil de aço será o menor valor entre a força resistente de cisalhamento do conjunto de parafusos (ou cisalhamento da solda por eventual opção), do esmagamento (força de contato nos furos) da mesa inferior do perfil de aço e do escoamento e esmagamento da aba da cantoneira de ligação. Tal força deve ser suficiente para garantir o binário com o escoamento da armadura negativa longitudinal, segundo Equação (8.3).

$$F_{i,Rd} = \text{mín} \begin{Bmatrix} n_b F_{b,Rd} \\ 1{,}25\, f_{yd} A_{f,inf} \\ F_{L,yd} A_L \end{Bmatrix} \geq F_{s,Rd} \quad \textbf{(7.3)}$$

Na Equação (8.3):

n_b é o número de parafusos;

$F_{b,Rd}$ é a força resistente de cálculo do parafuso, levando em consideração o cisalhamento do parafuso e a força de contato nos furos;

$F_{L,yd}$ é a força resistente de cálculo ao escoamento da cantoneira inferior;

$A_{f,inf}$ é a área da mesa inferior do perfil de aço;

A_L é a área da aba da cantoneira inferior.

Atendidas essas condições o momento fletor negativo resistente de cálculo da ligação mista fica caracterizado apenas pela força na armadura negativa superior e o braço de alavanca $(d + y)$ (Figura 7.2), segundo Equação (7.4).

$$M_{Rd}^{-} = f_{sd} A_{sl} (d + y) \quad \textbf{(7.4)}$$

7.3 Momento fletor resistente em situação de incêndio

A ABNT NBR 14323:2013 não apresenta recomendação específica para o cálculo de ligações mistas em situações de incêndio. De maneira geral dispensa a verificação das ligações caso adote-se revestimento contra fogo com a maior espessura dos elementos estruturais conectados ou, no caso dos mesmos dispensarem adoção de revestimento contra fogo, não há necessidade de revestir as ligações.

O Anexo D da norma EN-1993-1-2:2005 apresenta recomendações para avaliar a temperatura das partes que formam as ligações dos elementos estruturais de aço. Para ligações viga-pilar ou viga-viga, onde as vigas suportam lajes de concreto, a temperatura na ligação é determinada de acordo com a temperatura da mesa inferior da viga no meio do vão. Ao

aplicar o método descrito no item 5.3 para determinar a temperatura dos elementos de aço da viga mista, obtém-se a temperatura de um elemento de ligação localizado a uma altura h, medida a partir da face inferior do perfil da viga, representada como uma fração da temperatura da mesa inferior da viga, de acordo com o gradiente térmico apresentado na Figura 7.3.

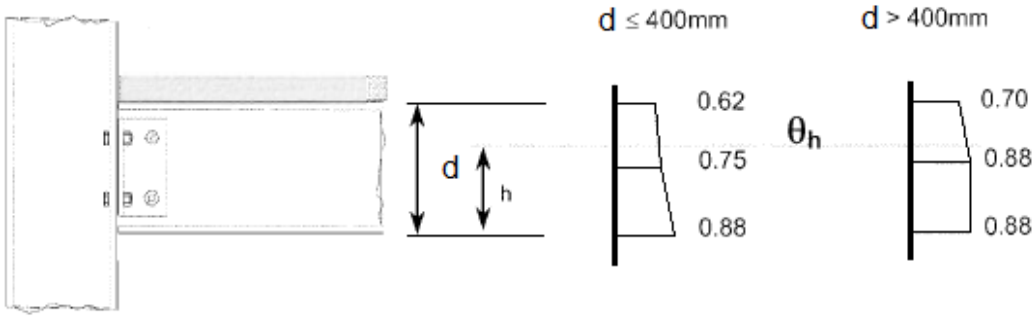


Figura 7.3 – Gradiente térmico na região das ligações (Fonte: adaptado de EN-1993-1-2:2005).

A determinação do gradiente térmico é feita conforme Equação (8.5).

$$\text{Para } d \leq 400\text{mm} \rightarrow \theta_h = 0{,}88\theta_0[1 - 0{,}3(h/d)]$$

$$\text{Para } D > 400\text{mm} \rightarrow \begin{matrix} \theta_h = 0{,}88\theta_0 \text{se } h \leq d/2 \\ \theta_h = 0{,}88\theta_0[1 + 0{,}2(1 - 2h/d)] \text{se } h > d/2 \end{matrix} \quad \textbf{(7.5)}$$

Na Equação (8.5):

d é a altura do perfil da viga;

θ_h é a temperatura do elemento de ligação localizado na altura h medida a partir da face inferior da viga;

θ_0 é a temperatura da mesa inferior da viga longe da ligação.

Visto a ligação ser objeto da Dissertação e ter caráter parcial, ou seja, com capacidade resistente geralmente inferior à da viga que suporta, vê-se importante avaliar qual será sua capacidade resistente com a elevação da temperatura proporcionada pelo incêndio. Logo a capacidade da ligação

mista em situação de incêndio será avaliada de acordo com as recomendações da norma EN-1993-1-2:2005.

Como explicado no item 6.2.3, no caso da avaliação do momento fletor negativo resistente da viga mista, a taxa de armadura longitudinal a ser adotada fica limitada, em situação de incêndio, pela plastificação do perfil de aço que se encontra com suas propriedades mecânicas debilitadas pela alta temperatura, ao passo que a armadura está protegida pela laje de concreto. O mesmo ocorre no caso da ligação mista. O momento fletor resistente da ligação mista fica limitado pela força resistente dos elementos de ligação da mesa inferior do perfil da viga (Equação (8.3)), que estão diretamente expostos ao fogo.

Com o intuito de associar a capacidade da ligação mista apenas às características do perfil de aço, eliminando a necessidade de avaliar diversas condições de número de parafusos e espessuras de cantoneiras no decorrer da Dissertação, será admitido que, na avaliação do momento fletor resistente de uma viga semicontínua em um ambiente de projeto, a força resistente dos parafusos e a espessura da cantoneira serão compatíveis ao perfil de aço utilizado, ou seja, que as condições apresentadas na Equação (7.6) sejam satisfeitas durante a avaliação da capacidade da viga mista em situação de incêndio com consideração da semicontinuidade do apoio.

$$\begin{aligned} n_b F_{b,Rd} &\geq 1{,}25\, f_{yd} A_{f,inf} \\ F_{L,yd} A_L &\geq 1{,}25\, f_{yd} A_{f,inf} \end{aligned} \tag{7.6}$$

O momento fletor negativo resistente em situação de incêndio será o menor valor encontrado entre a capacidade da seção mista e a capacidade da ligação mista, conforme Equação (7.7).

$$M^{-}_{Rd,fi} = \text{mín} \begin{Bmatrix} M^{sl}_{Rd,fi} + M^{fs}_{Rd,fi} + M^{w}_{Rd,fi} + M^{fi}_{Rd,fi} \\ 1{,}25\, f_{yd} A_{f,inf} k^{fi}_{y,0.88\theta} (d + y) \end{Bmatrix} \tag{7.7}$$

Na Equação (7.7):

$M^{sl}_{Rd,fi}$, $M^{fs}_{Rd,fi}$, $M^{w}_{Rd,fi}$ e $M^{fi}_{Rd,fi}$ são definidos no item 6.2.3;

$k_{y,0.88\theta}^{fi}$ é o fator de redução para a resistência ao escoamento do aço para 0,88 da temperatura da mesa inferior do perfil da seção mista.

8 ANÁLISE PLÁSTICA LIMITE DE VIGA SEMICONTÍNUA EM SITUAÇÃO DE INCÊNDIO

8.1 Análise global plástica

Quando uma seção transversal submetida à flexão atinge o momento de plastificação, ela perde a capacidade de absorver esforços para carregamentos superiores que levaram ao ocorrido, caracterizando a formação de uma rótula plástica.

Em estruturas hiperestáticas submetidas a um carregamento crescente a formação de uma rótula plástica não configura, necessariamente, a ruína ou, em outras palavras, a formação de um mecanismo. Para cada seção plastificada a resposta da estrutura modifica-se, permitindo a absorção de carregamentos maiores. Tal processo continua até que a estrutura atinja um caráter hipostático parcial ou global, atingindo sua capacidade limite e configurando sua ruína.

A análise plástica limite consiste em determinar um multiplicador que, aplicado a um conjunto de carregamentos ao qual uma estrutura esteja submetida, configura a capacidade limite da estrutura.

Para que a seção transversal possa atingir a máxima capacidade plástica é necessário que a ligação tenha uma capacidade de rotação mínima, atribuída os deslocamentos máximos de cada componente que compõe a ligação semicontínua descrita no capítlo 7. Maiores informações podem ser encontradas no anexo R da ABNT NBR 8800:2008.

8.1.1 Teorema cinemático

Segundo Virtuoso (2009), o método de cálculo, com base no denominado Teorema cinemático para determinar o multiplicador que configura a capacidade limite da estrutura, consiste em impor a condição de equilíbrio à configuração de mecanismo de ruína. O equilíbrio é descrito pela igualdade de trabalhos externos e internos partindo das hipóteses

simplificadoras de desprezar os deslocamentos elásticos e considerar que as deformações associadas ao mecanismo de ruína sejam suficientemente pequenas.

8.1.2 Viga biengastada com carregamento uniforme

Neste item discute-se a análise limite de uma viga biengastada submetida a um carregamento uniformemente distribuído, visto ser objeto principal da Dissertação. A Figura 8.1 indica a caracterização do problema e o mecanismo de ruptura da viga biengastada.

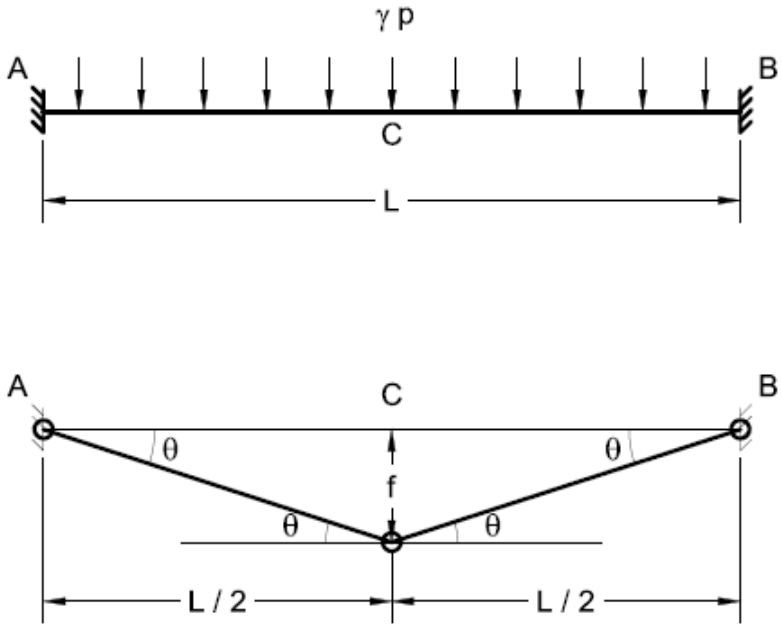


Figura 8.1 – Mecanismo de ruptura da viga biengastada.

O trabalho dos esforços externos é descrito pela Equação (8.1).

$$\tau_{ext} = \gamma p \frac{L}{2} f \tag{8.1}$$

Na Equação (7.2):

τ_{ext} é o trabalho dos esforços externos;

γ é um fator de proporcionalidade;

p é um carregamento uniformemente distribuído;

L é o comprimento do vão;

f é o deslocamento vertical no meio do vão.

Considerando momentos de plastificação distintos para regiões de momentos positivos, que ocorrem em C, e negativos, que ocorrem em A e B, o trabalho dos esforços internos fica descrito pela Equação (8.2).

$$\tau_{int} = 2M_{pl}^{-}\theta + M_{pl}^{+}2\theta \quad \textbf{(8.2)}$$

Na Equação (8.3):

τ_{int} é o trabalho dos esforços internos;

M_{pl}^{+} é o momento fletor positivo de plastificação da seção transversal;

M_{pl}^{-} é o momento fletornegativo de plastificação da seção transversal;

θ é a rotação no apoio.

Seguindo a hipótese de deslocamentos suficientemente pequenos temos que $f = \theta\frac{L}{2}$, aplicando o equilíbrio $\tau_{ext} = \tau_{int}$ obtêm-se o resultado da Equação (8.3).

$$\gamma p = \left(M_{pl}^{-} + M_{pl}^{+}\right)\frac{8}{L^2} \quad \textbf{(8.3)}$$

8.2 Capacidade limite da viga mista semicontínua em situação de incêndio e fator de carga

A capacidade plástica da viga mista semicontínua em situação de incêndio é avaliada comparando o carregamento distribuído que causa o mecanismo de ruína para um determinado TRRF ($p_{fi,TRRF}$), ao carregamento distribuído na ocorrência do mecanismo de ruptura da mesma viga à temperatura ambiente, analisada como biapoiada (p_0), ou seja, sem consideração da capacidade resistente nos apoios (situação mais comum de

projeto). Denomina-se aqui fator de carga a razão entre esses dois valores, segundo Equação (8.4).

$$fator\ de\ carga = \frac{p_{fi,TRRF}}{p_0} \quad \textbf{(8.4)}$$

Já que o vão entre os casos é o mesmo, o fator de carga da viga mista semicontínua fica descrito, em função dos momentos fletores resistentes de cálculo definidos no item 6.2, pela Equação (8.5). No caso de uma viga mista biapoiada não há contribuição do momento fletor resistente negativo.

$$fator\ de\ carga = \frac{M^{+}_{Rd,fi} + M^{-}_{Rd,fi}}{M^{+}_{Rd,0}} \quad \textbf{(8.5)}$$

O fator de carga servirá como parâmetro de avaliação da segurança estrutural da viga em situação de incêndio, lembrando que a ABNT NBR 14323:2013 permite, por simplicidade, adotar esforços solicitantes de cálculo em situação de incêndio com valores iguais a 70% dos esforços empregados no dimensionamento à temperatura ambiente. Admitindo que a viga mista quando projetada para temperatura ambiente teve solicitação igual a 100% (caso mais extremo possível) de sua capacidade resistente para momento fletor positivo é desejável que uma viga analisada apresente fator de carga igual ou superior a 0,7 para dispensar a utilização de revestimento contra fogo.

Deve-se ressaltar que a Equação (8.5) só é válida para uma viga semicontínua com 3 ou mais tramos, ou seja, com continuidade da laje e da mesa inferior do perfil de aço em ambos os apoios. No caso de avaliação com apenas dois tramos a Equação (8.2) deve ser modificada para que em uma das extremidades o momento fletor solicitante seja nulo, já que não haverá continuidade da laje em um dos apoios.

9 ANÁLISE SIMPLIFICADA DE VIGAS SEMICONTÍNUAS EM SITUAÇÃO DE INCÊNDIO

9.1 TRRF de 30 min

9.1.1 Introdução

Neste capítulo foram avaliadas as capacidades resistentes de diversas seções transversais mistas, percorrendo a variedade de perfis da marca Gerdau e espessuras de laje de 8 a 18 cm. Alguns perfis classificados como de mesa esbelta em situação de incêndio, ou seja, com relação entre largura e espessura superior a $0{,}32\sqrt{E/f_y}$, não foram considerados na análise conforme recomendação da ABNT NBR 8800:2008 discutida no item 6.2.3. Admitiu-se a resistência característica de compressão do concreto de 30 MPa e a resistência ao escoamento do aço de 345 MPa. O fator de sombreamento será calculado pela Equação (5.6) conforme a ABNT NBR 14323:2013.

A largura colaborante da laje de concreto foi de 2 m para todos os casos. A taxa de armadura adotada foi tal que possibilitou o desenvolvimento do máximo momento fletor negativo resistente, conforme explicado no item 6.2.3. A quantidade de conectores de cisalhamento adotada foi a necessária para iteração completa à temperatura ambiente.

Como resultado avaliou-se a capacidade resistente em situação de incêndio das vigas admitindo um TRRF de 30 min para a condição biapoiada e semicontínua, sendo os valores comparados aos utilizados no dimensionamento à temperatura ambiente.

O TRRF de 30 min foi escolhido por ser o valor mais baixo permitido pelo método tabular da IT08:2011 e, portanto, com maior possibilidade de conduzir a resultados favoráveis ao objetivo da Dissertação.

9.1.2 Exemplo de cálculo W310x32,7 com laje de 18 cm

Aqui são apresentados os resultados parciais da análise simplificada de um perfil Gerdau W310x32,7 sob laje maciça de 18 cm realizada com auxílio de uma planilha de cálculo Excel.

9.1.2.1 Parâmetros de entrada

A Figura 9.1 indica os parâmetros geométricos do perfil Gerdau W 310x32,7 e da laje de concreto, as resistências características e os parâmetros dos conectores de cisalhamento utilizados na análise.

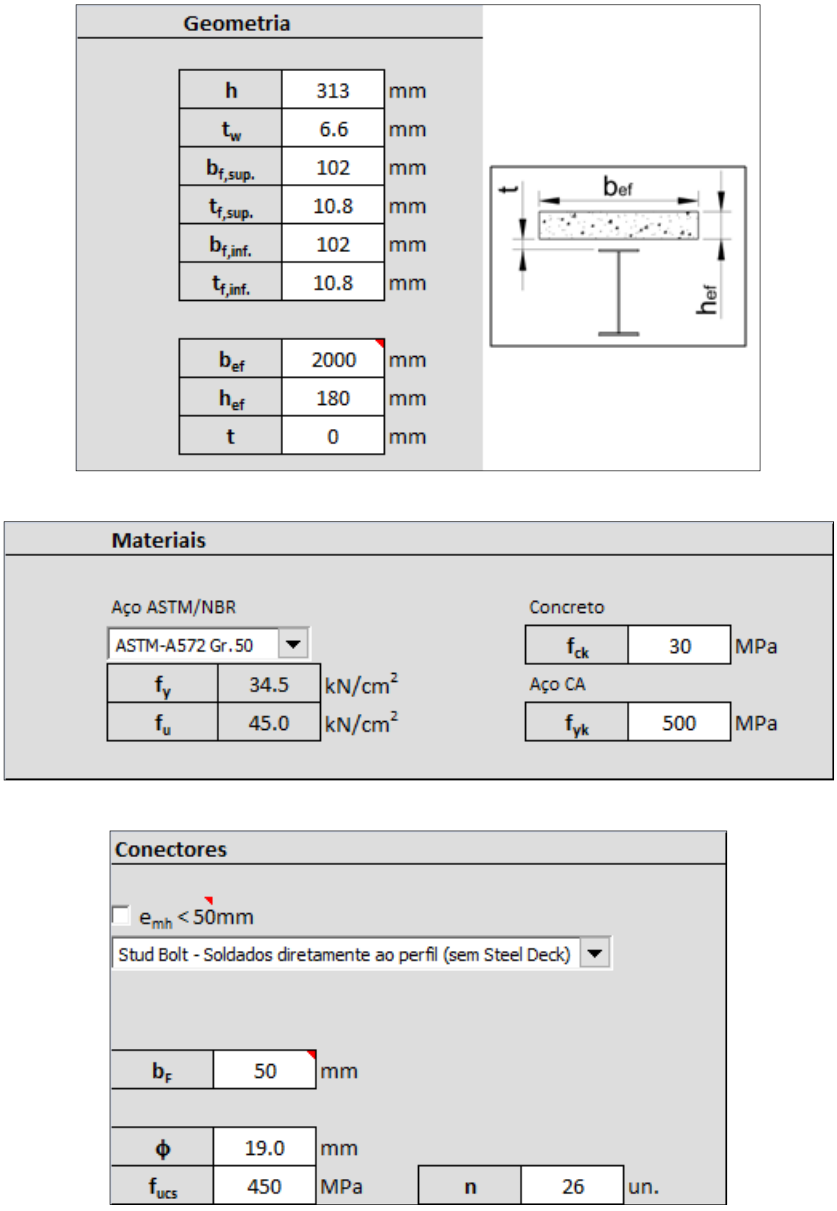


Figura 9.1 – Exemplo de cálculo, parâmetros geométricos e de material.

9.1.2.2 Análise à temperatura ambiente

A Figura 9.2 indica os resultados parciais da análise da viga mista à temperatura ambiente conforme procedimentos descritos no capítlo 2 e Anexo A.

Classificação (O.1.1.2)		
h/t_w	44.2	
Limite 1	138.9	
Limite 2	91.7	
Controle	1	
COMPACTA		

Força resistente de cálculo de conectores (O.4.2)						
Stud Bolt						
E_c	2607	kN/cm²		R_g	1.00	
f_{ck}	3.0	kN/cm²		R_p	1.00	
A_{cs}	2.84	cm²		f_{ucs}	45.0	kN/cm²
$Q_{Rd,c}$	100.3	kN		$Q_{Rd,a}$	102.1	kN

Grau de interação (O.2.3.1.1.2)						
$F_{hd,c}$	6557.1	kN		F_{hd}	1294.2	kN
$F_{hd,a}$	1294.2	kN		ΣQ_{Rd}	1303.9	kN
η_i	1.01	OK		$A_{f,inf./sup.}$	1.0	OK

Vigas mistas COMPACTAS (O.2.3.1.1)						
ΣQ_{Rd}	1303.9	kN		t_c	18.0	cm
$A_a f_{yd}$	1294.2	kN		h_F	0.0	cm
$0.85 f_{cd} b t_c$	6557.1	kN		b	200.0	cm
Caso	a)			M_{Rd}	412.5	kN.m
C_{cd}	1294.2	kN				
C_{ad}	-	kN				
T_{ad}	1294.2	kN				
a	3.6	cm				
d_1	15.7	cm				
y_p	-	cm				
y_t	-	cm				
y_c	-	cm				

Figura 9.2 – Exemplo de cálculo, resultados parciais da análise à temperatura ambiente.

Como resultado final tem-se um momento fletor resistente de cálculo, à temperatura ambiente, de 412,5 kN.m.

9.1.2.3 Análise em situação de incêndio

Na análise em situação de incêndio, além dos parâmetros já apresentados na Figura 9.1, são utilizados como dados de entrada o TRRF, a taxa de armadura negativa e a distância do centro geométrico da armadura à face superior da laje, denominada c_1, segundo Figura 9.3. A taxa de armadura adotada ρ (relação entre a área de armadura e a área de concreto referente à laje colaborante) foi tal que $T_{ds} = T_{ad,fi}^{máx}$ (ver Figura 9.7), ou seja, a máxima possível para equilíbrio da seção transversal, conforme explicado no item 6.2.3.

TRRF	30	min

Aço CA		
fys	500	MPa
c_1	3.0	cm
ρ	0.07	%

Figura 9.3 – Exemplo de cálculo, parâmetros para análise em situação de incêndio.

A Figura 9.4 indica a determinação da temperatura nos elementos estruturais conforme procedimentos descritos no item 6.1.

Temperatura na seção transversal					
Elementos de Aço					
F_{tot}	225.9	m^{-1}			
k_{sh}	0.70				
Mesa inferior					
F_{fi}	204.8	m^{-1}			
θ_{fi}	830	°C			
$k_{y,fi}$	0.10				
Mesa Superior					
F_{fs}	112.2	m^{-1}			
θ_{fs}	804	°C			
$k_{y,fs}$	0.11				
Alma					
F_w	303.0	m^{-1}			
θ_w	834	°C			
$k_{y,w}$	0.09				

Concreto					
h_{ef}	180	mm			
Fatia	y	h	θ_c	k_c	Σh
14	80.0	100.0	60	1.00	100.0
13	60.0	20.0	80	1.00	120.0
12	55.0	5.0	110	1.00	125.0
11	50.0	5.0	125	0.99	130.0
10	45.0	5.0	140	0.98	135.0
9	40.0	5.0	160	0.97	140.0
8	35.0	5.0	180	0.96	145.0
7	30.0	5.0	210	0.94	150.0
6	25.0	5.0	250	0.90	155.0
5	20.0	5.0	300	0.85	160.0
4	15.0	5.0	350	0.80	165.0
3	10.0	5.0	415	0.73	170.0
2	5.0	5.0	470	0.65	175.0
1	0.0	5.0	535	0.55	180.0

Figura 9.4 – Exemplo de cálculo, temperatura nos elementos de aço e concreto.

A Figura 9.5 indica a determinação da resistência dos conectores de cisalhamento em situação de incêndio.

Conectores de cisalhamento						
A_{cs}	2.84	cm^2		R_g	1.00	
f_{ck}	3.0	kN/cm^2		R_p	1.00	
E_{cs}	2607	kN/cm^2		f_{ucs}	45.0	kN/cm^2
$\theta_{c,cs}$	321	°C		θ_{cs}	643	°C
$k_{c,cs}$	0.83			$k_{y,cs}$	0.37	
$Q_{fi,Rd}$	37.5	kN		η_i	3.50	
ΣQ_{Rd}	487.0	kN				

Figura 9.5 – Exemplo de cálculo, resistência dos conectores de cisalhamento em situação de incêndio.

A Figura 9.6 indica os resultados parciais na determinação do momento fletor positivo resistente.

Momentos fletores positivos					
Classificação					
h/t_w	44.2				
Limite	78.0				
COMPACTA					
Momento resistente					
A_w	19.2	cm^2	Fatia	h	$h.k_c$
A_{fs}	11.0	cm^2	14	100.0	10.00
A_{fi}	11.0	cm^2	13	20.0	2.00
$k_{y,w}$	0.09		12	5.0	0.50
$k_{y,fs}$	0.11		11	5.0	0.49
$k_{y,fi}$	0.10		10	5.0	0.49
			9	5.0	0.49
$C_{cd,fi}^{máx}$	10290.8	kN	8	5.0	0.48
$T_{ad,fi}^{máx}$	138.9	kN	7	5.0	0.47
			6	5.0	0.45
Caso	1		5	5.0	0.43
LNP Concreto			4	5.0	0.40
			3	5.0	0.36
$M_{fi,Rd}^{+}$	45.8	kN.m	2	5.0	0.32
			1	5.0	0.27

Caso 1		
a	0.2	cm
$M_{fi,Rd}^{c}$	16.1	kN.cm
$M_{fi,Rd}^{fs}$	752.7	kN.cm
$M_{fi,Rd}^{w}$	2059.9	kN.cm
$M_{fi,Rd}^{fi}$	1756.2	kN.cm

Figura 9.6 – Exemplo de cálculo, momento fletor positivo resistente em situação de incêndio.

A Figura 9.7 indica os resultados parciais na determinação do momento fletor negativo resistente.

Momentos fletores negativos						
Classificação da mesa comprimida						
$b/2t_{fi}$	4.7					
Limite	7.8					
COMPACTA						
A_w	19.2	cm^2		A_{sl}	2.8	cm^2
A_{fs}	11.0	cm^2		T_{ds}	138.9	kN
A_{fi}	11.0	cm^2		$T_{ad,fi}^{máx}$	138.9	kN
$k_{y,w}$	0.09			$T_{ad,fi}$	0.0	kN
$k_{y,fs}$	0.11			$f_y A_{fs} k_{y,fs}$	41.1	kN
$k_{y,fi}$	0.10			LNP Mesa		
d_s	15.0	cm				
y_p	0.0	cm				
$M_{fi,Rd}^{sl}$	2084.1	kN.cm				
$M_{fi,Rd}^{fs}$	22.2	kN.cm				
$M_{fi,Rd}^{w}$	964.7	kN.cm				
$M_{fi,Rd}^{fi}$	1113.1	kN.cm				
$M_{fi,Rd}^{-}$	41.8	kN.m				

Figura 9.7 – Exemplo de cálculo, momento fletor negativo resistente em situação de incêndio.

A Figura 9.8 indica os resultados parciais na determinação do momento fletor negativo resistente da ligação mista na região do apoio.

Ligação mista						
A_{fi}	11.0	cm^2		A_{sl}	1.8	cm^2
$\theta_{fi,lig}$	730	°C		T_{ds}	92.2	kN
$k_{y,fi,lig}$	0.19			d	31.3	cm
$F_{i,Rd}$	92.2	kN		y	15.0	cm
$M_{fi,Rd,lig}^{-}$	42.7	kN.m				

Figura 9.8 – Exemplo de cálculo, momento fletor resistente da ligação mista em situação de incêndio.

Como resultado final tem-se um momento fletor resistente positivo de cálculo, em situação de incêndio, de 45,8 kN.m e um momento fletor resistente negativo de 41,8 kN.m. Nota-se que o momento fletor resistente negativo da ligação mista, calculado conforme capítulo 7, foi superior ao da seção mista (42,7 kN.m), mesmo se tratando de ligação com caráter parcial.

9.1.2.4 Fator de carga

A Tabela 9.1 indica os momentos fletores resistentes do exemplo de cálculo em questão.

Tabela 9.1 – Exemplo de cálculo, momentos fletores resistentes de cálculo.

$M^{+}_{Rd,0}$	412,5 kN.m
$M^{+}_{Rd,fi}$	45,8 kN.m
$M^{-}_{Rd,fi}$	41,8 kN.m

Conforme Equação (8.5) o fator de carga da viga considerada biapoiada, ou seja, sem qualquer restrição de rotação nos apoio, em situação de incêndio é aproximadamente **0,11**, pois não há contribuição do momento fletor negativo $M^{-}_{Rd,fi}$. O fator de carga da viga semicontínua, ou seja, restringindo-se os apoios conforme Figura 1.1, em situação de incêndio é aproximadamente **0,21**. Os valores são muito abaixo do fator 0,7 recomendado por norma, de forma que dificilmente esses fatores seriam praticados em uma situação de projeto.

9.1.3 Análise dos perfis Gerdau

Os gráficos apresentados a seguir indicam os resultados na determinação da capacidade resistente em situação de incêndio, admitindo um tempo requerido de resistência ao fogo (TRRF) de 30 min, de vigas mistas formadas por perfis de aço Gerdau, variando dos mais leves aos mais pesados, e laje maciça de concreto de espessura (t_c) variando de 8 a 18 cm.Para cada perfil (eixo das abscissas) foi gerado um ponto no gráfico, sendo esses ligados por uma linha para facilitar a visualização.

O gráfico da Figura 9.9 indica as taxas de armadura necessárias para o desenvolvimento do máximo momento fletor resistente negativo no apoio, variando as espessuras da laje de concreto (t_c) para os perfis Gerdau da série W200. A Figura 9.10 abrange os resultados para as demais séries de perfis Gerdau. Os resultados seguintes seguem o mesmo formato.

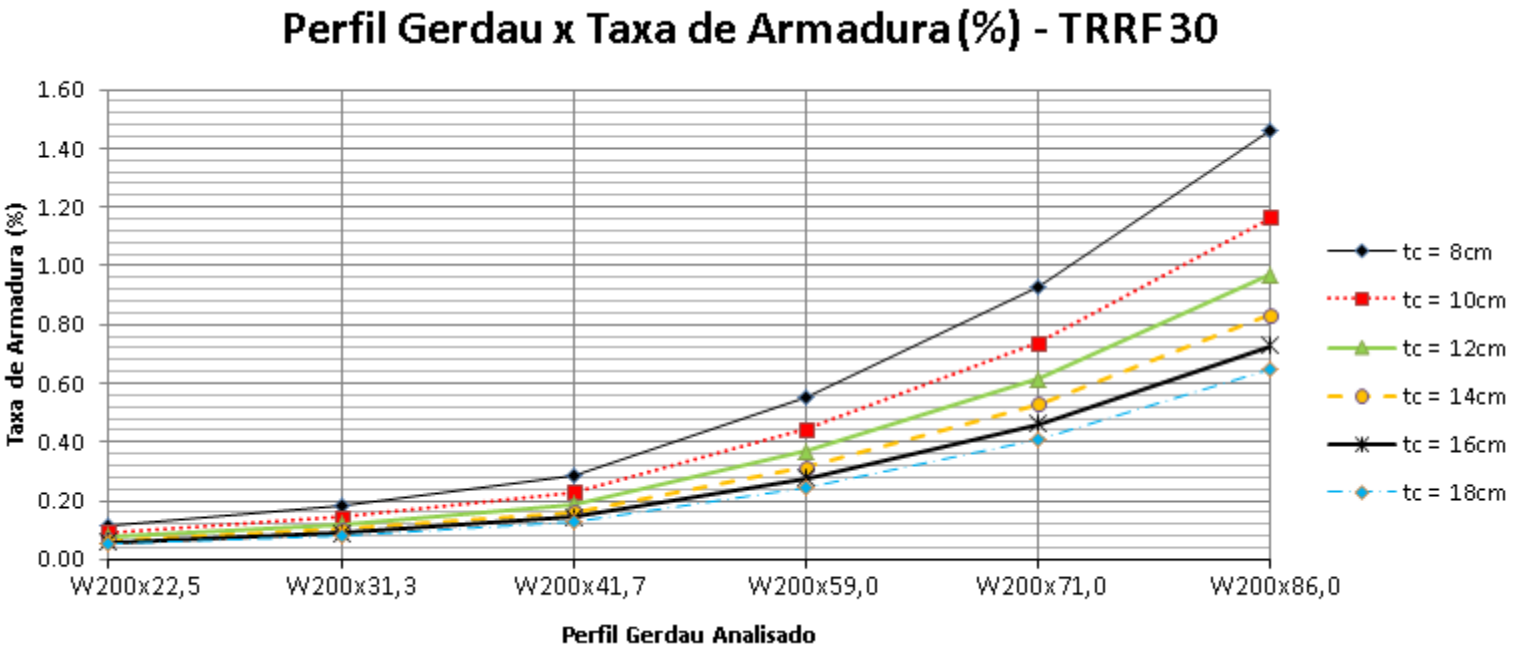


Figura 9.9 – Gráfico taxa de armadura x perfil Gerdau analisado (série W200), TRRF 30 min.

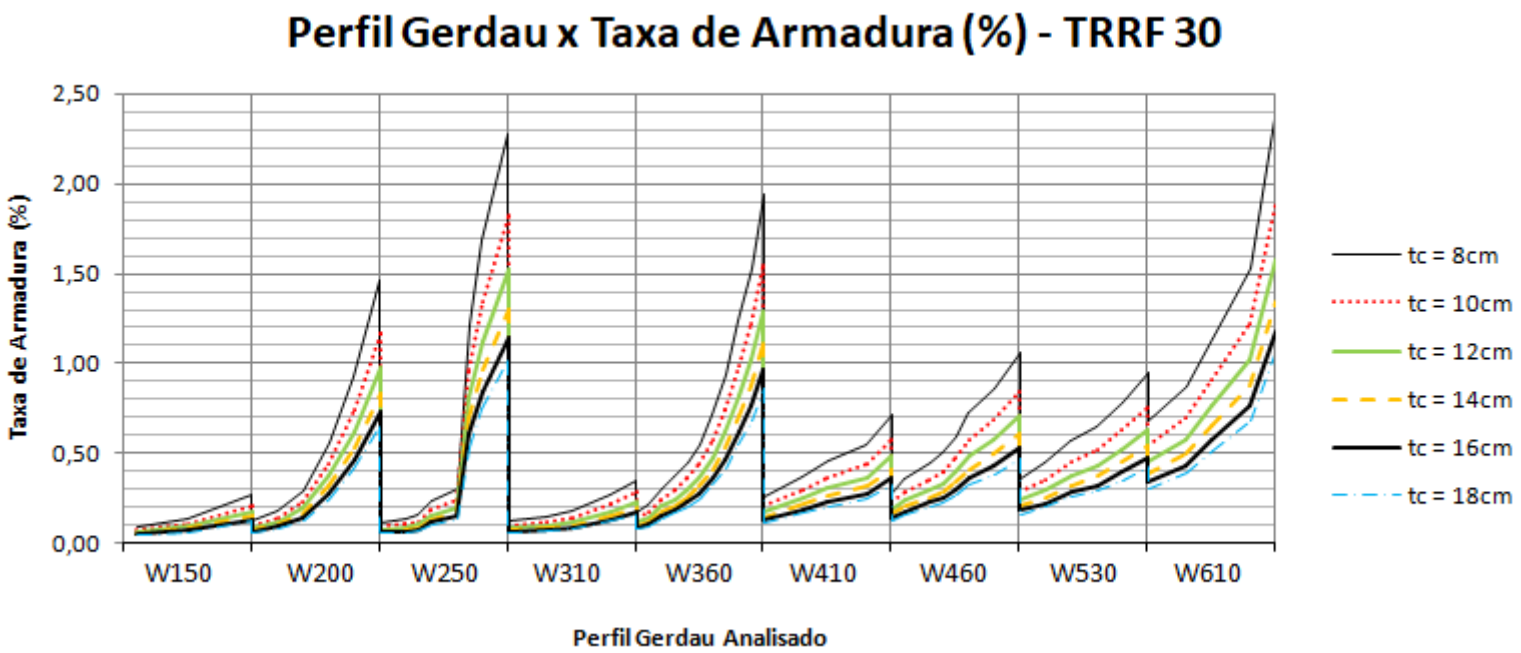


Figura 9.10 – Gráfico taxa de armadura x perfil Gerdau analisado, TRRF 30 min.

Os perfis da série W200, W250 e W360 apresentam um salto no gráfico pois essas séries, especificamente, incluem perfis pesados, de grande sessão transversal, com características mais associadas a colunas que, consequentemente, resultam em temperaturas menores e maior força de plástificação de compressão. Nota-se que para vigas mistas compostas por esses perfis em combinação com lajes de pequenas espessuras necessitam de taxas de armadura maiores, chegando ao valor máximo de 2,30%.

Os valores variaram, em média, de 0,29% para a laje de 18 cm de espessura a 0,65% para a laje de 8 cm, que significam aproximadamente uma seção de aço de 5,2 cm^2/m de laje, representando uma malha formada por barras CA-50 de 8 mm de diâmetro e espaçadas a cada 10 cm, por exemplo.

Na Figura 9.11 encontra-se o fator de carga, Equação (8.5), para cada caso com adoção das máximas taxas possíveis de armadura indicadas no gráfico da Figura 9.10. As linha tracejadas indicam a análise em situação de incêndio para o caso biapoiado e as linhas cheias para a viga semicontínua. Nota-se, nessa figura, que a variação da espessura da laje afeta pouco o resultado de fatores de carga.

O gráfico da Figura 9.12 indica a variação do fator de carga entre os modelos biapoiado e semicontínuo em situação de incêndio. Nota-se que existe um aumento de 80% a 95% no fator de carga, ou seja, em uma situação de projeto em que um essas magnitudes sejas suficientes para prescindir o revestimento contra fogo, tal alternativa é válida. Na escala apresentada é possível notar que a espessura da laje é mais influente para perfis menores, porém a variação é pequena, da ordem de 8% no melhor dos casos.

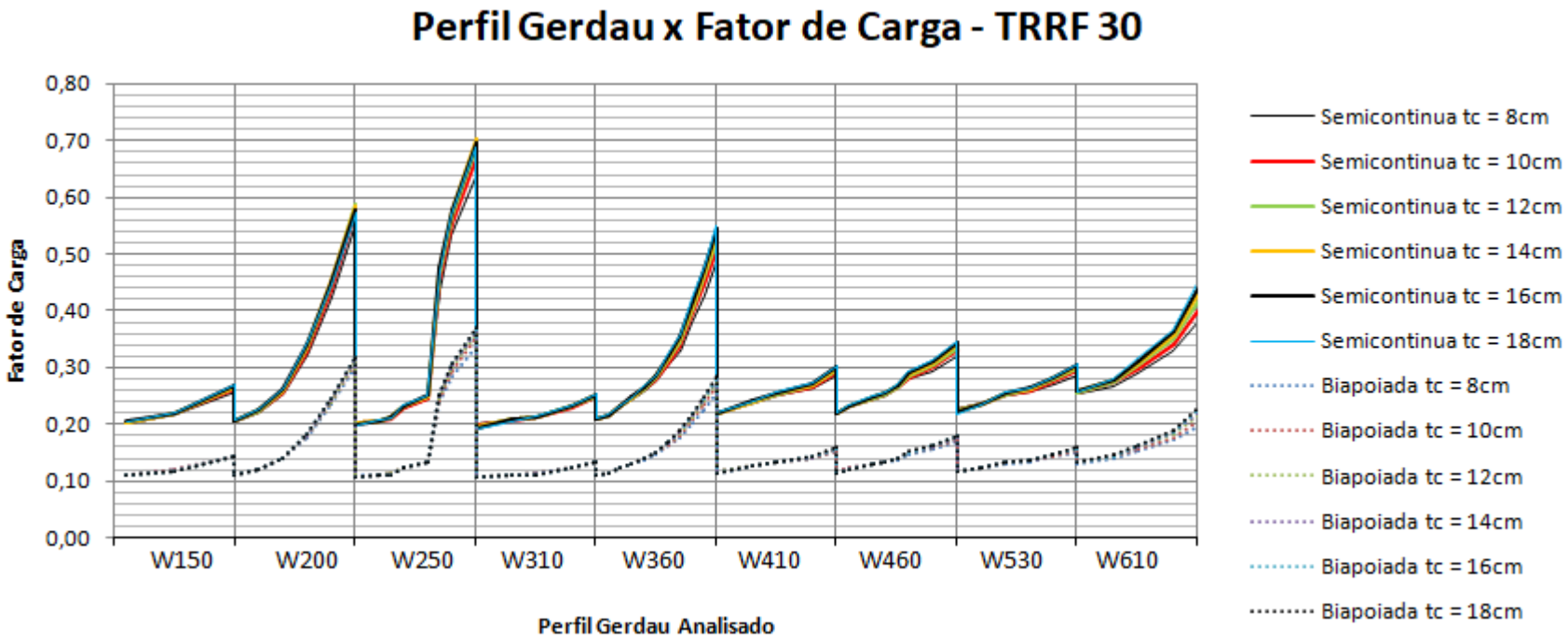


Figura 9.11 – Gráfico fator de carga x perfil Gerdau analisado, TRRF 30 min.

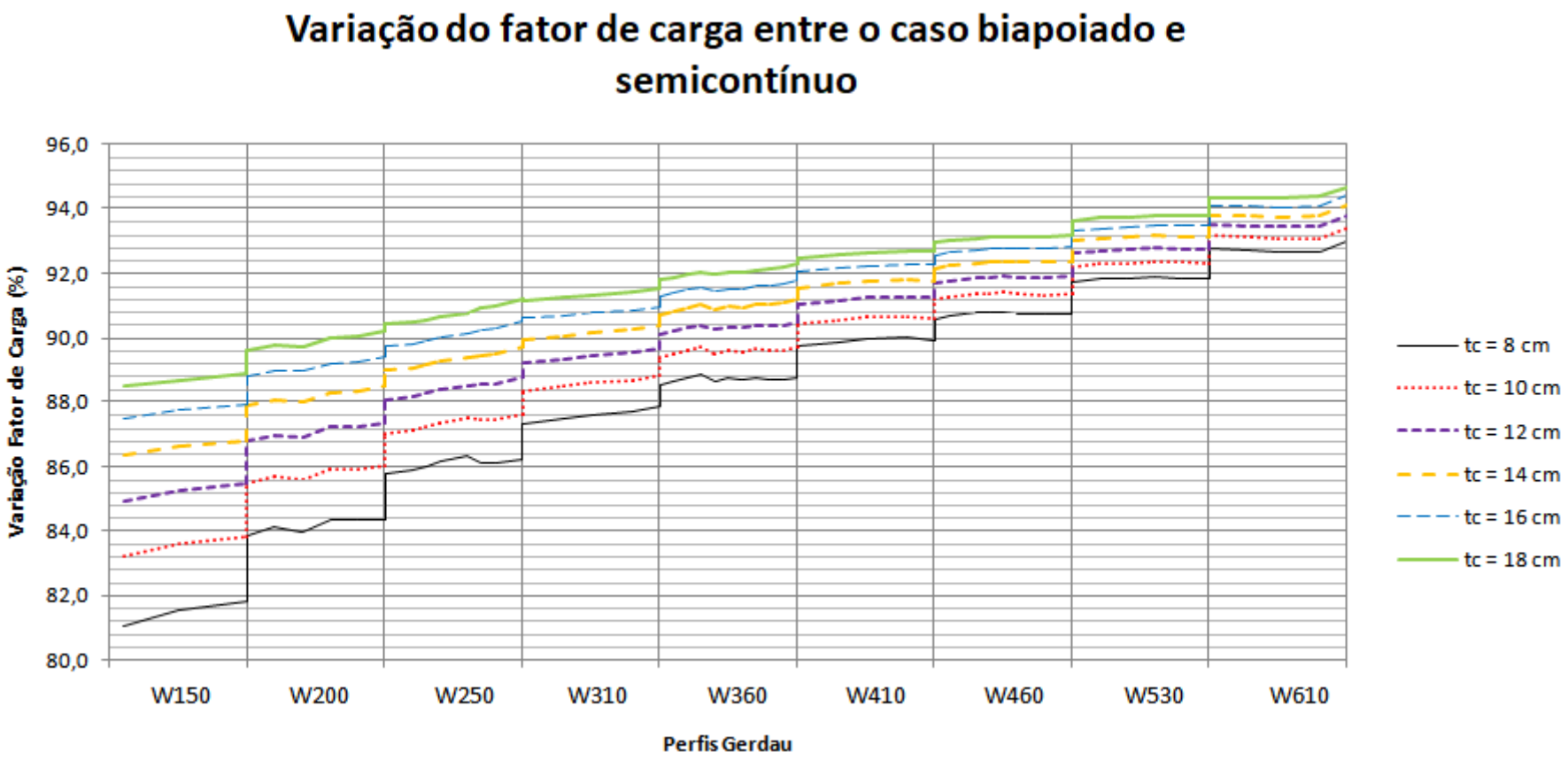


Figura 9.12 – Gráfico variação do fator de carga x perfil Gerdau analisado, TRRF 30 min.

Apesar de a alternativa semicontínua aumentar de 80% a 95% a resistência da viga mista em situação de incêndio, o fator de carga atinge, na melhor das hipóteses, o valor de 0,7 para ocaso do perfil W250x115,0, pouco usual para ser utilizado como viga de piso devido sua grande área da sessão transversal. O valor médio encontrado, considerando todos os casos calculados, foi de 0,30.

Para efeito de comparação vale lembrar que a ABNT NBR 14323:2013 permite, por simplicidade, a adoção de um fator de carga de 0,70, descrito em termos dos esforços solicitantes, para análise do Estado-limite último em situação de incêndio. Um fator de carga de 0,30 só seria relevante para uma estrutura em que os esforços causados pelas ações variáveis decorrentes do uso e ocupação fossem muito superiores aos esforços causados pelas ações permanentes, com valores não usuais na prática. Ou seja, as vigas analisadas, biapoiadas ou semicontínuas, não suportariam o TRRF de 30 min sem revestimento contra fogo, com exceção do perfil W250x115,0 com laje de 14 cm, onde o fator de carga foi de exatamente 0,7.Vale ressaltar que, por suas características geométricas (pouca altura e grande área),tal perfil é raramente utilizado como viga de piso.

O gráfico da Figura 9.13 mostra os valores de temperatura calculados na mesa inferior do perfil de aço.

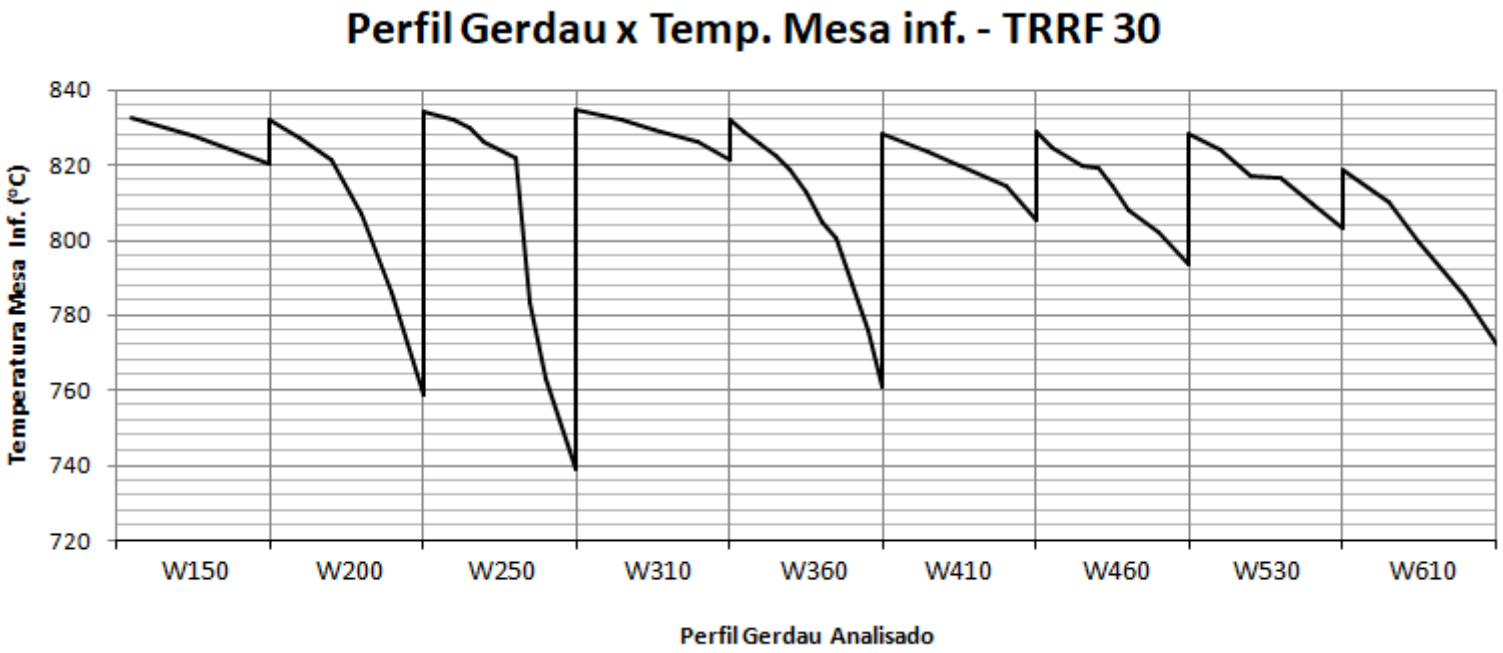


Figura 9.13 – Gráfico temperatura na mesa inferior x perfil Gerdau analisado, TRRF 30 min.

Avaliando a Figura 9.13 e Figura 9.11 fica clara a correlação entre a temperatura atingida pela mesa inferior do perfil de aço e os fatores de carga encontrados. A maior área dos perfis mais pesados leva a temperaturas menores durante a evolução do incêndio padrão, garantindo menor degradação das propriedades mecâncias do aço.

A Figura 9.14 indica os momentos fletores resistentes negativos para cada perfil com laje de 8 cm de espessura, comparando os valores calculados para seção transversal e para a região da ligação.

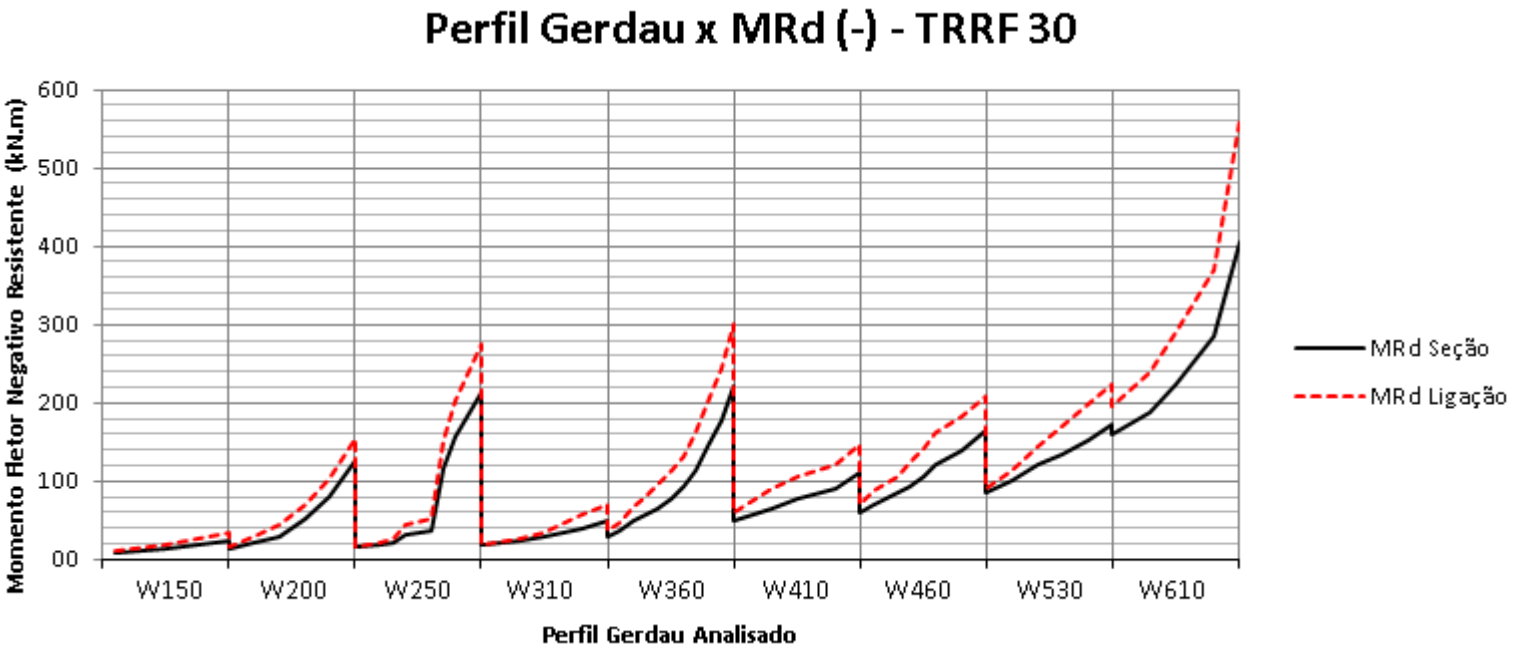


Figura 9.14 – Gráfico momento fletor resistente negativo x perfil Gerdau analisado, TRRF 30 min.

Para todos os casos os valores do momento fletor negativo resistente da seção transversal foi superior ao calculado para a região da ligação, mesmo se tratando de uma ligação semicontínua de caráter parcial. Tal fato se deve pela menor temperatura estimada na região das ligações e pela baixa contribuição da mesa superior do perfil de aço na capacidade plástica da seção mista.

9.1.4 Conclusões

Foi realizado o estudo do comportamento sob ação do incêndio de vigas mistas de aço e concreto para TRRF de 30 min considerando a capacidade resistente à flexão nos apoios fornecida pela armadura negativa longitudinal à viga e restrição da mesa inferior do perfil de aço. As análises tiveram caráter simplificado e seguiram as recomendações normatizadas, simulando um ambiente de projeto.

Com os resultados apresentados da análise simplificada pode-se concluir que:

- Para TRRF de 30 min, apesar de haver um aumento significativo da capacidade resistente da viga semicontínua em comparação com o caso biapoiado, não é suficiente para prescindir a adoção de revestimentos contra fogo.
- A ligação mista semicontinua, apesar de ter um caráter de resistência parcial, não foi o fator limitante na situação de incêndio, possuindo momento fletor negativo resistente superior ao da seção transversal mista.
- É necessário avaliar os resultados para TRRF inferiores a 30 min que, embora não tão comuns, podem ocorrer com o uso do método do tempo equivalente.
- Vê-se necessário avaliar o impacto dos esforços térmicos indiretos na capacidade resistente da viga com auxílio de análises numéricas não lineares para dar credibilidade aos procedimentos utilizados em situações de projeto. Tais análises são capazes ainda de incluir o efeito de catenária benéfico citado por diversos autores.

9.2 TRRF menores que 30 min

9.2.1 Introdução

Os resultados da análise simplificada para TRRF de 30 min mostraram que não é possível justificar fatores de cargas superiores a 0,7 para vigas mistas semicontínuas sem revestimento contra fogo seguindo procedimentos normativos. Vê-se necessário avaliar os mesmos procedimentos para TRRFs inferiores a 30 min que, embora não tão comuns, podem ser adotados para edificações de pequeno porte com utilização do denominado método do tempo equivalente, descrito em maior detalhe no Anexo F.

As análises seguintes seguem os mesmos critérios e hipóteses adotadas no item 9.1. A capacidade resistente das vigas mistas semicontínuas foi avaliada variando o TRRF de um em um minuto. Uma das recomendações da IT08:2011 na utilização do método do tempo equivalente é adotar limite inferior de 15 min para o TRRF, portanto as análises compreendem o intervalo de 15 min até 30 min.

O objetivo aqui é calcular os fatores de carga para cada caso de perfil Gerdau e espessura de laje estudado. Variando o TRRF é possível definir em qual tempo o fator de carga torna-se superior a 0,7 adotando a máxima taxa de armadura possível. Novamente, tal critério foi adotado visto a ABNT NBR 14323:2013 permitir, por simplicidade, a adoção de um fator de carga de 0,70, descrito em termos dos esforços solicitantes, para análise do Estado-limite último em situação de incêndio.

Como resultados são apresentadas tabelas indicando os fatores de carga para o caso biapoiado e semicontínuo em função do TRRF e a taxa de armadura máxima, sendo possível, assim, utilizá-las em ambiente de projeto para justificar a não adoção de revestimento contra fogo com base nos procedimentos normativos.

9.2.2 Temperatura na laje de concreto

Com o intuito de avaliar se por método simplificado é possível encontrar fatores de carga maiores que 0,7 para TRRFs menores que 30 min é necessário, em um primeiro momento, definir as temperaturas das camadas da laje que compõe a viga mista de maneira análoga à Tabela 6.2.

Visto que a ABNT NBR 14323:2013 não indica a temperatura das camadas para TRRFs inferiores a 30 min foi necessário avaliar as temperaturas com auxílio de programa de computador. Para realizar a análise térmica um modelo numérico foi desenvolvido no ABAQUS simulando o campo de temperatura de uma laje com 8 cm de espessura submetida ao incêndio-padrão. As propriedades térmicas do concreto seguiram as recomendações da ABNT NBR 15200:2012 descritas em detalhe no Anexo E. A emissividade foi considerada constante e igual a 0,7, a constante de Stefan-Boltzmann igual a $5{,}669 \times 10^{-8}$ W/(m²ºC) e a temperatura zero absoluta como -273,15 ºC.

A malha de elementos finitos é composta por elementos tridimensionais prismáticos com 8 nós denominados DC3D8 dentro do programa. A Figura 9.15 ilustra a malha utilizada.

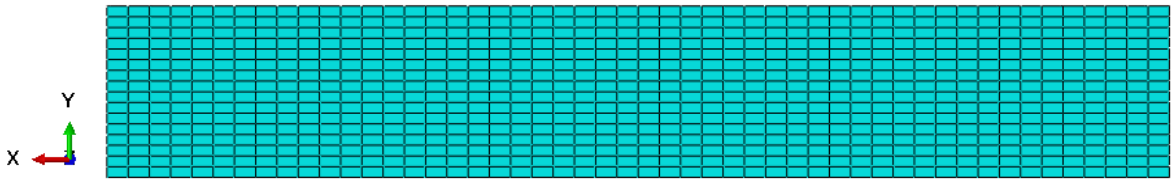


Figura 9.15 – Malha de elementos finitos para análise térmica não-linear da laje de concreto.

Para avaliar o comportamento do modelo numérico os resultados foram inicialmente comparados aos valores recomendados pela ABNT NBR 14323:2013. Os gráficos ilustrados na Figura 9.16, Figura 9.17 e Figura 9.18 representam a distribuição de temperatura ao longo da altura da laje de concreto, onde 0 é a face inferior da laje para TRRF de 30, 60 e 90 min respectivamente. A linha pontilhada indica os valores recomendados por norma e a linha cheia os calculados pelo programa. Nota-se que os resultados do modelo numérico são coerentes e apresentam boa relação quando comparados às recomendações.

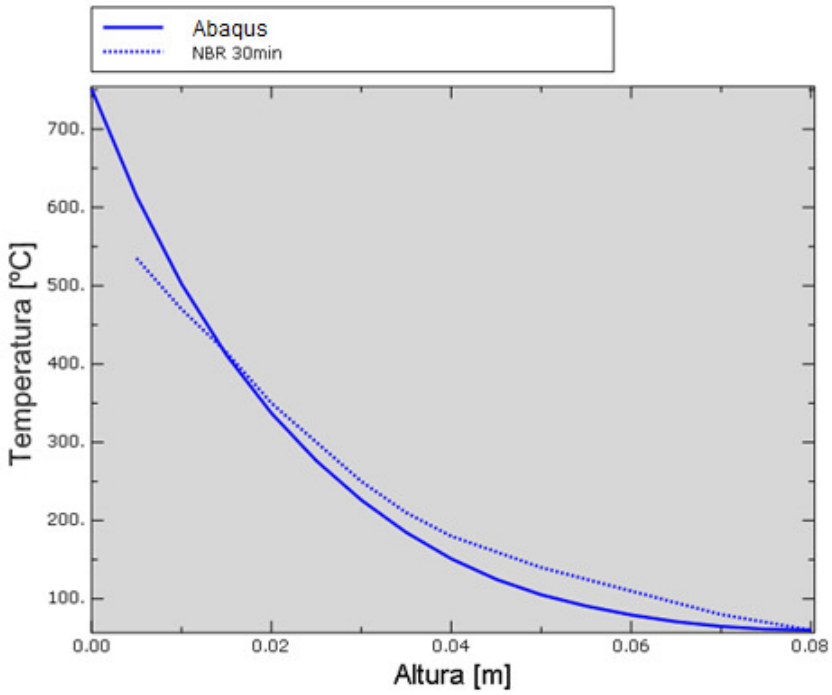


Figura 9.16 – Gráfico temperatura x altura da laje de concreto, 30 min.

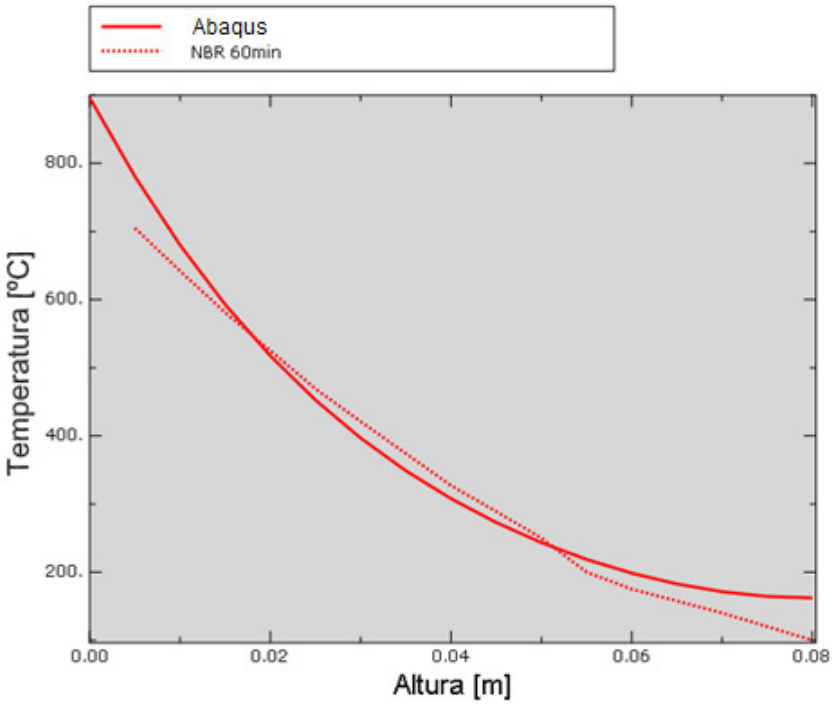


Figura 9.17 - Gráfico temperatura x altura da laje de concreto, 60 min.

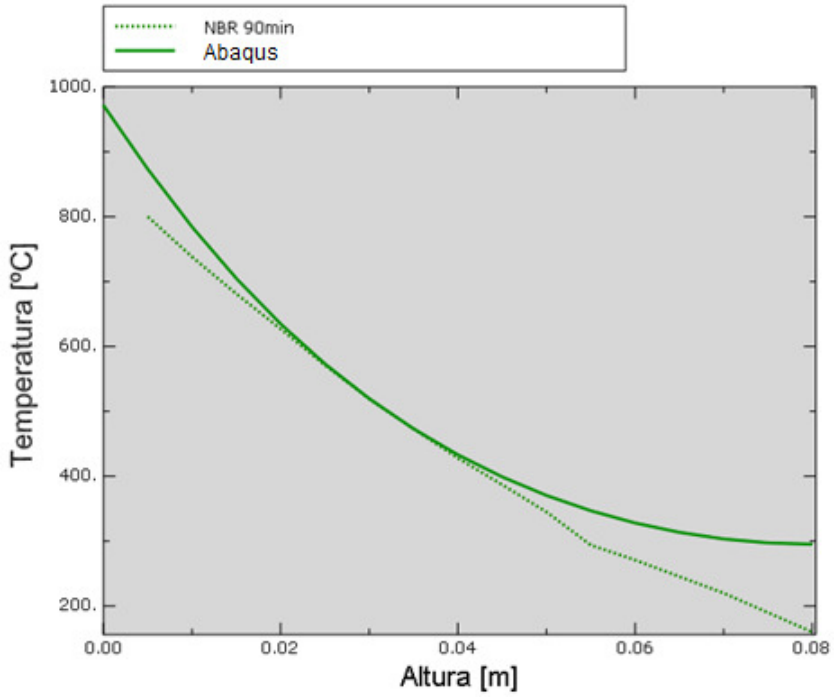


Figura 9.18 – Gráfico temperatura x altura da laje de concreto, 90 min.

Cumprindo com o objeto de avaliar temperaturas inferiores a 30 min o gráfico da Figura 9.19 indica os resultados para tempos de 15 min, 20 min e 25 min. Tempos inferiores não foram registrados visto 15 min ser o tempo mínimo recomendado pela instrução técnica IT08:2011 do Corpo de Bombeiros de São Paulo quando utilizado o método do tempo equivalente.

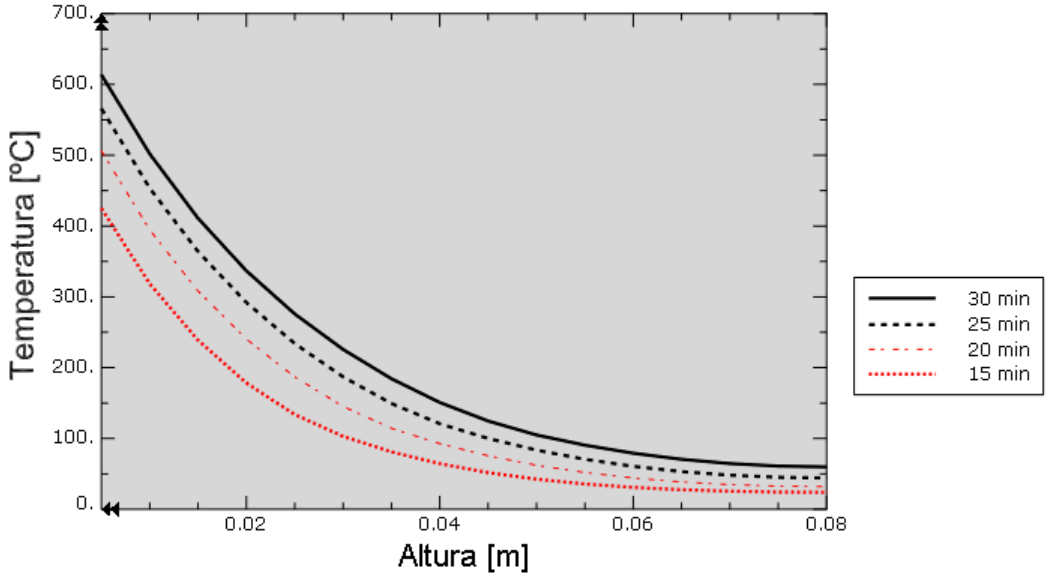
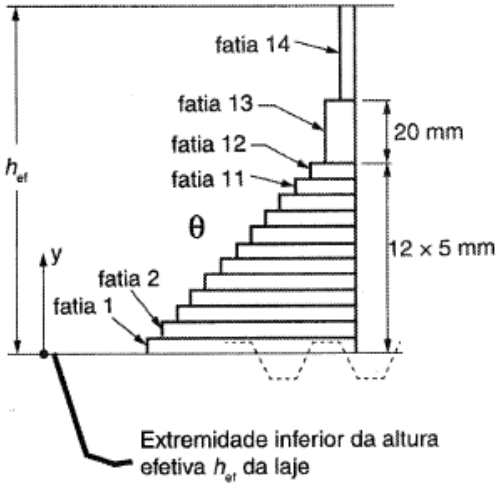


Figura 9.19 – Gráfico temperatura x altura da laje de concreto, tempos inferiores a 30 min.

A Tabela 9.2 apresenta os valores de temperatura de cada fatia da laje de concreto encontrados na análise térmica numérica de maneira análoga à da ABNT NBR 14323:2013. Tais valores são adotados na determinação do momento fletor resistente positivo de cálculo da seção mista. Para tempos intermediários realizou-se interpolação linear.

Tabela 9.2 – Distribuição de temperatura na altura das lajes de concreto, para TRRF inferiores a 30 min.

Fatia	**Altura** (y) mm	**TRRF** min		
		15	**20**	**25**
1	0 a 5	424	506	565
2	5 a 10	318	394	453
3	10 a 15	238	308	363
4	15 a 20	178	240	291
5	20 a 25	133	186	233
6	25 a 30	102	145	186
7	30 a 35	81	114	149
8	35 a 40	64	92	120
9	40 a 45	51	75	100
10	45 a 50	42	62	83
11	50 a 55	35	51	70
12	55 a 60	30	44	60
13	60 a 80	25	38	48
14	≥ 80	23	31	44



9.2.3 Resultados

O Quadro 9.1até o Quadro 9.12 indicam os fatores de carga (Equação (8.5)) para TRRF variando de 15 min até 30 min, para cada caso de espessura de laje. A coluna indicada como “B” mostra o fator de carga para a condição biapoiada, ou seja, sem consideração do momento fletor resistente negativo. A coluna indicada como “S” mostra o fator de carga para a condição semicontínua com adoção da máxima taxa de armadura possível, sendo essa indicada no Quadro 9.13 até o Quadro 9.24. Os valores em destaque representam fatores de carga superiores a 0,7, ou seja, caso exista destaque na coluna indicada como “B” conclui-se que a viga, sem revestimento contra fogo, tem capacidade resistente suficiente em situação de incêndio sem mesmo considerar a semicontinuidade (valor nulo de taxa de armadura) para o valor de TRRF associado.

Quadro 9.1 – Fatores de carga para vigas mistas com perfil Gerdau laje de 8 cm em função do TRRF.

Nome	TRRF (min) tc = 8 cm																													
	30		29		28		27		26		25		24		23		22		21		20		19		18		17		16		15	
	B	S	B	S	B	S	B	S	B	S	B	S	B	S	B	S	B	S	B	S	B	S	B	S	B	S	B	S	B	S	B	S
W 150x18,0	0.11	0.20	0.11	0.21	0.12	0.21	0.12	0.22	0.13	0.23	0.13	0.24	0.14	0.26	0.15	0.28	0.17	0.30	0.18	0.33	0.20	0.36	0.22	0.39	0.25	0.44	0.27	0.49	0.31	0.55	0.35	0.63
W 150x24,0	0.12	0.22	0.12	0.23	0.13	0.24	0.14	0.25	0.14	0.26	0.16	0.28	0.17	0.30	0.19	0.34	0.21	0.38	0.23	0.42	0.26	0.47	0.29	0.52	0.33	0.60	0.38	0.69	0.44	0.80	0.51	0.92
W 150x37,1	0.14	0.26	0.15	0.27	0.16	0.29	0.17	0.31	0.19	0.35	0.22	0.39	0.24	0.43	0.27	0.48	0.30	0.54	0.34	0.60	0.37	0.67	0.43	0.77	0.49	0.89	0.56	1.02	0.63	1.16	0.72	1.32
W 200x22,5	0.11	0.20	0.11	0.21	0.12	0.22	0.12	0.23	0.13	0.23	0.13	0.24	0.14	0.26	0.15	0.28	0.17	0.30	0.18	0.33	0.20	0.36	0.22	0.40	0.24	0.44	0.27	0.49	0.30	0.55	0.35	0.62
W 200x31,3	0.12	0.22	0.13	0.23	0.13	0.24	0.14	0.25	0.15	0.27	0.16	0.29	0.17	0.31	0.19	0.35	0.21	0.39	0.24	0.43	0.26	0.47	0.29	0.53	0.33	0.60	0.38	0.70	0.44	0.80	0.50	0.92
W 200x41,7	0.14	0.25	0.15	0.26	0.15	0.28	0.16	0.30	0.18	0.33	0.20	0.37	0.23	0.41	0.25	0.45	0.28	0.51	0.31	0.57	0.35	0.63	0.40	0.72	0.46	0.84	0.52	0.95	0.58	1.08	0.67	1.24
W 200x59,0	0.18	0.32	0.19	0.35	0.21	0.39	0.24	0.43	0.26	0.47	0.29	0.53	0.32	0.59	0.36	0.65	0.39	0.72	0.45	0.82	0.50	0.93	0.56	1.05	0.63	1.19	0.71	1.35	0.80	1.53	0.89	1.71
W 200x71,0	0.23	0.42	0.26	0.47	0.28	0.52	0.31	0.57	0.34	0.63	0.38	0.70	0.42	0.77	0.47	0.87	0.52	0.98	0.58	1.10	0.64	1.22	0.71	1.36	0.80	1.54	0.88	1.71	0.96	1.86	1.03	2.00
W 200x86,0	0.30	0.56	0.33	0.61	0.36	0.67	0.39	0.74	0.43	0.81	0.48	0.91	0.54	1.02	0.59	1.13	0.65	1.25	0.72	1.39	0.79	1.55	0.87	1.71	0.95	1.88	1.01	2.01	1.07	2.08	1.13	2.14
W 250x22,3	0.11	0.20	0.11	0.21	0.12	0.21	0.12	0.22	0.12	0.23	0.13	0.24	0.13	0.25	0.14	0.27	0.16	0.29	0.17	0.31	0.18	0.33	0.19	0.36	0.21	0.40	0.24	0.43	0.26	0.47	0.29	0.51
W 250x25,3	0.11	0.21	0.11	0.21	0.12	0.22	0.12	0.23	0.13	0.23	0.13	0.24	0.14	0.26	0.15	0.28	0.16	0.30	0.18	0.33	0.19	0.36	0.21	0.39	0.24	0.43	0.26	0.48	0.29	0.53	0.33	0.60
W 250x28,4	0.11	0.21	0.12	0.22	0.12	0.23	0.13	0.23	0.13	0.24	0.14	0.26	0.15	0.27	0.16	0.30	0.17	0.32	0.19	0.36	0.21	0.39	0.23	0.43	0.26	0.48	0.29	0.54	0.33	0.62	0.39	0.71
W 250x38,5	0.12	0.23	0.13	0.24	0.13	0.25	0.14	0.26	0.15	0.27	0.16	0.30	0.18	0.33	0.20	0.36	0.22	0.40	0.24	0.44	0.27	0.49	0.30	0.55	0.34	0.63	0.40	0.73	0.45	0.84	0.52	0.96
W 250x44,8	0.13	0.24	0.14	0.25	0.14	0.27	0.15	0.28	0.17	0.31	0.18	0.34	0.21	0.38	0.23	0.42	0.25	0.46	0.28	0.52	0.31	0.57	0.35	0.65	0.41	0.76	0.47	0.87	0.53	0.99	0.61	1.15
W 250x89,0	0.24	0.44	0.26	0.48	0.29	0.53	0.32	0.59	0.35	0.65	0.38	0.71	0.42	0.79	0.47	0.90	0.53	1.01	0.59	1.13	0.65	1.25	0.72	1.41	0.81	1.60	0.90	1.78	0.96	1.92	1.03	2.06
W 250x101,0	0.29	0.53	0.31	0.58	0.34	0.64	0.37	0.70	0.40	0.76	0.45	0.86	0.50	0.97	0.56	1.08	0.62	1.20	0.68	1.33	0.75	1.48	0.82	1.64	0.90	1.82	0.96	1.95	1.02	2.09	1.09	2.15
W 250x115,0	0.34	0.63	0.36	0.69	0.39	0.75	0.44	0.84	0.48	0.94	0.54	1.04	0.59	1.16	0.64	1.26	0.70	1.39	0.76	1.54	0.83	1.70	0.90	1.85	0.96	1.99	1.02	2.12	1.09	2.18	1.11	2.20
W 310x23,8	0.11	0.20	0.11	0.21	0.11	0.21	0.12	0.22	0.12	0.23	0.13	0.24	0.13	0.25	0.14	0.26	0.15	0.28	0.16	0.30	0.18	0.32	0.19	0.34	0.21	0.37	0.22	0.40	0.25	0.44	0.27	0.48
W 310x28,3	0.11	0.21	0.11	0.21	0.12	0.22	0.12	0.23	0.13	0.24	0.13	0.24	0.14	0.26	0.15	0.28	0.16	0.30	0.17	0.33	0.19	0.36	0.21	0.39	0.23	0.43	0.25	0.47	0.28	0.52	0.32	0.59
W 310x32,7	0.11	0.21	0.12	0.22	0.12	0.23	0.13	0.24	0.13	0.25	0.14	0.26	0.15	0.28	0.16	0.30	0.18	0.33	0.19	0.36	0.21	0.39	0.23	0.43	0.26	0.48	0.29	0.53	0.33	0.62	0.38	0.71
W 310x44,5	0.12	0.23	0.13	0.24	0.13	0.25	0.14	0.26	0.15	0.27	0.16	0.29	0.17	0.32	0.19	0.36	0.21	0.40	0.24	0.44	0.26	0.49	0.29	0.54	0.33	0.62	0.38	0.71	0.44	0.82	0.50	0.94
W 310x52,0	0.13	0.25	0.14	0.26	0.14	0.27	0.15	0.28	0.17	0.31	0.18	0.34	0.20	0.38	0.22	0.42	0.25	0.46	0.28	0.51	0.31	0.57	0.35	0.65	0.40	0.76	0.46	0.87	0.52	0.99	0.61	1.15
W 360x32,9	0.11	0.21	0.11	0.21	0.12	0.22	0.12	0.23	0.13	0.24	0.13	0.25	0.14	0.26	0.15	0.28	0.16	0.30	0.18	0.33	0.19	0.36	0.21	0.39	0.23	0.43	0.25	0.47	0.28	0.53	0.32	0.60
W 360x39,0	0.11	0.22	0.12	0.22	0.12	0.23	0.13	0.24	0.13	0.25	0.14	0.26	0.15	0.28	0.16	0.31	0.18	0.34	0.20	0.37	0.22	0.41	0.24	0.45	0.27	0.50	0.30	0.56	0.35	0.65	0.40	0.75
W 360x51,0	0.12	0.23	0.13	0.24	0.13	0.25	0.14	0.26	0.15	0.27	0.16	0.30	0.17	0.33	0.19	0.36	0.21	0.40	0.23	0.44	0.26	0.48	0.29	0.54	0.33	0.61	0.38	0.71	0.43	0.82	0.50	0.94
W 360x57,8	0.13	0.24	0.13	0.25	0.14	0.26	0.15	0.28	0.16	0.30	0.18	0.33	0.19	0.36	0.21	0.40	0.24	0.44	0.26	0.49	0.29	0.54	0.33	0.61	0.38	0.72	0.43	0.82	0.49	0.94	0.58	1.10
W 360x64,0	0.14	0.26	0.14	0.27	0.15	0.28	0.16	0.31	0.18	0.34	0.20	0.37	0.22	0.41	0.24	0.45	0.27	0.50	0.30	0.56	0.33	0.62	0.38	0.72	0.44	0.84	0.50	0.95	0.57	1.09	0.66	1.27
W 360x72,0	0.15	0.27	0.16	0.29	0.17	0.32	0.19	0.35	0.20	0.38	0.22	0.42	0.25	0.47	0.28	0.52	0.30	0.57	0.34	0.64	0.39	0.74	0.44	0.84	0.50	0.97	0.57	1.10	0.66	1.27	0.75	1.45
W 360x79,0	0.16	0.30	0.18	0.33	0.19	0.36	0.21	0.39	0.23	0.43	0.26	0.48	0.28	0.53	0.31	0.59	0.35	0.66	0.40	0.75	0.45	0.86	0.51	0.97	0.57	1.11	0.65	1.27	0.74	1.45	0.83	1.63
W 360x91,0	0.18	0.33	0.19	0.36	0.21	0.40	0.23	0.44	0.26	0.48	0.28	0.53	0.31	0.59	0.34	0.65	0.39	0.74	0.44	0.84	0.50	0.96	0.56	1.08	0.63	1.23	0.72	1.41	0.81	1.60	0.89	1.76
W 360x101,0	0.20	0.38	0.22	0.42	0.24	0.46	0.27	0.50	0.29	0.56	0.32	0.61	0.35	0.67	0.40	0.77	0.45	0.88	0.51	0.99	0.57	1.10	0.63	1.25	0.72	1.43	0.80	1.60	0.88	1.76	0.95	1.91
W 360x110,0	0.23	0.43	0.25	0.47	0.27	0.51	0.30	0.56	0.32	0.62	0.36	0.68	0.40	0.78	0.45	0.88	0.51	0.99	0.56	1.10	0.63	1.24	0.70	1.39	0.78	1.57	0.86	1.74	0.92	1.88	0.99	2.00
W 360x122,0	0.25	0.48	0.28	0.53	0.30	0.58	0.33	0.63	0.36	0.70	0.41	0.79	0.46	0.89	0.51	1.00	0.56	1.11	0.62	1.24	0.69	1.39	0.76	1.55	0.84	1.73	0.91	1.87	0.98	2.00	1.05	2.07

B = Caso biapoioado. S = Caso semicontínuo. Valores em destaque indicam fatores de carga superiores a 0,7.

Quadro 9.2 – Fatores de carga para vigas mistas com laje de 8 cm em função do TRRF (continuação).

Nome	TRRF (min) tc = 8 cm																													
	30		29		28		27		26		25		24		23		22		21		20		19		18		17		16		15	
	B	S	B	S	B	S	B	S	B	S	B	S	B	S	B	S	B	S	B	S	B	S	B	S	B	S	B	S	B	S	B	S
W 410x46,1	0.12	0.22	0.12	0.23	0.12	0.24	0.13	0.25	0.14	0.26	0.14	0.27	0.15	0.29	0.17	0.32	0.18	0.35	0.20	0.38	0.22	0.42	0.24	0.46	0.27	0.51	0.31	0.58	0.36	0.67	0.41	0.77
W 410x60,0	0.13	0.24	0.13	0.25	0.14	0.26	0.14	0.27	0.15	0.29	0.17	0.31	0.18	0.34	0.20	0.38	0.22	0.42	0.24	0.46	0.27	0.51	0.30	0.57	0.35	0.66	0.40	0.76	0.46	0.87	0.53	1.02
W 410x67,0	0.13	0.25	0.14	0.26	0.14	0.27	0.15	0.29	0.17	0.32	0.18	0.35	0.20	0.38	0.22	0.42	0.25	0.47	0.27	0.52	0.30	0.57	0.35	0.66	0.40	0.77	0.46	0.88	0.53	1.02	0.62	1.20
W 410x75,0	0.14	0.26	0.15	0.28	0.16	0.30	0.17	0.32	0.19	0.35	0.20	0.39	0.23	0.43	0.25	0.47	0.28	0.52	0.31	0.58	0.35	0.67	0.40	0.77	0.46	0.88	0.52	1.01	0.61	1.18	0.70	1.37
W 410x85,0	0.15	0.29	0.16	0.31	0.18	0.34	0.20	0.37	0.21	0.40	0.24	0.45	0.26	0.49	0.29	0.55	0.32	0.61	0.37	0.70	0.42	0.80	0.47	0.91	0.54	1.05	0.62	1.21	0.71	1.40	0.81	1.55
W 460x52,0	0.12	0.22	0.12	0.23	0.12	0.24	0.13	0.24	0.13	0.25	0.14	0.27	0.15	0.29	0.16	0.31	0.18	0.34	0.20	0.37	0.22	0.41	0.24	0.45	0.26	0.50	0.30	0.56	0.34	0.65	0.40	0.75
W 460x60,0	0.12	0.23	0.13	0.24	0.13	0.25	0.14	0.26	0.14	0.27	0.16	0.30	0.17	0.32	0.19	0.36	0.21	0.39	0.23	0.43	0.25	0.48	0.28	0.53	0.32	0.61	0.37	0.70	0.42	0.80	0.49	0.93
W 460x68,0	0.13	0.24	0.13	0.25	0.14	0.26	0.15	0.28	0.16	0.30	0.18	0.33	0.19	0.37	0.21	0.40	0.23	0.44	0.26	0.49	0.29	0.54	0.33	0.63	0.38	0.73	0.43	0.83	0.50	0.96	0.58	1.13
W 460x74,0	0.13	0.25	0.14	0.26	0.14	0.27	0.15	0.29	0.17	0.32	0.18	0.34	0.20	0.38	0.22	0.42	0.24	0.46	0.27	0.51	0.30	0.57	0.34	0.66	0.40	0.76	0.45	0.87	0.52	1.01	0.61	1.19
W 460x82,0	0.14	0.26	0.14	0.27	0.15	0.29	0.17	0.32	0.18	0.35	0.20	0.38	0.22	0.42	0.24	0.46	0.27	0.51	0.30	0.57	0.34	0.65	0.39	0.75	0.45	0.86	0.51	0.99	0.60	1.16	0.69	1.35
W 460x89,0	0.15	0.28	0.16	0.30	0.17	0.32	0.19	0.35	0.20	0.38	0.22	0.42	0.25	0.47	0.27	0.52	0.30	0.57	0.34	0.66	0.39	0.75	0.44	0.86	0.50	0.98	0.58	1.14	0.67	1.32	0.77	1.50
W 460x97,0	0.15	0.29	0.17	0.32	0.18	0.35	0.20	0.38	0.22	0.41	0.24	0.46	0.27	0.51	0.29	0.56	0.33	0.64	0.38	0.73	0.43	0.83	0.48	0.94	0.56	1.09	0.64	1.26	0.73	1.45	0.82	1.58
W 460x106,0	0.17	0.32	0.18	0.35	0.20	0.38	0.22	0.41	0.24	0.46	0.27	0.51	0.29	0.56	0.33	0.63	0.37	0.72	0.42	0.82	0.47	0.93	0.54	1.06	0.63	1.24	0.71	1.41	0.80	1.55	0.87	1.68
W 530x66,0	0.12	0.23	0.12	0.23	0.13	0.24	0.13	0.25	0.14	0.26	0.14	0.27	0.16	0.30	0.17	0.33	0.19	0.36	0.20	0.39	0.22	0.43	0.25	0.47	0.27	0.52	0.31	0.58	0.36	0.67	0.43	0.78
W 530x74,0	0.12	0.24	0.13	0.24	0.13	0.25	0.14	0.26	0.15	0.28	0.16	0.30	0.17	0.33	0.19	0.36	0.21	0.40	0.23	0.44	0.25	0.49	0.28	0.54	0.32	0.62	0.37	0.71	0.44	0.83	0.51	0.96
W 530x85,0	0.13	0.25	0.14	0.26	0.14	0.27	0.15	0.29	0.17	0.32	0.18	0.35	0.20	0.38	0.22	0.42	0.24	0.46	0.27	0.51	0.30	0.58	0.35	0.67	0.40	0.77	0.46	0.89	0.54	1.05	0.63	1.19
W 530x92,0	0.13	0.26	0.14	0.27	0.15	0.28	0.16	0.31	0.17	0.33	0.19	0.36	0.21	0.40	0.23	0.44	0.26	0.49	0.28	0.54	0.32	0.62	0.37	0.71	0.42	0.82	0.49	0.95	0.57	1.11	0.66	1.29
W 530x101,0	0.14	0.27	0.15	0.29	0.16	0.31	0.18	0.34	0.19	0.37	0.21	0.40	0.23	0.45	0.26	0.49	0.28	0.55	0.32	0.62	0.37	0.71	0.42	0.81	0.48	0.94	0.56	1.10	0.65	1.28	0.74	1.44
W 530x109,0	0.15	0.29	0.16	0.31	0.18	0.33	0.19	0.36	0.21	0.40	0.23	0.44	0.25	0.49	0.28	0.54	0.31	0.61	0.36	0.70	0.41	0.79	0.46	0.90	0.53	1.05	0.62	1.22	0.71	1.39	0.79	1.53
W 610x101,0	0.13	0.25	0.14	0.26	0.14	0.27	0.15	0.29	0.16	0.32	0.18	0.35	0.20	0.38	0.22	0.42	0.24	0.46	0.27	0.51	0.30	0.57	0.34	0.66	0.39	0.77	0.46	0.90	0.54	1.05	0.63	1.21
W 610x113,0	0.14	0.27	0.15	0.28	0.16	0.30	0.17	0.33	0.19	0.36	0.21	0.39	0.23	0.44	0.25	0.48	0.27	0.53	0.31	0.60	0.36	0.69	0.40	0.79	0.47	0.92	0.54	1.08	0.63	1.26	0.72	1.40
W 610x125,0	0.15	0.29	0.16	0.31	0.18	0.34	0.19	0.37	0.21	0.41	0.23	0.45	0.26	0.50	0.28	0.55	0.32	0.63	0.37	0.72	0.42	0.82	0.47	0.93	0.55	1.09	0.63	1.26	0.71	1.42	0.79	1.55
W 610x140,0	0.17	0.33	0.19	0.36	0.20	0.39	0.22	0.43	0.24	0.47	0.27	0.52	0.30	0.58	0.34	0.66	0.38	0.76	0.43	0.85	0.48	0.96	0.55	1.10	0.63	1.28	0.72	1.45	0.79	1.57	0.87	1.69
W 610x174,0	0.20	0.38	0.21	0.41	0.23	0.45	0.25	0.50	0.28	0.55	0.31	0.61	0.35	0.70	0.39	0.79	0.44	0.89	0.48	0.99	0.56	1.15	0.64	1.32	0.73	1.51	0.81	1.67	0.89	1.80	0.97	1.89

B = Caso biapoioado. S = Caso semicontínuo. Valores em destaque indicam fatores de carga superiores a 0,7.

Quadro 9.3 – Fatores de carga para vigas mistas com laje de 10 cm em função do TRRF.

Nome	TRRF (min) tc = 10 cm																													
	30		29		28		27		26		25		24		23		22		21		20		19		18		17		16		15	
	B	S	B	S	B	S	B	S	B	S	B	S	B	S	B	S	B	S	B	S	B	S	B	S	B	S	B	S	B	S	B	S
W 150x18,0	0.11	0.20	0.11	0.21	0.12	0.21	0.12	0.22	0.13	0.23	0.13	0.24	0.14	0.26	0.15	0.28	0.17	0.31	0.18	0.33	0.20	0.36	0.22	0.40	0.25	0.45	0.28	0.50	0.31	0.56	0.36	0.63
W 150x24,0	0.12	0.22	0.12	0.23	0.13	0.24	0.14	0.25	0.15	0.26	0.16	0.28	0.17	0.31	0.19	0.35	0.21	0.39	0.24	0.43	0.27	0.48	0.30	0.54	0.34	0.62	0.39	0.70	0.45	0.80	0.52	0.91
W 150x37,1	0.14	0.26	0.15	0.28	0.16	0.29	0.17	0.32	0.19	0.35	0.22	0.40	0.24	0.44	0.27	0.49	0.31	0.56	0.34	0.62	0.38	0.70	0.44	0.79	0.50	0.91	0.56	1.03	0.64	1.16	0.72	1.31
W 200x22,5	0.11	0.20	0.11	0.21	0.12	0.22	0.12	0.23	0.13	0.24	0.13	0.25	0.14	0.26	0.15	0.28	0.17	0.31	0.18	0.33	0.20	0.37	0.22	0.41	0.25	0.45	0.27	0.50	0.31	0.55	0.35	0.62
W 200x31,3	0.12	0.22	0.13	0.23	0.13	0.24	0.14	0.26	0.15	0.27	0.16	0.29	0.17	0.32	0.19	0.35	0.21	0.39	0.24	0.44	0.27	0.49	0.30	0.55	0.34	0.62	0.39	0.72	0.45	0.83	0.51	0.95
W 200x41,7	0.14	0.25	0.15	0.27	0.15	0.28	0.16	0.30	0.18	0.34	0.20	0.38	0.23	0.42	0.25	0.47	0.28	0.52	0.32	0.59	0.36	0.65	0.40	0.75	0.46	0.86	0.52	0.98	0.59	1.11	0.67	1.27
W 200x59,0	0.18	0.33	0.19	0.36	0.22	0.40	0.24	0.44	0.26	0.49	0.30	0.55	0.33	0.61	0.36	0.67	0.40	0.75	0.45	0.85	0.51	0.96	0.57	1.08	0.64	1.22	0.72	1.37	0.80	1.53	0.89	1.68
W 200x71,0	0.24	0.44	0.26	0.48	0.29	0.53	0.32	0.59	0.35	0.65	0.39	0.72	0.43	0.80	0.48	0.90	0.53	1.01	0.59	1.12	0.65	1.24	0.72	1.38	0.80	1.54	0.88	1.71	0.95	1.83	1.02	1.94
W 200x86,0	0.31	0.57	0.34	0.63	0.37	0.69	0.40	0.76	0.44	0.84	0.49	0.94	0.55	1.04	0.60	1.16	0.66	1.27	0.72	1.41	0.80	1.56	0.87	1.71	0.95	1.85	1.02	1.97	1.09	2.05	1.14	2.11
W 250x22,3	0.11	0.20	0.11	0.21	0.11	0.21	0.12	0.22	0.12	0.23	0.13	0.24	0.13	0.25	0.14	0.27	0.16	0.29	0.17	0.31	0.18	0.33	0.19	0.36	0.22	0.39	0.24	0.42	0.26	0.46	0.29	0.51
W 250x25,3	0.11	0.21	0.11	0.21	0.12	0.22	0.12	0.23	0.13	0.24	0.13	0.25	0.14	0.26	0.15	0.28	0.16	0.31	0.18	0.33	0.19	0.36	0.21	0.40	0.24	0.44	0.26	0.48	0.29	0.53	0.34	0.60
W 250x28,4	0.11	0.21	0.12	0.22	0.12	0.23	0.13	0.24	0.13	0.25	0.14	0.26	0.15	0.28	0.16	0.30	0.18	0.33	0.19	0.36	0.21	0.40	0.24	0.44	0.26	0.49	0.30	0.55	0.34	0.62	0.39	0.71
W 250x38,5	0.12	0.23	0.13	0.24	0.13	0.25	0.14	0.26	0.15	0.28	0.16	0.30	0.18	0.33	0.20	0.37	0.22	0.41	0.25	0.46	0.27	0.51	0.31	0.57	0.35	0.65	0.40	0.75	0.46	0.86	0.52	0.99
W 250x44,8	0.13	0.25	0.14	0.26	0.15	0.27	0.15	0.29	0.17	0.31	0.19	0.35	0.21	0.39	0.23	0.43	0.26	0.48	0.29	0.53	0.32	0.59	0.36	0.67	0.42	0.78	0.47	0.89	0.54	1.01	0.62	1.17
W 250x89,0	0.24	0.45	0.27	0.50	0.30	0.55	0.32	0.61	0.36	0.67	0.39	0.74	0.43	0.82	0.48	0.93	0.54	1.04	0.60	1.16	0.66	1.28	0.73	1.43	0.82	1.61	0.90	1.78	0.97	1.92	1.05	2.03
W 250x101,0	0.30	0.56	0.32	0.61	0.35	0.67	0.39	0.73	0.42	0.80	0.47	0.90	0.52	1.01	0.58	1.12	0.63	1.24	0.69	1.36	0.77	1.51	0.84	1.68	0.93	1.86	0.99	1.99	1.06	2.08	1.12	2.14
W 250x115,0	0.35	0.67	0.38	0.73	0.41	0.79	0.45	0.88	0.50	0.98	0.56	1.09	0.61	1.20	0.66	1.31	0.73	1.45	0.80	1.60	0.88	1.76	0.94	1.91	1.00	2.04	1.05	2.11	1.11	2.17	1.13	2.19
W 310x23,8	0.11	0.20	0.11	0.21	0.11	0.21	0.12	0.22	0.12	0.22	0.13	0.23	0.13	0.24	0.14	0.26	0.15	0.28	0.16	0.30	0.18	0.32	0.19	0.34	0.21	0.37	0.23	0.40	0.25	0.43	0.27	0.47
W 310x28,3	0.11	0.21	0.11	0.21	0.12	0.22	0.12	0.23	0.13	0.24	0.13	0.25	0.14	0.26	0.15	0.28	0.16	0.30	0.18	0.33	0.19	0.36	0.21	0.39	0.23	0.43	0.26	0.47	0.29	0.52	0.33	0.59
W 310x32,7	0.11	0.21	0.12	0.22	0.12	0.23	0.13	0.24	0.13	0.25	0.14	0.26	0.15	0.28	0.16	0.30	0.18	0.33	0.19	0.36	0.21	0.40	0.24	0.44	0.26	0.49	0.29	0.55	0.34	0.62	0.39	0.71
W 310x44,5	0.12	0.23	0.13	0.24	0.13	0.25	0.14	0.26	0.15	0.28	0.16	0.30	0.18	0.33	0.20	0.37	0.22	0.41	0.24	0.45	0.27	0.50	0.30	0.56	0.34	0.63	0.39	0.73	0.45	0.84	0.51	0.96
W 310x52,0	0.13	0.25	0.14	0.26	0.14	0.27	0.15	0.29	0.17	0.32	0.19	0.35	0.21	0.39	0.23	0.43	0.25	0.48	0.28	0.53	0.31	0.59	0.36	0.67	0.41	0.78	0.47	0.89	0.53	1.01	0.61	1.17
W 360x32,9	0.11	0.21	0.11	0.21	0.12	0.22	0.12	0.23	0.13	0.24	0.13	0.25	0.14	0.26	0.15	0.28	0.16	0.31	0.18	0.33	0.19	0.36	0.21	0.40	0.23	0.44	0.26	0.48	0.28	0.54	0.33	0.60
W 360x39,0	0.11	0.22	0.12	0.22	0.12	0.23	0.13	0.24	0.13	0.25	0.14	0.27	0.15	0.29	0.16	0.31	0.18	0.34	0.20	0.38	0.22	0.41	0.24	0.46	0.27	0.51	0.31	0.57	0.35	0.66	0.40	0.76
W 360x51,0	0.12	0.23	0.13	0.24	0.13	0.25	0.14	0.26	0.15	0.28	0.16	0.30	0.18	0.33	0.19	0.37	0.21	0.40	0.24	0.45	0.26	0.50	0.29	0.55	0.33	0.63	0.38	0.73	0.44	0.83	0.50	0.96
W 360x57,8	0.13	0.24	0.13	0.25	0.14	0.27	0.15	0.28	0.16	0.30	0.18	0.33	0.20	0.37	0.22	0.41	0.24	0.45	0.27	0.50	0.30	0.56	0.33	0.63	0.39	0.73	0.44	0.84	0.50	0.96	0.58	1.12
W 360x64,0	0.14	0.26	0.14	0.27	0.15	0.29	0.17	0.31	0.18	0.34	0.20	0.38	0.22	0.42	0.25	0.47	0.28	0.52	0.31	0.58	0.34	0.64	0.39	0.74	0.45	0.86	0.51	0.97	0.58	1.11	0.66	1.28
W 360x72,0	0.15	0.28	0.16	0.30	0.17	0.32	0.19	0.36	0.21	0.39	0.23	0.43	0.25	0.48	0.28	0.53	0.31	0.59	0.35	0.66	0.40	0.76	0.45	0.86	0.51	0.98	0.58	1.11	0.66	1.28	0.75	1.46
W 360x79,0	0.16	0.31	0.18	0.33	0.20	0.37	0.21	0.40	0.24	0.44	0.26	0.49	0.29	0.55	0.32	0.60	0.36	0.68	0.40	0.77	0.46	0.88	0.51	0.99	0.58	1.12	0.66	1.28	0.74	1.45	0.83	1.63
W 360x91,0	0.18	0.34	0.20	0.37	0.22	0.41	0.24	0.45	0.26	0.50	0.29	0.55	0.32	0.61	0.35	0.67	0.40	0.76	0.45	0.87	0.51	0.98	0.57	1.10	0.64	1.25	0.72	1.42	0.81	1.61	0.90	1.77
W 360x101,0	0.21	0.39	0.23	0.43	0.25	0.48	0.28	0.53	0.31	0.58	0.33	0.64	0.37	0.70	0.42	0.80	0.47	0.91	0.52	1.02	0.58	1.14	0.65	1.27	0.73	1.45	0.82	1.63	0.90	1.79	0.97	1.94
W 360x110,0	0.24	0.45	0.26	0.49	0.28	0.54	0.31	0.59	0.34	0.65	0.37	0.71	0.42	0.81	0.47	0.91	0.52	1.02	0.58	1.14	0.64	1.27	0.72	1.43	0.81	1.61	0.89	1.78	0.95	1.92	1.02	2.00
W 360x122,0	0.27	0.51	0.29	0.56	0.32	0.61	0.35	0.67	0.38	0.73	0.43	0.83	0.48	0.93	0.53	1.04	0.58	1.15	0.65	1.28	0.72	1.44	0.80	1.61	0.88	1.78	0.94	1.91	1.00	2.00	1.07	2.07

B = Caso biapoioado. S = Caso semicontínuo. Valores em destaque indicam fatores de carga superiores a 0,7.

Quadro 9.4 – Fatores de carga para vigas mistas com laje de 10 cm em função do TRRF (continuação).

Nome	TRRF (min) tc = 10 cm																													
	30		29		28		27		26		25		24		23		22		21		20		19		18		17		16		15	
	B	S	B	S	B	S	B	S	B	S	B	S	B	S	B	S	B	S	B	S	B	S	B	S	B	S	B	S	B	S	B	S
W 410x46,1	0.12	0.22	0.12	0.23	0.12	0.24	0.13	0.25	0.14	0.26	0.14	0.27	0.15	0.29	0.17	0.32	0.19	0.35	0.20	0.39	0.22	0.43	0.25	0.47	0.28	0.53	0.31	0.60	0.36	0.69	0.41	0.79
W 410x60,0	0.13	0.24	0.13	0.25	0.14	0.26	0.14	0.27	0.15	0.29	0.17	0.32	0.18	0.35	0.20	0.39	0.22	0.43	0.25	0.47	0.28	0.52	0.31	0.58	0.36	0.68	0.41	0.78	0.46	0.89	0.54	1.04
W 410x67,0	0.13	0.25	0.14	0.26	0.14	0.27	0.16	0.30	0.17	0.32	0.19	0.35	0.21	0.39	0.23	0.43	0.25	0.48	0.28	0.53	0.31	0.59	0.36	0.68	0.41	0.79	0.47	0.90	0.54	1.04	0.62	1.21
W 410x75,0	0.14	0.27	0.15	0.28	0.16	0.30	0.17	0.33	0.19	0.36	0.21	0.39	0.23	0.44	0.26	0.48	0.28	0.54	0.31	0.59	0.36	0.69	0.41	0.78	0.47	0.90	0.53	1.02	0.61	1.19	0.70	1.35
W 410x85,0	0.15	0.29	0.17	0.32	0.18	0.34	0.20	0.38	0.22	0.41	0.24	0.46	0.27	0.51	0.29	0.56	0.33	0.63	0.38	0.72	0.42	0.82	0.48	0.92	0.55	1.06	0.63	1.23	0.71	1.39	0.81	1.53
W 460x52,0	0.12	0.22	0.12	0.23	0.12	0.24	0.13	0.25	0.13	0.26	0.14	0.27	0.15	0.29	0.17	0.32	0.18	0.35	0.20	0.38	0.22	0.42	0.24	0.46	0.27	0.51	0.30	0.57	0.35	0.65	0.40	0.74
W 460x60,0	0.12	0.23	0.13	0.24	0.13	0.25	0.14	0.26	0.15	0.28	0.16	0.30	0.17	0.33	0.19	0.36	0.21	0.40	0.23	0.44	0.26	0.49	0.28	0.54	0.33	0.62	0.37	0.71	0.42	0.82	0.49	0.95
W 460x68,0	0.13	0.24	0.13	0.26	0.14	0.27	0.15	0.28	0.16	0.31	0.18	0.34	0.20	0.37	0.22	0.41	0.24	0.45	0.26	0.50	0.29	0.56	0.34	0.64	0.39	0.74	0.44	0.84	0.50	0.97	0.59	1.13
W 460x74,0	0.13	0.25	0.14	0.26	0.14	0.27	0.15	0.29	0.17	0.32	0.18	0.35	0.20	0.39	0.22	0.43	0.25	0.47	0.28	0.52	0.30	0.58	0.35	0.67	0.40	0.78	0.46	0.88	0.53	1.03	0.62	1.20
W 460x82,0	0.14	0.26	0.15	0.28	0.16	0.30	0.17	0.32	0.19	0.35	0.20	0.39	0.22	0.43	0.25	0.48	0.28	0.53	0.30	0.58	0.35	0.67	0.40	0.76	0.45	0.88	0.52	1.01	0.60	1.17	0.69	1.33
W 460x89,0	0.15	0.28	0.16	0.30	0.17	0.33	0.19	0.36	0.21	0.39	0.23	0.43	0.25	0.48	0.28	0.53	0.31	0.59	0.35	0.67	0.40	0.77	0.45	0.87	0.51	1.00	0.59	1.15	0.68	1.33	0.77	1.48
W 460x97,0	0.16	0.30	0.17	0.33	0.19	0.36	0.20	0.39	0.22	0.43	0.25	0.47	0.27	0.52	0.30	0.58	0.34	0.66	0.39	0.75	0.44	0.85	0.49	0.96	0.57	1.11	0.65	1.28	0.74	1.43	0.83	1.57
W 460x106,0	0.17	0.33	0.19	0.36	0.20	0.39	0.22	0.43	0.25	0.47	0.27	0.53	0.30	0.58	0.34	0.65	0.38	0.75	0.43	0.84	0.49	0.95	0.55	1.08	0.64	1.26	0.72	1.41	0.81	1.55	0.90	1.68
W 530x66,0	0.12	0.23	0.12	0.23	0.13	0.24	0.13	0.25	0.14	0.26	0.14	0.28	0.16	0.30	0.17	0.33	0.19	0.35	0.21	0.39	0.23	0.42	0.25	0.46	0.28	0.51	0.31	0.58	0.37	0.66	0.43	0.77
W 530x74,0	0.12	0.24	0.13	0.24	0.13	0.25	0.14	0.27	0.15	0.28	0.16	0.30	0.17	0.33	0.19	0.37	0.21	0.40	0.23	0.45	0.26	0.49	0.28	0.54	0.33	0.62	0.38	0.71	0.44	0.82	0.52	0.95
W 530x85,0	0.13	0.25	0.14	0.26	0.14	0.27	0.16	0.30	0.17	0.32	0.18	0.35	0.20	0.39	0.22	0.43	0.25	0.47	0.27	0.52	0.31	0.59	0.35	0.68	0.40	0.78	0.46	0.90	0.54	1.04	0.63	1.18
W 530x92,0	0.14	0.26	0.14	0.27	0.15	0.29	0.16	0.31	0.18	0.34	0.19	0.37	0.21	0.41	0.24	0.45	0.26	0.50	0.29	0.56	0.33	0.63	0.37	0.72	0.43	0.83	0.49	0.96	0.57	1.13	0.67	1.28
W 530x101,0	0.14	0.28	0.15	0.29	0.17	0.32	0.18	0.35	0.20	0.38	0.22	0.42	0.24	0.46	0.26	0.51	0.29	0.56	0.33	0.64	0.38	0.73	0.43	0.83	0.49	0.96	0.57	1.12	0.66	1.28	0.75	1.43
W 530x109,0	0.15	0.29	0.17	0.32	0.18	0.34	0.20	0.37	0.21	0.41	0.24	0.46	0.26	0.50	0.29	0.56	0.32	0.63	0.37	0.72	0.42	0.82	0.47	0.92	0.54	1.07	0.63	1.24	0.72	1.39	0.81	1.53
W 610x101,0	0.13	0.25	0.14	0.27	0.14	0.28	0.15	0.30	0.17	0.32	0.18	0.35	0.20	0.39	0.22	0.43	0.25	0.48	0.27	0.53	0.30	0.59	0.35	0.68	0.40	0.78	0.47	0.91	0.54	1.06	0.64	1.21
W 610x113,0	0.14	0.27	0.15	0.29	0.16	0.31	0.18	0.34	0.19	0.37	0.21	0.41	0.23	0.45	0.26	0.50	0.28	0.55	0.32	0.62	0.37	0.71	0.41	0.81	0.48	0.94	0.56	1.10	0.64	1.26	0.74	1.40
W 610x125,0	0.16	0.30	0.17	0.32	0.18	0.35	0.20	0.38	0.22	0.42	0.24	0.47	0.27	0.51	0.29	0.57	0.33	0.65	0.38	0.74	0.43	0.84	0.48	0.95	0.56	1.11	0.64	1.29	0.74	1.43	0.82	1.56
W 610x140,0	0.18	0.34	0.19	0.37	0.21	0.41	0.23	0.44	0.25	0.49	0.28	0.54	0.31	0.60	0.35	0.69	0.40	0.78	0.44	0.88	0.50	0.99	0.57	1.13	0.66	1.32	0.74	1.46	0.81	1.58	0.89	1.69
W 610x174,0	0.21	0.40	0.22	0.44	0.24	0.48	0.27	0.53	0.29	0.58	0.32	0.64	0.37	0.73	0.42	0.83	0.46	0.93	0.51	1.04	0.58	1.19	0.66	1.36	0.75	1.55	0.82	1.68	0.90	1.81	0.98	1.89

B = Caso biapoioado. S = Caso semicontínuo. Valores em destaque indicam fatores de carga superiores a 0,7.

Quadro 9.5 – Fatores de carga para vigas mistas com laje de 12 cm em função do TRRF.

Nome	TRRF (min) tc = 12cm																													
	30		29		28		27		26		25		24		23		22		21		20		19		18		17		16		15	
	B	S	B	S	B	S	B	S	B	S	B	S	B	S	B	S	B	S	B	S	B	S	B	S	B	S	B	S	B	S	B	S
W 150x18,0	0.11	0.20	0.11	0.21	0.12	0.22	0.12	0.22	0.13	0.23	0.13	0.25	0.14	0.26	0.15	0.28	0.17	0.31	0.18	0.33	0.20	0.37	0.22	0.41	0.25	0.45	0.28	0.50	0.31	0.55	0.36	0.62
W 150x24,0	0.12	0.22	0.12	0.23	0.13	0.24	0.14	0.25	0.15	0.27	0.16	0.29	0.17	0.31	0.19	0.35	0.21	0.39	0.24	0.44	0.27	0.49	0.30	0.54	0.34	0.61	0.40	0.69	0.46	0.80	0.52	0.91
W 150x37,1	0.14	0.26	0.15	0.28	0.16	0.30	0.17	0.32	0.20	0.36	0.22	0.41	0.25	0.45	0.27	0.51	0.31	0.56	0.35	0.63	0.39	0.70	0.44	0.79	0.51	0.90	0.57	1.02	0.65	1.15	0.73	1.30
W 200x22,5	0.11	0.21	0.11	0.21	0.12	0.22	0.12	0.23	0.13	0.24	0.13	0.25	0.14	0.26	0.15	0.29	0.17	0.31	0.18	0.34	0.20	0.37	0.22	0.40	0.25	0.45	0.27	0.49	0.31	0.55	0.36	0.62
W 200x31,3	0.12	0.22	0.13	0.23	0.13	0.25	0.14	0.26	0.15	0.27	0.16	0.29	0.17	0.32	0.19	0.36	0.22	0.40	0.24	0.45	0.27	0.50	0.30	0.56	0.34	0.64	0.40	0.72	0.45	0.82	0.52	0.94
W 200x41,7	0.14	0.26	0.15	0.27	0.15	0.29	0.17	0.31	0.19	0.34	0.21	0.38	0.23	0.43	0.26	0.48	0.29	0.54	0.32	0.60	0.36	0.67	0.41	0.76	0.47	0.87	0.53	0.99	0.60	1.11	0.68	1.26
W 200x59,0	0.18	0.33	0.20	0.36	0.22	0.41	0.24	0.45	0.27	0.50	0.30	0.56	0.33	0.62	0.37	0.69	0.41	0.77	0.46	0.86	0.52	0.97	0.58	1.09	0.65	1.23	0.72	1.37	0.80	1.51	0.89	1.65
W 200x71,0	0.24	0.45	0.26	0.49	0.29	0.55	0.32	0.61	0.36	0.67	0.39	0.74	0.43	0.82	0.48	0.92	0.54	1.02	0.59	1.14	0.65	1.25	0.72	1.39	0.80	1.54	0.88	1.67	0.94	1.79	1.01	1.90
W 200x86,0	0.31	0.59	0.34	0.64	0.37	0.71	0.41	0.78	0.45	0.85	0.50	0.95	0.55	1.06	0.60	1.17	0.66	1.28	0.72	1.41	0.79	1.54	0.87	1.67	0.94	1.80	1.01	1.92	1.08	1.99	1.13	2.05
W 250x22,3	0.11	0.20	0.11	0.21	0.11	0.21	0.12	0.22	0.12	0.23	0.13	0.24	0.13	0.25	0.14	0.27	0.16	0.29	0.17	0.31	0.18	0.33	0.19	0.35	0.22	0.39	0.24	0.42	0.26	0.46	0.29	0.51
W 250x25,3	0.11	0.21	0.11	0.21	0.12	0.22	0.12	0.23	0.13	0.24	0.13	0.25	0.14	0.26	0.15	0.28	0.16	0.31	0.18	0.33	0.19	0.36	0.21	0.39	0.24	0.43	0.26	0.48	0.30	0.53	0.34	0.59
W 250x28,4	0.11	0.21	0.12	0.22	0.12	0.23	0.13	0.24	0.13	0.25	0.14	0.26	0.15	0.28	0.16	0.30	0.18	0.33	0.20	0.37	0.22	0.40	0.24	0.44	0.27	0.49	0.30	0.55	0.34	0.62	0.40	0.71
W 250x38,5	0.12	0.23	0.13	0.24	0.14	0.25	0.14	0.27	0.15	0.28	0.16	0.30	0.18	0.34	0.20	0.38	0.22	0.42	0.25	0.47	0.28	0.52	0.31	0.58	0.36	0.67	0.41	0.77	0.47	0.88	0.53	1.00
W 250x44,8	0.13	0.25	0.14	0.26	0.15	0.27	0.15	0.29	0.17	0.32	0.19	0.35	0.21	0.39	0.23	0.44	0.26	0.49	0.29	0.55	0.32	0.61	0.37	0.69	0.43	0.80	0.48	0.91	0.54	1.03	0.62	1.17
W 250x89,0	0.25	0.46	0.27	0.51	0.30	0.57	0.33	0.62	0.36	0.69	0.40	0.76	0.44	0.84	0.49	0.94	0.54	1.05	0.60	1.17	0.66	1.29	0.73	1.43	0.82	1.61	0.90	1.75	0.97	1.87	1.04	1.98
W 250x101,0	0.30	0.57	0.33	0.62	0.36	0.68	0.39	0.75	0.43	0.82	0.48	0.92	0.53	1.02	0.58	1.13	0.64	1.25	0.70	1.37	0.77	1.52	0.84	1.67	0.93	1.82	0.99	1.94	1.06	2.03	1.13	2.10
W 250x115,0	0.36	0.69	0.39	0.75	0.42	0.82	0.47	0.90	0.52	1.00	0.57	1.11	0.62	1.22	0.67	1.33	0.74	1.46	0.81	1.61	0.88	1.77	0.95	1.89	1.02	2.02	1.08	2.10	1.14	2.15	1.16	2.17
W 310x23,8	0.11	0.20	0.11	0.20	0.11	0.21	0.12	0.21	0.12	0.22	0.13	0.23	0.13	0.24	0.14	0.25	0.15	0.27	0.16	0.29	0.18	0.31	0.19	0.34	0.21	0.36	0.23	0.39	0.25	0.43	0.27	0.47
W 310x28,3	0.11	0.21	0.11	0.21	0.12	0.22	0.12	0.23	0.13	0.24	0.13	0.25	0.14	0.26	0.15	0.28	0.16	0.31	0.18	0.33	0.19	0.36	0.21	0.39	0.23	0.43	0.26	0.47	0.29	0.52	0.33	0.58
W 310x32,7	0.11	0.21	0.12	0.22	0.12	0.23	0.13	0.24	0.13	0.25	0.14	0.26	0.15	0.28	0.16	0.30	0.18	0.33	0.19	0.37	0.22	0.40	0.24	0.44	0.27	0.49	0.30	0.54	0.34	0.62	0.39	0.70
W 310x44,5	0.12	0.23	0.13	0.24	0.13	0.25	0.14	0.27	0.15	0.28	0.16	0.30	0.18	0.33	0.20	0.37	0.22	0.41	0.24	0.46	0.27	0.51	0.30	0.57	0.34	0.65	0.40	0.75	0.45	0.86	0.51	0.98
W 310x52,0	0.13	0.25	0.14	0.26	0.15	0.27	0.15	0.29	0.17	0.32	0.19	0.35	0.21	0.39	0.23	0.44	0.26	0.49	0.29	0.54	0.32	0.60	0.36	0.69	0.42	0.80	0.47	0.90	0.54	1.02	0.62	1.18
W 360x32,9	0.11	0.21	0.11	0.21	0.12	0.22	0.12	0.23	0.13	0.24	0.13	0.25	0.14	0.26	0.15	0.29	0.16	0.31	0.18	0.33	0.19	0.37	0.21	0.40	0.24	0.44	0.26	0.48	0.29	0.53	0.33	0.60
W 360x39,0	0.11	0.22	0.12	0.22	0.12	0.23	0.13	0.24	0.13	0.25	0.14	0.27	0.15	0.29	0.17	0.31	0.18	0.35	0.20	0.38	0.22	0.42	0.25	0.46	0.28	0.52	0.31	0.58	0.36	0.66	0.41	0.76
W 360x51,0	0.12	0.23	0.13	0.24	0.13	0.25	0.14	0.27	0.15	0.28	0.16	0.30	0.18	0.33	0.20	0.37	0.22	0.41	0.24	0.45	0.27	0.51	0.30	0.56	0.34	0.65	0.39	0.74	0.45	0.85	0.51	0.98
W 360x57,8	0.13	0.24	0.14	0.26	0.14	0.27	0.15	0.28	0.16	0.31	0.18	0.34	0.20	0.38	0.22	0.42	0.24	0.46	0.27	0.51	0.30	0.57	0.34	0.65	0.39	0.75	0.45	0.85	0.51	0.97	0.59	1.13
W 360x64,0	0.14	0.26	0.15	0.27	0.15	0.29	0.17	0.32	0.19	0.35	0.20	0.39	0.23	0.43	0.25	0.48	0.28	0.53	0.31	0.59	0.35	0.66	0.40	0.76	0.46	0.87	0.51	0.99	0.58	1.12	0.67	1.29
W 360x72,0	0.15	0.28	0.16	0.30	0.17	0.33	0.19	0.36	0.21	0.40	0.23	0.44	0.26	0.49	0.29	0.55	0.32	0.60	0.36	0.68	0.40	0.77	0.46	0.88	0.52	1.00	0.58	1.13	0.66	1.29	0.75	1.45
W 360x79,0	0.17	0.31	0.18	0.34	0.20	0.37	0.22	0.41	0.24	0.45	0.27	0.50	0.29	0.56	0.33	0.62	0.36	0.69	0.41	0.79	0.46	0.89	0.52	1.00	0.59	1.14	0.66	1.29	0.74	1.46	0.83	1.60
W 360x91,0	0.18	0.34	0.20	0.38	0.22	0.42	0.24	0.46	0.27	0.51	0.30	0.57	0.33	0.63	0.36	0.69	0.41	0.78	0.46	0.89	0.51	1.00	0.57	1.12	0.64	1.26	0.73	1.43	0.81	1.61	0.89	1.75
W 360x101,0	0.21	0.40	0.23	0.44	0.26	0.49	0.28	0.54	0.31	0.60	0.34	0.66	0.38	0.72	0.42	0.82	0.47	0.92	0.53	1.03	0.59	1.15	0.65	1.28	0.74	1.46	0.82	1.63	0.90	1.78	0.97	1.90
W 360x110,0	0.24	0.46	0.26	0.51	0.29	0.56	0.32	0.61	0.35	0.67	0.38	0.74	0.43	0.83	0.48	0.93	0.53	1.04	0.59	1.16	0.65	1.29	0.72	1.44	0.81	1.62	0.89	1.78	0.96	1.90	1.03	1.98
W 360x122,0	0.27	0.52	0.30	0.58	0.33	0.63	0.36	0.69	0.39	0.76	0.44	0.86	0.49	0.96	0.54	1.07	0.60	1.18	0.66	1.30	0.73	1.46	0.81	1.62	0.89	1.78	0.96	1.91	1.03	1.99	1.10	2.06

B = Caso biapoioado. S = Caso semicontínuo. Valores em destaque indicam fatores de carga superiores a 0,7.

Quadro 9.6 – Fatores de carga para vigas mistas com laje de 12 cm em função do TRRF (continuação).

Nome	TRRF (min) tc = 12cm																													
	30		29		28		27		26		25		24		23		22		21		20		19		18		17		16		15	
	B	S	B	S	B	S	B	S	B	S	B	S	B	S	B	S	B	S	B	S	B	S	B	S	B	S	B	S	B	S	B	S
W 410x46,1	0.12	0.22	0.12	0.23	0.12	0.24	0.13	0.25	0.14	0.26	0.14	0.27	0.15	0.29	0.17	0.32	0.19	0.36	0.21	0.39	0.23	0.43	0.25	0.48	0.28	0.53	0.32	0.60	0.37	0.68	0.42	0.78
W 410x60,0	0.13	0.24	0.13	0.25	0.14	0.26	0.14	0.27	0.15	0.29	0.17	0.32	0.19	0.35	0.21	0.39	0.23	0.43	0.25	0.48	0.28	0.53	0.31	0.59	0.36	0.69	0.41	0.79	0.47	0.90	0.54	1.05
W 410x67,0	0.13	0.25	0.14	0.26	0.15	0.28	0.16	0.30	0.17	0.33	0.19	0.36	0.21	0.40	0.23	0.44	0.26	0.49	0.28	0.54	0.32	0.60	0.36	0.69	0.42	0.80	0.47	0.91	0.54	1.05	0.63	1.20
W 410x75,0	0.14	0.27	0.15	0.28	0.16	0.30	0.17	0.33	0.19	0.36	0.21	0.40	0.23	0.44	0.26	0.49	0.29	0.55	0.32	0.61	0.36	0.70	0.41	0.80	0.47	0.91	0.53	1.04	0.62	1.19	0.70	1.33
W 410x85,0	0.16	0.30	0.17	0.32	0.18	0.35	0.20	0.38	0.22	0.42	0.25	0.47	0.27	0.52	0.30	0.57	0.33	0.64	0.38	0.73	0.43	0.83	0.48	0.94	0.55	1.07	0.63	1.23	0.72	1.36	0.80	1.50
W 460x52,0	0.11	0.22	0.12	0.23	0.12	0.24	0.13	0.25	0.13	0.26	0.14	0.27	0.15	0.29	0.17	0.32	0.18	0.35	0.20	0.38	0.22	0.42	0.24	0.46	0.27	0.51	0.30	0.57	0.35	0.64	0.41	0.74
W 460x60,0	0.12	0.23	0.13	0.24	0.13	0.25	0.14	0.26	0.15	0.28	0.16	0.30	0.17	0.33	0.19	0.37	0.21	0.40	0.23	0.44	0.26	0.49	0.29	0.55	0.33	0.63	0.38	0.72	0.43	0.82	0.50	0.94
W 460x68,0	0.13	0.25	0.13	0.26	0.14	0.27	0.15	0.29	0.16	0.31	0.18	0.34	0.20	0.38	0.22	0.42	0.24	0.46	0.27	0.51	0.30	0.57	0.34	0.65	0.39	0.75	0.44	0.85	0.51	0.98	0.59	1.12
W 460x74,0	0.13	0.25	0.14	0.26	0.14	0.28	0.16	0.30	0.17	0.32	0.19	0.36	0.21	0.39	0.23	0.43	0.25	0.48	0.28	0.54	0.31	0.59	0.36	0.68	0.41	0.79	0.46	0.90	0.53	1.04	0.62	1.19
W 460x82,0	0.14	0.27	0.15	0.28	0.16	0.30	0.17	0.33	0.19	0.36	0.21	0.39	0.23	0.44	0.25	0.48	0.28	0.54	0.31	0.59	0.35	0.68	0.40	0.78	0.46	0.89	0.52	1.02	0.60	1.18	0.69	1.31
W 460x89,0	0.15	0.28	0.16	0.31	0.17	0.33	0.19	0.36	0.21	0.40	0.23	0.44	0.26	0.49	0.28	0.54	0.31	0.60	0.36	0.69	0.40	0.78	0.46	0.88	0.52	1.01	0.59	1.16	0.68	1.31	0.77	1.45
W 460x97,0	0.16	0.30	0.17	0.33	0.19	0.36	0.21	0.40	0.23	0.44	0.25	0.48	0.28	0.54	0.31	0.59	0.35	0.67	0.39	0.76	0.44	0.86	0.50	0.97	0.57	1.12	0.65	1.27	0.74	1.41	0.82	1.55
W 460x106,0	0.17	0.33	0.19	0.37	0.21	0.40	0.23	0.44	0.25	0.49	0.28	0.54	0.31	0.59	0.34	0.67	0.39	0.76	0.44	0.86	0.49	0.96	0.55	1.09	0.64	1.26	0.72	1.39	0.81	1.53	0.89	1.66
W 530x66,0	0.12	0.22	0.12	0.23	0.13	0.24	0.13	0.25	0.14	0.26	0.14	0.27	0.16	0.30	0.17	0.32	0.19	0.35	0.21	0.38	0.23	0.42	0.25	0.46	0.28	0.51	0.32	0.57	0.37	0.66	0.44	0.77
W 530x74,0	0.12	0.24	0.13	0.25	0.13	0.26	0.14	0.27	0.15	0.28	0.16	0.31	0.18	0.34	0.19	0.37	0.21	0.40	0.23	0.44	0.26	0.49	0.29	0.54	0.33	0.62	0.38	0.70	0.45	0.81	0.52	0.94
W 530x85,0	0.13	0.25	0.14	0.26	0.14	0.28	0.16	0.30	0.17	0.33	0.19	0.36	0.20	0.39	0.23	0.44	0.25	0.48	0.28	0.53	0.31	0.60	0.36	0.69	0.41	0.79	0.47	0.90	0.54	1.03	0.63	1.16
W 530x92,0	0.14	0.26	0.14	0.27	0.15	0.29	0.16	0.31	0.18	0.34	0.20	0.38	0.22	0.42	0.24	0.46	0.27	0.51	0.29	0.57	0.33	0.64	0.38	0.73	0.43	0.85	0.50	0.97	0.58	1.12	0.67	1.26
W 530x101,0	0.14	0.28	0.15	0.30	0.17	0.32	0.18	0.35	0.20	0.38	0.22	0.42	0.24	0.47	0.27	0.52	0.30	0.57	0.34	0.65	0.38	0.74	0.43	0.85	0.49	0.97	0.57	1.12	0.66	1.27	0.75	1.41
W 530x109,0	0.15	0.30	0.17	0.32	0.18	0.35	0.20	0.38	0.22	0.42	0.24	0.47	0.27	0.52	0.29	0.57	0.33	0.64	0.38	0.73	0.42	0.83	0.48	0.94	0.55	1.08	0.63	1.24	0.72	1.38	0.81	1.52
W 610x101,0	0.13	0.26	0.14	0.27	0.14	0.28	0.16	0.30	0.17	0.33	0.19	0.36	0.20	0.39	0.23	0.44	0.25	0.48	0.28	0.54	0.31	0.60	0.35	0.69	0.41	0.79	0.47	0.91	0.55	1.05	0.64	1.19
W 610x113,0	0.14	0.28	0.15	0.29	0.16	0.32	0.18	0.34	0.19	0.37	0.21	0.41	0.24	0.46	0.26	0.51	0.29	0.56	0.33	0.64	0.37	0.73	0.42	0.83	0.48	0.95	0.56	1.11	0.65	1.25	0.74	1.39
W 610x125,0	0.16	0.30	0.17	0.33	0.19	0.36	0.20	0.39	0.22	0.43	0.25	0.48	0.27	0.53	0.30	0.58	0.34	0.67	0.39	0.76	0.44	0.86	0.49	0.97	0.57	1.13	0.65	1.28	0.74	1.42	0.83	1.56
W 610x140,0	0.18	0.35	0.20	0.38	0.22	0.42	0.24	0.46	0.26	0.50	0.28	0.56	0.32	0.62	0.36	0.71	0.41	0.80	0.45	0.90	0.51	1.01	0.58	1.15	0.67	1.33	0.75	1.46	0.83	1.59	0.91	1.70
W 610x174,0	0.21	0.42	0.23	0.45	0.25	0.50	0.28	0.55	0.31	0.60	0.34	0.67	0.38	0.76	0.43	0.86	0.48	0.97	0.53	1.07	0.61	1.23	0.68	1.39	0.77	1.56	0.84	1.69	0.92	1.82	1.00	1.90

B = Caso biapoioado. S = Caso semicontínuo. Valores em destaque indicam fatores de carga superiores a 0,7.

Quadro 9.7 – Fatores de carga para vigas mistas com laje de 14 cm em função do TRRF.

Nome	TRRF (min) tc = 14cm																													
	30		29		28		27		26		25		24		23		22		21		20		19		18		17		16		15	
	B	S	B	S	B	S	B	S	B	S	B	S	B	S	B	S	B	S	B	S	B	S	B	S	B	S	B	S	B	S	B	S
W 150x18,0	0.11	0.20	0.11	0.21	0.12	0.22	0.12	0.23	0.13	0.24	0.13	0.25	0.14	0.26	0.15	0.29	0.17	0.31	0.18	0.34	0.20	0.37	0.22	0.40	0.25	0.45	0.28	0.49	0.32	0.55	0.37	0.62
W 150x24,0	0.12	0.22	0.12	0.23	0.13	0.24	0.14	0.26	0.15	0.27	0.16	0.29	0.17	0.32	0.19	0.36	0.22	0.40	0.24	0.44	0.27	0.49	0.30	0.54	0.35	0.61	0.40	0.69	0.46	0.79	0.53	0.90
W 150x37,1	0.14	0.27	0.15	0.28	0.16	0.30	0.18	0.33	0.20	0.37	0.22	0.41	0.25	0.46	0.28	0.50	0.31	0.56	0.35	0.62	0.39	0.69	0.45	0.78	0.51	0.89	0.58	1.01	0.65	1.14	0.73	1.28
W 200x22,5	0.11	0.21	0.11	0.21	0.12	0.22	0.12	0.23	0.13	0.24	0.13	0.25	0.14	0.27	0.15	0.29	0.17	0.31	0.18	0.34	0.20	0.37	0.22	0.40	0.25	0.44	0.28	0.49	0.31	0.54	0.36	0.61
W 200x31,3	0.12	0.22	0.13	0.24	0.13	0.25	0.14	0.26	0.15	0.28	0.16	0.30	0.17	0.32	0.19	0.36	0.22	0.41	0.24	0.45	0.27	0.51	0.31	0.56	0.35	0.63	0.40	0.72	0.46	0.82	0.52	0.93
W 200x41,7	0.14	0.26	0.15	0.27	0.16	0.29	0.17	0.31	0.19	0.35	0.21	0.39	0.23	0.44	0.26	0.49	0.29	0.55	0.33	0.61	0.37	0.67	0.42	0.76	0.48	0.86	0.54	0.98	0.60	1.10	0.68	1.25
W 200x59,0	0.18	0.34	0.20	0.37	0.22	0.41	0.24	0.46	0.27	0.51	0.30	0.57	0.34	0.63	0.38	0.69	0.42	0.77	0.47	0.86	0.52	0.96	0.58	1.08	0.65	1.21	0.72	1.35	0.80	1.48	0.89	1.62
W 200x71,0	0.24	0.45	0.27	0.50	0.30	0.55	0.33	0.61	0.36	0.67	0.40	0.74	0.44	0.82	0.49	0.91	0.54	1.01	0.60	1.13	0.66	1.25	0.72	1.37	0.80	1.51	0.87	1.63	0.94	1.75	1.01	1.86
W 200x86,0	0.31	0.58	0.34	0.64	0.38	0.71	0.41	0.77	0.45	0.85	0.50	0.94	0.55	1.04	0.61	1.15	0.66	1.26	0.72	1.39	0.79	1.51	0.86	1.63	0.94	1.76	1.00	1.87	1.07	1.95	1.12	2.00
W 250x22,3	0.11	0.20	0.11	0.21	0.11	0.21	0.12	0.22	0.12	0.23	0.13	0.24	0.13	0.25	0.14	0.26	0.15	0.28	0.17	0.30	0.18	0.32	0.19	0.35	0.22	0.38	0.24	0.42	0.26	0.46	0.29	0.50
W 250x25,3	0.11	0.21	0.11	0.21	0.12	0.22	0.12	0.23	0.13	0.24	0.13	0.25	0.14	0.26	0.15	0.28	0.16	0.31	0.18	0.33	0.19	0.36	0.22	0.39	0.24	0.43	0.27	0.47	0.30	0.52	0.34	0.59
W 250x28,4	0.11	0.21	0.12	0.22	0.12	0.23	0.13	0.24	0.13	0.25	0.14	0.26	0.15	0.28	0.16	0.31	0.18	0.33	0.20	0.37	0.22	0.40	0.24	0.44	0.27	0.49	0.30	0.54	0.35	0.61	0.40	0.70
W 250x38,5	0.12	0.23	0.13	0.24	0.14	0.25	0.14	0.27	0.15	0.28	0.16	0.31	0.18	0.34	0.20	0.38	0.23	0.43	0.25	0.47	0.28	0.53	0.32	0.59	0.36	0.67	0.42	0.76	0.47	0.87	0.54	0.99
W 250x44,8	0.13	0.25	0.14	0.26	0.15	0.28	0.15	0.29	0.17	0.32	0.19	0.36	0.21	0.40	0.24	0.44	0.26	0.50	0.30	0.56	0.33	0.62	0.37	0.69	0.43	0.80	0.49	0.90	0.55	1.02	0.63	1.16
W 250x89,0	0.25	0.47	0.27	0.52	0.30	0.58	0.33	0.64	0.37	0.70	0.40	0.77	0.44	0.85	0.50	0.95	0.55	1.06	0.61	1.18	0.66	1.30	0.73	1.44	0.82	1.58	0.89	1.71	0.96	1.83	1.03	1.93
W 250x101,0	0.30	0.58	0.33	0.64	0.36	0.70	0.40	0.76	0.43	0.83	0.48	0.93	0.53	1.03	0.59	1.14	0.64	1.26	0.70	1.37	0.77	1.52	0.84	1.64	0.92	1.78	0.98	1.90	1.05	1.98	1.12	2.05
W 250x115,0	0.36	0.70	0.40	0.76	0.43	0.83	0.47	0.91	0.52	1.01	0.57	1.12	0.62	1.23	0.67	1.34	0.74	1.46	0.81	1.60	0.88	1.72	0.95	1.85	1.01	1.97	1.07	2.04	1.14	2.11	1.15	2.12
W 310x23,8	0.11	0.19	0.11	0.20	0.11	0.21	0.12	0.21	0.12	0.22	0.12	0.23	0.13	0.24	0.14	0.25	0.15	0.27	0.16	0.29	0.18	0.31	0.19	0.33	0.21	0.36	0.23	0.39	0.25	0.43	0.27	0.47
W 310x28,3	0.11	0.21	0.11	0.21	0.12	0.22	0.12	0.23	0.13	0.24	0.13	0.25	0.14	0.26	0.15	0.28	0.16	0.30	0.18	0.33	0.19	0.35	0.21	0.39	0.24	0.42	0.26	0.47	0.29	0.51	0.33	0.58
W 310x32,7	0.11	0.21	0.12	0.22	0.12	0.23	0.13	0.24	0.13	0.25	0.14	0.26	0.15	0.28	0.16	0.31	0.18	0.33	0.20	0.36	0.22	0.40	0.24	0.44	0.27	0.49	0.30	0.54	0.35	0.61	0.40	0.70
W 310x44,5	0.12	0.23	0.13	0.24	0.13	0.25	0.14	0.27	0.15	0.28	0.16	0.30	0.18	0.34	0.20	0.38	0.22	0.42	0.25	0.46	0.27	0.52	0.31	0.58	0.35	0.66	0.40	0.76	0.46	0.86	0.52	0.98
W 310x52,0	0.13	0.25	0.14	0.26	0.15	0.28	0.16	0.29	0.17	0.33	0.19	0.36	0.21	0.40	0.23	0.44	0.26	0.49	0.29	0.55	0.32	0.62	0.37	0.70	0.42	0.80	0.48	0.91	0.54	1.03	0.62	1.17
W 360x32,9	0.11	0.21	0.11	0.22	0.12	0.22	0.12	0.23	0.13	0.24	0.13	0.25	0.14	0.27	0.15	0.29	0.16	0.31	0.18	0.34	0.19	0.37	0.21	0.40	0.24	0.44	0.26	0.48	0.29	0.53	0.33	0.60
W 360x39,0	0.11	0.22	0.12	0.22	0.12	0.23	0.13	0.24	0.13	0.26	0.14	0.27	0.15	0.29	0.17	0.32	0.18	0.35	0.20	0.39	0.22	0.43	0.25	0.47	0.28	0.52	0.31	0.58	0.36	0.66	0.41	0.75
W 360x51,0	0.12	0.23	0.13	0.24	0.13	0.25	0.14	0.27	0.15	0.28	0.16	0.30	0.18	0.34	0.20	0.38	0.22	0.42	0.24	0.46	0.27	0.51	0.30	0.57	0.35	0.66	0.40	0.75	0.45	0.85	0.52	0.97
W 360x57,8	0.13	0.25	0.14	0.26	0.14	0.27	0.15	0.28	0.16	0.31	0.18	0.34	0.20	0.38	0.22	0.42	0.25	0.47	0.28	0.52	0.31	0.58	0.34	0.66	0.40	0.76	0.45	0.86	0.51	0.97	0.59	1.12
W 360x64,0	0.14	0.26	0.15	0.28	0.15	0.29	0.17	0.32	0.19	0.36	0.21	0.39	0.23	0.44	0.26	0.49	0.29	0.54	0.32	0.60	0.35	0.67	0.40	0.77	0.46	0.89	0.52	1.00	0.59	1.14	0.67	1.29
W 360x72,0	0.15	0.28	0.16	0.30	0.18	0.33	0.19	0.37	0.21	0.41	0.24	0.45	0.26	0.50	0.29	0.56	0.32	0.62	0.36	0.69	0.41	0.79	0.46	0.89	0.52	1.01	0.59	1.14	0.67	1.30	0.75	1.43
W 360x79,0	0.17	0.32	0.18	0.35	0.20	0.38	0.22	0.42	0.24	0.46	0.27	0.51	0.30	0.57	0.33	0.63	0.37	0.71	0.42	0.80	0.47	0.91	0.52	1.02	0.59	1.15	0.66	1.30	0.75	1.44	0.83	1.58
W 360x91,0	0.18	0.35	0.20	0.39	0.22	0.43	0.25	0.47	0.27	0.52	0.30	0.58	0.33	0.64	0.37	0.71	0.41	0.80	0.46	0.90	0.52	1.01	0.58	1.13	0.65	1.27	0.73	1.43	0.81	1.58	0.89	1.72
W 360x101,0	0.22	0.41	0.24	0.45	0.26	0.50	0.29	0.55	0.32	0.61	0.35	0.67	0.38	0.74	0.43	0.83	0.48	0.94	0.53	1.05	0.59	1.16	0.65	1.29	0.74	1.46	0.82	1.61	0.89	1.74	0.96	1.86
W 360x110,0	0.24	0.47	0.27	0.51	0.29	0.57	0.32	0.62	0.35	0.68	0.39	0.75	0.43	0.85	0.48	0.95	0.54	1.06	0.59	1.17	0.65	1.29	0.73	1.44	0.81	1.61	0.89	1.74	0.95	1.86	1.03	1.94
W 360x122,0	0.28	0.54	0.30	0.59	0.33	0.64	0.36	0.70	0.40	0.77	0.44	0.87	0.49	0.97	0.55	1.08	0.60	1.19	0.66	1.31	0.73	1.46	0.81	1.61	0.89	1.75	0.96	1.87	1.03	1.96	1.10	2.03

B = Caso biapoioado. S = Caso semicontínuo. Valores em destaque indicam fatores de carga superiores a 0,7.

Quadro 9.8 – Fatores de carga para vigas mistas com laje de 14 cm em função do TRRF (continuação).

Nome	TRRF (min) tc = 14cm																													
	30		29		28		27		26		25		24		23		22		21		20		19		18		17		16		15	
	B	S	B	S	B	S	B	S	B	S	B	S	B	S	B	S	B	S	B	S	B	S	B	S	B	S	B	S	B	S	B	S
W 410x46,1	0.11	0.22	0.12	0.23	0.12	0.24	0.13	0.25	0.14	0.26	0.14	0.28	0.16	0.30	0.17	0.33	0.19	0.36	0.21	0.40	0.23	0.43	0.25	0.48	0.28	0.53	0.32	0.60	0.37	0.68	0.42	0.78
W 410x60,0	0.13	0.24	0.13	0.25	0.14	0.26	0.14	0.28	0.15	0.30	0.17	0.32	0.19	0.36	0.21	0.40	0.23	0.44	0.26	0.49	0.28	0.54	0.32	0.60	0.37	0.70	0.42	0.80	0.47	0.91	0.55	1.04
W 410x67,0	0.13	0.25	0.14	0.27	0.15	0.28	0.16	0.30	0.17	0.33	0.19	0.36	0.21	0.40	0.23	0.45	0.26	0.50	0.29	0.55	0.32	0.61	0.37	0.71	0.42	0.81	0.48	0.92	0.55	1.04	0.63	1.19
W 410x75,0	0.14	0.27	0.15	0.28	0.16	0.31	0.18	0.34	0.19	0.37	0.21	0.41	0.24	0.45	0.26	0.50	0.29	0.56	0.32	0.62	0.37	0.71	0.42	0.81	0.48	0.92	0.54	1.04	0.62	1.18	0.71	1.31
W 410x85,0	0.16	0.30	0.17	0.32	0.19	0.36	0.20	0.39	0.22	0.43	0.25	0.48	0.28	0.53	0.30	0.58	0.34	0.65	0.39	0.74	0.43	0.84	0.49	0.95	0.55	1.08	0.63	1.21	0.72	1.35	0.80	1.48
W 460x52,0	0.11	0.22	0.12	0.23	0.12	0.24	0.13	0.25	0.13	0.26	0.14	0.27	0.15	0.29	0.17	0.32	0.18	0.35	0.20	0.38	0.22	0.41	0.24	0.45	0.27	0.51	0.31	0.56	0.35	0.64	0.41	0.74
W 460x60,0	0.12	0.23	0.13	0.24	0.13	0.25	0.14	0.26	0.15	0.28	0.16	0.30	0.17	0.33	0.19	0.37	0.21	0.41	0.24	0.45	0.26	0.50	0.29	0.55	0.34	0.63	0.38	0.72	0.43	0.82	0.50	0.94
W 460x68,0	0.13	0.25	0.13	0.26	0.14	0.27	0.15	0.29	0.16	0.32	0.18	0.34	0.20	0.38	0.22	0.42	0.24	0.47	0.27	0.52	0.30	0.58	0.34	0.65	0.39	0.75	0.45	0.85	0.51	0.97	0.59	1.10
W 460x74,0	0.13	0.25	0.14	0.27	0.15	0.28	0.16	0.30	0.17	0.33	0.19	0.36	0.21	0.40	0.23	0.44	0.26	0.49	0.28	0.54	0.31	0.60	0.36	0.70	0.41	0.80	0.47	0.91	0.54	1.03	0.62	1.18
W 460x82,0	0.14	0.27	0.15	0.28	0.16	0.30	0.17	0.33	0.19	0.36	0.21	0.40	0.23	0.44	0.26	0.49	0.28	0.55	0.31	0.60	0.36	0.69	0.41	0.79	0.46	0.90	0.53	1.02	0.61	1.16	0.69	1.30
W 460x89,0	0.15	0.29	0.16	0.31	0.18	0.34	0.19	0.37	0.21	0.40	0.23	0.45	0.26	0.50	0.29	0.55	0.32	0.61	0.36	0.70	0.41	0.79	0.46	0.90	0.52	1.02	0.60	1.16	0.68	1.29	0.77	1.43
W 460x97,0	0.16	0.31	0.18	0.34	0.19	0.37	0.21	0.40	0.23	0.44	0.26	0.49	0.28	0.54	0.31	0.60	0.35	0.68	0.40	0.77	0.45	0.87	0.50	0.98	0.57	1.13	0.65	1.26	0.74	1.39	0.82	1.52
W 460x106,0	0.18	0.34	0.19	0.37	0.21	0.40	0.23	0.44	0.26	0.49	0.28	0.55	0.31	0.60	0.35	0.68	0.39	0.77	0.44	0.87	0.50	0.97	0.56	1.10	0.64	1.24	0.72	1.37	0.81	1.50	0.89	1.63
W 530x66,0	0.12	0.22	0.12	0.23	0.13	0.24	0.13	0.25	0.14	0.26	0.14	0.27	0.16	0.29	0.17	0.32	0.19	0.35	0.21	0.38	0.23	0.42	0.25	0.46	0.28	0.51	0.32	0.57	0.37	0.65	0.44	0.76
W 530x74,0	0.12	0.24	0.13	0.25	0.13	0.26	0.14	0.27	0.15	0.28	0.16	0.31	0.18	0.33	0.19	0.37	0.21	0.40	0.24	0.44	0.26	0.49	0.29	0.54	0.34	0.61	0.38	0.70	0.45	0.81	0.52	0.93
W 530x85,0	0.13	0.25	0.14	0.27	0.14	0.28	0.16	0.30	0.17	0.33	0.19	0.36	0.21	0.40	0.23	0.44	0.25	0.49	0.28	0.54	0.32	0.60	0.36	0.68	0.41	0.78	0.47	0.89	0.55	1.02	0.63	1.15
W 530x92,0	0.14	0.26	0.14	0.27	0.15	0.29	0.17	0.32	0.18	0.35	0.20	0.38	0.22	0.42	0.24	0.47	0.27	0.52	0.30	0.57	0.34	0.65	0.38	0.74	0.44	0.85	0.50	0.97	0.58	1.11	0.67	1.25
W 530x101,0	0.15	0.28	0.16	0.30	0.17	0.33	0.18	0.36	0.20	0.39	0.22	0.43	0.25	0.48	0.27	0.53	0.30	0.58	0.34	0.66	0.39	0.75	0.44	0.85	0.50	0.98	0.57	1.12	0.66	1.25	0.75	1.39
W 530x109,0	0.16	0.30	0.17	0.33	0.18	0.36	0.20	0.39	0.22	0.43	0.24	0.47	0.27	0.52	0.30	0.58	0.33	0.65	0.38	0.74	0.43	0.84	0.48	0.94	0.55	1.09	0.63	1.23	0.72	1.36	0.81	1.50
W 610x101,0	0.13	0.26	0.14	0.27	0.15	0.28	0.16	0.30	0.17	0.33	0.19	0.36	0.21	0.40	0.23	0.44	0.25	0.49	0.28	0.54	0.31	0.61	0.36	0.69	0.41	0.79	0.47	0.90	0.55	1.04	0.64	1.18
W 610x113,0	0.14	0.28	0.15	0.29	0.17	0.32	0.18	0.35	0.20	0.38	0.22	0.42	0.24	0.47	0.27	0.52	0.29	0.57	0.33	0.65	0.38	0.74	0.43	0.84	0.49	0.96	0.56	1.10	0.65	1.23	0.74	1.37
W 610x125,0	0.16	0.31	0.17	0.34	0.19	0.37	0.21	0.40	0.23	0.44	0.25	0.49	0.28	0.54	0.30	0.59	0.35	0.68	0.39	0.77	0.44	0.87	0.49	0.98	0.57	1.13	0.65	1.27	0.74	1.41	0.83	1.54
W 610x140,0	0.18	0.36	0.20	0.39	0.22	0.43	0.24	0.47	0.26	0.52	0.29	0.57	0.32	0.63	0.37	0.72	0.41	0.81	0.46	0.91	0.51	1.02	0.58	1.16	0.67	1.32	0.76	1.45	0.83	1.58	0.92	1.69
W 610x174,0	0.22	0.43	0.24	0.47	0.26	0.51	0.29	0.57	0.31	0.62	0.35	0.69	0.39	0.78	0.44	0.88	0.49	0.99	0.54	1.10	0.62	1.25	0.70	1.42	0.79	1.58	0.86	1.70	0.93	1.82	1.01	1.90

B = Caso biapoioado. S = Caso semicontínuo. Valores em destaque indicam fatores de carga superiores a 0,7.

Quadro 9.9 – Fatores de carga para vigas mistas com laje de 16 cm em função do TRRF.

Nome	TRRF (min) tc = 16cm																													
	30		29		28		27		26		25		24		23		22		21		20		19		18		17		16		15	
	B	S	B	S	B	S	B	S	B	S	B	S	B	S	B	S	B	S	B	S	B	S	B	S	B	S	B	S	B	S	B	S
W 150x18,0	0.11	0.20	0.11	0.21	0.12	0.22	0.12	0.23	0.13	0.24	0.13	0.25	0.14	0.27	0.15	0.29	0.17	0.31	0.18	0.34	0.20	0.37	0.22	0.40	0.25	0.45	0.28	0.49	0.32	0.55	0.37	0.62
W 150x24,0	0.12	0.22	0.12	0.23	0.13	0.24	0.14	0.26	0.15	0.27	0.16	0.29	0.17	0.32	0.19	0.36	0.22	0.40	0.24	0.44	0.27	0.48	0.31	0.54	0.35	0.61	0.40	0.69	0.47	0.79	0.53	0.90
W 150x37,1	0.14	0.27	0.15	0.28	0.16	0.30	0.18	0.33	0.20	0.37	0.22	0.41	0.25	0.45	0.28	0.50	0.32	0.56	0.35	0.62	0.40	0.69	0.45	0.78	0.51	0.89	0.58	1.00	0.65	1.13	0.73	1.27
W 200x22,5	0.11	0.21	0.11	0.21	0.12	0.22	0.12	0.23	0.13	0.24	0.13	0.25	0.14	0.27	0.15	0.29	0.17	0.31	0.18	0.33	0.20	0.36	0.22	0.40	0.25	0.44	0.28	0.49	0.31	0.54	0.36	0.61
W 200x31,3	0.12	0.22	0.13	0.24	0.13	0.25	0.14	0.26	0.15	0.28	0.16	0.30	0.17	0.33	0.20	0.37	0.22	0.41	0.25	0.46	0.27	0.50	0.31	0.56	0.35	0.63	0.41	0.71	0.46	0.81	0.53	0.93
W 200x41,7	0.14	0.26	0.15	0.28	0.16	0.29	0.17	0.31	0.19	0.35	0.21	0.39	0.24	0.44	0.26	0.49	0.30	0.54	0.33	0.60	0.37	0.67	0.42	0.75	0.48	0.86	0.54	0.97	0.61	1.10	0.69	1.24
W 200x59,0	0.18	0.34	0.20	0.37	0.22	0.41	0.25	0.46	0.27	0.50	0.31	0.56	0.34	0.62	0.38	0.69	0.42	0.76	0.47	0.85	0.53	0.95	0.59	1.07	0.65	1.20	0.73	1.34	0.80	1.46	0.88	1.60
W 200x71,0	0.24	0.45	0.27	0.50	0.30	0.55	0.33	0.61	0.37	0.67	0.40	0.73	0.44	0.81	0.49	0.90	0.55	1.00	0.60	1.11	0.66	1.23	0.72	1.36	0.80	1.48	0.87	1.61	0.94	1.73	1.00	1.83
W 200x86,0	0.32	0.58	0.35	0.63	0.38	0.70	0.42	0.76	0.46	0.84	0.51	0.93	0.56	1.03	0.61	1.13	0.66	1.25	0.72	1.37	0.79	1.48	0.86	1.60	0.93	1.73	0.99	1.84	1.06	1.91	1.11	1.96
W 250x22,3	0.11	0.20	0.11	0.20	0.11	0.21	0.12	0.22	0.12	0.22	0.13	0.23	0.13	0.24	0.14	0.26	0.15	0.28	0.17	0.30	0.18	0.32	0.19	0.35	0.22	0.38	0.24	0.41	0.26	0.45	0.29	0.50
W 250x25,3	0.11	0.21	0.11	0.21	0.12	0.22	0.12	0.23	0.13	0.24	0.13	0.25	0.14	0.26	0.15	0.28	0.16	0.30	0.18	0.33	0.19	0.35	0.22	0.39	0.24	0.43	0.27	0.47	0.30	0.52	0.35	0.59
W 250x28,4	0.11	0.21	0.12	0.22	0.12	0.23	0.13	0.24	0.13	0.25	0.14	0.26	0.15	0.28	0.16	0.31	0.18	0.33	0.20	0.36	0.22	0.40	0.24	0.44	0.27	0.49	0.31	0.54	0.35	0.61	0.41	0.70
W 250x38,5	0.12	0.23	0.13	0.24	0.14	0.26	0.14	0.27	0.15	0.29	0.16	0.31	0.18	0.35	0.20	0.39	0.23	0.43	0.25	0.48	0.29	0.53	0.32	0.59	0.37	0.67	0.42	0.76	0.48	0.86	0.54	0.98
W 250x44,8	0.13	0.25	0.14	0.26	0.15	0.28	0.16	0.29	0.17	0.33	0.19	0.36	0.21	0.40	0.24	0.45	0.27	0.50	0.30	0.56	0.33	0.62	0.38	0.69	0.44	0.79	0.49	0.90	0.55	1.01	0.63	1.15
W 250x89,0	0.25	0.47	0.28	0.52	0.31	0.58	0.34	0.64	0.37	0.70	0.41	0.77	0.45	0.85	0.50	0.94	0.55	1.05	0.61	1.17	0.67	1.28	0.73	1.42	0.81	1.55	0.89	1.68	0.96	1.80	1.03	1.90
W 250x101,0	0.31	0.58	0.34	0.63	0.37	0.69	0.40	0.76	0.44	0.83	0.48	0.92	0.54	1.02	0.59	1.13	0.64	1.25	0.70	1.36	0.77	1.49	0.84	1.61	0.92	1.75	0.98	1.86	1.04	1.94	1.11	2.01
W 250x115,0	0.37	0.69	0.40	0.76	0.43	0.82	0.47	0.90	0.52	1.00	0.57	1.11	0.63	1.22	0.68	1.33	0.74	1.45	0.80	1.57	0.87	1.69	0.94	1.81	1.00	1.93	1.07	2.00	1.13	2.06	1.14	2.08
W 310x23,8	0.11	0.19	0.11	0.20	0.11	0.20	0.12	0.21	0.12	0.22	0.12	0.22	0.13	0.23	0.14	0.25	0.15	0.27	0.16	0.29	0.18	0.31	0.19	0.33	0.21	0.36	0.23	0.39	0.25	0.42	0.28	0.46
W 310x28,3	0.11	0.21	0.11	0.21	0.12	0.22	0.12	0.23	0.13	0.24	0.13	0.25	0.14	0.26	0.15	0.28	0.16	0.30	0.18	0.32	0.19	0.35	0.21	0.38	0.24	0.42	0.26	0.46	0.29	0.51	0.34	0.58
W 310x32,7	0.11	0.21	0.12	0.22	0.12	0.23	0.13	0.24	0.13	0.25	0.14	0.26	0.15	0.28	0.16	0.30	0.18	0.33	0.20	0.36	0.22	0.40	0.24	0.44	0.27	0.48	0.30	0.54	0.35	0.61	0.40	0.70
W 310x44,5	0.12	0.23	0.13	0.24	0.13	0.26	0.14	0.27	0.15	0.28	0.16	0.31	0.18	0.34	0.20	0.38	0.22	0.42	0.25	0.47	0.28	0.53	0.31	0.59	0.35	0.66	0.41	0.75	0.46	0.86	0.53	0.97
W 310x52,0	0.13	0.25	0.14	0.26	0.15	0.28	0.16	0.30	0.17	0.33	0.19	0.36	0.21	0.40	0.24	0.45	0.26	0.50	0.30	0.56	0.33	0.62	0.37	0.70	0.43	0.80	0.48	0.91	0.55	1.02	0.62	1.16
W 360x32,9	0.11	0.21	0.11	0.22	0.12	0.22	0.12	0.23	0.13	0.24	0.13	0.25	0.14	0.27	0.15	0.29	0.16	0.31	0.18	0.33	0.19	0.36	0.21	0.39	0.24	0.43	0.26	0.48	0.29	0.53	0.34	0.59
W 360x39,0	0.11	0.22	0.12	0.22	0.12	0.23	0.13	0.25	0.13	0.26	0.14	0.27	0.15	0.29	0.17	0.32	0.18	0.35	0.20	0.39	0.23	0.42	0.25	0.46	0.28	0.52	0.32	0.58	0.37	0.66	0.42	0.75
W 360x51,0	0.12	0.23	0.13	0.24	0.13	0.26	0.14	0.27	0.15	0.28	0.16	0.31	0.18	0.34	0.20	0.38	0.22	0.42	0.25	0.47	0.27	0.52	0.31	0.58	0.35	0.65	0.40	0.74	0.45	0.84	0.52	0.96
W 360x57,8	0.13	0.25	0.14	0.26	0.14	0.27	0.15	0.29	0.16	0.31	0.18	0.35	0.20	0.39	0.22	0.43	0.25	0.48	0.28	0.53	0.31	0.59	0.35	0.66	0.40	0.75	0.46	0.85	0.52	0.97	0.59	1.11
W 360x64,0	0.14	0.27	0.15	0.28	0.16	0.30	0.17	0.33	0.19	0.36	0.21	0.40	0.23	0.44	0.26	0.49	0.29	0.55	0.32	0.61	0.36	0.69	0.41	0.78	0.47	0.89	0.53	1.01	0.59	1.14	0.67	1.28
W 360x72,0	0.15	0.29	0.16	0.31	0.18	0.34	0.20	0.37	0.22	0.41	0.24	0.45	0.27	0.51	0.30	0.57	0.33	0.63	0.37	0.70	0.42	0.79	0.47	0.90	0.53	1.02	0.59	1.14	0.67	1.28	0.75	1.42
W 360x79,0	0.17	0.32	0.18	0.35	0.20	0.39	0.22	0.43	0.25	0.47	0.27	0.52	0.30	0.58	0.34	0.64	0.37	0.72	0.42	0.81	0.47	0.92	0.53	1.03	0.59	1.16	0.67	1.29	0.75	1.42	0.83	1.56
W 360x91,0	0.19	0.35	0.21	0.39	0.23	0.43	0.25	0.48	0.28	0.53	0.31	0.59	0.34	0.65	0.37	0.72	0.42	0.81	0.47	0.91	0.52	1.02	0.58	1.14	0.65	1.28	0.73	1.42	0.81	1.56	0.89	1.69
W 360x101,0	0.22	0.42	0.24	0.46	0.26	0.51	0.29	0.56	0.32	0.62	0.35	0.68	0.39	0.75	0.43	0.85	0.49	0.95	0.54	1.06	0.60	1.17	0.66	1.30	0.74	1.45	0.82	1.59	0.89	1.71	0.96	1.83
W 360x110,0	0.25	0.47	0.27	0.52	0.30	0.58	0.33	0.63	0.36	0.70	0.39	0.76	0.44	0.86	0.49	0.96	0.54	1.07	0.60	1.18	0.66	1.30	0.73	1.44	0.81	1.58	0.88	1.71	0.95	1.83	1.02	1.91
W 360x122,0	0.28	0.54	0.31	0.60	0.34	0.65	0.37	0.72	0.40	0.78	0.45	0.88	0.50	0.98	0.55	1.09	0.60	1.20	0.66	1.31	0.73	1.46	0.81	1.58	0.89	1.72	0.95	1.83	1.02	1.92	1.10	1.99

B = Caso biapoioado. S = Caso semicontínuo. Valores em destaque indicam fatores de carga superiores a 0,7.

Quadro 9.10 – Fatores de carga para vigas mistas com laje de 16 cm em função do TRRF (continuação).

Nome	TRRF (min) tc = 16cm																													
	30		29		28		27		26		25		24		23		22		21		20		19		18		17		16		15	
	B	S	B	S	B	S	B	S	B	S	B	S	B	S	B	S	B	S	B	S	B	S	B	S	B	S	B	S	B	S	B	S
W 410x46,1	0.11	0.22	0.12	0.23	0.12	0.24	0.13	0.25	0.14	0.26	0.14	0.28	0.16	0.30	0.17	0.33	0.19	0.36	0.21	0.39	0.23	0.43	0.26	0.48	0.29	0.53	0.33	0.59	0.38	0.68	0.43	0.77
W 410x60,0	0.13	0.24	0.13	0.25	0.14	0.26	0.14	0.28	0.16	0.30	0.17	0.33	0.19	0.36	0.21	0.40	0.23	0.45	0.26	0.50	0.29	0.55	0.32	0.61	0.37	0.70	0.42	0.80	0.48	0.90	0.55	1.04
W 410x67,0	0.13	0.25	0.14	0.27	0.15	0.28	0.16	0.30	0.17	0.33	0.19	0.37	0.21	0.41	0.24	0.45	0.26	0.50	0.29	0.56	0.32	0.62	0.37	0.70	0.43	0.80	0.48	0.91	0.55	1.04	0.63	1.17
W 410x75,0	0.14	0.27	0.15	0.29	0.16	0.31	0.18	0.34	0.20	0.37	0.22	0.41	0.24	0.46	0.27	0.51	0.30	0.57	0.33	0.63	0.37	0.71	0.42	0.80	0.48	0.91	0.54	1.03	0.62	1.17	0.71	1.30
W 410x85,0	0.16	0.30	0.17	0.33	0.19	0.36	0.21	0.39	0.23	0.43	0.25	0.48	0.28	0.54	0.31	0.59	0.34	0.66	0.39	0.74	0.44	0.84	0.49	0.94	0.56	1.07	0.63	1.20	0.72	1.33	0.80	1.46
W 460x52,0	0.11	0.22	0.12	0.23	0.12	0.24	0.13	0.25	0.13	0.26	0.14	0.27	0.15	0.29	0.17	0.32	0.18	0.34	0.20	0.38	0.22	0.41	0.25	0.45	0.28	0.50	0.31	0.56	0.36	0.64	0.41	0.73
W 460x60,0	0.12	0.23	0.13	0.24	0.13	0.25	0.14	0.27	0.15	0.28	0.16	0.31	0.18	0.34	0.19	0.37	0.22	0.41	0.24	0.45	0.26	0.50	0.29	0.55	0.34	0.63	0.39	0.71	0.44	0.81	0.50	0.93
W 460x68,0	0.13	0.25	0.14	0.26	0.14	0.27	0.15	0.29	0.17	0.32	0.18	0.35	0.20	0.39	0.22	0.43	0.25	0.47	0.27	0.52	0.30	0.58	0.35	0.65	0.40	0.74	0.45	0.84	0.51	0.96	0.60	1.09
W 460x74,0	0.13	0.25	0.14	0.27	0.15	0.28	0.16	0.30	0.17	0.33	0.19	0.36	0.21	0.40	0.23	0.45	0.26	0.50	0.29	0.55	0.32	0.61	0.36	0.69	0.42	0.79	0.47	0.90	0.54	1.03	0.62	1.16
W 460x82,0	0.14	0.27	0.15	0.28	0.16	0.31	0.17	0.33	0.19	0.37	0.21	0.40	0.23	0.45	0.26	0.50	0.29	0.55	0.32	0.61	0.36	0.69	0.41	0.79	0.47	0.90	0.53	1.01	0.61	1.15	0.70	1.28
W 460x89,0	0.15	0.29	0.16	0.31	0.18	0.34	0.19	0.37	0.21	0.41	0.24	0.46	0.26	0.51	0.29	0.56	0.32	0.62	0.37	0.71	0.41	0.80	0.46	0.90	0.52	1.02	0.60	1.15	0.68	1.28	0.77	1.42
W 460x97,0	0.16	0.31	0.18	0.34	0.19	0.37	0.21	0.41	0.23	0.45	0.26	0.50	0.29	0.55	0.32	0.61	0.36	0.69	0.40	0.78	0.45	0.88	0.50	0.98	0.58	1.11	0.65	1.24	0.74	1.37	0.82	1.50
W 460x106,0	0.18	0.34	0.19	0.37	0.21	0.41	0.23	0.45	0.26	0.50	0.29	0.55	0.32	0.61	0.35	0.69	0.40	0.77	0.45	0.87	0.50	0.97	0.56	1.09	0.64	1.23	0.72	1.35	0.81	1.48	0.89	1.61
W 530x66,0	0.12	0.22	0.12	0.23	0.13	0.24	0.13	0.25	0.14	0.26	0.14	0.27	0.16	0.29	0.17	0.32	0.19	0.34	0.21	0.38	0.23	0.41	0.25	0.45	0.29	0.51	0.32	0.57	0.37	0.65	0.44	0.76
W 530x74,0	0.12	0.24	0.13	0.24	0.13	0.25	0.14	0.27	0.15	0.28	0.16	0.30	0.18	0.33	0.20	0.36	0.22	0.40	0.24	0.44	0.26	0.48	0.29	0.54	0.34	0.61	0.39	0.69	0.45	0.80	0.53	0.93
W 530x85,0	0.13	0.25	0.14	0.27	0.15	0.28	0.16	0.30	0.17	0.33	0.19	0.36	0.21	0.40	0.23	0.44	0.26	0.49	0.28	0.54	0.32	0.60	0.36	0.68	0.42	0.78	0.47	0.88	0.55	1.01	0.63	1.14
W 530x92,0	0.14	0.26	0.14	0.28	0.15	0.29	0.17	0.32	0.18	0.35	0.20	0.39	0.22	0.43	0.25	0.47	0.27	0.53	0.30	0.58	0.34	0.65	0.39	0.74	0.44	0.85	0.50	0.96	0.58	1.10	0.67	1.23
W 530x101,0	0.15	0.28	0.16	0.30	0.17	0.33	0.19	0.36	0.20	0.39	0.23	0.44	0.25	0.48	0.28	0.54	0.31	0.59	0.35	0.67	0.39	0.76	0.44	0.86	0.50	0.97	0.58	1.11	0.66	1.24	0.75	1.38
W 530x109,0	0.16	0.30	0.17	0.33	0.19	0.36	0.20	0.39	0.22	0.43	0.25	0.48	0.27	0.53	0.30	0.59	0.34	0.66	0.38	0.75	0.43	0.85	0.48	0.95	0.56	1.08	0.63	1.21	0.72	1.34	0.81	1.48
W 610x101,0	0.13	0.26	0.14	0.27	0.15	0.28	0.16	0.30	0.17	0.33	0.19	0.37	0.21	0.40	0.23	0.45	0.26	0.49	0.28	0.55	0.32	0.60	0.36	0.68	0.41	0.78	0.48	0.90	0.55	1.03	0.64	1.17
W 610x113,0	0.14	0.28	0.15	0.30	0.17	0.32	0.18	0.35	0.20	0.38	0.22	0.43	0.24	0.47	0.27	0.52	0.30	0.58	0.33	0.65	0.38	0.74	0.43	0.84	0.49	0.95	0.57	1.09	0.65	1.22	0.74	1.36
W 610x125,0	0.16	0.31	0.18	0.34	0.19	0.37	0.21	0.40	0.23	0.45	0.25	0.49	0.28	0.55	0.31	0.60	0.35	0.69	0.39	0.78	0.44	0.88	0.50	0.98	0.57	1.13	0.65	1.26	0.74	1.39	0.82	1.52
W 610x140,0	0.19	0.36	0.20	0.39	0.22	0.43	0.24	0.47	0.27	0.52	0.29	0.58	0.33	0.64	0.37	0.73	0.42	0.82	0.46	0.92	0.52	1.03	0.59	1.17	0.67	1.30	0.76	1.43	0.83	1.56	0.92	1.67
W 610x174,0	0.22	0.44	0.25	0.48	0.27	0.53	0.29	0.58	0.32	0.64	0.36	0.71	0.40	0.80	0.45	0.90	0.50	1.01	0.55	1.11	0.63	1.27	0.71	1.43	0.80	1.57	0.88	1.70	0.95	1.82	1.03	1.90

B = Caso biapoioado. S = Caso semicontínuo. Valores em destaque indicam fatores de carga superiores a 0,7.

Quadro 9.11 – Fatores de carga para vigas mistas com laje de 18 cm em função do TRRF.

Nome	TRRF (min) tc = 18cm																													
	30		29		28		27		26		25		24		23		22		21		20		19		18		17		16		15	
	B	S	B	S	B	S	B	S	B	S	B	S	B	S	B	S	B	S	B	S	B	S	B	S	B	S	B	S	B	S	B	S
W 150x18,0	0.11	0.20	0.11	0.21	0.12	0.22	0.12	0.23	0.13	0.24	0.13	0.25	0.14	0.27	0.15	0.29	0.17	0.31	0.18	0.33	0.20	0.36	0.22	0.40	0.25	0.44	0.28	0.49	0.32	0.55	0.37	0.62
W 150x24,0	0.12	0.22	0.12	0.23	0.13	0.25	0.14	0.26	0.15	0.27	0.16	0.30	0.17	0.32	0.19	0.36	0.22	0.39	0.24	0.44	0.27	0.48	0.31	0.54	0.35	0.61	0.41	0.69	0.47	0.79	0.53	0.90
W 150x37,1	0.14	0.27	0.15	0.29	0.16	0.30	0.18	0.33	0.20	0.37	0.22	0.41	0.25	0.45	0.28	0.50	0.32	0.55	0.36	0.62	0.40	0.69	0.46	0.77	0.52	0.88	0.58	1.00	0.66	1.13	0.73	1.26
W 200x22,5	0.11	0.21	0.11	0.21	0.12	0.22	0.12	0.23	0.13	0.24	0.13	0.25	0.14	0.26	0.15	0.28	0.17	0.31	0.18	0.33	0.20	0.36	0.22	0.40	0.25	0.44	0.28	0.48	0.32	0.54	0.37	0.61
W 200x31,3	0.12	0.23	0.13	0.24	0.13	0.25	0.14	0.26	0.15	0.28	0.16	0.30	0.17	0.33	0.20	0.37	0.22	0.41	0.25	0.45	0.28	0.50	0.31	0.56	0.35	0.63	0.41	0.71	0.47	0.81	0.53	0.92
W 200x41,7	0.14	0.26	0.15	0.28	0.16	0.29	0.17	0.32	0.19	0.36	0.21	0.40	0.24	0.44	0.26	0.49	0.30	0.54	0.33	0.60	0.37	0.67	0.43	0.75	0.49	0.86	0.55	0.97	0.61	1.09	0.69	1.23
W 200x59,0	0.18	0.34	0.20	0.37	0.22	0.41	0.25	0.45	0.27	0.50	0.31	0.56	0.34	0.62	0.38	0.68	0.42	0.76	0.48	0.84	0.53	0.95	0.59	1.06	0.66	1.19	0.73	1.32	0.80	1.45	0.88	1.58
W 200x71,0	0.24	0.45	0.27	0.49	0.30	0.54	0.33	0.60	0.37	0.66	0.41	0.73	0.45	0.80	0.50	0.89	0.55	0.99	0.60	1.10	0.66	1.22	0.72	1.34	0.80	1.47	0.87	1.59	0.93	1.70	1.00	1.80
W 200x86,0	0.32	0.57	0.35	0.63	0.38	0.69	0.42	0.76	0.46	0.83	0.51	0.92	0.56	1.02	0.61	1.12	0.67	1.23	0.73	1.35	0.79	1.46	0.86	1.58	0.93	1.70	0.99	1.81	1.05	1.88	1.10	1.93
W 250x22,3	0.11	0.20	0.11	0.20	0.11	0.21	0.12	0.22	0.12	0.22	0.13	0.23	0.13	0.24	0.14	0.26	0.15	0.28	0.17	0.30	0.18	0.32	0.19	0.34	0.22	0.38	0.24	0.41	0.27	0.45	0.30	0.50
W 250x25,3	0.11	0.21	0.11	0.21	0.12	0.22	0.12	0.23	0.13	0.24	0.13	0.25	0.14	0.26	0.15	0.28	0.16	0.30	0.18	0.32	0.20	0.35	0.22	0.38	0.24	0.42	0.27	0.47	0.30	0.52	0.35	0.58
W 250x28,4	0.11	0.21	0.11	0.22	0.12	0.23	0.13	0.24	0.13	0.25	0.14	0.26	0.15	0.28	0.16	0.30	0.18	0.33	0.20	0.36	0.22	0.40	0.24	0.44	0.27	0.48	0.31	0.54	0.35	0.61	0.41	0.70
W 250x38,5	0.12	0.23	0.13	0.24	0.14	0.26	0.14	0.27	0.15	0.29	0.16	0.31	0.18	0.35	0.21	0.39	0.23	0.43	0.26	0.48	0.29	0.53	0.32	0.59	0.37	0.67	0.43	0.76	0.48	0.86	0.55	0.98
W 250x44,8	0.13	0.25	0.14	0.26	0.15	0.28	0.16	0.30	0.17	0.33	0.19	0.37	0.22	0.41	0.24	0.45	0.27	0.50	0.30	0.55	0.34	0.61	0.38	0.69	0.44	0.79	0.49	0.89	0.56	1.01	0.63	1.14
W 250x89,0	0.25	0.47	0.28	0.52	0.31	0.57	0.34	0.63	0.38	0.69	0.41	0.76	0.45	0.84	0.50	0.93	0.56	1.04	0.61	1.15	0.67	1.27	0.74	1.40	0.81	1.53	0.89	1.66	0.95	1.77	1.02	1.87
W 250x101,0	0.31	0.57	0.34	0.63	0.37	0.69	0.41	0.75	0.44	0.82	0.49	0.91	0.54	1.01	0.59	1.12	0.65	1.23	0.70	1.34	0.77	1.47	0.84	1.59	0.91	1.72	0.97	1.83	1.04	1.91	1.10	1.98
W 250x115,0	0.37	0.69	0.40	0.75	0.43	0.81	0.48	0.89	0.53	0.99	0.58	1.09	0.63	1.20	0.68	1.31	0.74	1.43	0.80	1.54	0.87	1.66	0.93	1.77	1.00	1.89	1.06	1.96	1.12	2.02	1.13	2.03
W 310x23,8	0.11	0.19	0.11	0.20	0.11	0.20	0.12	0.21	0.12	0.21	0.12	0.22	0.13	0.23	0.14	0.25	0.15	0.26	0.16	0.28	0.18	0.30	0.19	0.33	0.21	0.35	0.23	0.39	0.25	0.42	0.28	0.46
W 310x28,3	0.11	0.20	0.11	0.21	0.12	0.22	0.12	0.23	0.13	0.23	0.13	0.24	0.14	0.26	0.15	0.28	0.16	0.30	0.18	0.32	0.19	0.35	0.21	0.38	0.24	0.42	0.26	0.46	0.30	0.51	0.34	0.58
W 310x32,7	0.11	0.21	0.12	0.22	0.12	0.23	0.13	0.24	0.13	0.25	0.14	0.26	0.15	0.28	0.16	0.30	0.18	0.33	0.20	0.36	0.22	0.39	0.24	0.43	0.27	0.48	0.30	0.53	0.35	0.61	0.40	0.69
W 310x44,5	0.12	0.23	0.13	0.24	0.13	0.26	0.14	0.27	0.15	0.29	0.16	0.31	0.18	0.34	0.20	0.39	0.23	0.43	0.25	0.48	0.28	0.53	0.31	0.58	0.36	0.66	0.41	0.75	0.47	0.85	0.53	0.97
W 310x52,0	0.13	0.25	0.14	0.27	0.15	0.28	0.16	0.30	0.17	0.33	0.19	0.37	0.21	0.41	0.24	0.46	0.27	0.50	0.30	0.56	0.33	0.62	0.38	0.69	0.43	0.80	0.49	0.90	0.55	1.02	0.63	1.15
W 360x32,9	0.11	0.21	0.11	0.22	0.12	0.22	0.12	0.23	0.13	0.24	0.13	0.25	0.14	0.26	0.15	0.28	0.16	0.31	0.18	0.33	0.19	0.36	0.21	0.39	0.24	0.43	0.26	0.47	0.30	0.52	0.34	0.59
W 360x39,0	0.11	0.22	0.12	0.23	0.12	0.24	0.13	0.25	0.13	0.26	0.14	0.27	0.15	0.29	0.17	0.32	0.19	0.35	0.21	0.38	0.23	0.42	0.25	0.46	0.28	0.52	0.32	0.57	0.37	0.65	0.42	0.75
W 360x51,0	0.12	0.23	0.13	0.24	0.13	0.26	0.14	0.27	0.15	0.29	0.16	0.31	0.18	0.34	0.20	0.38	0.22	0.43	0.25	0.47	0.28	0.52	0.31	0.58	0.35	0.65	0.40	0.74	0.46	0.84	0.52	0.96
W 360x57,8	0.13	0.25	0.14	0.26	0.14	0.27	0.15	0.29	0.17	0.32	0.18	0.35	0.20	0.39	0.23	0.43	0.25	0.48	0.28	0.53	0.31	0.59	0.35	0.65	0.41	0.75	0.46	0.85	0.52	0.96	0.60	1.10
W 360x64,0	0.14	0.27	0.15	0.28	0.16	0.30	0.17	0.33	0.19	0.36	0.21	0.40	0.23	0.45	0.26	0.50	0.29	0.56	0.33	0.62	0.36	0.69	0.41	0.78	0.47	0.89	0.53	1.00	0.60	1.13	0.67	1.27
W 360x72,0	0.15	0.29	0.16	0.31	0.18	0.34	0.20	0.38	0.22	0.42	0.24	0.46	0.27	0.52	0.30	0.57	0.33	0.63	0.37	0.70	0.42	0.79	0.47	0.89	0.53	1.01	0.59	1.13	0.67	1.27	0.75	1.40
W 360x79,0	0.17	0.32	0.18	0.35	0.20	0.39	0.23	0.43	0.25	0.48	0.28	0.53	0.31	0.59	0.34	0.65	0.38	0.72	0.43	0.81	0.48	0.91	0.53	1.02	0.60	1.15	0.67	1.28	0.75	1.40	0.83	1.54
W 360x91,0	0.19	0.36	0.21	0.40	0.23	0.44	0.25	0.48	0.28	0.54	0.31	0.60	0.34	0.66	0.38	0.73	0.42	0.81	0.47	0.91	0.53	1.02	0.59	1.14	0.65	1.28	0.73	1.41	0.81	1.54	0.89	1.67
W 360x101,0	0.22	0.42	0.24	0.46	0.27	0.51	0.29	0.57	0.32	0.63	0.36	0.69	0.39	0.76	0.44	0.85	0.49	0.95	0.54	1.06	0.60	1.17	0.66	1.30	0.74	1.43	0.82	1.56	0.89	1.69	0.96	1.80
W 360x110,0	0.25	0.48	0.27	0.53	0.30	0.58	0.33	0.64	0.36	0.71	0.40	0.77	0.44	0.86	0.49	0.96	0.55	1.07	0.60	1.18	0.66	1.30	0.73	1.42	0.81	1.56	0.88	1.68	0.94	1.80	1.02	1.88
W 360x122,0	0.28	0.55	0.31	0.60	0.34	0.66	0.37	0.72	0.41	0.79	0.45	0.88	0.50	0.98	0.55	1.08	0.61	1.19	0.66	1.31	0.73	1.43	0.81	1.56	0.88	1.69	0.95	1.80	1.02	1.89	1.09	1.96

B = Caso biapoioado. S = Caso semicontínuo. Valores em destaque indicam fatores de carga superiores a 0,7.

Quadro 9.12 – Fatores de carga para vigas mistas com laje de 18 cm em função do TRRF (continuação).

Nome	TRRF (min) tc = 18cm																													
	30		29		28		27		26		25		24		23		22		21		20		19		18		17		16		15	
	B	S	B	S	B	S	B	S	B	S	B	S	B	S	B	S	B	S	B	S	B	S	B	S	B	S	B	S	B	S	B	S
W 410x46,1	0.11	0.22	0.12	0.23	0.12	0.24	0.13	0.25	0.14	0.26	0.14	0.28	0.16	0.30	0.17	0.33	0.19	0.36	0.21	0.39	0.23	0.43	0.26	0.47	0.29	0.53	0.33	0.59	0.38	0.67	0.43	0.77
W 410x60,0	0.13	0.24	0.13	0.25	0.14	0.27	0.15	0.28	0.16	0.30	0.17	0.33	0.19	0.37	0.21	0.41	0.23	0.45	0.26	0.50	0.29	0.55	0.32	0.61	0.38	0.70	0.43	0.79	0.48	0.90	0.56	1.03
W 410x67,0	0.13	0.26	0.14	0.27	0.15	0.28	0.16	0.31	0.18	0.34	0.19	0.37	0.21	0.41	0.24	0.46	0.27	0.50	0.30	0.56	0.33	0.62	0.38	0.70	0.43	0.80	0.48	0.90	0.55	1.03	0.63	1.16
W 410x75,0	0.14	0.27	0.15	0.29	0.16	0.31	0.18	0.34	0.20	0.38	0.22	0.42	0.24	0.46	0.27	0.51	0.30	0.57	0.33	0.63	0.38	0.70	0.43	0.80	0.48	0.91	0.55	1.02	0.62	1.16	0.71	1.29
W 410x85,0	0.16	0.30	0.17	0.33	0.19	0.36	0.21	0.40	0.23	0.44	0.25	0.49	0.28	0.54	0.31	0.59	0.35	0.66	0.39	0.74	0.44	0.83	0.49	0.94	0.56	1.06	0.64	1.19	0.72	1.31	0.80	1.45
W 460x52,0	0.11	0.22	0.12	0.23	0.12	0.24	0.13	0.25	0.13	0.26	0.14	0.27	0.15	0.29	0.17	0.31	0.18	0.34	0.20	0.37	0.22	0.41	0.25	0.45	0.28	0.50	0.31	0.56	0.36	0.63	0.42	0.73
W 460x60,0	0.12	0.23	0.13	0.24	0.13	0.26	0.14	0.27	0.15	0.28	0.16	0.31	0.18	0.34	0.20	0.37	0.22	0.41	0.24	0.45	0.27	0.50	0.30	0.55	0.34	0.62	0.39	0.71	0.44	0.81	0.51	0.92
W 460x68,0	0.13	0.25	0.14	0.26	0.14	0.27	0.15	0.29	0.17	0.32	0.18	0.35	0.20	0.38	0.22	0.42	0.25	0.47	0.28	0.52	0.31	0.57	0.35	0.65	0.40	0.74	0.45	0.84	0.52	0.95	0.60	1.09
W 460x74,0	0.13	0.26	0.14	0.27	0.15	0.28	0.16	0.30	0.17	0.33	0.19	0.37	0.21	0.41	0.23	0.45	0.26	0.50	0.29	0.55	0.32	0.61	0.37	0.69	0.42	0.79	0.48	0.89	0.54	1.02	0.63	1.15
W 460x82,0	0.14	0.27	0.15	0.28	0.16	0.31	0.18	0.34	0.19	0.37	0.21	0.41	0.24	0.45	0.26	0.50	0.29	0.55	0.32	0.61	0.37	0.69	0.41	0.78	0.47	0.89	0.53	1.01	0.61	1.14	0.70	1.27
W 460x89,0	0.15	0.29	0.16	0.31	0.18	0.35	0.20	0.38	0.22	0.41	0.24	0.46	0.27	0.51	0.29	0.57	0.32	0.63	0.37	0.70	0.42	0.79	0.47	0.89	0.53	1.01	0.60	1.14	0.68	1.27	0.77	1.40
W 460x97,0	0.16	0.31	0.18	0.34	0.19	0.38	0.21	0.41	0.23	0.45	0.26	0.51	0.29	0.56	0.32	0.62	0.36	0.69	0.40	0.77	0.45	0.87	0.51	0.97	0.58	1.10	0.66	1.23	0.74	1.36	0.82	1.49
W 460x106,0	0.18	0.35	0.20	0.38	0.21	0.41	0.24	0.46	0.26	0.51	0.29	0.56	0.32	0.61	0.36	0.68	0.40	0.77	0.45	0.86	0.50	0.96	0.56	1.08	0.64	1.21	0.72	1.34	0.81	1.46	0.89	1.59
W 530x66,0	0.12	0.22	0.12	0.23	0.13	0.23	0.13	0.24	0.14	0.25	0.14	0.27	0.16	0.29	0.17	0.31	0.19	0.34	0.21	0.37	0.23	0.41	0.26	0.45	0.29	0.50	0.33	0.56	0.38	0.65	0.45	0.75
W 530x74,0	0.12	0.23	0.13	0.24	0.13	0.25	0.14	0.26	0.15	0.28	0.16	0.30	0.18	0.33	0.20	0.36	0.22	0.40	0.24	0.44	0.27	0.48	0.30	0.53	0.34	0.61	0.39	0.69	0.45	0.80	0.53	0.92
W 530x85,0	0.13	0.26	0.14	0.27	0.15	0.28	0.16	0.30	0.17	0.33	0.19	0.36	0.21	0.40	0.23	0.44	0.26	0.48	0.29	0.53	0.32	0.60	0.37	0.68	0.42	0.77	0.47	0.88	0.55	1.00	0.63	1.13
W 530x92,0	0.14	0.26	0.14	0.28	0.15	0.30	0.17	0.32	0.18	0.35	0.20	0.39	0.22	0.43	0.25	0.48	0.27	0.53	0.30	0.58	0.34	0.65	0.39	0.74	0.44	0.84	0.51	0.95	0.59	1.09	0.67	1.22
W 530x101,0	0.15	0.28	0.16	0.30	0.17	0.33	0.19	0.36	0.20	0.40	0.23	0.44	0.25	0.49	0.28	0.54	0.31	0.60	0.35	0.67	0.39	0.75	0.44	0.85	0.50	0.97	0.58	1.10	0.66	1.23	0.75	1.36
W 530x109,0	0.16	0.31	0.17	0.33	0.19	0.36	0.20	0.40	0.23	0.44	0.25	0.49	0.28	0.54	0.31	0.59	0.34	0.66	0.39	0.74	0.44	0.84	0.49	0.94	0.56	1.07	0.64	1.20	0.72	1.33	0.81	1.46
W 610x101,0	0.13	0.26	0.14	0.27	0.15	0.28	0.16	0.31	0.17	0.33	0.19	0.37	0.21	0.40	0.23	0.44	0.26	0.49	0.29	0.54	0.32	0.60	0.36	0.68	0.42	0.78	0.48	0.89	0.56	1.02	0.64	1.16
W 610x113,0	0.14	0.28	0.15	0.30	0.17	0.33	0.18	0.36	0.20	0.39	0.22	0.43	0.25	0.48	0.27	0.53	0.30	0.58	0.34	0.65	0.38	0.74	0.43	0.83	0.49	0.95	0.57	1.08	0.65	1.21	0.74	1.34
W 610x125,0	0.16	0.31	0.18	0.34	0.19	0.37	0.21	0.41	0.23	0.45	0.26	0.50	0.28	0.55	0.31	0.61	0.35	0.69	0.40	0.78	0.45	0.88	0.50	0.98	0.57	1.12	0.66	1.24	0.74	1.38	0.82	1.50
W 610x140,0	0.19	0.37	0.21	0.40	0.22	0.44	0.25	0.48	0.27	0.53	0.30	0.58	0.33	0.65	0.37	0.74	0.42	0.83	0.47	0.93	0.52	1.03	0.59	1.16	0.67	1.29	0.76	1.42	0.83	1.54	0.91	1.65
W 610x174,0	0.23	0.45	0.25	0.49	0.27	0.54	0.30	0.59	0.33	0.65	0.36	0.72	0.41	0.81	0.46	0.91	0.51	1.02	0.56	1.12	0.63	1.28	0.71	1.41	0.80	1.56	0.88	1.69	0.96	1.81	1.04	1.90

B = Caso biapoioado. S = Caso semicontínuo. Valores em destaque indicam fatores de carga superiores a 0,7.

Quadro 9.13 – Taxa de armadura para desenvolvimento do máximo momento fletor negativo de vigas mistas com perfil Gerdau e laje de 8 cm em função do TRRF.

	TRRF (min) tc = 8 cm															
Nome	30	29	28	27	26	25	24	23	22	21	20	19	18	17	16	15
W 150x18,0	0.09	0.10	0.10	0.10	0.11	0.12	0.12	0.14	0.15	0.16	0.18	0.20	0.23	0.26	0.30	0.35
W 150x24,0	0.14	0.14	0.15	0.16	0.17	0.19	0.21	0.23	0.27	0.30	0.34	0.39	0.45	0.52	0.60	0.68
W 150x37,1	0.26	0.28	0.30	0.33	0.38	0.43	0.49	0.55	0.63	0.71	0.80	0.91	1.02	1.14	1.27	1.39
W 200x22,5	0.12	0.12	0.12	0.13	0.14	0.15	0.16	0.17	0.18	0.20	0.23	0.26	0.29	0.33	0.38	0.44
W 200x31,3	0.18	0.19	0.20	0.22	0.23	0.25	0.28	0.32	0.36	0.41	0.46	0.53	0.61	0.70	0.80	0.89
W 200x41,7	0.28	0.31	0.33	0.36	0.41	0.46	0.52	0.59	0.67	0.76	0.86	0.97	1.10	1.22	1.35	1.48
W 200x59,0	0.55	0.62	0.70	0.78	0.87	0.99	1.11	1.24	1.38	1.53	1.68	1.85	2.03	2.19	2.36	2.54
W 200x71,0	0.92	1.02	1.15	1.28	1.43	1.58	1.73	1.90	2.08	2.26	2.44	2.60	2.80	3.00	3.18	3.36
W 200x86,0	1.46	1.61	1.78	1.95	2.12	2.31	2.52	2.73	2.94	3.13	3.34	3.57	3.81	4.02	4.25	4.47
W 250x22,3	0.11	0.12	0.12	0.12	0.13	0.14	0.14	0.16	0.17	0.18	0.20	0.21	0.24	0.27	0.31	0.35
W 250x25,3	0.13	0.14	0.14	0.15	0.15	0.16	0.17	0.19	0.21	0.22	0.25	0.28	0.32	0.36	0.41	0.48
W 250x28,4	0.15	0.16	0.17	0.17	0.18	0.20	0.21	0.23	0.25	0.29	0.33	0.37	0.42	0.48	0.55	0.64
W 250x38,5	0.23	0.25	0.26	0.28	0.30	0.33	0.37	0.42	0.48	0.54	0.62	0.70	0.81	0.92	1.02	1.14
W 250x44,8	0.30	0.32	0.34	0.36	0.41	0.46	0.52	0.59	0.66	0.76	0.85	0.97	1.10	1.22	1.35	1.50
W 250x89,0	1.21	1.35	1.51	1.67	1.85	2.04	2.22	2.43	2.65	2.89	3.08	3.29	3.55	3.80	4.01	4.26
W 250x101,0	1.68	1.86	2.04	2.24	2.43	2.65	2.88	3.13	3.38	3.56	3.80	4.06	4.34	4.57	4.83	5.10
W 250x115,0	2.28	2.49	2.69	2.91	3.16	3.42	3.69	3.92	4.15	4.41	4.70	4.98	5.25	5.53	5.82	5.97
W 310x23,8	0.12	0.12	0.13	0.13	0.14	0.14	0.15	0.16	0.17	0.19	0.20	0.22	0.24	0.27	0.31	0.34
W 310x28,3	0.15	0.15	0.16	0.16	0.17	0.18	0.19	0.21	0.23	0.25	0.28	0.31	0.36	0.40	0.46	0.53
W 310x32,7	0.17	0.18	0.19	0.20	0.21	0.23	0.25	0.27	0.30	0.34	0.38	0.43	0.49	0.55	0.64	0.73
W 310x44,5	0.27	0.28	0.30	0.32	0.34	0.38	0.43	0.49	0.55	0.62	0.71	0.80	0.92	1.05	1.17	1.30
W 310x52,0	0.35	0.37	0.40	0.43	0.49	0.55	0.62	0.70	0.79	0.89	1.01	1.14	1.28	1.42	1.57	1.74
W 360x32,9	0.17	0.17	0.18	0.19	0.20	0.21	0.22	0.24	0.26	0.29	0.32	0.36	0.41	0.46	0.53	0.61
W 360x39,0	0.21	0.22	0.23	0.25	0.26	0.28	0.30	0.33	0.38	0.42	0.48	0.54	0.62	0.70	0.81	0.91
W 360x51,0	0.30	0.32	0.34	0.36	0.39	0.42	0.48	0.55	0.62	0.69	0.79	0.90	1.03	1.16	1.30	1.46
W 360x57,8	0.36	0.39	0.41	0.44	0.50	0.56	0.63	0.71	0.80	0.91	1.02	1.16	1.31	1.46	1.62	1.81
W 360x64,0	0.45	0.48	0.52	0.58	0.66	0.74	0.83	0.94	1.06	1.19	1.34	1.50	1.68	1.85	2.03	2.21
W 360x72,0	0.55	0.61	0.69	0.77	0.86	0.96	1.09	1.22	1.37	1.53	1.70	1.87	2.08	2.26	2.45	2.66
W 360x79,0	0.71	0.80	0.89	0.99	1.11	1.25	1.40	1.55	1.73	1.91	2.10	2.30	2.51	2.70	2.93	3.16
W 360x91,0	0.93	1.04	1.16	1.29	1.45	1.62	1.80	1.99	2.19	2.41	2.63	2.87	3.08	3.32	3.58	3.83
W 360x101,0	1.23	1.36	1.53	1.70	1.89	2.09	2.28	2.51	2.74	2.99	3.23	3.43	3.71	3.99	4.25	4.52
W 360x110,0	1.53	1.71	1.89	2.08	2.30	2.50	2.74	2.99	3.25	3.51	3.72	3.97	4.29	4.58	4.84	5.15
W 360x122,0	1.93	2.13	2.34	2.57	2.78	3.04	3.31	3.59	3.87	4.09	4.38	4.69	5.04	5.33	5.67	6.02

Quadro 9.14 – Taxa de armadura para desenvolvimento do máximo momento fletor negativo de vigas mistas com perfil Gerdau e laje de 8 cm em função do TRRF (continuação).

Nome	TRRF (min) tc = 8 cm															
	30	29	28	27	26	25	24	23	22	21	20	19	18	17	16	15
W 410x46,1	0.25	0.27	0.28	0.30	0.32	0.34	0.37	0.41	0.46	0.52	0.59	0.66	0.76	0.87	0.99	1.11
W 410x60,0	0.37	0.39	0.42	0.45	0.49	0.55	0.62	0.70	0.78	0.89	1.01	1.13	1.30	1.45	1.61	1.81
W 410x67,0	0.45	0.48	0.52	0.57	0.64	0.72	0.81	0.91	1.03	1.16	1.30	1.47	1.64	1.82	2.03	2.23
W 410x75,0	0.55	0.59	0.66	0.74	0.82	0.92	1.03	1.16	1.30	1.45	1.63	1.81	2.01	2.23	2.44	2.67
W 410x85,0	0.72	0.80	0.89	0.99	1.09	1.24	1.39	1.55	1.72	1.91	2.10	2.31	2.56	2.79	3.04	3.31
W 460x52,0	0.28	0.29	0.31	0.33	0.35	0.37	0.40	0.44	0.50	0.56	0.63	0.71	0.82	0.93	1.06	1.21
W 460x60,0	0.35	0.37	0.40	0.42	0.45	0.50	0.57	0.64	0.72	0.80	0.91	1.03	1.18	1.32	1.47	1.66
W 460x68,0	0.44	0.47	0.50	0.55	0.61	0.69	0.77	0.86	0.97	1.10	1.23	1.39	1.56	1.73	1.93	2.14
W 460x74,0	0.50	0.53	0.56	0.63	0.70	0.79	0.89	0.99	1.12	1.26	1.42	1.60	1.78	1.97	2.21	2.43
W 460x82,0	0.59	0.63	0.71	0.79	0.88	0.98	1.11	1.25	1.40	1.56	1.75	1.94	2.16	2.39	2.63	2.89
W 460x89,0	0.72	0.80	0.89	0.99	1.10	1.23	1.39	1.55	1.72	1.92	2.12	2.33	2.58	2.82	3.08	3.37
W 460x97,0	0.86	0.96	1.06	1.17	1.31	1.47	1.64	1.82	2.03	2.23	2.45	2.69	2.96	3.23	3.52	3.82
W 460x106,0	1.05	1.17	1.29	1.43	1.60	1.79	1.98	2.19	2.41	2.65	2.90	3.17	3.47	3.78	4.11	4.45
W 530x66,0	0.36	0.38	0.40	0.42	0.44	0.47	0.52	0.58	0.65	0.73	0.82	0.93	1.06	1.20	1.38	1.60
W 530x74,0	0.44	0.47	0.50	0.53	0.56	0.63	0.71	0.79	0.89	1.00	1.13	1.27	1.46	1.63	1.86	2.13
W 530x85,0	0.56	0.60	0.64	0.72	0.80	0.89	1.00	1.12	1.26	1.41	1.59	1.77	1.98	2.20	2.48	2.74
W 530x92,0	0.64	0.69	0.76	0.85	0.94	1.05	1.18	1.33	1.49	1.67	1.87	2.08	2.32	2.59	2.87	3.16
W 530x101,0	0.78	0.87	0.97	1.07	1.19	1.33	1.50	1.68	1.87	2.09	2.30	2.54	2.82	3.10	3.40	3.73
W 530x109,0	0.94	1.04	1.16	1.28	1.43	1.60	1.79	1.99	2.21	2.43	2.68	2.94	3.25	3.55	3.88	4.23
W 610x101,0	0.68	0.72	0.78	0.87	0.96	1.08	1.21	1.36	1.53	1.72	1.93	2.15	2.41	2.71	3.05	3.37
W 610x113,0	0.87	0.96	1.06	1.18	1.30	1.46	1.65	1.84	2.05	2.29	2.52	2.78	3.10	3.43	3.77	4.14
W 610x125,0	1.14	1.26	1.40	1.54	1.72	1.93	2.14	2.37	2.62	2.88	3.16	3.46	3.79	4.14	4.53	4.91
W 610x140,0	1.53	1.68	1.86	2.06	2.29	2.53	2.78	3.06	3.34	3.65	3.96	4.27	4.69	5.10	5.50	5.97
W 610x174,0	2.36	2.61	2.88	3.18	3.49	3.78	4.14	4.51	4.90	5.24	5.67	6.13	6.67	7.15	7.70	8.28

Quadro 9.15 – Taxa de armadura para desenvolvimento do máximo momento fletor negativo de vigas mistas com perfil Gerdau e laje de 10 cm em função do TRRF.

	TRRF (min) tc = 10 cm															
Nome	30	29	28	27	26	25	24	23	22	21	20	19	18	17	16	15
W 150x18,0	0.07	0.08	0.08	0.08	0.09	0.09	0.10	0.11	0.12	0.13	0.14	0.16	0.19	0.21	0.24	0.28
W 150x24,0	0.11	0.12	0.12	0.13	0.14	0.15	0.17	0.19	0.21	0.24	0.28	0.31	0.36	0.42	0.48	0.54
W 150x37,1	0.21	0.22	0.24	0.27	0.30	0.35	0.39	0.44	0.50	0.57	0.64	0.73	0.82	0.91	1.02	1.11
W 200x22,5	0.09	0.10	0.10	0.10	0.11	0.12	0.12	0.14	0.15	0.16	0.18	0.20	0.23	0.26	0.30	0.35
W 200x31,3	0.14	0.15	0.16	0.17	0.19	0.20	0.22	0.26	0.29	0.33	0.37	0.43	0.49	0.56	0.64	0.71
W 200x41,7	0.23	0.24	0.26	0.29	0.33	0.37	0.42	0.47	0.54	0.61	0.69	0.78	0.88	0.97	1.08	1.18
W 200x59,0	0.44	0.50	0.56	0.63	0.70	0.79	0.89	0.99	1.10	1.22	1.35	1.48	1.63	1.75	1.89	2.04
W 200x71,0	0.74	0.82	0.92	1.03	1.14	1.26	1.38	1.52	1.66	1.81	1.95	2.08	2.24	2.40	2.54	2.69
W 200x86,0	1.17	1.29	1.42	1.56	1.70	1.85	2.01	2.18	2.35	2.50	2.67	2.85	3.04	3.21	3.40	3.58
W 250x22,3	0.09	0.09	0.10	0.10	0.10	0.11	0.12	0.12	0.13	0.15	0.16	0.17	0.19	0.22	0.25	0.28
W 250x25,3	0.10	0.11	0.11	0.12	0.12	0.13	0.14	0.15	0.16	0.18	0.20	0.22	0.26	0.29	0.33	0.38
W 250x28,4	0.12	0.13	0.13	0.14	0.15	0.16	0.17	0.19	0.20	0.23	0.26	0.29	0.34	0.38	0.44	0.51
W 250x38,5	0.18	0.20	0.21	0.22	0.24	0.26	0.30	0.34	0.38	0.43	0.49	0.56	0.65	0.73	0.82	0.92
W 250x44,8	0.24	0.25	0.27	0.29	0.33	0.37	0.42	0.47	0.53	0.60	0.68	0.77	0.88	0.97	1.08	1.20
W 250x89,0	0.97	1.08	1.21	1.34	1.48	1.63	1.78	1.95	2.12	2.31	2.46	2.63	2.84	3.04	3.21	3.41
W 250x101,0	1.34	1.49	1.63	1.79	1.94	2.12	2.31	2.50	2.70	2.85	3.04	3.24	3.47	3.66	3.86	4.08
W 250x115,0	1.82	1.99	2.15	2.33	2.53	2.74	2.96	3.13	3.32	3.53	3.76	3.98	4.20	4.42	4.66	4.77
W 310x23,8	0.10	0.10	0.10	0.11	0.11	0.11	0.12	0.13	0.14	0.15	0.16	0.18	0.20	0.22	0.24	0.27
W 310x28,3	0.12	0.12	0.13	0.13	0.14	0.15	0.16	0.17	0.18	0.20	0.22	0.25	0.28	0.32	0.36	0.42
W 310x32,7	0.14	0.15	0.15	0.16	0.17	0.18	0.20	0.21	0.24	0.27	0.30	0.34	0.39	0.44	0.51	0.58
W 310x44,5	0.21	0.23	0.24	0.26	0.28	0.30	0.34	0.39	0.44	0.50	0.56	0.64	0.74	0.84	0.93	1.04
W 310x52,0	0.28	0.30	0.32	0.34	0.39	0.44	0.50	0.56	0.63	0.71	0.80	0.91	1.03	1.14	1.26	1.39
W 360x32,9	0.13	0.14	0.14	0.15	0.16	0.17	0.18	0.19	0.21	0.23	0.26	0.29	0.33	0.37	0.42	0.49
W 360x39,0	0.17	0.18	0.19	0.20	0.21	0.22	0.24	0.26	0.30	0.34	0.38	0.43	0.49	0.56	0.65	0.73
W 360x51,0	0.24	0.26	0.27	0.29	0.31	0.34	0.39	0.44	0.49	0.56	0.63	0.72	0.82	0.93	1.04	1.17
W 360x57,8	0.29	0.31	0.33	0.35	0.40	0.45	0.51	0.57	0.64	0.73	0.82	0.93	1.05	1.17	1.29	1.45
W 360x64,0	0.36	0.38	0.41	0.47	0.53	0.59	0.66	0.75	0.85	0.96	1.07	1.20	1.34	1.48	1.62	1.77
W 360x72,0	0.44	0.49	0.55	0.62	0.69	0.77	0.87	0.98	1.10	1.22	1.36	1.50	1.66	1.81	1.96	2.13
W 360x79,0	0.57	0.64	0.71	0.79	0.88	1.00	1.12	1.24	1.38	1.53	1.68	1.84	2.01	2.16	2.34	2.53
W 360x91,0	0.74	0.83	0.93	1.03	1.16	1.30	1.44	1.59	1.75	1.92	2.11	2.30	2.46	2.66	2.86	3.06
W 360x101,0	0.99	1.09	1.22	1.36	1.51	1.67	1.83	2.01	2.19	2.39	2.59	2.75	2.97	3.19	3.40	3.61
W 360x110,0	1.22	1.36	1.51	1.67	1.84	2.00	2.19	2.39	2.60	2.81	2.97	3.18	3.43	3.66	3.87	4.12
W 360x122,0	1.55	1.71	1.87	2.05	2.23	2.43	2.65	2.87	3.09	3.27	3.51	3.76	4.03	4.26	4.53	4.81

Quadro 9.16 – Taxa de armadura para desenvolvimento do máximo momento fletor negativo de vigas mistas com perfil Gerdau e laje de 10 cm em função do TRRF (continuação).

Nome	TRRF (min) tc = 10 cm															
	30	29	28	27	26	25	24	23	22	21	20	19	18	17	16	15
W 410x46,1	0.20	0.21	0.22	0.24	0.25	0.27	0.29	0.33	0.37	0.42	0.47	0.53	0.61	0.69	0.79	0.88
W 410x60,0	0.30	0.31	0.34	0.36	0.39	0.44	0.50	0.56	0.63	0.71	0.81	0.91	1.04	1.16	1.28	1.45
W 410x67,0	0.36	0.39	0.41	0.46	0.51	0.58	0.65	0.73	0.82	0.93	1.04	1.17	1.31	1.45	1.63	1.78
W 410x75,0	0.44	0.47	0.52	0.59	0.66	0.73	0.82	0.93	1.04	1.16	1.31	1.44	1.61	1.78	1.95	2.14
W 410x85,0	0.57	0.64	0.71	0.79	0.88	0.99	1.11	1.24	1.38	1.53	1.68	1.85	2.05	2.23	2.43	2.65
W 460x52,0	0.22	0.24	0.25	0.26	0.28	0.30	0.32	0.35	0.40	0.45	0.51	0.57	0.65	0.74	0.85	0.96
W 460x60,0	0.28	0.30	0.32	0.34	0.36	0.40	0.45	0.51	0.57	0.64	0.73	0.82	0.94	1.06	1.17	1.32
W 460x68,0	0.36	0.38	0.40	0.44	0.49	0.55	0.62	0.69	0.78	0.88	0.98	1.11	1.25	1.38	1.55	1.72
W 460x74,0	0.40	0.42	0.45	0.50	0.56	0.63	0.71	0.79	0.90	1.01	1.13	1.28	1.43	1.58	1.77	1.94
W 460x82,0	0.47	0.51	0.57	0.63	0.71	0.79	0.88	1.00	1.12	1.25	1.40	1.55	1.73	1.92	2.10	2.31
W 460x89,0	0.58	0.64	0.71	0.79	0.88	0.99	1.11	1.24	1.38	1.54	1.70	1.87	2.06	2.26	2.46	2.69
W 460x97,0	0.69	0.76	0.85	0.94	1.05	1.18	1.31	1.46	1.62	1.79	1.96	2.15	2.37	2.58	2.82	3.06
W 460x106,0	0.84	0.93	1.03	1.14	1.28	1.43	1.58	1.75	1.93	2.12	2.32	2.53	2.78	3.03	3.29	3.56
W 530x66,0	0.29	0.30	0.32	0.34	0.35	0.38	0.41	0.46	0.52	0.59	0.66	0.74	0.85	0.96	1.10	1.28
W 530x74,0	0.35	0.37	0.40	0.42	0.45	0.50	0.57	0.64	0.71	0.80	0.90	1.02	1.17	1.30	1.49	1.70
W 530x85,0	0.45	0.48	0.52	0.58	0.64	0.71	0.80	0.90	1.01	1.13	1.27	1.42	1.58	1.76	1.98	2.19
W 530x92,0	0.52	0.55	0.60	0.68	0.75	0.84	0.94	1.06	1.20	1.34	1.50	1.66	1.85	2.07	2.29	2.53
W 530x101,0	0.63	0.69	0.77	0.86	0.95	1.07	1.20	1.34	1.50	1.67	1.84	2.03	2.25	2.48	2.72	2.99
W 530x109,0	0.75	0.84	0.93	1.02	1.14	1.28	1.43	1.59	1.77	1.95	2.14	2.35	2.60	2.84	3.11	3.38
W 610x101,0	0.54	0.58	0.62	0.69	0.77	0.87	0.97	1.09	1.23	1.38	1.54	1.72	1.93	2.17	2.44	2.70
W 610x113,0	0.69	0.77	0.85	0.94	1.04	1.17	1.32	1.47	1.64	1.83	2.02	2.23	2.48	2.74	3.01	3.31
W 610x125,0	0.91	1.01	1.12	1.23	1.38	1.54	1.71	1.89	2.10	2.30	2.53	2.76	3.03	3.31	3.62	3.93
W 610x140,0	1.22	1.34	1.49	1.65	1.83	2.02	2.23	2.44	2.68	2.92	3.17	3.42	3.75	4.08	4.40	4.77
W 610x174,0	1.89	2.09	2.30	2.54	2.79	3.03	3.31	3.61	3.92	4.19	4.53	4.90	5.33	5.72	6.16	6.62

Quadro 9.17 – Taxa de armadura para desenvolvimento do máximo momento fletor negativo de vigas mistas com perfil Gerdau e laje de 12 cm em função do TRRF.

Nome	TRRF (min) tc = 12 cm															
	30	29	28	27	26	25	24	23	22	21	20	19	18	17	16	15
W 150x18,0	0.06	0.06	0.07	0.07	0.07	0.08	0.08	0.09	0.10	0.11	0.12	0.14	0.16	0.18	0.20	0.23
W 150x24,0	0.09	0.10	0.10	0.11	0.12	0.13	0.14	0.16	0.18	0.20	0.23	0.26	0.30	0.35	0.40	0.45
W 150x37,1	0.17	0.19	0.20	0.22	0.25	0.29	0.33	0.37	0.42	0.48	0.53	0.61	0.68	0.76	0.85	0.93
W 200x22,5	0.08	0.08	0.08	0.09	0.09	0.10	0.10	0.11	0.12	0.13	0.15	0.17	0.19	0.22	0.25	0.29
W 200x31,3	0.12	0.13	0.14	0.15	0.16	0.17	0.19	0.21	0.24	0.27	0.31	0.35	0.41	0.47	0.53	0.60
W 200x41,7	0.19	0.20	0.22	0.24	0.27	0.31	0.35	0.39	0.45	0.51	0.57	0.65	0.73	0.81	0.90	0.99
W 200x59,0	0.37	0.41	0.47	0.52	0.58	0.66	0.74	0.83	0.92	1.02	1.12	1.23	1.35	1.46	1.57	1.70
W 200x71,0	0.62	0.68	0.77	0.86	0.95	1.05	1.15	1.27	1.38	1.51	1.63	1.73	1.87	2.00	2.12	2.24
W 200x86,0	0.97	1.07	1.18	1.30	1.41	1.54	1.68	1.82	1.96	2.09	2.23	2.38	2.54	2.68	2.83	2.98
W 250x22,3	0.08	0.08	0.08	0.08	0.09	0.09	0.10	0.10	0.11	0.12	0.13	0.14	0.16	0.18	0.21	0.23
W 250x25,3	0.09	0.09	0.09	0.10	0.10	0.11	0.12	0.13	0.14	0.15	0.17	0.19	0.21	0.24	0.27	0.32
W 250x28,4	0.10	0.10	0.11	0.12	0.12	0.13	0.14	0.15	0.17	0.19	0.22	0.25	0.28	0.32	0.37	0.42
W 250x38,5	0.15	0.16	0.17	0.19	0.20	0.22	0.25	0.28	0.32	0.36	0.41	0.47	0.54	0.61	0.68	0.76
W 250x44,8	0.20	0.21	0.22	0.24	0.27	0.31	0.35	0.39	0.44	0.50	0.57	0.65	0.73	0.81	0.90	1.00
W 250x89,0	0.81	0.90	1.00	1.12	1.24	1.36	1.48	1.62	1.77	1.92	2.05	2.19	2.36	2.53	2.67	2.84
W 250x101,0	1.12	1.24	1.36	1.49	1.62	1.77	1.92	2.09	2.25	2.37	2.53	2.70	2.90	3.05	3.22	3.40
W 250x115,0	1.52	1.66	1.79	1.94	2.11	2.28	2.46	2.61	2.76	2.94	3.13	3.32	3.50	3.69	3.88	3.98
W 310x23,8	0.08	0.08	0.09	0.09	0.09	0.10	0.10	0.11	0.12	0.13	0.14	0.15	0.16	0.18	0.20	0.23
W 310x28,3	0.10	0.10	0.10	0.11	0.12	0.12	0.13	0.14	0.15	0.17	0.19	0.21	0.24	0.27	0.30	0.35
W 310x32,7	0.12	0.12	0.13	0.13	0.14	0.15	0.16	0.18	0.20	0.22	0.25	0.28	0.32	0.37	0.43	0.49
W 310x44,5	0.18	0.19	0.20	0.21	0.23	0.25	0.29	0.32	0.37	0.41	0.47	0.53	0.61	0.70	0.78	0.87
W 310x52,0	0.23	0.25	0.26	0.29	0.32	0.37	0.41	0.46	0.52	0.60	0.67	0.76	0.86	0.95	1.05	1.16
W 360x32,9	0.11	0.12	0.12	0.13	0.13	0.14	0.15	0.16	0.18	0.19	0.22	0.24	0.28	0.31	0.35	0.41
W 360x39,0	0.14	0.15	0.16	0.16	0.17	0.19	0.20	0.22	0.25	0.28	0.32	0.36	0.41	0.47	0.54	0.61
W 360x51,0	0.20	0.21	0.23	0.24	0.26	0.28	0.32	0.37	0.41	0.46	0.53	0.60	0.69	0.78	0.86	0.97
W 360x57,8	0.24	0.26	0.28	0.29	0.33	0.37	0.42	0.47	0.53	0.61	0.68	0.77	0.88	0.97	1.08	1.20
W 360x64,0	0.30	0.32	0.34	0.39	0.44	0.49	0.55	0.62	0.71	0.80	0.89	1.00	1.12	1.23	1.35	1.47
W 360x72,0	0.37	0.41	0.46	0.51	0.57	0.64	0.72	0.82	0.91	1.02	1.13	1.25	1.39	1.51	1.64	1.78
W 360x79,0	0.48	0.53	0.59	0.66	0.74	0.83	0.93	1.04	1.15	1.27	1.40	1.53	1.67	1.80	1.95	2.11
W 360x91,0	0.62	0.69	0.77	0.86	0.96	1.08	1.20	1.33	1.46	1.60	1.76	1.92	2.05	2.21	2.39	2.55
W 360x101,0	0.82	0.91	1.02	1.13	1.26	1.39	1.52	1.67	1.83	1.99	2.16	2.29	2.47	2.66	2.84	3.01
W 360x110,0	1.02	1.14	1.26	1.39	1.53	1.67	1.82	1.99	2.16	2.34	2.48	2.65	2.86	3.05	3.23	3.43
W 360x122,0	1.29	1.42	1.56	1.71	1.86	2.03	2.21	2.39	2.58	2.73	2.92	3.13	3.36	3.55	3.78	4.01

Quadro 9.18 – Taxa de armadura para desenvolvimento do máximo momento fletor negativo de vigas mistas com perfil Gerdau e laje de 12 cm em função do TRRF (continuação).

Nome	TRRF (min) tc = 12 cm															
	30	29	28	27	26	25	24	23	22	21	20	19	18	17	16	15
W 410x46,1	0.17	0.18	0.19	0.20	0.21	0.23	0.24	0.27	0.31	0.35	0.39	0.44	0.51	0.58	0.66	0.74
W 410x60,0	0.25	0.26	0.28	0.30	0.32	0.37	0.41	0.47	0.52	0.59	0.67	0.75	0.87	0.96	1.07	1.21
W 410x67,0	0.30	0.32	0.34	0.38	0.43	0.48	0.54	0.61	0.69	0.77	0.87	0.98	1.09	1.21	1.36	1.49
W 410x75,0	0.36	0.39	0.44	0.49	0.55	0.61	0.69	0.77	0.87	0.97	1.09	1.20	1.34	1.48	1.63	1.78
W 410x85,0	0.48	0.53	0.59	0.66	0.73	0.82	0.92	1.03	1.15	1.27	1.40	1.54	1.71	1.86	2.03	2.21
W 460x52,0	0.19	0.20	0.21	0.22	0.23	0.25	0.27	0.30	0.33	0.38	0.42	0.47	0.54	0.62	0.71	0.80
W 460x60,0	0.24	0.25	0.27	0.28	0.30	0.33	0.38	0.43	0.48	0.54	0.61	0.68	0.79	0.88	0.98	1.10
W 460x68,0	0.30	0.31	0.33	0.37	0.41	0.46	0.51	0.57	0.65	0.73	0.82	0.93	1.04	1.15	1.29	1.43
W 460x74,0	0.33	0.35	0.38	0.42	0.47	0.53	0.59	0.66	0.75	0.84	0.94	1.06	1.19	1.32	1.47	1.62
W 460x82,0	0.39	0.42	0.47	0.53	0.59	0.66	0.74	0.83	0.93	1.04	1.17	1.29	1.44	1.60	1.75	1.92
W 460x89,0	0.48	0.53	0.60	0.66	0.73	0.82	0.93	1.03	1.15	1.28	1.41	1.55	1.72	1.88	2.05	2.24
W 460x97,0	0.57	0.64	0.71	0.78	0.87	0.98	1.09	1.21	1.35	1.49	1.64	1.79	1.97	2.15	2.35	2.55
W 460x106,0	0.70	0.78	0.86	0.95	1.07	1.19	1.32	1.46	1.61	1.76	1.93	2.11	2.32	2.52	2.74	2.97
W 530x66,0	0.24	0.25	0.26	0.28	0.30	0.32	0.34	0.39	0.44	0.49	0.55	0.62	0.71	0.80	0.92	1.06
W 530x74,0	0.29	0.31	0.33	0.35	0.37	0.42	0.47	0.53	0.59	0.67	0.75	0.85	0.97	1.09	1.24	1.42
W 530x85,0	0.38	0.40	0.43	0.48	0.53	0.59	0.66	0.75	0.84	0.94	1.06	1.18	1.32	1.47	1.65	1.83
W 530x92,0	0.43	0.46	0.50	0.56	0.63	0.70	0.78	0.89	1.00	1.11	1.25	1.38	1.54	1.72	1.91	2.10
W 530x101,0	0.52	0.58	0.65	0.72	0.79	0.89	1.00	1.12	1.25	1.39	1.54	1.69	1.88	2.07	2.27	2.49
W 530x109,0	0.63	0.70	0.77	0.85	0.95	1.07	1.19	1.32	1.47	1.62	1.79	1.96	2.16	2.37	2.59	2.82
W 610x101,0	0.45	0.48	0.52	0.58	0.64	0.72	0.81	0.91	1.02	1.15	1.29	1.44	1.61	1.81	2.03	2.25
W 610x113,0	0.58	0.64	0.71	0.79	0.87	0.98	1.10	1.23	1.37	1.52	1.68	1.85	2.07	2.28	2.51	2.76
W 610x125,0	0.76	0.84	0.93	1.03	1.15	1.28	1.43	1.58	1.75	1.92	2.11	2.30	2.53	2.76	3.02	3.27
W 610x140,0	1.02	1.12	1.24	1.38	1.53	1.69	1.86	2.04	2.23	2.43	2.64	2.85	3.13	3.40	3.67	3.98
W 610x174,0	1.57	1.74	1.92	2.12	2.32	2.52	2.76	3.01	3.27	3.49	3.78	4.09	4.44	4.77	5.13	5.52

Quadro 9.19 – Taxa de armadura para desenvolvimento do máximo momento fletor negativo de vigas mistas com perfil Gerdau e laje de 14 cm em função do TRRF.

Nome	TRRF (min) tc = 14 cm															
	30	29	28	27	26	25	24	23	22	21	20	19	18	17	16	15
W 150x18,0	0.05	0.05	0.06	0.06	0.06	0.07	0.07	0.08	0.08	0.09	0.10	0.12	0.13	0.15	0.17	0.20
W 150x24,0	0.08	0.08	0.09	0.09	0.10	0.11	0.12	0.13	0.15	0.17	0.20	0.22	0.26	0.30	0.34	0.39
W 150x37,1	0.15	0.16	0.17	0.19	0.22	0.25	0.28	0.31	0.36	0.41	0.46	0.52	0.58	0.65	0.73	0.79
W 200x22,5	0.07	0.07	0.07	0.07	0.08	0.08	0.09	0.10	0.11	0.11	0.13	0.15	0.17	0.19	0.22	0.25
W 200x31,3	0.10	0.11	0.12	0.12	0.13	0.14	0.16	0.18	0.21	0.24	0.27	0.30	0.35	0.40	0.46	0.51
W 200x41,7	0.16	0.17	0.19	0.20	0.23	0.26	0.30	0.34	0.38	0.43	0.49	0.56	0.63	0.69	0.77	0.85
W 200x59,0	0.32	0.35	0.40	0.45	0.50	0.57	0.64	0.71	0.79	0.87	0.96	1.06	1.16	1.25	1.35	1.45
W 200x71,0	0.53	0.59	0.66	0.73	0.82	0.90	0.99	1.08	1.19	1.29	1.40	1.49	1.60	1.71	1.82	1.92
W 200x86,0	0.83	0.92	1.01	1.11	1.21	1.32	1.44	1.56	1.68	1.79	1.91	2.04	2.17	2.30	2.43	2.55
W 250x22,3	0.06	0.07	0.07	0.07	0.07	0.08	0.08	0.09	0.10	0.10	0.11	0.12	0.14	0.16	0.18	0.20
W 250x25,3	0.07	0.08	0.08	0.08	0.09	0.09	0.10	0.11	0.12	0.13	0.14	0.16	0.18	0.21	0.23	0.27
W 250x28,4	0.09	0.09	0.09	0.10	0.11	0.11	0.12	0.13	0.15	0.16	0.19	0.21	0.24	0.27	0.32	0.36
W 250x38,5	0.13	0.14	0.15	0.16	0.17	0.19	0.21	0.24	0.27	0.31	0.35	0.40	0.46	0.52	0.59	0.65
W 250x44,8	0.17	0.18	0.19	0.21	0.23	0.26	0.30	0.34	0.38	0.43	0.49	0.55	0.63	0.70	0.77	0.86
W 250x89,0	0.69	0.77	0.86	0.96	1.06	1.16	1.27	1.39	1.52	1.65	1.76	1.88	2.03	2.17	2.29	2.43
W 250x101,0	0.96	1.06	1.17	1.28	1.39	1.51	1.65	1.79	1.93	2.04	2.17	2.32	2.48	2.61	2.76	2.92
W 250x115,0	1.30	1.42	1.54	1.66	1.81	1.96	2.11	2.24	2.37	2.52	2.68	2.84	3.00	3.16	3.33	3.41
W 310x23,8	0.07	0.07	0.07	0.08	0.08	0.08	0.09	0.09	0.10	0.11	0.12	0.13	0.14	0.16	0.17	0.20
W 310x28,3	0.08	0.09	0.09	0.09	0.10	0.10	0.11	0.12	0.13	0.14	0.16	0.18	0.20	0.23	0.26	0.30
W 310x32,7	0.10	0.10	0.11	0.12	0.12	0.13	0.14	0.15	0.17	0.19	0.22	0.24	0.28	0.32	0.37	0.42
W 310x44,5	0.15	0.16	0.17	0.18	0.20	0.21	0.24	0.28	0.31	0.35	0.40	0.46	0.53	0.60	0.67	0.74
W 310x52,0	0.20	0.21	0.23	0.24	0.28	0.31	0.35	0.40	0.45	0.51	0.57	0.65	0.73	0.81	0.90	0.99
W 360x32,9	0.10	0.10	0.10	0.11	0.11	0.12	0.13	0.14	0.15	0.16	0.18	0.21	0.24	0.27	0.30	0.35
W 360x39,0	0.12	0.13	0.13	0.14	0.15	0.16	0.17	0.19	0.21	0.24	0.27	0.31	0.35	0.40	0.46	0.52
W 360x51,0	0.17	0.18	0.19	0.21	0.22	0.24	0.28	0.31	0.35	0.40	0.45	0.51	0.59	0.67	0.74	0.83
W 360x57,8	0.21	0.22	0.24	0.25	0.28	0.32	0.36	0.41	0.46	0.52	0.59	0.66	0.75	0.83	0.92	1.03
W 360x64,0	0.26	0.27	0.29	0.33	0.38	0.42	0.47	0.54	0.61	0.68	0.77	0.86	0.96	1.06	1.16	1.26
W 360x72,0	0.31	0.35	0.39	0.44	0.49	0.55	0.62	0.70	0.78	0.87	0.97	1.07	1.19	1.29	1.40	1.52
W 360x79,0	0.41	0.46	0.51	0.57	0.63	0.71	0.80	0.89	0.99	1.09	1.20	1.31	1.43	1.54	1.67	1.81
W 360x91,0	0.53	0.59	0.66	0.74	0.83	0.93	1.03	1.14	1.25	1.37	1.50	1.64	1.76	1.90	2.05	2.19
W 360x101,0	0.71	0.78	0.87	0.97	1.08	1.19	1.31	1.43	1.57	1.71	1.85	1.96	2.12	2.28	2.43	2.58
W 360x110,0	0.87	0.97	1.08	1.19	1.31	1.43	1.56	1.71	1.86	2.01	2.12	2.27	2.45	2.61	2.77	2.94
W 360x122,0	1.10	1.22	1.34	1.47	1.59	1.74	1.89	2.05	2.21	2.34	2.50	2.68	2.88	3.04	3.24	3.44

Quadro 9.20 – Taxa de armadura para desenvolvimento do máximo momento fletor negativo de vigas mistas com perfil Gerdau e laje de 14 cm em função do TRRF (continuação).

Nome	TRRF (min) tc = 14 cm															
	30	29	28	27	26	25	24	23	22	21	20	19	18	17	16	15
W 410x46,1	0.14	0.15	0.16	0.17	0.18	0.19	0.21	0.23	0.27	0.30	0.34	0.38	0.43	0.50	0.56	0.63
W 410x60,0	0.21	0.22	0.24	0.26	0.28	0.31	0.35	0.40	0.45	0.51	0.58	0.65	0.74	0.83	0.92	1.03
W 410x67,0	0.26	0.28	0.29	0.33	0.37	0.41	0.46	0.52	0.59	0.66	0.74	0.84	0.94	1.04	1.16	1.27
W 410x75,0	0.31	0.34	0.37	0.42	0.47	0.52	0.59	0.66	0.74	0.83	0.93	1.03	1.15	1.27	1.39	1.53
W 410x85,0	0.41	0.46	0.51	0.56	0.63	0.71	0.79	0.88	0.99	1.09	1.20	1.32	1.46	1.59	1.74	1.89
W 460x52,0	0.16	0.17	0.18	0.19	0.20	0.21	0.23	0.25	0.29	0.32	0.36	0.41	0.47	0.53	0.61	0.69
W 460x60,0	0.20	0.21	0.23	0.24	0.26	0.29	0.32	0.36	0.41	0.46	0.52	0.59	0.67	0.75	0.84	0.95
W 460x68,0	0.25	0.27	0.29	0.31	0.35	0.39	0.44	0.49	0.56	0.63	0.70	0.80	0.89	0.99	1.10	1.23
W 460x74,0	0.28	0.30	0.32	0.36	0.40	0.45	0.51	0.57	0.64	0.72	0.81	0.91	1.02	1.13	1.26	1.39
W 460x82,0	0.34	0.36	0.40	0.45	0.50	0.56	0.63	0.71	0.80	0.89	1.00	1.11	1.23	1.37	1.50	1.65
W 460x89,0	0.41	0.46	0.51	0.57	0.63	0.71	0.79	0.89	0.98	1.10	1.21	1.33	1.47	1.61	1.76	1.92
W 460x97,0	0.49	0.55	0.61	0.67	0.75	0.84	0.94	1.04	1.16	1.28	1.40	1.54	1.69	1.85	2.01	2.18
W 460x106,0	0.60	0.67	0.73	0.82	0.92	1.02	1.13	1.25	1.38	1.51	1.65	1.81	1.98	2.16	2.35	2.54
W 530x66,0	0.20	0.22	0.23	0.24	0.25	0.27	0.30	0.33	0.37	0.42	0.47	0.53	0.60	0.69	0.79	0.91
W 530x74,0	0.25	0.27	0.28	0.30	0.32	0.36	0.40	0.45	0.51	0.57	0.65	0.73	0.83	0.93	1.06	1.21
W 530x85,0	0.32	0.34	0.37	0.41	0.46	0.51	0.57	0.64	0.72	0.81	0.91	1.01	1.13	1.26	1.42	1.57
W 530x92,0	0.37	0.39	0.43	0.48	0.54	0.60	0.67	0.76	0.85	0.95	1.07	1.19	1.32	1.48	1.64	1.80
W 530x101,0	0.45	0.50	0.55	0.61	0.68	0.76	0.86	0.96	1.07	1.19	1.32	1.45	1.61	1.77	1.95	2.13
W 530x109,0	0.54	0.60	0.66	0.73	0.81	0.92	1.02	1.14	1.26	1.39	1.53	1.68	1.86	2.03	2.22	2.42
W 610x101,0	0.39	0.41	0.44	0.49	0.55	0.62	0.69	0.78	0.88	0.98	1.10	1.23	1.38	1.55	1.74	1.93
W 610x113,0	0.49	0.55	0.61	0.67	0.75	0.84	0.94	1.05	1.17	1.31	1.44	1.59	1.77	1.96	2.15	2.37
W 610x125,0	0.65	0.72	0.80	0.88	0.98	1.10	1.22	1.35	1.50	1.65	1.80	1.97	2.16	2.37	2.59	2.81
W 610x140,0	0.87	0.96	1.06	1.18	1.31	1.45	1.59	1.75	1.91	2.09	2.26	2.44	2.68	2.92	3.14	3.41
W 610x174,0	1.35	1.49	1.64	1.81	1.99	2.16	2.36	2.58	2.80	3.00	3.24	3.50	3.81	4.09	4.40	4.73

Quadro 9.21 – Taxa de armadura para desenvolvimento do máximo momento fletor negativo de vigas mistas com perfil Gerdau e laje de 16 cm em função do TRRF.

Nome	TRRF (min) tc = 16 cm															
	30	29	28	27	26	25	24	23	22	21	20	19	18	17	16	15
W 150x18,0	0.05	0.05	0.05	0.05	0.05	0.06	0.06	0.07	0.07	0.08	0.09	0.10	0.12	0.13	0.15	0.18
W 150x24,0	0.07	0.07	0.08	0.08	0.09	0.09	0.10	0.12	0.13	0.15	0.17	0.20	0.23	0.26	0.30	0.34
W 150x37,1	0.13	0.14	0.15	0.17	0.19	0.22	0.24	0.28	0.31	0.36	0.40	0.46	0.51	0.57	0.64	0.70
W 200x22,5	0.06	0.06	0.06	0.07	0.07	0.07	0.08	0.08	0.09	0.10	0.11	0.13	0.15	0.16	0.19	0.22
W 200x31,3	0.09	0.10	0.10	0.11	0.12	0.13	0.14	0.16	0.18	0.21	0.23	0.27	0.31	0.35	0.40	0.45
W 200x41,7	0.14	0.15	0.16	0.18	0.20	0.23	0.26	0.29	0.33	0.38	0.43	0.49	0.55	0.61	0.67	0.74
W 200x59,0	0.28	0.31	0.35	0.39	0.44	0.49	0.56	0.62	0.69	0.76	0.84	0.92	1.02	1.09	1.18	1.27
W 200x71,0	0.46	0.51	0.58	0.64	0.71	0.79	0.86	0.95	1.04	1.13	1.22	1.30	1.40	1.50	1.59	1.68
W 200x86,0	0.73	0.81	0.89	0.97	1.06	1.16	1.26	1.36	1.47	1.57	1.67	1.78	1.90	2.01	2.12	2.23
W 250x22,3	0.06	0.06	0.06	0.06	0.06	0.07	0.07	0.08	0.08	0.09	0.10	0.11	0.12	0.14	0.15	0.17
W 250x25,3	0.07	0.07	0.07	0.07	0.08	0.08	0.09	0.09	0.10	0.11	0.12	0.14	0.16	0.18	0.21	0.24
W 250x28,4	0.08	0.08	0.08	0.09	0.09	0.10	0.11	0.12	0.13	0.14	0.16	0.18	0.21	0.24	0.28	0.32
W 250x38,5	0.12	0.12	0.13	0.14	0.15	0.16	0.19	0.21	0.24	0.27	0.31	0.35	0.40	0.46	0.51	0.57
W 250x44,8	0.15	0.16	0.17	0.18	0.20	0.23	0.26	0.29	0.33	0.38	0.43	0.48	0.55	0.61	0.68	0.75
W 250x89,0	0.60	0.67	0.75	0.84	0.93	1.02	1.11	1.22	1.33	1.44	1.54	1.65	1.77	1.90	2.01	2.13
W 250x101,0	0.84	0.93	1.02	1.12	1.21	1.32	1.44	1.56	1.69	1.78	1.90	2.03	2.17	2.28	2.42	2.55
W 250x115,0	1.14	1.24	1.34	1.46	1.58	1.71	1.85	1.96	2.07	2.21	2.35	2.49	2.62	2.77	2.91	2.98
W 310x23,8	0.06	0.06	0.06	0.07	0.07	0.07	0.07	0.08	0.09	0.09	0.10	0.11	0.12	0.14	0.15	0.17
W 310x28,3	0.07	0.08	0.08	0.08	0.09	0.09	0.10	0.11	0.11	0.12	0.14	0.16	0.18	0.20	0.23	0.26
W 310x32,7	0.09	0.09	0.10	0.10	0.11	0.11	0.12	0.13	0.15	0.17	0.19	0.21	0.24	0.28	0.32	0.36
W 310x44,5	0.13	0.14	0.15	0.16	0.17	0.19	0.21	0.24	0.28	0.31	0.35	0.40	0.46	0.52	0.58	0.65
W 310x52,0	0.17	0.19	0.20	0.21	0.24	0.27	0.31	0.35	0.39	0.45	0.50	0.57	0.64	0.71	0.79	0.87
W 360x32,9	0.08	0.09	0.09	0.09	0.10	0.10	0.11	0.12	0.13	0.14	0.16	0.18	0.21	0.23	0.27	0.31
W 360x39,0	0.10	0.11	0.12	0.12	0.13	0.14	0.15	0.17	0.19	0.21	0.24	0.27	0.31	0.35	0.41	0.46
W 360x51,0	0.15	0.16	0.17	0.18	0.19	0.21	0.24	0.27	0.31	0.35	0.40	0.45	0.51	0.58	0.65	0.73
W 360x57,8	0.18	0.19	0.21	0.22	0.25	0.28	0.32	0.36	0.40	0.45	0.51	0.58	0.66	0.73	0.81	0.90
W 360x64,0	0.22	0.24	0.26	0.29	0.33	0.37	0.42	0.47	0.53	0.60	0.67	0.75	0.84	0.93	1.02	1.10
W 360x72,0	0.27	0.31	0.34	0.39	0.43	0.48	0.54	0.61	0.68	0.77	0.85	0.94	1.04	1.13	1.23	1.33
W 360x79,0	0.36	0.40	0.45	0.50	0.55	0.62	0.70	0.78	0.86	0.95	1.05	1.15	1.26	1.35	1.46	1.58
W 360x91,0	0.47	0.52	0.58	0.64	0.72	0.81	0.90	0.99	1.09	1.20	1.32	1.44	1.54	1.66	1.79	1.91
W 360x101,0	0.62	0.68	0.76	0.85	0.94	1.04	1.14	1.25	1.37	1.49	1.62	1.72	1.86	2.00	2.13	2.26
W 360x110,0	0.76	0.85	0.95	1.04	1.15	1.25	1.37	1.49	1.62	1.76	1.86	1.99	2.14	2.29	2.42	2.58
W 360x122,0	0.97	1.07	1.17	1.28	1.39	1.52	1.65	1.79	1.93	2.05	2.19	2.35	2.52	2.66	2.83	3.01

Quadro 9.22 – Taxa de armadura para desenvolvimento do máximo momento fletor negativo de vigas mistas com perfil Gerdau e laje de 16 cm em função do TRRF (continuação).

Nome	TRRF (min) tc = 16 cm															
	30	29	28	27	26	25	24	23	22	21	20	19	18	17	16	15
W 410x46,1	0.13	0.13	0.14	0.15	0.16	0.17	0.18	0.20	0.23	0.26	0.29	0.33	0.38	0.43	0.49	0.55
W 410x60,0	0.18	0.20	0.21	0.22	0.24	0.27	0.31	0.35	0.39	0.44	0.50	0.57	0.65	0.72	0.80	0.90
W 410x67,0	0.23	0.24	0.26	0.29	0.32	0.36	0.41	0.45	0.52	0.58	0.65	0.73	0.82	0.91	1.02	1.11
W 410x75,0	0.27	0.29	0.33	0.37	0.41	0.46	0.51	0.58	0.65	0.73	0.82	0.90	1.00	1.11	1.22	1.34
W 410x85,0	0.36	0.40	0.45	0.49	0.55	0.62	0.69	0.77	0.86	0.95	1.05	1.16	1.28	1.39	1.52	1.66
W 460x52,0	0.14	0.15	0.16	0.16	0.17	0.19	0.20	0.22	0.25	0.28	0.32	0.35	0.41	0.46	0.53	0.60
W 460x60,0	0.18	0.19	0.20	0.21	0.23	0.25	0.28	0.32	0.36	0.40	0.46	0.51	0.59	0.66	0.73	0.83
W 460x68,0	0.22	0.24	0.25	0.27	0.31	0.34	0.39	0.43	0.49	0.55	0.61	0.70	0.78	0.86	0.97	1.07
W 460x74,0	0.25	0.26	0.28	0.31	0.35	0.39	0.44	0.50	0.56	0.63	0.71	0.80	0.89	0.99	1.11	1.21
W 460x82,0	0.30	0.32	0.35	0.40	0.44	0.49	0.55	0.62	0.70	0.78	0.88	0.97	1.08	1.20	1.32	1.44
W 460x89,0	0.36	0.40	0.45	0.50	0.55	0.62	0.69	0.78	0.86	0.96	1.06	1.17	1.29	1.41	1.54	1.68
W 460x97,0	0.43	0.48	0.53	0.59	0.65	0.74	0.82	0.91	1.01	1.12	1.23	1.34	1.48	1.61	1.76	1.91
W 460x106,0	0.53	0.58	0.64	0.71	0.80	0.89	0.99	1.10	1.21	1.32	1.45	1.58	1.74	1.89	2.05	2.22
W 530x66,0	0.18	0.19	0.20	0.21	0.22	0.24	0.26	0.29	0.33	0.37	0.41	0.46	0.53	0.60	0.69	0.80
W 530x74,0	0.22	0.23	0.25	0.26	0.28	0.31	0.35	0.40	0.44	0.50	0.56	0.63	0.73	0.81	0.93	1.06
W 530x85,0	0.28	0.30	0.32	0.36	0.40	0.45	0.50	0.56	0.63	0.71	0.80	0.89	0.99	1.10	1.24	1.37
W 530x92,0	0.32	0.34	0.38	0.42	0.47	0.53	0.59	0.66	0.75	0.83	0.94	1.04	1.16	1.29	1.43	1.58
W 530x101,0	0.39	0.43	0.48	0.54	0.59	0.67	0.75	0.84	0.94	1.04	1.15	1.27	1.41	1.55	1.70	1.87
W 530x109,0	0.47	0.52	0.58	0.64	0.71	0.80	0.89	0.99	1.10	1.22	1.34	1.47	1.62	1.78	1.94	2.11
W 610x101,0	0.34	0.36	0.39	0.43	0.48	0.54	0.60	0.68	0.77	0.86	0.96	1.08	1.20	1.36	1.52	1.68
W 610x113,0	0.43	0.48	0.53	0.59	0.65	0.73	0.82	0.92	1.03	1.14	1.26	1.39	1.55	1.71	1.88	2.07
W 610x125,0	0.57	0.63	0.70	0.77	0.86	0.96	1.07	1.18	1.31	1.44	1.58	1.73	1.89	2.07	2.26	2.45
W 610x140,0	0.76	0.84	0.93	1.03	1.15	1.26	1.39	1.53	1.67	1.83	1.98	2.14	2.34	2.55	2.75	2.98
W 610x174,0	1.18	1.30	1.44	1.59	1.74	1.89	2.07	2.25	2.45	2.62	2.83	3.06	3.33	3.57	3.85	4.14

Quadro 9.23 – Taxa de armadura para desenvolvimento do máximo momento fletor negativo de vigas mistas com perfil Gerdau e laje de 18 cm em função do TRRF.

Nome	TRRF (min) tc = 18 cm															
	30	29	28	27	26	25	24	23	22	21	20	19	18	17	16	15
W 150x18,0	0.04	0.04	0.04	0.05	0.05	0.05	0.06	0.06	0.07	0.07	0.08	0.09	0.10	0.12	0.13	0.16
W 150x24,0	0.06	0.06	0.07	0.07	0.08	0.08	0.09	0.10	0.12	0.14	0.15	0.17	0.20	0.23	0.27	0.30
W 150x37,1	0.12	0.12	0.13	0.15	0.17	0.19	0.22	0.24	0.28	0.32	0.36	0.40	0.45	0.51	0.57	0.62
W 200x22,5	0.05	0.05	0.06	0.06	0.06	0.06	0.07	0.08	0.08	0.09	0.10	0.11	0.13	0.15	0.17	0.19
W 200x31,3	0.08	0.09	0.09	0.10	0.10	0.11	0.12	0.14	0.16	0.18	0.21	0.24	0.27	0.31	0.35	0.40
W 200x41,7	0.13	0.14	0.15	0.16	0.18	0.21	0.23	0.26	0.30	0.34	0.38	0.43	0.49	0.54	0.60	0.66
W 200x59,0	0.25	0.28	0.31	0.35	0.39	0.44	0.49	0.55	0.61	0.68	0.75	0.82	0.90	0.97	1.05	1.13
W 200x71,0	0.41	0.46	0.51	0.57	0.63	0.70	0.77	0.84	0.92	1.01	1.09	1.16	1.24	1.33	1.41	1.49
W 200x86,0	0.65	0.72	0.79	0.87	0.94	1.03	1.12	1.21	1.31	1.39	1.49	1.59	1.69	1.79	1.89	1.99
W 250x22,3	0.05	0.05	0.05	0.06	0.06	0.06	0.06	0.07	0.07	0.08	0.09	0.10	0.11	0.12	0.14	0.15
W 250x25,3	0.06	0.06	0.06	0.07	0.07	0.07	0.08	0.08	0.09	0.10	0.11	0.12	0.14	0.16	0.18	0.21
W 250x28,4	0.07	0.07	0.07	0.08	0.08	0.09	0.09	0.10	0.11	0.13	0.15	0.16	0.19	0.21	0.25	0.28
W 250x38,5	0.10	0.11	0.12	0.12	0.13	0.14	0.17	0.19	0.21	0.24	0.27	0.31	0.36	0.41	0.46	0.51
W 250x44,8	0.13	0.14	0.15	0.16	0.18	0.21	0.23	0.26	0.30	0.34	0.38	0.43	0.49	0.54	0.60	0.67
W 250x89,0	0.54	0.60	0.67	0.74	0.82	0.91	0.99	1.08	1.18	1.28	1.37	1.46	1.58	1.69	1.78	1.89
W 250x101,0	0.75	0.83	0.91	1.00	1.08	1.18	1.28	1.39	1.50	1.58	1.69	1.80	1.93	2.03	2.15	2.27
W 250x115,0	1.01	1.10	1.20	1.29	1.41	1.52	1.64	1.74	1.84	1.96	2.09	2.21	2.33	2.46	2.59	2.65
W 310x23,8	0.05	0.06	0.06	0.06	0.06	0.06	0.07	0.07	0.08	0.08	0.09	0.10	0.11	0.12	0.14	0.15
W 310x28,3	0.07	0.07	0.07	0.07	0.08	0.08	0.09	0.09	0.10	0.11	0.12	0.14	0.16	0.18	0.20	0.23
W 310x32,7	0.08	0.08	0.09	0.09	0.10	0.10	0.11	0.12	0.13	0.15	0.17	0.19	0.22	0.25	0.28	0.32
W 310x44,5	0.12	0.13	0.13	0.14	0.15	0.17	0.19	0.22	0.24	0.28	0.31	0.36	0.41	0.47	0.52	0.58
W 310x52,0	0.15	0.17	0.18	0.19	0.22	0.24	0.28	0.31	0.35	0.40	0.45	0.51	0.57	0.63	0.70	0.77
W 360x32,9	0.07	0.08	0.08	0.08	0.09	0.09	0.10	0.11	0.12	0.13	0.14	0.16	0.18	0.21	0.24	0.27
W 360x39,0	0.09	0.10	0.10	0.11	0.12	0.12	0.13	0.15	0.17	0.19	0.21	0.24	0.27	0.31	0.36	0.41
W 360x51,0	0.13	0.14	0.15	0.16	0.17	0.19	0.21	0.24	0.27	0.31	0.35	0.40	0.46	0.52	0.58	0.65
W 360x57,8	0.16	0.17	0.18	0.20	0.22	0.25	0.28	0.32	0.36	0.40	0.46	0.51	0.58	0.65	0.72	0.80
W 360x64,0	0.20	0.21	0.23	0.26	0.29	0.33	0.37	0.42	0.47	0.53	0.60	0.67	0.74	0.82	0.90	0.98
W 360x72,0	0.24	0.27	0.30	0.34	0.38	0.43	0.48	0.54	0.61	0.68	0.75	0.83	0.92	1.01	1.09	1.18
W 360x79,0	0.32	0.35	0.40	0.44	0.49	0.55	0.62	0.69	0.77	0.85	0.93	1.02	1.12	1.20	1.30	1.40
W 360x91,0	0.41	0.46	0.51	0.57	0.64	0.72	0.80	0.88	0.97	1.07	1.17	1.28	1.37	1.48	1.59	1.70
W 360x101,0	0.55	0.61	0.68	0.76	0.84	0.93	1.02	1.11	1.22	1.33	1.44	1.53	1.65	1.77	1.89	2.01
W 360x110,0	0.68	0.76	0.84	0.93	1.02	1.11	1.22	1.33	1.44	1.56	1.65	1.77	1.91	2.03	2.15	2.29
W 360x122,0	0.86	0.95	1.04	1.14	1.24	1.35	1.47	1.59	1.72	1.82	1.95	2.09	2.24	2.37	2.52	2.67

Quadro 9.24 – Taxa de armadura para desenvolvimento do máximo momento fletor negativo de vigas mistas com perfil Gerdau e laje de 18 cm em função do TRRF (continuação).

Nome	TRRF (min) tc = 18 cm															
	30	29	28	27	26	25	24	23	22	21	20	19	18	17	16	15
W 410x46,1	0.11	0.12	0.12	0.13	0.14	0.15	0.16	0.18	0.21	0.23	0.26	0.29	0.34	0.39	0.44	0.49
W 410x60,0	0.16	0.17	0.19	0.20	0.22	0.24	0.28	0.31	0.35	0.40	0.45	0.50	0.58	0.64	0.71	0.80
W 410x67,0	0.20	0.21	0.23	0.25	0.29	0.32	0.36	0.40	0.46	0.52	0.58	0.65	0.73	0.81	0.90	0.99
W 410x75,0	0.24	0.26	0.29	0.33	0.36	0.41	0.46	0.52	0.58	0.65	0.73	0.80	0.89	0.99	1.08	1.19
W 410x85,0	0.32	0.36	0.40	0.44	0.49	0.55	0.62	0.69	0.77	0.85	0.93	1.03	1.14	1.24	1.35	1.47
W 460x52,0	0.12	0.13	0.14	0.15	0.15	0.16	0.18	0.20	0.22	0.25	0.28	0.32	0.36	0.41	0.47	0.54
W 460x60,0	0.16	0.17	0.18	0.19	0.20	0.22	0.25	0.28	0.32	0.36	0.40	0.46	0.52	0.59	0.65	0.74
W 460x68,0	0.20	0.21	0.22	0.24	0.27	0.30	0.34	0.38	0.43	0.49	0.55	0.62	0.69	0.77	0.86	0.95
W 460x74,0	0.22	0.24	0.25	0.28	0.31	0.35	0.39	0.44	0.50	0.56	0.63	0.71	0.79	0.88	0.98	1.08
W 460x82,0	0.26	0.28	0.31	0.35	0.39	0.44	0.49	0.56	0.62	0.69	0.78	0.86	0.96	1.06	1.17	1.28
W 460x89,0	0.32	0.36	0.40	0.44	0.49	0.55	0.62	0.69	0.77	0.85	0.94	1.04	1.15	1.25	1.37	1.50
W 460x97,0	0.38	0.42	0.47	0.52	0.58	0.65	0.73	0.81	0.90	0.99	1.09	1.19	1.32	1.44	1.57	1.70
W 460x106,0	0.47	0.52	0.57	0.64	0.71	0.79	0.88	0.97	1.07	1.18	1.29	1.41	1.54	1.68	1.83	1.98
W 530x66,0	0.16	0.17	0.18	0.19	0.20	0.21	0.23	0.26	0.29	0.33	0.36	0.41	0.47	0.54	0.61	0.71
W 530x74,0	0.20	0.21	0.22	0.23	0.25	0.28	0.31	0.35	0.40	0.44	0.50	0.56	0.65	0.72	0.83	0.94
W 530x85,0	0.25	0.27	0.29	0.32	0.36	0.40	0.44	0.50	0.56	0.63	0.71	0.79	0.88	0.98	1.10	1.22
W 530x92,0	0.29	0.30	0.34	0.38	0.42	0.47	0.52	0.59	0.66	0.74	0.83	0.92	1.03	1.15	1.27	1.40
W 530x101,0	0.35	0.39	0.43	0.48	0.53	0.59	0.67	0.75	0.83	0.93	1.02	1.13	1.25	1.38	1.51	1.66
W 530x109,0	0.42	0.46	0.51	0.57	0.63	0.71	0.80	0.88	0.98	1.08	1.19	1.31	1.44	1.58	1.73	1.88
W 610x101,0	0.30	0.32	0.35	0.38	0.43	0.48	0.54	0.60	0.68	0.76	0.86	0.96	1.07	1.21	1.35	1.50
W 610x113,0	0.38	0.43	0.47	0.52	0.58	0.65	0.73	0.82	0.91	1.02	1.12	1.24	1.38	1.52	1.67	1.84
W 610x125,0	0.51	0.56	0.62	0.68	0.77	0.86	0.95	1.05	1.16	1.28	1.40	1.54	1.68	1.84	2.01	2.18
W 610x140,0	0.68	0.74	0.83	0.92	1.02	1.12	1.24	1.36	1.49	1.62	1.76	1.90	2.08	2.27	2.44	2.65
W 610x174,0	1.05	1.16	1.28	1.41	1.55	1.68	1.84	2.00	2.18	2.33	2.52	2.72	2.96	3.18	3.42	3.68

Em posse de tais valores determina-se, para certo fator de carga, que, para um perfil Gerdau em específico, a consideração da semicontinuidade com adição da máxima taxa de armadura é suficiente para justificar o TRRF de projeto.

Em posse de tais valores determina-se, para certo fator de carga, que, para um perfil Gerdau em específico, a consideração da semicontinuidade com adição da máxima taxa de armadura é suficiente para justificar o TRRF de projeto. Os quadros devem ser utilizados conforme o seguinte roteiro de cálculo:

1. Determinar o fator de carga de projeto, lembrando que 0,7 é uma recomendação simplificada da ABNT NBR 14323 [1]; uma determinação mais precisa dos carregamentos atuantes na edificação, pode conduzir a fatores de carga menores. *Exemplo: um projeto apresenta o fator de carga 0,6;*
2. Identificar as características geométricas do projeto. *Exemplo: a viga mista a ser verificada é composta por um perfil W460x74,0 e laje maciça de 10 cm;*
3. Utilizar o Quadro 9.1 ao Quadro 9.12 para determinar o TRRF em que o fator de carga é superior ao de projeto na situação biapoiada (coluna “B”). *Exemplo: o Quadro 9.4 mostra que o perfil W460x74,0 para laje de 10 cm apresenta, para condição biapoiada, fator de carga de 0,62 para TRRF de 15 min. Para tempos superiores todos os fatores de carga são inferiores ao de projeto (0,6);*
4. Utilizar o Quadro 9.1 ao Quadro 9.12 para determinar o TRRF em que o fator de carga é superior ao de projeto na situação semicontínua (coluna “S”). *Exemplo: o Quadro 9.4 mostra que o perfil W460x74,0 para laje de 10 cm apresenta, para condição semicontínua, fator de carga de 0,67 para TRRF de 19 min. Para tempos superiores todos os fatores de carga são inferiores ao de projeto (0,6);*
5. Utilizar o Quadro 9.13 ao Quadro 9.24 para determinar qual a taxa de armadura utilizada na situação semicontínua para desenvolvimento do máximo momento fletor resistente. *Exemplo: o Quadro 9.16 mostra que o perfil W460x74,0 apresenta taxa de armadura de 1,28% para o TRRF de 19 min encontrado no item 4 do roteiro;*
6. Como conclusão, é possível prescindir revestimento contra fogo com base nos procedimentos normatizados para TRRF variando entre o caso biapoiado, sem armadura adicional, e semicontínuo, com adoção da armadura máxima.

Exemplo: prescinde-se revestimento contra fogo para TRRF de 15 minutos a 19 minutos para taxa de armadura variando de 0% até 1,28%;

7. Caso o TRRF de projeto seja um valor intermediário aos encontrados é possível adotar taxas de armaduras inferiores à máxima, calculando o momento fletor negativo resistente seguindo os procedimentos descritos no capítulo 6. Até que mais estudos sejam desenvolvidos não se permite a interpolação linear dos resultados extremos. *Exemplo: outra conclusão é de que não será possível, a partir dos procedimentos normatizados, prescindir revestimento contra fogo para TRRF superior a 19 minutos, independente da taxa de armadura adotada.*

No caso de perfis com fator menor do que 0,7, ainda pode ser possível dispensar o revestimento caso assim se comprove. Por exemplo, para um projeto onde o fator de carga é 0,6 (lembrando que 0,7 é uma recomendação simplificada da ABNT NBR 14323:2013; uma determinação mais precisa dos carregamentos atuantes na edificação, pode conduzir a fatores de carga menores) deseja-se justificar a não adoção de revestimento contra fogo em uma viga mista composta por perfil W460x74,0 e laje de 10 cm. De acordo com o Quadro 9.4 na situação biapoiada (“B”) o fator de carga é superior a 0,6 para TRRF de 15 min (fator de carga de 0,62) e na situação semicontínua para TRRF de 19 min (fator de carga de 0,67). A máxima taxa de armadura na condição semicontínua para TRRF de 19 min é, segundo Quadro 9.16, 1,28%. Portanto justifica-se a não adoção de revestimento contra fogo para casos onde o TRRF varia de 15 min, sem adoção de qualquer armadura negativa (caso biapoiado), a 19 min, com adoção de taxa de armadura de 1,28%. Caso o TRRF de projeto seja um valor intermediário aos encontrados nos quadros é possível adotar taxas de armaduras menores à máxima, calculando o momento fletor negativo resistente seguindo os procedimentos dos itens 6.2.3 e 7.3.

Para melhor visualização dos resultados o gráfico da Figura 9.20 mostra o tempo de resistência ao fogo (TRF) da série W200 de perfis Gerdau para o caso semicontínuo, ou seja, ilustra os pontos em que o TRRF do Quadro 9.1até o Quadro 9.12 resulta em fator de carga superior a 0,7 na coluna “S”. A Figura 9.21abrange os resultados para as demais séries de perfis Gerdau, ocultando os marcadores de

cada perfil para facilitar a visualização. Os resultados da Figura 9.22 seguem o mesmo formato.

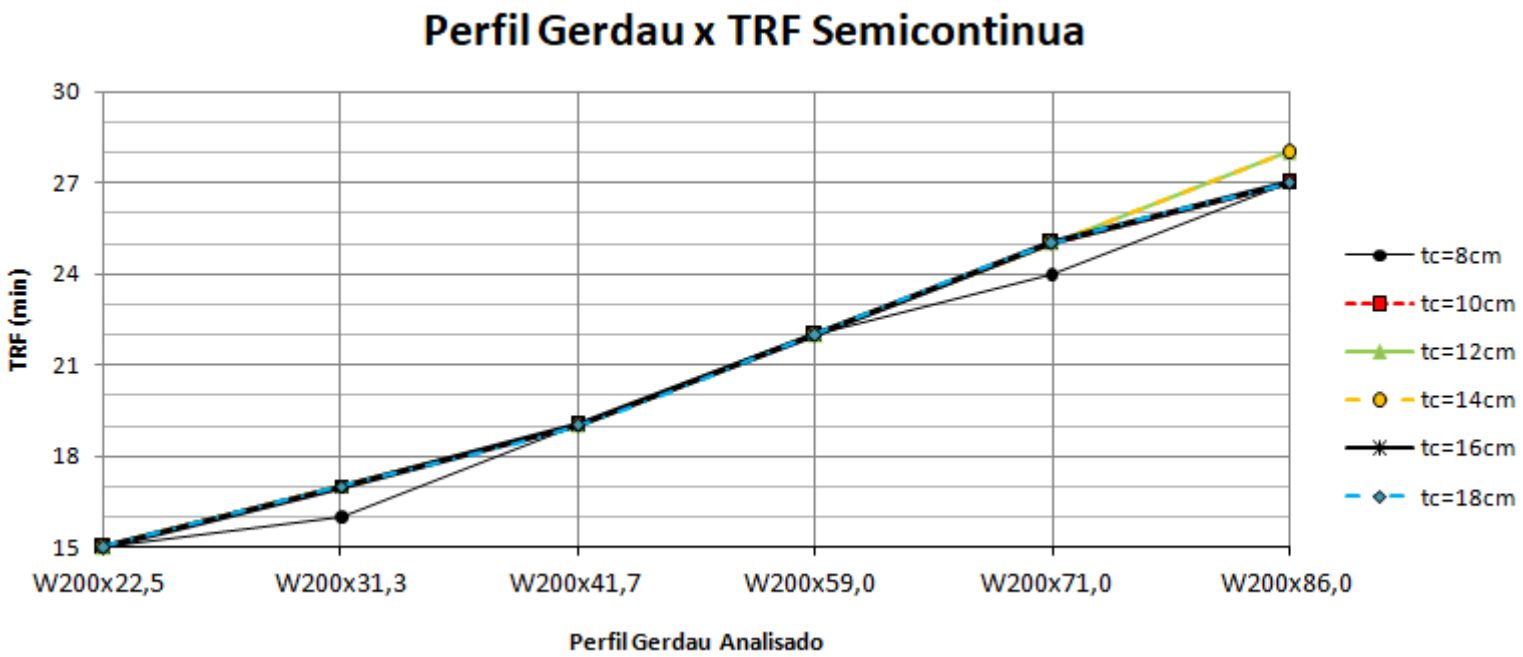


Figura 9.20 – Gráfico TRF do caso semicontínuo x perfil Gerdau analisado (série W200).

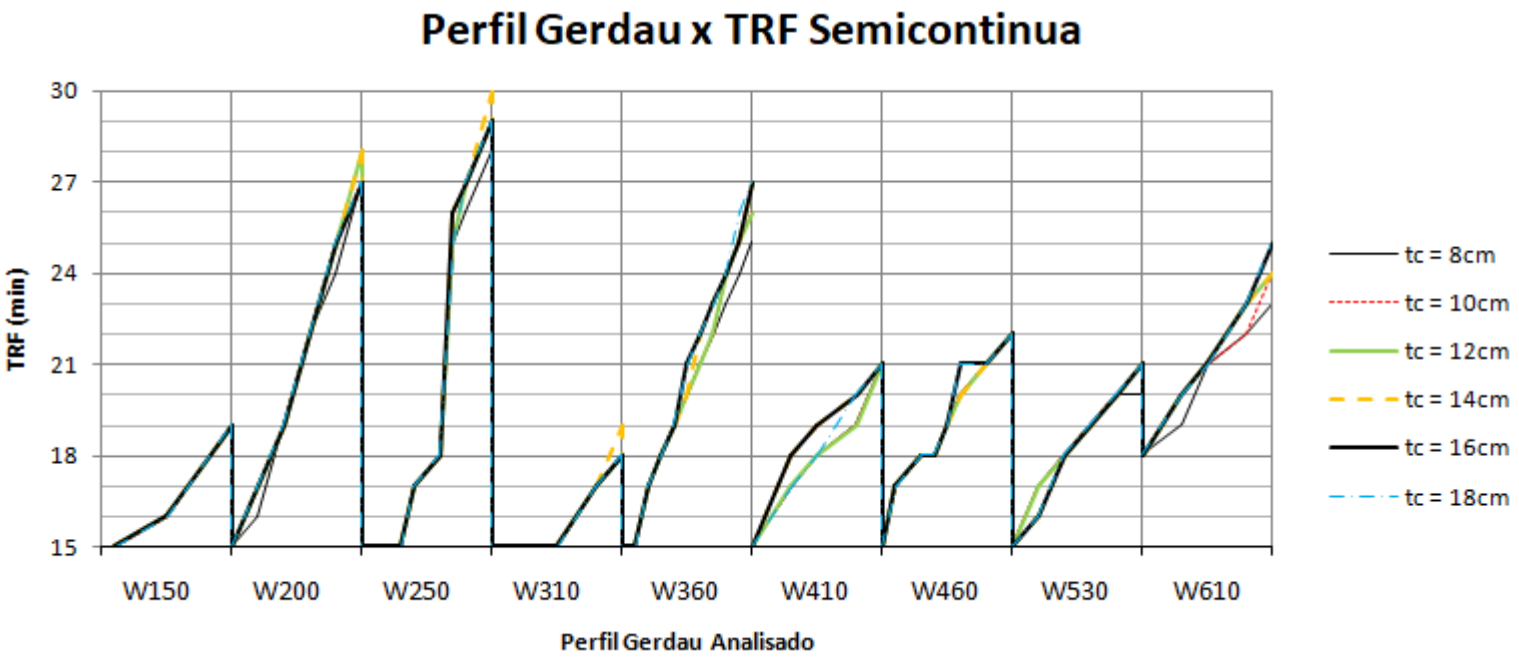


Figura 9.21 – Gráfico TRF do caso semicontínuo x perfil Gerdau analisado.

Nota-se que a influência da espessura da laje é muito baixa, variando o TRF em apenas um minuto geralmente. Também é possível perceber que nos perfis mais leves dificilmente atinge-se TRF superiores a 20 min e, em alguns casos nem mesmo 15 min. Isso fica bem evidente na série W310. Os perfis mais pesados e de baixa altura atingiram valores mais altos, se aproximando de 30 min. Isso é bem evidenciado na série W200, W250 e W360. Tais perfis, porém, não são usualmente utilizados como vigas de piso de edifício, sendo mais indicados para pilares, onde se predominam esforços axiais.

O gráfico da Figura 9.22 indica as taxas de armadura adotadas para o tempo em que o fator de carga foi superior a 0,7, ou seja, no tempo de resistência ao fogo indicado na Figura 9.21.

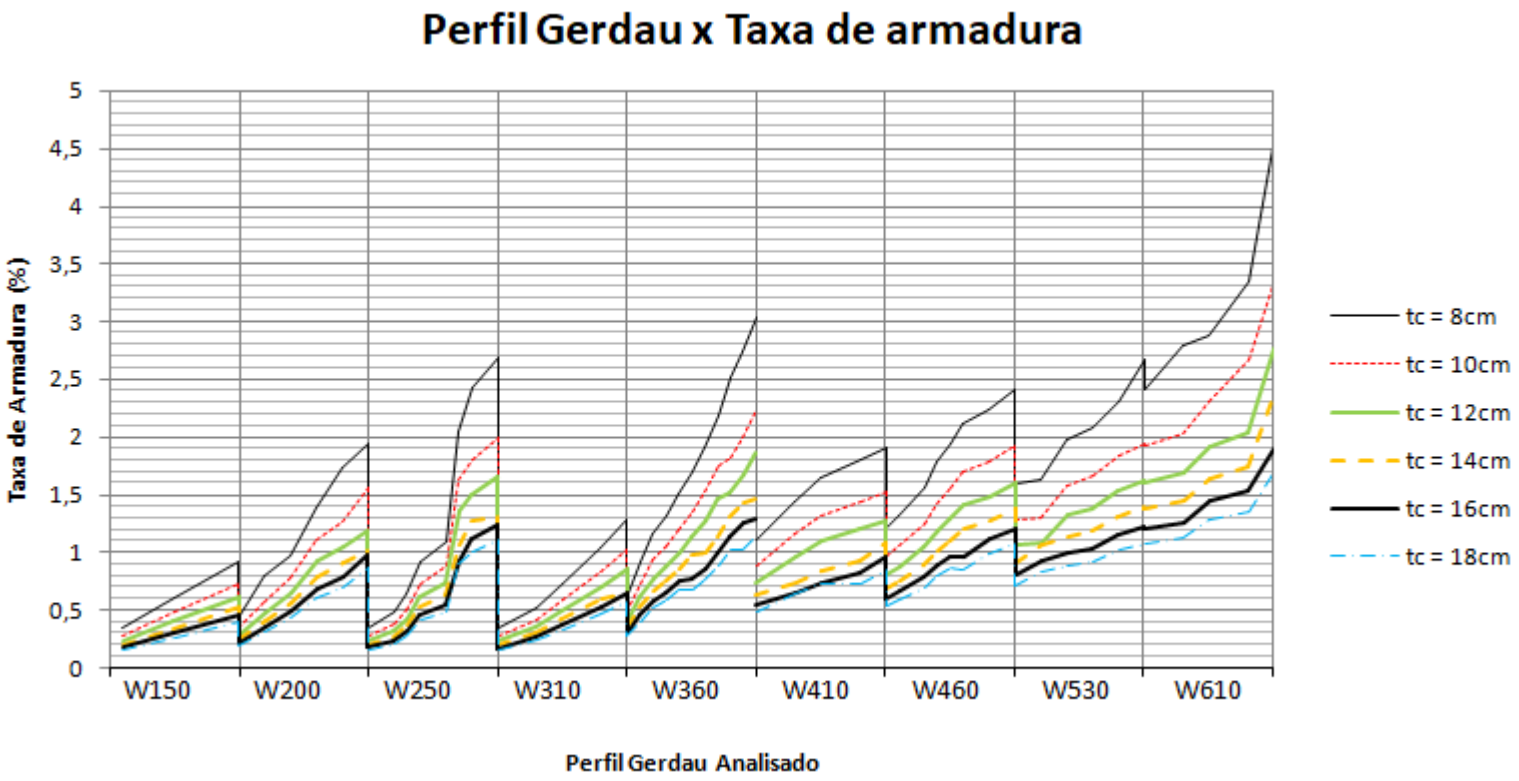


Figura 9.22 – Gráfico taxa de armadura x perfil Gerdau analisado, para TRF do caso semicontínuo.

Os perfis mais leves possuem taxas de armadura máxima razoáveis, entre 0,5% a 1,5%, ficando em média em 0,71%, que significam aproximadamente uma seção de aço de 8,3 cm²/m de laje, representando uma malha formada por barras CA-60 de 12,5 mm de diâmetro e espaçadas a cada 15 cm.

Já os perfis mais pesados necessitam de taxa de armadura muito elevada, variando entre 2% ao valor máximo de 4,5% para o perfil W610x174,0 com laje de 8 cm, de forma que não representam valores usuais encontrados em malhas antifissuração.

9.2.4 Conclusões

Foram estudadas as capacidades resistentes em situação de incêndio de vigas mistas de aço e concreto sem revestimento contra fogo, formadas por perfis da marca Gerdau e laje maciça considerando a semicontinuidade proporcionada por armadura negativa longitudinal da laje para TRRFs entre 15 min e 30 min. Análises anteriores mostraram que não é possível justificar a ausência de revestimento contra fogo seguindo procedimentos normativos para TRRF de 30 min, tempo mínimo fornecido pelo método tabular da IT08:2011. Tempos inferiores, embora não tão comuns, podem ser adotados para edificações de pequeno porte com utilização do denominado método do tempo equivalente, limitado a 15 min.

A análise simplificada aplica os métodos normatizados vigentes onde se avalia a formação de rótulas plásticas no apoio e no meio do vão, a fim de justificar a ausência de revestimento contra fogo. Foram tomadas hipóteses simplificadoras em que se desprezam esforços indiretos provocados pela dilatação térmica e gradiente térmico. Uma tentativa de propor um método de intensificar os esforços solicitantes sem considerar outros fenômenos mais complexos como não linearidade dos materiais e geométrica poderia penalizar excessivamente o modelo simplificado, levando a resultados muito conservadores (como já evidenciado por Silva, 2001, para o caso dos esforços indiretos em vigas de aço biapoiadas e pórticos simples submetidos a temperaturas próximas à crítica), indo de encontro ao objetivo de avaliar a possibilidade de dispensar revestimento contra fogo em alguns casos. Tal

hipótese foi verificada e validada nas análises numéricas desenvolvidas no decorrer da Dissertação.

Dos resultados obtidos pode-se concluir que:

- Utilizando procedimentos normatizados para TRRFs inferiores a 30 min é possível prescindir revestimento contra fogo em vigas mistas ao se considerar a semicontinuidade na região do apoio em casos específicos.
- Em geral os perfis mais leves, com geometria própria para serem utilizados como vigas de piso de edifícios, obtiveram fator de carga de 0,7 (critério simplificado da ABNT NBR 14323:2013 para avaliar os esforços solicitantes em situação de incêndio) para TRRFs entre 15 min e 20 min.
- Perfis mais pesados obtiveram resultados melhores, com TRRFs entre 20 min e 30 min, porém com adoção de taxa de armadura negativa elevada, entre 2% e 4,5%.
- Para um valor específico de fator de carga, a adoção da semicontinuidade com máxima taxa de armadura proporciona um aumento do tempo de resistência ao fogo (TRF) de 4 a 7 min em comparação ao caso biapoiado (sem consideração de armadura negativa).

10 VALIDAÇÃO DO MODELO NUMÉRICO

10.1 Introdução

Cumprindo o objetivo proposto na Dissertação, o comportamento de vigas mistas semicontínuas será avaliado utilizando-se métodos numéricos avançados capazes de considerar diversos fenômenos desprezados na análise simplificada como não linearidade geométrica, não linearidade das propriedades térmicas e mecânicas dos materiais e efeitos da dilatação térmica, incluindo esforços solicitantes indiretos.

Os modelos numéricos serão desenvolvidos no programa de computador ABAQUS versão 6.12-1. ABAQUS é uma ferramenta numérica desenvolvida pela Dassault Systèmes para análises em elementos finitos. Em um de seus diversos módulos é possível realizar análises térmicas não lineares tridimensionais e subsequente análise estrutural (cálculo de deslocamentos, deformações e tensões em função das condições de contorno) considerando o campo de temperatura encontrado e os fenômenos não lineares já citados.

Para trazer confiabilidade às técnicas utilizadas e aos resultados apresentados um modelo numérico foi comparado aos dados experimentais coletados por Wainman e Kirby (1987) que realizaram diversos ensaios nos laboratórios de Swinden em Roterdão, Inglaterra, para avaliar o comportamento de vigas de aço e vigas mistas de aço, sem revestimento contra fogo, submetidas a altas temperaturas. Os ensaios escolhidos como referência para validação do modelo numérico serão os denominados *ensaio 15* e *ensaio 16*. A escolha por esses ensaios se dá pelo fato de serem compostos por vigas mistas de aço e concreto desprotegidas, ou seja, são os mais próximos aos subsequentes modelos avaliados na Dissertação.

Ambos os ensaios seguem a configuração ilustrada pelo corte longitudinal da Figura 10.1 e o corte transversal da Figura 10.2. Trata-se de uma viga mista de aço composta pelo perfil de nomenclatura britânica UB 254x146x43 e uma laje de concreto de 642 mm de largura e 130 mm de espessura, duas linhas de conectores de 19 mm de diâmetro espaçados por 95 mm na transversal e a cada 280 mm na longitudinal, fornecendo interação física entre as partes. O vão é de 4530 mm e o

perfil de aço está apoiado sobre pontos que permitem a rotação e deslocamento das extremidades. Uma malha de aço formada por barras de 8 mm de diâmetro espaçadas de 200 mm está presente na laje de concreto, disposta a 35 mm da face inferior da laje. Quatro forças concentradas espaçadas de 1133 mm e simétricas em relação ao meio do vão são aplicadas durante todo o ensaio. O perfil de aço é de classe BS 43A e o concreto possui resistência a compressão nominal de 30 MPa.

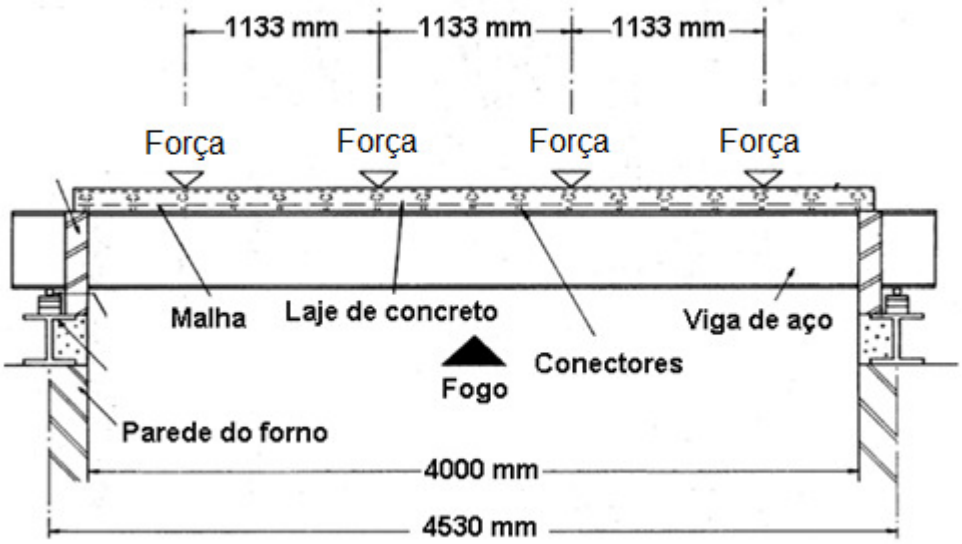


Figura 10.1 – Corte longitudinal do arranjo dos ensaios (Fonte: adaptado de Wainman, 1987).

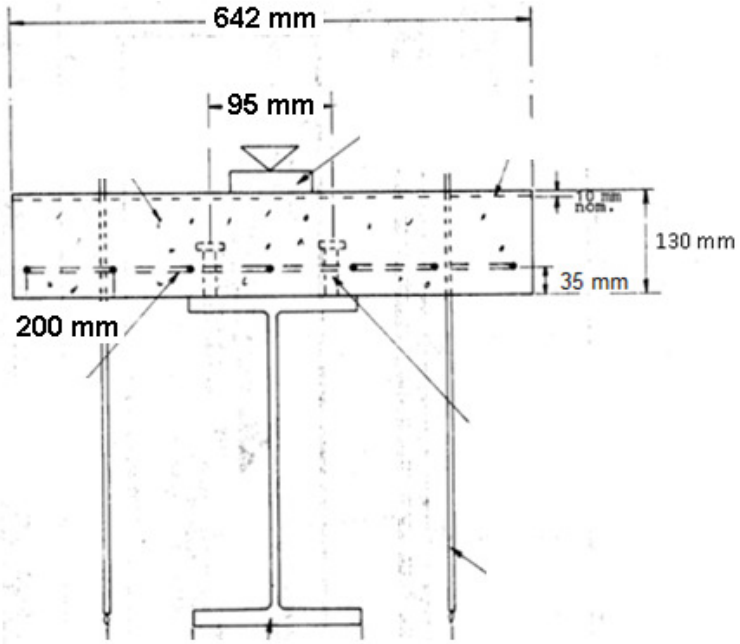


Figura 10.2 – Corte transversal do arranjo dos ensaios (Fonte: adaptado de Wainman, 1987).

As dimensões medidas do perfil de aço que compõe a viga mista estão reproduzidas, para cada ensaio, na Tabela 10.1.

Tabela 10.1 – Dimensões do perfil de aço.

	d [mm]	b_f [mm]	t_w [mm]	t_f [mm]
Ensaio 15	257	146	7,08	12,45
Ensaio 16	257	146	7,57	12,60

A resistência ao escoamento à temperatura ambiente das chapas de aço que compõe o perfil foi medida em laboratório, resultando em 280 MPa para o *ensaio 15* e 273 MPa para o *ensaio 16*. A resistência à ruptura resultou em 469 MPa para o *ensaio 15* e 481 MPa para o *ensaio 16* a um alongamento de 25%.

Cada uma das quatro forças aplicadas equivalem a 32,47 kN para o *ensaio 15* e 62,36 kN para o *ensaio 16*.

O forno utilizado nos ensaios é alimentado a gás e classificado como horizontal, com comprimento de 4 m, largura de 3 m e altura de 1,8 m. As

temperaturas do forno buscaram seguir a curva ISO 834, porém apresentaram certas flutuações, medidas durante o ensaio e reproduzidas na Tabela 10.2.

Tabela 10.2 – Temperaturas medidas no forno durante os ensaios.

Tempo [min]	Temperatura [ºC]		
	Ensaio 15	***Ensaio 16***	***ISO 834***
3	-	546	502
6	-	586	603
9	-	640	663
12	689	678	705
15	723	717	739
18	747	736	766
21	761	762	789
22	-	780	796
23	-	785	802
24	768	-	809
27	779	-	826
30	801	-	842
33	806	-	856
35	819	-	865
36	819	-	869
39	834	-	881
40	838	-	885

10.2 Modelo numérico

Inicialmente foi realizada análise térmica não linear capaz de definir as temperaturas nodais dos elementos finitos. Nessa análise foram utilizados elementos tridimensionais prismáticos com 20 nós, esses localizados nos vértices e ponto médio das arestas do prisma, denominados DC3D20 dentro do programa. A malha de elementos é ilustrada pela Figura 10.3, sua densidade foi definida após análise dos resultados de diversos modelos testes.

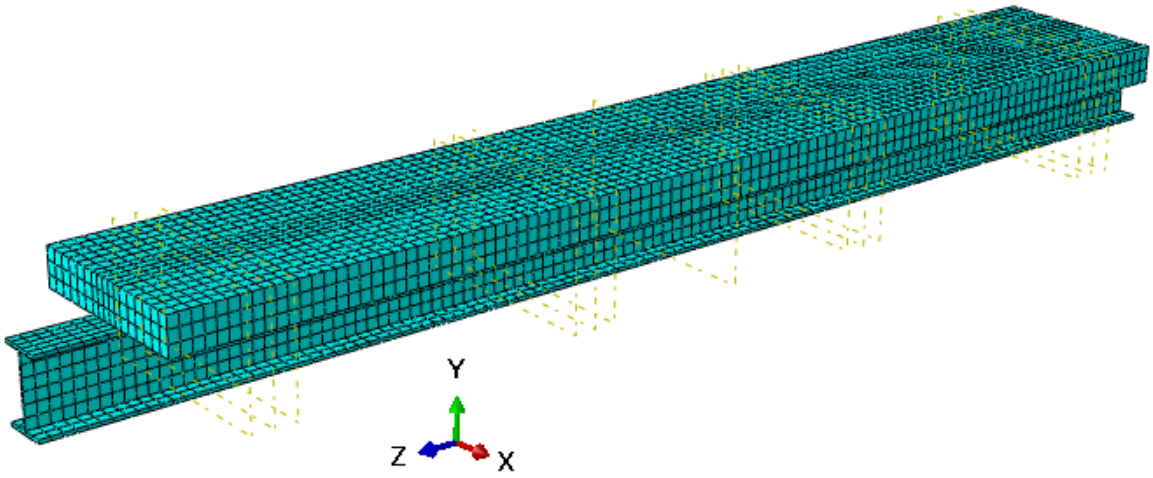


Figura 10.3 – Malha de elementos finitos.

As propriedades térmicas dos materiais variam conforme a temperatura, seguindo as recomendações da ABNT NBR 14323:2013 e ABNT NBR 15200:2012, explicadas com detalhe no Anexo E. Para o concreto assumiu-se umidade de 1,5% para determinar o calor específico e limite inferior para condutividade térmica, visto o limite superior não ser citado na ABNT NBR 15200:2012. A constante de Stefan Boltzmann foi definida como 5,669x10^{-8} W/(m²^{o}C) e o zero absoluto da temperatura como -273,15 ºC. Diferente da recomendação da ABNT NBR 14323:2013 em utilizar uma emissividade constante de 0,7, para simular os ensaios de laboratório foram seguidas as recomendações de Wong (2005) e Cedeno et al. (2011) onde considera-se as condições e características do forno de ensaios durante a análise.

A Equação (10.1) indica a emissividade equivalente, que é dependente da temperatura dos gases e do elemento estrutural, ou seja, varia durante a análise.

$$\varepsilon_{eq} = \frac{\varepsilon_g T_g^4 - \alpha_g T_s^4}{T_g^4 - T_s^4} \quad \textbf{(10.1)}$$

Sendo o coeficiente $\alpha_g$dado pela Equação (10.2) e ε_g pela Equação (10.3).

$$\alpha_g = X_1 T_s^{X_2} + T_g^{X_3} \quad \textbf{(10.2)}$$

$$\varepsilon_g = X_4 + X_5 T_g \quad \textbf{(10.3)}$$

Na Equação (10.2) e Equação (10.3) os coeficientes X_1 a X_5 (Tabela 10.3) foram definidos empiricamente por Wong (2005) em função do comprimento L_m, dado pela Equação (10.4) e relacionado ao comprimento L, largura w e altura h do forno.

$$L_m = \frac{1.8\, h\, w}{h + w + \frac{h\, w}{L}} \tag{10.4}$$

Tabela 10.3 – Fatores X_1 a X_5 (Fonte: Wong, 2005).

L_m	X_1	X_2	X_3	X_4	X_5
0,5	6,432499	-1,02349	0,499770	0,302	-0,000118
1	4,249018	-0,91824	0,493256	0,373	-0,000135
2	2,578352	-0,77310	0,457589	0,443	-0,000140
3	1,845211	-0,68851	0,441610	0,479	-0,000133
4	1,448499	-0,63266	0,434033	0,501	-0,000124
5	1,202279	-0,59368	0,431480	0,517	-0,000115
6	1,036789	-0,56531	0,431575	0,527	-0,000106

As análises numéricas de vigas mistas de Cedeno et al. (2011) indicam que as expressões de Wong (2005) são adequadas para estimar a emissividade equivalente no forno, simulando condições mais realistas.

A temperatura ambiente foi definida de acordo com as medições da temperatura do forno registradas pelos pesquisadores e reproduzidas na Tabela 10.2. Tais temperaturas são próximas às recomendadas pela curva ISO 834.

O passo subsequente do modelo consiste em, a partir do campo de temperatura encontrado na análise térmica, realizar análise estrutural da mesma malha de elementos finitos, porém agora com elementos finitos prismáticos de primeira ordem e integração reduzida, denominados C3D8R dentro do programa. A redução das propriedades mecânicas do aço e do concreto seguiu o descrito no Anexo E, conforme recomendações da ABNT NBR 14323:2013 e ABNT NBR 15200:2012. Os conectores de cisalhamento e a malha de armadura passiva foram modelados como elementos de barra conectados à mesa superior do perfil de aço e à laje de concreto, conforme ilustrado pela Figura 10.4 e Figura 10.5.

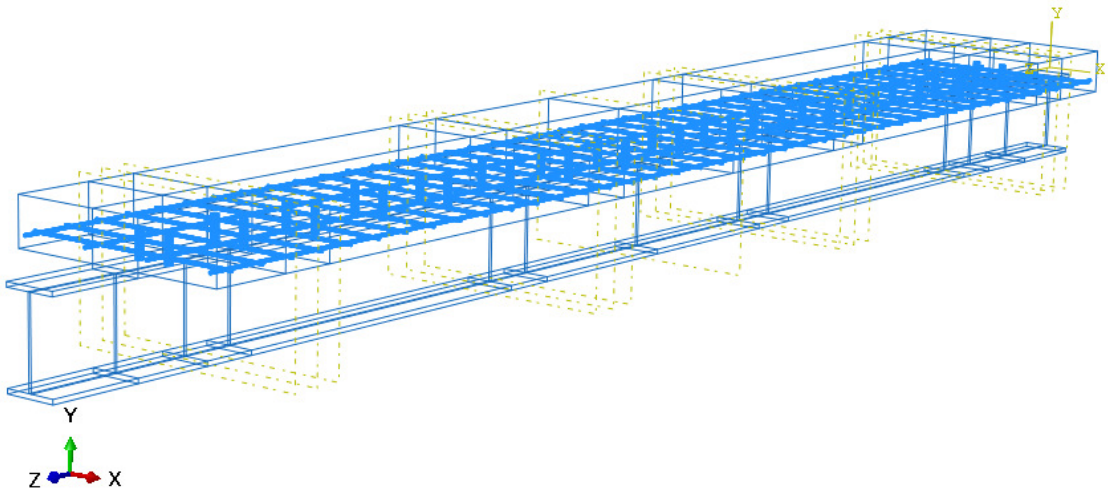


Figura 10.4 – Vista interna detalhando modelagem da malha de armadura.

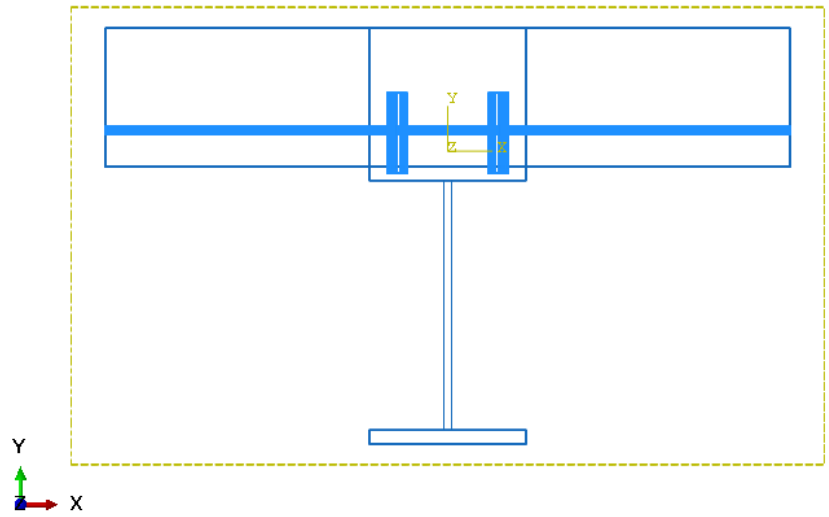


Figura 10.5 – Corte transversal detalhando modelagem da malha de armadura.

O ABAQUS possui diversos modelos constitutivos para representar o comportamento mecânico de diferentes tipos de materiais. O aço foi representado pelo denominado *Classical Metal Plasticity* ou Plasticidade Clássica dos Metais, onde é necessário prover os dados de tensões reais em função das deformações específicas reais (ou logarítmicas), ambas em função da temperatura. O comportamento do concreto foi representado pelo denominado *Concrete Damaged Plasticity* ou Plasticidade com Dano do Concreto, além dos diagramas de tensão e deformação distintos para tração e compressão (ambos em função da temperatura)

os demais parâmetros de entrada que caracterizam o comportamento para estados de tensão diferentes do uniaxial seguiram as recomendações de Kmiecik e Kaminski (2011).

As condições de contorno são tais que impedem o deslocamento vertical e transversal além de permitir a rotação de ambas as extremidades. A viga está livre para se deslocar longitudinalmente em um dos apoios. Cada uma das quatro forças concentradas relatadas nos ensaios foi distribuída na face superior da laje em uma área quadrada com lado igual à largura da mesa do perfil de aço, com o intuito de evitar concentração de tensões.

10.3 Resultados

Para verificar a validade do modelo foram comparadas as temperaturas obtidas ao longo do tempo pela análise térmica numérica, aqui desenvolvida, com as registradas no ensaio de laboratório. São apresentadas as temperaturas medidas na mesa superior, inferior e alma do perfil de aço e, em seguida, o deslocamento vertical (eixo y da Figura 10.3) calculado no meio do vão pela análise estrutural numérica, para comparação com os registros dos ensaios. Os itens 10.3.1 e 10.3.2 mostram os resultados obtidos para cada um dos ensaios reproduzidos.

10.3.1 Ensaio 15

Os gráficos apresentados na Figura 10.6, Figura 10.7 e Figura 10.8 apresentam a temperatura na mesa inferior, alma e mesa superior do perfil de aço encontradas na análise térmica, respectivamente, aqui desenvolvida, e comparam com os registros de Wainman e Kirby (1987) para o *ensaio 15*.

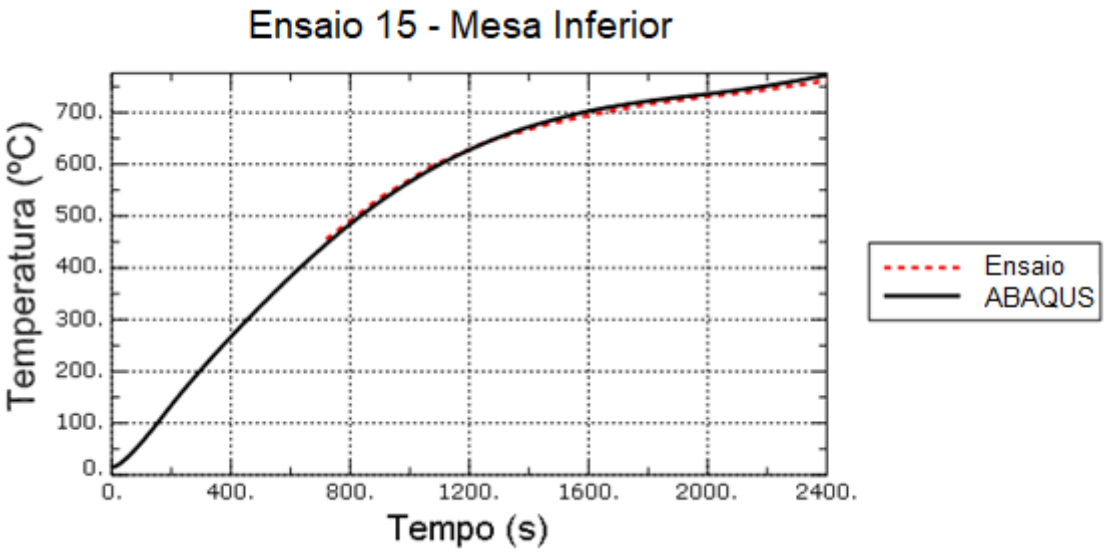


Figura 10.6 – Gráfico temperatura na mesa inferior x tempo, ensaio 15.

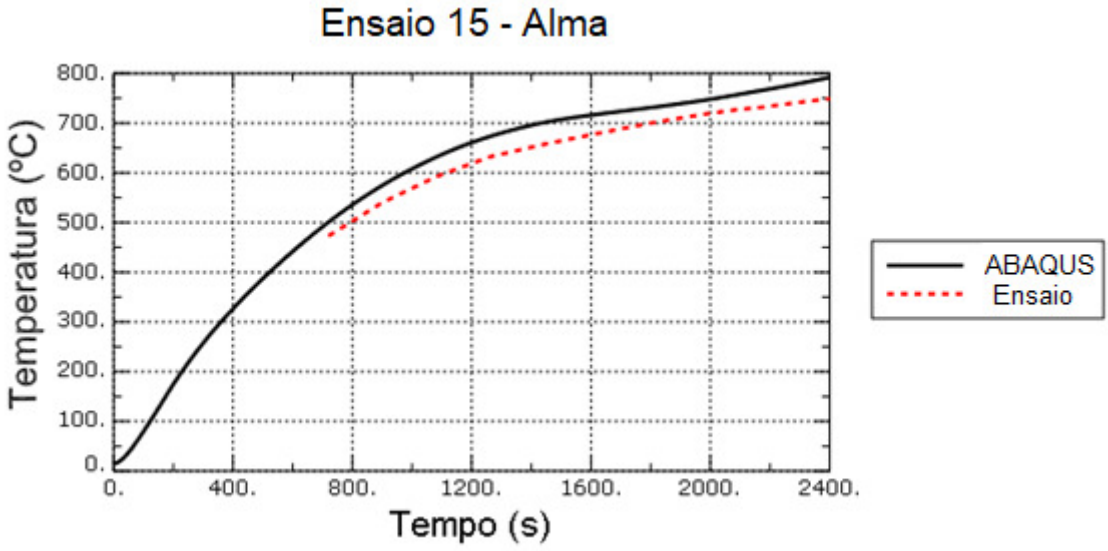


Figura 10.7 – Gráfico temperatura na alma x tempo, ensaio 15.

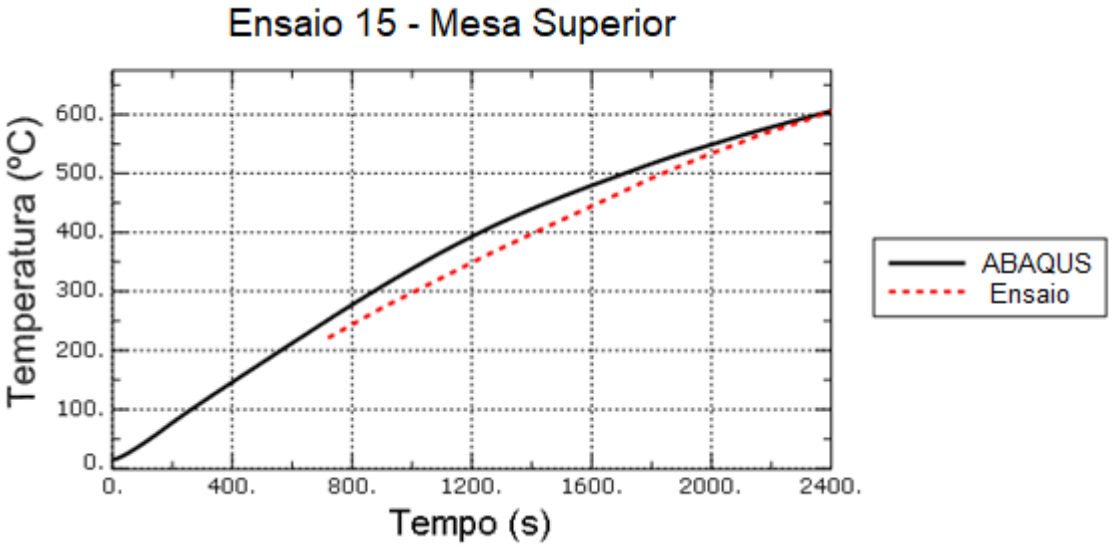


Figura 10.8 – Gráfico temperatura na mesa superior x tempo, ensaio 15.

Nota-se que o modelo numérico foi capaz de prever muito bem as temperaturas ao longo do perfil de aço, principalmente na mesa inferior. A alma e a mesa superior apresentaram, na análise térmica numérica, temperaturas ligeiramente superiores aos valores encontrados nos ensaios de laboratório.

O gráfico da Figura 10.9 registra o deslocamento vertical no meio do vão ao longo do tempo e a Figura 10.10 ilustra a situação deformada no final da análise.

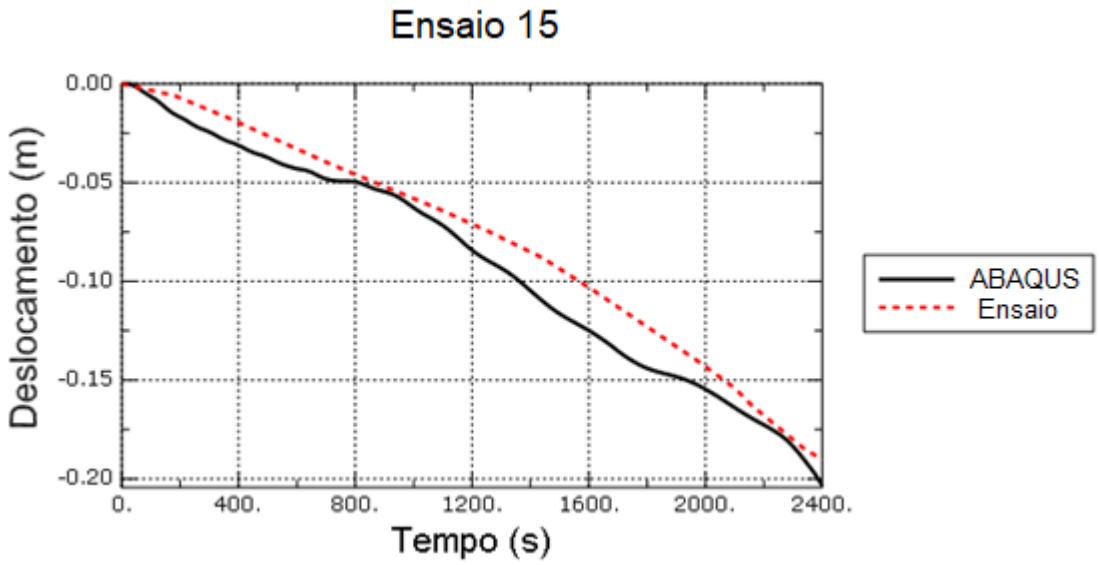


Figura 10.9 – Gráfico deslocamento no meio do vão x tempo, ensaio 15.

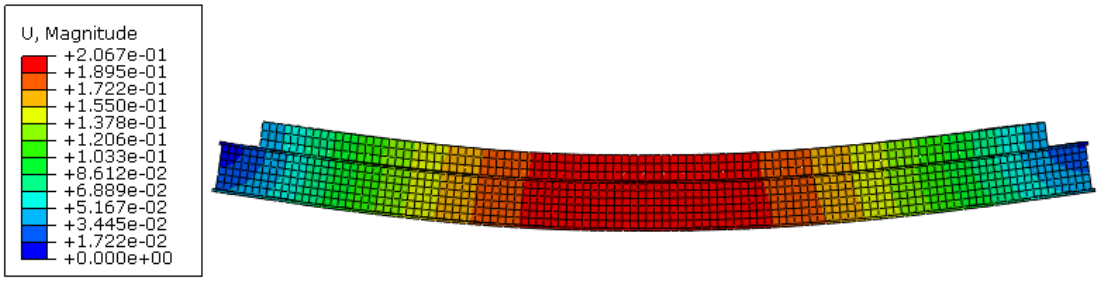


Figura 10.10 – Situação deformada do modelo no fim da análise, ensaio 15.

Conclui-se que análise estrutural, apesar de apresentar certas flutuações ao longo do tempo, representou bem o comportamento da viga mista durante a exposição ao fogo. O modelo numérico foi ligeiramente mais flexível que o ensaio durante toda a análise, provavelmente devido aos fatores utilizados na redução das propriedades mecânicas dos materiais em função da temperatura, terem seguido procedimentos normativos, que consideram margens de segurança.

10.3.2 Ensaio 16

Os gráficos da Figura 10.11, Figura 10.12 e Figura 10.13 registram a temperatura na mesa inferior, alma e mesa superior encontradas na análise térmica, respectivamente, e comparam com os registros de Wainman e Kirby (1987) para o *ensaio 16*.

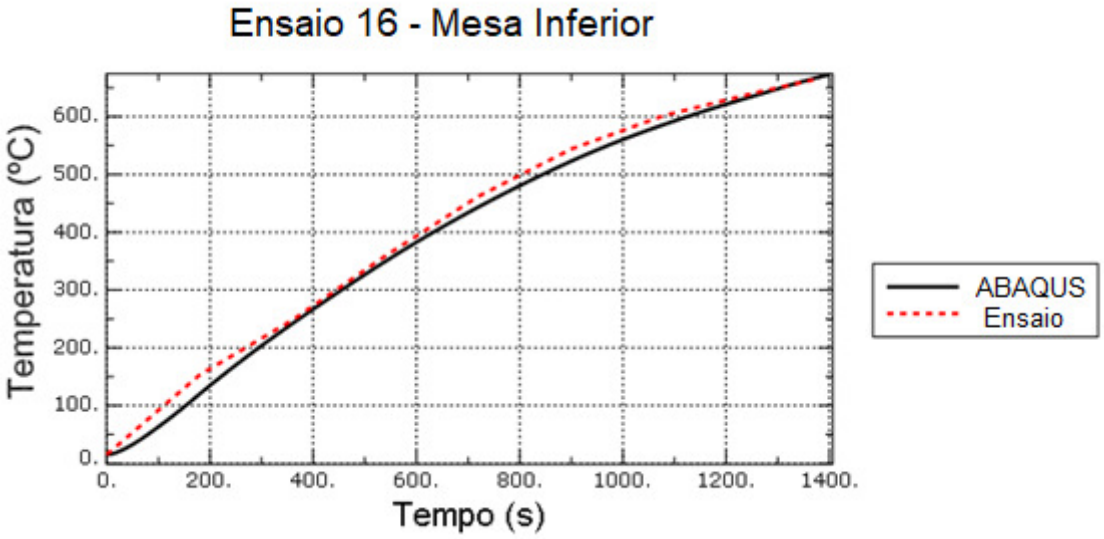


Figura 10.11 – Gráfico temperatura na mesa inferior x tempo, ensaio 16.

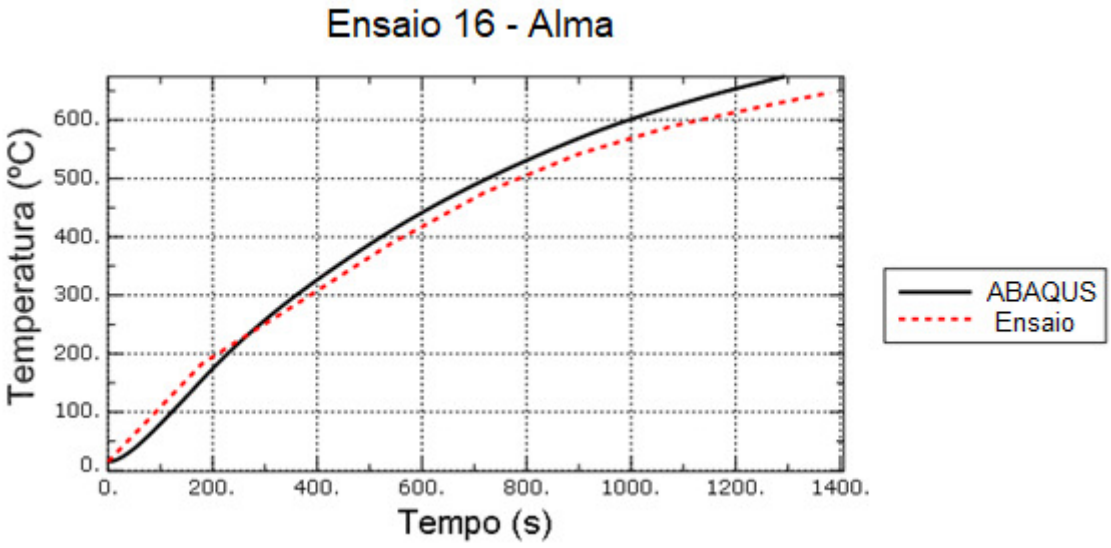


Figura 10.12 – Gráfico temperatura na alma x tempo, ensaio 16.

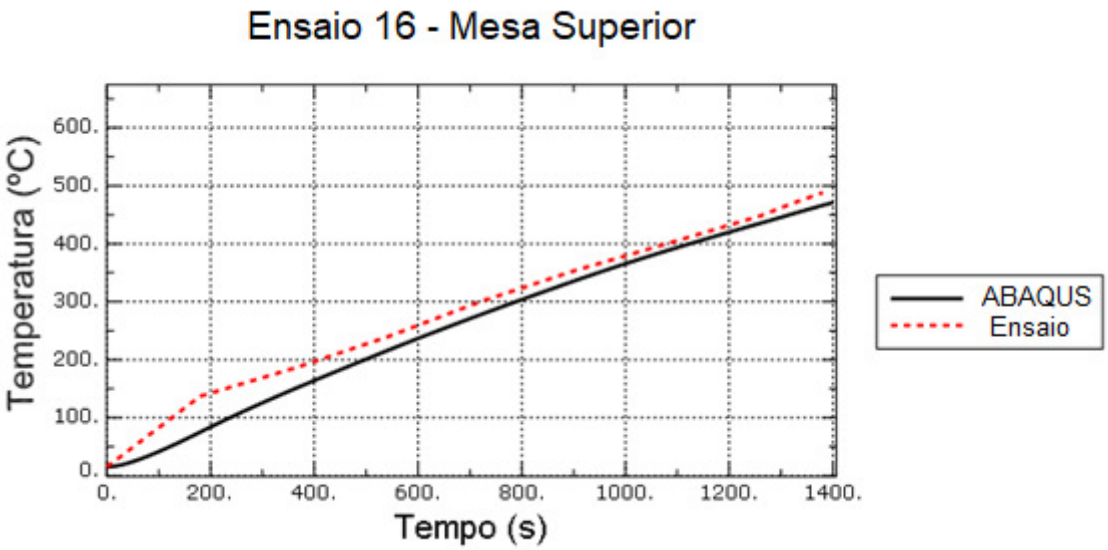


Figura 10.13 – Gráfico temperatura na mesa superior x tempo, ensaio 16.

Assim como o registrado no *ensaio 15* nota-se que o modelo numérico previu bem as temperaturas no perfil de aço, principalmente na mesa inferior.

O gráfico da Figura 10.14 registra o deslocamento vertical no meio do vão ao longo do tempo e a Figura 10.15 ilustra a situação deformada no final da análise.

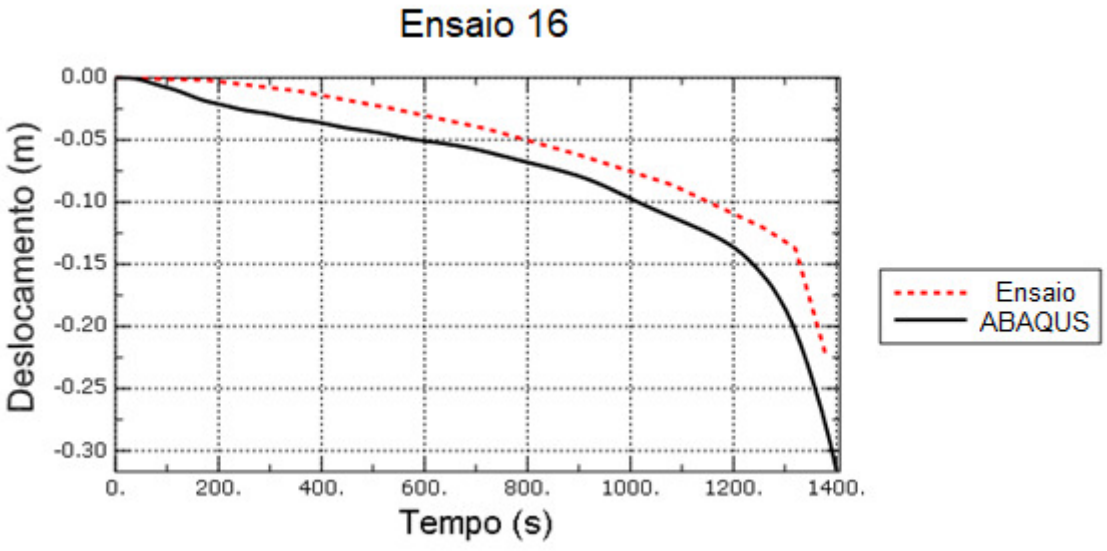


Figura 10.14 – Gráfico deslocamento no meio do vão x tempo, ensaio 16.

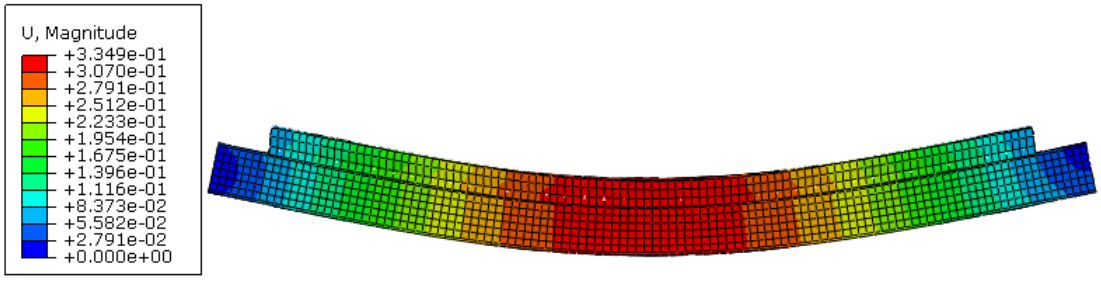


Figura 10.15 – Situação deformada do modelo próxima ao colapso, ensaio 16.

Assim como no *ensaio 15* a análise estrutural representou bem o comportamento da viga mista durante a exposição ao fogo sendo ligeiramente mais flexível, assim como no ensaio 15, novamente possivelmente devido os fatores redutores das propriedades mecânicas dos materiais em função da temperatura, terem seguido procedimentos normativos, que consideram margens de segurança. A ocorrência do colapso repentino do conjunto também foi capturada pelo modelo numérico em tempo muito próximo ao registrado no ensaio.

10.4 Conclusões

Dois modelos em elementos finitos foram desenvolvidos no programa de computador ABAQUS a fim de comparar os resultados com ensaios experimentais de vigas mistas de aço e concreto, sem revestimento contra fogo, submetidas a altas temperaturas, validando as técnicas utilizadas para os demais modelos no decorrer da Dissertação. Os resultados tanto da análise térmica como da análise estrutural apresentaram boas relações com os ensaios em laboratório, indicando que as propriedades dos materiais, densidade da malha e tipo de elemento finito, precisão numérica, condições de contorno e demais parâmetros adotados são suficientes para representar uma situação real. A única alteração a ser realizada é a restrição da laje, alma e mesa inferior do perfil em alguns modelos, afim de estudar a situação semicontínua proposta na Dissertação.

Durante a calibragem do modelo foi notável a diferença entre adotar a emissividade constante de 0,7 e a emissividade variável, conforme Equação (10.1), para simular o efeito das características do forno de ensaios. A emissividade

constante leva a temperaturas muito superiores às observadas nos experimentos, conforme gráfico da Figura 10.16, levando a resultados muito conservadores com ocorrência prematura do colapso. Contudo, visto os modelos desenvolvidos no decorrer da Dissertação não simularem ensaios em fornos e sim, representarem uma situação de projeto, a emissividade foi adotada constante com o valor de 0,7 para as demais análises.

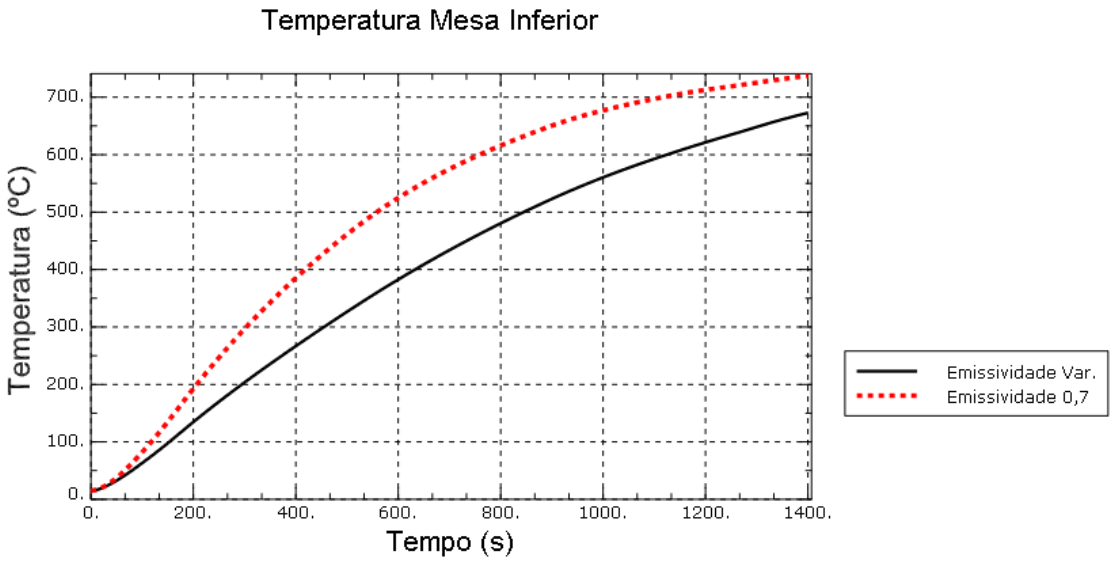


Figura 10.16 – Gráfico temperatura na mesa inferior x tempo, hipóteses para emissividade.

11 ANÁLISE DO COMPORTAMENTO DA VIGA SEMICONTÍNUA COM AUXÍLIO DE MODELO NUMÉRICO

11.1 Introdução

Com o objetivo de avaliar se a hipótese de desprezar os esforços indiretos causados pelo gradiente térmico no cálculo da capacidade resistente de vigas mistas semicontínuas sem revestimento contra fogo é razoável ou não, foram desenvolvidos modelos numéricos no programa de computador ABAQUS versão 6.12. As técnicas de modelagem aplicadas no capítulo 10 foram mantidas, sendo alteradas apenas as características geométricas, como dimensões dos elementos estruturais, e condições de contorno dos modelos. Nota-se que na validação do modelo a viga estudada possuía a característica de simplesmente apoiada, condição que foi alterada durante as análises numéricas deste capítulo.

Como já mencionado no item 10.1, com auxílio dos modelos numéricos é possível realizar análises térmicas não lineares tridimensionais e subsequente análise estrutural (cálculo de deslocamentos, deformações e tensões em função das condições de contorno) considerando o campo de temperatura encontrado, não linearidade geométrica, não linearidade das propriedades térmicas e mecânicas dos materiais e efeitos da dilatação térmica, gerando esforços solicitantes indiretos.

Foram desenvolvidos seis modelos com geometria distinta, alterando as dimensões do perfil de aço e laje que compõe a viga mista. Para cada um dos seis modelos foram analisadas três condições de contorno, sendo elas: simplesmente apoiada, biapoiada e semicontínua, totalizando 18 análises. O TRF do caso semicontínuo foi comparado ao encontrado pelo método simplificado, que seguiu recomendações normatizadas. O número de conectores, armadura negativa e carregamentos adotados foram calculados para serem compatíveis ao método simplificado, ou seja, garantindo interação completa à temperatura ambiente, desenvolvimento do máximo momento fletor negativo resistente e fator de carga igual a 0,7.

Além da comparação do comportamento estrutural entre as diferentes condições de contorno, a análise tem como objetivo avaliar o efeito do gradiente térmico, verificando se o mesmo gera um pico de momento fletor negativo na região

do apoio capaz de provocar o colapso da viga ou se a consideração das não linearidades geométricas e de material é suficiente para aliviar tal efeito nocivo.

Nesse capítulo os parâmetros adotados na modelagem numérica são descritos em detalhe permitindo ao máximo a reprodução dos modelos. Para melhor entendimento das nomenclaturas e passos adotados recomenda-se leitura do manual do usuário *Abaqus/CAE User's Manual* e *Abaqus/CAE Analysis User's Manual* da Dassault Systèmes, disponíveis livremente no endereço eletrônico http://abaqus.software.polimi.it/v6.12/index.html pertencente à Politécnica de Milão, Itália.

11.2 Modelos propostos

Os modelos numéricos desenvolvidos representam o caso de uma viga mista formada por um perfil de aço da Gerdau e laje de concreto maciça, ou seja, sem fôrma de aço incorporada, de 2 m de largura com interação garantida por conectores de cisalhamento do tipo pino com cabeça soldados à mesa superior do perfil de aço. A laje possui uma malha de armadura passiva formada por barras de aço dispostas tanto na longitudinal quanto na transversal e distanciadas 3 cm da face superior. O espaçamento longitudinal varia caso a caso para cada modelo e o espaçamento transversal é de 20 cm para todos os modelos.

Todas as unidades físicas utilizadas nos parâmetros de entrada seguem o S.I., com exceção da temperatura que foi definida em graus Celsius (ºC).

O carregamento térmico incide na face inferior da laje de concreto e em todas as faces do perfil de aço, com exceção da face superior da mesa superior, que se encontra em contato com a laje maciça. A temperatura ambiente inicia-se em 20 ºC e varia no tempo conforme curva ISO 834 (Equação (4.9)). O coeficiente de transferência de calor por convecção α_c foi definido constante e igual a 25 W/(m² ºC) e a emissividade constante e igual a 0,7, conforme recomendações da ABNT NBR 14323:2013 de modo a seguir as hipóteses adotadas no método simplificado. Não foram considerados efeitos de sombreamento.

O carregamento estático consiste em uma carga vertical uniformemente distribuída na área equivalente a todo comprimento da viga e largura igual à largura da mesa superior do perfil de aço b_f, aplicada sobre a face superior da laje. As restrições dos apoios representam condições perfeitamente elastoplásticas, simulando um apoio sobre uma viga de grandes dimensões ou pilar com revestimento contra fogo. Não existe qualquer tipo de elemento promovendo travamento intermediário da viga além da laje de concreto.

A Tabela 11.1 até Tabela 11.6 indicam as características de cada um dos modelos realizados, sendo:

d a altura do perfil de aço;

t_w a espessura da alma do perfil de aço;

b_f a largura da mesa do perfil de aço;

t_f a espessura da mesa do perfil de aço;

t_c a espessura da laje de concreto;

b a largura da laje colaborante;

ρ a máxima taxa de armadura calculada para o TRF encontrado pelo método simplificado;

$\emptyset$ o diâmetro das barras que formam a malha de aço;

s o espaçamento transversal das barras que formam a malha de aço;

L o vão da viga entre apoios;

n_{cs} o número de conectores de cisalhamento necessários para garantir interação completa à temperatura ambiente;

M_{Rd}^{+} o momento fletor positivo resistente calculado para temperatura ambiente;

q o carregamento uniformemente distribuído que resulta no momento fletor solicitante com valor igual a M_{Rd}^{+} para o caso biapoiado;

$0{,}7\,q$ 70% do valor de q, representando um fator de carga utilizado em situação de incêndio;

“TRF simpl.” o tempo de resistência ao fogo encontrado pelo método simplificado para o fator de carga de 0,7 e as mesmas características geométricas propostas.

Tabela 11.1 – Características do modelo 1.

MODELO 1		
Perfil W250x25,3		
d	257	mm
t_w	6,1	mm
b_f	102	mm
t_f	8,4	mm
Laje		
t_c	8	cm
b	200	cm
ρ	0,48	%
∅	10	mm
s	10	cm
Características		
L	5,0	m
n_{cs}	20	un.
M_{Rd}^{+}	194,2	kN.m
q	62,1	kN/m
0,7q	43,5	kN/m
TRF simpl.	<15	min

Tabela 11.2 – Características do modelo 2.

MODELO 2		
Perfil W460x106,0		
d	469	mm
t_w	12,6	mm
b_f	194	mm
t_f	20,6	mm
Laje		
t_c	8	cm
b_{ef}	200	cm
ρ	2,41	%
∅	20	mm
s	8	cm
Características		
L	8,0	m
n_{cs}	60	un.
M_{Rd}^{+}	1094,1	kN.m
q	136,8	kN/m
0,7q	95,7	kN/m
TRF simpl.	22	min

Tabela 11.3 – Características do modelo 3.

MODELO 3		
Perfil W530x85,0		
d	535	mm
t_w	10,3	mm
b_f	166	mm
t_f	16,5	mm
Laje		
t_c	12	cm
b	200	cm
ρ	1,32	%
∅	20	mm
s	10	cm
Características		
L	8,0	m
n_{cs}	68	un.
M_{Rd}^{+}	1141,1	kN.m
q	142,6	kN/m
0,7q	99,8	kN/m
TRF simpl.	18	min

Tabela 11.4 – Características do modelo 4.

MODELO 4		
Perfil W250x89,0		
d	260	mm
t_w	10,7	mm
b_f	256	mm
t_f	17,3	mm
Laje		
t_c	12	cm
b	200	cm
ρ	1,36	%
∅	20	mm
s	9	cm
Características		
L	5,0	m
n_{cs}	72	un.
M_{Rd}^{+}	712,2	kN.m
q	227,9	kN/m
0,7q	159,5	kN/m
TRF simpl.	25	min

Tabela 11.5 – Características do modelo 5.

MODELO 5		
Perfil W360x51,0		
d	355	mm
t_w	7,2	mm
b_f	171	mm
t_f	11,6	mm
Laje		
t_c	18	cm
b	200	cm
ρ	0,52	%
∅	16	mm
s	10	cm
Características		
L	8,0	m
n_{cs}	40	un.
M_{Rd}^{+}	658,1	kN.m
q	82,3	kN/m
0,7q	57,6	kN/m
TRF simpl.	17	min

Tabela 11.6 – Características do modelo 6.

MODELO 6		
Perfil W610x174,0		
d	616	mm
t_w	14,0	mm
b_f	325	mm
t_f	21,6	mm
Laje		
t_c	18	cm
b_{ef}	200	cm
ρ	1,68	%
∅	25	mm
s	8	cm
Características		
L	12,0	m
n_{cs}	132	un.
M_{Rd}^{+}	2720,7	kN.m
q	151,1	kN/m
0,7q	105,8	kN/m
TRF simpl.	25	min

11.3 Geometria

A geometria do modelo conta com três partes distintas. A primeira parte representa a seção da viga mista utilizando elementos geométricos sólidos tridimensionais, sendo composta pelo perfil de aço e laje de concreto maciça, de acordo com a Figura 11.1.

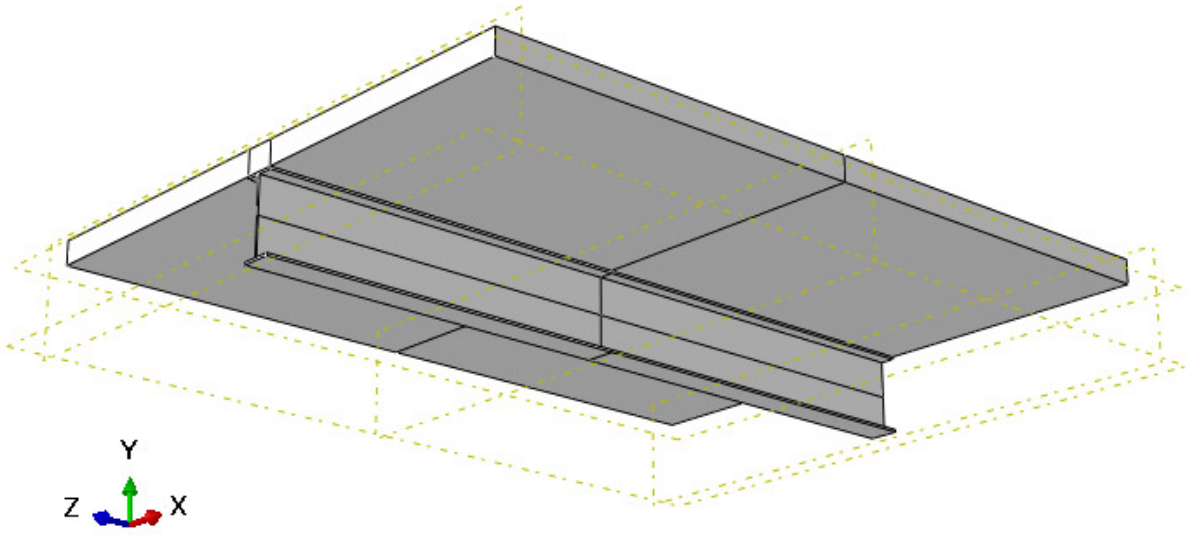


Figura 11.1 – Geometria da viga mista.

A segunda parte representa a malha de armadura passiva utilizando elementos geométricos lineares tridimensionais, ilustrada na Figura 11.2.

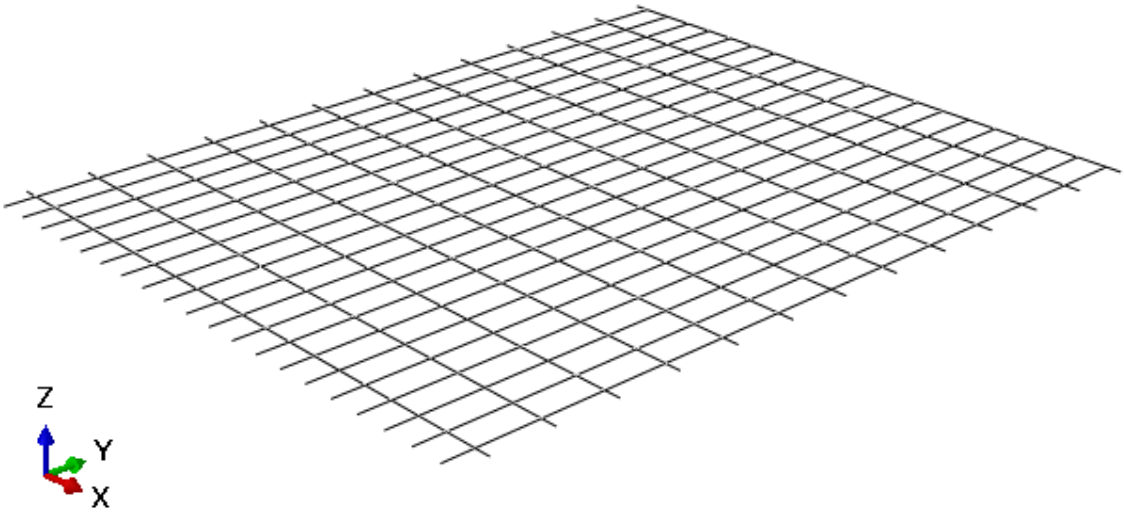


Figura 11.2 – Geometria da armadura passiva.

A terceira parte representa os conectores de cisalhamento utilizando também elementos geométricos lineares tridimensionais, ilustrados na Figura 11.3.

Figura 11.3 – Geometria dos conectores de cisalhamento.

A interação entre as partes geométricas modeladas é dada em etapa posterior, descrita no item 11.3.2.

11.3.1 Propriedade dos materiais

As propriedades térmicas e mecânicas dos materiais seguiram todas as recomendações da ABNT NBR 14323:2013 e ABNT NBR 15200:2012, explicadas em detalhe no Anexo E.

Para o aço estrutural foram definidas as seguintes propriedades: calor específico, condutividade térmica, expansão térmica, densidade, elasticidade e plasticidade. O modelo constitutivo não linear escolhido para representar a plasticidade é denominado *Plastic*, onde são inseridas as curvas tensão x deformação em função da temperatura. É importante informar que os valores de tensão e deformação utilizados devem representar os valores reais, e não nominais, sendo a transformação definida pela Equação (11.1) e Equação (11.2).

$$\varepsilon = \ln(1 + \varepsilon_{nom}) \tag{11.1}$$

$$\sigma = \sigma_{nom}(1 + \varepsilon_{nom}) \tag{11.2}$$

Os valores nominais utilizados representam aço da classe ASTM A572 Gr. 50 com resistência ao escoamento de 345 MPa e resistência a ruptura de 450 MPa. O alongamento específico no início do escoamento foi definido como 0,2% e na ruptura em 15%. O material da malha de armadura passiva foi definido como aço da classe

CA50 com resistência ao escoamento de 500 MPa. O aço representando os conectores de cisalhamento possui resistência à ruptura de 450 MPa.

A Figura 11.4 indica os valores de tensão e deformação utilizados no modelo constitutivo do aço, algumas curvas de temperaturas foram omitidas para melhor visualização do gráfico.

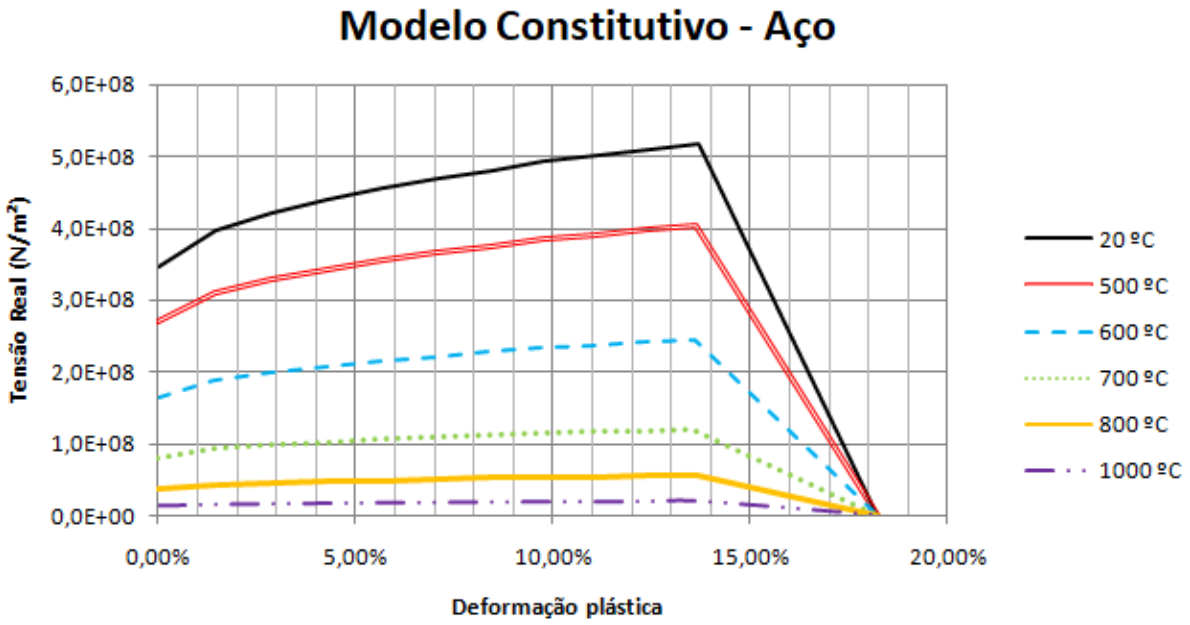


Figura 11.4 – Gráfico tensão real x deformação para o aço.

Para o concreto foram definidas as seguintes propriedades: calor específico, condutividade térmica, expansão térmica, densidade, elasticidade e, para o modelo constitutivo não linear, o denominado *Concrete Damaged Plasticity*. O concreto utilizado apresenta resistência à compressão de 30 MPa, a resistência à tração foi inserida seguindo a recomendação da ABNT NBR 6118:2014. Os demais parâmetros gerais seguiram as recomendações de Kmiecik, 2011, de acordo com a Tabela 11.7.

Tabela 11.7 – Parâmetros gerais do modelo constitutivo do concreto.

Ângulo de dilatação	Excentricidade	fb0/fc0	K	Parâmetro de viscosidade
40	0,1	1,16	0,5	0,0001

Segundo Kmiecik (2011) o ângulo de dilatação representa o ângulo de inclinação da superfície de ruptura em relação ao eixo hidrostático, fisicamente trata-

se do ângulo de atrito interno do concreto. A excentricidade é a razão entre a resistência à tração e compressão e o parâmetro fb0/fc0 representa a razão entre a resistência do concreto em um estado biaxial e o estado uniaxial. K representa uma modificação da forma cônica da superfície de ruptura do concreto no estado triaxial, onde o plano perpendicular ao eixo hidrostático deixa de ser um círculo, segundo Figura 1.1.

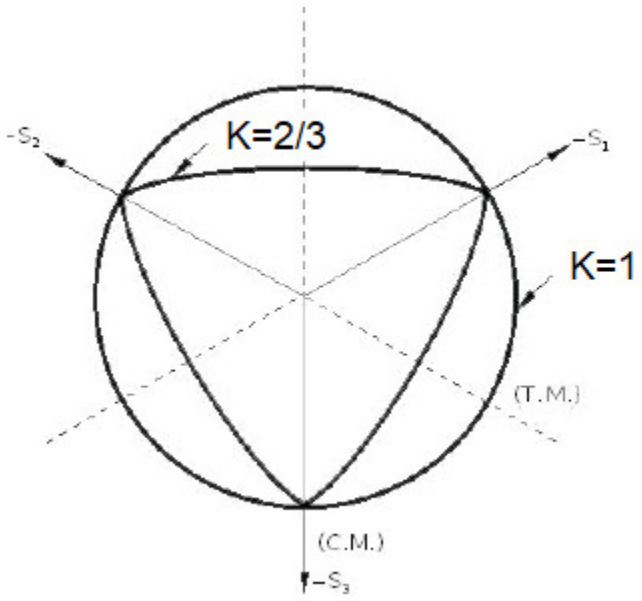


Figura 11.5 – Representação gráfica do parâmetro K (fonte: adaptado de Dassault Systèmes, 2012).

Por fim o parâmetro de viscosidade permite que valores de tensão fiquem fora da superfície de ruptura para pequenos incrementos de tempo, facilitando a convergência numérica durante a resolução dos modelos.

A Figura 11.6 e Figura 11.7 indicam os valores de tensão e deformação utilizados no modelo constitutivo do concreto, algumas curvas de temperaturas foram omitidas para melhor visualização do gráfico.

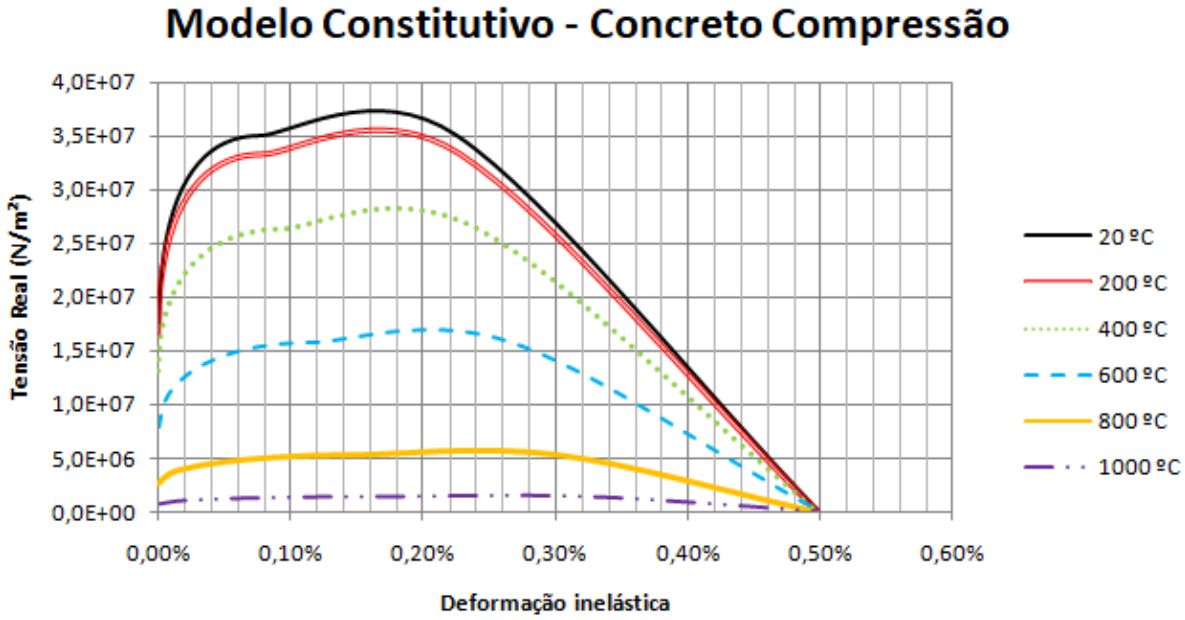


Figura 11.6 – Gráfico tensão real x deformação para o concreto a compressão.

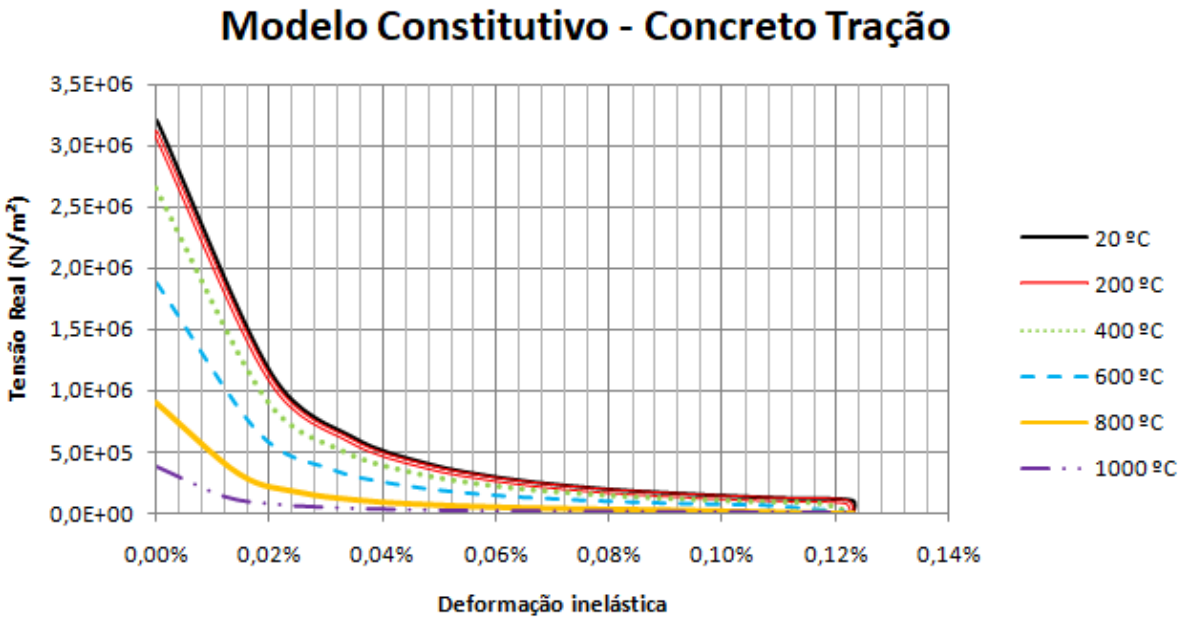


Figura 11.7 – Gráfico tensão real x deformação para o concreto a tração.

11.3.2 Interações e restrições

No módulo denominado interação (*Interaction*) é possível definir condições e restrições físicas às geometrias modeladas, além das interações térmicas entre as

partes e o ambiente. Existem dois tipos de interações térmicas disponíveis: convecção e radiação.

A convecção é definida, segundo nomenclatura do ABAQUS, como *Surface film condition* e segue a Equação (11.3).

$$q = -h(\theta - \theta^0) \quad \textbf{(11.3)}$$

Na Equação (11.3):

q é o fluxo de calor por convecção;

h é o coeficiente de referência;

θ é a temperatura na superfície;

θ^0 é a temperatura de referência.

Nota-se que existe semelhança entre a Equação (11.3) e a Equação (4.6) de modo que, para a análise térmica proposta, o coeficiente de referência h foi definido constante e igual a 25 e a temperatura de referência θ^0 varia com o tempo e segue a curva ISO 834 de acordo com a Equação (4.9).

A radiação é definida, segundo nomenclatura do ABAQUS, como *Surface radiation* e segue a Equação (11.4).

$$q = \sigma\varepsilon[(\theta - \theta^Z)^4 - (\theta^0 - \theta^Z)^4] \quad \textbf{(11.4)}$$

Na Equação (11.4):

q é o fluxo de calor por radiação;

σ é a constante de Stefan-Boltzmann;

ε é a emissividade;

θ é a temperatura na superfície;

θ^0é a temperatura de referência;

θ^Z é a temperatura do zero absoluto, de acordo com as unidades adotadas no modelo;

Também é possível notar semelhança entre a Equação (11.4) e a Equação (4.8). A emissividade adota é constante e igual a 0,7, o zero absoluto foi definido como -273,15 ºC e a temperatura de referência varia com o tempo seguindo a curva ISO 834.

Como restrições físicas definiu-se que a malha de armadura passiva e os conectores de cisalhamento, ambos modelados como partes separadas, estão embutidos nos elementos pertencentes à viga mista, utilizando a restrição denominada *Embedded Region.* Utilizando tal restrição o programa procura por relações geométricas entre os nós dos elementos embutidos e os nós dos elementos da região denominada "*host*", que no caso são os elementos da viga mista. Se um nó do elemento embutido é identificado como interno, seus graus de liberdade translacionais são restringidos aos nós do elemento "*host*", segundo interpolação. A vantagem de utilizar essa técnica é de que as malhas de elementos entre as diferentes partes modeladas não precisam possuir a mesma densidade, ou seja, os nós dos elementos das diferentes partes não precisam coincidir geometricamente (ter a mesma coordenada geométrica).

11.3.3 Condições de contorno

Para cada modelo realizado foram estudadas três condições de contorno distintas da viga mista: simplesmente apoiada, biapoiada e semicontínua. A Tabela 11.8 resume as hipóteses consideradas na região do apoio para cada um dos elementos que compõe a viga mista (mesa inferior, alma e mesa superior) para as diversas condições de contorno citadas.

Tabela 11.8 – Condições de contorno consideradas em cada modelo.

Elemento	Condição		
	Simples. Apoiada	**Biapoiada**	**Semicontínua**
Laje	Livre	Restringida Vertical e Axial	Restringida Vertical e Axial
Mesa superior	Livre	Livre	Livre
Alma	Restringida Vertical	Restringida Vertical e Axial	Restringida Vertical e Axial
Mesa inferior	Livre	Livre	Restringida Vertical e Axial

A condição simplesmente apoiada visa avaliar o comportamento da viga na situação hipotética de uma análise simplificada, onde não são consideradas forças axiais indiretas resultadas da dilatação térmica ou efeitos de catenária devido às grandes deformações. Tal condição dificilmente é encontrada na prática, principalmente em vigas de piso de edifícios, devido à complexidade dos elementos de ligação envolvidos.

A condição biapoiada avalia uma viga mista com a alma restringida na direção vertical e axial. A mesa colaborante de concreto também é restringida, simulando a continuidade da laje, porém com uma malha de armadura passiva mínima, formada por barras de 5 mm de diâmetro comumente encontrada em malhas antifissuração. A ideia aqui é considerar as condições mais comuns encontradas em uma viga de piso de um edifício, onde existe apenas ligação da alma do perfil com a viga principal de apoio ou pilar e malha antifissuração mínima. Comparando à condição simplesmente apoiada é possível avaliar se, ao considerar as reais disposições construtivas, os resultados são próximos das hipóteses utilizadas no cálculo estrutural simplificado para uma viga biapoiada.

A condição semicontínua considera, além das restrições da condição biapoiada, restrição da mesa inferior do perfil de aço e aumento da armadura longitudinal presente na laje de concreto de acordo com o cálculo simplificado, conforme especificações de cada modelo definidas no item 11.2. Comparando os resultados dessa condição ao caso biapoiado é possível verificar o impacto da restrição da mesa inferior e do aumento da taxa de armadura na laje no comportamento da viga mista durante um incêndio.

As vigas mistas foram carregadas verticalmente na face superior da laje por um carregamento uniformemente distribuído na área equivalente a todo comprimento da viga e largura igual à largura da mesa superior do perfil de aço b_f, resultando nos carregamentos descritos no item 11.2. O carregamento foi aplicado em etapa anterior à aplicação do campo de temperatura encontrado na análise térmica.

Adicionalmente, uma força horizontal equivalente a 0,1% da carga vertical foi aplicada na mesa inferior do perfil de aço, visando criar uma imperfeição geométrica

de modo a impedir a convergência numérica do modelo para um equilíbrio classificado como instável.

11.3.4 Malha de elementos finitos

A malha de elementos finitos utilizada é gerada de forma automática pelo programa de acordo com as geometrias modeladas. Foi admitido tamanho aproximado de 5 cm para os elementos, resultando em malhas com densidade semelhantes à utilizada na validação do modelo, conforme ilustração da Figura 11.8.

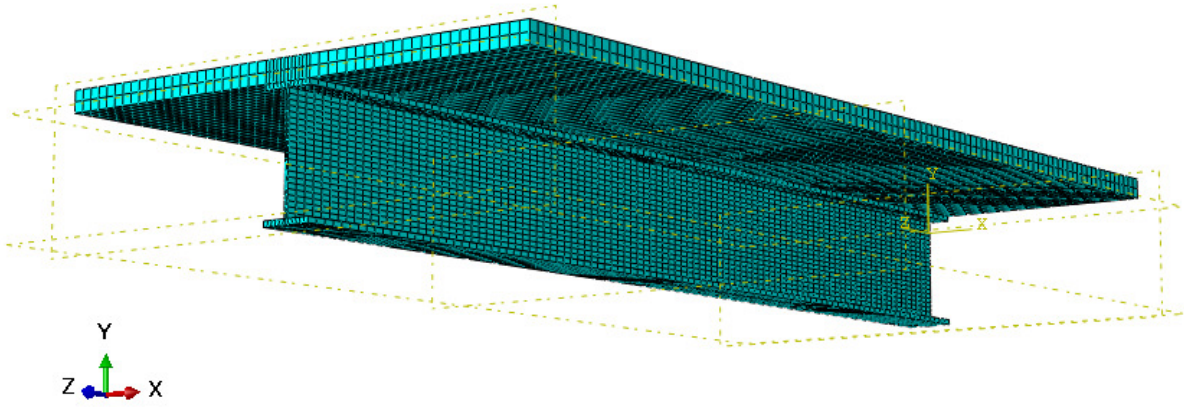


Figura 11.8 – Representação da densidade da malha de elementos.

Para a análise térmica foram utilizados elementos denominados DC3D20, na análise estrutural C3D8R para os elementos sólidos e B31 para os elementos lineares de barras (conectores e malha de armadura passiva). O ABAQUS não possui elementos lineares para análise térmica, de modo que as temperaturas nos conectores de cisalhamento foram inseridas de maneira direta como 80% da temperatura da mesa superior do perfil de aço encontrada na análise térmica, segundo recomendação da ABNT NBR 14323:2013. As camadas superiores da laje não ultrapassaram 200 ºC em nenhuma análise, portanto os elementos lineares de barra que formam a malha de armadura não tiveram as propriedades mecânicas alteradas pela temperatura durante a análise.

11.3.5 Análises

A primeira etapa consiste na análise térmica que irá determinar as temperaturas nodais, respeitando as interações térmicas definidas e as propriedades térmicas dos materiais. A análise é realizada para um tempo total de 40 minutos visto não ser esperado, pelo método simplificado, TRFs superiores a 30 minutos, havendo assim uma folga no tempo de análise. A não convergência numérica, geralmente associada a elementos excessivamente distorcidos, é o único critério automático para término prematuro da análise, sendo que não foi inserida nenhuma outra condição.

Como resultado da análise térmica será apresentado gráfico indicando a variação de temperatura ao longo da altura do perfil de aço para intervalos crescentes no tempo, sendo possível identificar se o gradiente térmico acentua-se ou não com o desenvolvimento do incêndio.

A segunda etapa avalia o comportamento estrutural da viga mista no decorrer do tempo. O campo de temperaturas encontrado na primeira análise é inserido como um campo pré-definido (*Predefined Field*) e é utilizado para determinar as propriedades mecânicas de cada elemento no decorrer do tempo. As diferentes condições de contorno foram avaliadas com três análises distintas para cada modelo proposto.

Como resultados da análise estrutural são comparados os deslocamentos no meio de vão para cada condição de contorno, sendo possível identificar o impacto das restrições impostas no comportamento da viga mista durante um incêndio. Também foi avaliada a tensão na mesa inferior do perfil de aço ao longo do vão no caso semicontínuo, a ideia é verificar a distribuição dos momentos fletores na evolução do incêndio-padrão, avaliando se os momentos fletores negativos se intensificam na região do apoio ou não.

11.4 Resultados

Os resultados das análises numéricas propostas apresentados neste capítulo têm o objetivo de verificar o impacto causado pela consideração da semicontinuidade no comportamento estrutural de vigas mistas de aço e concreto.

São avaliados ainda os efeitos de esforços indiretos provenientes do gradiente térmico e as correlações com o método simplificado seguindo procedimentos normativos.

11.4.1 Análise térmica

Como resultados da análise térmica, os gráficos da Figura 11.9 até a Figura 11.14 ilustram a distribuição de temperatura ao longo da altura do perfil de aço para cada um dos seis modelos. O eixo das abscissas representa a distância a partir da face inferior da mesa inferior até a face superior da mesa superior, sendo a coordenada zero o ponto mais baixo do perfil. Cada uma das curvas indica os valores encontrados no decorrer do tempo de análise, sendo possível avaliar as alterações durante evolução do incêndio-padrão.

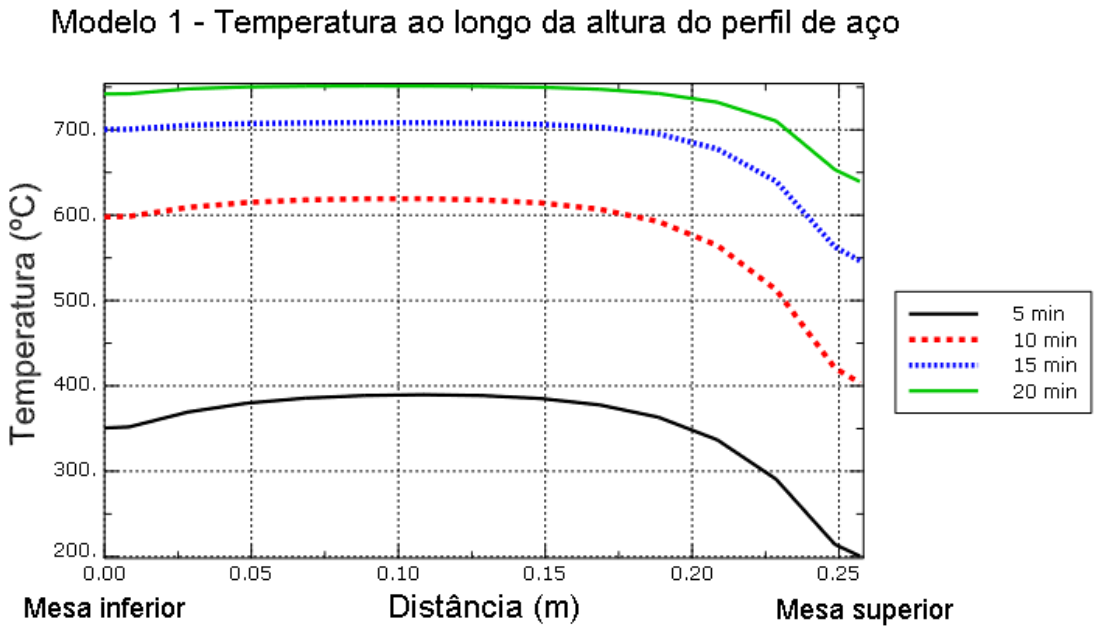


Figura 11.9 – Gráfico temperatura x altura do perfil, modelo 1.

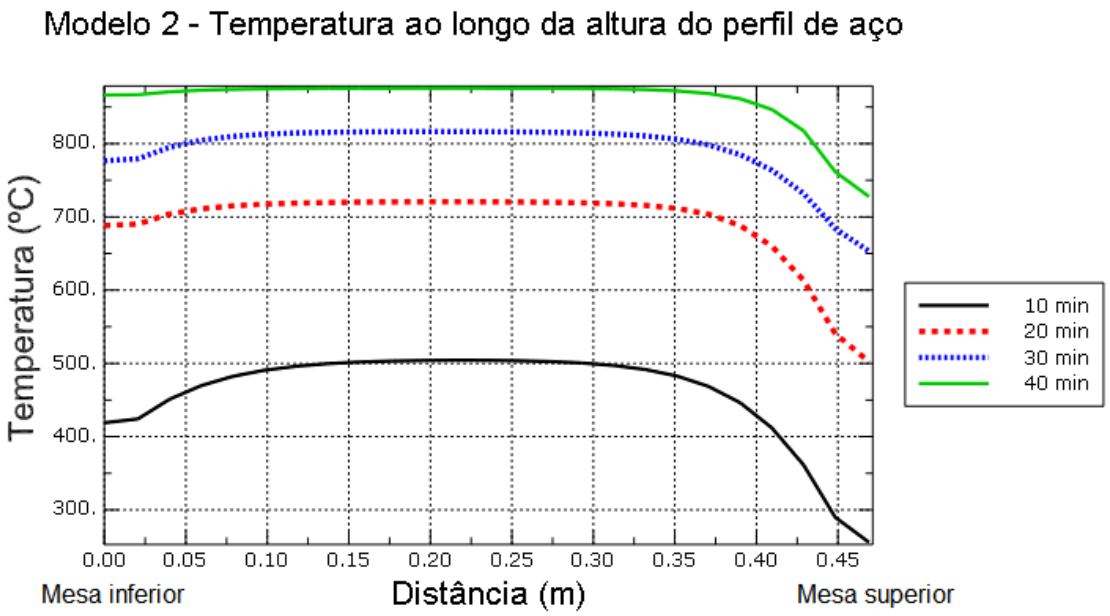


Figura 11.10 – Gráfico temperatura x altura do perfil, modelo 2.

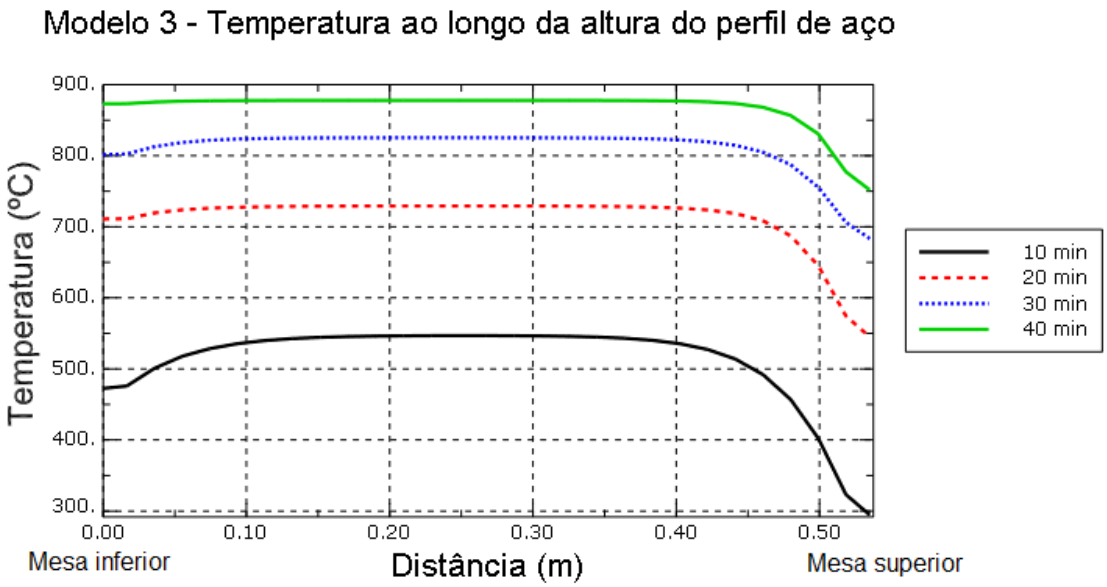


Figura 11.11 – Gráfico temperatura x altura do perfil, modelo 3.

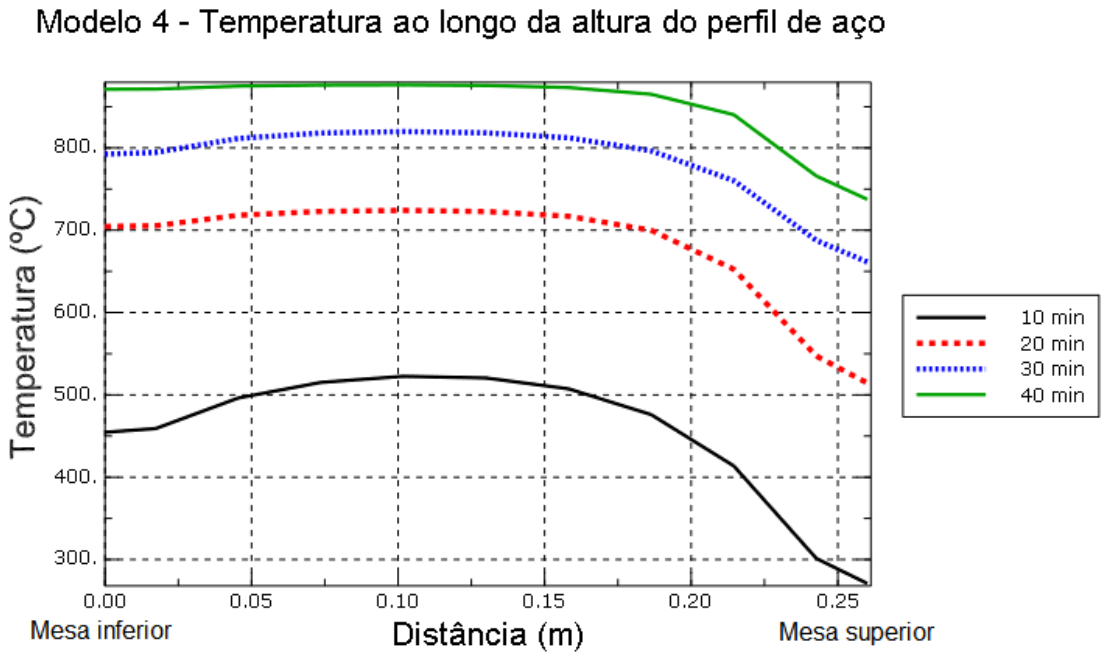


Figura 11.12 – Gráfico temperatura x altura do perfil, modelo 4.

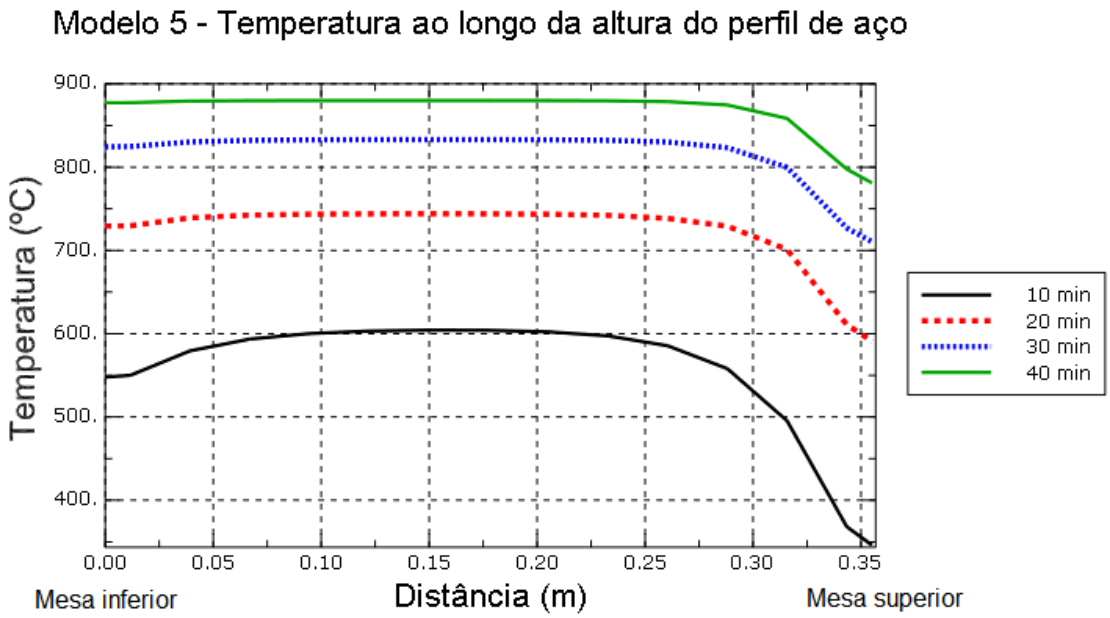


Figura 11.13 – Gráfico temperatura x altura do perfil, modelo 5.

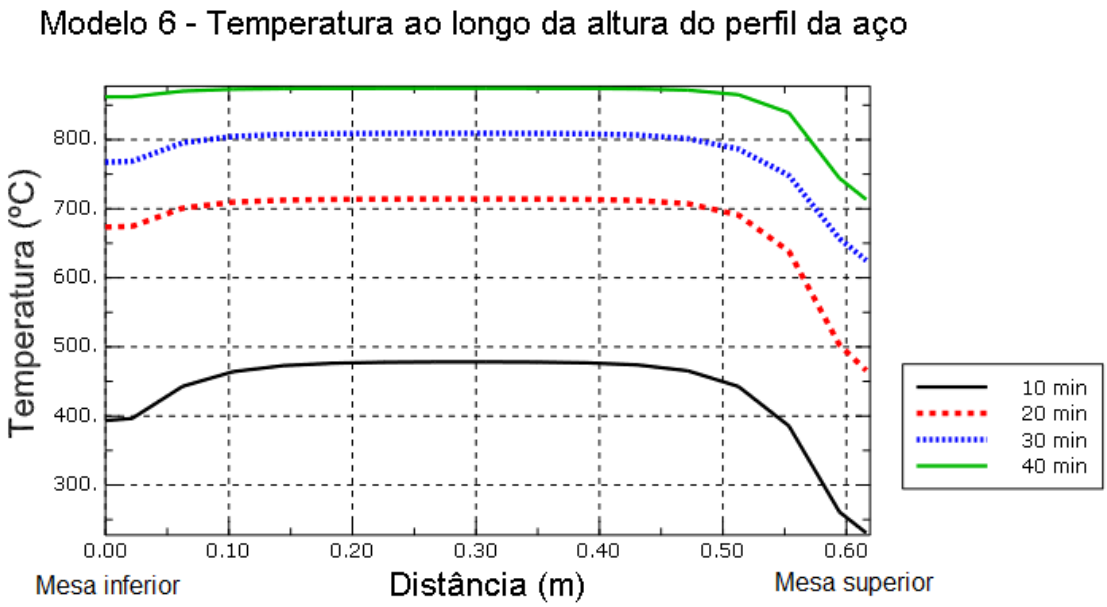


Figura 11.14 – Gráfico temperatura x altura do perfil, modelo 6.

Para facilitar a visualização e comparação da evolução da distribuição de temperaturas ao longo do tempo, os gráficos da Figura 11.15 até a Figura 11.20 apresentam os valores normalizados de temperatura, ou seja, para cada coordenada o valor de temperatura foi dividido pela raiz quadrada da soma dos quadrados de todos os valores, padronizando os resultados.

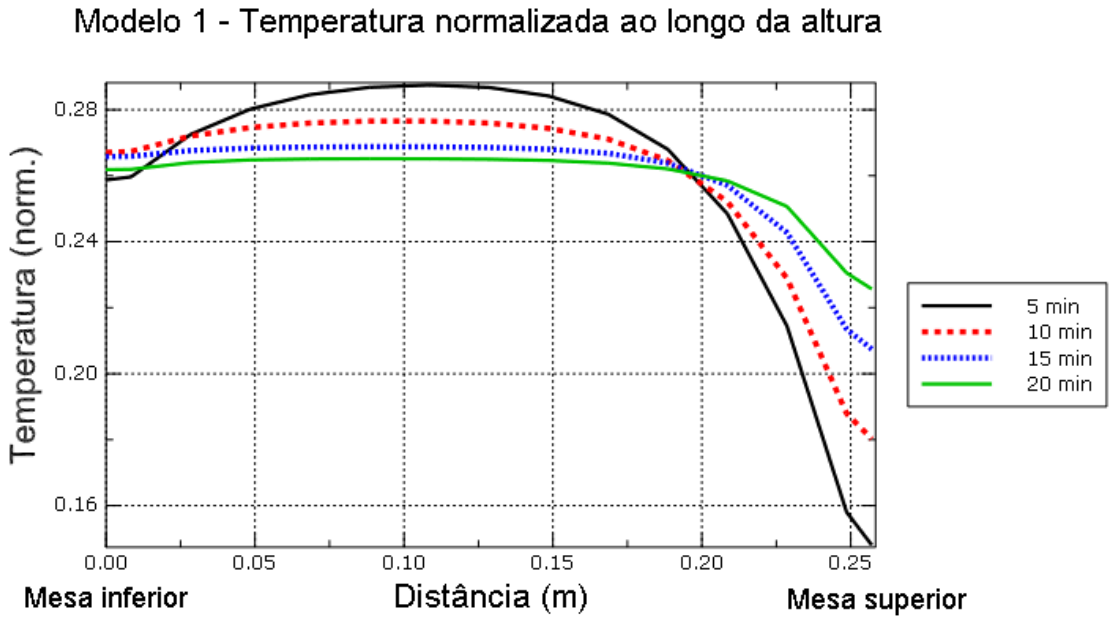


Figura 11.15 – Gráfico temperatura normalizada x altura do perfil, modelo 1.

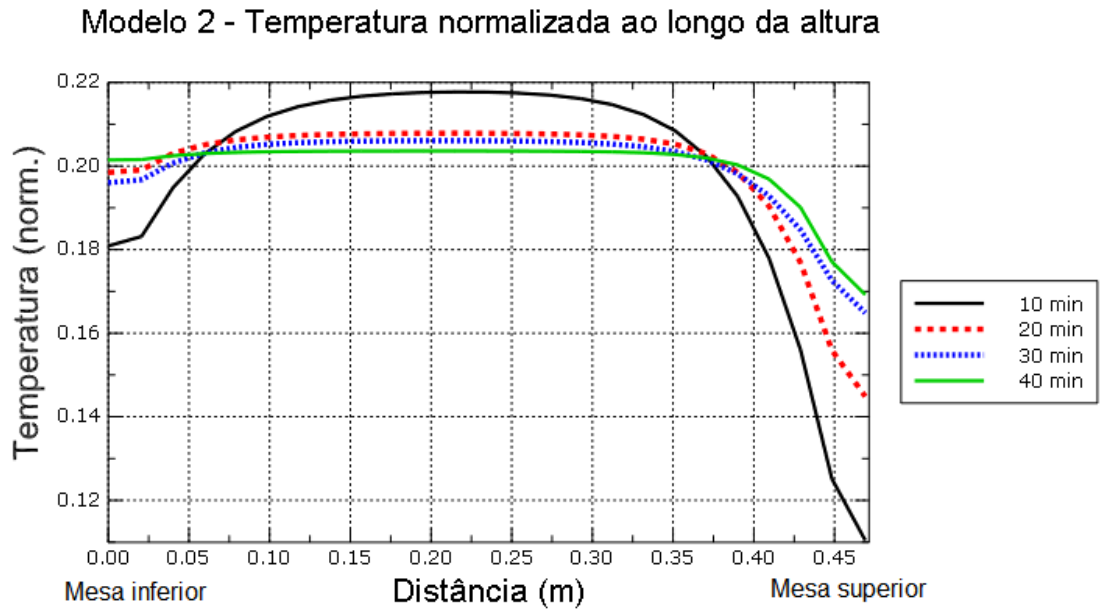


Figura 11.16 – Gráfico temperatura normalizada x altura do perfil, modelo 2.

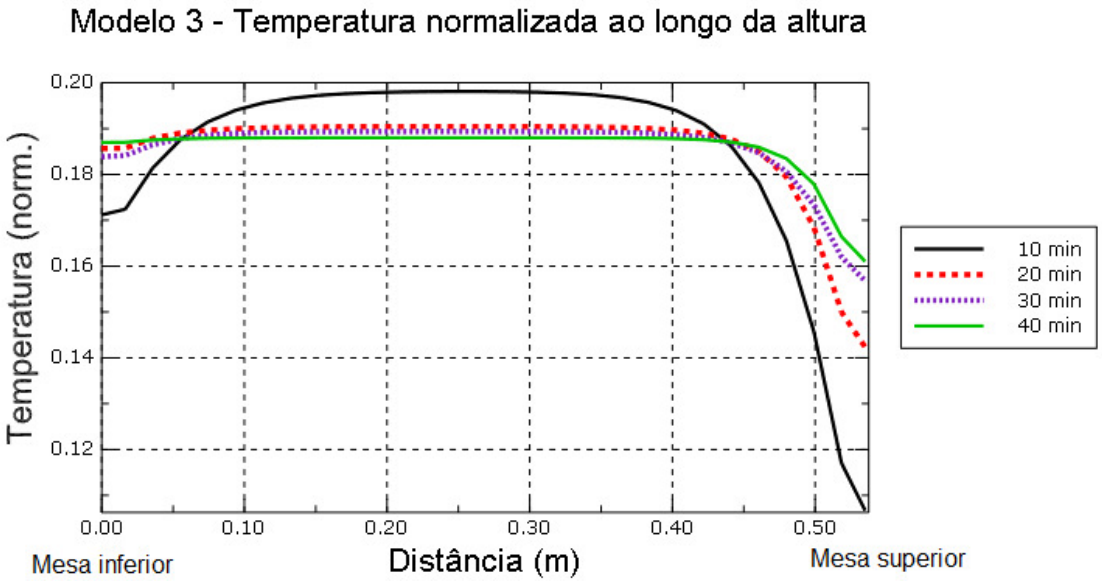


Figura 11.17 – Gráfico temperatura normalizada x altura do perfil, modelo 3.

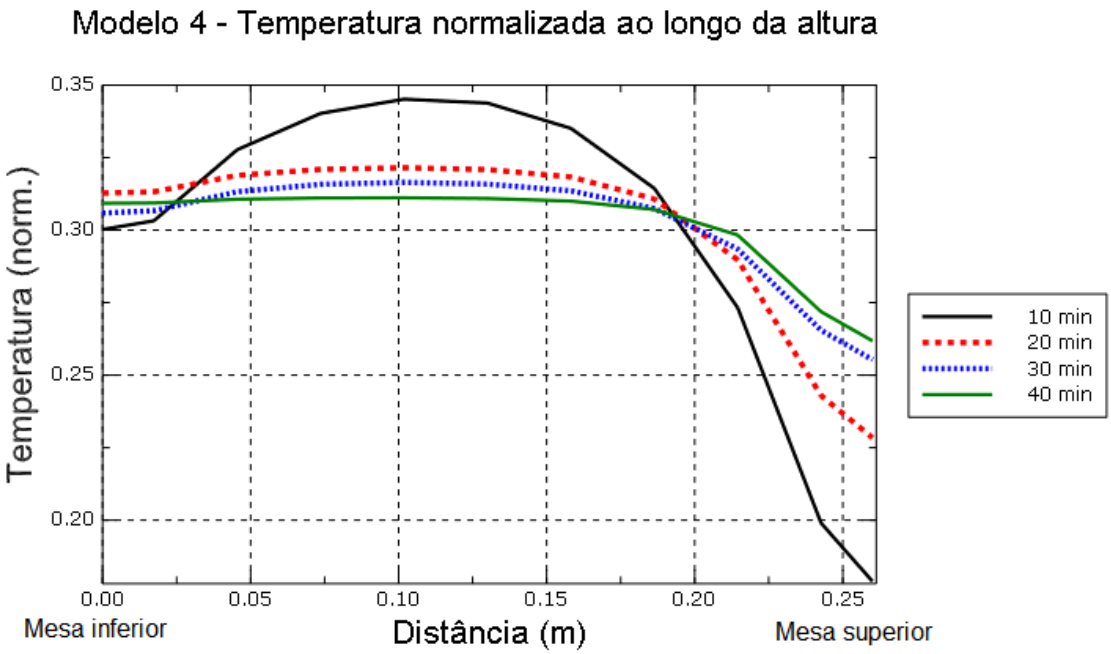


Figura 11.18 – Gráfico temperatura normalizada x altura do perfil, modelo 4.

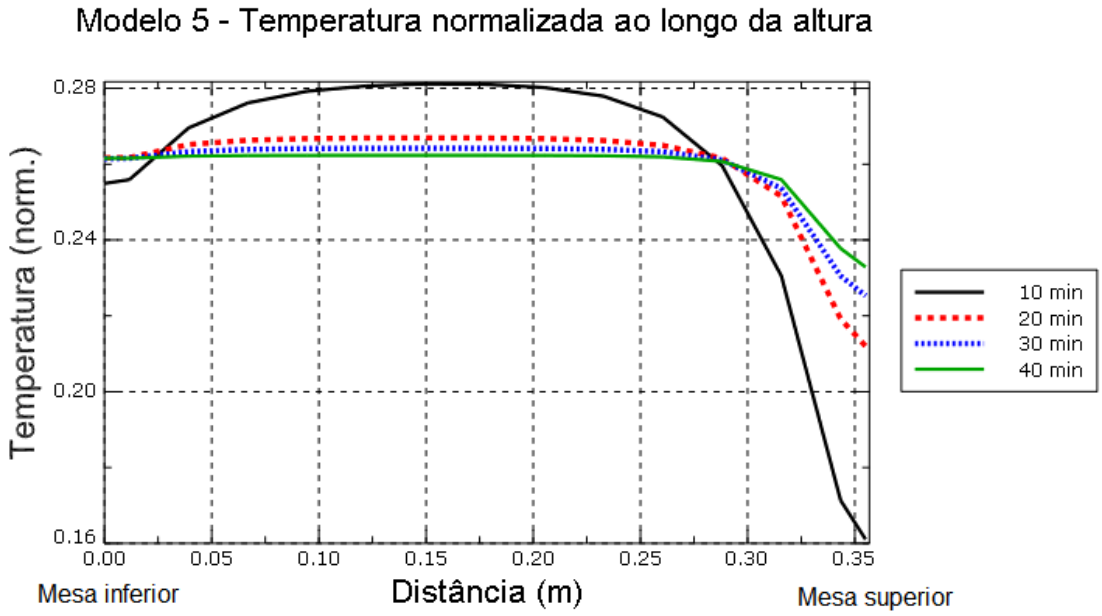


Figura 11.19 – Gráfico temperatura normalizada x altura do perfil, modelo 5.

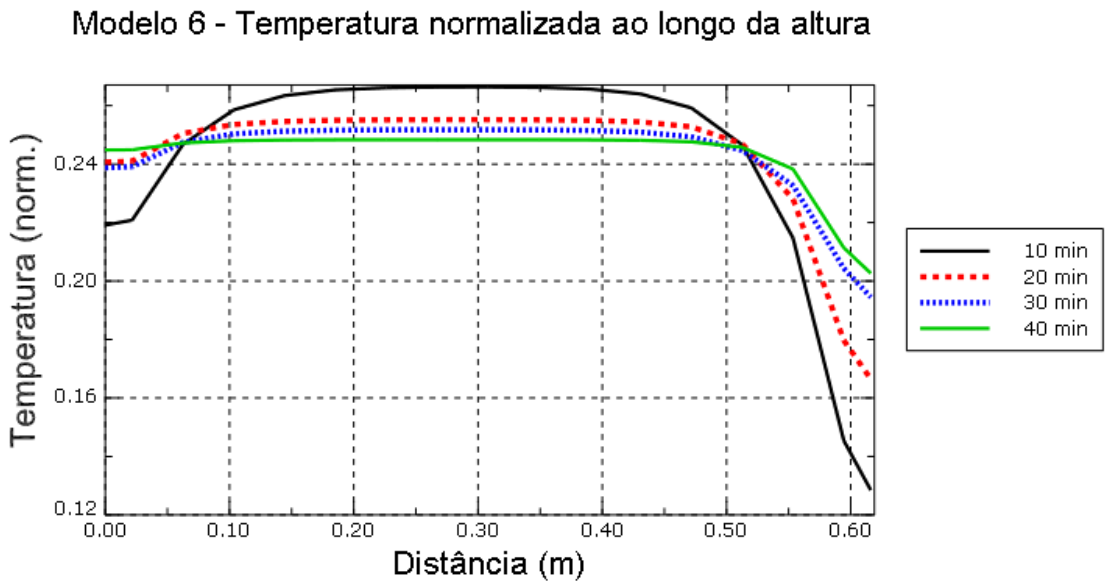


Figura 11.20 – Gráfico temperatura normalizada x altura do perfil, modelo 6.

Nota-se em todos os modelos, que a distribuição de temperaturas torna-se mais uniforme com a evolução do incêndio-padrão, de forma que efeitos relacionados ao gradiente térmico ficam pouco evidentes para tempos superiores a 15 min, TRRF mínimo recomendado pela IT08:2011. A mesa inferior e a alma do perfil de aço apresentam temperaturas praticamente uniformes, sendo notada uma diminuição evidente apenas na porção superior equivalente a aproximadamente 1/5 da altura total do perfil, onde varia de maneira próxima a linear até a face superior.

A Figura 11.21 representa uma aproximação simplificada da distribuição de temperaturas no perfil de aço sob laje de concreto maciça para exposição ao incêndio-padrão superior a 15 min.

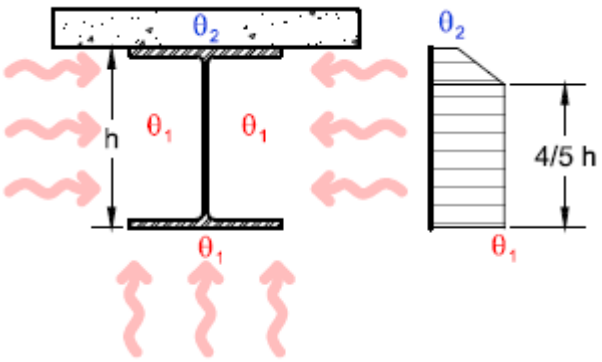


Figura 11.21 – Distribuição simplificada de temperatura no perfil de aço para t > 15 min.

11.4.2 Análise termo-estrutural

Como resultados da análise estrutural os gráficos da Figura 11.22 até a Figura 11.27 apresentam o deslocamento vertical no meio do vão dos modelos analisados, comparando as diferentes condições de contorno propostas segundo 11.3.3.

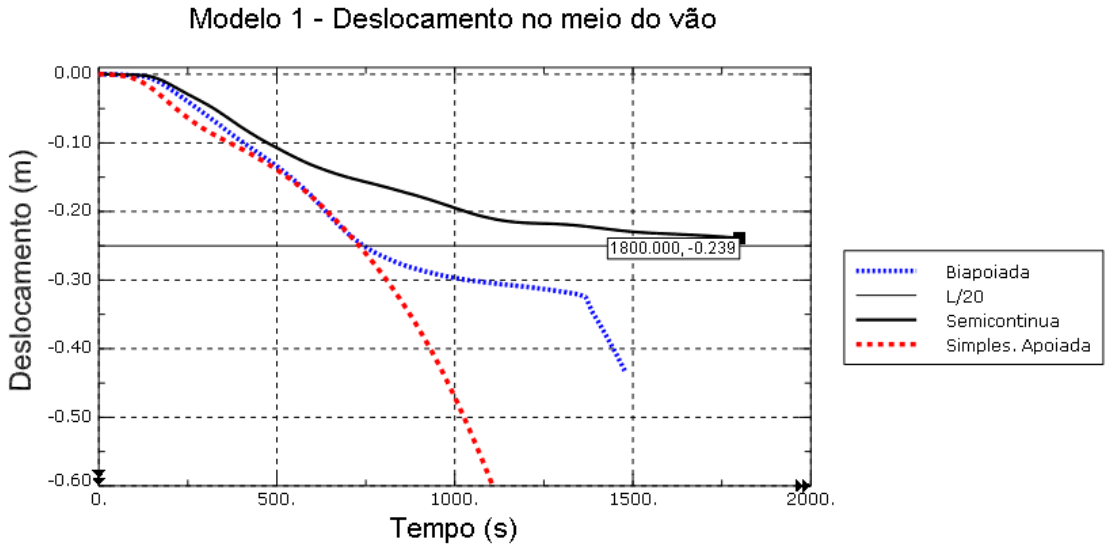


Figura 11.22 – Gráfico deslocamento no meio do vão x tempo, modelo 1.

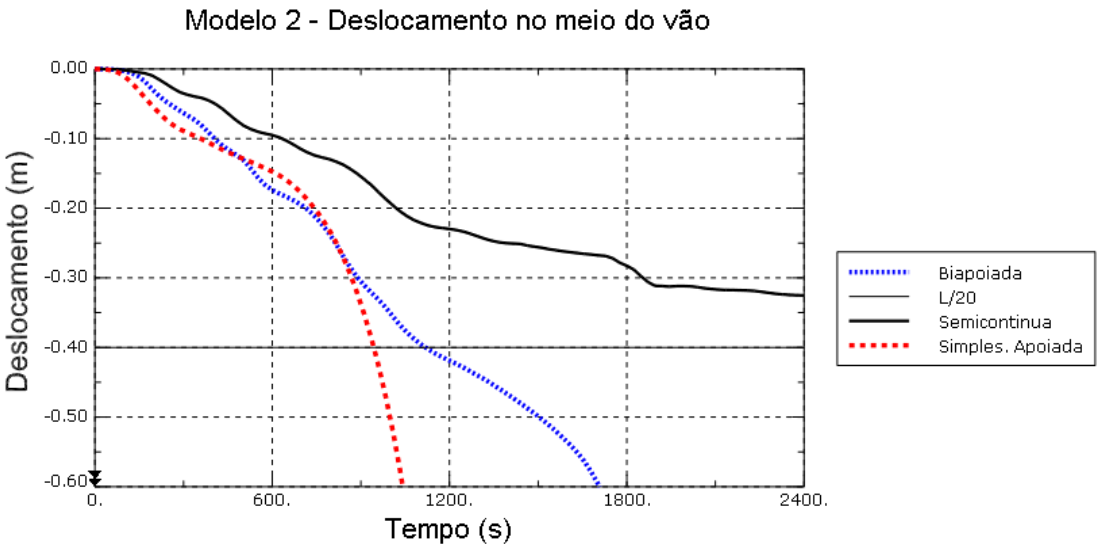


Figura 11.23 – Gráfico deslocamento no meio do vão x tempo, modelo 2.

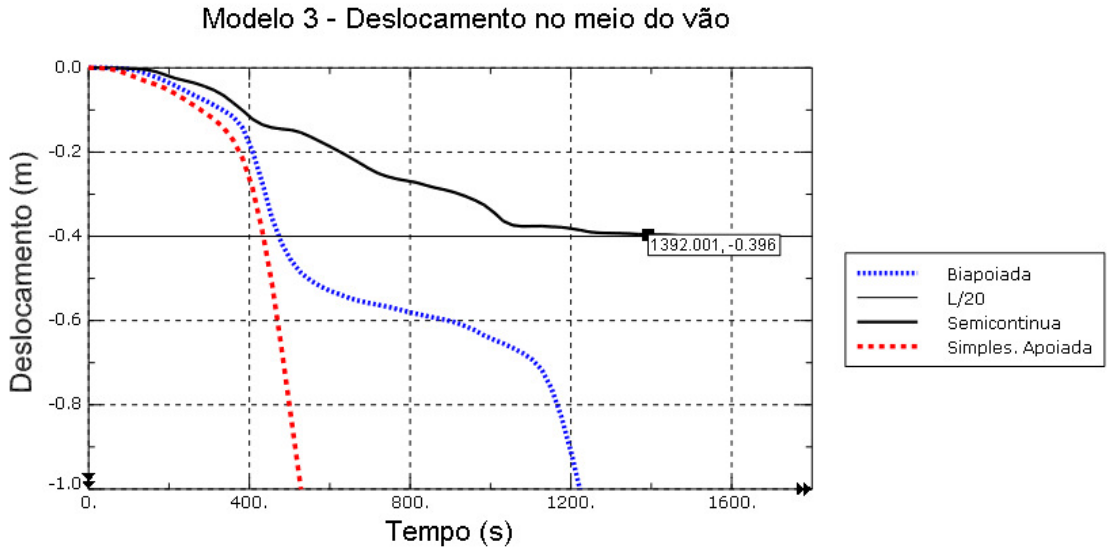


Figura 11.24 – Gráfico deslocamento no meio do vão x tempo, modelo 3.

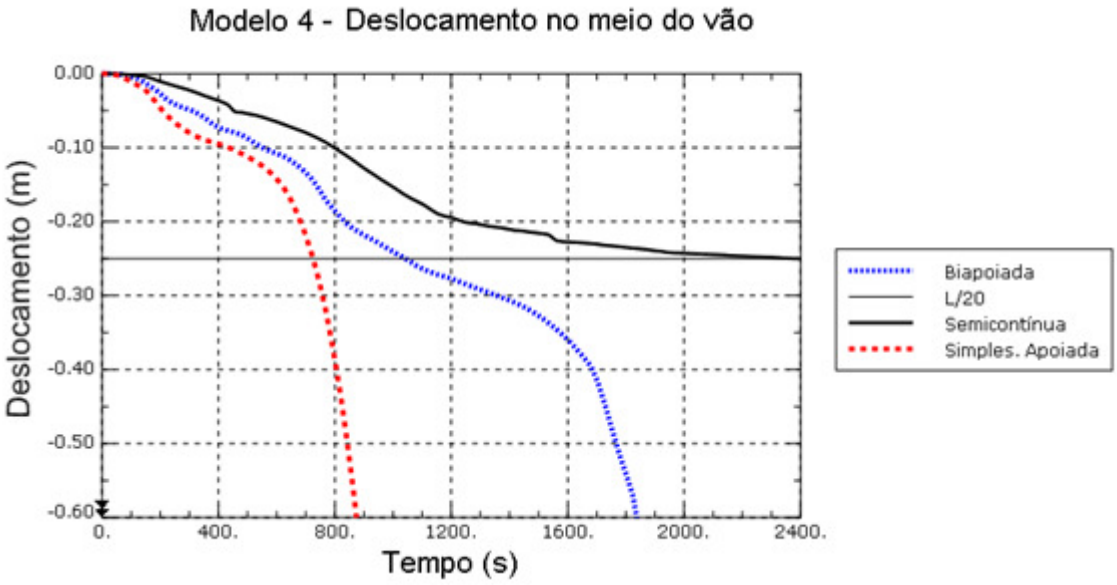


Figura 11.25 – Gráfico deslocamento no meio do vão x tempo, modelo 4.

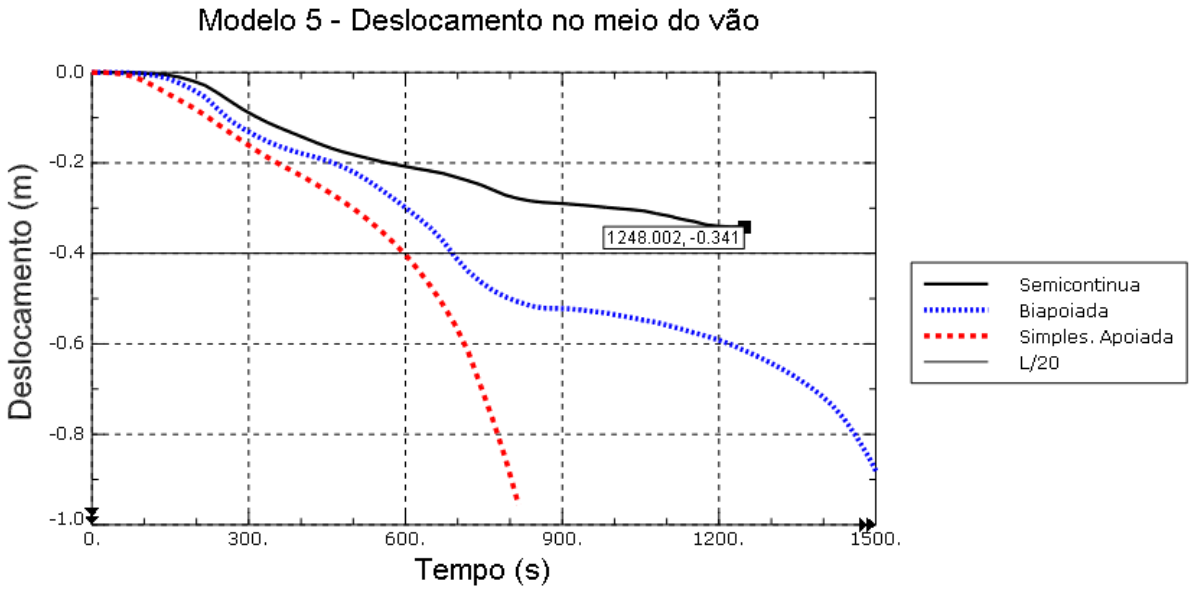


Figura 11.26 – Gráfico deslocamento no meio do vão x tempo, modelo 5.

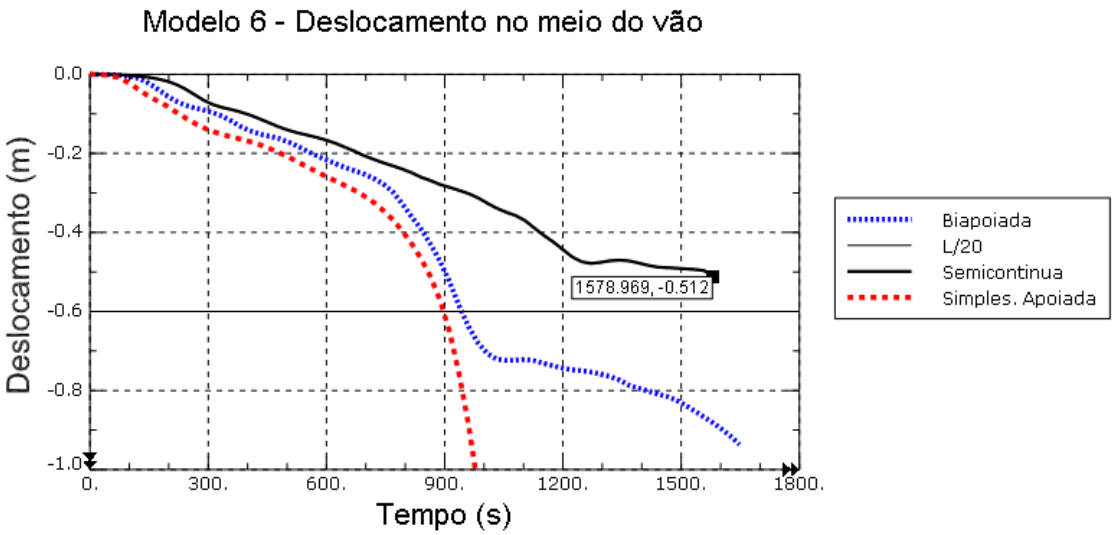


Figura 11.27 – Gráfico deslocamento no meio do vão x tempo, modelo 6.

Uma análise numérica estrutural que considera a não-linearidade geométrica e dos materiais é capaz de encontrar mecanismos de equilíbrio usualmente desprezados em análises simplificadas, de modo que existe uma dificuldade intrínseca em caracterizar o colapso estrutural. Dessa forma, seguindo os mesmos critérios de Wainman e Kirby (1987), ao realizarem experimentos em laboratório, e Cedeno et al. (2011) o colapso foi definido de acordo com as recomendações do BS 476 Part 20:1987. Admite-se que o colapso é caracterizado como a primeira ocorrência de uma das condições descritas na Equação (11.5).

$$(I) \qquad \delta = \frac{L}{20}$$

$$(II) \quad \frac{\partial \delta}{\partial t} = \frac{L^2}{9000d} \quad e \quad \delta \geq \frac{L}{30} \tag{11.5}$$

Sendo, na Equação (11.5):

δ o deslocamento no meio do vão [m];

L o vão da viga [m];

$\frac{\partial \delta}{\partial t}$ a taxa de variação do deslocamento no meio do vão [m/min];

d a altura da viga [m].

Adicionalmente a não convergência numérica do modelo, associada normalmente a elementos finitos excessivamente distorcidos, foi considerada um critério de falha, admitindo que a viga não possua mais capacidade de resistir aos esforços aplicados de maneira adequada. Nesse caso o programa cessa a análise automaticamente, sendo esse o único critério para término prematuro da análise.

É possível perceber que existe pouca diferença entre as condições simplesmente apoiada e biapoiada em todos os modelos para deslocamentos inferiores a L/20, de modo que as hipóteses de desprezar os esforços indiretos axiais e a continuidade da laje, adotadas nos métodos simplificados para vigas biapoiadas, são aceitáveis (lembrando que a laje da condição de contorno biapoiada foi considerada restringida e provida de armadura passiva mínima com barras de 5 mm de diâmetro, simulando uma condição próxima a real, observada em ligações típicas de vigas de piso de edifícios). Para deslocamentos superiores a L/20, porém, a taxa de variação do deslocamento do caso biapoiado é notavelmente menos acentuada em comparação ao caso simplesmente apoiado, de forma que o colapso não ocorre de maneira abrupta. Para deformações muito elevadas é provável que fissuras e rachaduras de grandes dimensões se formem na laje, quebrando sua propriedade de estanqueidade ao fogo, por isso é importante respeitar o limite de L/20 mesmo que o colapso catastrófico não ocorra.

Na condição semicontínua, onde a mesa inferior do perfil de aço foi restringida e a taxa de armadura passiva da laje foi elevada de maneira considerável, o comportamento da viga mista mudou drasticamente, com aumento de sua capacidade resistente. A taxa de variação do deslocamento no meio do vão ficou menos acentuada e não ocorreu colapso catastrófico em nenhum modelo, mesmo após plastificação e perda de capacidade resistente do perfil de aço exposto.

A Tabela 11.9 compara os TRFs obtidos na análise numérica do caso semicontínuo com os valores previstos pelo método simplificado. A condição (II) da Equação (11.5) não foi observada para o caso semicontínuo, sendo a convergência numérica e a condição de deslocamento superior a L/20 os critérios críticos para ocorrência do colapso estrutural da viga mista.

Tabela 11.9 – Comparação do TRF entre análise numérica e análise simplificada

	TRF Método simplificado	TRF Análise numérica
Modelo 1	< 15 min	30 min
Modelo 2	22 min	> 40 min
Modelo 3	18 min	~23 min
Modelo 4	25 min	40 min
Modelo 5	17 min	~21 min
Modelo 6	25 min	~26 min

A análise numérica previu valores de TRF superiores ao método simplificado em todos os casos estudados, ficando muito próximos no modelo 6. A consideração da não linearidade geométrica e dos materiais permitiu que a laje de concreto, provida de armadura longitudinal, resistisse aos esforços verticais por efeito de catenária. As grandes deformações, limitada a L/20 conforme recomendações previamente citadas de BS 476 Part 20:1987, e a armadura protegida do aumento de temperatura garantem que os esforços migrem ao apoio de forma semelhante a um cabo, hipótese já comprovada por diversos autores e ignorada na aplicação do método simplificado.

É importante ressaltar que para se tomar proveito de tal fenômeno é necessário que a armadura longitudinal esteja presente em todo comprimento da viga, e não apenas na região dos momentos fletores negativos, conforme hipótese do método simplificado. Desse modo a taxa de armadura deve ser incorporada a toda malha antifissuração. Recomenda-se para estudos posteriores que modelos numéricos onde haja um aumento da taxa de armadura apenas próximo à região do apoio sejam investigados, avaliando o impacto da extensão da armadura longitudinal.

Outro ponto de destaque está no fato de que a condição de apoio semicontínua resultou em grande zona de tração na laje, principalmente na região próxima ao apoio, com isso espera-se que tal região esteja sujeita a abertura de fissuras, o modelo, porém, não é capaz de avaliar a dimensão dessas aberturas, de modo que existe a possibilidade de haver perda da propriedade de estanqueidade da laje, permitindo que os gases aquecidos possam permear ao pavimento superior.

Os gráficos apresentados na Figura 11.28 até a Figura 11.33 indicam a evolução da tensão normal à mesa inferior do perfil de aço, em função da distância ao apoio, em consequência do aumento da temperatura para a condição de contorno semicontínua. O zero das abscissas indica a região do apoio, com valores do eixo progredindo até o meio do vão. Valores positivos de tensão indicam tração e valores negativos compressão. A ideia é representar de forma indireta a distribuição dos momentos fletores na viga mista, visto a compressão dos elementos finitos que representam a mesa inferior indicar momentos fletores negativos e a tração momentos fletores positivos.

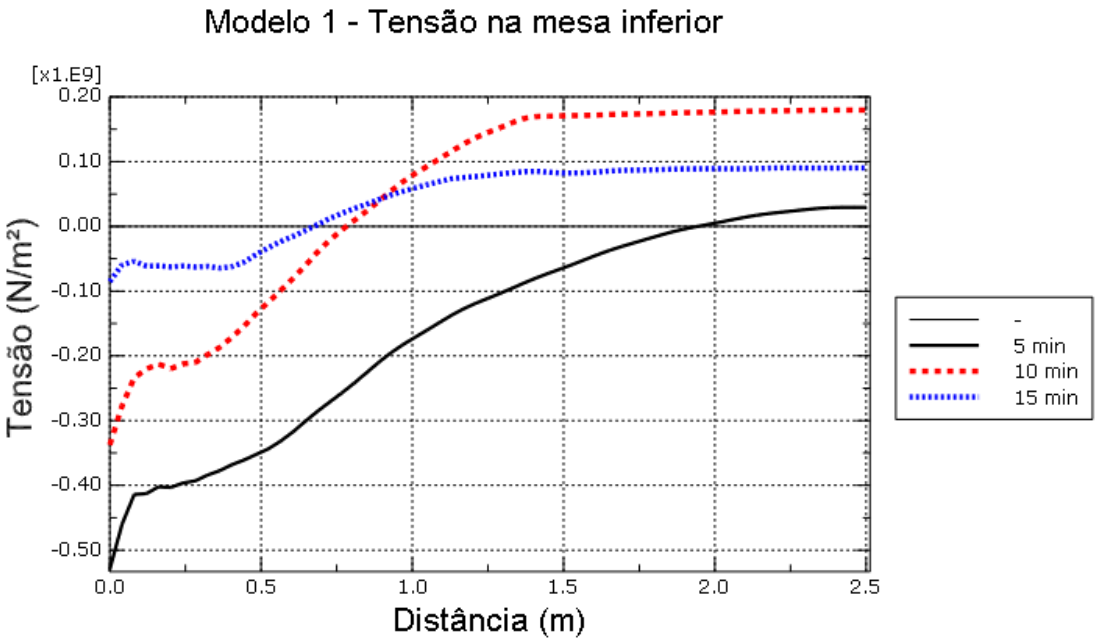


Figura 11.28 – Gráfico tensão na mesa inferior x distância a partir do apoio, modelo 1.

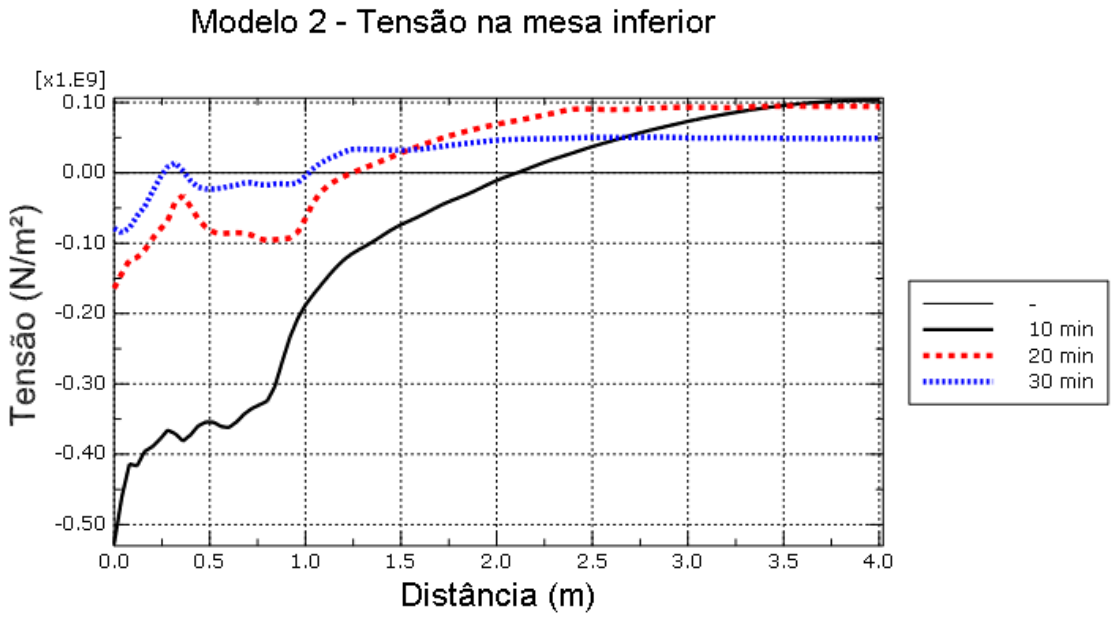


Figura 11.29 – Gráfico tensão na mesa inferior x distância a partir do apoio, modelo 2.

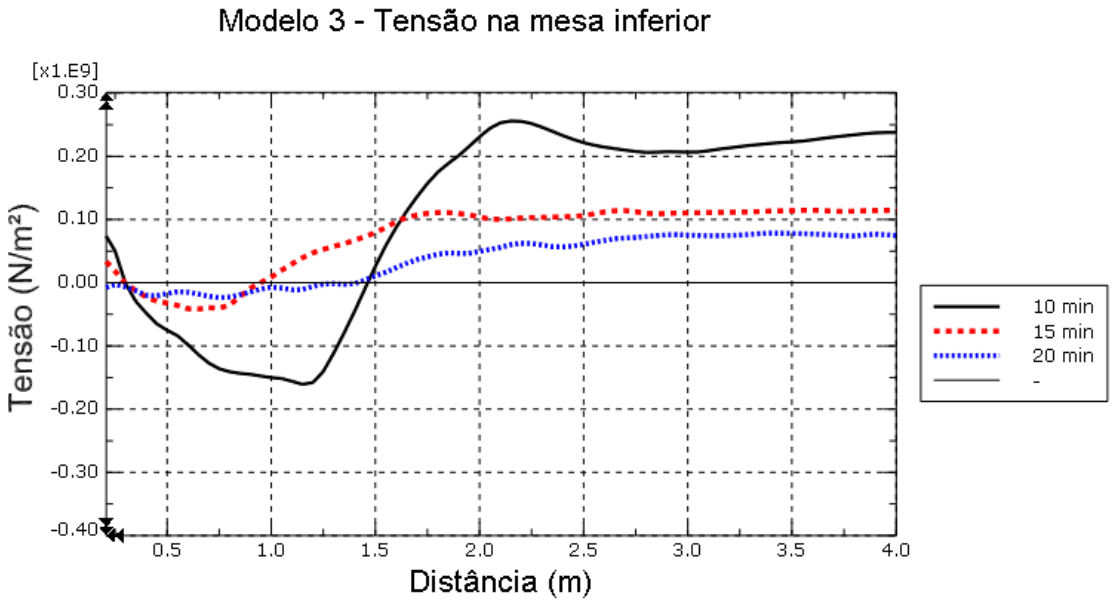


Figura 11.30 – Gráfico tensão na mesa inferior x distância a partir do apoio, modelo 3.

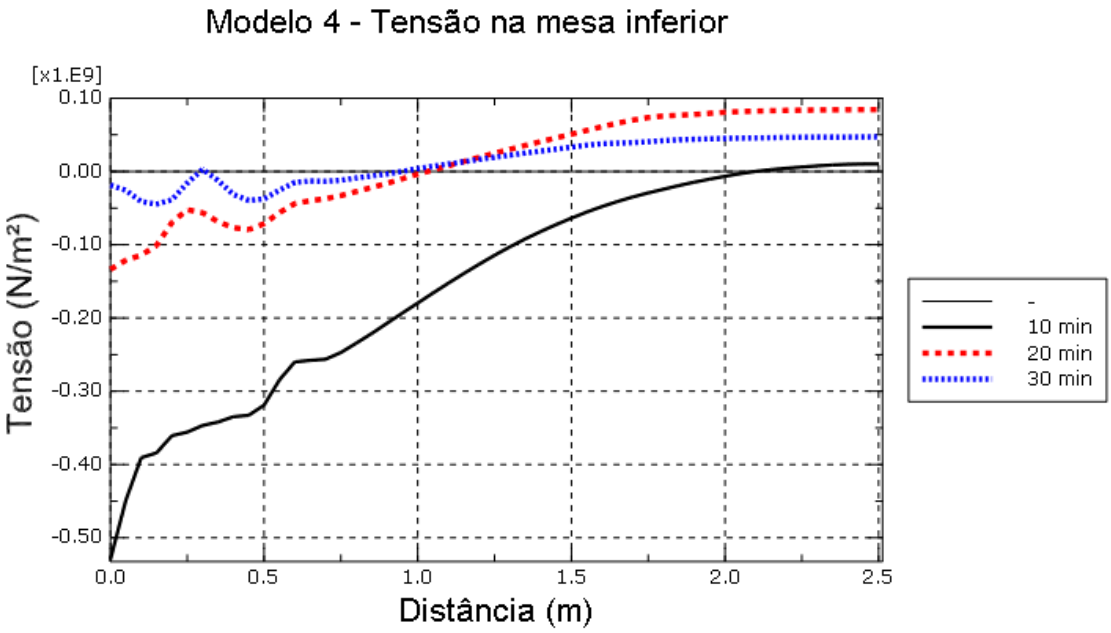


Figura 11.31 – Gráfico tensão na mesa inferior x distância a partir do apoio, modelo 4.

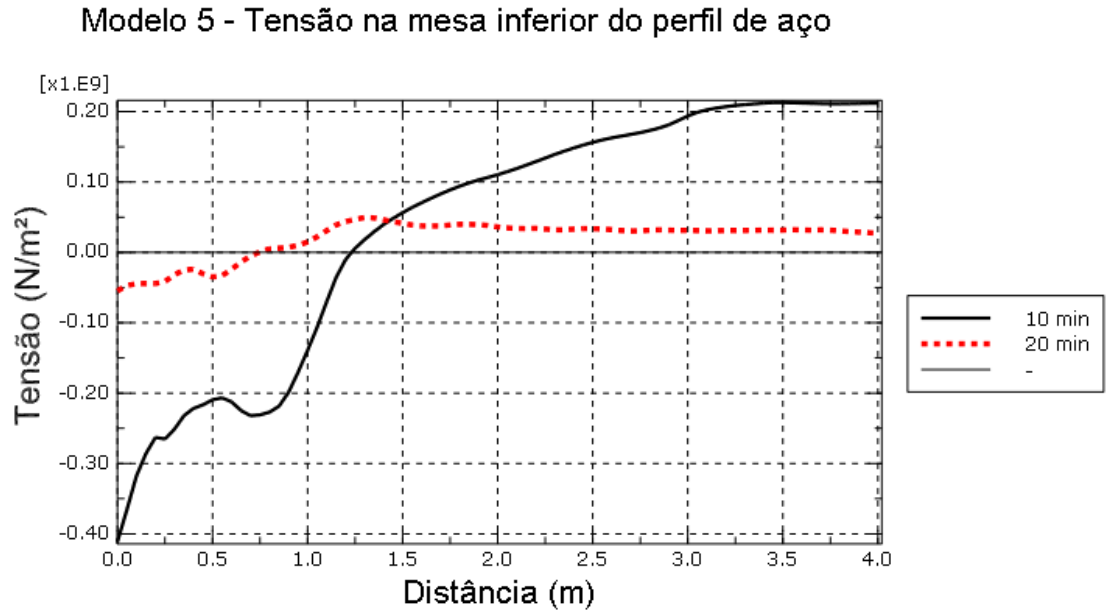


Figura 11.32 – Gráfico tensão na mesa inferior x distância a partir do apoio, modelo 5.

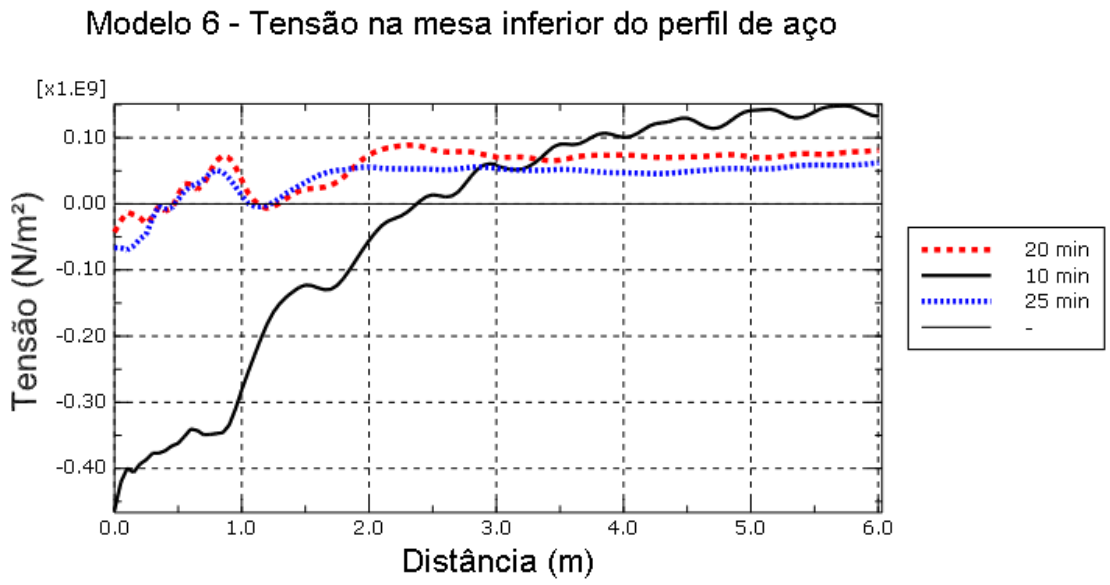


Figura 11.33 – Gráfico tensão na mesa inferior x distância a partir do apoio, modelo 6.

Fica claro que com a evolução do incêndio-padrão os momentos fletores diminuem drasticamente devido à tensão de plastificação do aço se degradar com o aumento da temperatura. Para tempos inferiores a 15 min nota-se que existe uma porção maior da mesa inferior do perfil submetida à compressão, tal fato se deve pela restrição à dilatação da viga que induz força axial de compressão. É possível perceber que o ponto de inflexão é deslocado em direção ao meio do vão devido à dilatação térmica, com isso a região do apoio sofre plastificação primeiro, enquanto o meio do vão apresenta valores menos acentuados. Contudo para tempos superiores a 15 min ocorre uniformização das tensões devido à plastificação no apoio e no centro do vão, com o ponto de inflexão se aproximando da região do apoio.

É notável que a rigidez à flexão da viga diminui drasticamente com o aumento da temperatura. Os esforços de catenária na laje tornam-se o principal mecanismo resistente da viga mista de modo que efeitos relacionados à dilatação térmica, incluindo o gradiente térmico, são mitigados pelas grandes deformações e comportamento não linear dos materiais.

A Figura 11.34 até a Figura 11.45 ilustra a situação de deformação, em escala real, das vigas modeladas na condição semicontínua no momento do colapso, definido como deslocamento vertical superior a L/20 no meio do vão.

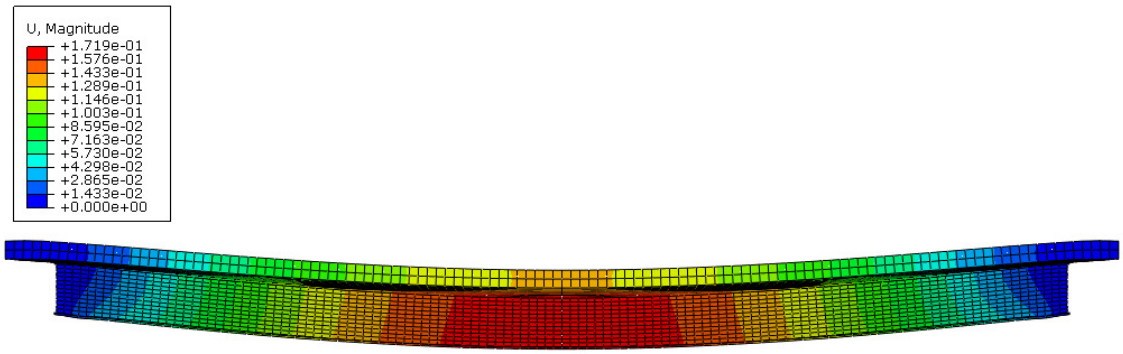


Figura 11.34 – Situação deformada no colapso, modelo 1.

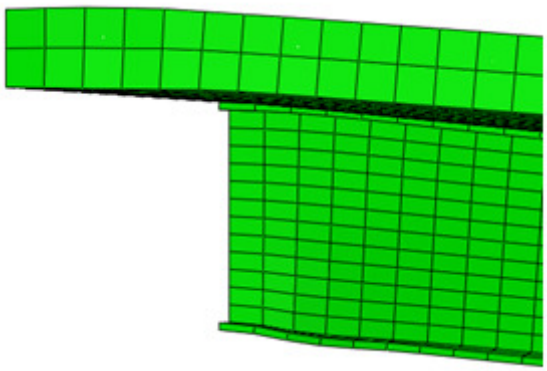


Figura 11.35 – Detalhe da instabilidade da mesa inferior no apoio, modelo 1.

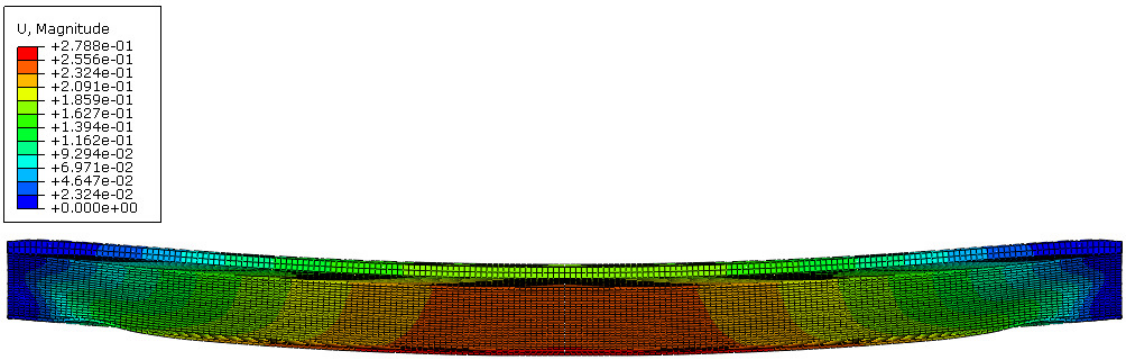


Figura 11.36 – Situação deformada no colapso, modelo 2.

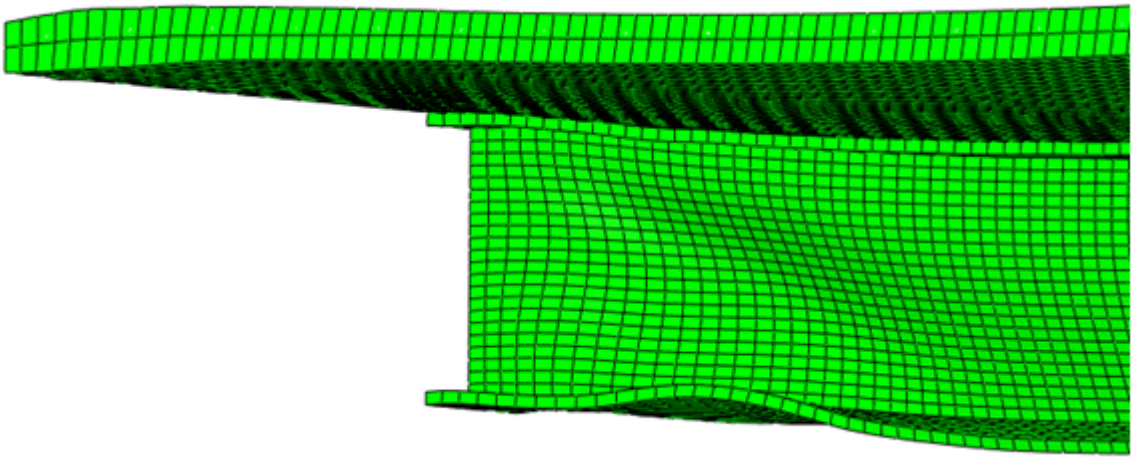


Figura 11.37 – Detalhe da instabilidade da mesa inferior e da alma no apoio, modelo 2.

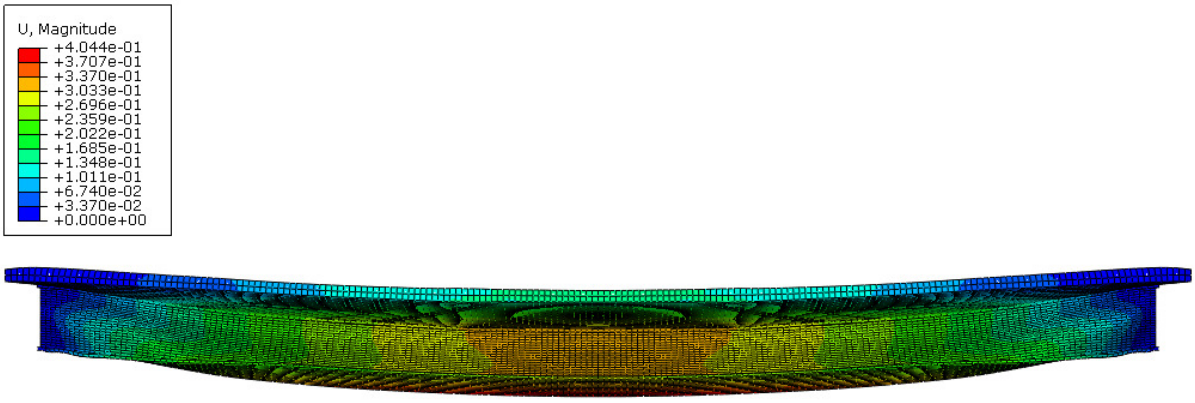


Figura 11.38 – Situação deformada no colapso, modelo 3.

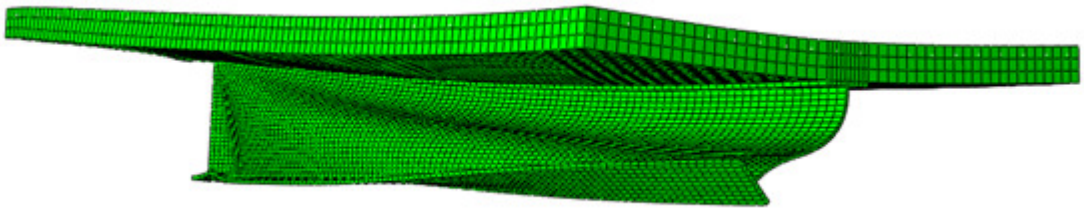


Figura 11.39 – Detalhe da distorção da alma no meio do vão, modelo 3.

Figura 11.40 – Situação deformada no colapso, modelo 4.

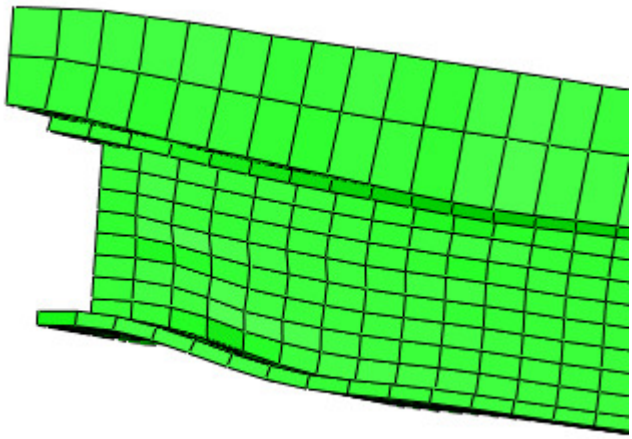


Figura 11.41 – Detalhe da instabilidade da mesa inferior, modelo 4.

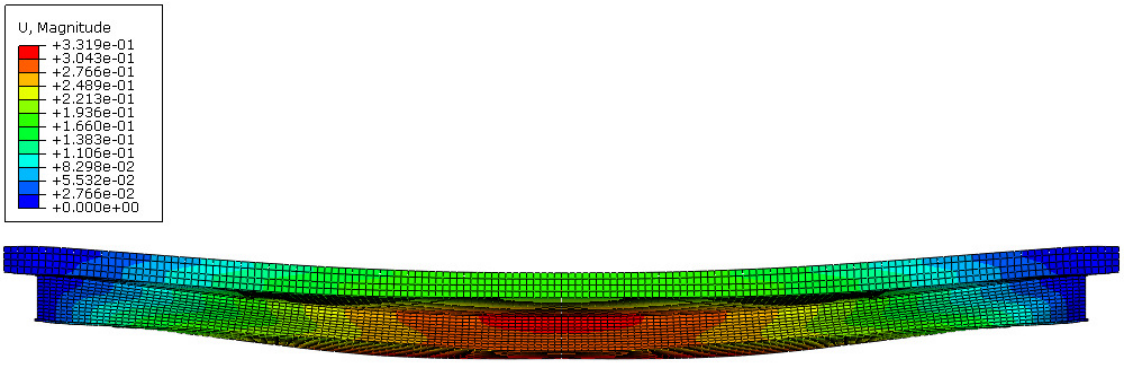


Figura 11.42 – Situação deformada no colapso, modelo 5.

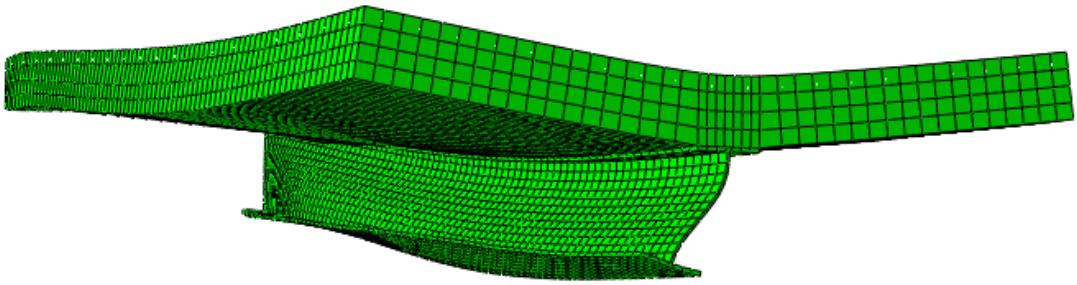


Figura 11.43 – Detalhe da distorção da alma no meio do vão, modelo 5.

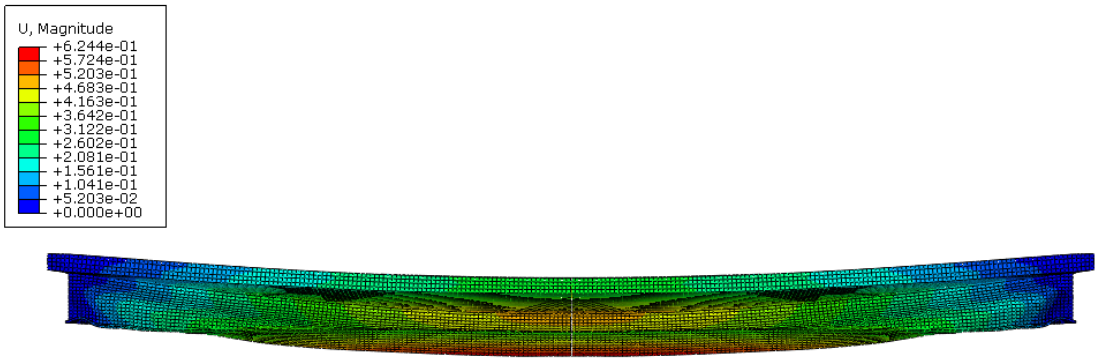


Figura 11.44 – Situação deformada no colapso, modelo 6.

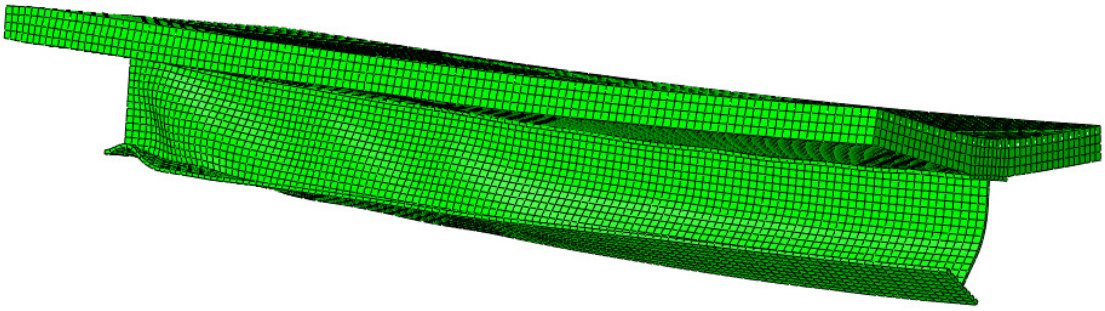


Figura 11.45 – Detalhe da distorção da alma no meio do vão, modelo 6.

Na região do apoio ocorreu instabilidade local da mesa inferior em todos os modelos, devido às grandes deformações e rotações. Como efeito de comparação é interessante perceber a semelhança com a situação final das vigas na região do apoio encontrada nos ensaios de Cardington (Figura 11.46 até Figura 11.48),

demonstrando comportamento do modelo numérico semelhante ao real para os perfis mais compactos.

Figura 11.46 – Exemplo 1 de deformação do perfil de aço em situação de incêndio no ensaio de Cardington (fonte: Universidade de Coimbra[1]).

Figura 11.47 – Exemplo 2 de deformação do perfil de aço em situação de incêndio no ensaio de Cardington (fonte: Universidade de Coimbra[2]).

Figura 11.48 – Exemplo 3 de deformação do perfil de aço em situação de incêndio no ensaio de Cardington (fonte: SteelConstruction.info[1]).

[1] Disponível em: <http://www.dec.uc.pt/~lborges/cardington/after/>Acesso em nov. 2017.

[2] Disponível em: <http://www.dec.uc.pt/~lborges/cardington/after/>Acesso em nov. 2017.

Os perfis de aço dos modelos 3, 5 e 6 sofreram elevada distorção da alma no meio do vão e instabilidade local da alma na região do apoio, reduzindo drasticamente a capacidade resistente da viga já nos minutos inicias do incêndio (inferiores a 15 min). Tal redução, porém, não causou deformação abrupta da viga mista. O deslocamento no centro do vão permaneceu dentro do limite L/20 durante a evolução do incêndio, sendo o efeito de catenária na laje suficiente para resistir aos esforços solicitantes, caracterizando o equilíbrio da viga. Dessa maneira, mesmo com a ocorrência da instabilidade por distorção da alma, os TRFs das análises numéricas foram superiores aos encontrados pelo método simplificado, onde tal efeito não foi considerado. A ocorrência das instabilidades locais provocou maiores deformações, que seriam relevantes para uma análise à temperatura ambiente onde se procura garantir o comportamento elástico de todas as peças estruturais durante a vida útil da edificação, porém para a análise na situação excepcional de incêndio não foram suficientes para causar o colapso estrutural ou quebrar a propriedade de estanqueidade ao fogo

É importante ressaltar que a distorção da alma não foi um fenômeno exclusivo da condição semicontínua, ocorrendo para todas as condições de contorno estudadas. A Figura 11.49 até a Figura 11.51 ilustram a situação deformada na condição simplesmente apoiada dos modelos em que ocorreu distorção da alma.

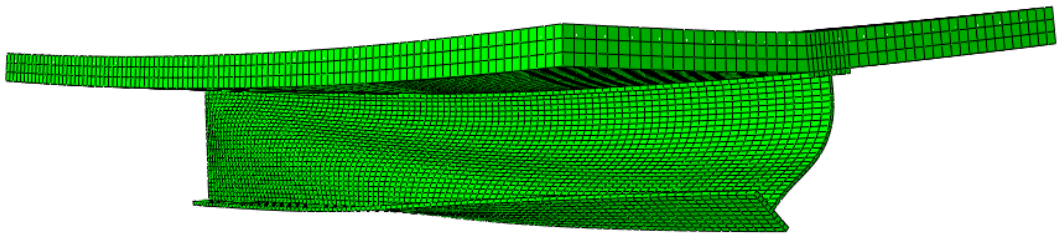


Figura 11.49 – Detalhe da distorção da alma para o caso simplesmente apoiado, modelo 3.

[1] Disponível em: <https://www.steelconstruction.info/Structural_fire_engineering>Acesso em nov. 2017.

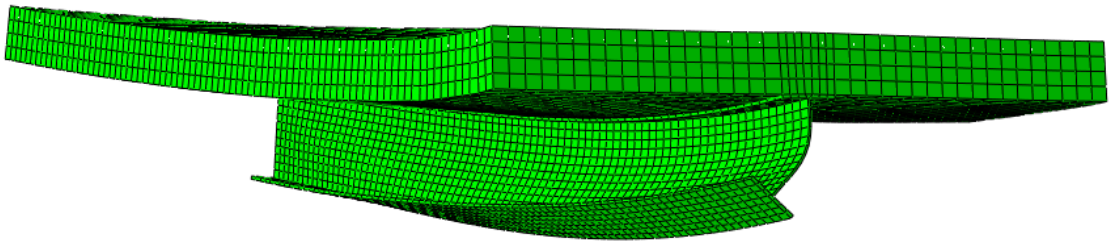


Figura 11.50 – Detalhe da distorção da alma para o caso simplesmente apoiado, modelo 5.

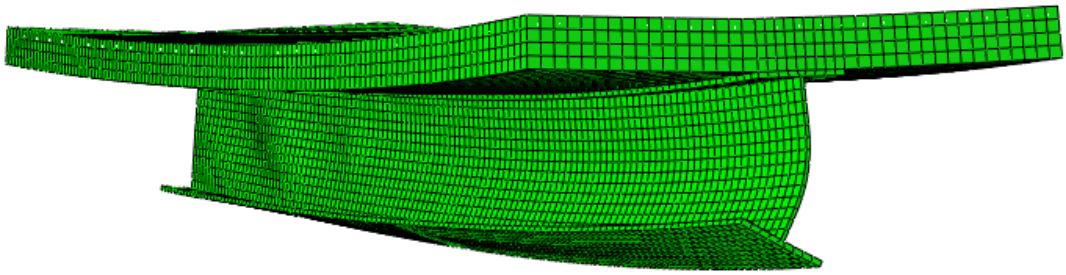


Figura 11.51 – Detalhe da distorção da alma para o caso simplesmente apoiado, modelo 6.

Apesar de classificados como compactos em situação de incêndio as grandes deformações induziram instabilidade por distorção da alma do perfil assim que o módulo de elasticidade do aço se reduziu (temperaturas superiores a 300 ºC), visto não haver presença de qualquer enrijecedor intermediário. Nervuras no meio do vão ligando a mesa inferior à mesa superior poderiam evitar tal fenômeno.

A Tabela 11.10 indica o índice de esbeltez da alma dos modelos estudados. Nota-se que o fenômeno de distorção da alma ocorreu para os modelos com índices superiores a 40. Vê-se necessário um melhor estudo dos parâmetros que governam o fenômeno para vigas mistas em situação de incêndio, incluindo a simulação numérica com uma maior densidade de malha na região da alma.

Tabela 11.10 – Índice de esbeltez da alma dos modelos.

	h/t_w	Distorção da alma?
Modelo 1	39,4	
Modelo 2	34,0	
Modelo 3	48,7	X
Modelo 4	21,1	
Modelo 5	46,1	X
Modelo 6	40,9	X

11.5 Conclusões a respeito da análise numérica

Foram desenvolvidos seis modelos numéricos de uma viga mista de aço e concreto sem revestimento contra fogo submetida ao incêndio-padrão, sendo realizadas análises térmicas e estruturais não lineares considerando esforços indiretos gerados pela dilatação térmica. Para cada modelo foram estudadas e comparadas três condições de contorno distintas, sendo elas: simplesmente apoiada, biapoiada e semicontínua. A condição semicontínua considera restrição da mesa inferior do perfil de aço e continuidade da laje de concreto, disposta de armadura passiva suficiente para desenvolvimento do máximo momento fletor negativo resistente da seção transversal.

Foi realizada análise do comportamento e colapso da viga em todas as condições, sendo os resultados comparados a valores de TRF encontrados por análise simplificada seguindo métodos normativos, onde efeitos da dilatação térmica e da não linearidade geométrica e de material são desprezados na determinação dos esforços solicitantes.

Avaliando os resultados encontrados pode-se concluir que:

- A distribuição de temperatura ao longo da altura do perfil de aço torna-se mais uniforme com a evolução do incêndio-padrão, de modo que efeitos associados ao gradiente térmico são reduzidos com o tempo.
- Para tempos superiores a 15 min de exposição ao incêndio-padrão, a distribuição de temperatura ao longo da altura do perfil de aço possui caráter próximo ao uniforme até 1/5 de altura da porção superior do perfil, onde varia linearmente até a face superior em contato com a laje.
- Existe pouca diferença entre as condições simplesmente apoiada e biapoiada em todos os modelos para deslocamentos inferiores a L/20, de modo que as hipóteses de desprezar os esforços indiretos axiais e a continuidade da laje, adotadas nos métodos simplificados para vigas biapoiadas, são aceitáveis. Para deslocamentos superiores a L/20, porém, a taxa de variação do deslocamento do caso biapoiado é notavelmente menos acentuada em comparação ao caso simplesmente apoiado, de forma que o colapso não ocorre de maneira abrupta.

- Na condição semicontínua para tempos inferiores a 15 min é notável um aumento dos momentos fletores negativos na região do apoio, ocorrendo plastificação prematura da mesa inferior. Contudo, com a evolução do incêndio-padrão e degradação da resistência ao escoamento do aço, os momentos fletores são atenuados e distribuídos ao longo do vão.
- Apenas o fato de se considerar a continuidade da laje sobre o apoio não é suficiente para alterar o TRF da viga mista de maneira significativa em comparação ao caso simplesmente apoiado, apesar de evitar o colapso catastrófico do conjunto. Também mostrou que não há necessidade de se considerar efeitos nocivos da dilatação térmica ocasionadas pela restrição axial da viga em uma análise simplificada, visto a condição biapoiada ter resultado em TRFs superiores ao simplesmente apoiado.
- A restrição da mesa inferior da viga e aumento da taxa de armadura passiva presente na laje, garantindo caráter semicontínuo da viga mista, aumentou consideravelmente o TRF de todos os modelos analisados. Mesmo após total degradação das propriedades mecânicas do perfil de aço o conjunto manteve o equilíbrio devido às forças de catenária na laje oriundas das grandes deformações e consideração da não linearidade geométrica.
- Todos os TRFs encontrados na análise numérica para a condição semicontínua foram superiores aos estimados por método simplificado. Visto isso, a hipótese de desprezar esforços indiretos causados pelo gradiente térmico é valida, já que a consideração da não linearidade geométrica e de material foi suficiente para mitigar os efeitos nocivos da dilatação térmica e restrição dos apoios. Vale ressaltar que para tomar proveito de tais efeitos benéficos, a armadura longitudinal presente na laje deve se estender a todo comprimento da viga, e não apenas na região de momentos fletores negativos. Com isso a transferência dos esforços por efeito de catenária na laje fica garantida, sendo esse o principal mecanismo de equilíbrio do conjunto após perda de capacidade resistente do perfil de aço.
- A condição de apoio semicontínua resultou em grande zona de tração na laje, principalmente na região próxima ao apoio. Espera-se que tal região esteja sujeita a abertura de fissuras, o modelo, porém, não é capaz de avaliar a dimensão dessas aberturas, de modo que existe a possibilidade de haver

perda da propriedade de estanqueidade da laje, permitindo que os gases aquecidos possam permear ao pavimento superior. As conclusões apresentadas são válidas apenas caso a compartimentação vertical não seja uma exigência de projeto, premissa usual para edificações de pequeno porte. Recomenda-se para estudos futuros avaliar a dimensão dessas fissuras e a ocorrência ou não da perda da estanqueidade da laje.

- Devido às grandes rotações, a região do apoio é altamente suscetível à instabilidade local da mesa inferior e da alma do perfil de aço, mesmo para perfis classificados como compactos.
- Perfis com índice de esbeltez de alma superior a 40 sofreram elevada distorção da alma no meio do vão, mesmo no caso simplesmente apoiado, resultando em TRFs muito inferiores aos casos onde isso não ocorreu. Vê-se necessário um melhor estudo dos parâmetros que influenciam tal fenômeno em vigas mistas em situação de incêndio sem revestimento contra incêndio com grandes comprimentos destravados. Mesmo com a ocorrência da instabilidade o TRF do modelo numérico para o caso semicontínuo foi superior ao estimado pelo método simplificado, onde a distorção da alma não foi considerada.

12 CONCLUSÕES

Foi avaliado o comportamento de vigas mistas de aço e concreto em situação de incêndio, considerando a rigidez à rotação dos apoios proporcionada pela armadura negativa longitudinal presente na laje de concreto e pela restrição da mesa inferior do perfil de aço no apoio, formando uma ligação mista e garantindo um caráter semicontínuo à viga, hipótese raramente adotada no dimensionamento à temperatura ambiente, onde as vigas são consideradas biapoiadas existindo, assim, uma reserva na capacidade resistente que pode ser útil para uma análise a temperaturas elevadas.

Primeiramente foram estudadas as capacidades resistentes em situação de incêndio de vigas mistas de aço e concreto sem proteção contra fogo seguindo uma análise simplificada, que aplica os métodos normatizados vigentes. Foram tomadas hipóteses simplificadoras em que se desprezam esforços indiretos provocados pela dilatação térmica e gradiente térmico. Dos resultados obtidos pode-se concluir que:

- Para TRRF de 30 min, apesar de haver um aumento significativo da capacidade resistente da viga semicontínua em comparação ao caso biapoiado, não é suficiente para prescindir a adoção de revestimentos contra fogo.
- A ligação mista semicontinua, apesar de ter um caráter de resistência parcial, não foi o fator limitante na situação de incêndio, possuindo momento fletor negativo resistente superior ao da seção transversal mista. Tal afirmação é válida apenas caso sejam satisfeitas as condições apresentadas na Equação (7.6).
- Utilizando procedimentos normatizados para TRRFs inferiores a 30 min é possível prescindir revestimento contra fogo em vigas mistas ao se considerar a semicontinuidade na região do apoio.
- Em geral os perfis mais leves, com geometria própria para serem utilizados como vigas de piso de edifícios, obtiveram fator de carga de 0,7 para TRRFs entre 15 min e 20 min.
- Perfis mais pesados obtiveram resultados melhores, com TRRFs entre 20 min e 30 min, porém com adoção de taxa de armadura negativa elevada, entre 2% e 4,5%.

- A adoção da semicontinuidade com máxima taxa de armadura proporciona um aumento do tempo de resistência ao fogo (TRF) de 4 a 7 min em comparação ao caso biapoiado (sem consideração de armadura negativa).

Em um segundo momento foram desenvolvidos modelos numéricos de uma viga mista de aço e concreto sem revestimento contra fogo submetida ao incêndio-padrão, sendo realizadas análises térmicas e estruturais não lineares, considerando esforços indiretos gerados pela dilatação térmica.

Avaliando os resultados encontrados pode-se concluir que:

- A distribuição de temperatura ao longo da altura do perfil de aço torna-se mais uniforme com a evolução do incêndio-padrão, de modo que efeitos associados ao gradiente térmico são reduzidos com o tempo.
- Para tempos superiores a 15 min de exposição ao incêndio-padrão, a distribuição de temperatura ao longo da altura do perfil de aço possui caráter próximo ao uniforme até 1/5 de altura da porção superior do perfil, onde varia linearmente até a face superior em contato com a laje.
- Na condição semicontínua para tempos inferiores a 15 min é notável um aumento dos momentos fletores negativos na região do apoio, ocorrendo plastificação prematura da mesa inferior. Contudo, com a evolução do incêndio-padrão e degradação da resistência ao escoamento do aço, os momentos fletores são atenuados e distribuídos ao longo do vão.
- Apenas o fato de se considerar a continuidade da laje sobre o apoio, sem aumento significativo da armadura passiva e sem restrição da mesa inferior, não é suficiente para alterar o TRF da viga mista de maneira significativa, apesar de evitar o colapso catastrófico do conjunto (observado na condição simplesmente apoiada). Também mostrou que não há necessidade de se considerar efeitos nocivos da dilatação térmica ocasionadas pela restrição axial da viga em uma análise simplificada, visto a condição biapoiada ter resultado em TRFs superiores ao simplesmente apoiado.
- A restrição da mesa inferior da viga e aumento da taxa de armadura passiva presente na laje, garantindo caráter semicontínuo da viga mista, aumentou consideravelmente o TRF de todos os modelos analisados. Mesmo após total degradação das propriedades mecânicas do perfil de aço o conjunto manteve

o equilíbrio devido ao efeito de catenária na laje oriundo das grandes deformações e consideração da não linearidade geométrica.

- Todos os TRFs encontrados na análise numérica para a condição semicontínua foram superiores aos estimados por método simplificado. Visto isso, a hipótese de desprezar esforços indiretos causados pelo gradiente térmico é valida, já que a consideração da não linearidade geométrica (efeito de catenária) e de material foi suficiente para mitigar os efeitos nocivos da dilatação térmica e restrição dos apoios. Vale ressaltar que para tomar proveito de tais efeitos benéficos a armadura longitudinal presente na laje deve se estender a todo comprimento da viga, e não apenas na região de momentos fletores negativos. Com isso a transferência dos esforços por efeito de catenária na laje fica garantida, sendo esse o principal mecanismo de equilíbrio do conjunto após perda de capacidade resistente do perfil de aço.
- A condição de apoio semicontínua resultou em grande zona de tração na laje, principalmente na região próxima ao apoio. Espera-se que tal região esteja sujeita a abertura de fissuras, o modelo, porém, não é capaz de avaliar a dimensão dessas aberturas, de modo que existe a possibilidade de haver perda da propriedade de estanqueidade da laje no caso da mesma não ser provida de forma de aço, permitindo que os gases aquecidos possam permear ao pavimento superior. As conclusões apresentadas são válidas, no caso de lajes maciças, apenas caso a compartimentação vertical não seja uma exigência de projeto, premissa usual para edificações de pequeno porte que permitem a adoção de TRRF inferior a 30 minutos.
- Devido às grandes rotações a região do apoio é altamente suscetível à instabilidade local da mesa inferior e da alma do perfil de aço, mesmo para perfis classificados como compactos.
- Perfis com índice de esbeltez de alma superior a 40 sofreram elevada distorção da alma no meio do vão, mesmo no caso simplesmente apoiado, resultando em TRFs muito inferiores aos casos onde isso não ocorreu. Vê-se necessário um melhor estudo dos parâmetros que influenciam tal fenômeno em vigas mistas em situação de incêndio com grandes vãos destravados e sem revestimento contra incêndio para melhor aproveitamento da capacidade resistente das vigas mistas. Mesmo com a ocorrência da instabilidade o TRF

do modelo numérico para o caso semicontínuo foi superior ao estimado pelo método simplificado, onde a distorção da alma não foi considerada.

Nos modelos numéricos onde não ocorreu distorção da alma, o TRF foi muito superior ao encontrado pelo método simplificado, porém nos modelos onde o fenômeno ocorreu o TRF, apesar de superior também, foi muito próximo ao modelo simplificado. Não se vê necessário penalizar o método simplificado devido a efeitos do gradiente térmico ou beneficiá-lo devido aos fenômenos não lineares geométricos e de material ao aplicar os procedimentos normativos na análise de uma viga mista semicontínua sem revestimento contra fogo. Próximos estudos devem avaliar melhor a ocorrência de tal instabilidade, dessa forma métodos desenvolvidos futuramente podem se beneficiar do aumento da capacidade resistente devido o efeito de catenária e evitar a distorção da alma.

O comportamento estrutural da viga mista semicontínua em situação de incêndio mostrou-se muito mais rígido e resistente quando em comparação com o caso biapoiado, chegando, nos modelos onde não ocorreu o fenômeno de distorção da alma, a TRFs superiores a 30 minutos, porém a grande influência das deformações na laje e outros efeitos da não linearidade geométrica e de material, além da ocorrência da distorção da alma já citada, dificultam uma avaliação simplificada da situação.

Como conclusão ao objetivo da Dissertação de se considerar, em situação de incêndio, a semicontinuidade proporcionada pela armadura longitudinal e continuidade da laje sobre o apoio, além de restrição da mesa inferior do perfil de aço, como uma alternativa a adoção de revestimento contra fogo das vigas mistas, vê-se justificada, com base em procedimentos normativos e hipótese simplificadora de se desprezar o gradiente térmico, validada pelos modelos numéricos, para TRRFs inferiores a 30 minutos.

Como sugestão a pesquisas futuras, vê se necessário avaliar a instabilidade por distorção da alma para vigas mistas biapoiadas em situação de incêndio e sem revestimento contra fogo para grandes comprimentos destravados, de modo a identificar quais fatores e parâmetros de esbeltez estão associados a esse fenômeno e impedir que o mesmo ocorra, havendo um melhor aproveitamento da capacidade resistente da viga mista. Outro ponto importante seria aplicar um método analítico

que considere os efeitos de catenária na laje de concreto, visto os modelos numéricos demonstrarem que a armadura longitudinal tem grande importância no comportamento estrutural da viga mista. Recomendam-se ainda estudos que avaliem a dimensão das fissuras e a ocorrência ou não da perda da estanqueidade da laje na região próxima ao apoio para a condição de apoio semicontínua, verificando se realmente existe quebra da compartimentação vertical.

Ainda, a condição de continuidade da armadura longitudinal por toda extensão da viga pode inviabilizar a solução da semicontinuidade para grandes taxas de armadura, visto isso existe a necessidade de estudar modelos em que haja aumento da área de aço presente na laje de concreto apenas nas regiões próximas dos apoios e comparar o TRF com os encontrados pelos métodos simplificados.

13 REFERÊNCIAS

ALBUQUERQUE, G. B. M. L. **Dimensionamento de vigas de concreto armado em situação de incêndio**. 246f. Tese (Mestrado) - Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, São Paulo, 2012.

ALVA, G. M. S. **Sobre o Projeto de Edifícios em Estrutura Mista Aço-Concreto**. 277f. Tese (Mestrado) - Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo. São Carlos, 2000.

AMERICAN INSTITUTE OF STEEL CONSTRUCTION - AISC. **Specification for Structural Steel Buildings**. Chicago, 2005.

ANDERSON, D.; NAJAFI A. A. Performance of Composite Connections: Major Axis End Plate Joints. **Journal of Constructional Steel Research**, v.31, p.31-57. Elsevier, 1993.

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. Rio de Janeiro, 2013.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 14432**: Exigências de resistência ao fogo de elementos construtivos de edificações - Procedimento. Rio de Janeiro, 2001.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 15200**: Projeto de estruturas de concreto em situação de incêndio. Rio de Janeiro, 2012.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 6118**: projeto de estruturas de concreto - procedimento. Rio de Janeiro, 2014.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 6120**: cargas para o cálculo de estruturas de edificações. Rio de Janeiro, 1980.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 8681**: ação e segurança nas estruturas - procedimento. Rio de Janeiro, 2003.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 8800**: projeto de estruturas de aço e de estruturas mistas de aço e concreto de edifícios. Rio de Janeiro, 2008.

BAILEY C.G.; WHITE D.S.; MOORE D.B. The tensile membrane action of unrestrained composite slabs simulated under fire conditions. **Engineering Structures**, v.22, p.1583-1595. Elsevier, 1999.

BAILEY C.G.; Membrane action of unrestrained lightly reinforced concrete slabs at large displacements. **Engineering Structures**, v.23, p.470-483. Elsevier, 2000.

BRITTO, H. **Curso básico de resistência dos materiais**. fasc.4. Apostila. Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, São Paulo, 2010.

CATAI, E. **Análise dos efeitos da retração e fluência em vigas mistas**. 155f. Tese (Mestrado) - Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo. São Carlos, 2005.

CEDENO, G. A.; VARMA, A. H.; GORE, J. Predicting the Standard Fire Behaviour of Composite Steel Beams. **Composite Construction in Steel and Concrete**, v.VI, p. 642-656. ASCE, 2011.

CHIOU, Y. J.; LIEN, K. H.; WANG, R. Z.; HSIAO, P. A. Nonlinear behaviour of steel structures considering the cooling phase of a fire. **Journal of Constructional Steel Research**, v.65, p.1776-1786. Elsevier, 2009.

CORPO DE BOMBEIROS - POLÍCIA MILITAR DO ESTADO DE SÃO PAULO. **Instrução técnica Nº 08**: Resistência ao fogo dos elementos de construção. São Paulo, 2011.

COSTA, C. N. **Dimensionamento de elementos de concreto armado em situação de incêndio**. 401f. Tese (Doutorado) – Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, São Paulo, 2008.

COSTA, C. N.; SILVA, V. P. O Método do tempo equivalente para o projeto de estruturas de concreto em situação de incêndio. **Anais do 47º Congresso Brasileiro do Concreto**, v.3, p.III154-167, Ibracon, 2005.

COWLARD, A. et al. Fire safety design for tall buildings. **Procedia Engineering**, v.62, p.169-181, Elsevier, 2013.

DASSAULT SYSTÈMES. Heat transfer and thermal-stress analysis. In: DASSAULT SYSTÈMES. **Abaqus 6.12 Documentation**: Abaqus Analysis User's Manual. Providence, RI, EUA: 2012.

DASSAULT SYSTÈMES. Heat transfer. In: DASSAULT SYSTÈMES. **Abaqus 6.12 Documentation**: Abaqus Theory Manual. Providence, RI, EUA: 2012.

DU, Y.; LI, G. A new temperature-time curve for fire-resistance analysis of structures. **Fire Safety Journal**, v.54, p.113-120. Elsevier, 2012.

ELLOBODY, E.; YOUNG, B. Nonlinear analysis of composite castellated beams with profiled steel sheeting exposed to different fire conditions. **Journal of Constructional Steel Research***,* v.113, p.247-260. Elsevier, 2015.

EUROPEAN COMMITTEE FOR STANDARDIZATION. **EN 1991-1-2**: Eurocode 1: Actions on structures – part 1-2: General actions - Actions on structures exposed to fire. Brussels: CEN, 2002.

EUROPEAN COMMITTEE FOR STANDARDIZATION. **EN 1992-1-2**: Eurocode 2: Design of concrete structures – part 1-2: General rules - Structural fire design. Brussels: CEN, 2004.

EUROPEAN COMMITTEE FOR STANDARDIZATION. **EN 1993-1-2**: Eurocode 3: Design of steel structures – part 1-2: General rules - Structural fire design. Brussels: CEN, 2005.

EUROPEAN COMMITTEE FOR STANDARDIZATION. **EN 1994-1-1**: Eurocode 4: Design of composite steel and concrete structures – part 1-1: General rules and rules for buildings. Brussels: CEN, 2004.

EUROPEAN COMMITTEE FOR STANDARDIZATION.**EN 1994-1-2**: Eurocode 4: Design of composite steel and concrete structures – part 1-2: General rules - Structural fire design. Brussels: CEN, 2005.

FAKURY, R. H. **A atual norma de projeto de estruturas de aço e mistas, a ABNT NBR 8800:2008**. Apresentação. Congresso Latinoamericano da Construção Metálica - Construmetal. São Paulo, 2008.

FAKURY, R. H.; CASAS, E. B.; PACÍFICO, F. F.; ABREU, L. M. P. Design of semi-continuous composite steel-concrete beams at the fire limit state. **Journal of Constructional Steel Research**, v.61, p.1094-1107. Elsevier, 2005.

FIGUEIREDO, L. M. B. **Projeto e construção de pilares mistos aço-concreto**. 143f. Tese (Mestrado) - Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo. São Carlos, 1998.

FISCHER, E. C.; VARMA, H. V. Fire behavior of composite beams with simple connections: Benchmarking of numerical models. **Journal of Constructional Steel Research**, v.111, p.112-125. Elsevier, 2015.

FISCHER, E. C.; VARMA, A. H. Fire resilience of composite beams with simple connections: Parametric studies and design. **Journal of Constructional Steel Research**, v.128, p.119-135. Elsevier, 2017.

FONSECA, C. **Estrutura metálica é aposta na construção**. Notícia. Valor Econômico. 14 de Julho de 2015.

FRANSEN, J. M.; ZAHARIA, R. **Design of steel structures subjected to fire**. Liege, Bélgica, ULG, 2005.

FRÜCHTENGARTEN, J. **Cálculo de Vigas Mistas de Aço e Concreto**. Apostila. ABECE. São Paulo, 2014.

FRÜCHTENGARTEN, J. **Sobre o estudo da flambagem lateral de vigas de aço por meio da utilização de uma teoria não-linear geometricamente exata**. 227f. Tese (Mestrado) - Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, São Paulo, 2005.

FUSCO, P. B. **Técnica de armar as estruturas de concreto**. São Paulo: Pini, 1995.

GILLIE, M.; USMANI, A. S.; ROTTER, J. M.A structural analysis of the first Cardington test. **Journal of Constructional Steel Research**, v.57, p.581-601. Elsevier, 2001.

GOVERNO DO ESTADO DE SÃO PAULO. **Decreto nº 56.819**: Regulamento de Segurança contra Incêndio. São Paulo, 10 de março de 2011.

GRIFFIS, L. G. The 1994 T.R. High Lecture: Composite Frame Construction. **National Steel Construction Conference**, Pittsburg, Pennsylvania. Proceedings. Nova Iorque, 1994.

HUANG, Z.; LIN, S.; FAN, M. The effects of protected beams and their connections on the fire resistance of composite buildings. **Fire Safety Journal**, v.78, p. 31-43. Elsevier, 2015.

IOANNIDES, S. A.; MEHTA, S. Restrained versus unrestrained fire ratings for steel structures - a practical approach. **Modern Steel Construction**. Chicago: AISC, 1997.

KMIECIK, P.; KAMINSKI, M. Modelling of reinforced concrete structures and composite structures with concrete strength degradation taken into consideration. **Archives of Civil and Mechanical Engineering**, v.XI, no.3.Breslávia, Polônia, 2011.

KODUR, V. K. R.; NASER, M. Z. Effect of local instability on capacity of steel beams exposed to fire. **Journal of Constructional Steel Research**, v.111, p.31-42. Elsevier, 2015.

KODUR, V. K. R.; NASER, M.; PAKALA, P.; VARMA, A. Modeling the response of composite beam-slab assemblies exposed to fire. **Journal of Constructional Steel Research**, v.80, p. 163-173. Elsevier, 2013.

KOLŜEK, J. et al. A fully generalised approach to modelling fire response of steel-RC composite structures. **International Journal of Non-Linear Mechanics**, v.67, p.382-393. Elsevier, 2014.

KUCZ, M. et al. Influence of Boundary Conditions on the Thermal Response of Selected Steel Member. **Procedia Engineering**, v.57, p.977-985. Elsevier, 2013.

LANDESMANN, A. Inelastic Analysis of Semi-Rigid Composite Structures under Fire Conditions. **Journal of the Brazilian Society of Mechanical Sciences and Engineering**, v.XXXIII, p.483-491.ABCM, 2011.

LIEN, K. H. et al. Nonlinear behavior of steel structures considering the cooling phase of a fire. **Journal of Construction Steel Research**, v.65, p.1776-1786. Elsevier, 2009.

LIM, L.; BUCHANAN, A. H.; MOSS, P. J. Restraint of fire-exposed concrete floor systems. **Fire and Materials**, v. 28, p. 95-125, 2004.

LUONGO, A.; CONTENTO, A. Nonlinear elastic analysis of steel planar frames under fire loads. **Computers and Structures**, v.150, p.23-33.Elsevier, 2015.

MAO, C. J. et al. Fire response of steel semi-rigid beam-column moment connections. **Journal of Constructional Steel Research**, v.65, p.1290-1303. Elsevier, 2009.

MAO, C. J. et al. The stiffness estimation of steel semi-rigid beam-column moment connections in a fire. **Journal of Constructional Steel Research**, v.66, p.680-694. Elsevier, 2010.

MARAVEAS, C.; SWAILES, T.; WANG, Y. A detailed methodology for the finite element analysis of asymmetric slim floor beams in fire. **Steel Construction**, v. 5, No. 3. Berlim: Ernst & Sohn, 2012.

MICHAL S.; ANDRZEJ W. Calibration of the CDP model parameters in Abaqus. **Advances in Structural Engineering and Mechanics**. Incheon, Coréia do Sul, 2015.

NATIONAL WILDFIRE COORDINATING GROUP. **Glossary of Wildland Fire Terminology**. Boise, 2012.

NGUYEN, T. T.; TAN, K. H. Experimental and numerical evaluation of composite floor systems under fire conditions. **Journal of Constructional Steel Research**, v.105, p.86-96. Elsevier, 2015.

OEHLERS, D. J.; BRADFORD, M. A. **Elementary Behaviour of Composite Steel and Concrete Structural Members**. Elsevier, 1999.

PANTOJA, J. C. **Geração automática via otimização topológica e avaliação de segurança de modelos de bielas e tirantes**. 240f. Tese (Doutorado) - Departamento de Engenharia Civil, Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2012.

PORCARI, G. F.; ZALOK, E.; MEKKY, W. Fire induced progressive collapse of steel building structures: A review of the mechanisms. **Engineering Structures**, v.82, p.261-267. Elsevier, 2015.

REBELLO, Y. C. P. **Concepção Estrutural e Arquitetura**. São Paulo: Zigurate Editores, 2000.

SILVA, V. P. **Dimensionamento de estruturas de aço**. Apostila para a disciplina PEF-2402 - Estruturas Metálicas e de Madeira. Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, São Paulo, 2012.

SILVA, V. P., **Estruturas de aço em situação de incêndio**. São Paulo: Zigurate Editora, 2001.

SILVA, V. P., **Projeto de estruturas de concreto em situação de incêndio**. São Paulo: Blucher, 2012.

SUN, Y.; MÄKELÄINEN, P. The longitudinal shear behaviour of a new steel sheeting profile for composite floor slabs. **Journal of Constructional Steel Research**, v.49, p.117-128. Elsevier, 1999.

TIPLER, P. A.; MOSCA, G. **Physics for Scientists and Engineers**, v.1, 6th ed. New York: W. H. Freeman, 2007.

USMANI, A. S.; ROTTER, J. M.; LAMONT, S.; SANAD, A. M.; GILLIE, M. Fundamental principles of structural behaviour under thermal effects. **Fire Safety Journal**, v.36, p. 721-744. Elsevier, 2001.

USMANI, A. S.; ROTTER, J. M.; GILLIE, M. A structural analysis of the first Cardington test. **Journal of Constructional Steel Research**, v.57, p. 581-601. Elsevier, 2001.

VASCONCELLOS, A. L. **Revista Construção Metálica**, v.73, p.20-25. São Paulo: ABCEM, 2006.

VIRTUOSO, F. **Análise Plástica de Estruturas**. Disciplina de estruturas metálicas. Departamento de Engenharia Civil e Arquitectura. Instituto Superior Técnico. Lisboa, 2009.

WAINMAN, D. E.; KIRBY B. R. Unprotected Structural Steel – 1. **Compendium of UK Standard Fire Test Data**. BSC, 1987.

WALD, F.; SOKOL, Z.; MOORE, D. Horizontal forces in steel structures tested in fire. **Journal of Constructional Steel Research**, v.65, p.1896-1903. Elsevier, 2009.

WANG, P.; LI, G.; GUO, S. Effects of the cooling phase of a fire on steel structures. **Fire Safety Journal**, v.43, p.451-458. Elsevier, 2008.

WANG, Y.; SWAILES, T.; MARAVEAS, C. A detailed methodology for the finite element analysis of asymmetric slim floor beams in fire. **Steel Construction**, v.5, no. 3. Ernst & Sohn: Berlin, 2012.

WANG, Y. C. **Steel and composite structures**. Behaviour and design for fire safety. London: Spon Press, 2002.

WONG, M. B. Size effect on temperatures of structural steel in fire. **Journal of Structural Engineering**, v.131 (1), p. 16-20. ASCE: Reston, 2005.

ZEHFUSS, J.; HOSSER, D. A parametric natural fire model for the structural fire design of multi-storey buildings. **Fire Safety Journal**, v.42, p.115-126. Elsevier, 2007.

ANEXO A - MOMENTO FLETOR RESISTENTE DE VIGAS MISTAS DE AÇO E CONCRETO SEGUNDO ABNT NBR 8800:2008

Neste anexo é apresentada a rotina de cálculo para determinar o momento fletor resistente de uma viga mista de aço e concreto, formada por um perfil compacto de seção tipo I ou H, segundo ABNT NBR 8800:2008.

Denominam-se perfis compactos aqueles em que a relação entre a altura e a espessura da alma (h/t_w) é inferior ou igual a $3{,}76\sqrt{E/f_y}$.

A.1 Momentos fletores positivos

Considera-se, **na interação total**, três possíveis situações de posição da linha neutra plástica, de acordo com a Figura A.1.

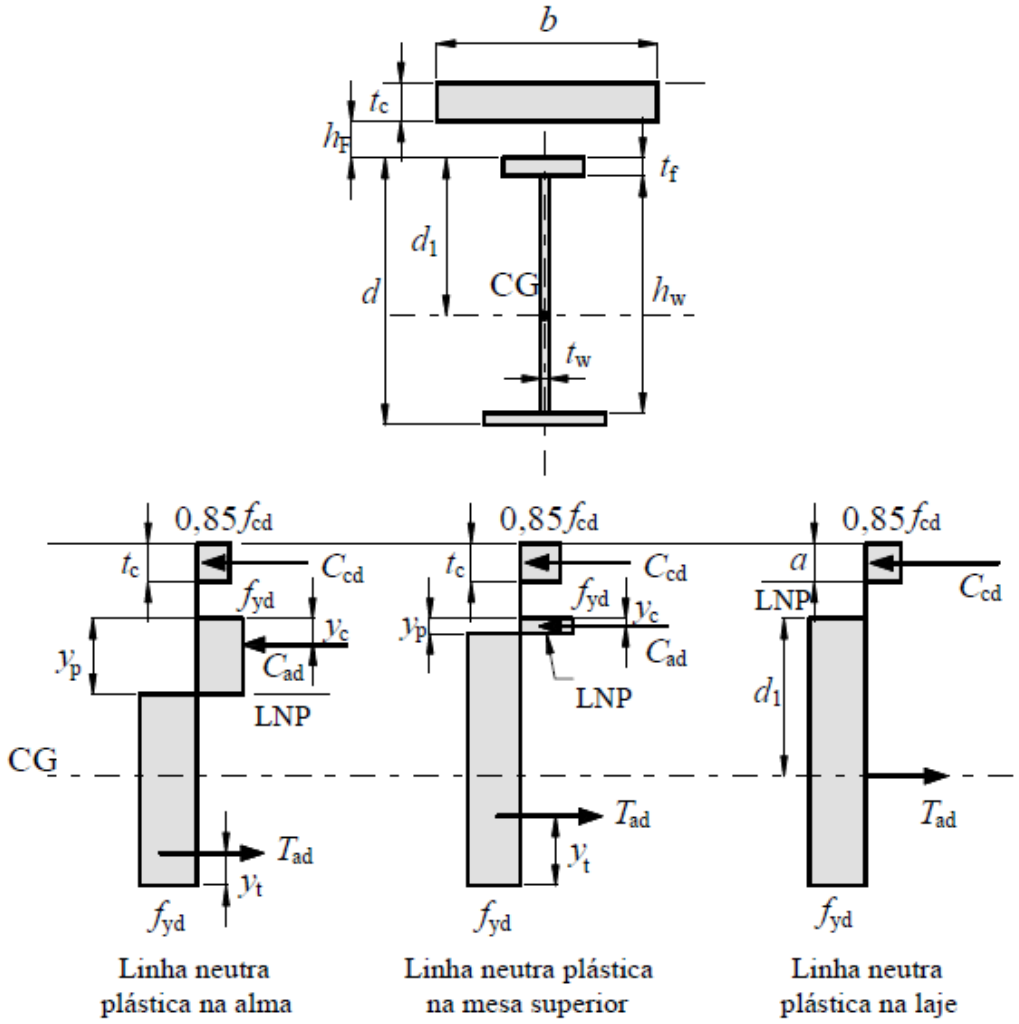


Figura A.1 – Propriedades plásticas da seção mista (Fonte: ABNT NBR8800:2008).

Na Figura A.1, têm-se:

C_{cd} a força resistente de cálculo da espessura comprimida da laje de concreto;

T_{ad} a força resistente de cálculo da região tracionada do perfil de aço;

C_{ad} a força resistente de cálculo da região comprimida do perfil de aço;

A_a a área do perfil de aço;

A_{af} a área da mesa superior do perfil de aço;

A_{aw} a área da alma do perfil de aço;

b a largura da laje de concreto;

t_c a altura da laje de concreto (descontados a pré-laje de concreto pré-moldada ou as nervuras da fôrma de aço incorporada, caso existentes);

a a espessura da região comprimida da laje;

h_F a espessura da pré-laje de concreto pré-moldada ou a altura das nervuras da fôrma de aço incorporada, caso existentes;

d a altura total do perfil de aço;

h_w a altura da alma do perfil de aço;

t_f a espessura da mesa superior do perfil de aço;

d_1 a distância do centro geométrico do perfil de aço até a face superior desse perfil;

y_c a distância do centro geométrico apenas da parte comprimida do perfil de aço (onde atua C_{ad}) até a face superior desse perfil;

y_t a distância do centro geométrico apenas da parte tracionada do perfil de aço (onde atua T_{ad}) até a face superior desse perfil;

y_p a distância da linha neutra plástica da seção até a face superior do perfil de aço.

Ao realizar-se o equilíbrio de forças e momentos na seção transversal determina-se o momento fletor de plastificação da viga mista para cada caso.

A.1.1 Linha neutra plástica na laje de concreto

Quando $(0{,}85\ f_{cd}\ b\ t_c) \geq A_a f_{yd}$, por equilíbrio, a linha neutra plástica deve estar na laje de concreto, definindo os parâmetros segundo Equação (A.1), Equação (A.2) e Equação (A.3).

$$C_{cd} = 0{,}85\ f_{cd}\ b\ a \quad \textbf{(A.1)}$$

$$T_{ad} = A_a f_{yd} \quad \textbf{(A.2)}$$

$$a = \frac{T_{ad}}{0{,}85\, f_{cd}\, b} \leq t_c \quad \textbf{(A.3)}$$

O momento fletor resistente de cálculo é dado pela Equação (A.4).

$$M_{Rd} = T_{ad}\left(d_1 + h_F + t_c - \frac{a}{2}\right) \quad \textbf{(A.4)}$$

A.1.2 Linha neutra plástica no perfil de aço

Quando $A_a f_{yd} > (0{,}85\, f_{cd}\, b\, t_c)$ a linha neutra plástica encontra-se no perfil de aço, logo vale a Equação (A.5), Equação (A.6) e Equação (A.7).

$$C_{cd} = 0{,}85\, f_{cd}\, b\, t_c \quad \textbf{(A.5)}$$

$$C_{ad} = \frac{1}{2}\left(A_a f_{yd} - C_{cd}\right) \quad \textbf{(A.6)}$$

$$T_{ad} = C_{cd} + C_{ad} \quad \textbf{(A.7)}$$

Também por equilíbrio, quando $C_{ad} \leq A_{af} f_{yd}$ a linha neutra plástica encontra-se na mesa superior do perfil de aço e sua posição é determinada conforme Equação (A.8).

$$y_p = \frac{C_{ad}}{A_{af}\, f_{yd}}\, t_f \quad \textbf{(A.8)}$$

No caso em que $C_{ad} > A_{af}\, f_{yd}$ a linha neutra plástica encontra-se na alma do perfil metálico e sua posição é determinada pela Equação (A.9).

$$y_p = t_f + h_w\left(\frac{C_{ad} - A_{af} f_{yd}}{A_{aw} f_{yd}}\right) \quad \textbf{(A.9)}$$

O momento fletor resistente fica descrito, tanto para a linha plástica na mesa superior quanto na alma, pela Equação (A.10).

$$M_{Rd} = C_{ad}(d - y_t - y_c) + C_{cd}\left(\frac{t_c}{2} + h_F + d - y_t\right) \quad \textbf{(A.10)}$$

A.1.3 Interação parcial

No caso de interação parcial adota-se a hipótese de que a maior força de compressão que poderá ser transmitida à laje de concreto será justamente o máximo

esforço resistente dos conectores de cisalhamento ($\sum Q_{Rd}$), valendo o descrito pela Equação (A.11).

$$C_{cd} = \Sigma Q_{Rd} \quad \textbf{(A.11)}$$

Por esse motivo, a laje de concreto não se encontra totalmente comprimida, sendo o parâmetro a calculado pela Equação (A.12).

$$a = \frac{C_{cd}}{0{,}85\, f_{cd}\, b} \quad \textbf{(A.12)}$$

Por tratar-se de interação parcial o esforço resistente dos conectores de cisalhamento é menor do que a máxima força de tração que o perfil de aço pode estar sujeito, ou seja, $C_{cd} < A_a f_{yd}$, caracterizando as mesmas expressões de C_{ad}, T_{ad} e y_p definidas em 0. Por fim o momento fletor resistente de cálculo é dado pela Equação (A.13).

$$M_{Rd} = C_{ad}(d - y_t - y_c) + C_{cd}\left(t_c - \frac{a}{2} + h_F + d - y_t\right) \quad \textbf{(A.13)}$$

A.2 Momentos fletores negativos

A ABNT NBR 8800:2008 admite que a seção transversal resistente em regiões de momento fletor negativo das vigas mistas reduz-se ao perfil de aço e à seção da armadura longitudinal existente na largura efetiva da laje de concreto (item 3.2.1). Existem ainda recomendações gerais que devem ser atendidas para garantir as formulações apresentadas:

- A quantidade de conectores de cisalhamento presentes na região de momentos negativos deve ser suficiente para absorver a força de tração da armadura da laje.
- A relação entre largura e espessura da mesa inferior (comprimida) do perfil de aço não pode ser superior a $0{,}38\sqrt{E/f_y}$, garantindo que a seção plastifique antes do estado-limite último de instabilidade local da mesa (FLM).
- A relação entre duas vezes a altura da parte comprimida da alma (para perfis laminados desconta-se, ainda, duas vezes o raio de concordância entre a mesa e a alma) não pode ser superior a $3{,}76\sqrt{\mathrm{E/f_y}}$, com a posição da linha neutra plástica (LNP) determinada conforme Figura A.2, garantindo que a

seção plastifique antes do estado-limite último de instabilidade local da alma (FLA).

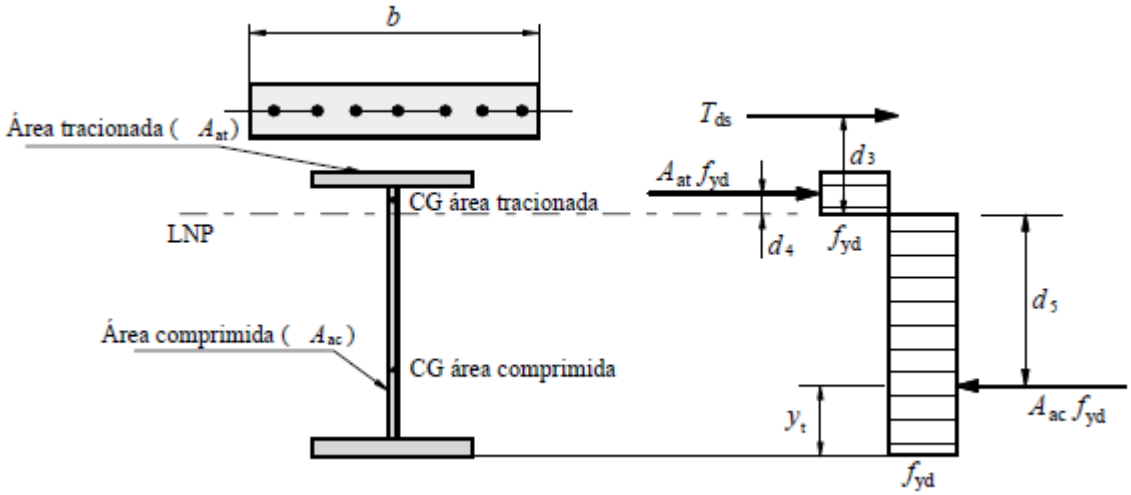


Figura A.2 – Propriedades plásticas da seção mista sujeita a momentos negativos (Fonte: ABNT NBR8800:2008).

A força resistente de tração de cálculo da armadura longitudinal da laje deve ser determinada conforme Equação (A.14).

$$T_{ds} = A_{sl}\, f_{sd} \qquad \textbf{(A.14)}$$

Na Equação (A.14):

A_{sl} a área total de armadura longitudinal na largura efetiva da laje de concreto;

f_{sd} a tensão de escoamento de cálculo do aço da armadura.

O momento fletor resistente fica determinado pela Equação (A.15).

$$M_{Rd}^{-} = T_{ds}\, d_3 + A_{at}\, f_{yd} d_4 + A_{ac}\, f_{yd} d_5 \qquad \textbf{(A.15)}$$

Na Equação (A.15):

d_3 é a distância do centro geométrico da armadura longitudinal à LNP;

d_4 é a distância do centro geométrico da área tracionada do perfil de aço à LNP;

d_5 é a distância do centro geométrico da área comprimida do perfil de aço à LNP;

A_{at} é a área tracionada da seção do perfil de aço;

A_{ac} é a área comprimida da seção do perfil de aço.

A posição da LNP deve ser determinada realizando o equilíbrio de forças da seção transversal conforme Figura A.2, representado pela igualdade de áreas da Equação (A.16).

$$\frac{T_{ds}}{f_{yd}} + A_{at} = A_{ac} \quad \textbf{(A.16)}$$

ANEXO B -TEMPOS REQUERIDOS DE RESISTÊNCIA AO FOGO (TRRF) SEGUNDO CORPO DE BOMBEIROS - IT08:2011

B.1 Classificação das edificações e TRRF

O anexo do Regulamento de Segurança Contra Incêndio (decreto 56.819, São Paulo, 2011) classifica os edifícios segundo Tabela B.1 e o anexo A da IT08:2011 determina os valores de TRRF (Tabela B.2).

Tabela B.1 – Classificação das edificações quanto à sua ocupação (Fonte: Regulamento de Segurança Contra Incêndio, decreto 56.819, São Paulo, 2011).

Grupo	Ocupação/uso	Divisão	Descrição	Exemplos
A	Residencial	A-1	Habitação unifamiliar	Casas térreas ou assobradadas (isoladas e não isoladas) e condomínios horizontais
		A-2	Habitação multifamiliar	Edifícios de apartamento em geral
		A-3	Habitação coletiva	Pensionatos, internatos, alojamentos, mosteiros, conventos, residências geriátricas. Capacidade máxima de 16 leitos
B	Serviço de Hospedagem	B-1	Hotel e assemelhado	Hotéis, motéis, pensões, hospedarias, pousadas, albergues, casas de cômodos, divisão A-3 com mais de 16 leitos
		B-2	Hotel residencial	Hotéis e assemelhados com cozinha própria nos apartamentos (incluem-se apart-hotéis, flats, hotéis residenciais)
C	Comercial	C-1	Comércio com baixa carga de incêndio	Artigos de metal, louças, artigos hospitalares e outros
		C-2	Comércio com média e alta carga de incêndio	Edifícios de lojas de departamentos, magazines, armarinhos, galerias comerciais, supermercados em geral, mercados e outros
		C-3	*Shopping centers*	Centro de compras em geral (*shopping centers*)
D	Serviço profissional	D-1	Local para prestação de serviço profissional ou condução de negócios	Escritórios administrativos ou técnicos, consultórios, instituições financeiras (que não estejam incluídas em D-2), repartições públicas, cabeleireiros, laboratórios de análises clínicas sem internação, centros profissionais e outros
		D-2	Agência bancária	Agências bancárias e assemelhados
		D-3	Serviço de reparação (exceto os classificados em G-4)	Lavanderias, assistência técnica, reparação e manutenção de aparelhos eletrodomésticos, chaveiros, pintura de letreiros e outros
		D-4	Laboratório	Laboratórios de análises clínicas sem internação, laboratórios químicos, fotográficos e assemelhados

Tabela B.1 – Classificação das edificações quanto à sua ocupação (Fonte: Regulamento de Segurança Contra Incêndio, decreto 56.819, São Paulo, 2011).

Grupo	Ocupação/uso	Divisão	Descrição	Exemplos
E	Educacional e cultura física	E-1	Escola em geral	Escolas de primeiro, segundo e terceiro graus, cursos supletivos e pré-universitário e assemelhados
		E-2	Escola especial	Escolas de artes e artesanato, de línguas, de cultura geral, de cultura estrangeira, escolas religiosas e assemelhados
		E-3	Espaço para cultura física	Locais de ensino e/ou práticas de artes marciais, natação, ginástica (artística, dança, musculação e outros) esportes coletivos (tênis, futebol e outros que não estejam incluídos em F-3), sauna, casas de fisioterapia e assemelhados. Sem arquibancadas.
		E-4	Centro de treinamento profissional	Escolas profissionais em geral
		E-5	Pré-escola	Creches, escolas maternais, jardins de infância
		E-6	Escola para portadores de deficiências	Escolas para excepcionais, deficientes visuais e auditivos e assemelhados
F	Locais de reunião pública	F-1	Local onde há objeto de valor inestimável	Museus, centro de documentos históricos, galerias de arte, bibliotecas e assemelhados
		F-2	Local religioso e velório	Igrejas, capelas, sinagogas, mesquitas, templos, cemitérios, crematórios, necrotérios, salas de funerais e assemelhados
		F-3	Centro esportivo e de exibição	Arenas em geral, estádios, ginásios, piscinas, rodeios, autódromos, sambódromos, pista de patinação e assemelhados. Todos com arquibancadas
		F-4	Estação e terminal de passageiro	Estações rodoferroviárias e marítimas, portos, metrô, aeroportos, heliponto, estações de transbordo em geral e assemelhados
		F-5	Arte cênica e auditório	Teatros em geral, cinemas, óperas, auditórios de estúdios de rádio e televisão, auditórios em geral e assemelhados
		F-6	Clubes sociais e diversão	Boates, clubes em geral, salões de baile, restaurantes dançantes, clubes sociais, bingo, bilhares, tiro ao alvo, boliche e assemelhados
		F-7	Construção provisória	Circos e assemelhados
		F-8	Local para refeição	Restaurantes, lanchonetes, bares, cafés, refeitórios, cantinas e assemelhados
		F-9	Recreação pública	Jardim zoológico, parques recreativos e assemelhados
		F-10	Exposição de objetos ou animais	Salões e salas para exposição de objetos ou animais. Edificações permanentes

Tabela B.1 – Classificação das edificações quanto à sua ocupação (Fonte: Regulamento de Segurança Contra Incêndio, decreto 56.819, São Paulo, 2011).

Grupo	Ocupação/uso	Divisão	Descrição	Exemplos
G	Serviço automotivo e assemelhados	G-1	Garagem sem acesso de público e sem abastecimento	Garagens automáticas, garagens com manobristas
		G-2	Garagem com acesso de público e sem abastecimento	Garagens coletivas sem automação, em geral, sem abastecimento (exceto veículos de carga e coletivos)
		G-3	Local dotado de abastecimento de combustível	Postos de abastecimento e serviço, garagens (exceto veículos de carga e coletivos)
		G-4	Serviço de conservação, manutenção e reparos	Oficinas de conserto de veículos, borracharia (sem recauchutagem). Oficinas e garagens de veículos de carga e coletivos, máquinas agrícolas e rodoviárias, retificadoras de motores
		G-5	Hangares	Abrigos para aeronaves com ou sem abastecimento
H	Serviço de saúde e institucional	H-1	Hospital veterinário e assemelhados	Hospitais, clínicas e consultórios veterinários e assemelhados (inclui-se alojamento com ou sem adestramento)
		H-2	Local onde pessoas requerem cuidados especiais por limitações físicas ou mentais	Asilos, orfanatos, abrigos geriátricos, hospitais psiquiátricos, reformatórios, tratamento de dependentes de drogas, álcool. E assemelhados. Todos sem celas
		H-3	Hospital e assemelhado	Hospitais, casa de saúde, prontos-socorros, clínicas com internação, ambulatórios e postos de atendimento de urgência, postos de saúde e puericultura e assemelhados com internação
		H-4	Edificações das forças armadas e policiais	Quartéis, delegacias, postos policiais e assemelhados
		H-5	Local onde a liberdade das pessoas sofre restrições	Hospitais psiquiátricos, manicômios, reformatórios, prisões em geral (casa de detenção, penitenciárias, presídios) e instituições assemelhadas. Todos com celas
		H-6	Clínica e consultório médico e odontológico	Clínicas médicas, consultórios em geral, unidades de hemodiálise, ambulatórios e assemelhados. Todos sem internação

Tabela B.1 – Classificação das edificações quanto à sua ocupação (Fonte: Regulamento de Segurança Contra Incêndio, decreto 56.819, São Paulo, 2011).

Grupo	Ocupação/uso	Divisão	Descrição	Exemplos
I	Indústria	I-1	Locais onde as atividades exercidas e os materiais utilizados apresentam baixo potencial de incêndio. Locais onde a carga de incêndio não chega a 300MJ/m2	Atividades que utilizam pequenas quantidades de materiais combustíveis. Aço, aparelhos de rádio e som, armas, artigos de metal, gesso, esculturas de pedra, ferramentas, jóias, relógios, sabão, serralheria, suco de frutas, louças, máquinas
		I-2	Locais onde as atividades exercidas e os materiais utilizados apresentam médio potencial de incêndio. Locais com carga de incêndio entre 300 a 1.200MJ/m2	Artigos de vidro, automóveis, bebidas destiladas, instrumentos musicais, móveis, alimentos, marcenarias, fábricas de caixas
		I-3	Locais onde há alto risco de incêndio. Locais com carga de incêndio superior a 1.200 MJ/m²	Atividades industriais que envolvam inflamáveis, materiais oxidantes, ceras, espuma sintética, grãos, tintas, borracha, processamento de lixo
J	Depósito	J-1	Depósitos de material incombustível	Edificações sem processo industrial que armazenam tijolos, pedras, areias, cimentos, metais e outros materiais incombustíveis. Todos sem embalagem
		J-2	Todo tipo de Depósito	Depósitos com carga de incêndio entre 300 a 1.200MJ/m2
		J-3	Todo tipo de Depósito	Depósitos com carga de incêndio entre 300 a 1.200MJ/m2
		J-4	Todo tipo de Depósito	Depósitos onde a carga de incêndio ultrapassa a 1.200MJ/m²
L	Explosivo	L-1	Comércio	Comércio em geral de fogos de artifício e assemelhados
		L-2	Indústria	Indústria de material explosivo
		L-3	Depósito	Depósito de material explosivo
M	Especial	M-1	Túnel	Túnel rodoferroviário e marítimo, destinados a transporte de passageiros ou cargas diversas
		M-2	Líquido ou gás inflamáveis ou combustíveis	Depósitos com risco de incêndio maior. Edificações que armazenam alimentos, madeira, papel, tecidos e outros
		M-3	Central de comunicação e energia	Central telefônica, centros de comunicação, centrais de transmissão ou de distribuição de energia e assemelhados
		M-4	Propriedade em transformação	Locais em construção ou demolição e assemelhados
		M-5	Silos	Armazéns de grãos e assemelhados
		M-6	Terra selvagem	Floresta, reserva ecológica, parque florestal e assemelhados
		M-7	Pátio de contêineres	Área aberta destinada a armazenamento de contêineres

Tabela B.2 – Tempos requeridos de resistência ao fogo (TRRF), em minuto (Fonte: Corpo de Bombeiros - IT08:2011, São Paulo).

Grupo	Ocupação/uso	Divisão	Profundidade do subsolo hs		Altura da edificação h							
			Classe S_2 hs> 10 m	Classe S_1 hs≤ 10 m	Classe P_1 h ≤ 6 m	Classe P_2 6 m < h ≤ 12 m	Classe P_3 12 m < h ≤ 23 m	Classe P_4 23 m < h ≤ 30 m	Classe P_5 30 m < h ≤ 80 m	Classe P_6 80 m < h ≤ 120 m	Classe P_7 120 m < h ≤ 150 m	Classe P_8 150 m < h ≤ 250 m
A	Residencial	A-1 a A-3	90	60	30	30	60	90	120	120	150	180
B	Serviços de hospedagem	B-1 e B-2	90	60	30	60	60	90	120	150	180	180
C	Comercial varejista	C-1	90	60	60	60	60	90	120	150	150	180
		C-2 e C-3	90	60	60	60	60	90	120	150	150	180
D	Serviços profissionais, pessoais e técnicos	D-1 a D-3	90	60	30	60	60	90	120	120	150	180
E	Educacional e cultura física	E-1 a E-6	90	60	30	30	60	90	120	120	150	180
F	Locais de reunião de público	F-1, F-2, F-5, F-6, F-8 e F-10	90	60	60	60	60	90	120	150	180	-
		F-3, F-4 e F-7	90	60	Ver isenções		30	60	60	90	120	-
		F-9	90	60	30	60	60	90	120	-	-	-
G	Serviços automotivos	G-1 e G-2 não abertos lateralmente e G-3 a G-5	90	60	30	60	60	90	120	120	150	180
		G-1 e G-2 abertos lateralmente	90	60	30	30	30	30	60	120	120	150
H	Serviços de saúde e institucionais	H-1 e H-4	90	60	30	60	60	90	120	150	180	180
		H-2, H-3 e H-5	90	60	30	60	60	90	120	150	180	180
I	Industrial	I-1	90	60	30	30	30	60	120	-	-	-
		I-2	120	90	30	30	60	90	120	-	-	-
		I-3	120	90	60	60	90	120	120	-	-	-
J	Depósitos	J-1	60	30	Ver isenções		30	30	60	-	-	-
		J-2	90	60	30	30	30	30	60	-	-	-
		J-3	90	60	30	60	60	120	120	-	-	-
		J-4	120	90	60	60	90	120	120	-	-	-
L	Explosivos	L-1, L-2 e L-3	120	120	120	-				-	-	-
M	Especial	M-1	150	150	150	-				-	-	-
		M-5	120	90	60	60	90	120	-	-	-	-
		M-3	120	90	90	90	120	120	120	150	-	-

B.2 Isenções

A IT08:2011 define ainda edificações isentas dos requisitos de resistência ao fogo, desde que atendidas as exigências de saídas de emergência, rotas de fuga e condições de ventilação conforme regulamentações vigentes.

As isenções descritas **não se aplicam** aos subsolos com mais de um piso de profundidade ou área de pavimento superior a 500 m², à estrutura e paredes de vedação das escadas e elevadores de segurança, isolamento de riscos e de compartimentação, às edificações do grupo L e às divisões M1, M2 e M3.

Estão isentas:

- edificações de classes P1 e P2 (ver) com área inferior a 750 m²;
- de classes P1 e P2 com área inferior a 1500 m², com carga de incêndio menor ou igual a 500 MJ/m², excluindo dessa isenção as edificações pertencentes às divisões C2, C3, E6, F1, F5, F6, H2, H3 e H5;
- edificações pertencentes às divisões F3, F4 (exclusivo para áreas de transbordo e circulação de pessoas) e F7, de classes P1 e P2, exceto nas áreas destinadas a outras ocupações, que caracterizem ou não ocupação mista;
- edificações pertencentes à divisão J1 de classes P1 e P2;
- edificações pertencentes às divisões G1 e G2 de classes P1 a P4, quando abertos lateralmente;
- coberturas das edificações que não tiverem função de piso, não forem usadas como rota de fuga e seu colapso estrutural não comprometa a estabilidade das paredes externas e da estrutura principal;
- mezaninos que apresentem área inferior a 750 m² cuja estrutura não dependa da estrutura principal do edifício e mezaninos com área superior a 750 m² das edificações isentas de verificação;
- escadas abertas (não enclausuradas), desde que não possuam materiais combustíveis incorporados em suas estruturas, acabamentos ou revestimentos;
- edificações destinadas a academias de ginástica e similares (divisão E-3), de classes P1 e P2, nas áreas destinadas a piscinas, vestiários, salas de

ginástica, musculação e similares, desde que possuam nestas áreas materiais de acabamento e revestimento incombustíveis;

edificações térreas que forem providas de chuveiros automáticos com bicos do tipo resposta rápida (dimensionados conforme normas específicas), ou que possuírem carga de incêndio específica menor ou igual a 500 MJ/m², ou que forem do grupo I, com carga de incêndio específica menor ou igual a 1200 MJ/m² ou que forem do grupo J, com carga de incêndio específica menor ou igual a 2000 MJ/m². Essa isenção não se aplica quando a cobertura da edificações tiver função de piso ou for usada como rota de fuga, ou quando os elementos estruturais considerados forem essenciais à estabilidade de um elemento de compartimentação ou de isolamento de risco (esses elementos estruturais devem ser dimensionados de forma a não entrar em colapso caso ocorra a ruína da cobertura do edifício;

ANEXO C - FORÇA CORTANTE RESISTENTE DE UMA VIGA DE AÇO À TEMPERATURA AMBIENTE SEGUNDO ABNT NBR 8800:2008

Este anexo apresenta o método recomendado pela ABNT NBR 8800:2008 para determinar a força cortante de cálculo de um perfil de aço de seção transversal do tipo I ou H fletida em relação ao eixo de maior inércia.

C.1 Presença de enrijecedores transversais

O primeiro passo é determinar o parâmetro k_v responsável por levar em consideração a presença de enrijecedores transversais de alma no trecho em análise (Figura C.). A função desses enrijecedores é de impedir a instabilidade local da alma devido às tensões de cisalhamento. Quanto menos espaçados entre si, a força cortante resistente de cálculo será mais próxima do valor equivalente à plastificação total da alma.

Figura C.1 – Exemplo de enrijecedores transversais de alma (Fonte: SOLDAVIGA Ind e Com[1]).

Na presença de enrijecedores (com exceção dos casos explorados pela Equação (C.2)) o parâmetro k_v é determinado segundo Equação (C.1).

[1] Disponível em <http://www.soldaviga.com.br/?pg=produtos&acao=95>. Acesso em mai. 2016.

$$k_v = 5 + \frac{5}{(a/h)^2} \quad \textbf{(C.1)}$$

Na Equação (C.1):

a é o espaçamento entre enrijecedores transversais adjacentes;

h é a altura da alma (distância entre faces internas das mesas dos perfis soldados e essa mesma distância menos dois raios de concordância no caso de perfis laminados).

Caso (a/h) seja superior a 3,0 ou superior a $\left[\frac{260}{(h/t_w)}\right]^2$, o parâmetro k_v passa a ser o mesmo para o caso de almas sem enrijecedores transversais, apresentado pela Equação (C.2).

$$k_v = 5 \quad \textbf{(C.2)}$$

C.2 Plastificação da alma

A força cortante que corresponde à plastificação total da alma é dada pela Equação (C.3). O coeficiente 0,60 diz respeito ao critério de Von Mises que avalia a tensão de escoamento no caso de cisalhamento puro quando comparada ao caso de tração pura como $\boldsymbol{\tau_y = \frac{1}{\sqrt{3}} f_y \approx 0,60\, f_y}$.

$$V_{pl} = 0{,}60\, A_w f_y \quad \textbf{(C.3)}$$

A área da alma $\boldsymbol{A_w}$ deve ser tomada como a altura total da seção transversal $\boldsymbol{d}$ multiplicada pela espessura da alma $\boldsymbol{t_w}$.

C.3 Parâmetros de esbeltez

O parâmetro de esbeltez da alma é responsável por indicar se, no estado-limite último, a chapa está trabalhando em regime totalmente elástico, sendo governado pela instabilidade local, ou no regime plástico, sendo governado pelo escoamento da seção transversal.

O parâmetro de esbeltez $\boldsymbol{\lambda}$ é definido pela Equação (C.4).

$$\lambda = \frac{h}{t_w} \tag{C.4}$$

Os limites para o comportamento plástico e totalmente elástico são definidos pela Equação (C.5) e Equação (C.6) respectivamente.

$$\lambda_p = 1{,}10\sqrt{\frac{k_v\, E}{f_y}} \tag{C.5}$$

$$\lambda_r = 1{,}37\sqrt{\frac{k_v\, E}{f_y}} \tag{C.6}$$

C.4 Força cortante resistente

O último passo é avaliar a força cortante resistente de cálculo de acordo com o parâmetro de esbeltez da alma. Quando o estado-limite último não é governado pelo escoamento total da alma a força cortante resistente é representada como uma fração de V_{pl}, correspondente à plastificação.

A força cortante resistente de cálculo V_{Rd} fica definida pela Equação (C.7).

$$\begin{aligned} Para\ \lambda \leq \lambda_p\text{:}\ \ V_{Rd} &= \frac{V_{pl}}{\gamma_{a1}} \\ Para\ \lambda_p < \lambda \leq \lambda_r\text{:}\ \ V_{Rd} &= \frac{\lambda_p}{\lambda}\frac{V_{pl}}{\gamma_{a1}} \\ Para\ \lambda > \lambda_r\text{:}\ \ V_{Rd} &= 1{,}24\left(\frac{\lambda_p}{\lambda}\right)^2\frac{V_{pl}}{\gamma_{a1}} \end{aligned} \tag{C.7}$$

O coeficiente de ponderação γ_{a1} vale 1,10 para casos de combinações últimas normais de ações.

Na Figura C.2 fica evidente a mudança de comportamento da resistência da peça em função do seu parâmetro de esbeltez. No eixo vertical está o valor da força cortante resistente comparada ao valor de plastificação total da alma, no eixo horizontal o parâmetro de esbeltez comparado ao valor de λ_p.

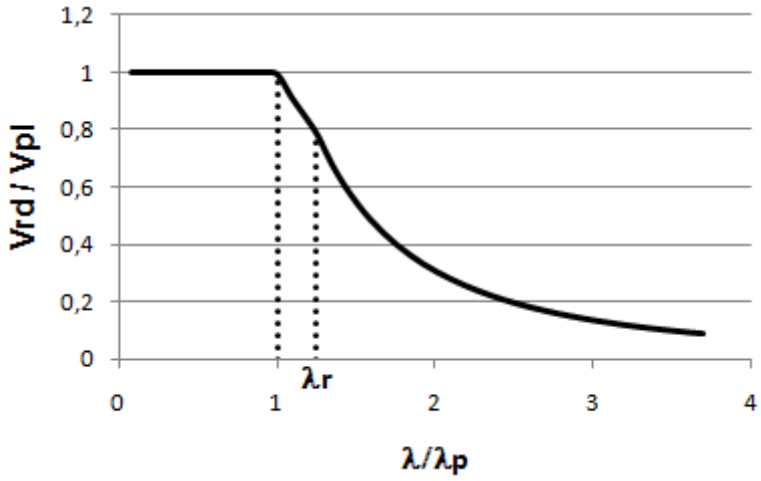


Figura C.2 – Força cortante resistente x parâmetro de esbeltez.

ANEXO D - MOMENTO FLETOR RESISTENTE DE UMA VIGA DE AÇO À TEMPERATURA AMBIENTE SEGUNDO ABNT NBR 8800:2008

Este anexo apresenta o método recomendado pela ABNT NBR 8800:2008 para determinar o momento fletor resistente de cálculo de um perfil de aço de seção transversal do tipo I ou H, de alma não-esbelta, fletida em relação ao eixo de maior inércia.

Vigas não-esbeltas, para o caso de seções I ou H, são aquelas em que o parâmetro de esbeltez da alma (h/t_w) é inferior ou igual a $5{,}70\sqrt{E/f_y}$.

D.1 Estados-limites últimos

Vigas sujeitas à ação de momento fletor são verificadas de acordo com o índice de esbeltez das peças e dos elementos que compõe a seção transversal. O estado-limite último pode ocorrer no regime elástico, onde a resistência é associada à ocorrência de efeitos de instabilidade ou, no regime plástico, estando associada à formação de uma rótula plástica.

A **instabilidade lateral com torção** (FLT) é um fenômeno dito global típico de estruturas com seções transversais abertas e esbeltas, sujeitas ao empenamento. A Figura D. ilustra o fenômeno, nota-se que a seção transversal sofre torção e flexão em sua menor inércia, culminando na amplificação de esforços indesejáveis.

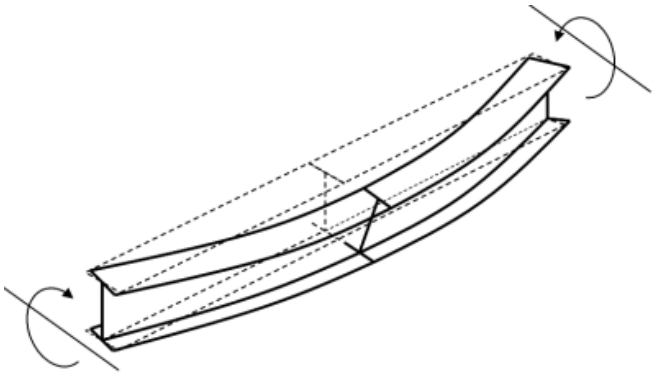


Figura D.1 – Instabilidade lateral com torção (Fonte: SteelConstruction.info[1]).

[1] Disponível em <http://www.steelconstruction.info/Design_of_beams_in_composite_bridges>. Acesso em mai. 2016.

Esse efeito pode ser reduzido com a presença de contenções laterais que impeçam o deslocamento e rotação da seção transversal, diminuindo o denominado *comprimento destravado* e aumentando a capacidade da peça em análise.

A **instabilidade local da mesa comprimida** (FLM) pode ocorrer em seções transversais com mesas esbeltas e deve ser evitada. A Figura D.2 ilustra o fenômeno.

Figura D.2 – Instabilidade local da mesa (Fonte: University of Houston[1]).

A **instabilidade local da alma** (FLA) pode ocorrer em seções transversais com almas esbeltas em região próxima à mesa comprimida. A Figura D.3 ilustra o fenômeno.

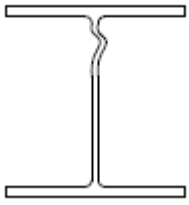


Figura D.3 – Instabilidade local da alma.

A **plastificação da seção transversal** representa o máximo momento fletor que a seção é capaz de resistir, ou seja, quando o fenômeno de instabilidade não é

[1] Disponível em <https://www.youtube.com/watch?v=GUyX9nToAAQ>. Acesso em mai. 2016.

fator limitante e todas as fibras atingem a tensão de escoamento do aço, formando uma rótula plástica.

D.2 Coeficiente C_b

Com respeito ao fenômeno da instabilidade lateral com torção (FLT) o valor do momento fletor crítico que resulta na existência de uma nova configuração de equilíbrio é dependente, além das características geométricas da viga e da seção transversal, do diagrama de momentos fletores, do ponto de aplicação da carga em relação ao centro de cisalhamento e ao tipo de vinculação (FRÜCHTENGARTEN, 2005).

A ABNT NBR 8800:2008 associa o momento crítico apenas ao diagrama de momentos fletores, através do coeficiente C_b, e às características geométricas, ignorando a questão do ponto de aplicação da carga e do tipo de vinculação. Früchtengarten (2005) conclui que essa simplificação é excessivamente a favor da segurança, porém justificada pela sua simplicidade para aplicação em um ambiente de projeto.

D.2.1 Vigas sem contenção lateral contínua

O coeficiente de diagrama de momento não-uniforme C_b é determinado segundo Equação (D.1). Caso haja a presença de pontos de travamento, que restrinjam o deslocamento lateral e a torção da seção transversal ao longo do vão da viga, deve-se calcular um coeficiente C_b para cada trecho entre travamentos (denominados *trechos destravados*, de comprimento L_b). No caso de um trecho entre um ponto de travamento e uma extremidade livre em balanço $C_b = 1{,}0$.

$$C_b = \frac{12{,}5\ M_{máx}}{2{,}5\ M_{máx} + 3\ M_A + 4\ M_B + 3\ M_C}\ R_m \leq 3{,}0 \qquad \textbf{(D.1)}$$

Na Equação (D.1):

$M_{máx}$ é o valor do momento fletor máximo de cálculo, em módulo, do comprimento destravado em análise (Figura D.4);

M_A é o valor do momento fletor de cálculo, em módulo, situado a 1/4 do comprimento destravado em análise (Figura D.4);

M_B é o valor do momento fletor de cálculo, em módulo, situado a 1/2 do comprimento destravado em análise (Figura D.4);

M_C é o valor do momento fletor de cálculo, em módulo, situado a 3/4 do comprimento destravado em análise (Figura D.4);

$R_m = 0{,}5 + 2\left(I_{yc}/I_y\right)^2$ para seções com apenas um eixo de simetria (ou seja, perfil I ou H com mesa superior diferente da inferior) sujeitas à curvatura reversa no comprimento destravado (ou seja, sujeita a momentos fletores positivos e também negativos no comprimento destravado). Para todos os outros casos $R_m = 1{,}0$;

I_y é o menor momento de inércia da seção transversal;

I_{yc} é o momento de inércia da **mesa comprimida** em relação ao eixo de simetria, no caso de seções I ou H com apenas um eixo de simetria $I_{yc} = \left(t_f {b_f}^3\right)/12$. Como este parâmetro será utilizado apenas caso a viga esteja sujeita à curvatura reversa no trecho destravado, refere-se ao menor valor calculado para a mesa superior e para a mesa inferior.

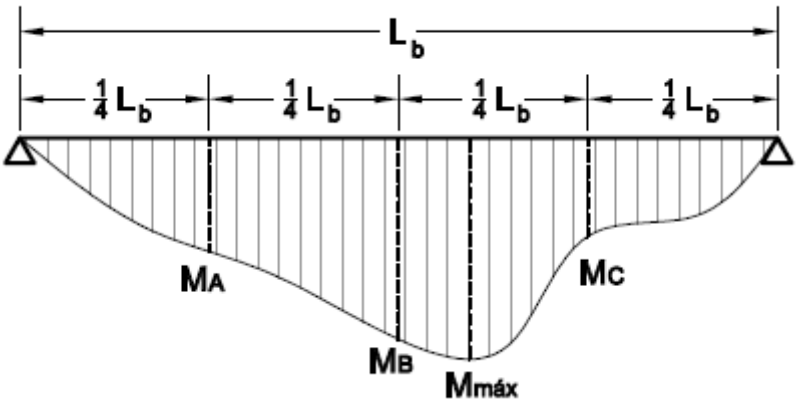


Figura D.4 – Definições dos momentos para cálculo do coeficiente C_b.

D.2.2 Vigas com contenção lateral contínua

A ABNT NBR 8800:2008 recomenda uma formulação diferente para o coeficiente C_b no caso de uma viga que possua uma das mesas travadas continuamente, impedindo o deslocamento lateral dessa mesa, e a outra mesa sem travamento, livre para se deslocar. Deve ser ressaltado que essa formulação é válida apenas para seções simétricas em relação ao eixo de flexão, ou seja, **seções com mesa superior diferente da inferior estão excluídas do caso apresentado nesse item** sendo o coeficiente C_b determinado conforme item D.2.1**.**

Um caso típico de contenção lateral contínua é o de uma viga sob laje de concreto com a presença de conectores de cisalhamento espaçados uniformemente, de tal forma que a mesa superior encontra-se solidarizada à laje de concreto, estando impedida de se deslocar lateralmente.

Uma viga com a mesa superior contida continuamente, submetida apenas a momentos fletores positivos (Figura D.5), não estará sujeita ao estado-limite último de FLT, não havendo necessidade de determinar o coeficiente C_b. O mesmo é valido para o caso de uma viga com a mesa inferior contida, porém submetida apenas a momentos fletores negativos.

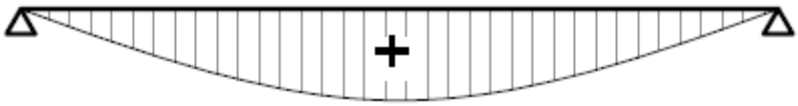


Figura D.5 – Diagrama de momentos fletores em que não ocorre FLT para caso de uma viga com mesa superior contida continuamente.

Uma viga com a mesa superior contida continuamente, com pelo menos uma das extremidades submetidas a momento fletor negativo (Figura D.6), o coeficiente C_b deve ser determinado conforme Equação (D.2). Nesse caso o momento fletor solicitante de cálculo para verificar a FLT será o máximo momento fletor negativo, não existindo a necessidade de verificar FLT para o momento fletor positivo. O mesmo é valido para o caso de uma viga com a mesa inferior contida, porém invertendo os sinais do diagrama de momentos fletores.

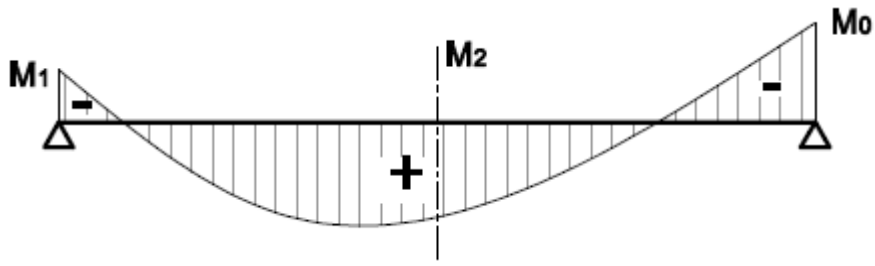


Figura D.6 – Exemplo de diagrama de momentos fletores para utilização da Equação (D.2) no caso de uma viga com mesa superior contida continuamente.

$$C_b = 3{,}00 - \frac{2}{3}\frac{M_1}{M_0} - \frac{8}{3}\frac{M_2}{(M_0 + M_1)} \qquad \textbf{(D.2)}$$

Onde:

M_0é o valor do maior momento fletor solicitante de cálculo, tomado com sinal negativo, que comprime a mesa livre nas extremidades do comprimento destravado.

M_1 é o valor do momento fletor solicitante de cálculo na outra extremidade do comprimento destravado, tomado com sinal negativo se comprimir a mesa livre. Se tracionar a mesa livre será tomado com sinal positivo no segundo termo da Equação (D.2) e igual a zero no terceiro termo (termo em que aparece entre parênteses).

M_2 é o valor do momento fletor solicitante de cálculo na seção central do comprimento destravado, com sinal positivo se tracionar a mesa livre e negativo se comprimir.

Para uma viga com a mesa superior contida continuamente, com carregamento uniformemente distribuído, submetida apenas a momentos fletores negativos e momento nulo nas extremidades (Figura D.7) $C_b = 2{,}00$. O mesmo vale para uma viga com a mesa inferior contida continuamente, porém submetida a momentos fletores positivos.

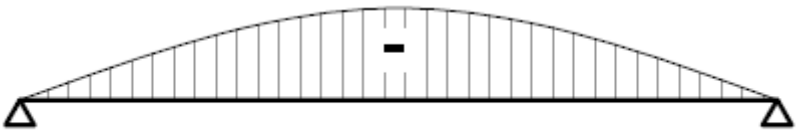


Figura D.7 – Exemplo de diagrama de momentos fletores para utilização onde C_b = 2,00 no caso de uma viga com mesa superior contida continuamente.

Para qualquer outro caso não apresentado adota-se, a favor da segurança, $C_b = 1{,}00$.

D.3 Seções com dois eixos de simetria

Esse item apresenta o roteiro de cálculo para determinar o momento fletor resistente de vigas com seção transversal do tipo I ou H simétricas em relação ao eixo de flexão (de maior inércia), ou seja, com mesa superior e inferior de mesma dimensão.

Define-se a simbologia a ser utilizada:

$M_{pl} = Zf_y$ é o momento de plastificação da seção transversal;

M_r é o momento fletor correspondente ao início do escoamento, em alguns casos o coeficiente 0,7 representa a influência das tensões residuais;

M_{cr} é o momento fletor crítico de flambagem elástica;

L_b é o comprimento destravado do trecho de viga em análise, corresponde à distância entre dois pontos de travamento que impeçam o deslocamento lateral e torção da seção transversal;

λ é o parâmetro de esbeltez;

λ_p é o parâmetro de esbeltez que corresponde à plastificação;

λ_r é o parâmetro de esbeltez que corresponde ao início do escoamento;

f_y é a resistência ao escoamento característica do aço;

E é o módulo de elasticidade do aço;

d é a altura total da seção transversal;

b_f é a largura da mesa;

t_f é a espessura da mesa;

h é a altura da alma (distância entre faces internas das mesas dos perfis soldados e essa mesma distância menos dois raios de concordância no caso de perfis laminados).

t_w é a espessura da alma;

W ou W_c é módulo de resistência elástico da seção relativo ao eixo de flexão;

Z é o módulo de resistência plástico da seção relativo ao eixo de flexão;

I_y é o menor momento de inércia da seção transversal;

I_w é o momento de inércia ao empenamento da seção transversal (ver Equação (D.3));

A é a área da seção transversal;

$r_y = \sqrt{\frac{I_y}{A}}$ é o raio de giração da seção relativo à menor inércia;

I_té o momento de inércia à torção da seção transversal;

$k_c = \frac{4}{\sqrt{h/t_w}}$, respeitando os limites $0{,}35 \leq k_c \leq 0{,}76$.

D.3.1 Parâmetros de cálculo

A Tabela D.1 indica os parâmetros necessários para determinar o momento fletor resistente de cálculo.

Tabela D.1 – Parâmetros de cálculo para seções com dois eixos de simetria.

Estado-limite	M_r	M_{cr}	λ	λ_p	λ_r
FLT	$0{,}7\ f_y W$	Ver Equação (D.3)	$\frac{L_b}{r_y}$	$1{,}76\sqrt{\frac{E}{f_y}}$	Ver Equação (D.4)
FLM	$0{,}7\ f_y W$	Ver Equação (D.5)	$\frac{b_f}{2t_f}$	$0{,}38\sqrt{\frac{E}{f_y}}$	Ver Equação (D.6)
FLA	$f_y W$	Ver Anexo H da NBR 8800 (2008)	$\frac{h}{t_w}$	$3{,}76\sqrt{\frac{E}{f_y}}$	$5{,}70\sqrt{\frac{E}{f_y}}$

$$I_w = \frac{I_y\left(d - t_f\right)^2}{4}$$

$$M_{cr} = \frac{C_b \pi^2 E I_y}{{L_b}^2}\sqrt{\frac{I_w}{I_y}\left(1 + 0{,}039\frac{I_t {L_b}^2}{I_w}\right)} \quad \textbf{(D.3)}$$

$$\beta_1 = \frac{0{,}7\ f_y W}{E I_t}$$

$$\lambda_r = \frac{1{,}38\sqrt{I_y I_t}}{r_y I_t \beta_1}\sqrt{1 + \sqrt{1 + \frac{27 I_w {\beta_1}^2}{I_y}}} \quad \textbf{(D.4)}$$

$$Para\ perfis\ laminados\text{: } M_{cr} = \frac{0{,}69E}{\lambda^2} W_c$$

$$Para\ perfis\ soldados\text{: } M_{cr} = \frac{0{,}9E\ k_c}{\lambda^2} W_c \quad \textbf{(D.5)}$$

$$Para\ perfis\ laminados\text{: } \lambda_r = 0{,}83\sqrt{\frac{E}{0{,}7 f_y}} \quad \textbf{(D.6)}$$

$$Para\ perfis\ soldados: \lambda_r = 0{,}95\sqrt{\frac{E\ k_c}{0{,}7 f_y}}$$

D.3.2 Momento fletor resistente

O momento fletor resistente de cálculo M_{rd} correspondente ao estado-limite FLT é dado pelas Equações (D.7).

$$Para\ \lambda \leq \lambda_p: M_{rd} = \frac{M_{pl}}{\gamma_{a1}}$$

$$Para\ \lambda_p < \lambda \leq \lambda_r: M_{rd}\left[M_{pl} - \left(M_{pl} - M_r\right)\frac{\lambda - \lambda_p}{\lambda_r - \lambda_p}\right] \leq \frac{M_{pl}}{\gamma_{a1}} \qquad \textbf{(D.7)}$$

$$Para\ \lambda > \lambda_r: M_{rd} = \frac{M_{cr}}{\gamma_{a1}} \leq \frac{M_{pl}}{\gamma_{a1}}$$

Para os estados-limites FLA e FLM o momento fletor resistente de cálculo segue a mesma formulação, porém sem a presença do coeficiente C_b, segundo Equações (D.8).

$$Para\ \lambda \leq \lambda_p: M_{rd} = \frac{M_{pl}}{\gamma_{a1}}$$

$$Para\ \lambda_p < \lambda \leq \lambda_r: M_{rd} = \frac{1}{\gamma_{a1}}\left[M_{pl} - \left(M_{pl} - M_r\right)\frac{\lambda - \lambda_p}{\lambda_r - \lambda_p}\right] \qquad \textbf{(D.8)}$$

$$Para\ \lambda > \lambda_r: M_{rd} = \frac{M_{cr}}{\gamma_{a1}}$$

O coeficiente de ponderação γ_{a1}vale 1,10 para casos de combinações últimas normais de ações.

D.4 Seções com um eixo de simetria

Esse item apresenta o roteiro de cálculo para determinar o momento fletor resistente de vigas com seção transversal do tipo I ou H com apenas um eixo de simetria, ou seja, com mesa superior e inferior de dimensões diferentes, sendo o eixo de flexão o de maior inércia.

A formulação utilizada pela ABNT NBR 8800:2008 é válida apenas para seções em que a soma das áreas da menor mesa e da alma seja superior à área da

maior mesa (linha neutra plástica localizada na alma por consequência) e seja satisfeita a condição apresentada pela Equação (D.9).

$$\frac{1}{9} \leq \alpha_y = \frac{I_{yc}}{I_{yt}} \leq 9 \qquad \textbf{(D.9)}$$

Onde:

$I_{yc} = \left(t_f {b_f}^3\right)/12$ é o momento de inércia da **mesa comprimida** em relação ao eixo de simetria (menor inércia). Caso haja momentos positivos e negativos no comprimento destravado em análise, deve ser tomada a mesa de **menor** momento de inércia calculado.

$I_{yt} = \left(t_f {b_f}^3\right)/12$ é o momento de inércia da **mesa tracionada** em relação ao eixo de simetria (menor inércia). Caso haja momentos positivos e negativos no comprimento destravado em análise, deve ser tomada a mesa de **maior** momento de inércia calculado.

Além das definições de D.3 utiliza-se a simbologia complementar:

W_c módulo de resistência elástico do lado comprimido da seção, relativo ao eixo de flexão;

W_t módulo de resistência elástico do lado tracionado da seção, relativo ao eixo de flexão;

r_{yc} é o raio de giração da seção T formada pela mesa comprimida e a parte comprimida da alma em regime elástico em relação ao eixo que passa pelo plano médio da alma (ver Figura D.8);

b_{fs} é a largura da mesa superior da seção;

b_{fi} é a largura da mesa inferior da seção;

t_{fs} é a espessura da mesa superior da seção;

t_{fi} é a espessura da mesa inferior da seção;

b_{fc} é a largura da mesa comprimida;

t_{fc} é a espessura da mesa comprimida;

α_y é o fator de assimetria da seção, definido na Equação (D.9);

h_c é **duas vezes** a distância do centro geométrico da seção à face interna da mesa comprimida;

h_p é **duas vezes** a distância da linha neutra plástica da seção à face interna da mesa comprimida;

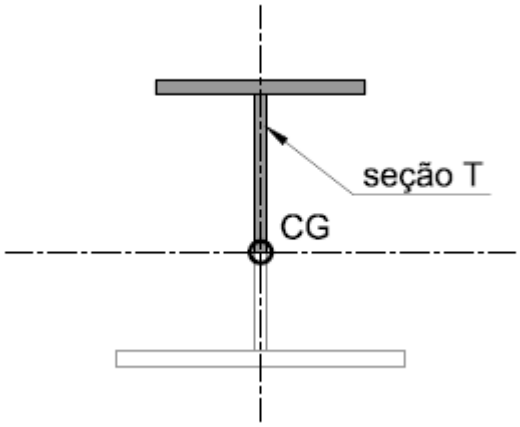


Figura D.8 – Seção T para cálculo do raio de giração r_{yc}.

D.4.1 Parâmetros de cálculo

A Tabela D.2 indica os parâmetros necessários para determinar o momento fletor resistente de cálculo.

Tabela D.2 – Parâmetros de cálculo para seções com um eixo de simetria.

Estado-limite	M_r	M_{cr}	λ	λ_p	λ_r	
FLT	$0{,}7\ f_y W_c \leq f_y W_t$	Ver Equação (D.10)	$\frac{L_b}{r_{yc}}$	$1{,}76\sqrt{\frac{E}{f_y}}$	Ver Equação (D.11)	
FLM	$0{,}7\ f_y W_c$	Ver Equação (D.5)	$\frac{b_{fc}}{2t_{fc}}$	$0{,}38\sqrt{\frac{E}{f_y}}$	Ver Equação (D.6)	
FLA	$f_y\ W$	Ver Anexo H da NBR 8800 (2008)	$\frac{h_c}{t_w}$	Ver Equação (D.12)		$5{,}70\sqrt{\frac{E}{f_y}}$

$$I_w = \frac{\left(d - \frac{t_{fs}+t_{fi}}{2}\right)^2}{12}\left(\frac{t_{fi}{b_{fi}}^3 t_{fs}{b_{fs}}^3}{t_{fi}{b_{fi}}^3 + t_{fs}{b_{fs}}^3}\right)$$

$$\beta_3 = 0{,}45\left(d - \frac{t_{fs}+t_{fi}}{2}\right)\left(\frac{\alpha_y - 1}{\alpha_y + 1}\right) \qquad \textbf{(D.10)}$$

$$M_{cr} = \frac{C_b \pi^2 E I_y}{{L_b}^2}\left[\beta_3 + \sqrt{{\beta_3}^2 + \frac{I_w}{I_y}\left(1 + 0{,}039\frac{I_t {L_b}^2}{I_w}\right)}\right]$$

$$\beta_1 = \frac{0{,}7\ f_y W_c}{E I_t}$$

$$\beta_2 = 5{,}2\ \beta_1 \beta_3 + 1 \qquad \textbf{(D.11)}$$

$$\lambda_r = \frac{1{,}38\sqrt{I_y I_t}}{r_{yc} I_t \beta_1}\sqrt{\beta_2 + \sqrt{{\beta_2}^2 + \frac{27 I_w {\beta_1}^2}{I_y}}}$$

$$\lambda_p = \frac{\frac{h_c}{h_p}\sqrt{\frac{E}{f_y}}}{\left(0{,}54\frac{M_{pl}}{M_r} - 0{,}09\right)^2} \leq \lambda_r \qquad \textbf{(D.12)}$$

D.4.2 Momento fletor resistente

O momento fletor resistente de cálculo M_{rd} para os estados-limites FLT, FLM e FLA é calculado pela mesma formulação apresentada em D.3.2.

ANEXO E - CARACTERÍSTICAS DOS MATERIAIS EM FUNÇÃO DA TEMPERATURA SEGUNDO ABNT NBR 14323:2013 E ABNT NBR 15200:2012

E.1 Aço estrutural submetido a temperaturas elevadas

A ABNT NBR 14323:2013 apresenta valores de redução $k_{y,\theta}$ e $k_{E,\theta}$ para a resistência ao escoamento característica (f_y) e do módulo de elasticidade (E), respectivamente,comparados a seus valores à temperatura ambiente, admitida como 20ºC. Existe a recomendação, ainda, de um fator de redução $k_{\sigma,\theta}$ aplicado em casos onde a seção transversal do perfil de aço seja formada por elementos esbeltos sujeitos à instabilidade local. Vale ressaltar que tais valores, reproduzidos na Tabela E.1, são válidos para uma taxa de aquecimento entre 2ºC/min e 50ºC/min de tal modo que o efeito da fluência do aço a temperaturas elevadas (onde o mesmo passa a ter comportamento viscoso) já foi considerado nos ensaios para determinação desses fatores (SILVA, 2001) e pode ser desprezado na prática.

Para **valores de cálculo** da resistência ao escoamento em função da temperatura ($f_{yd,\theta}$) a ABNT NBR 14323:2013 recomenda a utilização de coeficiente de ponderação unitário em uma situação de incêndio, logo seu valor fica determinado pela Equação (E.1).

$$f_{yd,\theta} = k_{y,\theta} f_y \qquad \textbf{(E.1)}$$

Tabela E.1 – Fatores de redução do aço estrutural em função da temperatura (Fonte: ABNT NBR 14323:2013).

Temperatura do aço	Fator de redução da resistência ao escoamento $k_{y,\theta}$	Fator de redução do módulo de elasticidade $k_{E,\theta}$	Fator de redução para instabilidade local $k_{\sigma,\theta}$
20	1,000	1,000	1,000
100	1,000	1,000	1,000
200	1,000	0,900	0,890
300	1,000	0,800	0,780
400	1,000	0,700	0,650
500	0,780	0,600	0,530
600	0,470	0,310	0,300
700	0,230	0,130	0,130
800	0,110	0,090	0,070
900	0,060	0,068	0,050
1000	0,040	0,045	0,030
1100	0,020	0,023	0,020
1200	0,000	0,000	0,000

As propriedades térmicas relevantes para a análise de estruturas em situação de incêndio são a condutividade térmica, o calor específico e o coeficiente de dilatação térmica (para uma peça inicialmente a 20 ºC).

Em análises onde são empregados métodos simplificados a ABNT NBR 14323:2013 permite tratar as propriedades térmicas do aço como constantes e, como consequência, independentes da temperatura em que a peça estrutural se encontra. A Tabela E.2 indica os valores recomendados pela ABNT NBR 14323:2013.

Tabela E.2 – Propriedades térmicas do aço segundo ABNT NBR 14323:2013.

Propriedade	Símbolo	Valor simplificado
Condutividade térmica	λ_a	45 W/m ºC
Calor específico	c_a	600 J/kg ºC
Coef. dilatação térmica	α	$1{,}4 \times 10^{-5}$ ºC^{-1}

Em análises mais avançadas a dependência com a temperatura pode ser considerada, tornando o modelo de cálculo mais preciso. A condutividade térmica dos aços estruturais em W/m ºC, segundo a ABNT NBR 14323:2013, é apresentada na Equação (E.2) e ilustrada na Figura E..

$$\lambda_a = 54 - (3{,}33 \times 10^{-2})\theta \; para \; 20\,°C \leq \theta \leq 800\,°C$$
$$\lambda_a = 27{,}3 \; para \; 800\,°C < \theta \leq 1200\,°C \quad \textbf{(E.2)}$$

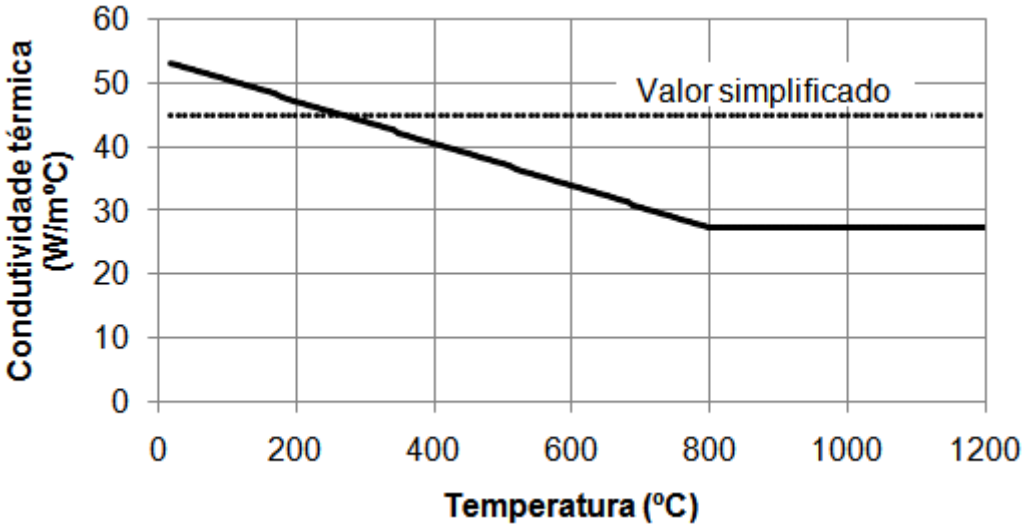


Figura E.1 – Condutividade térmica do aço em função da temperatura.

A Equação (E.3) indica o calor específico dos aços estruturais, em J/kgºC, em função da temperatura segundo ABNT NBR 14323:2013, ilustrado na Figura E.2.

$$c_a = 425 + (7{,}73 \times 10^{-1})\theta - (1{,}69 \times 10^{-3})\theta^2 \ldots$$
$$+ (2{,}22 \times 10^{-6})\theta^3 \; para \; 20\,°C \leq \theta \leq 600\,°C$$
$$c_a = 666 + \frac{13002}{738 - \theta} \; para \; 600\,°C < \theta \leq 735\,°C \quad \textbf{(E.3)}$$
$$c_a = 545 + \frac{17820}{\theta - 731} \; para \; 735\,°C < \theta \leq 900\,°C$$
$$c_a = 650 \; para \; 900\,°C < \theta \leq 1200\,°C$$

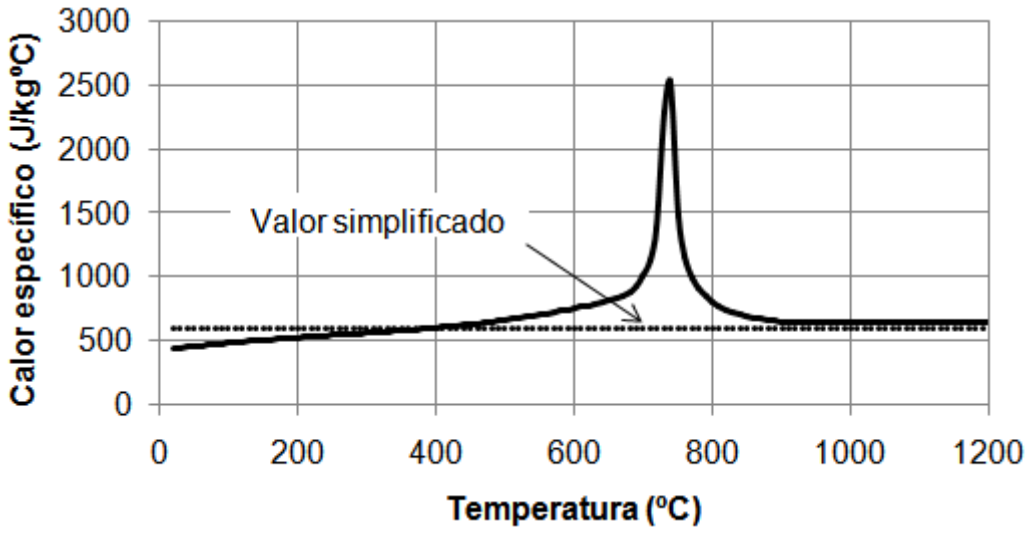


Figura E.2 – Calor específico do aço em função da temperatura.

Para uma peça inicialmente a 20 ºC com comprimento L_0 a ABNT NBR 14323:2013 recomenda o uso da Equação (E.4) para representar o alongamento $\Delta L/L_0$ em função da temperatura. A Figura E.3 ilustra a expressão recomendada.

$$\begin{aligned} \Delta L/L_0 = {} & (1{,}2\times10^{-5})\theta + (0{,}4\times10^{-8})\theta^2 \\ & - (2{,}416\times10^{-4}) \; para \; 20\,°C \leq \theta \leq 750\,°C \\ \Delta L/L_0 = {} & 1{,}1\times10^{-2} \; para \; 750\,°C < \theta \leq 860\,°C \\ \Delta L/L_0 = {} & (2\times10^{-5})\theta - (6{,}2\times10^{-3}) \; para \; 860\,°C < \theta \leq 1200\,°C \end{aligned} \qquad \textbf{(E.4)}$$

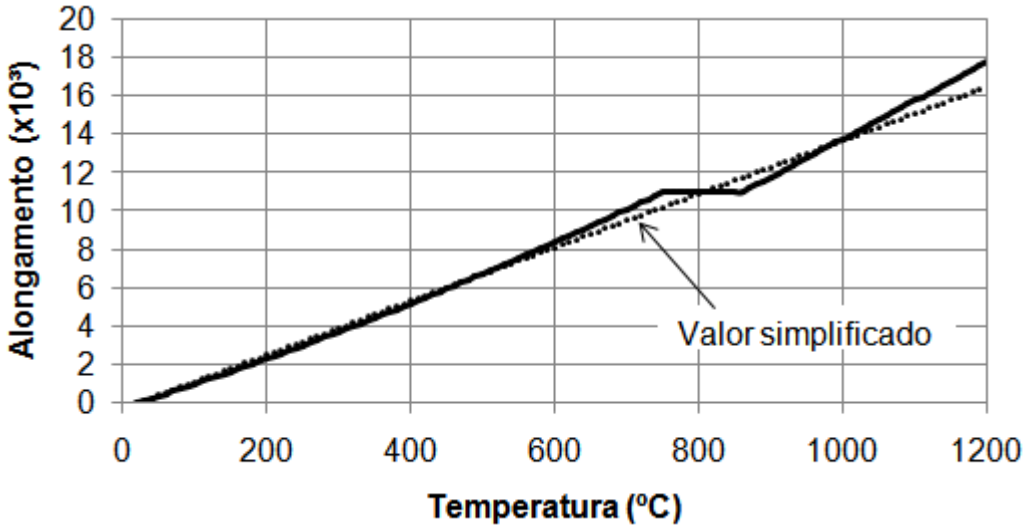


Figura E.3 – Alongamento do aço em função da temperatura.

E.2 Concreto armado submetido a temperaturas elevadas

Na análise de estruturas de concreto armado sob a ação do incêndio considera-se a perda de resistência e rigidez do concreto e de resistência do aço das armaduras. Outro efeito importante de ser comentado é o fenômeno denominado "*spalling*" que ocorre devido à pressão interna exercida pela água presente no concreto quando aquecida acima de 100 ºC, ocasionando o desprendimento, muitas vezes explosivo, de camadas superficiais das peças de concreto armado. Albuquerque (2012) relata que apesar da importância de tal fenômeno, visto que o mesmo é responsável por causar redução da seção resistente de concreto e exposição da armadura ao fogo, atualmente não existe modelo de cálculo capaz de prever a ocorrência do "*spalling"* já que, segundo Silva (2012), possuí natureza aleatória.

Com respeito à resistência característica à compressão do concreto (f_{ck}) a ABNT NBR 15200:2012 e o Eurocode EN 1992-1-2:2004 recomendam a utilização dos fatores de redução ($k_{c,\theta}$) em função da temperatura conforme Tabela E.3. Em uma situação de incêndio o **valor de cálculo** da resistência em função da temperatura ($f_{cd,\theta}$) deve ser tomado mediante a utilização de um coeficiente de ponderação unitário sendo, assim, determinado segundo a Equação (E.5).

$$f_{cd,\theta} = k_{c,\theta} f_{ck} \quad \textbf{(E.5)}$$

Tabela E.3 – Fatores de redução do concreto em função da temperatura (Fonte: ABNT NBR 15200:2012 e Eurocode 2 EN 1992-1-2:2004).

Temperatura do concreto (ºC)	$k_{c,\theta}$	
	Agregados silicosos	Agregados calcários
20	1,00	1,00
100	1,00	1,00
200	0,95	0,97
300	0,85	0,91
400	0,75	0,85
500	0,60	0,74
600	0,45	0,60
700	0,30	0,43
800	0,15	0,27
900	0,08	0,15
1000	0,04	0,06
1100	0,01	0,02
1200	0,00	0,00

Visto a ação do incêndio ser de curta duração, não existe influência do efeito Rüsch, logo o coeficiente de redução utilizado para cálculo da tensão de pico atuante no concreto (usualmente tomado como 0,85) deve ser unitário (Boletim nº46 *fib*-CEB, 2008 apud Albuquerque, 2012).

Com respeito às propriedades térmicas do concreto, a ABNT NBR 15200:2012 recomenda para análises simplificadas os valores segundo Tabela E.4.

Tabela E.4 – Propriedades térmicas do concreto segundo ABNT NBR 15200:2012.

Propriedade	Símbolo	Valor simplificado
Condutividade térmica	λ_c	1,3 W/m ºC
Calor específico	c_c	1000 J/kg ºC

No caso de análises mais avançadas as propriedades térmicas são tomadas com seus valores dependentes da temperatura. A ABNT NBR 15200:2012

recomenda para a condutividade térmica do concreto a utilização da Equação (E.6) que resulta na relação ilustrada na Figura E.4.

$$\lambda_c = 1{,}36 - 0{,}136\frac{\theta}{100} + 0{,}0057\left(\frac{\theta}{100}\right)^2 \; para \; 20\,°C \leq \theta \leq 1200\,°C \qquad \textbf{(E.6)}$$

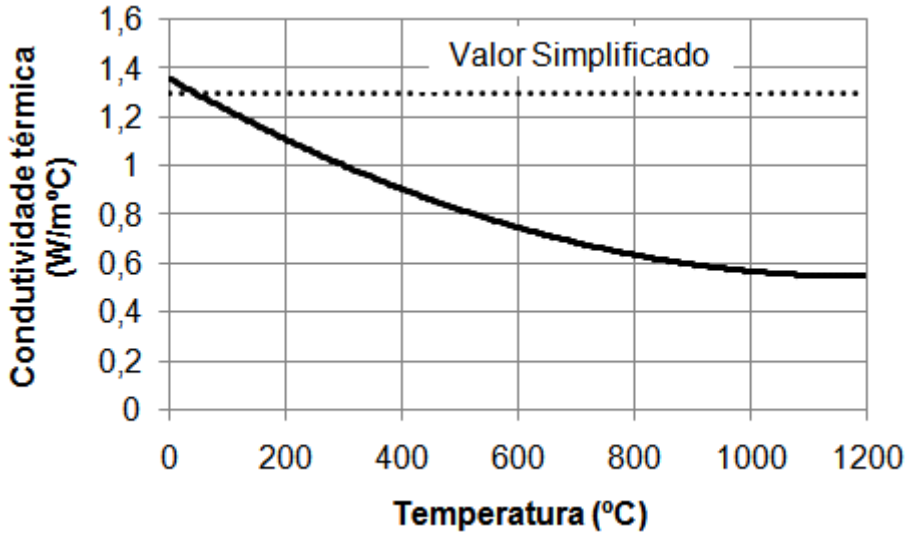


Figura E.4 – Condutividade térmica do concreto em função da temperatura.

O calor específico do concreto em função da temperatura é representado pela Equação (E.7) e ilustrado na Figura E.5, conforme ABNT NBR 15200:2012. O Eurocode EN 1992-1-2:2004 considera ainda um valor de pico $c_{c,pico}$ que ocorre devido à evaporação da água livre e é dependente da umidade presente no concreto, segundo Tabela E.5.

$$\begin{aligned} c_c &= 900 \;\; para \; 20\,°C \leq \theta \leq 100\,°C \\ c_c &= c_{c,pico} \;\; para \; 100\,°C < \theta \leq 115\,°C \\ c_c &= 900 + (\theta - 100) \; para \; 115\,°C < \theta \leq 200\,°C \\ c_c &= 1000 + \frac{(\theta - 200)}{2} \; para \; 200\,°C < \theta \leq 400\,°C \\ c_c &= 1100 \; para \; 400\,°C < \theta \leq 1200\,°C \end{aligned} \qquad \textbf{(E.7)}$$

Tabela E.5 – Valor de pico do calor específico do concreto entre 100 e 115 ºC (Fonte: EN 1992-1-2:2004).

$c_{c,pico}$ (J/kgºC)	Umidade (%) em peso de concreto
900	0
1470	1,5
1875	2
2020	3
2750	4
5600	10

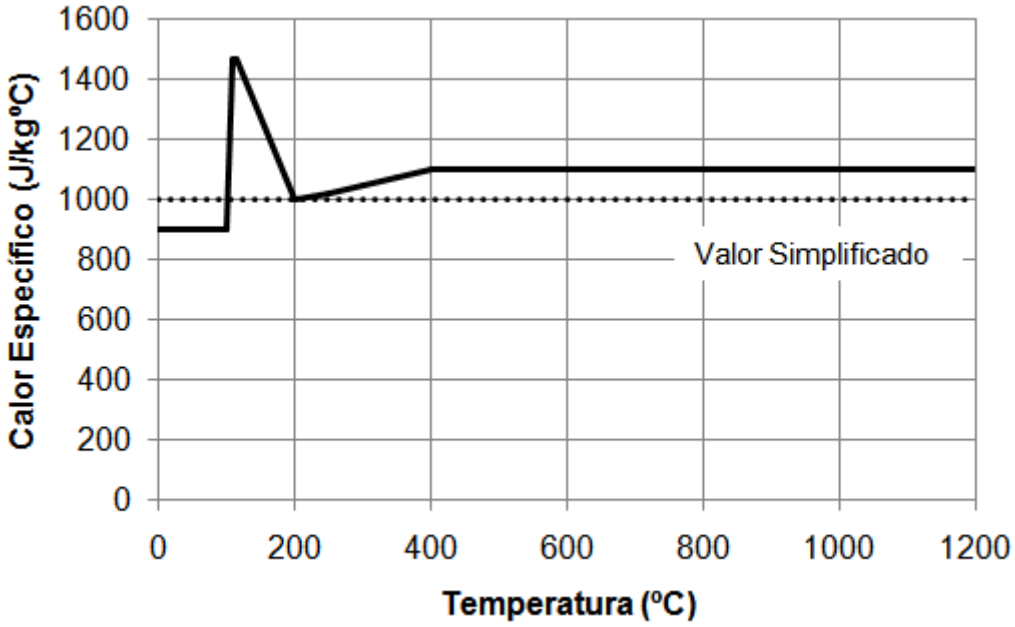


Figura E.5 – Calor específico do concreto em função da temperatura para U=1,5%.

A resistência característica do aço utilizado como armadura passiva (f_{sk}) nas peças de concreto armado possuem fatores de redução em função da temperatura ($k_{s,\theta}$) distintos dependendo do tipo de solicitação conforme Tabela E.6 (ABNT NBR 15200:2012). Também recomenda-se a utilização de coeficiente de ponderação unitário para a **resistência de cálculo** do aço utilizado para armadura passiva, logo o valor de cálculo em função da temperatura ($f_{sd,\theta}$) é dado pela Equação (E.8).

$$f_{sd,\theta} = k_{s,\theta} f_{sk} \quad \textbf{(E.8)}$$

Tabela E.6 – Fatores de redução do aço para armadura passiva em função da temperatura (Fonte: ABNT NBR 15200:2012).

Temperatura do aço (ºC)	$k_{s,\theta}$		
	Tração		Compressão
	CA-50	CA-60	CA-50 ou CA-60
20	1,00	1,00	1,00
100	1,00	1,00	1,00
200	1,00	1,00	0,89
300	1,00	1,00	0,78
400	1,00	0,94	0,67
500	0,78	0,67	0,56
600	0,47	0,40	0,33
700	0,23	0,12	0,10
800	0,11	0,11	0,08
900	0,06	0,08	0,06
1000	0,04	0,05	0,04
1100	0,02	0,03	0,02
1200	0,00	0,00	0,00

ANEXO F - MÉTODO DO TEMPO EQUIVALENTE PARA REDUÇÃO DO TRRF SEGUNDO CORPO DE BOMBEIROS - IT08:2011

F.1 Introdução

A adoção do incêndio-padrão (item 4.3.1) é uma forma simples e prática para estudar o comportamento das estruturas em um incêndio, porém está longe de representar a realidade. O incêndio natural é capaz de representar melhor a situação de um compartimento, levando em consideração as características geométricas, grau de ventilação, características físico-térmicas dos elementos de compartimentação e da carga de incêndio específica. No incêndio natural existe ainda a consideração da fase de resfriamento do incêndio, havendo, assim, uma temperatura máxima que pode-se atingir.

O conceito por trás do método do tempo equivalente consiste em associar um tempo fictício para a curva do incêndio-padrão em que a temperatura máxima atingida pelo elemento estrutural seja a mesma caso fosse adotada uma curva de incêndio real, segundo Figura F..

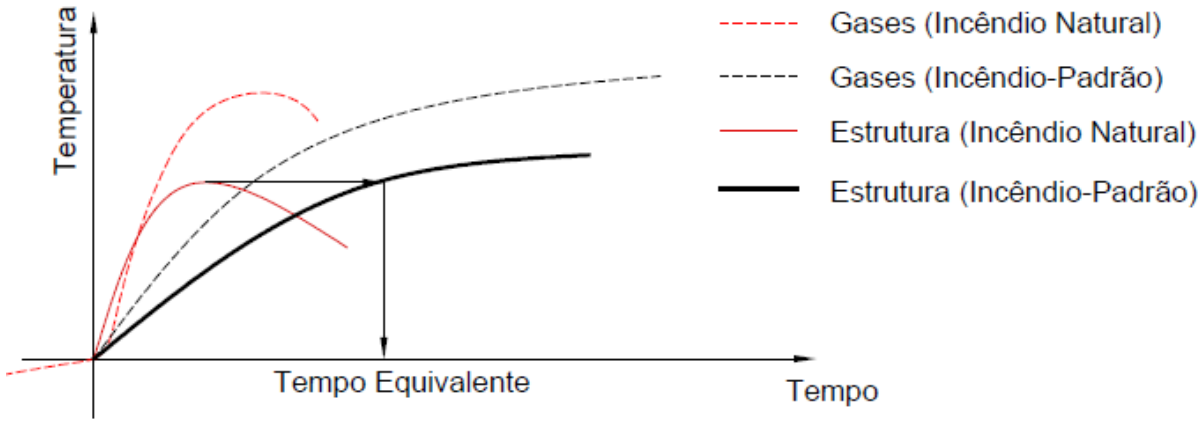


Figura F.1 – Conceito de tempo equivalente.

Em 1987, Ingberg (apud Costa e Silva, 2005) relacionou a área sob curvas de incêndios reais determinadas por ensaios de laboratório com a área sob a curva-

padrão encontrando uma relação aproximada do tempo equivalente, em minutos, com a carga de incêndio por área de piso (MJ/m²) de $t_{eq} \cong 0{,}07\ q_{fi}$.

Law e Pettersson em 1971 e 1973, respectivamente (apud Costa e Silva, 2005) apresentaram formulações para o tempo equivalente que também relacionavam os efeitos da ventilação do ambiente. A formulação de Pettersson considera ainda um fator κ para relacionar as características térmicas dos elementos de compartimentação.

Segundo Costa e Silva (2005) a norma alemã DIN 18230-1:1998-05 incorporou conceitos de nível de risco e desempenho das proteções ativas por meio de coeficientes de ponderação γ para determinação da carga de incêndio de cálculo, que foram incorporados com adaptações ao Eurocode 1-1-2.

O método sugerido pela IT08:2011 do Corpo de Bombeiros de São Paulo inclui recomendações de diversas normas e estudos, perdendo o conceito original explicado anteriormente. De forma sucinta trata-se de um método que permite a redução dos TRRF, constados no Anexo B, na presença de condições favoráveis à segurança no caso de ocorrência de um incêndio, como a existência de chuveiros automáticos, ausência de materiais altamente inflamáveis e condições específicas de ventilação.

F.2 Formulação

O tempo equivalente é determinado segundo Equação (F.1).

$$t_{eq} = 0{,}07\ q_{fi}\ \gamma_n\ \gamma_s W \qquad \textbf{(F.1)}$$

Na Equação (F.1):

t_{eq} é o tempo equivalente (em minutos);

q_{fi} é o valor da carga de incêndio específica do compartimento analisado, em MJ/m², conforme IT14 do Corpo de Bombeiros;

γ_n é o produto $\gamma_{n1} \times \gamma_{n2} \times \gamma_{n3}$ que levam em consideração a presença de medidas de proteção ativa, conforme Tabela F.1;

γ_s é o produto $\gamma_{s1} \times \gamma_{s2}$ que dependem do risco de incêndio, determinados pela Equação (F.2) e Tabela F.2;

W é um fator associado à ventilação do ambiente e altura do compartimento analisado, conforme Equação (F.3).

Tabela F.1 – Fatores de medida de segurança contra incêndio

Presença de chuveiros automáticos γ_{n1}	Presença de brigada contra incêndio γ_{n2}	Existência de detecção automática γ_{n3}
0,60	0,90	0,90

Na ausência de algum deles adotar respectivo γ_n igual a 1.

$$\gamma_{s1} = 1 + \frac{A_f(h+3)}{10^5} \quad \textbf{(F.2)}$$

Na Equação (F.2):

$1 \leq \gamma_{s1} \leq 3$;

A_f a área de piso do compartimento considerado [m²];

h a altura do piso habitável mais alto do edifício [m].

Tabela F.2 – Risco de ativação do incêndio

γ_{s2}	Risco de ativação do incêndio	Exemplos de ocupação
0,85	Pequena	Escola, galeria de arte, parque aquático, igreja, museu.
1,0	Normal	Biblioteca, cinema, correio, consultório médico, escritório, farmácia, frigorífico, hotel, livraria, hospital, laboratório fotográfico, indústria de papel, oficina elétrica ou mecânica, residência, restaurante, teatro, depósitos de: produtos farmacêuticos, bebidas alcoólicas, supermercado, venda de acessórios de automóveis, depósitos em geral.
1,2	Média	Montagem de automóveis, hangar, indústria mecânica.
1,5	Alta	Laboratório químico, oficina de pintura de automóveis.

$$W = \left(\frac{6}{H}\right)^{0,3}\left[0,62 + \frac{90\left(0,4 - \frac{A_v}{A_f}\right)^4}{1 + 12,5\left(1 + 10\frac{A_v}{A_f}\right)\frac{A_h}{A_f}}\right] \geq 0,5 \qquad \textbf{(F.3)}$$

Na Equação (F.3):

$0,025 \leq \frac{A_v}{A_f} \leq 0,25$;

H é a altura do compartimento [m];

A_v é a área de ventilação vertical (janelas, portas e similares) [m²];

A_h é a área de ventilação horizontal - piso [m²];

A_f é a área de piso do compartimento analisado [m²].

F.3 Valores limites

A IT08:2011 do Corpo de Bombeiros apresenta os seguintes limites relativos ao método do tempo equivalente:

- Excetua-se a aplicação do método para as edificações do grupo L e das divisões M-1, M-2 e M-3 (ver Tabela B.1);
- A máxima redução do TRRF permitida é de 30 min em relação aos valores apresentados na Tabela B.2, ou seja, $TRRF - t_{eq} \leq 30\, min$;
- O valor mínimo de t_{eq} é de 15 min para edificações com altura menor do que 6 metros pertencentes aos grupos A, D, E e G e divisões I-1, I-2, J-1 e J2 e de 30 min para todas as demais.

ANEXO G - FORÇA CORTANTE RESISTENTE DE UMA VIGA DE AÇO EM SITUAÇÃO DE INCÊNDIO SEGUNDO ABNT NBR 14323:2013

Esse anexo apresenta a formulação necessária para determinar a força cortante resistente de cálculo em situação de incêndio $V_{Rd,fi}$ para seções I ou H fletidas em relação ao maior momento de inércia.

O parâmetro de esbeltez da alma é determinado pela Equação (G.1).

$$\lambda = \frac{h}{t_w} \tag{G.1}$$

Na Equação (G.1):

h é a altura da alma (distância entre faces internas das mesas dos perfis soldados e essa mesma distância menos dois raios de concordância no caso de perfis laminados);

t_w é a espessura da alma.

Os limites para o comportamento plástico e totalmente elástico são definidos pela Equação (G.2) e Equação (G.3) respectivamente, com os valores do módulo de elasticidade $\boldsymbol{E}$ e tensão de escoamento $\boldsymbol{f_y}$ à temperatura ambiente. Para determinação do coeficiente $\boldsymbol{k_v}$ ver item C.1.

$$\lambda_{p,fi} = 0{,}93\sqrt{\frac{k_v\, E}{f_y}} \tag{G.2}$$

$$\lambda_{r,fi} = 1{,}16\sqrt{\frac{k_v\, E}{f_y}} \tag{G.3}$$

Com isso a força cortante resistente fica definida pela Equação (G.4).

$$\begin{aligned} &Para\ \lambda \le \lambda_{p,fi}\colon\ V_{Rd,fi} = 0{,}60\, A_w\, k_{y,\theta} f_y \\ &Para\ \lambda_{p,fi} < \lambda \le \lambda_{r,fi}\colon\ V_{Rd,fi} = 0{,}60\, \frac{\lambda_{p,fi}}{\lambda}\left(A_w\, k_{y,\theta} f_y\right) \\ &Para\ \lambda > \lambda_{r,fi}\colon\ V_{Rd,fi} = 0{,}74\left(\frac{\lambda_{p,fi}}{\lambda}\right)^2\left(A_w\, k_{\sigma,\theta} f_y\right) \end{aligned} \tag{G.4}$$

A área da alma A_w deve ser tomada como a altura total da seção transversal d multiplicada pela espessura da alma t_w.

ANEXO H - MOMENTO FLETOR RESISTENTE DE UMA VIGA DE AÇO EM SITUAÇÃO DE INCÊNDIO SEGUNDO ABNT NBR 14323:2013

Esse anexo apresenta a formulação necessária para determinação do momento fletor resistente de cálculo em situação de incêndio $M_{Rd,fi}$ para seções I ou H fletidas em relação ao maior momento de inércia.

Efeitos benéficos de uma distribuição não uniforme de temperatura na seção transversal, não avaliados quando empregado o método apresentado no item 5.3 para determinar a temperatura no elemento de aço, são considerados por intermédio de um fator de correção κ dependente da situação de exposição ao fogo da viga segundo Tabela H.1.

Tabela H.1 – Fator de correção κsegundo ABNT NBR 14323:2013.

κ	Situação de exposição ao fogo
1,00	Quatro lados expostos ao fogo.
1,15	Envolvida por material de revestimento contra fogo e três lados expostos, com laje de concreto ou laje com fôrma de aço incorporada no quarto lado.
1,40	Sem material de revestimento contra fogo e três lados expostos, com laje de concreto ou laje com fôrma de aço incorporada no quarto lado.

H.1 FLA e FLM

A formulação apresentada tem como base as recomendações da ABNT NBR 14323:2013 e ABNT NBR 8800:2008 e são válidas para vigas com seção transversal com um e dois eixos de simetria do tipo I ou H, de alma não esbelta, fletida em relação ao eixo de maior inércia.

Os parâmetros de esbeltez são determinados de acordo com a Tabela H.2.

Tabela H.2 – Parâmetros de esbeltez para situação de incêndio.

Seção I ou H	Estado-Limite	λ	$\lambda_{p,fi}$	$\lambda_{r,fi}$
Dois eixos de simetria	**FLM**	$\frac{b_f}{2t_f}$	$0{,}32\sqrt{\frac{E}{f_y}}$	Ver Equação (H.1)
	FLA	$\frac{h}{t_w}$	$3{,}20\sqrt{\frac{E}{f_y}}$	$4{,}84\sqrt{\frac{E}{f_y}}$
Um eixo de simetria	**FLM**	$\frac{b_{fc}}{2t_{fc}}$	$0{,}32\sqrt{\frac{E}{f_y}}$	Ver Equação (H.1)
	FLA	$\frac{h_c}{t_w}$	Ver Equação (H.2)	$4{,}84\sqrt{\frac{E}{f_y}}$

$$Para\ perfis\ laminados\text{: } \lambda_{r,fi} = 0{,}71\sqrt{\frac{E}{0{,}7f_y}}$$

$$Para\ perfis\ soldados\text{: } \lambda_{r,fi} = 0{,}81\sqrt{\frac{E\ k_c}{0{,}7f_y}} \qquad \textbf{(H.1)}$$

$$\lambda_{p,fi} = \frac{0{,}85\frac{h_c}{h_p}\sqrt{\frac{E}{f_y}}}{\left(0{,}54\frac{Z}{W} - 0{,}09\right)^2} \leq \lambda_{r,fi} \qquad \textbf{(H.2)}$$

Nas Equações (H.1) e (H.2):

h_c é **duas vezes** a distância do centro geométrico da seção à face interna da mesa comprimida;

h_p é **duas vezes** a distância da linha neutra plástica da seção à face interna da mesa comprimida;

W é o módulo de resistência elástico mínimo da seção relativo ao eixo de flexão;

Z é o módulo de resistência plástico da seção relativo ao eixo de flexão;

b_{fc} é a largura da mesa comprimida;

t_{fc} é a espessura da mesa comprimida;

$k_c = \frac{4}{\sqrt{h/t_w}}$, respeitando os limites $0{,}35 \leq k_c \leq 0{,}76$.

O momento fletor resistente em situação de incêndio para os estados-limites últimos FLA e FLM fica definido pela Equação (H.3). Para $\lambda > \lambda_{r,fi}$ no caso FLA a viga é classificada como esbelta e, como recomendação da ABNT NBR 14323:2013, deve ser dimensionada conforme Anexo H da ABNT NBR 8800:2008 porém multiplicando-se a resistência ao escoamento do aço por $k_{\sigma,\theta}$ e o módulo de elasticidade por $k_{E,\theta}$. A equação apresentada na ABNT NBR 14323:2012 tem uma incorreção, aqui corrigida.

$$Para\ \lambda \leq \lambda_{p,fi}: M_{Rd,fi} = \kappa\, k_{y,\theta} Z f_y$$

$$Para\ \lambda_{p,fi} < \lambda \leq \lambda_{r,fi}: M_{Rd,fi} = \kappa\, k_{y,\theta} \left[Z f_y - \left(Z f_y - W f_y \right) \frac{\lambda - \lambda_{p,fi}}{\lambda_{r,fi} - \lambda_{p,fi}} \right] \qquad \textbf{(H.3)}$$

$$Para\ \lambda > \lambda_{r,fi}: M_{Rd,fi} = k_{E,\theta} M_{cr} (exceto\ FLA)$$

Com o parâmetro κ segundo Tabela H.1Tabela H..

H.2 FLT

Para verificar o estado-limite de instabilidade lateral por torção (FLT) a ABNT NBR 14323:2013 associa um fator de redução χ_{fi} ao momento fletor de plastificação da seção transversal.

O primeiro passo é determinar o momento crítico da peça em análise tendo por base o Anexo G da ABNT NBR 8800:2008 reproduzido na Equação (H.4). A formulação apresentada é válida para vigas com seção transversal com um e dois eixos de simetria do tipo I ou H, de alma não esbelta, fletida em relação ao eixo de maior inércia.

$$M_{cr} = \frac{C_b \pi^2 E I_y}{{L_b}^2}\left[\beta_3 + \sqrt{{\beta_3}^2 + \frac{I_w}{I_y}\left(1 + 0{,}039\frac{I_t {L_b}^2}{I_w}\right)}\right] \qquad \textbf{(H.4)}$$

Na Equação (H.4):

I_w é o momento de inércia ao empenamento da seção transversal (ver Tabela H.3);

β_3 ver Tabela H.3;

C_b é o coeficiente de diagrama de momento não-uniforme (ver item D.2);

L_b é o comprimento destravado do trecho de viga em análise, corresponde à distância entre dois pontos de travamento que impeçam o deslocamento lateral e torção da seção transversal;

I_y é o menor momento de inércia da seção transversal;

I_té momento de inércia à torção da seção transversal;

Tabela H.3 – Parâmetros para determinação de M_{cr} segundo ABNT NBR 8800:2008.

Seção I ou H	I_w	β_3
Dois eixos de simetria	$\frac{I_y(d-t_f)^2}{4}$	0
Um eixo de simetria	$\frac{\left(d-\frac{t_{fs}+t_{fi}}{2}\right)^2}{12}\left(\frac{t_{fi}{b_{fi}}^3 t_{fs}{b_{fs}}^3}{t_{fi}{b_{fi}}^3+t_{fs}{b_{fs}}^3}\right)$	$0{,}45\left(d-\frac{t_{fs}+t_{fi}}{2}\right)\left(\frac{\alpha_y-1}{\alpha_y+1}\right)$

Na Tabela H.3:

$\alpha_y = \frac{I_{yc}}{I_{yt}}$, respeitando o limite inferior de 1/9 e superior de 9, é o fator de assimetria da seção.

$I_{yc} = \left(t_f {b_f}^3\right)/12$ é o momento de inércia da **mesa comprimida** em relação ao eixo de simetria (menor inércia). Caso haja momentos positivos e negativos no comprimento destravado em análise, deve ser tomada a mesa de **menor** momento de inércia calculado.

$I_{yt} = \left(t_f {b_f}^3\right)/12$ é o momento de inércia da **mesa tracionada** em relação ao eixo de simetria (menor inércia). Caso haja momentos positivos e negativos no comprimento destravado em análise, deve ser tomada a mesa de **maior** momento de inércia calculado.

d é a altura total da seção transversal;

t_f é a espessura da mesa da seção com dois eixos de simétrica;

b_{fs} é a largura da mesa superior da seção;

b_{fi} é a largura da mesa inferior da seção;

t_{fs} é a espessura da mesa superior da seção;

t_{fi} é a espessura da mesa inferior da seção.

Após definir o momento crítico determina-se o índice de esbeltez reduzido segundo Equação (H.5).

$$\lambda_{0,fi} = \sqrt{\frac{k_{y,\theta}\, Zf_y}{k_{E,\theta}\, M_{cr}}} \qquad \textbf{(H.5)}$$

O fator de redução χ_{fi} fica definido pelas expressões apresentadas na Equação (H.6).

$$\alpha = 0{,}022\sqrt{\frac{E}{f_y}}$$

$$\varphi_{0,fi} = 0{,}5\left(1 + \alpha\,\lambda_{0,fi} + {\lambda_{0,fi}}^2\right) \qquad \textbf{(H.6)}$$

$$\chi_{fi} = \frac{1}{\varphi_{0,fi} + \sqrt{{\varphi_{0,fi}}^2 - {\lambda_{0,fi}}^2}}$$

Por fim o momento fletor resistente de cálculo em situação de incêndio para o estado-limite último FLT fica definido pela Equação (H.7), com o parâmetro κ segundo Tabela H.1.

$$M_{Rd,fi} = \kappa\,\chi_{fi} k_{y,\theta}\, Zf_y \qquad \textbf{(H.7)}$$