

UNIEVANGÉLICA

CURSO DE ENGENHARIA CIVIL

CHARLES DA SILVA SANTOS

EDMAR VINICIUS SILVA

**VERIFICAÇÃO DA CAPACIDADE RESISTENTE DE
BARRAS DE AÇO SEM REVESTIMENTO DE PROTEÇÃO
CONTRA O FOGO EM SITUAÇÃO DE INCÊNDIO SEGUNDO
A NBR 14.323**

ANÁPOLIS / GO

2017

CHARLES DA SILVA SANTOS

EDMAR VINICIUS SILVA

**VERIFICAÇÃO DA CAPACIDADE RESISTENTE DE
BARRAS DE AÇO SEM REVESTIMENTO DE PROTEÇÃO
CONTRA O FOGO EM SITUAÇÃO DE INCÊNDIO SEGUNDO
A NBR 14.323**

**TRABALHO DE CONCLUSÃO DE CURSO SUBMETIDO AO
CURSO DE ENGENHARIA CIVIL DA UNIEVANGÉLICA**

ORIENTADOR: ROGÉRIO SANTOS CARDOSO

ANÁPOLIS / GO

2017

FICHA CATALOGRÁFICA

SANTOS, CHARLES DA SILVA/ SILVA, EDMAR VINICIUS

Verificação da capacidade resistente de barras de aço sem revestimento de proteção contra o fogo em situação de incêndio segundo a NBR 14.323.

153P, 297 mm (ENC/UNI, Bacharel, Engenharia Civil, 2017).

TCC - UniEvangélica

Curso de Engenharia Civil.

- | | |
|----------------------|--------------------|
| 1. Estruturas de aço | 2. Incêndio |
| 3. Dimensionamento | 4. Segurança |
| I. ENC/UNI | II. Título (Série) |

REFERÊNCIA BIBLIOGRÁFICA

SANTOS, Charles da Silva; SILVA, Edmar Vinicius. **Verificação da capacidade resistente de barras de aço sem revestimento de proteção contra o fogo em situação de incêndio segundo a NBR 14.323.**TCC, Curso de Engenharia Civil, UniEvangélica, Anápolis, GO, 153p. 2017.

CESSÃO DE DIREITOS

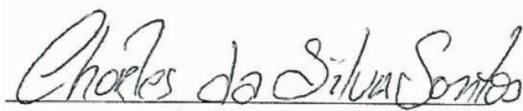
NOME DOS AUTORES: Charles da Silva Santos; Edmar Vinicius Silva

TÍTULO DA DISSERTAÇÃO DE TRABALHO DE CONCLUSÃO DE CURSO:

Verificação da capacidade resistente de barras de aço sem revestimento de proteção contra o fogo em situação de incêndio segundo a NBR 14.323.

GRAU: Bacharel em Engenharia Civil ANO: 2017

É concedida à UniEvangélica a permissão para reproduzir cópias deste TCC e para emprestar ou vender tais cópias somente para propósitos acadêmicos e científicos. O autor reserva outros direitos de publicação e nenhuma parte deste TCC pode ser reproduzida sem a autorização por escrito do autor.


Charles da Silva Santos
charles_s_santos@hotmail.com


Edmar Vinicius Silva
vinleal@hotmail.com

CHARLES DA SILVA SANTOS
EDMAR VINICIUS SILVA

**VERIFICAÇÃO DA CAPACIDADE RESISTENTE DE
BARRAS DE AÇO SEM REVESTIMENTO DE PROTEÇÃO
CONTRA O FOGO EM SITUAÇÃO DE INCÊNDIO SEGUNDO
A NBR 14.323**

**TRABALHO DE CONCLUSÃO DE CURSO SUBMETIDO AO CURSO DE
ENGENHARIA CIVIL DA UNIEVANGÉLICA COMO PARTE DOS REQUISITOS
NECESSÁRIOS PARA A OBTENÇÃO DO GRAU DE BACHAREL**

APROVADO POR:



ROGÉRIO SANTOS CARDOSO, Professor Mestre (UniEvangélica)
(ORIENTADOR)



FABRÍCIO NASCIMENTO SILVA, Professor Mestre (UniEvangélica)
(EXAMINADOR INTERNO)



ISA LORENA SILVA BARBOSA, Professora Mestra (UniEvangélica)
(EXAMINADORA INTERNA)

DATA: ANÁPOLIS/GO, 01 de Dezembro de 2017

AGRADECIMENTOS

Primeiramente agradeço e dedico este trabalho a Deus que permitiu que tudo isso acontecesse, ao longo de minha vida, e não somente nestes anos como universitário, mas que em todos os momentos é o maior mestre que alguém pode conhecer.

Aos meus pais, Vitoriano Pereira dos Santos e Maria de Nazaré da Silva Filha, pelo amor, incentivo, e suporte incondicional durante esta trajetória. Que mesmo em tempos de dificuldades se dispuseram em tentar fazer o possível para que meus objetivos e sonhos fossem realizados.

Agradeço e dedico este trabalho a minha namorada Andreza Karlla Moreira de Oliveira, uma das pessoas ou a pessoa, o qual, mais me incentivou a ingressar na vida acadêmica dedicando-lhe, todo meu sucesso profissional e acadêmico à ela.

Meus agradecimentos aos meus irmãos, pelo apoio e compreensão, pois cada um ajudou-me na medida do possível, concedendo-me espaço, paz, apoio e palavras de incentivos para que completasse esta etapa da vida.

Agradeço esta Universidade e todo seu corpo docente - professores, por proporcionarme o conhecimento não apenas racional, mas a manifestação do caráter e afetividade da educação no processo de formação profissional, por tanto que se dedicaram a mim, não somente por ensinar-me, mas por terem feito aprender.

A todos que direta ou indiretamente fizeram parte da minha formação, o meu muito obrigado.

Charles da Silva Santos

AGRADECIMENTOS

A minha insubstituível mãe. Obrigado por todos os dias de apoio e companheirismo. Pelas palavras de conforto nos dias de angústia, pela presença nos momentos de solidão, pela confiança invariável depositada em mim. A sua existência me possibilitou chegar até aqui. Obrigado pelo amor e carinho, pelas palavras de ânimo e conforto. Por viver comigo os meus sonhos e me apoiar nos dias difíceis. Te amo imensuravelmente.

Obrigado a minha família, pelo apoio e compreensão. Em especial, a minha tia Maria, grande incentivadora e companheira.

Obrigado aos meus professores pela dedicação ao ensino!

Edmar Vinícius Silva

RESUMO

Toda e qualquer edificação, apresenta um risco de ocorrência de incêndio, mesmo que seja de baixa probabilidade. Este risco é dependente dos parâmetros da edificação, como o uso/ocupação, a área construída, a altura e as cargas térmicas dos materiais combustíveis presentes. Frente ao risco, as estruturas das edificações devem apresentar um comportamento adequado, segundo as legislações vigentes, caso venham a ser solicitadas pelas ações decorrentes do incêndio, garantindo, desta maneira, o tempo necessário para a desocupação total da edificação e para as ações de combate do corpo de bombeiros. No Brasil, a preocupação com a segurança das estruturas em situação de incêndio, em específico, as estruturas de aço e mistas (aço-concreto), existe há aproximadamente 20 anos, quando foram realizados os primeiros estudos e lançada a primeira norma a tratar do assunto, a NBR 14.323 (ABNT, 2013) (ABNT,1999) - Dimensionamento de Estruturas de Aço e de Estruturas Mistas Aço-Concreto de Edifícios em Situação de Incêndio. Por ser relativamente nova, a norma NBR 14.323 (ABNT, 2013), hoje com a sua última edição realizada no ano de 2013, não está satisfatoriamente difundida entre os engenheiros de estruturas e profissionais da área, e percebe-se, por vezes, um total desconhecimento da necessidade da aplicação das medidas de segurança contra incêndios nas estruturas. Dentro desta realidade, este trabalho apresenta os conceitos envolvidos na aplicação do método simplificado de dimensionamento apresentado pela norma NBR 14.323 (ABNT, 2013) para a verificação da capacidade resistente em situação de incêndio de barras de aço previstas pela NBR 8.800 (ABNT, 2008). Onde foi realizada a verificação da capacidade resistente das barras de aço em situação de incêndio da estrutura de um mezanino sem proteção contra o fogo.

PALAVRAS-CHAVE:

Estruturas de aço. Incêndio. Dimensionamento. Segurança.

ABSTRACT

Any building presents a risk of fire, even a low probability risk. This risk is dependent of the building's parameters as the use/occupation, the area, the height and the thermal loads of the combustible materials. In front of the risk of fire, the structures of the buildings must behave suitably according to the current legislations, ensuring the necessary time for complete evacuation of the building and for firefighters' actions. In Brazil, the preoccupation with the safety of the structures exposed to fire, specifically those composed by steel and composite (steel-concrete) elements, exists for about 20 years, when were performed the first studies and was released the first code about the issue, the code NBR 14.323 (ABNT, 2013) (ABNT,1999)(Structural fire design of steel and composite steel and concrete structures for buildings). Due to be relatively recent, the code NBR 14.323 (ABNT, 2013), currently at the 2013's edition, is not satisfactorily diffused between the structure's engineers and related professionals, and is evident, sometimes, the total lack of knowledge about the applications of the safety actions against fires on the buildings. Inside this reality, this work presents the concepts involved in the application of the design simplified method presented by the code NBR 14.323 (ABNT, 2013) for the verification of resistance of steel bars exposed to fire defined in the code NBR 8.800 (ABNT, 2008). It was performed the verification of the steel bars' resistances of the structure of a mezzanine exposed to fire without fire protection.

KEYWORDS:

Steel structures. Fire. Design. Safety.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 - Triângulo do Fogo	26
Figura 2 - Quadrado ou Tetraedro do Fogo.....	27
Figura 3 - Curva característica real de um incêndio	28
Figura 4 - Forma de propagação do fogo por condução	29
Figura 5 - Forma de propagação do fogo por radiação térmica	30
Figura 6 - Forma de propagação do fogo por convecção.....	30
Figura 7 - Corte Esquemáticos com representações de Medidas Ativas	33
Figura 8 - Argamassa aplicada em vigas de aço.....	35
Figura 9 - Aplicação de fibras projetadas em viga de aço	36
Figura 10 - Método de instalação de placas de gesso acartonado	36
Figura 11 - Aplicação de placas de gesso em perfil metálico	37
Figura 12 - Aplicação de placas de gesso acartonado.....	38
Figura 13 - Aplicação de Placas de Lã de Rocha	39
Figura 14 - Aplicação das Mantas cerâmicas.....	40
Figura 15 - Aplicação de Enclausuramento em Concreto.....	40
Figura 16 – Tinta intumescente exposta ao fogo.....	41
Figura 17 - Gráfico da redução do modulo de elasticidade	48
Figura 18 - Gráfico da redução da resistência ao escoamento do aço	48
Figura 19 - Alongamento do aço em função da temperatura	50
Figura 20 - Calor específico do aço em função da temperatura.....	51
Figura 21 - Condutividade térmica do aço em função da temperatura.....	52
Figura 22 - Fator de Massividade para alguns elementos estruturais sem material de revestimento	68
Figura 23 - Elementos estruturais de vedação.....	69
Figura 24 - Planta baixa do Mezanino	81
Figura 25 – Viga biapoiada com carregamento distribuído	87
Figura 26 – Viga biapoiada com carregamento concentrado.....	88
Figura 27 – Carregamento para o ELU das vigas V2 e V3.....	89
Figura 28 - Carregamento para o ELS das vigas V2 e V3	92
Figura 29 - Carregamento para o ELU das vigas V1 e V4	93
Figura 30 - Carregamento para o ELS das vigas V1 e V4.....	96

Figura 31 - Carregamento para o ELU das vigas V5 e V6	97
Figura 32 - Diagrama de momento fletor solicitante das vigas V5 e V6 para o ELU.....	97
Figura 33 - Diagrama de esforço cortante solicitante das vigas V5 e V6 para o ELU	98
Figura 34 - Carregamento para o ELS das vigas V5 e V6.....	101
Figura 35 - Carregamento para o ELU do pilar P1.....	102
Figura 36 - Carregamento para o ELU Excepcional das vigas V2 e V3	117
Figura 37 - Carregamento para o ELU Excepcional das vigas V1 e V4	122
Figura 38 - Carregamento para o ELU Excepcional das vigas V5 e V6	125
Figura 39 - Diagrama de momento fletor das vigas V5 e V6 para o ELU Excepcional.....	125
Figura 40 - Diagrama de esforço cortante solicitante das vigas V5 e V6 para o ELU Excepcional	126
Figura 41 - Carregamento para o ELU Excepcional do pilar P1.....	130

LISTA DE TABELA

Tabela 1 - Incêndios e Fatalidades de 1960 à 1992.....	18
Tabela 2 - Ocorrência de Incêndios (exceto residenciais) noticiados em 2015 – por ocupação - Brasil.....	19
Tabela 3 - Ocorrência de Incêndios (exceto residenciais) noticiados em 2015 – por Estado - Brasil.....	20
Tabela 4 - Propriedades das Placas de Gesso Acartonado.....	37
Tabela 5 - Propriedades das Placas de Lã de Rocha.....	38
Tabela 6 - Propriedades das Mantas Cerâmicas.....	39
Tabela 7 - Fatores de redução das propriedades mecânicas do Aço.....	46
Tabela 8 - Fatores de redução das propriedades mecânicas do aço para barras sujeitas à flambagem local.....	47
Tabela 9 - Coeficientes de ponderação γ_g para ações permanentes diretas consideradas separadamente.....	59
Tabela 10 - Coeficientes de ponderação γ_g para ações permanentes agrupadas.....	60
Tabela 11 - Valores para θ_a (temperatura do aço sem revestimento) em °C, exposto a curva padrão da ISO 834 em função de diferentes valores de $k_{sh} \cdot (u/Ag)$ de 24 à 30 minutos.....	60
Tabela 12 - Dados do Perfil W360 x 75.....	90
Tabela 13 – Dados do Perfil W410 x 75.....	99
Tabela 14 - Dados do Perfil W150 x 13.....	103
Tabela 15 - Resumo – parâmetros de cálculo dos perfis laminados.....	116
Tabela 16 - Resultados obtidos na verificação dos elementos (vigas e pilares) à temperatura ambiente 20°C – Estado Limite Último (ELU).....	135
Tabela 17 - Resultados obtidos na verificação dos elementos (vigas e pilares) à temperatura ambiente 20°C – Estado Limite de Serviço (ELS).....	136
Tabela 18 - Resultados obtidos na verificação dos elementos (vigas e pilares) em situação de incêndio - Estado Limite Último (ELU).....	137
Tabela 19 - Percentual de redução da capacidade resistente dos elementos estruturais devido a elevação da temperatura.....	138

SUMÁRIO

1 INTRODUÇÃO.....	17
1.1 JUSTIFICATIVA	21
1.2 OBJETIVOS.....	21
1.2.1 Objetivo geral	21
1.2.2 Objetivos específicos	22
1.3 METODOLOGIA.....	22
1.4 ESTRUTURA DO TRABALHO	23
2 PRINCÍPIOS DE SEGURANÇA CONTRA INCÊNDIOS NAS EDIFICAÇÕES.....	25
2.1 O FOGO.....	25
2.1.1 Definição	25
2.1.2 Elementos constituintes do fogo	25
2.1.3 Produtos resultantes da combustão	27
2.1.4 Curva de evolução do fogo no incêndio	28
2.1.5 Mecanismos de transmissão de calor e propagação do fogo	28
2.2 INCÊNDIOS	31
2.2.1 Definição	31
2.2.2 Principais causas dos incêndios nas edificações	31
2.3 O PROJETO DE SEGURANÇA CONTRA INCÊNDIOS	31
2.3.1 Objetivos do projeto de segurança contra incêndios	31
2.3.2 Medidas de segurança contra incêndios	32
2.4 REVESTIMENTOS DE PROTEÇÃO CONTRA FOGO NAS ESTRUTURAS.....	34
2.4.1 Tipos de revestimentos	34
2.4.1.1 Argamassas projetadas “ <i>Cimentitious</i> ”	34
2.4.1.2 Fibras Projetadas.....	35
2.4.1.3 Placas.....	36
2.4.1.3.1 <i>Placas de Gesso Acartonado</i>	37
2.4.1.3.2 <i>Placas de Lã de Rocha</i>	38
2.4.1.4 Manta Cerâmica.....	39
2.4.1.5 Enclausuramento em Concreto	40
2.4.1.6 Pinturas Intumescentes.....	41

2.5	LEGISLAÇÕES DE SEGURANÇA CONTRA INCÊNDIOS NO BRASIL	41
2.6	TIPOS DE LEGISLAÇÕES NO BRASIL	42
2.6.1	Legislações Federais	42
2.6.2	Legislações Estaduais	43
2.6.3	Legislação do Estado de São Paulo	43
2.6.4	Legislações Municipais	43
2.6.5	Regulamentação das Companhias Seguradoras	44
2.7	HIERARQUIA DAS LEGISLAÇÕES.....	44
3	PROPRIEDADES DO AÇO ESTRUTURAL A TEMPERATURAS ELEVADAS SEGUNDO A NBR 14.323 (ABNT, 2013)	45
3.1	AÇO.....	45
3.1.1	Propriedades mecânicas do aço a temperaturas elevadas (resistência ao escoamento e módulo de elasticidade)	45
3.1.2	Propriedades Térmicas do aço a temperaturas elevadas	48
3.1.2.1	Alongamento do aço ($\Delta l_a/l_a$).....	49
3.1.2.2	Calor específico do aço (C_a).....	50
3.1.2.3	Condutividade térmica (λ_a).....	52
4	ASPECTOS DA SEGURANÇA DAS ESTRUTURAS DE AÇO EM SITUAÇÃO DE INCÊNDIO	54
4.1	CURVA TEMPERATURA-TEMPO	54
4.1.1	Curva do incêndio-padrão	55
4.2	VERIFICAÇÃO DA SEGURANÇA ESTRUTURAL DOS ELEMENTOS.....	56
4.1	AÇÕES TÉRMICAS NAS ESTRUTURAS.....	57
4.2	COMBINAÇÕES ÚLTIMAS DE INCÊNDIO	58
4.3	DETERMINAÇÃO DA TEMPERATURA NOS ELEMENTOS ESTRUTURAIS SUBMETIDOS AO INCÊNDIO SEM PROTEÇÃO CONTRA O FOGO.....	60
4.3.1	Temperatura do aço no instante t-Dt	60
4.3.2	Temperatura crítica	61
4.3.3	Fator de massividade	61
4.3.4	Roteiro de cálculo para a determinação da temperatura do aço	61
5	MÉTODO SIMPLIFICADO DE DIMENSIONAMENTO DA NBR 14.323 (ABNT, 2013)	63
5.1	GENERALIDADES	63

5.2	ESFORÇOS SOLICITANTES DE CÁLCULO	64
5.3	O ELU E OS ESFORÇOS RESISTENTES DE CÁLCULO	65
5.4	CÁLCULO DA ELEVAÇÃO DA TEMPERATURA DO AÇO	65
5.4.1	Elementos estruturais pertencentes a estruturas internas	65
5.4.1.1	Elementos estruturais sem revestimento contra o fogo.....	65
5.4.1.2	Elementos estruturais pertencentes a estruturas externas.....	69
5.4.1.3	Elementos estruturais pertencentes a elementos de compartimentação.....	69
5.4.1.4	Ligações	69
5.5	CAPACIDADE RESISTENTE DAS BARRAS DE AÇO EM SITUAÇÃO DE INCÊNDIO.....	70
5.5.1	Barras submetidas à força axial de tração	70
5.5.2	Barras submetidas à força axial de compressão	70
5.5.2.1	Determinação do comprimento de flambagem para o dimensionamento em situação de incêndio:.....	71
5.5.2.2	Barras comprimidas não sujeitas à flambagem local.....	71
5.5.2.3	Barras comprimidas sujeitas à flambagem local	73
5.5.3	Barras submetidas à flexão	73
5.5.3.1	Momento fletor resistente de cálculo em situação de incêndio.....	73
5.5.3.1.1	<i>Fator de correção κ</i>	76
5.5.3.2	Força cortante resistente de cálculo em situação de incêndio	76
5.5.4	Barras submetidas à combinação de esforços solicitantes	78
5.5.4.1	Expressões de interação	78
6	DIMENSIONAMENTO DO MEZANINO À TEMPERATURA AMBIENTE, CONFORME A NBR 8.800 (ABNT, 2008).	80
6.1	CARACTERÍSTICAS DO MEZANINO	80
6.2	CONSIDERAÇÕES DE PROJETO	80
6.3	DIMENSIONAMENTO DAS VIGAS.....	81
6.3.1	Coefficiente de ponderação das ações	81
6.3.2	Verificação ao Estado Limite Último (ELU)	82
6.3.3	Esforços solicitantes das vigas	82
6.3.3.1	Momento Fletor	82
6.3.3.2	Esforço Cortante	83
6.3.4	Pré-dimensionamento da seção transversal das vigas	83

6.3.5	Esforços resistentes das vigas	84
6.3.5.1	Determinação da força cortante resistente de cálculo.....	84
6.3.5.2	Determinação do momento Fletor Resistente de Cálculo.....	85
6.3.5.2.1	<i>Verificação da flambagem local – FLA e FLM</i>	85
6.3.6	Verificação ao Estado Limite de Serviço (ELS)	87
6.4	DIMENSIONAMENTO DAS VIGAS V2 E V3	88
6.4.1	Verificação ao ELU	88
6.4.1.1	Carregamento.....	88
6.4.1.2	Esforços solicitantes.....	89
6.4.1.2.1	<i>Momento fletor</i>	89
6.4.1.2.2	<i>Esforço cortante</i>	89
6.4.1.3	Pré-dimensionamento da seção transversal.....	89
6.4.1.4	Escolha do perfil.....	90
6.4.1.5	Esforços resistentes.....	90
6.4.1.5.1	<i>Força cortante resistente de cálculo</i>	90
6.4.1.5.2	<i>Momento fletor resistente de cálculo</i>	91
6.4.2	Verificação ao ELS	91
6.4.2.1	Carregamento.....	92
6.4.2.2	Deslocamentos.....	92
6.5	DIMENSIONAMENTO DAS VIGAS V1 E V4	93
6.5.1	Verificação ao ELU	93
6.5.1.1	Carregamento.....	93
6.5.1.2	Esforços solicitantes.....	93
6.5.1.2.1	<i>Momento fletor</i>	93
6.5.1.2.2	<i>Esforço cortante</i>	94
6.5.1.3	Pré-dimensionamento da seção transversal.....	94
6.5.1.4	Escolha do perfil.....	94
6.5.1.5	Esforços resistentes.....	94
6.5.1.5.1	<i>Força cortante resistente de cálculo</i>	94
6.5.1.5.2	<i>Momento fletor resistente de cálculo</i>	95
6.5.2	Verificação ao ELS	95
6.5.2.1	Carregamento.....	95
6.5.2.2	Deslocamentos.....	96

6.6	DIMENSIONAMENTO DAS VIGAS V5 E V6	96
6.6.1	Verificação ao ELU	96
6.6.1.1	Carregamento.....	96
6.6.1.2	Esforços solicitantes.....	97
6.6.1.2.1	<i>Momento fletor</i>	97
6.6.1.2.2	<i>Esforço cortante</i>	98
6.6.1.3	Escolha do perfil	98
6.6.1.4	Esforços resistentes.....	99
6.6.1.4.1	<i>Força cortante resistente de cálculo</i>	99
6.6.1.4.2	<i>Momento fletor resistente de cálculo</i>	99
6.6.2	Verificação ao ELS	100
6.6.2.1	Carregamento.....	100
6.6.2.2	Deslocamentos.....	101
6.7	DIMENSIONAMENTO DOS PILARES P1, P2, P3 E P4.....	101
6.7.1	Verificação ao ELU	101
6.7.1.1	Carregamento atuante / Solicitação à compressão de cálculo (N_{csd})	102
6.7.1.2	Escolha do perfil	103
6.7.1.3	Resistência à compressão de cálculo (N_{crd}).....	103
6.7.1.3.1	<i>Vínculos do pilar P1</i>	103
6.7.1.3.2	<i>Índices de esbeltezes</i>	104
6.7.1.3.3	<i>Verificação da instabilidade local (Fator de redução Q)</i>	104
6.7.1.3.4	<i>Verificação da instabilidade global (Fator de redução χ)</i>	105
7	DIMENSIONAMENTO DO MEZANINO EM SITUAÇÃO DE INCÊNDIO, CONFORME A NBR 14.323 (ABNT, 2013).	107
7.1	CONSIDERAÇÕES DE PROJETO	107
7.2	COMBINAÇÃO ÚLTIMA DE INCÊNDIO	107
7.2.1	Coefficientes de ponderação das ações	108
7.3	PARÂMETROS DE CÁLCULO	108
7.3.1	Temperatura dos Gases (Incêndio-Padrão)	108
7.3.2	Perfil W360x58	108
7.3.2.1	Fator de correção para o efeito de sombreamento	108
7.3.2.2	Fator de Massividade reduzido.....	109
7.3.2.3	Temperatura do Aço no instante $t - \Delta t$	109

7.3.2.4	Fluxo de Calor	109
7.3.2.5	Elevação da temperatura do aço	110
7.3.2.6	Temperatura do aço.....	110
7.3.2.7	Fatores de redução	110
7.3.3	Perfil W410x75	111
7.3.3.1	Fator de correção para o efeito de sombreamento	111
7.3.3.2	Fator de Massividade reduzido	111
7.3.3.3	Temperatura do Aço no instante $t - \Delta t$	111
7.3.3.4	Fluxo de Calor	112
7.3.3.5	Elevação da temperatura do aço	112
7.3.3.6	Temperatura do aço.....	113
7.3.3.7	Fatores de redução	113
7.3.4	Perfil W150x13	113
7.3.4.1	Fator de correção para o efeito de sombreamento	113
7.3.4.2	Fator de Massividade reduzido	114
7.3.4.3	Temperatura do Aço no instante $t - \Delta t$	114
7.3.4.4	Fluxo de Calor	114
7.3.4.5	Elevação da temperatura do aço	115
7.3.4.6	Temperatura do aço.....	115
7.3.4.7	Fatores de redução	115
7.3.5	Resumo dos parâmetros de cálculo	116
7.4	VERIFICAÇÃO DAS VIGAS V2 E V3 – W360X58	117
7.4.1	Carregamentos (ELU)	117
7.4.2	Esforços Solicitantes de Cálculo em situação de incêndio	117
7.4.2.1	Momento Fletor	117
7.4.2.2	Esforço Cortante	118
7.4.3	Esforços Resistentes de Cálculo em situação de incêndio	118
7.4.3.1	Esforços Cortante.....	118
7.4.3.2	Momento Fletor	119
7.4.4	Verificação da segurança do elemento	120
7.5	VERIFICAÇÃO DAS VIGAS V1 E V4 – PERFIL W360X58	121
7.5.1	Carregamentos (ELU)	121
7.5.2	Esforços Solicitantes de Cálculo em situação de incêndio	122

7.5.2.1	Momento Fletor	122
7.5.2.2	Esforço Cortante	122
7.5.3	Esforços Resistentes de Cálculo em situação de incêndio	122
7.5.3.1	Esforços Cortante.....	122
7.5.3.2	Momento Fletor	123
7.5.4	Verificação da segurança do elemento	123
7.6	VERIFICAÇÃO DAS VIGAS V5 E V6 – PERFIL W410X75	124
7.6.1	Carregamentos (ELU)	124
7.6.2	Esforços Solicitantes de Cálculo em situação de incêndio	125
7.6.2.1	Momento Fletor	125
7.6.2.2	Esforço Cortante	126
7.6.3	Esforços Resistentes de Cálculo em situação de incêndio	126
7.6.3.1	Esforços Cortante.....	126
7.6.3.2	Momento Fletor	127
7.6.4	Verificação da segurança do elemento	128
7.7	VERIFICAÇÃO DOS PILARES P1, P2, P3 E P4	129
7.7.1	Carregamento atuante / Solicitação à compressão de cálculo (N_{csd})	129
7.7.2	Esforço Resistente à compressão de cálculo em situação de incêndio ($N_{fi,Rd}$) ..	130
7.7.2.1	Vínculos do pilar P1.....	131
7.7.2.2	Índices de esbeltez para o dimensionamento em situação de incêndio	131
7.7.2.3	Verificação da instabilidade local (Fator de redução Q).....	131
7.7.2.4	Verificação da instabilidade global (Fator de redução χ_{fi})	132
7.7.3	Verificação da segurança do elemento	134
8	APRESENTAÇÃO E ANÁLISE DOS RESULTADOS	135
8.1	RESULTADOS OBTIDOS NO DIMENSIONAMENTO DA ESTRUTURA DO MEZANINO À TEMPERATURA AMBIENTE (20°C)	135
8.2	RESULTADOS OBTIDOS NO DIMENSIONAMENTO DA ESTRUTURA DO MEZANINO EM SITUAÇÃO DE INCÊNDIO	136
8.3	INFLUÊNCIA DA ELEVAÇÃO DA TEMPERATURA NA CAPACIDADE RESISTENTE DOS ELEMENTOS ESTRUTURAIs.....	138
9	CONSIDERAÇÕES FINAIS	139
	REFERÊNCIAS	140
	ANEXOS	142

1 INTRODUÇÃO

O aço é bastante conhecido nos países mais desenvolvidos economicamente. A sua alta ductilidade e resistência proporcionam o alcance de formas e o vencimento de vãos não superados com tanta facilidade por outros materiais. Os baixos custos de produção do aço nestes países, tornam o aço uma das melhores escolhas para a aplicação na indústria da construção. Pode-se citar a aplicação do aço na construção de pontes, ferrovias, edificações verticais residenciais e comerciais, edificações industriais, dentre muitas outras, (BELLEI, 2008).

Quando se trata das estruturas, sejam de aço, de concreto, mistas (aço-concreto) ou híbridas, um fator de extrema relevância é a segurança contra incêndios. O risco de incêndios estará sempre presente nas edificações, sejam elas atribuídas à ocupação residencial, comercial, industrial, mista, ou qualquer outra, (BRENTANO, 2015). A cada dia, em decorrência das exigências do mercado e da sociedade, as estruturas apresentam formatos mais complexos e arrojados, aumentando, desta forma, as preocupações com as questões da segurança contra incêndios. Por exemplo, em zonas altamente urbanizadas das cidades, onde os terrenos são escassos e possuem custos elevados, a construção de edificações residenciais se torna possível somente por meio da verticalização dos edifícios, onde procura-se construir o máximo número de unidades residenciais possíveis, de modo a viabilizar economicamente o empreendimento, (ANDRADE, 2010). Conforme as edificações se tornam mais altas e esbeltas, o risco de incêndios aumenta consideravelmente, colocando em jogo a segurança dos seus ocupantes, do empreendimento em si e das edificações vizinhas, (BRENTANO, 2015).

Os incêndios, em geral, deixam prejuízos incalculáveis, por vezes, irreparáveis, principalmente quando se trata da perda da vida humana. Existem inúmeros casos de incêndios devastadores ao longo da história, muitos ocorridos ainda na antiguidade. Como o incêndio da biblioteca de Alexandria no Egito por volta de 47 a.C., que destruiu praticamente todo o acervo intelectual daquela época, causando um grande prejuízo a toda a humanidade. Ou, o famoso incêndio que destruiu toda a cidade de Roma por volta do século 64 a.C., que, posteriormente, teve de ser reconstruída, este incêndio ficou conhecido por ter sido ordenado pelo imperador romano Nero, (ANDRADE, 2010). Também, pode-se citar, dentre muitos, o grande incêndio de Londres no ano de 1666, onde dezenas de milhares de edificações foram destruídas e milhares de pessoas perderam as suas vidas (SEITO I.A. et al., 2008). Todos estes exemplos clássicos, demonstram o potencial de destruição proporcionado pelo fogo e o quanto um incêndio pode deixar de prejuízo para as pessoas envolvidas.

Nos Estados Unidos, na Europa, na Oceania e no Japão a preocupação com a segurança contra incêndios nas edificações já é antiga. Pesquisas e legislações são desenvolvidas constantemente abordando todos os aspectos da segurança contra incêndios nas edificações, (MARTINS, 2000).

Na Tabela 1, é válido citar os resultados do levantamento apresentado por Martins (2000), que mostra o número de incêndios de maiores proporções e o número de casos fatais ocorridos em edificações de diversos países do mundo entre os anos de 1960 à 1992, onde se pode observar que em países no qual há um maior desenvolvimento, como o Brasil, o número de fatalidades por incêndio é bastante elevado, quando comparado como o mesmo índice em países desenvolvidos como os Estados Unidos. Essa diferença provavelmente se deve ao fato de haver maior preocupação nas exigências de segurança contra o sinistro.

Tabela 1 - Incêndios e Fatalidades de 1960 à 1992

País	Total de Incêndios (I)	Nº Fatalidades (F)	Nº de Fatalidades por Incêndios (F/I)
Estados Unidos	226	590	2,6
Canadá	11	26	2,4
México	2	4	2,0
Porto Rico	1	96	96,0
Brasil	3	195	65,0
Colômbia	1	4	4,0
França	1	2	2,0
Filipinas	1	10	10,0
Japão	1	32	32,0
Coreia	2	201	100,5
Índia	1	1	1,0

Fonte: MARTINS (2000).

Devido ao crescimento e desenvolvimento do Brasil na construção civil nos últimos anos, o país está em terceiro lugar no ranking mundial de mortes por incêndio. Esta averiguação é dada devido ao cruzamento de informações do Sistema Único de Saúde (SUS) com uma pesquisa feita pela *Geneva Association*. Em 2011, o Sistema de Informações sobre Mortalidade do SUS registrou 1.051 óbitos por incêndio ou por inalação de fumaça, enquanto que os Estados Unidos tiveram 3.192 óbitos e o Japão teve 1.750 óbitos pelo mesmo motivo, conforme a entidade internacional *World Fire Statistics*. (INSTITUTO SPRINKLER BRASIL, 2015).

Na Tabela 2, observa-se a quantidade de ocorrência de incêndios no Brasil por ocupação sendo a quantidade mais elevada em edificações comerciais (Lojas, Shopping Centers e Supermercados), pois nestes locais há existência maior de produtos inflamáveis, tais como espumas – colchões, sofá, madeiras, plásticos, roupas, etc. Os quais em contato com fogo proporciona uma forma desencadeada e descontrolada do fogo – incêndio.

Tabela 2 - Ocorrência de Incêndios (exceto residenciais) noticiados em 2015 – por ocupação - Brasil

Ocupação	Ocorrência de Incêndios
Depósito	194
Comercial ^a	373
Indústrias	225
Serviço Profissional ^b	123
Prédio e Empresas públicas	60
Educacional e Cultura Física ^c	124
Serviço de Saúde e Institucional ^d	60
Local de Reunião de Público ^e	172
Serviço de Hospedagens	18
Total	1349

a – Lojas, Shopping Centers, Supermercados;

b – Agência Bancárias, Prédios Comerciais;

c – Escolas e Universidades;

d – Hospital, Posto de Saúde e Clínicas;

e – Igrejas, Teatro, Aeroporto, Clube, Estádio, Escola de Samba, Casas noturnas, Restaurantes e Bibliotecas.

Fonte: INSTITUTO SPRINKLER BRASIL (2015) - Adaptado.

Consequentemente, devido ao grande número populacional em que se requer uma elevada demanda de edificações sendo elas comerciais, residenciais e industriais, São Paulo (SP) é um dos estados o qual verifica-se uma maior ocorrência de incêndios (INSTITUTO SPRINKLER BRASIL, 2015). Como observado na Tabela 3.

Tabela 3 - Ocorrência de Incêndios (exceto residenciais) noticiados em 2015 – por Estado - Brasil

Estados	Ocorrência de Incêndios
São Paulo (SP)	238
Minas Gerais (MG)	137
Rio Grande do Sul (RS)	113
Santa Catarina	107
Paraná (PR)	99
Rio de Janeiro (RJ)	95
Pernambuco (PE)	85
Bahia (BA)	53
Mato Grosso Sul (MS)	49
Amazonas (AM)	45
Ceará (CE)	35
Mato Grosso	35
Alagoas (AL)	30
Pará (PA)	29
Goiás (GO)	27
Piauí (PI)	27
Rondônia (RO)	23
Paraíba (PB)	22
Maranhão (MA)	21
Distrito Federal (DF)	18
Espirito Santo (ES)	16
Rio Grande do Norte (RN)	15
Sergipe (SE)	13
Tocantins (TO)	7
Amapá (AP)	5
Acre (AC)	3
Roraima (RR)	2

Fonte: INSTITUTO SPRINKLER BRASIL (2015) - Adaptado.

Segundo Brentano (2015), as tragédias proporcionadas por incêndios certamente não deixarão de existir, por outro lado, há uma tendência de diminuição diretamente proporcional à eficiência das legislações de segurança contra incêndios. O Brasil está em sua corrida pelo

aperfeiçoamento de suas legislações, porém, ainda estamos longe do êxito na questão da segurança contra incêndios.

1.1 JUSTIFICATIVA

A partir das décadas 70 e 80, no Brasil, principalmente na cidade de São Paulo, em decorrência de sucessivos incêndios, iniciou-se a corrida para a produção de legislações e normas que definissem medidas de segurança para tornarem as edificações mais seguras contra os incêndios (BRENTANO, 2015). Ainda que algumas legislações de segurança contra incêndios houvessem sido criadas neste período, tratando de algumas das muitas medidas existentes, somente em 1999, baseando-se no Eurocode, foi publicada uma norma brasileira que tratasse do assunto do dimensionamento e verificação das estruturas de aço e mistas (aço-concreto) em situação de incêndio, a NBR 14.323 (ABNT,1999) - Dimensionamento de Estruturas de Aço e de Estruturas Mistas Aço-Concreto de Edifícios em Situação de Incêndio. Esta norma foi o resultado de pesquisas realizadas de forma conjunta em 1995 por professores das universidades brasileiras UFMG, USP e UFOP (MARTINS, 2000).

A exploração dos assuntos voltados às estruturas de aço em situação de incêndio no Brasil, se justifica frente à escassa literatura técnica. Poucos são os autores dedicados a esta causa. Há a necessidade da produção de um volume maior de livros, artigos, dissertações, teses e manuais técnicos, bem como de pesquisas por parte das instituições de ensino superior nacionais. A popularização do tema da segurança das estruturas em situação de incêndio é a forma pela qual se dará a informação e a conscientização dos engenheiros de estruturas e estudantes.

1.2 OBJETIVOS

1.2.1 Objetivo geral

Analisar as estruturas de aço constituídas de perfis laminados (vigas e pilares) em situação de incêndio, utilizando o método simplificado de dimensionamento prescrito pela norma NBR 14.323 (ABNT, 2013) - Dimensionamento de Estruturas de Aço e de Estruturas Mistas Aço-Concreto de Edifícios em Situação de Incêndio para a verificação da capacidade resistente das barras de aço sem revestimento de proteção contra o fogo.

1.2.2 Objetivos específicos

Compreender os princípios fundamentais de segurança contra incêndio nos projetos das edificações;

Apresentar o comportamento das propriedades (mecânicas e térmicas) do aço estrutural frente a temperaturas elevadas conforme descritas na norma NBR 14.323 (ABNT, 2013) - Dimensionamento de Estruturas de Aço e de Estruturas Mistas Aço-Concreto de Edifícios em Situação de Incêndio.

Mostrar os conceitos relacionados à segurança estrutural em situação de incêndio, demonstrando as formulações relativas à verificação da capacidade resistente dos elementos estruturais constituídos de perfis laminados pelo método simplificado de dimensionamento previsto pela NBR 14.323 (ABNT, 2013).

Verificar a capacidade resistente das vigas e pilares constituídos de perfis laminados de um mezanino, utilizando o método simplificado de dimensionamento previsto pela NBR 14.323 (ABNT, 2013) e considerando a estrutura sem revestimento de proteção contra o fogo

Produzir conteúdo científico relacionado à segurança das estruturas de aço em situação de incêndio.

1.3 METODOLOGIA

O estudo foi elaborado com levantamentos bibliográficos dos trabalhos científicos de autores relevantes sobre a segurança das estruturas de aço em situação de incêndio no Brasil, demonstrando o método simplificado de dimensionamento apresentado pela NBR 14.323 (ABNT, 2013) - Dimensionamento de Estruturas de Aço e de Estruturas Mistas Aço-Concreto de Edifícios em Situação de Incêndio para o dimensionamento dos elementos estruturais em situação de incêndio.

Aplicou-se o método simplificado de dimensionamento na análise da estrutura de aço (vigas e pilares) de um mezanino, constituído de perfis laminados, com o objetivo de verificar sua capacidade resistente em situação de incêndio sem revestimento de proteção contra o fogo.

1.4 ESTRUTURA DO TRABALHO

No Capítulo 1 foi introduzido dados estatísticos relevantes e fatos históricos que justificam a motivação da elaboração deste trabalho, assim como todos os objetivos e a metodologia aplicada para produção do mesmo.

No Capítulo 2 foi apresentado os princípios elementares da segurança contra incêndios nos projetos das edificações. Definindo os fenômenos envolvidos nos incêndios, entre eles o fogo e seus componentes, os produtos gerados pelos incêndios, os meios de transmissão de calor, etc.

No Capítulo 3 caracterizou-se os comportamentos mecânicos e térmicos do aço aplicado as estruturas constituídas de perfis de aço laminado previstos pela norma NBR 8.800 (ABNT, 2008) - Projeto de estruturas de aço e de estruturas mistas de aço e concreto de edifícios.

No Capítulo 4 abordou os aspectos envolvidos na segurança das estruturas de aço em situação de incêndio, explanando conceitos utilizados para a análise e o dimensionamento dos elementos estruturais submetidos a temperaturas elevadas, demonstrando a Curva-Padrão de incêndio e do tempo requerido de resistência ao fogo - TRRF, ambos utilizados no dimensionamento dos elementos estruturais em situação de incêndio.

No Capítulo 5 foi abordado considerações gerais sobre o dimensionamento de barras de aço constituídas por perfis laminados previstos pela norma NBR 8.800 (ABNT, 2008) - Projeto de estruturas de aço e de estruturas mistas de aço e concreto de edifícios. Apresentando as formulações necessárias previstas pela norma NBR 14.323 (ABNT, 2013) - Dimensionamento de Estruturas de Aço e de Estruturas Mistas Aço-Concreto de Edifícios em Situação de Incêndio, para a verificação da capacidade resistente das barras de aço em situação de incêndio.

No Capítulo 6 foi realizado o dimensionamento à temperatura ambiente (conforme a NBR 8.800 (ABNT, 2008), das vigas e pilares do mezanino estruturado em perfis de aço laminado, como pré-requisito para a verificação da estrutura em situação de incêndio.

No capítulo 7 foi aplicado o método simplificado de dimensionamento de acordo a norma NBR 14.323 (ABNT, 2013) - Dimensionamento de Estruturas de Aço e de Estruturas Mistas Aço-Concreto de Edifícios em Situação de Incêndio do mezanino, verificando a capacidade resistente em situação de incêndio de suas vigas e pilares.

No capítulo 8 foram analisados e discutidos os resultados obtidos no dimensionamento á temperatura ambiente e em situação de incêndio dos elementos estruturais constituídos de perfis laminados constituintes do mezanino.

No capítulo 9 foram feitas as considerações finais sobre resultados obtidos no dimensionamento do mezanino .

2 PRINCÍPIOS DE SEGURANÇA CONTRA INCÊNDIOS NAS EDIFICAÇÕES

Atualmente, devido um grande volume de dados estatísticos relacionados aos incêndios no Brasil, observa-se uma necessidade maior do conhecimento dos aspectos gerais e específicos envolvidos nos projetos de segurança contra incêndios das edificações, por parte de engenheiros e responsáveis de estrutura. Uma visão geral sobre os aspectos da segurança contra incêndios, resulta em uma maior percepção sobre o papel da segurança estrutural, permitindo-os correlacionar a estrutura com os demais sistemas da edificação. De maneira que, compreender os princípios elementares da segurança contra incêndios, os fenômenos envolvidos na produção dos incêndios, produtos gerados pelo fogo e os impactos dos mesmos sobre os ocupantes da edificação é de suma importância.

O conhecimento das legislações existentes no Brasil e sua hierarquia, também é essencial para que os projetistas de estruturas saibam a correta forma de aplicação e utilização das mesmas e, para que o papel da segurança seja obtido com êxito.

2.1 O FOGO

2.1.1 Definição

O fogo, definido como o resultado do fenômeno da combustão, é uma reação química que consiste na combinação de material combustível (sólido ou líquido) com o comburente (oxigênio do ar), que, ativado por uma fonte de calor (pequena chama, fagulha ou o contato com uma superfície aquecida), inicia uma transformação química, gerando o fogo, que, com a produção de mais calor, propicia o prosseguimento da reação, desencadeando um mecanismo reacional, chamado de reação química em cadeia. (BRENTANO, 2015).

Segundo Silva (2010), “o fogo é um fenômeno físico-químico caracterizado por uma reação de oxidação, com emissão de calor e luz.”

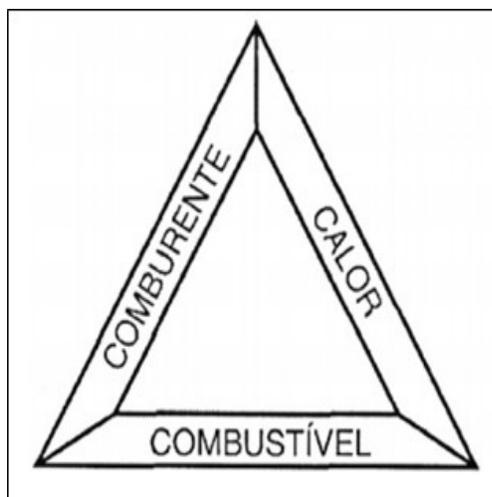
2.1.2 Elementos constituintes do fogo

Como definido anteriormente, o fogo surge da reação química de três elementos fundamentais, o combustível, o comburente e uma fonte de calor, dando início ao que é chamado de reação química em cadeia.

- a) Combustível: Os combustíveis, dentro do processo de combustão, são os materiais que estão sujeitos à queima, ou seja, após a inflamação, continuam queimando sem uma adição extra de calor ao processo. Os materiais combustíveis podem se apresentar de forma sólida (papeis, plásticos, madeira, tecidos borrachas, etc.), líquida (gasolina, álcool etílico, acetona, etc.) e gasosa (GLP, metano, hidrogênio, etc.).
- b) Comburente: O comburente, geralmente o oxigênio do ar atmosférico, é o agente responsável pela ativação e conservação do processo de combustão. O oxigênio combinado aos gases e vapores de combustível, forma uma mistura inflamável.
- c) Fonte de calor: A calor é o ignitor do processo de combustão. Ele tem a função de iniciar, manter e incentivar a propagação do fogo. As fontes de calor podem ser dos mais variados tipos, como faíscas elétricas, chamas, calor devido ao aquecimento de condutores elétricos ou máquinas, atrito, explosão, etc.
- d) Reação química em cadeia: De forma simplificado pode-se entender a reação química como a transferência de calor de uma molécula para a molécula vizinha do material em combustão.

É comum ilustrar o processo de combustão pelo triângulo do fogo (Figura 1), no entanto a representação mais correta seria com o quadrado ou tetraedro do fogo (Figura 2).

Figura 1 - Triângulo do Fogo



Fonte: Próprios autores (2017).

Figura 2 - Quadrado ou Tetraedro do Fogo

Fonte: Próprios autores (2017).

2.1.3 Produtos resultantes da combustão

Os produtos resultantes do processo de combustão dependem da composição dos materiais combustíveis envolvidos. Contudo, no processo de combustão pode haver a produção dos seguintes elementos:

a) Vapores:

Produtos resultantes da combustão que se encontram no estado gasoso quando produzidos, porém, quando resfriados à temperatura ambiente, tornam-se líquidos ou sólidos.

b) Gases:

Estes produtos se mantem no estado gasoso mesmo quando resfriados à temperatura ambiente, eles geralmente são tóxicos e constituem, juntamente com a fumaça, a principal causa de mortes nos incêndios. O principal gás tóxico produzido pela combustão de um material é o monóxido de carbono.

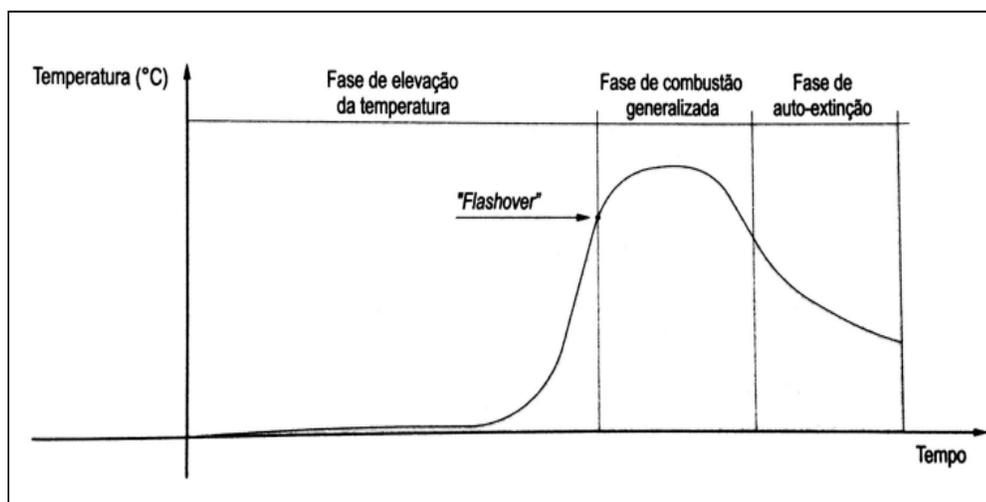
c) Fumaça:

A fumaça, por sua vez, constitui-se da mistura de gases, vapores e fuligem (partículas finas de matéria sólida). Apresentam alta toxicidade e reduzem drasticamente a visibilidade dos ambientes que estão presentes.

2.1.4 Curva de evolução do fogo no incêndio

A evolução do fogo em um ambiente submetido a um incêndio pode ser representada por uma curva de três fases bem definidas, representada na (Figura 3). Essa curva é chamada de Curva de Evolução do Incêndio ou Curva Característica do Incêndio. Segundo Silva (2010) e Brentano (2015), as três fases que caracterizam a curva de evolução de um incêndio, podem ser definidas como: fase de elevação da temperatura (ignição), fase de aquecimento brusco ou combustão generalizada, e fase de auto extinção (resfriamento).

Figura 3 - Curva característica real de um incêndio



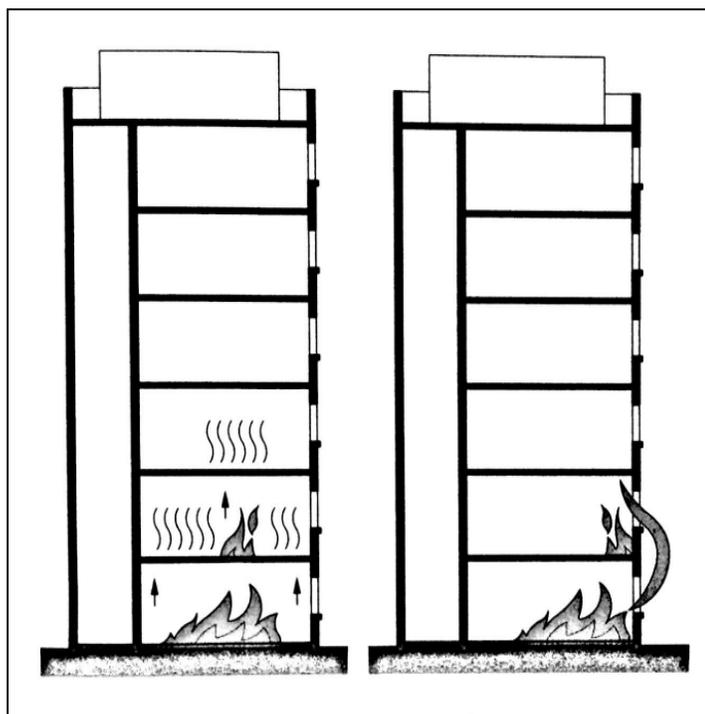
Fonte: BRENTANO (2015).

2.1.5 Mecanismos de transmissão de calor e propagação do fogo

O fogo se propaga, ou se transmite, de três formas. Por condução de calor, por radiação de calor ou por convecção de gases aquecidos. Essas três formas de transmissão de calor podem ocorrer de forma combinada ou isolada.

Silva (2010) define que, a condução é a transmissão de calor, por meio de um corpo de matéria sólida, de um ponto de temperatura mais elevada para um ponto de temperatura menos elevada. Veja o exemplo de transmissão de calor por condução nas edificações na (Figura 4).

Figura 4 - Forma de propagação do fogo por condução

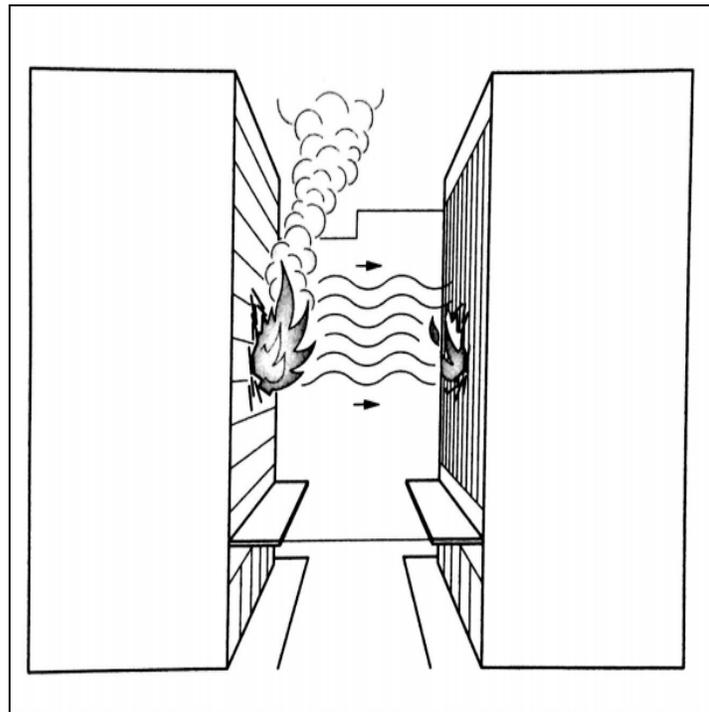


Fonte: BRENTANO (2015).

A radiação, diferentemente da condução, não necessita de um corpo sólido para a transmissão de calor de um ponto ao outro. A transmissão de calor ocorre na forma de propagação de ondas eletromagnéticas, no gás ou no vácuo, de um ponto de temperatura mais elevada para um ponto de temperatura menos elevada. É comum observar a transferência de calor através da radiação em edificações próximas, mostrado na (Figura 5).

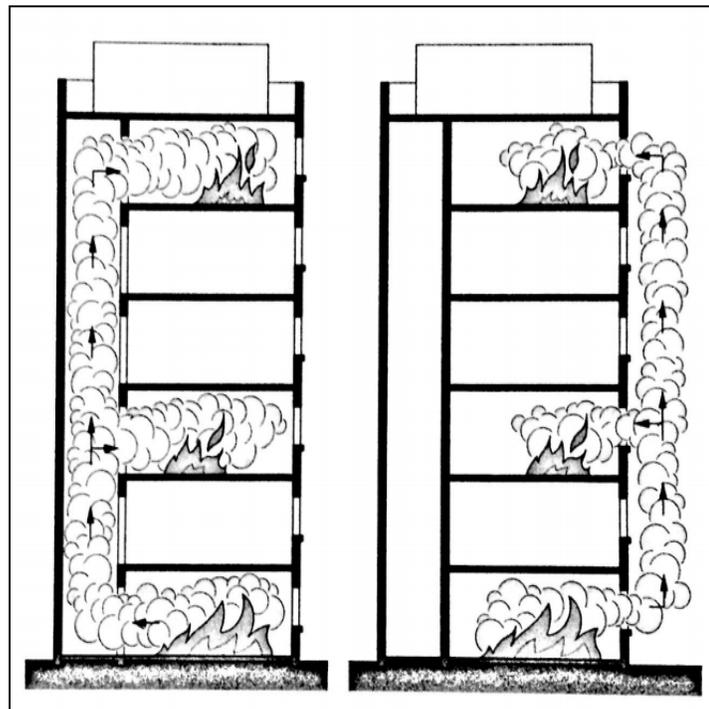
Na convecção, a transmissão de calor dos gases aquecidos, se dá por meio do fluxo contínuo gerado pela diferença de densidade dos gases existente no ambiente em chamas. Esse fluxo faz com que os gases aquecidos em movimento entrem em contato com os mobiliários e demais materiais presentes no ambiente. Em edificações verticais onde há a existência de múltiplos pavimentos, em caso de incêndio, andares superiores podem ser afetados devido à este fenômeno, como mostrado na (Figura 6).

Figura 5 - Forma de propagação do fogo por radiação térmica



Fonte: BRENTANO (2015).

Figura 6 - Forma de propagação do fogo por convecção



Fonte: BRENTANO (2015)

2.2 INCÊNDIOS

2.2.1 Definição

Segundo a definição de Brentano (2015), a ocorrência de um incêndio é devido a concorrência, simultânea, de um combustível, um comburente, uma fonte de calor e uma reação química em cadeia não controlada, pois quando a reação química em cadeia é controlada, podemos controlar pelo menos um dos elementos componentes do triângulo do fogo. Temos como exemplo o queimador de gás da boca de um fogão onde se tem o controle do combustível.

A definição nacional conforme a NBR13.860 (ABNT, 1997) - Glossário de termos relacionado com a segurança contra incêndio: “Incêndio é o fogo fora de controle”.

Como definição Internacional segundo a ISO 8421-1 - *Fire protection — Vocabulary — Part 1: General terms and phenomena of fire*: “incêndio é a combustão rápida disseminando-se de forma descontrolada no tempo e no espaço”.

2.2.2 Principais causas dos incêndios nas edificações

As incidências, mais frequentes, de incêndios tanto pequenos como grandes são nas edificações. Alguns exemplos de início de ignição são: vazamento de gás de bujões com explosões, curtos-circuitos em instalações elétricas por excesso de carga, manuseio de explosivos e outros produtos perigosos em locais não adequados, esquecimento de ferro de passar roupa, fogões e eletrodomésticos ligados, etc. Toda tragédia de incêndio começa pequena. (SEITO I.A. et al., 2008).

2.3 O PROJETO DE SEGURANÇA CONTRA INCÊNDIOS

2.3.1 Objetivos do projeto de segurança contra incêndios

O projeto de segurança contra incêndios de uma edificação, possui dois objetivos principais, ambos seguindo uma ordem de importância. São eles: a proteção da vida humana e a proteção do patrimônio (seja público ou privado), sendo o primeiro objetivo o de maior importância. Brentano (2015), define, ainda, um terceiro objetivo, a garantia do processo de

produção da edificação. Este último objetivo, estaria na terceira posição da ordem de importância.

a) A proteção da vida humana:

Em uma edificação, a vida e a integridade física dos seus ocupantes deve ser garantida em possíveis situações de pânico provocadas pela ocorrência de um incêndio. Essa garantia se dá por meio de um projeto adequadamente elaborado segundo as necessidades e características da edificação. A orientação para o projeto é obtida por meio de legislações específicas de segurança contra incêndio. Em casos de ocorrência de um incêndio, aos ocupantes, deve ser garantida a possibilidade da desocupação da edificação, com condições de iluminação, ventilação e sinalização adequados.

b) A proteção do patrimônio:

As edificações constituem um alto valor de investimento por parte dos seus proprietários, logo a perda patrimonial causada pela condenação de uma edificação após a ocorrência de um incêndio incorre em grandes prejuízos financeiros. No projeto de segurança contra incêndios de uma edificação, a garantia da proteção patrimonial entra como o segundo objetivo principal.

c) A garantia da continuidade do processo de produção:

Segundo Brentano (2015), a garantia da continuidade do processo de produção deve ser levado em consideração na elaboração dos projetos de segurança contra incêndios das edificações, principalmente edificações industriais e comerciais. A interrupção do processo produtivo de uma empresa ou indústria instalada em uma edificação que sofreu um sinistro, conduz a sérios prejuízos financeiros e sociais, afetando direta e indiretamente a vida de todos os envolvidos.

2.3.2 Medidas de segurança contra incêndios

O nível esperado de segurança contra incêndios para uma edificação é obtido pelas medidas de segurança ou de proteção adotadas para o projeto da mesma, segundo as prescrições normativas vigentes, a partir dos parâmetros de classificação da edificação em questão. Sendo estes parâmetros: a ocupação/uso, a altura, a área construída e a carga térmica de incêndio.

As medidas de segurança ou de proteção contra incêndios são divididas em passivas e ativas. As medidas passivas existentes nos projetos das edificações são as seguintes:

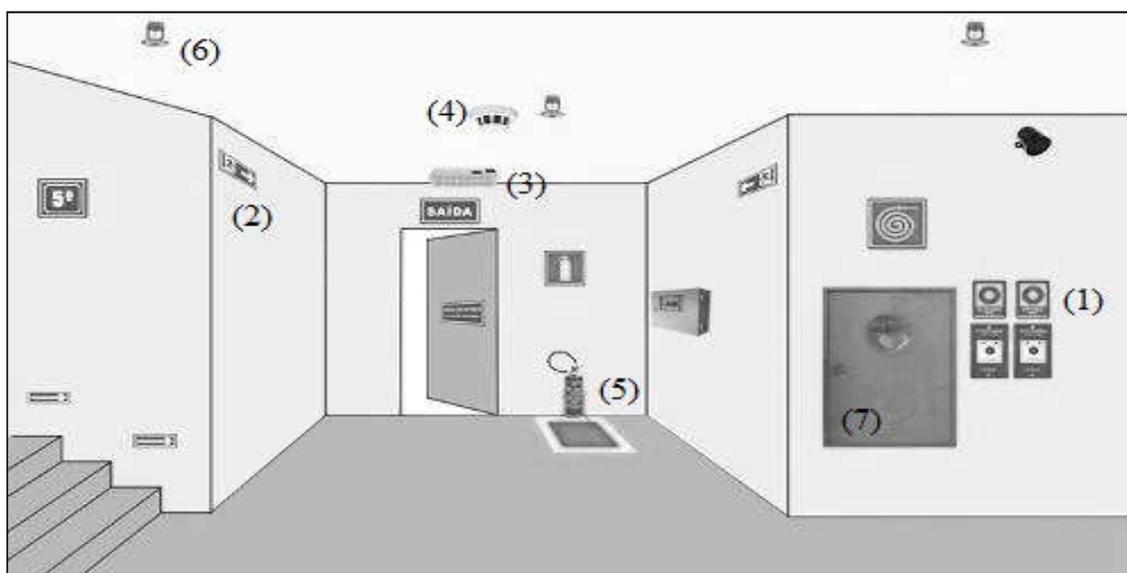
a) Afastamentos entre edificações vizinhas;

- b) Segurança estrutural das edificações;
- c) Compartimentações horizontais e verticais da edificação;
- d) Saídas de emergência;
- e) Controle dos materiais de acabamento e revestimento (CMAR);
- f) Sistemas de proteção contra descargas atmosféricas (SPDA);
- g) Central de gás;
- h) Acesso de viaturas do corpo de bombeiros junto à edificação;
- i) Brigada de incêndio;
- j) Outros.

Como representadas na (Figura 7), as medidas ativas são:

- (1) Sistema de detecção e de alarme de incêndio;
- (2) Sistemas de sinalização de emergência;
- (3) Sistema de iluminação de emergência;
- (4) Sistema de controle da fumaça de incêndio;
- (5) Sistema de extintores de incêndio;
- (6) Sistema de chuveiros automáticos (sprinklers);
- (7) Sistema de hidrantes e/ou mangotinhos.

Figura 7 - Corte Esquemático com representações de Medidas Ativas



Fonte: Próprios autores (2017).

Os conjuntos destas medidas, passivas e ativas, buscam a garantia da segurança contra incêndios da edificação. Pode-se observar a hierarquia operacional entre as medidas de segurança. Algumas das medidas passivas, buscam evitar a ocorrência do foco de incêndio ou até mesmo a redução da sua atuação. Já as medidas ativas, tendo em vista que o incêndio já esteja instalado em parte ou em toda a edificação, têm a função do combate e extinção do incêndio. Justamente na etapa de incêndio instalado, em parte ou em toda a edificação, é que se espera da estrutura um desempenho adequado frente ao fogo. A estrutura deverá resistir a um tempo mínimo necessário que permita a desocupação total das pessoas e o combate ao incêndio por parte dos bombeiros e equipamentos de combate, sem apresentar um estado limite último de ruína. A este tempo, dá-se o nome de Tempo Requerido de Resistência ao Fogo - TRRF, estabelecido conforme o que preconiza a norma NBR 14.432 (ABNT,2001) - Exigências de resistência ao fogo de elementos construtivos de edificações - Procedimento.

2.4 REVESTIMENTOS DE PROTEÇÃO CONTRA FOGO NAS ESTRUTURAS

Quando a estrutura dimensionada não obedece a resistência requerida conforme a NBR 14.323 (ABNT, 2013), a solução mais comum é a aplicação de revestimentos de proteção contra o fogo, que tem como objetivo de impossibilitar a evolução da temperatura nas estruturas de aço em situação de incêndio. Onde esses revestimentos de proteção devem ostentar propriedades, tais como:

- a) Massa específica baixa;
- b) Condutividade térmica baixa;
- c) Calor específico elevado;
- d) Resistência Mecânica Adequada (quando submetidos à impactos);
- e) Integridade do material ao longo da evolução do incêndio;
- f) Custos razoáveis.

2.4.1 Tipos de revestimentos

2.4.1.1 Argamassas projetadas “*Cimentitious*”

A argamassa projetada é um método moderno, ao contrário da aplicação feita manualmente, tem uma alta qualidade e um alto índice de produtividade. Onde se lança de

maneira contínua e uniforme o material. Conseqüentemente, elevando o poder de aderência diminuindo os defeitos e, como resultado, obtendo-se uma maior durabilidade do revestimento. A mesma é composta basicamente por agregados e aglomerantes adicionados à água, como resultado de uma massa fluída. Comumente feita por vermiculita ou gesso, resinas acrílicas, cimento e cargas inertes como celulose e poliestireno expandido, onde apresentam densidade aproximada de 300kg/m³.

A aplicação de argamassas projetadas é um dos métodos mais econômicos para a situação de vigas não aparentes sobre forro, obtendo-se como resultado um aspecto rústico e de aparência rugosa, como mostra a (Figura 8).

Figura 8 - Argamassa aplicada em vigas de aço



Fonte: GUARUTHERM COMERCIAL & ENGENHARIA LTDA
(2015).

2.4.1.2 Fibras Projetadas

Uma mistura de baixa e média densidade composta por fibras que advém de rochas basálticas, também conhecida como escória de alto forno, onde se tem de 20 a 30% do peso seco total.

As propriedades isolantes das fibras são utilizadas para que os efeitos causados pela evolução do incêndio sejam retardados, de forma a proteger o aço. Onde se tem a mesma forma de aplicação da argamassa projetada já citada. Ver a sua aplicação na (Figura 9).

Figura 9 - Aplicação de fibras projetadas em viga de aço

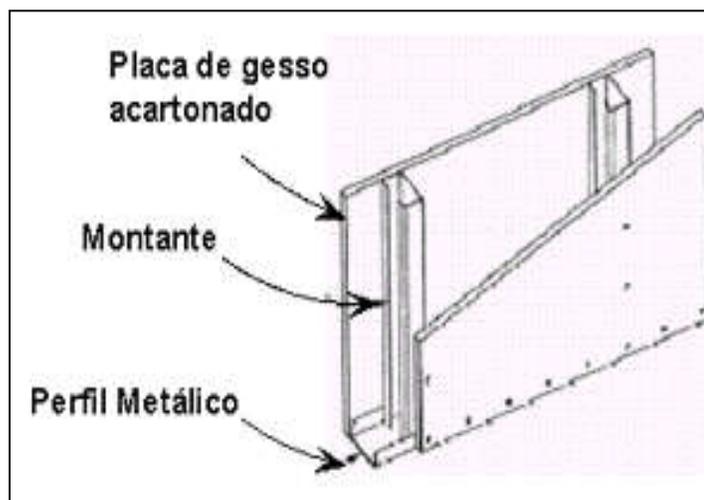


Fonte: PANNONI (2007).

2.4.1.3 Placas

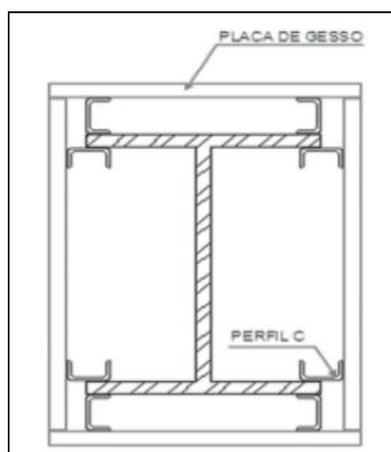
Placas são elementos pré-fabricados as quais são fixadas na estrutura de aço por meio de pinos (parafusos) ou perfis leves de aço, como mostrado nas (Figuras 10 e 11), propiciando múltiplas possibilidades de acabamento. Normalmente, constituídas de materiais fibrosos, vermiculita, gesso ou com um arranjo destes materiais. Os materiais mais comuns são as placas de gesso acartonado, lã de rocha e mantas cerâmicas.

Figura 10 - Método de instalação de placas de gesso acartonado



Fonte: PANNONI (2007).

Figura 11 - Aplicação de placas de gesso em perfil metálico



Fonte: SILVA (2010)

2.4.1.3.1 Placas de Gesso Acartonado

As placas de gesso acartonado são basicamente feitas com um núcleo de gesso natural e 2 lâminas de cartão duplex acolchoando-o. O núcleo também pode receber a adição de fibras minerais (fibra de vidro ou vermiculita incorporada). Suas propriedades são demonstradas na Tabela 4. Geralmente, essas placas são mantidas visíveis nas estruturas, por questões arquitetônicas. Seu método de aplicação pode ser observado na (Figura 12).

Tabela 4 - Propriedades das Placas de Gesso Acartonado

Descrição	Valores
Comportamento ao Fogo	Incombustível
Condutibilidade Térmica (W/m.k)	0,15
Calor Específico (J/kg°C)	1200

Fonte: SILVA (2010)

Figura 12 - Aplicação de placas de gesso acartonado



Fonte: COELHO (2003)

2.4.1.3.2 Placas de Lã de Rocha

As placas de lã de rocha são painéis de baixa densidade, rígidos ou flexíveis, geralmente, são constituídas de materiais fibrosos, em geral aglomerados por pulverização de resinas termo-endurecíveis. Sua origem advém da fusão de rocha basáltica. Seu método de fixação é através pinos de aço soldados à estrutura metálica. Algumas de suas propriedades são apresentadas na Tabela 5, e vemos na (Figura 13) a sua aplicação.

Tabela 5 - Propriedades das Placas de Lã de Rocha

Descrição	Valores
Comportamento ao Fogo	Incombustível
Condutibilidade Térmica (W/m.k)	0,099
Calor específico (J/kg°C)	837,4

Fonte: SILVA (2010)

Figura 13 - Aplicação de Placas de Lã de Rocha

Fonte: PANNONI (2007)

2.4.1.4 Manta Cerâmica

As mantas cerâmicas flexíveis são produtos obtidos de fibras silício-aluminosas que apresentam uma densidade baixa aproximada de 64 kg/m^3 e outras propriedades como descritas na Tabela 6. São fixadas à estrutura com a utilização de pinos de aço soldados de acordo com a (Figura 14).

Tabela 6 - Propriedades das Mantas Cerâmicas

Descrição	Valores
Comportamento ao Fogo	Incombustível
Condutibilidade Térmica (W/m.k)	0,087
Calor específico (J/kg°C)	1.130

Fonte: SILVA (2010)

Figura 14 - Aplicação das Mantas cerâmicas

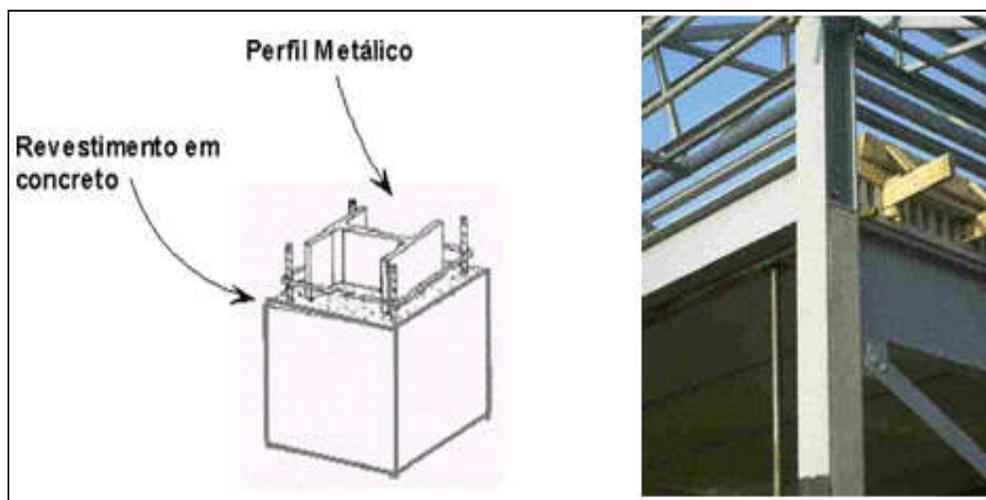


Fonte: PANNONI (2007)

2.4.1.5 Enclausuramento em Concreto

O enclausuramento de perfis metálicos em concreto, (Figura 15), é também um tipo de método empregado na proteção do aço. Proporcionando a proteção do aço frente à corrosão e frente ao incêndio simultaneamente. Entretanto, não muito utilizada devido ao custo elevado.

Figura 15 - Aplicação de Enclausuramento em Concreto



Fonte: PANNONI (2007).

2.4.1.6 Pinturas Intumescentes

São constituídas por polímeros com substâncias intumescentes diversas, isto é, uma película fina que se intumesce (aumenta seu volume). Quando em contato com temperaturas superiores à 200 °C, formam um tipo de camada (espuma carbonácea rígida) – Figura 16, de proteção térmica no aço que retarda o efeito do calor da chama. Sua aplicação é através de meios standardizados com rolo ou pistola, de modo direto na superfície de aço previamente preparada, de tal maneira que a textura obtida, aparência e cores são parecidas com as das pinturas convencionais. Comumente, em seu processo de aplicação, deve ser prevista a aplicação de tinta de fundo (primer) e de acabamento (*top seal*) harmonizáveis, e depois recoberta com uma película acrílica ou poliuretana, devido à baixa resistência química e física, no entanto isto fica a critério do cliente.

Figura 16 – Tinta intumescente exposta ao fogo



Fonte: PANNONI (2007)

2.5 LEGISLAÇÕES DE SEGURANÇA CONTRA INCÊNDIOS NO BRASIL

As normalizações brasileiras possuem uma diversidade de documentos legais que regem as atividades técnicas de uma forma ampla. Nas áreas de arquitetura e urbanismo e engenharia, esta organização burocrática se torna importante, sendo as edificações organizadas por códigos de obra, e as cidades por planos diretores, dentre outros. Temos como exemplo, legislações específicas de segurança contra incêndios.

Em relação às legislações específicas de segurança contra incêndios, as grandes cidades, assim como os estados do Brasil, possuem suas próprias legislações. Havendo ainda, regulamentos das companhias de seguro, assim como a nossa conhecida ABNT (Associação Brasileira de Normas Técnicas).

A Associação Brasileira de Normas Técnicas (ABNT), é uma instituição privada de uma sociedade civil, sem fins lucrativos sendo à mesma de direito público, isto é, não recebe dinheiro público para se manter, exercendo atividades públicas reconhecidas, onde é constituída por 54 comitês técnicos. Tratando especificamente o assunto de segurança contra incêndios a ABNT/CB-24 – Comitê Brasileiro de Segurança contra Incêndio.

Devido a ocorrência de grandes incêndios no Brasil, na década de 70, houve uma demanda de elaboração e revisão das normas já existentes. Atualmente temos normas brasileiras relativamente atualizadas, entretanto, as mesmas, não suprem com rapidez e eficácia a demanda do avanço vertiginoso da tecnologia.

As normas técnicas brasileiras são elaboradas por técnicos especialistas da área de segurança contra incêndios. Elas tem a função de recomendar, especificar, padronizar, classificar, dentre outros, os serviços e produtos. Por essa razão, elas são adotadas de forma geral no Brasil, sendo referencial para a atualização e criação das legislações estaduais.

2.6 TIPOS DE LEGISLAÇÕES NO BRASIL

2.6.1 Legislações Federais

Decretado a lei federal 6.514, de 22 de dezembro de 1977 – Segurança e Medicina do trabalho, designou ao Ministério de Trabalho através da Portaria 3.214, de 08 de junho de 1978, estabelecer disposições complementares na criação das Normas Regulamentadoras - NR, onde é de foco a segurança do trabalho, entretanto abordam assuntos relacionados à proteção contra incêndios. Temos a respeito do assunto, a NR 23 (Portaria SIT n.º 221, de 06 de maio de 2011) – Proteção Contra Incêndio, no entanto, a mesma trata de forma bem básica o conteúdo, mas houve uma nova edição a qual obriga os projetista e responsáveis a instalar dispositivos e projetá-los utilizando medidas apresentadas pelas normas brasileiras. Evitando divergências e conflitos de parâmetros das legislações estaduais, municipais dentre outros regulamentos existentes.

2.6.2 Legislações Estaduais

As legislações estaduais estabelecem varias tabelas que classificam as edificações segundo a sua ocupação, área, capacidade de lotação, altura e carga de incêndio. E devem ser obedecidas no projeto de proteção contra incêndios das edificações, referenciando constantemente as normas brasileiras.

Atualmente, em algumas das legislações estaduais, encontramos problemas de atualizações, parâmetros incompatíveis e exigências absurdas. No entanto temos estados que elaboram e atualizam suas leis baseando-as em normas brasileiras como, o Instituto de Resseguros do Brasil (IRB), as normas regulamentadoras do ministério do trabalho (NR) e até em normas internacionais como, National Fire Protection Association (NFPA) – USA e Regulamento de Segurança contra Incêndio de Portugal. Temos como exemplo estados referências, Espirito Santo (ES), Minas Gerais (MG), Goiás (GO), Paraná (PR) e Mato Grosso do Sul (MS).

2.6.3 Legislação do Estado de São Paulo

Por ser pioneira no Brasil quando o assunto é segurança contra incêndios, a legislação do estado de São Paulo (SP), se destaca, com seu histórico com mais de 50 anos de regulamentação, sendo referência, muitas vezes, para outros estados. Seu primeiro documento legal foi no ano de 1961: Especificações para Instalações de Proteção contra Incêndios, havendo uma grande quantidade de atualizações em seguida.

2.6.4 Legislações Municipais

No Brasil existem muitas cidades as quais possuem sua própria legislação de segurança contra incêndios. As legislações municipais de segurança contra incêndios se baseam nas próprias leis municipais, temos como exemplo a cidade de São Paulo, que se baseia em seu Código de Obras e Edificações (COE), criado pela lei municipal 11.228:1993 e regulamentado pelo decreto 32.3329, de 23 setembro de 1992. Todavia, as legislações municipais podem conter determinações conflitantes com a legislação estadual e até mesmo com as normas brasileiras.

2.6.5 Regulamentação das Companhias Seguradoras

Visando primordialmente à proteção ao patrimônio, as companhias seguradoras foram as primeiras organizações a ditar regras sobre a proteção contra incêndios no Brasil, as mesmas necessitavam de padrões condicionantes para o cálculo do prêmio do seguro, que não havia nas normas brasileiras, seus regulamentos eram mais abrangentes do que os demais, havendo um detalhamento técnico das instalações mais rebuscados. Futuramente adotados por algumas legislações estaduais e municipais e, até mesmo, normas brasileiras como por exemplo a NBR 9.077 (ABNT, 2001) – Saídas de emergência de Edifícios. Atualmente as mesmas não são necessárias pois as normalizações brasileiras atuais abrangem todas as necessidades.

2.7 HIERARQUIA DAS LEGISLAÇÕES

No Brasil, havendo uma diversidade de legislações e normas brasileiras acerca do assunto da segurança contra incêndios, em muitos lugares e regiões, responsáveis técnicos podem se deparar com situações de conflito, de modo que, para a mesma obra, tenha-se a existência de leis municipais, estaduais e normas brasileiras (NBR's), surgindo, deste modo, a dúvida sobre quais as recomendações deve-se obedecer. Entretanto há uma hierarquia entre as legislações, de modo que, as leis federais prevalecem sobre as demais. Atualmente as regulamentações estaduais e municipais são condizentes com as leis federais, mas havendo conflito ou divergência, devemos obedecer primeiramente às leis federais, que tem o poder sobre as estaduais, que conseqüentemente tem valor prevalecente sobre as municipais.

3 PROPRIEDADES DO AÇO ESTRUTURAL A TEMPERATURAS ELEVADAS SEGUNDO A NBR 14.323 (ABNT, 2013)

3.1 AÇO

O aço, assim como outros materiais, quando submetido a elevadas temperaturas, sofre drásticas mudanças em suas propriedades mecânicas e térmicas. Os valores destas propriedades devem ser conhecidos para que se possa efetuar o dimensionamento das estruturas em situação de incêndio.

A NBR 14.323 (ABNT, 2013), define as propriedades mecânicas e térmicas necessárias à verificação da segurança estrutural em situação de incêndio dos aços previstos pelas normas NBR 8.800 (ABNT, 2008), definindo uma massa específica (ρ_a) igual 7.850 kg/m^3 para os mesmos, independentemente da temperatura que estejam submetidos.

As propriedades de aços não previstos por essas normas podem ser utilizadas, desde que obtidas a partir de ensaios ou literaturas técnicas aceitas pela comunidade científica, conforme o que prescreve o item 5 da NBR 14.323 (ABNT, 2013).

3.1.1 Propriedades mecânicas do aço a temperaturas elevadas (resistência ao escoamento e módulo de elasticidade)

Para taxas de aquecimento entre $2^\circ\text{C}/\text{min}$ e $50^\circ\text{C}/\text{min}$, a NBR 14.323 (ABNT, 2013), fornece os valores, relativamente à temperatura de 20°C , dos fatores redutores da resistência ao escoamento e do módulo de elasticidade dos aços laminados e aços trefilados.

Para seções de barras de aço não sujeitas à flambagem local das chapas, a norma NBR 14.323 (ABNT, 2013), define os valores dos fatores de redução apresentados na Tabela 7:

Tabela 7 - Fatores de redução das propriedades mecânicas do Aço

Temperatura do aço θ_a °C	Fator de redução da resistência ao escoamento $k_{y,\theta}$	Fator de redução do módulo de elasticidade $k_{E,\theta}$
20	1,000	1,000
100	1,000	1,000
200	1,000	1,000
300	1,000	1,000
400	1,000	1,000
500	0,780	0,600
600	0,470	0,310
700	0,230	0,130
800	0,110	0,090
900	0,060	0,068
1000	0,040	0,045
1100	0,020	0,023
1200	0,000	0,000

Nota: Para valores intermediários da temperatura do aço, pode ser feita interpolação linear.

Fonte: NBR 14.323 (ABNT, 2013).

Sendo,

$$k_{y,\theta} = \frac{f_{y,\theta}}{f_y} \quad (1)$$

$$k_{E,\theta} = \frac{E_\theta}{E} \quad (2)$$

Onde:

$f_{y,\theta}$ = Resistência ao escoamento do aço a uma temperatura θ_a ;

f_y = Resistência ao escoamento do aço à temperatura ambiente (20°C);

E_θ = Módulo de elasticidade do aço a uma temperatura θ_a ;

E = Módulo de elasticidade do aço à temperatura ambiente (20°C).

Para seções de barras de aço sujeitas à flambagem local das chapas, a norma NBR 14.323 (ABNT, 2013), define os valores apresentados na tabela 8, dos fatores de redução da resistência ao escoamento, $k_{\sigma,\theta}$.

Tabela 8 - Fatores de redução das propriedades mecânicas do aço para barras sujeitas à flambagem local

Temperatura do aço θ_a °C	Fator de redução ^a $k_{\sigma,\theta}$
20	1,000
100	1,000
200	0,890
300	0,780
400	0,650
500	0,530
600	0,300
700	0,130
800	0,070
900	0,050
1000	0,030
1100	0,020
1200	0,000

a – Para valores intermediários da temperatura do aço, pode ser feita interpolação linear.

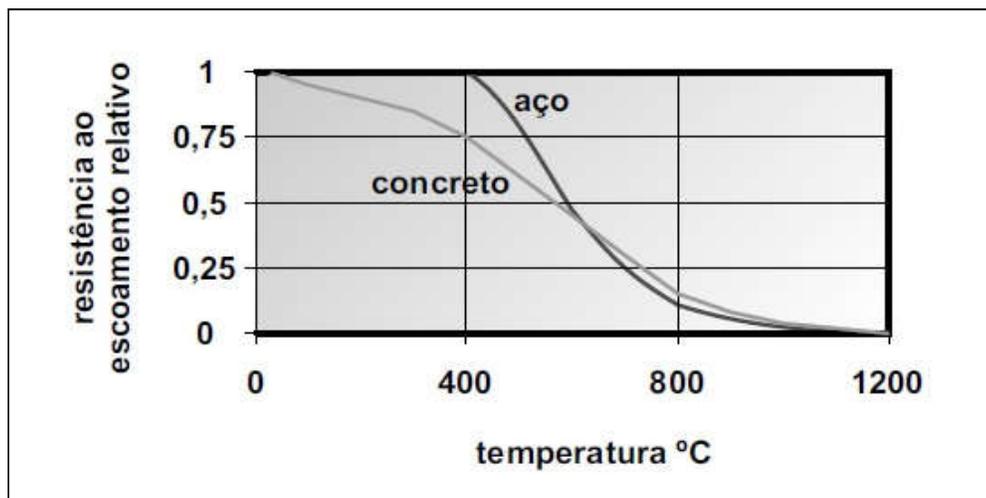
Fonte:NBR14.323 (ABNT, 2013).

Sendo,

$$k_{\sigma,\theta} = \frac{f_{y,\theta}}{f_y} \quad (3)$$

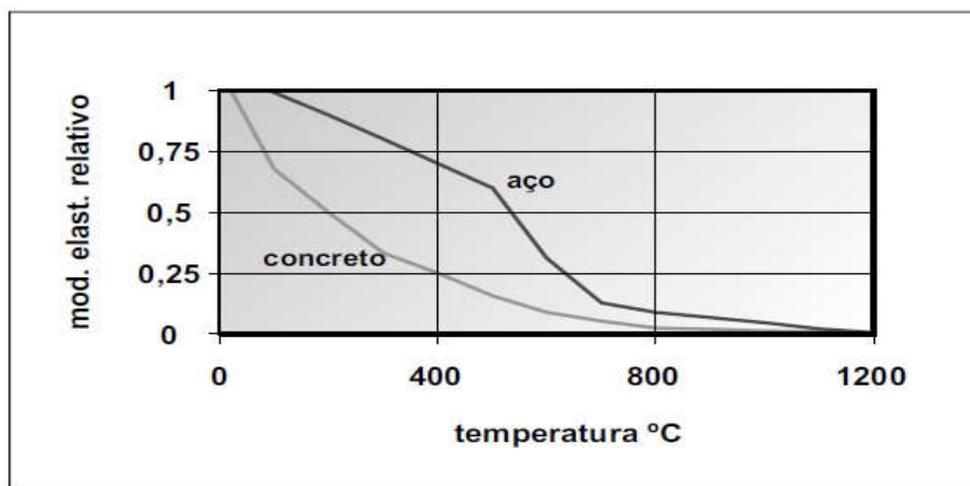
Silva (2005), apresenta dois gráficos que descrevem as reduções nos valores das propriedades mecânicas do aço com a elevação da temperatura. O primeiro gráfico, mostrado na (Figura 17), apresenta a redução do módulo de elasticidade do aço em função da temperatura. O segundo gráfico, mostrado na (Figura 18), apresenta a redução da resistência ao escoamento do aço em função da temperatura.

Figura 17 - Gráfico da redução do módulo de elasticidade



Fonte: SILVA (2005).

Figura 18 - Gráfico da redução da resistência ao escoamento do aço



Fonte: SILVA (2005).

3.1.2 Propriedades Térmicas do aço a temperaturas elevadas

A NBR 14.323 (ABNT, 2013), define as propriedades térmicas dos aços estruturais previstos pelas normas NBR 8.800 (ABNT, 2008), conforme apresentado para as propriedades mecânicas anteriormente.

Poder-se-á verificar nos próximos itens as expressões que definem as propriedades de alongamento, calor específico e condutividade térmica do aço.

3.1.2.1 Alongamento do aço ($\Delta l_a/l_a$)

Para a determinação do alongamento do aço em temperaturas acima da temperatura ambiente (20°C), a NBR 14.323 (ABNT, 2013), define diferentes expressões matemáticas para três faixas bem definidas de temperatura, conforme é apresentado abaixo:

a) Para $20^\circ\text{C} \leq \theta_a < 750^\circ\text{C}$

$$\frac{l_a}{l_a} = 1,2 \times 10^{-5} \theta_a + 0,4 \times 10^{-8} \theta_a^2 \quad 2,416 \times 10^{-4} \quad (4)$$

b) Para $750^\circ\text{C} \leq \theta_a \leq 860^\circ\text{C}$

$$\frac{l_a}{l_a} = 1,1 \times 10^{-2} \quad (5)$$

c) Para $860^\circ\text{C} < \theta_a \leq 1200^\circ\text{C}$

$$\frac{l_a}{l_a} = 2 \times 10^{-5} \theta_a \quad 6,2 \times 10^{-3} \quad (6)$$

Onde:

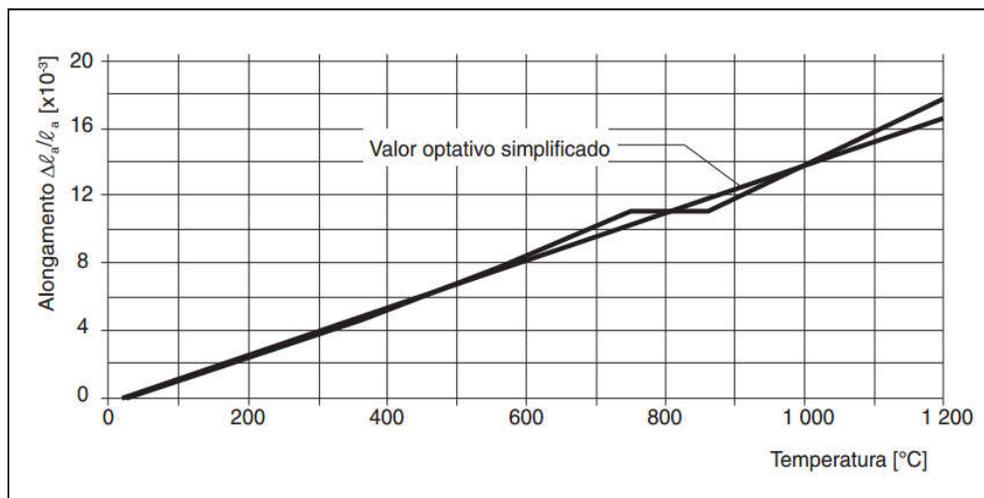
l_a = Comprimento da peça de aço à temperatura ambiente (20°C);

Δl_a = Alongamento da peça de aço provocado pela temperatura;

θ_a = temperatura elevada do aço, em graus Celsius ($^\circ\text{C}$).

A variação do alongamento do aço em função da temperatura pode ser visto na (Figura 19).

Figura 19 - Alongamento do aço em função da temperatura



Fonte: NBR 14.323 (ABNT, 2013).

Por praticidade, a norma permite a adoção de uma relação constante entre o alongamento do aço e a temperatura. Logo, o valor do alongamento do aço pode ser obtido de forma simplificada pela Equação 7.

$$\frac{l_a}{l_a} = 14 \times 10^{-6} (\theta_a - 20) \quad (7)$$

No gráfico da (Figura 19), os valores obtidos pela expressão simplificada são representados por uma reta.

3.1.2.2 Calor específico do aço (C_a)

O calor específico do aço a temperaturas elevadas, segundo a NBR 14.323 (ABNT, 2013), é determinado para 4 faixas bem definidas de temperatura, conforme pode-se verificar abaixo:

a) Para $20^\circ\text{C} \leq \theta_a < 600^\circ\text{C}$

$$C_a = 425 + 7,73 \times 10^{-1} \theta_a - 1,69 \times 10^{-3} \theta_a^2 + 2,22 \times 10^{-6} \theta_a^3 \quad (8)$$

b) Para $600^\circ\text{C} < \theta_a < 735^\circ\text{C}$

$$C_a = 666 + \frac{13.002}{738} \theta_a \quad (9)$$

c) Para $735^\circ\text{C} \leq \theta_a < 900^\circ\text{C}$

$$C_a = 545 + \frac{17.820}{731} \theta_a \quad (10)$$

d) Para $900^\circ\text{C} \leq \theta_a \leq 1200^\circ\text{C}$

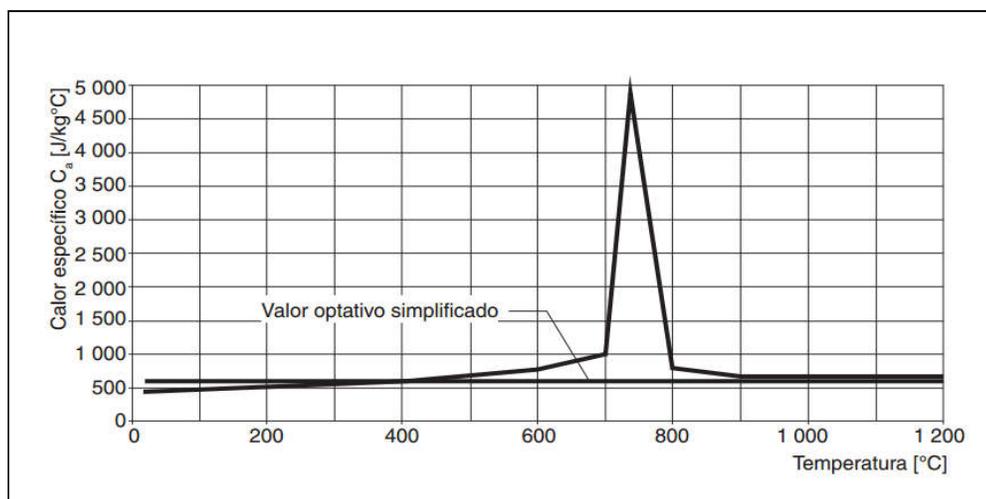
Considera-se o valor constante $C_a = 650$.

Onde:

θ_a = temperatura elevada do aço, em graus Celsius ($^\circ\text{C}$).

O gráfico do calor específico do aço em função da temperatura pode visto na (Figura 20):

Figura 20 - Calor específico do aço em função da temperatura



Fonte: NBR 14.323 (ABNT, 2013).

Por praticidade, a norma permite, de forma simplificada, que o valor do calor específico do aço seja constante e independente da temperatura, desta forma podendo-se adotar

um valor de $C_a = 600 \text{ J/kg}^\circ\text{C}$. Conforme pode-se observar no gráfico, o valor simplificado constante abrange todas as faixas de temperatura.

3.1.2.3 Condutividade térmica (λ_a)

A NBR 14.323 (ABNT, 2013) define duas faixas de temperatura para a obtenção da condutividade térmica do aço, conforme apresentado abaixo:

- a) Para $20^\circ\text{C} \leq \theta_a < 800^\circ\text{C}$

$$\lambda_a = 54 - 3,33 \times 10^{-2} \theta_a \quad (11)$$

- b) Para $800^\circ\text{C} \leq \theta_a \leq 1200^\circ\text{C}$

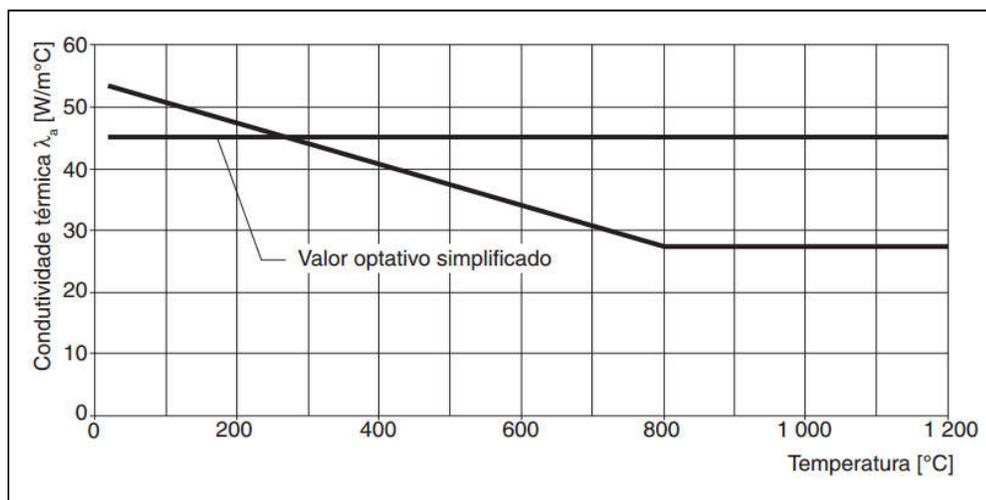
- c) Considera-se o valor constante $\lambda_a = 27,3$.

Onde:

θ_a = temperatura elevada do aço, em graus Celsius ($^\circ\text{C}$).

A condutividade térmica do aço em função da temperatura pode ser vista no gráfico da (Figura 21).

Figura 21 - Condutividade térmica do aço em função da temperatura



Fonte: NBR 14.323 (ABNT, 2013).

Da mesma forma que para o calor específico, a norma permite, de forma simplificada, a adoção de um valor constante para a condutividade térmica do aço, $\lambda_a = 45 \text{ W/m}^\circ\text{C}$, independentemente da temperatura, conforme pode-se observar no gráfico acima.

4 ASPECTOS DA SEGURANÇA DAS ESTRUTURAS DE AÇO EM SITUAÇÃO DE INCÊNDIO

4.1 CURVA TEMPERATURA-TEMPO

A principal característica de um incêndio, para o estudo das estruturas, é a sua curva de evolução, conforme apresentado no item 2.1.4. A curva de evolução do incêndio define a elevação da temperatura dos gases aquecidos em função do tempo. A partir dessa curva, pode-se conhecer a máxima temperatura que os elementos estruturais deverão resistir. A curva define três fases diferentes do incêndio, conforme já explicado. As fases da elevação de temperatura, aquecimento brusco e auto extinção. O instante conhecido como “flashover”, define o início da fase de aquecimento brusco. Momento em que toda a carga combustível do ambiente entra em ignição até a extinção total de todo o material.

Na fase de elevação da temperatura, onde o ponto de inflamação generalizada (“flashover”) não foi atingido, as medidas de proteção ativas, como hidrantes, mangotinhos e chuveiros automáticos, por exemplo, são eficientes na extinção do foco de incêndio, não havendo nenhuma solicitação adicional à estrutura da edificação. Porém, frente à impossibilidade de se garantir a eficiência das medidas de proteção ativa na extinção do fogo, surge a necessidade da verificação da segurança estrutural em situação de incêndio.

Para a verificação da segurança das estruturas em situação de incêndio, modelos do incêndio são elaborados utilizando-se curvas temperatura-tempo, baseadas em ensaios ou modelos matemáticos realísticos que, consideram, dentre alguns parâmetros, a variação da quantidade de material combustível e o grau de ventilação do compartimento incendiado. Estas curvas, por simplicidade, admitem que o início do incêndio se dá a partir do ponto de “flashover”, SILVA (1997 apud SCHLEICH, 1994). Estas curvas são conhecidas por modelo do incêndio natural ou modelo do incêndio real.

As curvas temperatura-tempo do modelo do incêndio real, são de difícil obtenção já que se alteram para cada situação estudada. Deste modo, convencionou-se adotar uma curva padronizada como modelo do incêndio para análise experimental de elementos estruturais, materiais de proteção térmica, portas corta-fogo, etc. Este modelo é conhecido como modelo do incêndio-padrão.

4.1.1 Curva do incêndio-padrão

O incêndio-padrão é o modelo de incêndio para o qual, de forma simplificada, admite-se que a temperatura dos gases provenientes do ambiente incendiado tenha o comportamento das curvas padronizadas (curvas-padrão) para ensaio. Essas curvas apresentam apenas um trecho ascendente, admitindo-se, portanto, que a temperatura dos gases é crescente com o tempo e além disso independente das características do ambiente e da quantidade de material combustível presente no mesmo, Silva (1997). É importante destacar que as curvas-padrão não representam o incêndio real, logo, quaisquer resultados obtidos a partir destas curvas devem ser cuidadosamente analisados.

Interessa-se conhecer a temperatura a qual estão submetido os elementos estruturais de uma edificação em situação de incêndio, temperatura do aço exposto ao incêndio. Esta temperatura pode ser calculada em função do tempo de exposição da estrutura ao incêndio-padrão por meio de métodos analíticos, de modo experimental (ensaios) ou técnicas semi-empíricas.

É corrente nos códigos de segurança contra incêndios, a exigência da segurança não à uma temperatura elevada, mas sim, a um tempo associado à curva-padrão. A esse tempo dá-se o nome de tempo requerido de resistência ao fogo - TRRF, no Brasil, prescrito pela norma NBR 14.432 (ABNT, 2001). A resistência ao fogo é a propriedade de um elemento estrutural resistir à ação do fogo por um determinado período de tempo, mantendo sua segurança estrutural, estanqueidade e isolamento, onde aplicável, (SILVA *et al* 2005).

A norma NBR 5628 (ABNT, 1980) - Componentes Construtivos Estruturais - Determinação da Resistência ao Fogo, define a Equação 12 para a determinação da temperatura dos gases de um incêndio, através da curva do incêndio-padrão, para um determinado instante de tempo:

$$\theta_g = \theta_0 + 345 \log(8t + 1) \quad (12)$$

Onde:

t = Tempo, em minutos;

θ_0 = Temperatura do ambiente antes do início do aquecimento, em graus Celsius, geralmente adotada como 20°C;

θ_g = Temperatura dos gases, em graus Celsius, no instante de tempo t.

As curvas padronizadas mais citadas nas bibliografias são ISO 834 (1975) e ASTM E 119 (1988).

4.2 VERIFICAÇÃO DA SEGURANÇA ESTRUTURAL DOS ELEMENTOS

Os elementos de aço sujeitos ao incêndio tem a sua estabilidade estrutural garantida quando é efetuada a verificação do critério do domínio do tempo, da temperatura e da resistência (VIEIRA L. L. *et al.*, 2016).

A verificação no domínio temporal deve garantir que a estrutura resista, sem entrar em colapso, a um tempo mínimo necessário à desocupação total da edificação por parte dos usuários de forma segura e rápida. No Brasil, a garantia do domínio temporal se dá pelo tempo requerido de resistência ao fogo - TRRF, prescrito pela norma NBR 14.432 (ABNT, 2001). Cabendo-se salientar que o TRRF é obtido em função dos parâmetros da edificação, como uso/ocupação, altura, carga térmica dos materiais combustíveis presentes e a área. A Equação 13 garante a verificação da segurança estrutural do elemento no domínio do tempo.

$$t_{f,d} > t_{f,req} \quad 13$$

Onde:

$t_{f,req}$ = Tempo requerido de resistência ao fogo;

$t_{f,d}$ = Valor de cálculo de resistência ao fogo com base no incêndio padrão ISO 834.

A verificação no domínio da temperatura deve garantir que o elemento estrutural de aço não sofra o colapso quando solicitado por ações térmicas, deste modo, é necessário que a temperatura do aço, proveniente do incêndio, seja inferior a temperatura crítica. Entendo-se por temperatura crítica como a temperatura que conduz o elemento estrutural ao colapso (SILVA, 2001). A Equação 14 garante a verificação da segurança estrutural do elemento no domínio da temperatura.

$$\theta_a > \theta_{cr} \quad (14)$$

Onde:

θ_a = Temperatura do aço;

θ_{cr} = Temperatura crítica.

A verificação da segurança dos elementos estruturais no domínio da resistência se dá pela Equação 15.

$$S_{d,fi} \leq R_{d,fi} \quad (15)$$

Onde:

$S_{d,fi}$: Valor de cálculo do esforço solicitante atuante em situação de incêndio, obtido para a combinação ultima excepcional conforme item 4.4;

$R_{d,fi}$: Valor de cálculo do esforço resistente em situação de incêndio, obtido considerando-se o efeito das ações térmicas por meio da aplicação dos coeficientes de redução às propriedades mecânicas do aço.

4.1 AÇÕES TÉRMICAS NAS ESTRUTURAS

Silva (1997) define as ações térmicas como as ações atuantes sobre a estrutura advindas do fluxo de calor, por radiação e convecção, provocado pela diferença entre a temperatura elevada dos gases quentes do ambiente incendiado e a temperatura dos elementos estruturais (pilares, vigas, lajes, ligações, etc). As ações térmicas incorrem na elevação da temperatura dos elementos estruturais, causando-lhes a redução da capacidade resistente, devido à depreciação das propriedades mecânicas dos mesmos, e o surgimento de esforços decorrentes das deformações térmicas, este podendo ser desprezíveis devido a sua baixa significância nos efeitos globais da estrutura conforme permite a NBR 14.323 (ABNT, 2013).

A NBR 8.681 (ABNT, 2003), classifica as ações, segundo a sua variabilidade no tempo, em três categorias. Ações permanentes, ações variáveis e ações excepcionais. Para as estruturas submetidas a um incêndio, as ações decorrentes da elevação da temperatura (ações térmicas) são chamadas de ações transitórias excepcionais. As ações excepcionais também representam as ações decorrentes de causas como explosões, choques de veículos, enchentes e sismos.

O conjunto de ações com probabilidade não desprezível de atuarem simultaneamente sobre uma estrutura, durante um período de tempo preestabelecido, constituem um

carregamento. A NBR 8.681 (ABNT, 2003) define os seguintes tipos de carregamentos: carregamento normal, carregamento especial, carregamento excepcional e carregamento de construção. Um carregamento é definido em função do seu tempo de duração sobre a estrutura. A nós, interessa o conhecimento do carregamento excepcional, atribuído às ações provenientes dos incêndios.

O carregamento excepcional é transitório, com curta duração na estrutura, e pode provocar efeitos catastróficos na mesma. A verificação do estado limite último para um carregamento excepcional é realizada para uma única combinação última excepcional de ações.

4.2 COMBINAÇÕES ÚLTIMAS DE INCÊNDIO

A combinação decorrente de um estado limite último de incêndio, são combinações últimas excepcionais, obtidas conforme as prescrições da norma NBR 8681/2003, conforme já mencionado. A norma NBR 14.323 (ABNT, 2013), baseando-se nas prescrições da norma NBR 8.681 (ABNT, 2003), define as seguintes combinações últimas de incêndio:

- a) Locais sem a predominância de pesos de equipamentos fixos ou elevadas concentrações de pessoas por longos períodos de tempo, como por exemplo, edificações residenciais ou de acesso restrito:

$$\sum_{i=1}^n \gamma_{gi} F_{Gi,k} + F_{Q,exc} + 0,21 F_{Q,k} \quad (16)$$

- b) Locais com a predominância de pesos de equipamentos fixos ou elevadas concentrações de pessoas por longos períodos de tempo, como por exemplo, edificações comerciais, escritórios e de acesso ao público:

$$\sum_{i=1}^n \gamma_{gi} F_{Gi,k} + F_{Q,exc} + 0,28 F_{Q,k} \quad (17)$$

- c) Locais utilizados como bibliotecas, depósitos, oficinas ou garagens:

$$\sum_{i=1}^n \gamma_{gi} F_{Gi,k} + F_{Q,exc} + 0,42 F_{Q,k} \quad (18)$$

- d) Para elementos da estruturas submetidas unicamente a esforços decorrentes da ação do vento, seu peso próprio e eventuais ações térmicas, deve-se utilizar a seguinte combinação última:

$$\sum_{i=1}^n \gamma_{gi} F_{Gi,k} + F_{Q,exc} + 0,20 F_{W,k} \quad (19)$$

Onde:

$F_{gi,k}$ = Valor característico das ações permanentes diretas;

$F_{Q,exc}$ = Valor característico das ações térmicas decorrentes do incêndio;

$F_{Q,k}$ = Valor característico das ações variáveis decorrentes do uso e ocupação da edificação;

γ_g = Coeficiente de ponderação das ações permanentes diretas. Igual a 1 para ações permanentes favoráveis à segurança. Definido conforme as tabelas 9 e 10, para ações permanentes desfavoráveis à segurança;

$F_{W,k}$ = Valor característico das ações provenientes do vento, conforme a NBR 6.123 (ABNT, 1988).

Tabela 9 - Coeficientes de ponderação γ_g para ações permanentes diretas consideradas separadamente

Ações permanentes diretas	γ_g
Peso próprio de estruturas metálicas	1,10
Peso próprio de estruturas pré-moldadas, estruturas moldadas no local e de elemento construtivos industrializados e empuxos permanentes	1,15
Peso próprio de elementos construtivos industrializados com adições in loco	1,20
Peso próprio de elementos construtivos em geral e equipamentos	1,30

Fonte: NBR 14.323 (ABNT, 2013).

Tabela 10 - Coeficientes de ponderação γ_g para ações permanentes agrupadas

Tipo edificação	γ_g
Edificação onde as ações variáveis decorrentes do uso e ocupação superam 5 kN/m ²	1,15
Edificação onde as ações variáveis decorrentes do uso e ocupação não superam 5 kN/m ²	1,20

Fonte: NBR 14.323 (ABNT, 2013).

4.3 DETERMINAÇÃO DA TEMPERATURA NOS ELEMENTOS ESTRUTURAIS SUBMETIDOS AO INCÊNDIO SEM PROTEÇÃO CONTRA O FOGO

4.3.1 Temperatura do aço no instante $t-\Delta t$

Vieira (2016), apresenta um modelo proposto por Franssen e Real (2012), para a determinação da temperatura do aço desprovido de proteção térmica, exposto 30 minutos ao incêndio padrão ISO 834, no instante $t-\Delta t$. Os valores das temperaturas do aço são obtidos em função do fator de massividade do perfil e do tempo de exposição ao incêndio. Para valores intermediários, deve-se efetuar interpolação linear. Ver os dados na Tabela 11.

Tabela 11 - Valores para θ_a (temperatura do aço sem revestimento) em °C, exposto a curva padrão da ISO 834 em função de diferentes valores de $ksh.(u/Ag)$ de 24 à 30 minutos

Tempo (min.)	10 (m ⁻¹)	15 (m ⁻¹)	20 (m ⁻¹)	25 (m ⁻¹)	30 (m ⁻¹)	40 (m ⁻¹)	60 (m ⁻¹)	100 (m ⁻¹)	100 (m ⁻¹)	300 (m ⁻¹)	400 (m ⁻¹)
24	197	271	337	396	448	532	641	726	767	791	799
25	207	284	353	414	467	552	658	732	780	801	807
26	217	298	369	432	485	570	674	735	792	809	813
27	227	311	385	449	503	588	688	739	803	816	820
28	237	324	401	466	521	604	701	746	813	823	826
29	247	338	416	482	538	621	712	756	821	829	831
30	257	351	431	498	554	636	721	767	828	835	837

Nota: Para valores intermediários da temperatura do aço, pode ser feita interpolação linear
Fonte: ISO 834.

4.3.2 Temperatura crítica

Segundo Silva (2004), a temperatura crítica está correlacionada com as dimensões dos elementos e seus carregamentos. Que diretamente influenciam no fator de redução. Sendo assim calculada conforme a Equação 20.

$$\theta_{cr} = 39,19 \ln \left(\frac{1}{0,9674 k_{y,\theta}^{3,833}} + 1 \right) + 482 \quad (20)$$

4.3.3 Fator de massividade

O fator de massividade para barras prismáticas é definido como a relação entre o perímetro exposto ao fogo da seção transversal e a sua área, por vezes conhecido como fator de forma da seção (SILVA, 2001).

A temperatura presente nos elementos de uma estrutura quando submetida a um incêndio, é fortemente influenciada pela relação existente entre a área da seção transversal exposta ao calor e a massa do perfil. A esta relação, dá-se o nome de fator de massividade, e, quanto menor for o seu valor, maior será a capacidade resistente a temperaturas elevadas, (BELLEI, 2008).

4.3.4 Roteiro de cálculo para a determinação da temperatura do aço

Vieira (2016), adaptou o roteiro proposto por Silva (2001) às prescrições da NBR 14.323 (ABNT, 2013), para a determinação da temperatura atuante na seção transversal dos elementos estruturais de aço submetidos às ações de um incêndio padrão sem revestimentos de proteção contra o fogo. Ver o roteiro descrito abaixo.

Temperatura dos gases aquecidos provenientes do incêndio padrão, determinada conforme a equação 12;

- 1) Fator de sombreamento, determinado conforme a Equação 23;
- 2) Fatores de massividade do perfil, determinados conforme a (Figura 22);

- 3) Determinação do fator de massividade reduzido. Obtido pelo produto entre o fator de sombreamento, calculado no passo 1, conforme a Equação 23, e o fator de massividade do perfil, calculado no passo 2, conforme a (Figura 22);
- 4) Temperatura do aço no instante $t-\Delta t$. Obtida através da Tabela 11 do item 4.3.1, em função do fator de massividade e do tempo de exposição ao fogo, para perfis submetidos ao incêndio padrão da ISO 834 e desprovidos de proteção térmica;
- 5) Fluxo de calor radioativo, determinado conforme a Equação 26;
- 6) Fluxo de calor devido à convecção, determinado conforme a equação 25;
- 7) Fluxo de calor total, φ , determinado conforme a equação 24;
- 8) Elevação da temperatura do aço, $\Delta\theta_a$, determinada conforme a Equação 22;
- 9) Temperatura na superfície do aço, θ_a , determinada conforme a Equação 21.

$$\theta_a = \theta_a + \theta_{a(t-\ t)} \quad (21)$$

Este roteiro foi aplicado na obtenção da temperatura na superfície do aço dos perfis aplicados na estrutura do mezanino dimensionado em situação de incêndio no capítulo 7.

5 MÉTODO SIMPLIFICADO DE DIMENSIONAMENTO DA NBR 14.323 (ABNT, 2013)

5.1 GENERALIDADES

O método simplificado de dimensionamento descrito pela NBR 14.323 (ABNT, 2013), é um método analítico e aplica-se à grande parte das estruturas convencionais, conduzindo a resultados conservadores. A aplicação do método se restringe às barras prismáticas de aço constituídas de perfis laminados e soldados não-híbridos, às vigas mistas e pilares mistos (aço-concreto), também constituídos de perfis laminados e soldados não híbridos, e às lajes mistas (aço-concreto), previstos pela norma NBR 8.800 (ABNT, 2008) e NBR 14.762 (ABNT, 2010).

Os métodos analíticos em geral, levam em consideração, para o dimensionamento da estrutura, a debilitação progressiva das propriedades mecânicas do aço e do concreto com a elevação da temperatura. Fato que incorre no colapso do elemento estrutural ou ligação como consequência da incapacidade do mesmo em resistir às solicitações. Os elementos estruturais são verificados, quanto a sua capacidade resistente, de forma isolada.

A NBR 14.323 (ABNT, 2013) faz as seguintes considerações para a aplicação do método simplificado de dimensionamento:

- a) As estruturas verificadas em situação de incêndio, devem ter sido previamente dimensionadas ao estado limite último – ELU, à temperatura ambiente, de acordo com a respectiva norma aplicável, seja a NBR 8.800 (ABNT, 2008) ou a NBR 14.762 (ABNT, 2010);
- b) As estruturas devem ser dimensionadas para o estado limite último em situação de incêndio, e, para o mesmo, a NBR 14.323 (ABNT, 2013) adota o coeficiente de ponderação unitário para a determinação das forças resistentes de cálculo. Deste modo, poder-se-á observar que as expressões referentes às forças resistentes de cálculo não possuem a indicação dos coeficientes de ponderação (γ);
- c) Os esforços solicitantes decorrentes das restrições às deformações de origem térmica (alongamentos axiais devidos a elevação da temperatura) podem ser desprezados;
- d) As resistências de cálculo, $R_{fi,d}$, deverão ser determinadas considerando-se as variações das propriedades mecânicas do aço e do concreto com a elevação da temperatura;

- e) A norma dispensa a verificação do estado limite de serviço da estrutura, já que, para uma situação de incêndio, interessa-se somente a capacidade resistente da mesma.

5.2 ESFORÇOS SOLICITANTES DE CÁLCULO

A NBR 14.323 (ABNT, 2013) permite que os esforços solicitantes de cálculo em estruturas de deslocabilidade pequena, podem ser obtidos através de uma análise estrutural global elástica linear, com as propriedades dos materiais à temperatura ambiente. O efeito local causado pela não linearidade geométrica, efeito ($P - \delta$), deve ser considerado e a resultante das imperfeições iniciais desprezadas. Para as estruturas de grande e média deslocabilidades, obtêm-se os esforços solicitantes de cálculo seguindo as recomendações prescritas conforme a NBR 8.800 (ABNT, 2008), conservando as propriedades materiais à temperatura ambiente e seguindo as considerações mostradas abaixo nos itens a e b. A classificação das estruturas quanto à sensibilidade a deslocamentos laterais, deve ser realizada à temperatura ambiente, seguindo as precrições da NBR 8.800 (ABNT, 2008).

Para o dimensionamento das barras de aço, utilizando-se as combinações últimas excepcionais de incêndio, conforme definido no item 4.3, quando as mesmas são expostas ao incêndio-padrão, desprezamos:

- a) Os efeitos das deformações térmicas advindas dos gradientes térmicos por toda a extensão da seção transversal da barra, se o Tempo Requerido de Resistência ao Fogo – TRRF, for igual ou inferior a 30 minutos, segundo a NBR 14.432 (ABNT, 2001);
- b) Os efeitos das expansão térmica das barras.

A NBR 14.323 (ABNT, 2013), por facilidade, também permite para estruturas de médias e pequenas deslocabilidades, que os esforços solicitantes de cálculo em situação de incêndio, possam equivaler a 70% dos esforços obtidos para o dimensionamento conforme a NBR 8.800 (ABNT, 2008) - à temperatura ambiente, tomando-se apenas as combinações que não englobem as ações do vento, excetuando-se as barras de contraventamento, as quais devem, em seu dimensionamento em situação de incêndio, receber um acréscimo de 20% dos esforços decorrentes do vento.

5.3 O ELU E OS ESFORÇOS RESISTENTES DE CÁLCULO

Os estados limites últimos verificados nas estruturas em situação de incêndio pelo método simplificado de dimensionamento, são os mesmos preconizados pela NBR 8.800 (ABNT, 2008) – com o dimensionamento à temperatura ambiente, com exceção dos esforços envolvidos na ruptura das seções líquidas das barras, os quais são desconsiderados no dimensionamento em situação de incêndio, conforme o que prescreve a NBR 14.323 (ABNT, 2013).

Os esforços resistentes de cálculo atribuídos aos estados limites últimos, $R_{fi,d}$ ($N_{fi,d}$, $V_{fi,d}$ e $M_{fi,d}$), são obtidos aplicando-se as combinações últimas excepcionais de incêndio, conforme definido em 4.3, considerando-se as mudanças das propriedades mecânicas do aço com a elevação da temperatura. A elevação da temperatura, para a aplicação do método simplificado de dimensionamento, deve ser considerada conforme o item 5.4 seguinte.

5.4 CÁLCULO DA ELEVAÇÃO DA TEMPERATURA DO AÇO

5.4.1 Elementos estruturais pertencentes a estruturas internas

5.4.1.1 Elementos estruturais sem revestimento contra o fogo

$$\theta_{a,t} = k_{sh} \frac{(u/A_g)}{C_a \rho_a} \varphi \quad t \quad (22)$$

Onde:

$\Delta\theta_{a,t}$ = Variação da temperatura no elemento estrutural de aço, durante um intervalo de tempo Δt ;

k_{sh} = é um fator de correção para o efeito de sombreamento, que pode ser tomado como igual a 1,0 ou determinado conforme abaixo (item 8.5.1.1.2 da NBR 14.323 (ABNT, 2013))

u/A_g = é o fator de massividade para elementos estruturais de aço sem revestimento contra o fogo, expresso em metros a menos um (m^{-1}), não deve ser inferior a $10 m^{-1}$;

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

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

ρ_a = é a massa específica do aço, conforme definido no item 3.1, expresso em kg/m^3 ;

C_a = é o calor específico do aço, conforme o item 3.1.2.2, expresso em ($J/kg/^\circ C$);

φ = é o valor do fluxo de calor por unidade de área, dado conforme abaixo, expresso em (W/m^2);

t = é o intervalo de tempo, expresso em segundos (s), o seu valor não pode ser tomado como maior que 5 s;

O fator de correção para o efeito de sombreamento em seções I ou H submetidas ao incêndio-padrão, é dado por:

$$k_{sh} = 0,9 \frac{(u/A_g)b}{(u/A_g)} \quad (23)$$

Onde $(u/A_g)b$ é o valor do fator de massividade, definido como a relação entre o perímetro exposto ao incêndio de uma caixa hipotética que envolve o perfil e a área da seção transversal do mesmo. Em uma seção I ou H com altura d e largura das mesas b , exposta ao incêndio pelos quatro lados, o perímetro é igual a $2(d + b)$ e, se a seção transversal for exposta ao incêndio somente pelo lado inferior e as laterais, o perímetro é igual a $2d + b$.

O fator de correção para o efeito de sombreamento de seções transversais fechadas, como seções caixão e tubulares, circulares e retangulares, e seções sólidas, como as retangulares, totalmente submetidas ao incêndio-padrão, k_{sh} é igual 1,0.

O valor de φ (W/m^2) é dado por:

$$\varphi = \varphi_c + \varphi_r \quad (24)$$

Com

$$\varphi_c = \alpha_c (\theta_g - \theta_a) \quad (25)$$

e

$$\varphi_r = 5,67 \times 10^{-8} \varepsilon_{res} [(\theta_g + 273)^4 - (\theta_a + 273)^4] \quad (26)$$

Onde

φ_c = é o componente do fluxo de calor devido à convecção (W/m²);

φ_r = é o componente do fluxo de calor devido à radiação (W/m²);

α_c = é o coeficiente de transferência de calor por convecção, podendo ser adotado; na prática, como igual a 25 W/m²°C, no caso de exposição ao incêndio-padrão, ou 35 W/m²°C, para a exposição ao incêndio natural, conforme o item 3.17 da NBR 14.432 (ABNT, 2000);

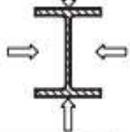
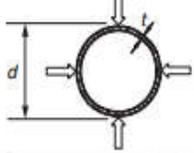
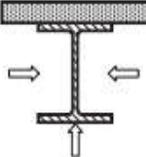
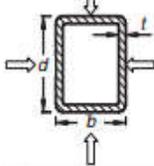
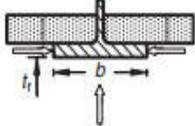
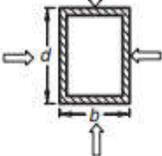
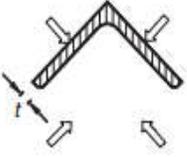
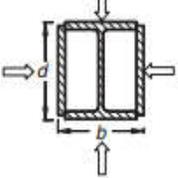
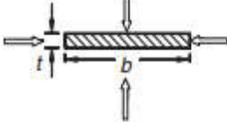
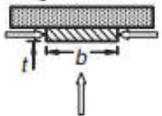
θ_g = é a temperatura dos gases (°C);

θ_a = é a temperatura na superfície do aço (°C);

ε_{res} = é a emissividade resultante, podendo ser tomada para efeitos práticos como igual a 0,7.

As expressões para o cálculo dos fatores de massividade podem ser vistas na Figura 22 abaixo:

Figura 22 - Fator de Massividade para alguns elementos estruturais sem material de revestimento

<p>Seção aberta exposta ao incêndio por todos os lados:</p> $\frac{u}{A_g} = \frac{\text{perímetro}}{\text{área da seção transversal}}$ 	<p>Seção tubular de forma circular exposta ao incêndio por todos os lados:</p> $\frac{u}{A_g} = \frac{d}{t(d-t)}$ 
<p>Seção aberta exposta ao incêndio por três lados:</p> $\frac{u}{A_g} = \frac{\text{perímetro exposto ao incêndio}}{\text{área da seção transversal}}$ 	<p>Seção tubular de forma retangular (ou seção-caixão soldada de espessura uniforme) exposta ao incêndio por todos os lados:</p> $\frac{u}{A_g} = \frac{b+d}{t(b+d-2t)}$ 
<p>Mesa de seção I ou H exposta ao incêndio por três lados:</p> $\frac{u}{A_g} = \frac{b+2t_f}{bt_f}$ 	<p>Seção-caixão soldada exposta ao incêndio por todos os lados:</p> $\frac{u}{A_g} = \frac{2(b+d)}{\text{área da seção transversal}}$ 
<p>Cantoneira exposta ao incêndio por todos os lados:</p> $\frac{u}{A_g} = \frac{2}{t}$ 	<p>Seção I ou H com reforço em caixão exposta ao incêndio por todos os lados:</p> $\frac{u}{A_g} = \frac{2(b+d)}{\text{área da seção transversal}}$ 
<p>Chapa exposta ao incêndio por todos os lados:</p> $\frac{u}{A_g} = \frac{2(b+t)}{bt}$ 	<p>Chapa exposta ao incêndio por três lados:</p> $\frac{u}{A_g} = \frac{b+2t}{bt}$ 

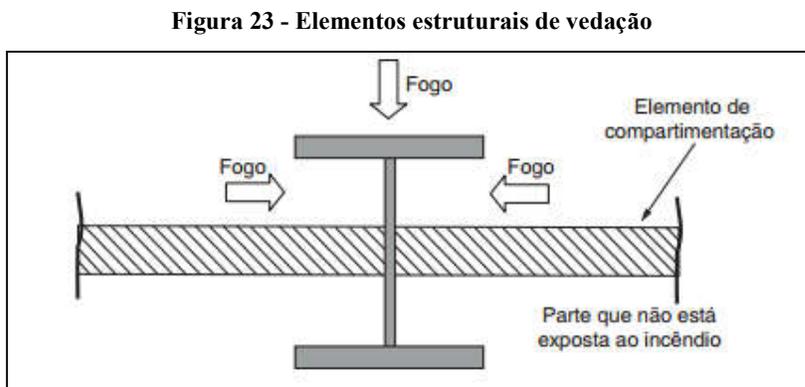
Fonte: NBR 14.323 (ABNT, 2013).

5.4.1.2 Elementos estruturais pertencentes a estruturas externas

De maneira conservadora a elevação da temperatura de estruturas externas, pode ser determinada utilizando o procedimento aplicado nas estruturas internas, mas para resultados precisos das temperaturas máximas das estruturas internas adjuntas das estruturas externas, suas dimensões, fluxo de calor advindo da radiação e convecção e temperatura da chama que atua nessa região, recomenda-se a utilização dos métodos prescritos no Eurocode 3 Parte 1-2.

5.4.1.3 Elementos estruturais pertencentes a elementos de compartimentação

Para os elementos de compartimentação conforme a Figura 23, a elevação de sua temperatura deve ser determinada de forma adequada por análise térmica (hipótese e princípios de transferência de calor), onde se permite também a utilização do método aplicado nas estruturas internas, quando os mesmos estão expostos à um incêndio-padrão. Onde utiliza-se como área da seção bruta somente o perímetro exposto ao fogo.



Fonte: NBR 14.323 (ABNT, 2013).

5.4.1.4 Ligações

A NBR 14.323 (ABNT, 2013) permite a dispensa da verificação da capacidade resistente das ligações da estrutura, caso as mesmas estejam envolvidas por materiais de proteção térmica com a maior espessura entre aquelas dos elementos que estão conectados.

5.5 CAPACIDADE RESISTENTE DAS BARRAS DE AÇO EM SITUAÇÃO DE INCÊNDIO

5.5.1 Barras submetidas à força axial de tração

Considerações:

- a) Aplicável somente às barras de aço axialmente tracionadas com distribuição uniforme de temperatura na seção transversal e ao longo do comprimento;
- b) A força normal resistente de cálculo deverá ser determinada para o estado limite último de escoamento da seção bruta. Não há a necessidade de se verificar o estado limite último de ruptura da seção líquida pois a temperatura do aço será menor na ligação devido a presença de material adicional (parafusos, chapas, cantoneiras, etc);
- c) A Equação 27 da força normal de tração resistente de cálculo demonstrada, aplica-se a todos os perfis previstos pela NBR 8.800 (ABNT, 2008).

A força normal resistente de cálculo de uma barra axialmente tracionada para o estado limite último de escoamento da seção bruta em situação de incêndio, é:

$$N_{fi,Rd} = k_{y,\theta} A_g f_y \quad (27)$$

Onde:

$k_{y,\theta}$ = Fator de redução da resistência ao escoamento do aço do perfil em temperatura elevada relativo ao valor à temperatura ambiente, conforme o item 3.1.1;

A_g = Área bruta da seção transversal da barra;

f_y = Resistência ao escoamento do aço à temperatura ambiente.

5.5.2 Barras submetidas à força axial de compressão

Considerações:

- a) Aplicável somente às barras de aço axialmente comprimidas com distribuição uniforme de temperatura na seção transversal e ao longo do comprimento;

5.5.2.1 Determinação do comprimento de flambagem para o dimensionamento em situação de incêndio:

Para os pilares não-contínuos, a NBR 14.323 (ABNT, 2013) estabelece que o cálculo do comprimento de flambagem para o dimensionamento em situação de incêndio, $L_{e,fi}$, pode ser realizado como no dimensionamento à temperatura ambiente, conforme a NBR 8.800 (ABNT, 2008). Entretanto, para pilares contínuos (pilares com lances por pavimentos), deverá-se efetuar considerações diferentes para o cálculo do comprimento de flambagem para o dimensionamento em situação de incêndio dos vários lances do pilar. Devido ao projeto analisado no capítulo 7 não possuir pilares contínuos, as considerações para os pilares contínuos fogem ao escopo deste trabalho. Contudo pode-se ter acesso a estas considerações no item 8.4.2.1.6 da NBR 14.323 (ABNT, 2013).

5.5.2.2 Barras comprimidas não sujeitas à flambagem local

As barras de perfis previstos pela NBR 8.800 (ABNT, 2008) que não apresentam flambagem local, são aquelas cujos elementos componentes da seção transversal (chapas) possuem relações entre largura e espessura (b/t) inferiores às relações $(b/t)_{fi,lim}$. Sendo os valores de $(b/t)_{fi,lim}$, obtidos multiplicando-se os valores de $(b/t)_{lim}$ apresentados na tabela F.1 do ANEXO F da NBR 8.800 (ABNT, 2008) (neste trabalho, disposto no ANEXO H), por um fator de correção igual a 0,85. Às seções destas barras, dá-se o nome de seções compactas. O fator de redução total devido à flambagem local Q , possui valor unitário, logo o mesmo não é apresentado na Equação 28 que define a força normal de compressão resistente de cálculo.

A força normal de compressão resistente de cálculo das barras sem flambagem local, resume-se à verificação do estado limite último de instabilidade da barra como um todo (instabilidade global), conforme a Equação 28:

$$N_{fi,Rd} = \chi_{fi} k_{y,\theta} A_g f_y \quad (28)$$

Onde:

χ_{fi} = Fator de redução da resistência de barras axialmente comprimidas em situação de incêndio;

$k_{y,\theta}$ = Fator de redução da resistência ao escoamento do aço do perfil em temperatura elevada relativo ao valor à temperatura ambiente, conforme o item 3.1.1.1;

A_g = Área bruta da seção transversal da barra;

f_y = Resistência ao escoamento do aço à temperatura ambiente.

Pode-se determinar o valor de χ_{fi} pela Equação 29:

$$\chi_{fi} = \frac{1}{\varphi_{0,fi} + \sqrt{\varphi_{0,fi}^2 + \lambda_{0,fi}^2}} \quad (29)$$

com

$$\varphi_{0,fi} = 0,5 (1 + \alpha \lambda_{0,fi} + \lambda_{0,fi}^2) \quad (30)$$

e

$$\alpha = 0,022 \sqrt{\frac{E}{f_y}} \quad (31)$$

O índice de esbeltez reduzido em situação de incêndio, poder ser obtido por:

$$\lambda_{0,fi} = \frac{\lambda_0}{0,85} \quad (32)$$

Onde:

$\lambda_{0,fi}$ = Índice de esbeltez reduzido em situação de incêndio;

λ_0 = Índice de esbeltez reduzido para barras comprimidas à temperatura ambiente (determinado conforme o item 5.3.3.2 da NBR 8.800 (ABNT, 2008)), com o comprimento de flambagem em situação de incêndio ($L_{e,fi}$);

$k_{y,\theta}$ = Fator de redução da resistência ao escoamento do aço do perfil em temperatura elevada relativo ao valor à temperatura ambiente, conforme o item 3.1.1.1;

$k_{E,\theta}$ = Fator de redução do módulo de elasticidade do aço do perfil em temperatura elevada relativo ao valor à temperatura ambiente, conforme o item 3.1.1.1;

f_y = Resistência ao escoamento do aço à temperatura ambiente;

E = Módulo de elasticidade do aço à temperatura ambiente.

5.5.2.3 Barras comprimidas sujeitas à flambagem local

As barras de perfis previstos pela NBR 8.800 (ABNT, 2008), sujeitas à flambagem local das chapas, são aquelas cujos elementos componentes da seção transversal (chapas) possuem relações entre largura e espessura (b/t) superiores às relações $(b/t)_{fi,lim}$. Às seções destas barras, dá-se o nome de seções esbeltas.

A força normal de compressão resistente de cálculo de seções transversais esbeltas, deve ser obtida para o estado limite último de instabilidade da barra como um todo (instabilidade global) e flambagem local (instabilidade local), conforme a Equação 13:

$$N_{fi,Rd} = \chi_{fi} k_{\sigma,\theta} A_{ef} f_y \quad (33)$$

Onde:

χ_{fi} = Fator de redução da resistência de barras axialmente comprimidas em situação de incêndio, determinado da mesma forma que para barras comprimidas não sujeitas à flambagem local, mas com o índice de esbeltez reduzido (λ_0) à temperatura ambiente;

$k_{\sigma,\theta}$ = Fator de redução da resistência ao escoamento do aço de seções sujeitas à flambagem local, em temperatura elevada, calculado conforme o item 3.1.1;

A_{ef} = Área efetiva da seção transversal, determinada multiplicando-se a área bruta da seção transversal (A_g) pelo fator de redução total devido à flambagem local (Q), dado conforme o ANEXO F da NBR 8.800 (ABNT, 2008).

f_y = Resistência ao escoamento do aço à temperatura ambiente.

5.5.3 Barras submetidas à flexão

5.5.3.1 Momento fletor resistente de cálculo em situação de incêndio

Considerações:

- a) Aplicável às barras fletidas de perfis de alma esbelta ou não-esbelta em conformidade com as prescrições dos ANEXOS G e H da NBR 8.800 (ABNT,

2008), com distribuição uniforme de temperatura na seção transversal e ao longo do comprimento;

b) Perfis com seção I ou H soldada com dois eixos de simetria ou um eixo de simetria no plano médio da alma, carregados nesse plano, com relação entre altura e espessura da alma (h/t_w) superior a $4,84\sqrt{E/f_y}$, devem ser dimensionados conforme o ANEXO H da NBR 8.800 (ABNT, 2008), multiplicando-se a resistência ao escoamento (f_y) e o módulo de elasticidade do aço (E), pelos seus respectivos coeficientes de redução em situação de incêndio, $k_{\sigma,\theta}$ e $k_{E,\theta}$.

c) Os valores dos parâmetros de esbeltez correspondentes à plastificação e ao início do escoamento em situação de incêndio, $\lambda_{p,fi}$ e $\lambda_{r,fi}$, são obtidos multiplicando-se os valores de λ_p e λ_r , obtidos pelo ANEXO G da NBR 8.800 (ABNT, 2008), por 0,85;

Para os estados limites últimos de FLM e FLA, quando aplicáveis segundo o ANEXO G da NBR 8.800 (ABNT, 2008) (vigas de alma não-esbelta), tem-se as seguintes condições:

a) $\lambda \leq \lambda_{p,fi}$, então o $M_{fi,Rd}$ é dado por:

$$M_{fi,Rd} = \kappa k_{y,\theta} M_{pl} \quad (34)$$

b) $\lambda_{p,fi} < \lambda \leq \lambda_{r,fi}$, então o $M_{fi,Rd}$ é dado por:

$$M_{fi,Rd} = \kappa k_{y,\theta} M_y \quad (35)$$

c) $\lambda > \lambda_{r,fi}$, então o $M_{fi,Rd}$ é dado por (somente para FLM):

$$M_{fi,Rd} = \kappa k_{\sigma,\theta} M_y \quad (36)$$

Com

$$M_{pl} = Z f_y \quad (37)$$

e

$$M_y = W f_y \quad (38)$$

Para o estado limite último de FLT, quando aplicável segundo o ANEXO G da NBR 8.800 (ABNT, 2008) (vigas de alma não-esbelta), tem-se:

$$M_{fi,Rd} = \kappa \chi_{fi} k_{y,\theta} M_{pl} \quad (39)$$

Onde:

λ = Parâmetro de esbeltez à temperatura ambiente;

$\lambda_{p,fi}$ = Parâmetro de esbeltez da alma correspondente à plastificação em situação de incêndio;

$\lambda_{r,fi}$ = Parâmetro de esbeltez da alma correspondente ao início do escoamento em situação de incêndio;

$k_{y,\theta}$ = Fator de redução da resistência ao escoamento do aço do perfil em temperatura elevada relativo ao valor à temperatura ambiente, conforme o item 3.1.1;

$k_{E,\theta}$ = Fator de redução do módulo de elasticidade do aço do perfil em temperatura elevada relativo ao valor à temperatura ambiente, conforme o item 3.1.1;

κ = Fator de correção, ver próximo item;

M_{pl} = Momento de plastificação da seção transversal à temperatura ambiente;

M_y = Momento fletor correspondente ao início do escoamento à temperatura ambiente, desprezando-se as tensões residuais, cujo valor é igual ao produto Wf_y , com W igual ao módulo de resistência elástico mínimo da seção transversal em relação ao eixo de flexão;

χ_{fi} = Fator de redução associado à resistência à compressão em situação de incêndio, obtido da mesma forma que para a força normal de compressão resistente de cálculo, porém considerando-se:

$$\lambda_{0,fi} = \sqrt{\frac{k_{y,\theta} M_{pl}}{k_{E,\theta} M_{cr}}} \quad (40)$$

Sendo

M_{cr} = Momento fletor de flambagem elástica à temperatura ambiente, obtido conforme a NBR 8.800 (ABNT, 2008).

De forma simplificada pode-se adotar o seguinte valor para $\lambda_{0,fi}$:

$$\lambda_{0,fi} = \sqrt{\frac{M_{pl}}{0,85 M_{cr}}} \quad (41)$$

5.5.3.1.1 Fator de correção κ

O fator de correção κ considera o efeito benéfico de uma distribuição não uniforme de temperatura na seção transversal da barra. Tem-se os seguintes valores:

- a) 1,00, para vigas com todos os quatro lados expostos ao fogo ou quando a temperatura na seção transversal não for obtida pelo processo de distribuição uniforme prescrito pelo item 8.5 da NBR 14.323 (ABNT, 2013).
- b) 1,15, para vigas revestidas de material resistente ao fogo, com três lados expostos, com uma laje de concreto ou laje com fôrma de aço incorporada no quarto lado, com a temperatura da seção transversal obtida pelo processo de distribuição uniforme prescrito pelo item 8.5 da NBR 14.323 (ABNT, 2013).
- c) 1,40, para vigas não revestidas de material resistente ao fogo, com três lados expostos, com uma laje de concreto ou laje com fôrma de aço incorporada no quarto lado, com a temperatura da seção transversal obtida pelo processo de distribuição uniforme prescrito pelo item 8.5 da NBR 14.323 (ABNT, 2013).

5.5.3.2 Força cortante resistente de cálculo em situação de incêndio

Considerações:

- a) Aplicável às seções I, H e U fletidas em relação ao eixo central de inércia perpendicular à alma, previstas pela NBR 8.800 (ABNT, 2008), com distribuição uniforme de temperatura na seção transversal e ao longo do comprimento;
- b) A força cortante resistente de cálculo em situação de incêndio, $V_{fi,Rd}$, deve ser determinada tomando-se o coeficiente de ponderação da resistência $\gamma_{a1} = 1,0$. Multiplicando-se os valores de λ_p e λ_r , calculados conforme o item 5.4.3.1 da NBR 8.800 (ABNT, 2008), por 0,85, para a obtenção dos valores de $\lambda_{p,fi}$ e $\lambda_{r,fi}$. Para a

aplicação das expressões da NBR 8.800 (ABNT, 2008), são substituídos os valores de λ_p e λ_r por $\lambda_{p,fi}$ e $\lambda_{r,fi}$, respectivamente;

- c) Dever-se-á multiplicar o valor do módulo de elasticidade do aço, E, pelo fator de redução, $k_{E,\theta}$;
- d) Dever-se-á multiplicar, nas seções em que λ não supere a $\lambda_{r,fi}$, a resistência ao escoamento, f_y , pelo fator de redução $k_{y,\theta}$. E, nas seções em que λ supere a $\lambda_{r,fi}$, multiplicar pelo fator de redução $k_{\sigma,\theta}$.

Para o cálculo da força cortante resistente de cálculo em situação de incêndio, tem-se as seguintes condições:

- a) $\lambda \leq \lambda_{p,fi}$, então o $V_{fi,Rd}$ é dado por:

$$V_{fi,Rd} = k_{y,\theta} V_{pl} \quad (42)$$

- b) $\lambda_{p,fi} < \lambda \leq \lambda_{r,fi}$, então o $V_{fi,Rd}$ é dado por:

$$V_{fi,Rd} = k_{y,\theta} \frac{\lambda_{p,fi}}{\lambda} V_{pl} \quad (43)$$

- c) $\lambda > \lambda_{r,fi}$, então o $V_{fi,Rd}$ é dado por:

$$V_{fi,Rd} = k_{\sigma,\theta} (1,24) \left(\frac{\lambda_{p,fi}}{\lambda} \right)^2 V_{pl} \quad (44)$$

Sendo V_{pl} , dado abaixo:

$$V_{pl} = 0,60 A_w f_y \quad (45)$$

e

$$A_w = d t_w \quad (46)$$

Onde:

λ = Parâmetro de esbeltez da alma à temperatura ambiente, determinado conforme o item 5.4.3.1 da NBR 8.800 (ABNT, 2008);

λ_p = Parâmetro de esbeltez da alma correspondente à plastificação, determinado conforme o item 5.4.3.1 da NBR 8.800 (ABNT, 2008);

λ_r = Parâmetro de esbeltez da alma correspondente ao início do escoamento, determinado conforme o item 5.4.3.1 da NBR 8.800 (ABNT, 2008);

$\lambda_{p,fi}$ = Parâmetro de esbeltez da alma correspondente à plastificação em situação de incêndio;

$\lambda_{r,fi}$ = Parâmetro de esbeltez da alma correspondente ao início do escoamento em situação de incêndio;

V_{pl} = Força cortante correspondente à plastificação da alma por cisalhamento, determinado conforme o item 5.4.3.1.2 da NBR 8.800 (ABNT, 2008);

$k_{y,\theta}$ = Fator de redução da resistência ao escoamento do aço do perfil em temperatura elevada relativo ao valor à temperatura ambiente, conforme o item 3.1.1;

$k_{\sigma,\theta}$ = Fator de redução da resistência ao escoamento do aço de seções sujeitas à flambagem local, em temperatura elevada, calculado conforme o item 3.1.1;

A_w = Área efetiva de cisalhamento;

d = Altura total da seção transversal;

t_w = Espessura da alma;

5.5.4 Barras submetidas à combinação de esforços solicitantes

Considerações:

- a) Aplicável às barras de perfis previstos pela NBR 8.800 (ABNT, 2008) em situação de incêndio, cuja seção transversal possua um ou dois eixos de simetria, sujeitas aos efeitos conjuntos de força axial de tração ou compressão e momento fletor em torno de um dos dois eixos centrais de inércia da seção transversal. Com distribuição uniforme de temperatura na seção transversal e ao longo do comprimento;

5.5.4.1 Expressões de interação

$$\text{a) } \frac{N_{fi,Sd}}{N_{fi,Rd}} \geq 0,2$$

$$\frac{N_{fi,Sd}}{N_{fi,Rd}} + \frac{8}{9} \left(\frac{M_{x,fi,Sd}}{M_{x,fi,Rd}} + \frac{M_{y,fi,Sd}}{M_{y,fi,Rd}} \right) \leq 1,0 \quad (47)$$

$$\text{b) } \frac{N_{fi,Sd}}{N_{fi,Rd}} < 0,2$$

$$\frac{N_{fi,Sd}}{2N_{fi,Rd}} + \frac{M_{x,fi,Sd}}{M_{x,fi,Rd}} + \frac{M_{y,fi,Sd}}{M_{y,fi,Rd}} \leq 1,0 \quad (48)$$

Onde:

$N_{fi,Sd}$ = Força axial solicitante de cálculo em situação de incêndio, de tração ou compressão, constante na barra;

$N_{fi,Rd}$ = Força axial resistente de cálculo em situação de incêndio, de tração ou compressão, constante na barra;

$M_{x,fi,Sd}$ = Momento fletor solicitante de cálculo em situação de incêndio, em relação ao eixo x da seção;

$M_{y,fi,Sd}$ = Momento fletor solicitante de cálculo em situação de incêndio, em relação ao eixo y da seção;

$M_{x,fi,Rd}$ = Momento fletor resistente de cálculo em situação de incêndio, em relação ao eixo x da seção;

$M_{y,fi,Rd}$ = Momento fletor resistente de cálculo em situação de incêndio, em relação ao eixo y da seção.

6 DIMENSIONAMENTO DO MEZANINO À TEMPERATURA AMBIENTE, CONFORME A NBR 8.800 (ABNT, 2008).

A NBR 14.323 (ABNT, 2013), estabelece que o dimensionamento das estruturas de aço em situação de incêndio deve ser precedido do dimensionamento da mesma à temperatura ambiente, atendendo aos estados limites últimos e de serviço necessários, conforme descrito no item 5.1 deste trabalho. Para o mezanino analisado, constituído de perfis laminados de aço, temos que a verificação à temperatura ambiente será realizada por meio da norma NBR 8.800 (ABNT, 2008).

O projeto deste mezanino (Figura 24) é fictício e possui a finalidade única de demonstrar a aplicação dos procedimentos envolvidos no dimensionamento pelo método simplificado de dimensionamento da NBR 14.323 (ABNT, 2013) das barras de aços (vigas e pilares) sem revestimento de proteção contra o fogo em situação de incêndio.

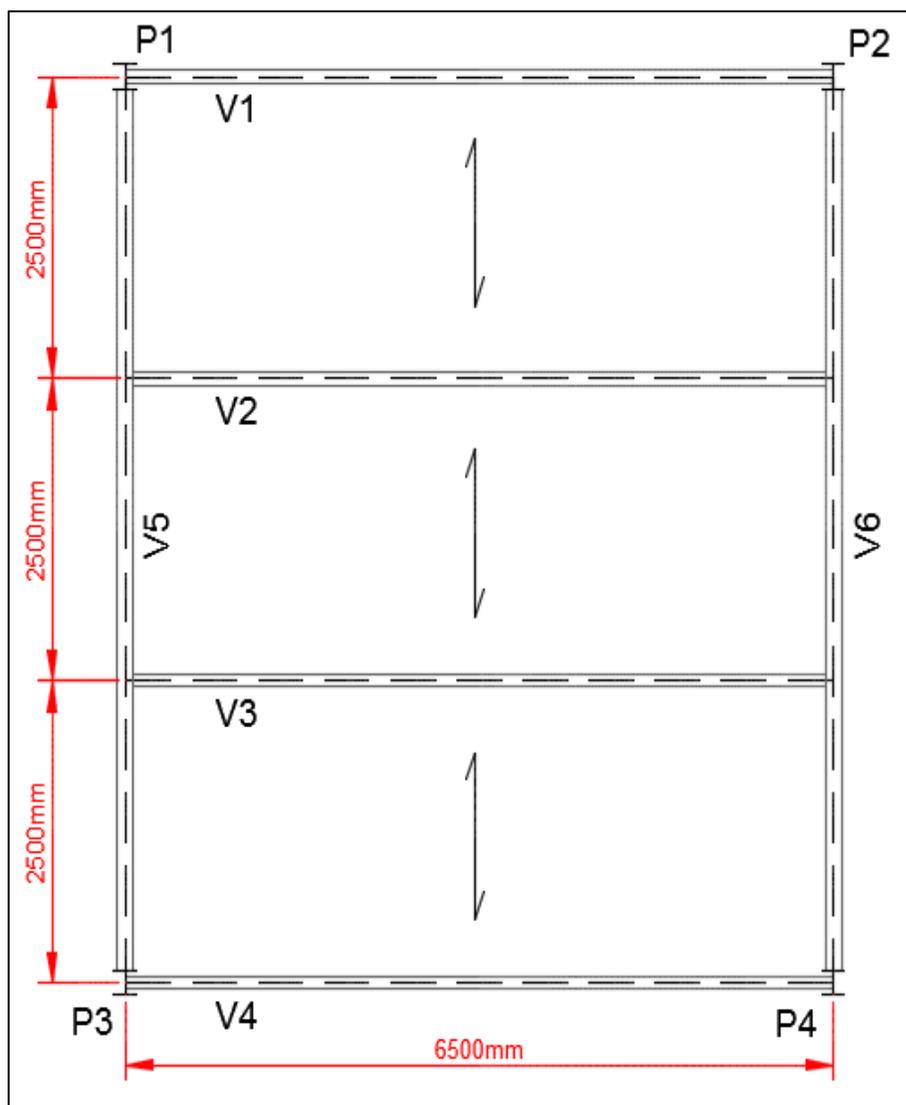
6.1 CARACTERÍSTICAS DO MEZANINO

- a) Local de implantação: Área Interna de Vendas Shopping Center
- b) Utilização: Casa de Máquinas
- c) Comprimento em Planta: 7,5 m
- d) Largura em Planta: 6,5 m
- e) Altura dos Pilares: 3,0 m
- f) Piso: Lajes Pré-Moldadas

6.2 CONSIDERAÇÕES DE PROJETO

- a) Peso de revestimento = 1,5 KN/m²;
- b) Estimativa de Peso Próprio = 0,45 KN/m²;
- c) Peso da Laje Pré-Moldada = 2,0KN/m²;
- d) Carga Acidental = 7,5 kN/m² (conforme a NBR 6.120 (ABNT, 1980);
- e) Aço Estrutural ASTM A36 para perfis ($f_y=25\text{kN/cm}^2$, $f_u=35\text{kN/cm}^2$);
- f) Perfis Laminados da Gerdau Açominas (ANEXO I).

Figura 24 - Planta baixa do Mezanino



Fonte: Próprios Autores (2017).

6.3 DIMENSIONAMENTO DAS VIGAS

6.3.1 Coeficiente de ponderação das ações

Os coeficientes de ponderação considerados para o cálculo dos carregamentos das vigas, foram obtidos na NBR 8.800 (ABNT, 2008), ver o ANEXO A.

- $\gamma_{g1} = 1,25$ (relacionado com o peso próprio da estrutura);

- $\gamma_{g2} = 1,35$ (relacionado a estruturas moldadas no local e elementos industrializados);
- $\gamma_q = 1,5$ (relacionado a ações variáveis, incluindo as decorrentes do uso e ocupação)

6.3.2 Verificação ao Estado Limite Último (ELU)

A carga distribuída é calculada conforme a combinação última normal das ações especificada no item 4.7.7.2.1 da norma NBR 8.800 (ABNT, 2008), mostrada na Equação 49 abaixo:

$$Q_{sd} = \sum_{i=1}^m (\gamma_{gi} F_{Gi,k}) + \gamma_{q1} F_{Q1,k} + \sum_{j=2}^n (\gamma_{qj} \Psi_{0j} F_{Qj,k}) \quad \text{Área de Influência} \quad (49)$$

Onde:

Q_{sd} = Carga distribuída solicitante (kN/m);

$F_{Gi,k}$ = Valor característico das ações permanentes

$F_{Q1,k}$ = Valor característico das ações variáveis principais para a combinação;

$F_{Qj,k}$ = Valor característico das ações variáveis que podem atuar simultaneamente com as ações variáveis principais.

6.3.3 Esforços solicitantes das vigas

6.3.3.1 Momento Fletor

Considerando as vigas sendo bi-apoiadas, determina-se o Momento Fletor solicitante de dimensionamento com a seguinte Equação 50:

$$M_{sd} = \frac{Q_{sd} l^2}{8} \quad (50)$$

Onde:

Q_{sd} = Carga distribuída solicitante (KN/m);

l = comprimento da barra (m).

6.3.3.2 Esforço Cortante

Considerando as vigas sendo bi-apoiadas, determina-se o esforço cortante solicitante de dimensionamento com a seguinte Equação 51:

$$V_{sd} = \frac{Q_{sd} l}{2} \quad (51)$$

Onde:

Q_{sd} = Carga distribuída solicitante (kN/m);

l = comprimento da barra (m).

6.3.4 Pré-dimensionamento da seção transversal das vigas

Considerando-se seção compacta ($\lambda \leq \lambda_p$), o momento resistente de cálculo é definido pela Equação 52;

$$M_{rd} = \frac{Z_x f_y}{\gamma_m} \quad (52)$$

Onde:

Z_x = Módulo de resistência plástico(ANEXO I);

f_y = Resistência de escoamento do aço (ANEXO I);

γ_m = Coeficiente de ponderação das resistências (ver ANEXO E);

λ = Parâmetro de esbeltez da alma à temperatura ambiente, determinado a NBR 8.800 (ABNT, 2008);

λ_p = Parâmetro de esbeltez da alma correspondente à plastificação, determinado conforme a NBR 8.800 (ABNT, 2008);

Isolando-se o módulo de resistência plástico, encontra-se o valor mínimo, conseqüentemente, possibilitando a escolha de um perfil de acordo com o valor dado na Tabela Gerdau Açominas no ANEXO I.

6.3.5 Esforços resistentes das vigas

6.3.5.1 Determinação da força cortante resistente de cálculo

Segue-se a seguinte condição conforme o item 5.4.3 da NBR 8.800 (ABNT, 2008),

$$V_{sd} \leq V_{rd}$$

V_{sd} = Força cortante solicitante de cálculo;

V_{rd} = Força cortante resistente de cálculo.

para o cálculo de V_{rd} , considerando-se seção compacta ($\lambda \leq \lambda_p$), temos:

$$V_{rd} = \frac{V_{pl}}{\gamma_{a1}} \quad (53)$$

$$\lambda = \frac{h}{tw} \quad (54)$$

$$\lambda_p = 1,10 \sqrt{\frac{k_v E}{f_y}} \quad (55)$$

Sendo,

$$k_v \begin{cases} 5,0 \text{ para almas sem enrijecedores transversais, para } \frac{a}{h} > 3 \text{ ou para } \frac{a}{h} < \left[\frac{260}{(h/t_w)} \right]^2 \\ 5 + \frac{260}{(a/h)^2}, \text{ para todos outros casos} \end{cases}$$

A força cortante de plastificação é obtida conforme a Equação 56:

$$V_{pl} = 0,60 A_w f_y \quad (56)$$

Na Equação 56, A_w é a área efetiva de cisalhamento, definida como:

$$A_w = d t_w \quad (57)$$

Onde:

V_{pl} = Força de plastificação da alma por cisalhamento;

a = Distância entre linhas de centro dos enrijecedores transversais adjacentes;

= Altura da alma;

t_w = Espessura da alma;

d = Altura total da seção transversal.

6.3.5.2 Determinação do momento Fletor Resistente de Cálculo

O momento fletor resistente de cálculo (M_{rd}), obedece às prescrições do ANEXO G da NBR 8.800 (ABNT, 2008), e deverá ser o menor valor encontrado entre os momentos M_{FLT} , M_{FLM} e M_{FLA} . Neste caso, dispensa-se a verificação de M_{FLT} , pois as vigas são contidas pelas lajes ao longo de todo o seu comprimento.

6.3.5.2.1 Verificação da flambagem local – FLA e FLM

Para a verificação de flambagem local da Alma (FLA) e para flambagem local da Mesa (FLM), os parâmetros são obtidos conforme o ANEXO B.

Para FLA, temos:

$$\lambda = \frac{h}{t_w} \quad (58)$$

= Altura da Alma;

t_w = Espessura da Alma.

$$\lambda_p = 3,76 \sqrt{\frac{E}{f_y}} \quad (59)$$

E = Módulo de elasticidade do aço;

f_y = Tensão de escoamento do aço.

E para FLM, temos:

$$\lambda = \frac{b}{2t_f} \quad (60)$$

b = Altura da mesa;

t_f = Espessura da mesa.

$$\lambda_p = 0,38 \sqrt{\frac{E}{f_y}} \quad (61)$$

E = Módulo de Elasticidade do aço;

f_y = Tensão de escoamento do aço.

Para o cálculo de M_{rd} , satisfazendo-se a condição $\lambda \leq \lambda_p$ (seção compacta), temos:

$$M_{FLM} = M_{FLA}$$

Logo,

- Para $\lambda \leq \lambda_p$:

$$M_{rd} = \frac{M_{pl}}{\gamma_{a1}} \quad (62)$$

Sendo M_{pl} calculado conforme a Equação 34.

6.3.6 Verificação ao Estado Limite de Serviço (ELS)

A carga distribuída é calculada conforme a combinação quase permanente de serviço, determinada no item 4.7.7.3.2 da NBR 8.800 (ABNT, 2008), e apresentada na Equação 56 abaixo.

$$P_{servi\c{c}o} = \sum_{i=1}^m F_{G_{i,k}} + \sum_{j=1}^n (\Psi_{2j} F_{Q_{j,k}}) \quad \text{Área de Influência} \quad (63)$$

Onde:

$P_{servi\c{c}o}$ = Carga distribuída solicitante de serviço (kN/m);

$F_{G_{i,k}}$ = Valor característico das ações permanentes

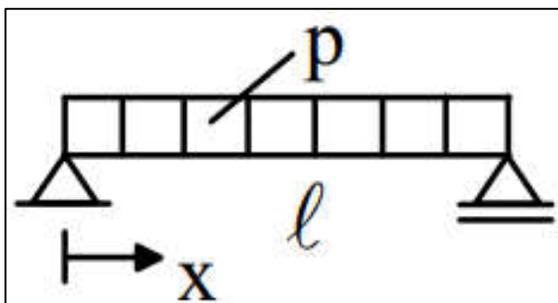
$F_{Q_{1,k}}$ = Valor característico das ações variáveis principais para a combinação;

Ψ_{2j} = Coeficiente de redução, ver ANEXO C.

O deslocamento da viga é calculado devido ao arranjo de cargas solicitantes e suas vinculações, considerando uma carga distribuída ou pontual e a viga sendo bi-apoiada. Neste projeto tem-se os seguintes casos:

- a) Viga bi-apoiada com carregamento distribuído:

Figura 25 – Viga biapoiada com carregamento distribuído

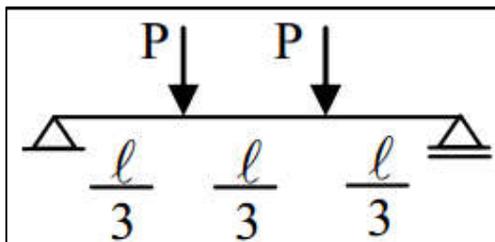


Fonte: Próprios Autores (2017).

$$\delta_{atuante} = \frac{5 P l^4}{384 E I} \quad (64)$$

b) Viga bi-apoiada com duas cargas concentradas:

Figura 26 – Viga bi-apoiada com carregamento concentrado



Fonte: Próprios Autores (2017).

$$\delta_{atuante} = \frac{23 P l^3}{648 E I} \quad (65)$$

Onde:

$\delta_{atuante}$ = Deslocamento máximo atuante (cm);

$P = P_{serviço}$ = Carga de serviço distribuída ou concentrada (kN/m ou kN);

l = Vão da viga (cm);

x = Ponto de máximo deslocamento (meio do vão, para os dois casos);

E = Módulo de elasticidade do aço (20.000 kN/cm²);

$I = I_x$ = Momento de inércia da viga em relação ao eixo de flexão (cm⁴).

Os deslocamentos limites são obtidos no ANEXO D, o qual corresponde à tabela C.1 da NBR 8.800 (ABNT, 2008).

6.4 DIMENSIONAMENTO DAS VIGAS V2 E V3

6.4.1 Verificação ao ELU

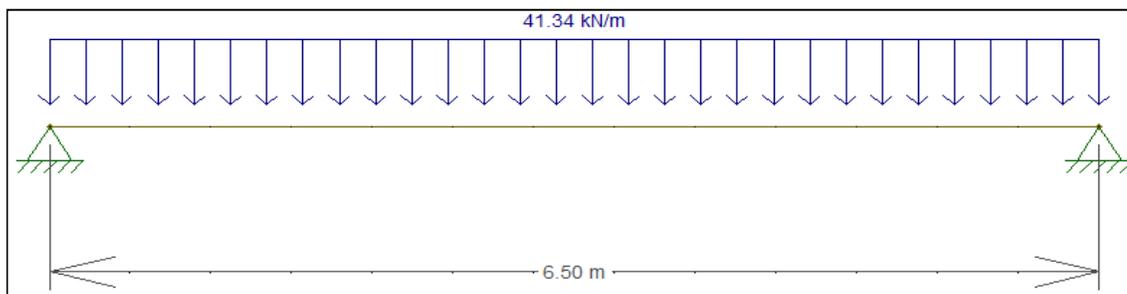
6.4.1.1 Carregamento

Para a combinação última normal das ações, dada pela Equação 49, tem-se:

$$Q_{sd} = [1,25 \times 0,45 + 1,35 \times (2,00 + 1,50) + 1,50 \times 7,50] \times 2,50$$

$$Q_{sd} = 41,34 \text{ kN/m}$$

Figura 27 – Carregamento para o ELU das vigas V2 e V3



Fonte: Próprios Autores (2017).

6.4.1.2 Esforços solicitantes

6.4.1.2.1 Momento fletor

Por meio da Equação 50, tem-se:

$$M_{sd} = \frac{41,34 \times (6,5)^2}{8}$$

$$M_{sd} = 218,33 \text{ kNm}$$

6.4.1.2.2 Esforço cortante

Por meio da Equação 51, tem-se:

$$V_{sd} = \frac{41,34 \times 6,5}{2}$$

$$V_{sd} = 134,35 \text{ kN}$$

6.4.1.3 Pré-dimensionamento da seção transversal

Supondo seção compacta ($\lambda \leq \lambda_p$), através da Equação 52, tem-se:

$$M_{rd} = \frac{Z_x f_y}{\gamma_m}$$

$$\gamma_m = 1,10$$

$$f_y = 25 \text{ kN/cm}^2$$

$$M_{rd} = M_{sd} = 218,33 \text{ Kn.m} = 21833 \text{ Kn.cm}$$

$$Z_{xmin} = \frac{M_{sd} \gamma_m}{f_y} = \frac{21833 \times 1,10}{25} = 960,65 \text{ cm}^3$$

6.4.1.4 Escolha do perfil

De acordo com a tabela de perfis laminados da Gerdau Açominas, disposta no ANEXO I, escolhe-se o perfil W360 x 57,8, por atender à resistência plástica mínima calculada anteriormente $Z_{xmin} = 960,65 \text{ cm}^3$.

Tabela 12 - Dados do Perfil W360 x 75

d	bf	tw	tf	A	I _x	W _x	Z _x	h	A _w
(cm)	(cm)	(cm)	(cm)	(cm ²)	(cm ⁴)	(cm ³)	(cm ³)	(cm)	(cm ²)
35,8	17,2	0,79	1,31	72,5	16143	901,8	1014,8	33,2	26,23

Fonte: Tabela Aço Minas Gerdau (2017) - Adaptado.

6.4.1.5 Esforços resistentes

6.4.1.5.1 Força cortante resistente de cálculo

Para $\lambda \leq \lambda_p$ (seção compacta), aplicando-se as equações 54 e 55, obtém-se:

$$\lambda = \frac{h}{tw} = \frac{33,2}{0,79} = 42,02 \leq \lambda_p = 1,10 \sqrt{\frac{k_v E}{f_y}} = 1,10 \sqrt{\frac{5 \times 20000}{25}} = 69,57 \rightarrow OK!$$

o esforço cortante resistente de cálculo dado pela Equação 53, é:

$$V_{rd} = \frac{0,60 A_w f_y}{\gamma_{a1}} = \frac{0,6 \times 26,23 \times 25}{1,10} = 357,68 \text{ kN}$$

$$V_{rd} = 357,68 \text{ kN} > V_{sd} = 134,35 \text{ kN}$$

ATENDE!

6.4.1.5.2 Momento fletor resistente de cálculo

- Para as mesas – FLM:

Para $\lambda \leq \lambda_p$ (seção compacta), aplicando-se as equações 60 e 61, obtém-se:

$$\lambda = \frac{b}{2t_f} = \frac{17,2}{2 \times 1,31} = 6,56 < \lambda_p = 0,38 \sqrt{\frac{E}{f_y}} = 0,38 \sqrt{\frac{20000}{25}} = 10,75 \rightarrow OK!$$

- Para a alma – FLA:

Para $\lambda \leq \lambda_p$ (seção compacta), aplicando-se as equações 58 e 59, obtém-se:

$$\lambda = \frac{h}{tw} = \frac{33,2}{0,79} = 42,02 < \lambda_p = 3,76 \sqrt{\frac{E}{f_y}} = 3,76 \sqrt{\frac{20000}{25}} = 106,35 \rightarrow OK!$$

Logo, o momento fletor resistente de cálculo, dado pela Equação 62, é:

$$M_{rd} = \frac{Z_x f_y}{\gamma_{a1}} = \frac{1014,8 \times 25}{1,10} = 23063,63 \text{ kNcm} = 230,64 \text{ kNm}$$

$$M_{rd} = 230,64 \text{ kNm} > M_{sd} = 218,33 \text{ kNm}$$

ATENDE!

6.4.2 Verificação ao ELS

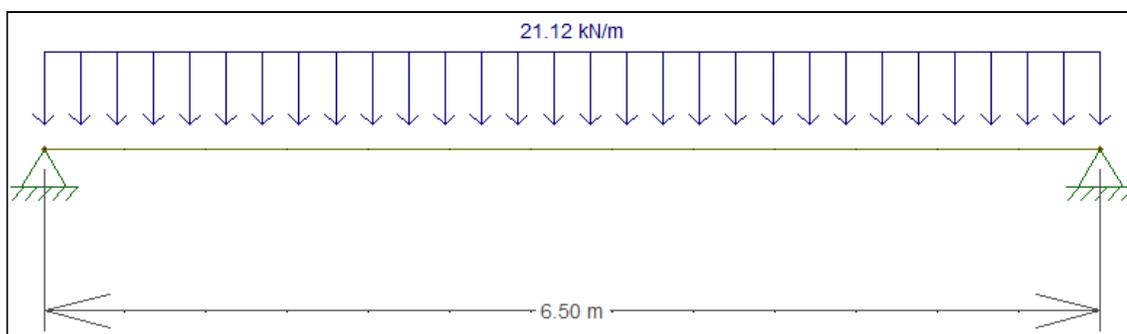
6.4.2.1 Carregamento

Considerando-se $\Psi_2 = 0,60$ (ver ANEXO C), para a combinação quase permanente de serviço das ações, dada pela Equação 63, tem-se:

$$P_{\text{serviço}} = [(0,45 + 2,00 + 1,50) + 0,60 \times 7,50] \times 2,50$$

$$P_{\text{serviço}} = 21,12 \text{ kN/m}$$

Figura 28 - Carregamento para o ELS das vigas V2 e V3



Fonte: Próprios Autores (2017).

6.4.2.2 Deslocamentos

O deslocamento máximo atuante no meio do vão, dado pela Equação 64, para uma viga bi-apoiada com carregamento distribuído, é:

$$\delta_{\text{atuante}} = \frac{5 P l^4}{384 E I} = \frac{5 \times \left(\frac{21,12}{100}\right) \times (650)^4}{384 \times 20000 \times 16143} = 1,52 \text{ cm}$$

O deslocamento limite para vigas de piso imposto pela NBR 8.800 (ABNT, 2008), obtido no ANEXO D, é de $L/350$.

$$\delta_{\text{limite}} = \frac{L}{350} = \frac{650}{350} = 1,86 \text{ cm}$$

$$\delta_{\text{atuante}} = 1,52 \text{ cm} < \delta_{\text{limite}} = 1,86 \text{ cm}$$

ATENDE!

6.5 DIMENSIONAMENTO DAS VIGAS V1 E V4

6.5.1 Verificação ao ELU

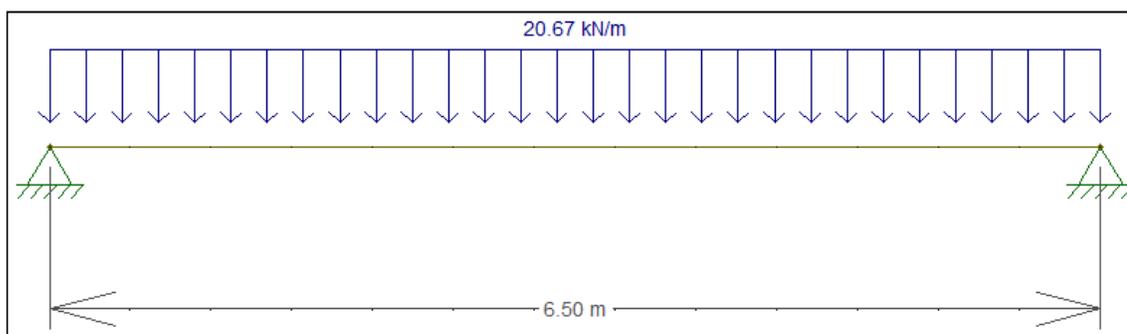
6.5.1.1 Carregamento

Para a combinação última normal das ações, dada pela Equação 49, tem-se:

$$Q_{sd} = [1,25 \times 0,45 + 1,35 \times (2,00 + 1,50) + 1,50 \times 7,50] \times 1,25$$

$$Q_{sd} = 20,67 \text{ kN/m}$$

Figura 29 - Carregamento para o ELU das vigas V1 e V4



Fonte: Próprios Autores (2017).

6.5.1.2 Esforços solicitantes

6.5.1.2.1 Momento fletor

Por meio da Equação 50, tem-se:

$$M_{sd} = \frac{20,67 \times (6,5)^2}{8}$$

$$M_{sd} = 109,16 \text{ kN.m}$$

6.5.1.2.2 Esforço cortante

Por meio da Equação 51, tem-se:

$$V_{sd} = \frac{20,67 \times 6,5}{2}$$

$$V_{sd} = 67,18 \text{ kN}$$

6.5.1.3 Pré-dimensionamento da seção transversal

Supondo seção compacta ($\lambda \leq \lambda_p$), através da Equação 52, tem-se:

$$M_{rd} = \frac{Z_x f_y}{\gamma_m}$$

$$\gamma_m = 1,10$$

$$f_y = 25 \text{ kN/cm}^2$$

$$M_{rd} = M_{sd} = 109,16 \text{ Kn.m} = 10916 \text{ Kn.cm}$$

$$Z_{xmin} = \frac{M_{sd} \gamma_m}{f_y} = \frac{10916 \times 1,10}{25} = 480,31 \text{ cm}^3$$

6.5.1.4 Escolha do perfil

A resistência plástica mínima calculada anteriormente ($Z_{xmin} = 480,31 \text{ cm}^3$), requer um perfil inferior ao escolhido para as vigas V2 e V3 já dimensionadas. Com a finalidade de uma maior compatibilização dos perfis do projeto, adotar-se-á o perfil W360 x 57,8 utilizado nas vigas V2 e V3.

6.5.1.5 Esforços resistentes

6.5.1.5.1 Força cortante resistente de cálculo

O esforço cortante resistente de cálculo já foi calculado anteriormente no dimensionamento das vigas V2 e V3. Logo, temos:

$$V_{rd} = 357,68 \text{ kN} > V_{sd} = 67,18 \text{ kN}$$

ATENDE!

6.5.1.5.2 *Momento fletor resistente de cálculo*

A seção é compacta, conforme já verificado anteriormente no dimensionamento das vigas V2 e V3 para a FLM e FLA. Logo, temos que o momento fletor resistente de cálculo dado pela Equação 62, é:

$$M_{rd} = 230,64 \text{ kNm} > M_{sd} = 109,16 \text{ kNm}$$

ATENDE!

6.5.2 **Verificação ao ELS**

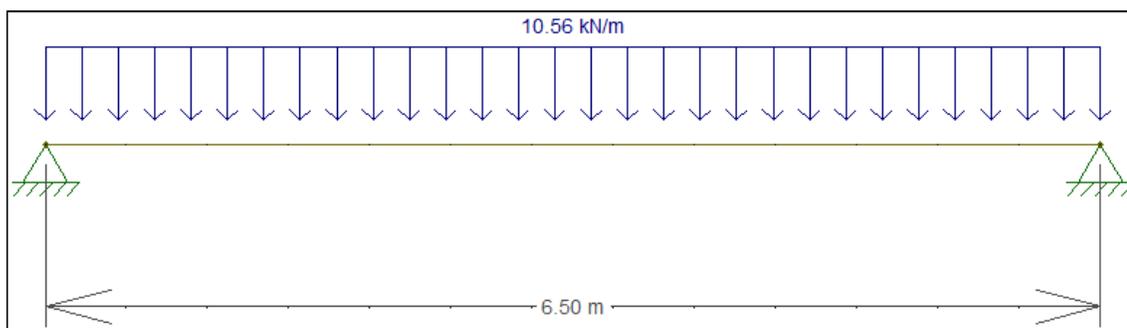
6.5.2.1 Carregamento

Considerando-se $\Psi_2 = 0,60$ (ver ANEXO C), para a combinação quase permanente de serviço das ações, dada pela Equação 63, tem-se:

$$P_{\text{serviço}} = [(0,45 + 2,00 + 1,50) + 0,60 \times 7,50] \times 1,25$$

$$P_{\text{serviço}} = 10,56 \text{ kN/m}$$

Figura 30 - Carregamento para o ELS das vigas V1 e V4



Fonte: Próprios Autores (2017).

6.5.2.2 Deslocamentos

O deslocamento máximo atuante no meio do vão, dado pela Equação 64, para uma viga bi-apoiada com carregamento distribuído, é:

$$\delta_{atuante} = \frac{5 P l^4}{384 E I} = \frac{5 \times \left(\frac{10,56}{100}\right) \times (650)^4}{384 \times 20000 \times 16143} = 0,76 \text{ cm}$$

O deslocamento limite para vigas de piso imposto pela NBR 8.800 (ABNT, 2008), obtido no ANEXO D, é de $L/350$, conforme adotado para as vigas V2 e V3.

$$\delta_{limite} = \frac{L}{350} = \frac{650}{350} = 1,86 \text{ cm}$$

$$\delta_{atuante} = 0,76 \text{ cm} < \delta_{limite} = 1,86 \text{ cm}$$

ATENDE!

6.6 DIMENSIONAMENTO DAS VIGAS V5 E V6

6.6.1 Verificação ao ELU

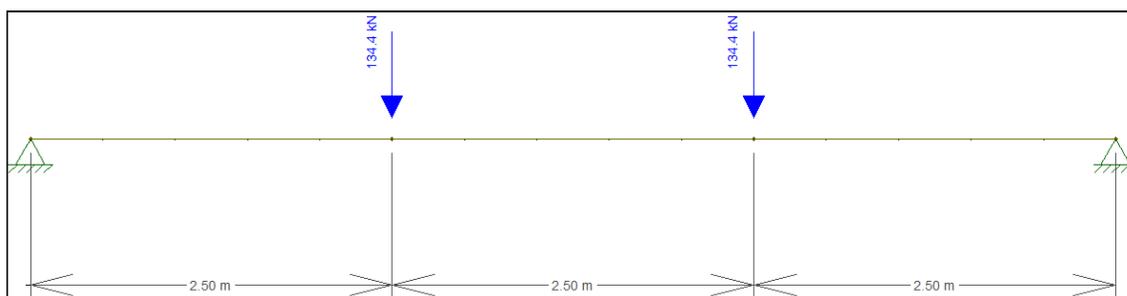
6.6.1.1 Carregamento

O carregamento das vigas V5 e V6 para a combinação última normal das ações, é obtido pelas reações de apoio das vigas V2 e V3 para a mesma combinação. Assim, segundo a Equação 49, tem-se:

$$Q_{sd} = (41,34 \times 6,50) / 2$$

$$Q_{sd} = 134,4 \text{ kN}$$

Figura 31 - Carregamento para o ELU das vigas V5 e V6

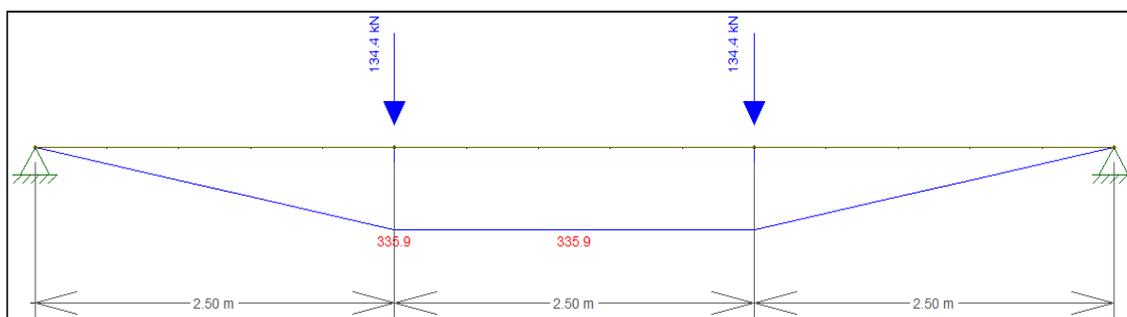


Fonte: Próprios Autores (2017).

6.6.1.2 Esforços solicitantes

6.6.1.2.1 Momento fletor

Figura 32 - Diagrama de momento fletor solicitante das vigas V5 e V6 para o ELU



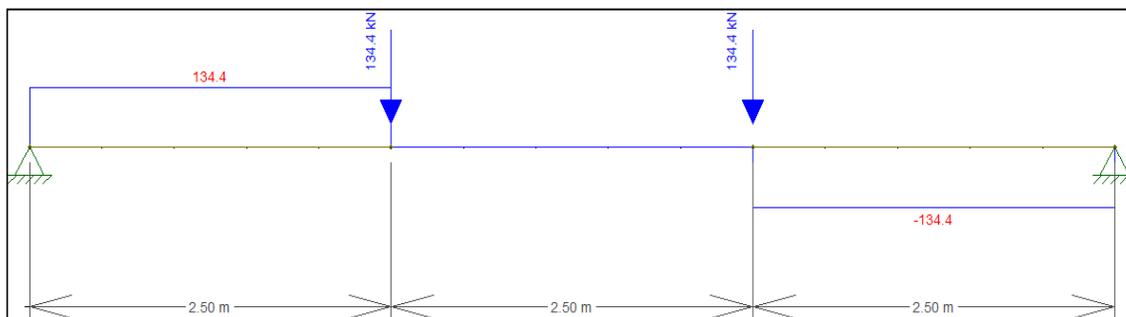
Fonte: Próprios Autores (2017).

Conforme o resultado obtido pelo software ftool, apresentado na Figura 32, tem-se:

$$M_{sd} = 336 \text{ kNm}$$

6.6.1.2.2 Esforço cortante

Figura 33 - Diagrama de esforço cortante solicitante das vigas V5 e V6 para o ELU



Fonte: Próprios Autores (2017).

Conforme o resultado obtido pelo software ftool, apresentado na Figura 33, tem-se:

$$V_{sd} = 134,4 \text{ kN}$$

Pré-dimensionamento da seção transversal

Supondo seção compacta ($\lambda \leq \lambda_p$), através da Equação 52, tem-se:

$$M_{rd} = \frac{Z_x f_y}{\gamma_m}$$

$$\gamma_m = 1,10$$

$$f_y = 25 \text{ kN/cm}^2$$

$$M_{rd} = M_{sd} = 336 \text{ kNm} = 33600 \text{ kNcm}$$

$$Z_{xmin} = \frac{M_{sd} \gamma_m}{f_y} = \frac{33600 \times 1,10}{25} = 1478,4 \text{ cm}^3$$

6.6.1.3 Escolha do perfil

De acordo com a tabela de perfis laminados da Gerdau Açominas, disposta no ANEXO I, escolhe-se o perfil W 410 x 75, por atender à resistência plástica mínima calculada anteriormente $Z_{xmin} = 1478,4 \text{ cm}^3$.

Tabela 13 – Dados do Perfil W410 x 75

d	bf	tw	tf	A	Ix	Wx	Zx	h	Aw
(cm)	(cm)	(cm)	(cm)	(cm ²)	(cm ⁴)	(cm ³)	(cm ³)	(cm)	(cm ²)
41,3	18,0	0,97	1,6	95,8	27616	1337,3	1518,6	38,1	36,96

Fonte: Tabela Aço Minas Gerdau (2017) - Adaptado.

6.6.1.4 Esforços resistentes

6.6.1.4.1 Força cortante resistente de cálculo

Para $\lambda \leq \lambda_p$ (seção compacta), aplicando-se as equações 54 e 55, obtém-se:

$$\lambda = \frac{h}{tw} = \frac{38,1}{0,97} = 39,28 \leq \lambda_p = 1,10 \sqrt{\frac{k_v E}{f_y}} = 1,10 \sqrt{\frac{5 \times 20000}{25}} = 69,57 \rightarrow OK!$$

o esforço cortante resistente de cálculo, dado pela Equação 53, é:

$$V_{rd} = \frac{0,60 A_w f_y}{\gamma_{a1}} = \frac{0,6 \times 36,96 \times 25}{1,10} = 504,0 \text{ kN}$$

$$V_{rd} = 504,0 \text{ kN} > V_{sd} = 134,4 \text{ kN}$$

ATENDE!

6.6.1.4.2 Momento fletor resistente de cálculo

- Para as mesas – FLM:

Para $\lambda \leq \lambda_p$ (seção compacta), aplicando-se as equações 60 e 61, obtém-se:

$$\lambda = \frac{b_f}{2t_f} = \frac{18}{2 \times 1,6} = 5,62 < \lambda_p = 0,38 \sqrt{\frac{E}{f_y}} = 0,38 \sqrt{\frac{20000}{25}} = 10,75 \rightarrow OK!$$

- Para a alma – FLA:

Para $\lambda \leq \lambda_p$ (seção compacta), aplicando-se as equações 58 e 59, obtem-se:

$$\lambda = \frac{h}{tw} = \frac{38,1}{0,97} = 39,28 < \lambda_p = 3,76 \sqrt{\frac{E}{f_y}} = 3,76 \sqrt{\frac{20000}{25}} = 106,35 \rightarrow OK!$$

Logo, o momento fletor resistente de cálculo, dado pela Equação 62, é:

$$M_{rd} = \frac{Z_x f_y}{\gamma_{a1}} = \frac{1518,6 \times 25}{1,10} = 34513,64 \text{ kNcm} = 345,14 \text{ kNm}$$

$$M_{rd} = 345,14 \text{ kNm} > M_{sd} = 336 \text{ kNm}$$

ATENDE!

6.6.2 Verificação ao ELS

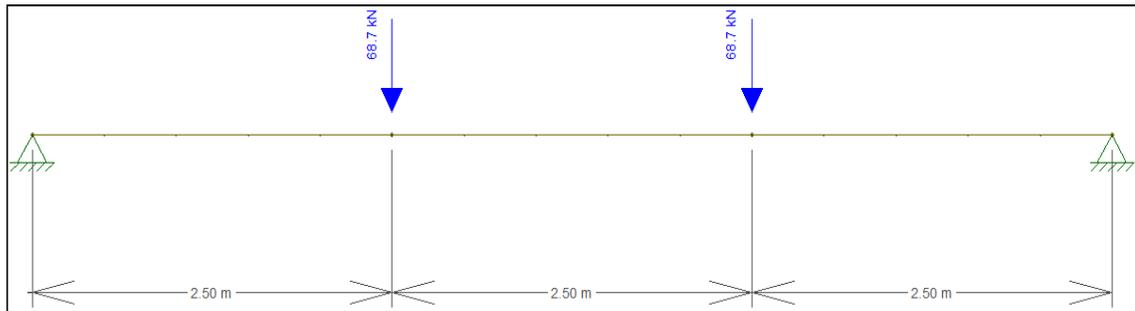
6.6.2.1 Carregamento

O carregamento das vigas V5 e V6 para a combinação quase permanente de serviço das ações, dada pela Equação 63, é obtido pelas reações de apoio das vigas V2 e V3 para a mesma combinação. Considerando-se $\Psi_2 = 0,60$ (ver ANEXO C), tem-se:

$$P_{\text{serviço}} = \{[(0,45 + 2,00 + 1,50) + 0,60 \times 7,50] \times (2,50 \times 6,50)\} / 2$$

$$P_{\text{serviço}} = 68,7 \text{ kN}$$

Figura 34 - Carregamento para o ELS das vigas V5 e V6



Fonte: Próprios Autores (2017).

6.6.2.2 Deslocamentos

O deslocamento máximo atuante no meio do vão, dado pela Equação 65, para uma viga bi-apoiada com duas cargas concentradas, é:

$$\delta_{atuante} = \frac{23 P l^3}{648 E I} = \frac{23 \times \left(\frac{68,7}{100}\right) \times (750)^3}{648 \times 20000 \times 27616} = 0,02 \text{ cm}$$

O deslocamento limite para vigas de piso imposto pela NBR 8.800 (ABNT, 2008), obtido no ANEXO D é de $L/350$.

$$\delta_{limite} = \frac{L}{350} = \frac{750}{350} = 2,14 \text{ cm}$$

$$\delta_{atuante} = 0,02 \text{ cm} < \delta_{limite} = 2,14 \text{ cm}$$

ATENDE!

6.7 DIMENSIONAMENTO DOS PILARES P1, P2, P3 E P4

Todos os pilares (P1, P2, P3 e P4) possuem uma carga de compressão idênticas, logo, bastará realizar o dimensionamento de um dos pilares. Escolhe-se dimensionar o pilar P1.

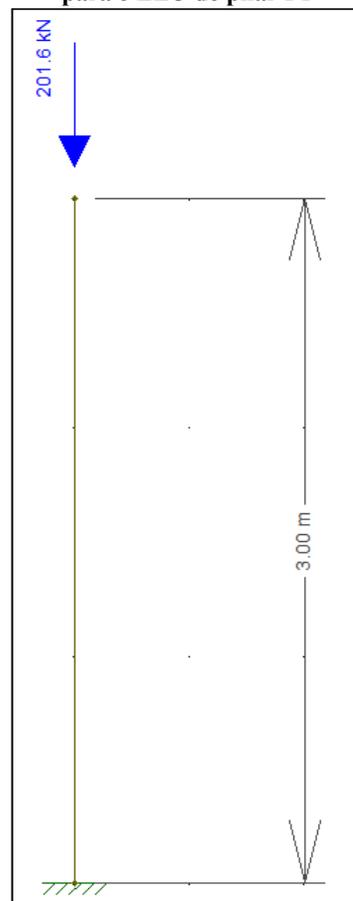
6.7.1 Verificação ao ELU

6.7.1.1 Carregamento atuante / Solicitação à compressão de cálculo (N_{csd})

A carga de compressão atuante no pilar P1 é decorrente das reações de apoio das vigas V1 e V5 para a combinação última normal das ações. Logo, temos que:

- Reação viga V1 = 67,18 kN
- Reação viga V5 = 134,4 kN
- Carga atuante no pilar P1 = $N_{csd} = 67,18 \text{ kN} + 134,4 \text{ kN} = 201,6 \text{ kN}$

Figura 35 - Carregamento para o ELU do pilar P1



Fonte: Próprios Autores
(2017).

6.7.1.2 Escolha do perfil

Escolher-se-á o perfil W 150 x 13 da tabela de perfis laminados da Gerdau Açominas, disposta no ANEXO I, para a verificação de sua estabilidade à compressão. As características deste perfil são:

Tabela 14 - Dados do Perfil W150 x 13

d	bf	tw	tf	I _x	I _y	r _x	r _y	h	Ag
(cm)	(cm)	(cm)	(cm)	(cm ⁴)	(cm ⁴)	(cm)	(cm)	(cm)	(cm ²)
14,8	10,0	0,43	0,49	635	82	6,18	2,22	13,8	16,6

Fonte: Tabela Aço Minas Gerdau - Adaptado.

6.7.1.3 Resistência à compressão de cálculo (N_{crd})

A equação da força resistente à compressão de cálculo, N_{crd} , é definida no item 5.3.2 da NBR 8.800 (ABNT, 2008), e aqui, representada pela Equação 66 abaixo.

$$N_{crd} = \frac{\chi Q A_g f_y}{\gamma_{a1}} \quad (66)$$

Logo, para a força resistente à compressão de cálculo, tem-se:

$$N_{crd} = \frac{0,625 \times 1,0 \times 16,6 \times 25}{1,1} = 235,79 \text{ kN} < N_{csd} = 201,6 \text{ kN}$$

ATENDE!

Os valores dos parâmetros da Equação 66 foram obtidos conforme demonstra-se nos itens subsequentes.

6.7.1.3.1 Vínculos do pilar P1

Considera-se sua base engastada e o topo rotulado, logo, de acordo com o ANEXO F, definem-se os coeficientes de flambagem à flexão como $K_x = K_y = 0,7$.

6.7.1.3.2 Índices de esbeltezes

O índice de esbeltez para a compressão, λ , é limitado a 200 no item 5.3.4.1 da NBR 8.800 (ABNT, 2008).

- Índice de esbeltez – direção x:

$$\lambda_x = \frac{K_x l_x}{r_x} = \frac{0,7 \times 300}{6,18} = 33,98 < 200 \rightarrow OK!$$

- Índice de esbeltez – direção y:

$$\lambda_y = \frac{K_y l_y}{r_y} = \frac{0,7 \times 300}{2,22} = 94,59 < 200 \rightarrow OK!$$

Conclui-se que a direção y é a direção com a maior esbeltez (direção mais crítica em termos de perda da estabilidade lateral). Logo, o dimensionamento será realizado para a direção y.

6.7.1.3.3 Verificação da instabilidade local (Fator de redução Q)

O fator de redução Q é definido conforme o ANEXO F da NBR 8.800 (ABNT, 2008). Logo, para a compreensão integral das formulações apresentadas aqui, é ideal a consulta da referida norma.

$$Q = Q_a Q_s = 1,0 \times 1,0 = 1,0 \rightarrow \text{SEÇÃO COMPACTA!}$$

- Instabilidade Local da alma:

Elemento AA (duas bordas longitudinais vinculadas) – Grupo 2

$$\left(\frac{h}{tw}\right)_{perfil} = \frac{13,8}{0,43} = 32,09 < \left(\frac{b}{t}\right)_{lim} = 1,49 \sqrt{\frac{E}{f_y}} = 1,49 \sqrt{\frac{20000}{25}} = 42,14 \rightarrow OK!$$

$$Q_a = 1,0$$

- Instabilidade Local das mesas:

Elemento AL (uma borda longitudinal vinculada) – Grupo 4

$$\left(\frac{b_f}{2 t_f}\right)_{perfil} = \frac{10,0}{2 \times 0,49} = 10,24 < \left(\frac{b}{t}\right)_{lim} = 0,56 \sqrt{\frac{E}{f_y}} = 0,56 \sqrt{\frac{20000}{25}} = 15,84 \rightarrow OK!$$

$$Q_s = 1,0$$

6.7.1.3.4 Verificação da instabilidade global (Fator de redução χ)

O fator de redução χ para a direção y é definido conforme o item 5.3.3 da NBR 8.800 (ABNT, 2008). Logo, para a compreensão integral das formulações apresentadas aqui, é ideal a consulta da referida norma.

Com o valor λ_0 calculado para a direção y, pode-se encontrar o valor de χ_y pelo ANEXO G.

$$\chi_y = 0,625$$

- Carga crítica de Euler para a direção y:

Calculado conforme o ANEXO E da NBR 8.800 (ABNT, 2008). Para seção transversal tipo I, tem-se:

$$N_{ey} = \frac{\pi^2 E I_y}{(K_y l_y)^2} = \frac{3,14^2 \times 20000 \times 82}{(0,7 \times 300)^2} = 366,66 \text{ kN}$$

- Índice de esbeltez reduzido λ_0 para a direção y:

Calculado conforme o item 5.3.3.1 da NBR 8.800 (ABNT, 2008).

$$\lambda_{0y} = \sqrt{\frac{Q A_g f_y}{N_{ey}}} = \sqrt{\frac{1,0 \times 16,6 \times 25}{366,66}} = 1,06$$

7 DIMENSIONAMENTO DO MEZANINO EM SITUAÇÃO DE INCÊNDIO, CONFORME A NBR 14.323 (ABNT, 2013).

O dimensionamento em situação de incêndio das barras de aço, consiste na verificação da capacidade resistente das mesmas quando submetidas ao incêndio-padrão da ISO 834 por um tempo pré-estabelecido pela norma NBR 14.432 (ABNT, 2001), tempo requerido de resistência ao fogo (TRRF), obtido em função das características da edificação, como a ocupação/uso, altura, área e carga de incêndio. A segurança da estrutura é garantida quando, para cada um dos elementos estruturais, pode-se verificar a garantia da segurança nos domínios temporal, de temperatura e de resistência, conforme definido no item 4.2 desta obra.

Por simplicidade, toma-se o tempo de exposição ao fogo da estrutura como 30 minutos, deixando-se de lado as considerações envolvidas na obtenção do TRRF, estabelecido pela norma NBR 14.432 (ABNT, 2001). Dá-se foco na demonstração dos procedimentos envolvidos na verificação da segurança dos elementos estruturais por meio do método simplificado de dimensionamento da NBR 14.323 (ABNT, 2013), para a obtenção da capacidade resistente das barras de aço em situação de incêndio, em seguida, verificando os domínios de temperatura e de resistência.

7.1 CONSIDERAÇÕES DE PROJETO

- a) Modelo de Incêndio: Curva-Padrão ISO 834/NBR 14.432 (ABNT, 2000);
- b) Tempo de exposição ao fogo: 30 minutos;
- c) Elementos Estruturais: Pertencentes a estrutura interna e sem revestimento de proteção contra o fogo.

7.2 COMBINAÇÃO ÚLTIMA DE INCÊNDIO

A Equação 17 define a combinação última de incêndio utilizada no dimensionamento do mezanino em situação de incêndio, para edificação comercial com a predominância de pesos de equipamentos fixos por longos períodos de tempo, definida no item 4.2 desta obra.

7.2.1 Coeficientes de ponderação das ações

Os coeficientes de ponderação considerados para o cálculo dos carregamentos das vigas, foram obtidos na NBR 14.323 (ABNT, 2013), e são apresentados na Tabela 9 desta obra.

- a) $\gamma_{g1} = 1,10$ (relacionado com o peso próprio da estrutura);
- b) $\gamma_{g2} = 1,20$ (relacionado a estruturas moldadas no local);
- c) $\gamma_q = 1,15$ (relacionado a ações variáveis, incluindo as decorrentes do uso e ocupação)

Tabela 4.

7.3 PARÂMETROS DE CÁLCULO

7.3.1 Temperatura dos Gases (Incêndio-Padrão)

Por meio da Equação 12, tem-se:

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

$$\theta_0 = 20^\circ\text{C};$$

$$t = 30 \text{ minutos.}$$

$$\theta_g = 20 + 345 \log(8 \times 30 + 1)$$

$$\theta_g = 842^\circ\text{C}$$

7.3.2 Perfil W360x58

7.3.2.1 Fator de correção para o efeito de sombreamento

Por meio da Equação 23, obtem-se o valor do fator de sombreamento:

$$k_{sh} = 0,9 \frac{(u/A_g)_b}{(u/A_g)} = 0,9 \frac{122,48}{188,96} = 0,58$$

A partir da Figura 22, obtêm-se os valores dos fatores de massividade seguintes:

$$(u/A_g)_b = (2d + b_f/A_g)_b = \left(\frac{(2.35,8 + 17,2)}{72,5} \right) x 100 = 122,48 (m^{-1})$$

$$(u/A_g) = (137/72,5)x100 = 188,96 (m^{-1})$$

7.3.2.2 Fator de Massividade reduzido

$$k_{sh} \left(\frac{u}{A_g} \right) = 0,58 x 188,96 = 109,59 (m^{-1})$$

7.3.2.3 Temperatura do Aço no instante $t - \Delta t$

A temperatura do aço no instante $t - \Delta t$, para o fator de massividade obtido para o perfil W 360x58 e o tempo de exposição ao fogo de 30 minutos, é obtido por meio da Tabela 11. Interpolando-se linearmente o valor intermediário, tem-se:

$$\theta_a(t - \Delta t) = 772,85 \text{ } ^\circ\text{C}$$

7.3.2.4 Fluxo de Calor

a) Fluxo de calor radioativo

Aplicando-se a Equação 26, tem-se:

$$\varphi_{r(t)} = 5,67x10^{-8} x 0,7x[(842 + 273)^4 - (772,85 + 273)^4]$$

$$\varphi_{r(t)} = 13859,95 (W/m^2)$$

b) Fluxo de calor devido a convecção

Aplicando-se a Equação 25, tem-se:

$$\varphi_{c(t)} = 25 \times (842 - 772,85) = 1728,75 \text{ (W/m}^2\text{)}$$

c) Fluxo de calor total

Aplicando-se a Equação 24, tem-se:

$$\varphi = \varphi_c + \varphi_r = 13859,95 + 1728,75 = 15588,7 \text{ (W/m}^2\text{)}$$

7.3.2.5 Elevação da temperatura do aço

Considerando-se os seguintes dados,

$\rho_a = 7850 \text{ kg/m}^3$, conforme o item 3.1;

$C_a = 600 \text{ J/kg/}^\circ\text{C}$, conforme 3.1.2.2;

$t = 5 \text{ s}$, conforme o item 5.4.1.1;

e aplicando-se a Equação 22, tem-se:

$$\Theta_{a,t} = \frac{109,59}{600 \times 7850} \times 15588,7 \times 5 = 1,81 \text{ }^\circ\text{C}$$

7.3.2.6 Temperatura do aço

Aplicando-se a Equação 21, obtem-se:

$$\theta_a = 1,81 + 772,85 = 774,66 \text{ }^\circ\text{C}$$

7.3.2.7 Fatores de redução

Conforme as tabelas do item 3.1.1, obtemos:

$$k_{y,\theta} = 0,140$$

$$k_{E,\theta} = 0,100$$

$$k_{\sigma,\theta} = 0,085$$

7.3.3 Perfil W410x75

7.3.3.1 Fator de correção para o efeito de sombreamento

Por meio da Equação 23, obtem-se o valor do fator de sombreamento:

$$k_{sh} = 0,9 \frac{(u/A_g)_b}{(u/A_g)} = 0,9 \frac{105,01}{157,62} = 0,60$$

A partir da Figura 22, obtem-se os valores dos fatores de massividade seguintes:

$$(u/A_g)_b = (2d + b_f/A_g)_b = \left(\frac{(2 \times 41,3 + 18,0)}{95,8} \right) \times 100 = 105,01 \text{ (m}^{-1}\text{)}$$

$$(u/A_g) = (151/95,8) \times 100 = 157,62 \text{ (m}^{-1}\text{)}$$

7.3.3.2 Fator de Massividade reduzido

$$k_{sh} \left(\frac{u}{A_g} \right) = 0,60 \times 157,62 = 94,57 \text{ (m}^{-1}\text{)}$$

7.3.3.3 Temperatura do Aço no instante $t - \Delta t$

A temperatura do aço no instante $t - \Delta t$, para o fator de massividade obtido para o perfil W 410x75 e o tempo de exposição ao fogo de 30 minutos, é obtido por meio da Tabela 11. Interpolando-se linearmente o valor intermediário, tem-se:

$$\theta_a(t - t) = 760,75 \text{ } ^\circ\text{C}$$

7.3.3.4 Fluxo de Calor

- a) Fluxo de calor radioativo

Aplicando-se a Equação 26, tem-se:

$$\varphi_{r(t)} = 5,67 \times 10^{-8} \times 0,7 \times [(842 + 273)^4 - (760,75 + 273)^4]$$

$$\varphi_{r(t)} = 16019,64 \text{ (W/m}^2\text{)}$$

- b) Fluxo de calor devido a convecção

Aplicando-se a Equação 25, tem-se:

$$\varphi_{c(t)} = 25 \times (842 - 760,75) = 2031,25 \text{ (W/m}^2\text{)}$$

- c) Fluxo de calor total

Aplicando-se a Equação 24, tem-se:

$$\varphi = \varphi_c + \varphi_r = 16019,64 + 2031,25 = 18050,89 \text{ (W/m}^2\text{)}$$

7.3.3.5 Elevação da temperatura do aço

Considerando-se os seguintes dados,

$$\rho_a = 7850 \text{ kg/m}^3, \text{ conforme o item 3.1;}$$

$C_a = 600 \text{ J/kg/}^\circ\text{C}$, conforme 3.1.2.2;

$t = 5 \text{ s}$, conforme o item 5.4.1.1;

e aplicando-se a Equação 22, tem-se:

$$\theta_{a,t} = \frac{94,57}{600 \times 7850} \times 18050,89 \times 5 = 1,81 \text{ } ^\circ\text{C}$$

7.3.3.6 Temperatura do aço

Aplicando-se a Equação 21, obtem-se:

$$\theta_a = 1,81 + 760,75 = 762,56 \text{ } ^\circ\text{C}$$

7.3.3.7 Fatores de redução

Conforme as tabelas do item 3.1.1, obtemos:

$$k_{y,\theta} = 0,155$$

$$k_{E,\theta} = 0,105$$

$$k_{\sigma,\theta} = 0,092$$

7.3.4 Perfil W150x13

7.3.4.1 Fator de correção para o efeito de sombreamento

Por meio da Equação 23, obtem-se o valor do fator de sombreamento:

$$k_{sh} = 0,9 \frac{(u/A_g)_b}{(u/A_g)} = 0,9 \frac{298,79}{403,61} = 0,67$$

A partir da Figura 22, obtem-se os valores dos fatores de massividade seguintes:

$$\left(\frac{u}{A_g}\right)_b = \left(2(d + b_f)/A_g\right)_b = \left(\frac{2x(14,8 + 10,0)}{16,6}\right)x100 = 298,79 \text{ (m}^{-1}\text{)}$$

$$\left(\frac{u}{A_g}\right) = (67/16,6)x100 = 403,61 \text{ (m}^{-1}\text{)}$$

7.3.4.2 Fator de Massividade reduzido

$$k_{sh} \left(\frac{u}{A_g}\right) = 0,67x403,61 = 270,42 \text{ (m}^{-1}\text{)}$$

7.3.4.3 Temperatura do Aço no instante $t - \Delta t$

A temperatura do aço no instante $t - \Delta t$, para o fator de massividade obtido para o perfil W 150x13 e o tempo de exposição ao fogo de 30 minutos, é obtido por meio da Tabela 11. Interpolando-se linearmente o valor intermediário, tem-se:

$$\theta_a(t - t) = 832,93 \text{ }^\circ\text{C}$$

7.3.4.4 Fluxo de Calor

a) Fluxo de calor radioativo

Aplicando-se a Equação 26, tem-se:

$$\varphi_{r(t)} = 5,67x10^{-8} x0,7x[(842 + 273)^4 - (832,93 + 273)^4]$$

$$\varphi_{r(t)} = 1971,83 \text{ (W/m}^2\text{)}$$

b) Fluxo de calor devido a convecção

Aplicando-se a Equação 25, tem-se:

$$\varphi_{c(t)} = 25x (842 - 832,93) = 226,75 (W/m^2)$$

c) Fluxo de calor total

Aplicando-se a Equação 24, tem-se:

$$\varphi = \varphi_c + \varphi_r = 1971,83 + 226,75 = 2198,58 (W/m^2)$$

7.3.4.5 Elevação da temperatura do aço

Considerando-se os seguintes dados,

$\rho_a = 7850 \text{ kg/m}^3$, conforme o item 3.1;

$C_a = 600 \text{ J/kg/}^\circ\text{C}$, conforme 3.1.2.2;

$t = 5 \text{ s}$, conforme o item 5.4.1.1;

e aplicando-se a Equação 22, tem-se:

$$\Theta_{a,t} = \frac{270,42}{600 \times 7850} \times 2198,58 \times 5 = 0,63 \text{ }^\circ\text{C}$$

7.3.4.6 Temperatura do aço

Aplicando-se a Equação 21, obtem-se:

$$\theta_a = 0,63 + 832,93 = 833,56 \text{ }^\circ\text{C}$$

7.3.4.7 Fatores de redução

Conforme as tabelas do item 3.1.1, obtemos:

$$k_{y,\theta} = 0,093; \quad k_{E,\theta} = 0,083; \quad k_{\sigma,\theta} = 0,063$$

7.3.5 Resumo dos parâmetros de cálculo

Tabela 15 - Resumo – parâmetros de cálculo dos perfis laminados

Perfil	$\left(\frac{u}{Ag}\right)$	$\left(\frac{u}{Ag}\right)_b$	$k_{sh}\left(\frac{u}{Ag}\right)$	$\theta_{a(t-t)}$	φ_r	φ_c	φ	θ_a	θ_a	Fatores de redução		
	(m ⁻¹)	(m ⁻¹)	(m ⁻¹)	(°C)	(W/m ²)	(W/m ²)	(W/m ²)	(°C)	(°C)	$k_{y,\theta}$	$k_{E,\theta}$	$k_{\sigma,\theta}$
W150X13	403,61	298,79	270,42	832,93	1971,83	226,75	2198,58	0,63	833,56	0,093	0,083	0,063
W360X58	188,96	122,48	109,59	772,85	13859,95	1728,75	15588,7	1,81	774,66	0,140	0,100	0,085
W410X75	157,62	105,01	94,57	760,75	16019,64	2031,25	18050,89	1,81	762,56	0,155	0,105	0,092

Fonte: Próprios Autores (2017).

7.4 VERIFICAÇÃO DAS VIGAS V2 E V3 – W360X58

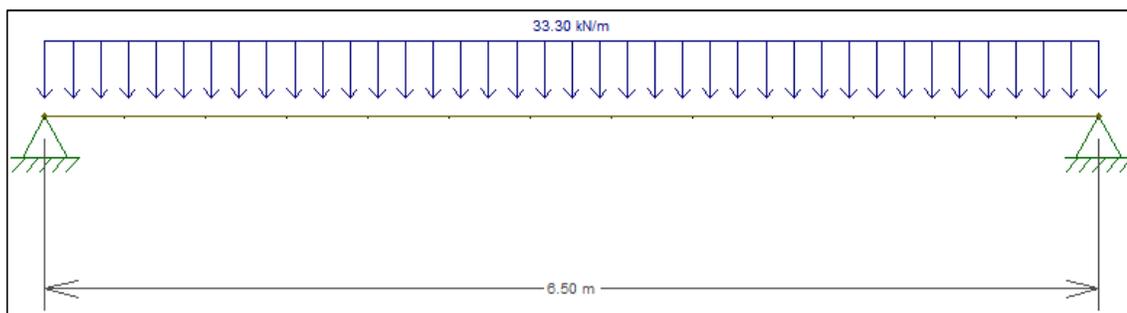
7.4.1 Carregamentos (ELU)

A carga distribuída em situação de incêndio, $q_{fi,d}$, atuante nas vigas V2 e V3, é calculada conforme a combinação última excepcional das ações definida pela Equação 17. Veja abaixo:

$$q_{fi,d} = [(1,10 \times 0,45) + 1,2 \times (2,0 + 1,5) + 1,15 \times 7,50] \times 2,50$$

$$q_{fi,d} = 33,3 \text{ kN/m}$$

Figura 36 - Carregamento para o ELU Excepcional das vigas V2 e V3



Fonte: Próprios Autores (2017).

7.4.2 Esforços Solicitantes de Cálculo em situação de incêndio

7.4.2.1 Momento Fletor

O momento fletor solicitante de cálculo em situação de incêndio, $M_{fi,Sd}$, é determinado por meio da Equação 50, mas considerando-se a combinação última excepcional das ações, definida pela Equação 17. Ver abaixo:

$$M_{fi,Sd} = \frac{33,3 \times (6,5)^2}{8}$$

$$M_{fi,Sd} = 175,86 \text{ kNm}$$

7.4.2.2 Esforço Cortante

O esforço cortante solicitante de cálculo em situação de incêndio, $V_{fi,Sd}$, é determinado por meio da Equação 51, mas considerando-se a combinação última excepcional das ações, definida pela Equação 17. Ver abaixo:

$$V_{fi,Sd} = \frac{33,3 \times 6,5}{2}$$

$$V_{fi,Sd} = 108,22 \text{ kN}$$

7.4.3 Esforços Resistentes de Cálculo em situação de incêndio

7.4.3.1 Esforços Cortante

Conforme definido no item 5.5.2.2, os parâmetros de esbeltez são definidos pelas seguintes expressões:

$$\lambda = \frac{h}{tw} = \frac{33,2}{0,79} = 42,02$$

$$\lambda_{p,fi} = 0,85 \lambda_p = 0,85 \left(1,10 \sqrt{\frac{k_v E}{f_y}} \right) = 0,85 \left(1,10 \sqrt{\frac{5 \times 20000}{25}} \right) = 59,13$$

$$\lambda_{r,fi} = 0,85 \lambda_r = 0,85 \left(1,37 \sqrt{\frac{k_v E}{f_y}} \right) = 0,85 \left(1,37 \sqrt{\frac{5 \times 20000}{25}} \right) = 73,65$$

Para $\lambda \leq \lambda_{p,fi}$, então o $V_{fi,Rd}$ é dado pela Equação 42, conforme se segue:

$$V_{fi,Rd} = k_{y,\theta} V_{pl} = V_{rd} = k_{y,\theta} (0,60 A_w f_y)$$

$$k_{y,\theta} = 0,140$$

$$A_w = 26,23 \text{ cm}^2$$

$$V_{fi,Rd} = 0,140 (0,6 \times 26,23 \times 25) = 55,08 \text{ kN}$$

7.4.3.2 Momento Fletor

Conforme definido no item 5.5.2.1, os parâmetros de esbeltez são definidos pelas seguintes expressões abaixo.

- Para as mesas – FLM:

$$\lambda \leq \lambda_{p,fi}$$

$$\lambda = \frac{b}{2t_f} = \frac{17,2}{2 \times 1,31} = 6,56$$

$$\lambda_{p,fi} = 0,85 \lambda_p = 0,85 \left(0,38 \sqrt{\frac{E}{f_y}} \right) = 0,85 \left(0,38 \sqrt{\frac{20000}{25}} \right) = 9,14$$

$$\lambda < \lambda_{p,fi} \rightarrow OK!$$

- Para a alma – FLA:

$$\lambda \leq \lambda_{p,fi}$$

$$\lambda = \frac{h}{tw} = \frac{33,2}{0,79} = 42,02$$

$$\lambda_{p,fi} = 0,85 \lambda_p = 0,85 \left(3,76 \sqrt{\frac{E}{f_y}} \right) = 0,85 \left(3,76 \sqrt{\frac{20000}{25}} \right) = 90,4$$

$$\lambda < \lambda_{p,fi} \rightarrow OK!$$

Logo, o momento fletor resistente de cálculo em situação de incêndio, dado pela Equação 36, é:

$$M_{fi,Rd} = \kappa k_{y,\theta} M_{pl}$$

$$M_{fi,Rd} = \kappa k_{y,\theta} (Z_x f_y)$$

Considerando-se,

$$\kappa = 1,40 \text{ (conforme o item 5.5.2.1.1)}$$

$$k_{y,\theta} = 0,140$$

$$Z_x = 1014,8 \text{ cm}^3$$

então:

$$M_{fi,Rd} = 1,40 \times 0,140 \times (1014,8 \times 25) = 4972,52 \text{ kNcm} = 49,72 \text{ kNm}$$

7.4.4 Verificação da segurança do elemento

a) Domínio da temperatura:

O domínio da temperatura é garantido quando a condição da Equação 14, apresentada abaixo, é satisfeita.

$$\theta_{cr} \geq \theta_a$$

Para o cálculo da temperatura crítica, θ_{cr} , aplica-se a Equação 20.

$$\theta_{cr} = 39,19 \ln \left(\frac{1}{0,9674 k_{y,\theta}^{3,833}} + 1 \right) + 482 \geq \theta_a$$

$$\theta_{cr} = 39,19 \ln \left(\frac{1}{0,9674 \times 0,140^{3,833}} \right) + 482 \geq 774,66 \text{ } ^\circ\text{C}$$

$$778,62 \text{ } ^\circ\text{C} > 774,66 \text{ } ^\circ\text{C} \rightarrow \text{ATENDE!}$$

b) Domínio das resistências:

O domínio da resistência é garantido quando a condição da Equação 15, apresentada abaixo, é satisfeita.

$$R_{fi,d} \geq S_{fi,d}$$

Assim, temos:

$$V_{fi,Rd} = 55,08 \text{ kN} < V_{fi,Sd} = 108,22 \text{ kN} \rightarrow \text{NÃO ATENDE!}$$

$$M_{fi,Rd} = 49,72 \text{ kNm} < M_{fi,Sd} = 175,86 \text{ kNm} \rightarrow \text{NÃO ATENDE!}$$

7.5 VERIFICAÇÃO DAS VIGAS V1 E V4 – PERFIL W360X58

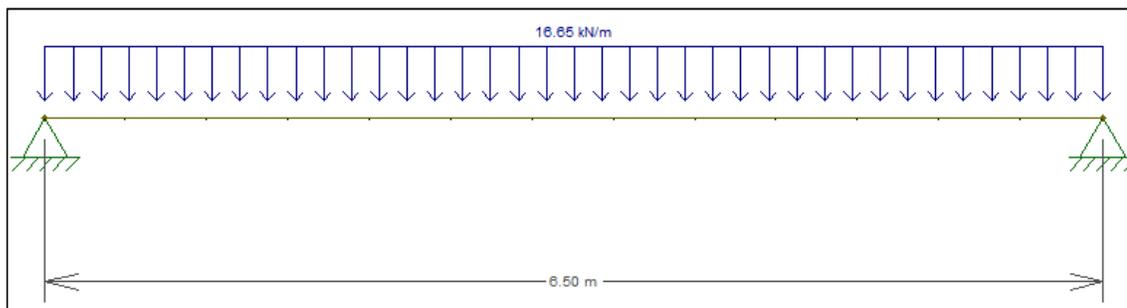
7.5.1 Carregamentos (ELU)

A carga distribuída em situação de incêndio, $q_{fi,d}$, atuante nas vigas, V1 e V4, é calculada conforme a combinação última excepcional das ações definida pela Equação 17. Veja abaixo:

$$q_{fi,d} = [(1,10 \times 0,45) + 1,2 \times (2,0 + 1,5) + 1,15 \times 7,50] \times 1,25$$

$$q_{fi,d} = 16,65 \text{ kN/m}$$

Figura 37 - Carregamento para o ELU Excepcional das vigas V1 e V4



Fonte: Próprios Autores (2017)..

7.5.2 Esforços Solicitantes de Cálculo em situação de incêndio

7.5.2.1 Momento Fletor

Conforme a Equação 50, considerando-se a combinação última excepcional das ações, definida pela Equação 17, tem-se:

$$M_{fi,sd} = \frac{16,65 \times (6,5)^2}{8}$$

$$M_{fi,sd} = 87,93 \text{ kNm}$$

7.5.2.2 Esforço Cortante

Conforme a Equação 51, considerando-se a combinação última excepcional das ações, definida pela Equação 17, tem-se:

$$V_{fi,sd} = \frac{16,65 \times 6,5}{2}$$

$$V_{fi,sd} = 54,11 \text{ kN}$$

7.5.3 Esforços Resistentes de Cálculo em situação de incêndio

7.5.3.1 Esforços Cortante

Os valores dos parâmetros de esbeltez λ , $\lambda_{p,fi}$, $\lambda_{r,fi}$, e do esforço cortante resistente $V_{fi,Rd}$, já foram obtidos no dimensionamento das vigas V2 e V3 para o perfil W 360 x 58. Os seus valores são dados abaixo:

$$\lambda = 42,02$$

$$\lambda_{p,fi} = 59,13$$

$$\lambda_{r,fi} = 73,65$$

$$V_{fi,Rd} = 55,08 \text{ kN}$$

7.5.3.2 Momento Fletor

O valor do momento fletor resistente, $M_{fi,Rd}$, já foi obtido no dimensionamento das vigas V2 e V3 para o perfil W 360 x 58, conforme pode-se observar abaixo:

$$M_{fi,Rd} = 49,72 \text{ kNm}$$

7.5.4 Verificação da segurança do elemento

a) Domínio da temperatura:

O domínio da temperatura é garantido quando a condição da Equação 14, apresentada abaixo, é satisfeita.

$$\theta_{cr} \geq \theta_a$$

Para o cálculo da temperatura crítica, θ_{cr} , aplica-se a Equação 20.

$$\theta_{cr} = 39,19 \ln \left(\frac{1}{0,9674 k_{y,\theta}^{3,833}} + 1 \right) + 482 \geq \theta_a$$

$$\theta_{cr} = 39,19 \ln \left(\frac{1}{0,9674 \times 0,140^{3,833}} + 1 \right) + 482 \geq 774,66 \text{ } ^\circ\text{C}$$

$$778,62 \text{ } ^\circ\text{C} > 774,66 \text{ } ^\circ\text{C} \rightarrow \text{ATENDE!}$$

b) Domínio das resistências:

O domínio da resistência é garantido quando a condição da Equação 15, apresentada abaixo, é satisfeita.

$$R_{fi,d} \geq S_{fi,d}$$

Assim, temos:

$$V_{fi,Rd} = 55,08 \text{ kN} > V_{fi,Sd} = 54,11 \text{ kN} \rightarrow \text{ATENDE!}$$

$$M_{fi,Rd} = 49,72 \text{ kNm} < M_{fi,Sd} = 87,93 \text{ kNm} \rightarrow \text{NÃO ATENDE!}$$

7.6 VERIFICAÇÃO DAS VIGAS V5 E V6 – PERFIL W410X75

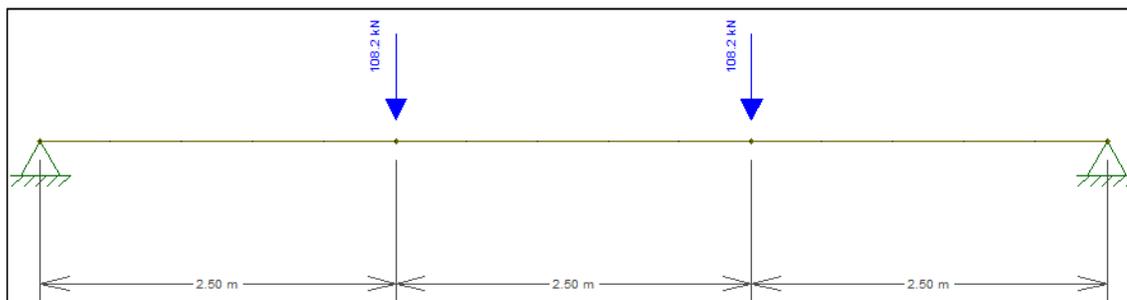
7.6.1 Carregamentos (ELU)

A carga em situação de incêndio, $q_{fi,d}$, atuante nas vigas V5 e V6 para a combinação última excepcional das ações, é obtida pelas reações de apoio das vigas V2 e V3 para a mesma combinação. Assim temos:

$$q_{fi,d} = \frac{(33,3 \times 6,5)}{2}$$

$$q_{fi,d} = 108,22 \text{ kN}$$

Figura 38 - Carregamento para o ELU Excepcional das vigas V5 e V6

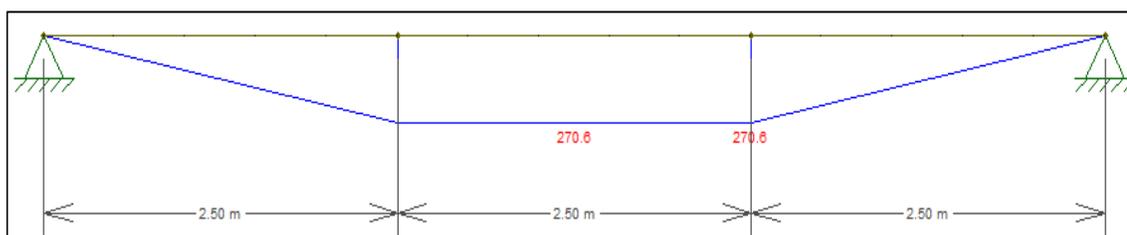


Fonte: Próprios Autores (2017).

7.6.2 Esforços Solicitantes de Cálculo em situação de incêndio

7.6.2.1 Momento Fletor

Figura 39 - Diagrama de momento fletor das vigas V5 e V6 para o ELU Excepcional



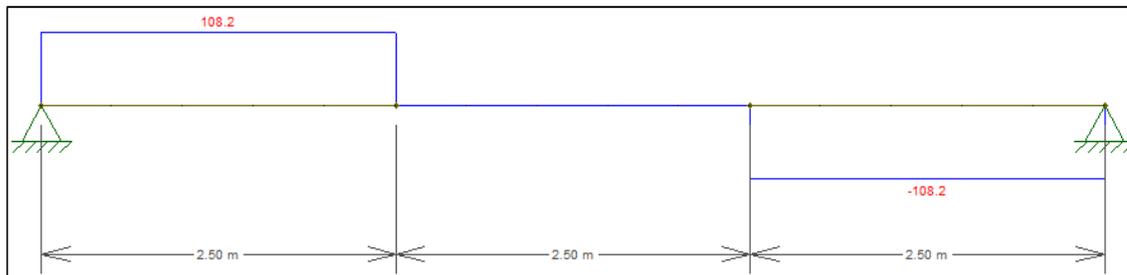
Fonte: Próprios Autores (2017).

Conforme o resultado obtido pelo software ftool, apresentado na Figura 39, tem-se o seguinte valor para o momento fletor solicitante de cálculo em situação de incêndio, $M_{fi,sd}$:

$$M_{fi,sd} = 270,6 \text{ kNm}$$

7.6.2.2 Esforço Cortante

Figura 40 - Diagrama de esforço cortante solicitante das vigas V5 e V6 para o ELU Excepcional



Fonte: Próprios Autores (2017).

Conforme o resultado obtido pelo software fool, apresentado na Figura 40, tem-se o seguinte valor para o esforço cortante solicitante de cálculo em situação de incêndio, $V_{fi,Sd}$:

$$V_{fi,Sd} = 108,2 \text{ kN}$$

7.6.3 Esforços Resistentes de Cálculo em situação de incêndio

7.6.3.1 Esforços Cortante

Conforme definido no item 5.5.2.2, os parâmetros de esbelteza são definidos pelas seguintes expressões:

$$\lambda = \frac{h}{tw} = \frac{38,1}{0,97} = 39,28$$

$$\lambda_{p,fi} = 0,85 \lambda_p = 0,85 \left(1,10 \sqrt{\frac{k_v E}{f_y}} \right) = 0,85 \left(1,10 \sqrt{\frac{5 \times 20000}{25}} \right) = 59,13$$

$$\lambda_{r,fi} = 0,85 \lambda_r = 0,85 \left(1,37 \sqrt{\frac{k_v E}{f_y}} \right) = 0,85 \left(1,37 \sqrt{\frac{5 \times 20000}{25}} \right) = 73,65$$

Para $\lambda \leq \lambda_{p,fi}$, então o $V_{fi,Rd}$ é dado por:

$$V_{fi,Rd} = k_{y,\theta} V_{pl} = V_{rd} = k_{y,\theta} (0,60 A_w f_y)$$

$$k_{y,\theta} = 0,155$$

$$A_w = 36,96 \text{ cm}^2$$

$$V_{fi,Rd} = 0,155 (0,6 \times 36,96 \times 25) = 85,93 \text{ kN}$$

7.6.3.2 Momento Fletor

Conforme definido no item 5.5.2.1, os parâmetros de esbeltez são definidos pelas seguintes expressões abaixo.

- Para as mesas – FLM:

$$\lambda \leq \lambda_{p,fi}$$

$$\lambda = \frac{b}{2t_f} = \frac{18}{2 \times 1,6} = 5,62$$

$$\lambda_{p,fi} = 0,85 \lambda_p = 0,85 \left(0,38 \sqrt{\frac{E}{f_y}} \right) = 0,85 \left(0,38 \sqrt{\frac{20000}{25}} \right) = 9,14$$

$$\lambda < \lambda_{p,fi} \rightarrow OK!$$

- Para a alma – FLA:

$$\lambda \leq \lambda_{p,fi}$$

$$\lambda = \frac{h}{tw} = \frac{38,1}{0,97} = 39,28$$

$$\lambda_{p,fi} = 0,85 \lambda_p = 0,85 \left(3,76 \sqrt{\frac{E}{f_y}} \right) = 0,85 \left(3,76 \sqrt{\frac{20000}{25}} \right) = 90,4$$

$$\lambda < \lambda_{p,fi} \rightarrow OK!$$

Logo, o momento fletor resistente de cálculo em situação de incêndio, dado pela Equação 36, é:

$$M_{fi,Rd} = \kappa k_{y,\theta} M_{pl}$$

$$M_{fi,Rd} = \kappa k_{y,\theta} (Z_x f_y)$$

$$\kappa = 1,40 \text{ (conforme o item 5.5.2.1.1)}$$

$$k_{y,\theta} = 0,155$$

$$Z_x = 1518,6 \text{ cm}^3$$

$$M_{fi,Rd} = 1,40 \times 0,155 \times (1518,6 \times 25) = 8238,41 \text{ kNcm} = 82,38 \text{ kNm}$$

7.6.4 Verificação da segurança do elemento

a) Domínio da temperatura:

O domínio da temperatura é garantido quando a condição da Equação 14, apresentada abaixo, é satisfeita.

$$\theta_{cr} \geq \theta_a$$

Para o cálculo da temperatura crítica, θ_{cr} , aplica-se a Equação 20.

$$\theta_{cr} = 39,19 \ln \left(\frac{1}{0,9674 k_{y,\theta}^{3,833}} + 1 \right) + 482 \geq \theta_a$$

$$\theta_{cr} = 39,19 \ln \left(\frac{1}{0,9674 \times 0,155^{3,833}} \right) + 482 \geq 762,56 \text{ } ^\circ\text{C}$$

$$763,32 \text{ } ^\circ\text{C} > 762,56 \text{ } ^\circ\text{C} \rightarrow \text{ATENDE!}$$

b) Domínio das resistências:

O domínio da resistência é garantido quando a condição da Equação 15, apresentada abaixo, é satisfeita.

$$R_{fi,d} \geq S_{fi,d}$$

Assim, temos:

$$V_{fi,Rd} = 85,93 \text{ kN} < V_{fi,Sd} = 108,2 \text{ kN} \rightarrow \text{NÃO ATENDE!}$$

$$M_{fi,Rd} = 82,38 \text{ kNm} < M_{fi,Sd} = 270,6 \text{ kNm} \rightarrow \text{NÃO ATENDE!}$$

7.7 VERIFICAÇÃO DOS PILARES P1, P2, P3 E P4

Todos os pilares (P1, P2, P3 e P4) possuem cargas de compressão idênticas, logo, bastará realizar o dimensionamento de um dos pilares. Escolhe-se verificar o pilar P1.

7.7.1 Carregamento atuante / Solicitação à compressão de cálculo (N_{csd})

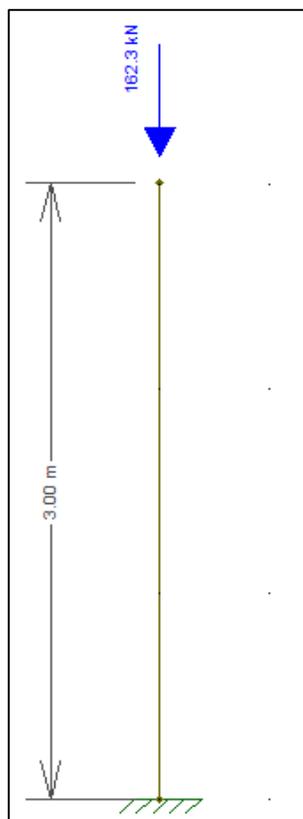
A carga de compressão atuante no pilar P1 é decorrente das reações de apoio das vigas V1 e V5 para a combinação última excepcional das ações. Logo, temos que:

$$\text{- Reação viga V1} = 54,11 \text{ kN}$$

$$\text{- Reação viga V5} = 108,22 \text{ kN}$$

$$\text{- Carga atuante no pilar P1} = N_{csd} = 54,11 \text{ kN} + 108,22 \text{ kN} = 162,33 \text{ kN}$$

Figura 41 - Carregamento para o ELU Excepcional do pilar P1



Fonte: Próprios Autores (2017).

7.7.2 Esforço Resistente à compressão de cálculo em situação de incêndio ($N_{fi,Rd}$)

Conforme descrito a seguir na verificação da instabilidade local, a barra comprimida não sofre flambagem local, deste modo, pela Equação 28, tem-se:

$$N_{fi,Rd} = \chi_{fi} k_{y,\theta} A_g f_y$$

$$k_{y,\theta} = 0,093$$

$$A_g = 16,6 \text{ cm}^2$$

$$\chi_{fi} = 0,36$$

$$N_{fi,Rd} = 0,36 \times 0,093 \times 16,6 \times 25 = 13,89 \text{ kN}$$

7.7.2.1 Vínculos do pilar P1

Considera-se sua base engastada e o topo rotulado, logo, de acordo com o ANEXO F, definem-se os coeficientes de flambagem à flexão como $K_x = K_y = 0,7$.

7.7.2.2 Índices de esbeltez para o dimensionamento em situação de incêndio

O índice de esbeltez para a compressão é limitado a 200 no item 5.3.4.1 da NBR 8.800 (ABNT, 2008). Para pilares não contínuos, adota-se o comprimento de flambagem em situação de incêndio, $L_{e,fi}$, igual ao comprimento de flambagem à temperatura ambiente, L_e

- Índice de esbeltez – direção x:

$$\lambda_x = \frac{L_{e,fi,x}}{r_x} = \frac{K_x l_x}{r_x} = \frac{0,7 \times 300}{6,18} = 33,98 < 200 \rightarrow OK!$$

- Índice de esbeltez – direção y:

$$\lambda_y = \frac{L_{e,fi,y}}{r_y} = \frac{K_y l_y}{r_y} = \frac{0,7 \times 300}{2,22} = 94,59 < 200 \rightarrow OK!$$

Conclui-se que a direção y é a direção com a maior esbeltez (direção mais crítica em termos de perda da estabilidade lateral). Logo, o dimensionamento será realizado para a direção y.

7.7.2.3 Verificação da instabilidade local (Fator de redução Q)

O fator de redução Q é definido conforme já estabelecido no item 5.1.2.2.

- Instabilidade Local da alma:

Elemento AA (duas bordas longitudinais vinculadas) – Grupo 2

$$\left(\frac{h}{tw}\right)_{perfil} = \frac{13,8}{0,43} = 32,09$$

$$\left(\frac{b}{t}\right)_{fi,lim} = 0,85 \left(\frac{b}{t}\right)_{lim} = 0,85 \left(1,49 \sqrt{\frac{E}{f_y}}\right) = 0,85 \left(1,49 \sqrt{\frac{20000}{25}}\right) = 35,82$$

$$\left(\frac{h}{tw}\right)_{perfil} = 32,09 < \left(\frac{b}{t}\right)_{fi,lim} = 35,82 \rightarrow OK!$$

- Instabilidade Local das mesas:

Elemento AL (uma borda longitudinal vinculada) – Grupo 4

$$\left(\frac{b_f}{2 t_f}\right)_{perfil} = \frac{10,0}{2 \times 0,49} = 10,24$$

$$\left(\frac{b}{t}\right)_{fi,lim} = 0,85 \left(0,56 \sqrt{\frac{E}{f_y}}\right) = 0,85 \left(0,56 \sqrt{\frac{20000}{25}}\right) = 13,46$$

$$\left(\frac{b_f}{2 t_f}\right)_{perfil} = 10,24 < \left(\frac{b}{t}\right)_{fi,lim} = 13,46 \rightarrow OK!$$

Os elementos possuem relação (b/t) menores que (b/t)_{fi,lim}, logo, a a barra comprimida não sofre flambagem local e, portanto, temos Q = 1,0.

7.7.2.4 Verificação da instabilidade global (Fator de redução χ_{fi})

- Carga crítica de Euler para a direção y:

Calculado conforme o ANEXO E da NBR 8.800 (ABNT, 2008). Para seção transversal tipo I, tem-se:

$$N_{ey} = \frac{\pi^2 E I_y}{(L_{e,fi,y})^2} = \frac{3,14^2 \times 20000 \times 82}{(0,7 \times 300)^2} = 366,66 \text{ kN}$$

- Índice de esbeltez reduzido λ_0 para a direção y:

Calculado conforme o item 5.3.3.1 da NBR 8.800 (ABNT, 2008).

$$\lambda_{0y} = \sqrt{\frac{Q A_g f_y}{N_{ey}}} = \sqrt{\frac{1,0 \times 16,6 \times 25}{366,66}} = 1,06$$

- Parâmetro α , conforme a Equação 31:

$$\alpha = 0,022 \sqrt{\frac{E}{f_y}} = 0,022 \sqrt{\frac{20000}{25}} = 0,62$$

- Índice de esbeltez reduzido, $\lambda_{0,fi}$, em situação de incêndio para a direção y, conforme a Equação 32:

$$\lambda_{0,fi} = \frac{\lambda_0}{0,85} = \frac{1,06}{0,85} = 1,25$$

- Parâmetro $\varphi_{0,fi}$, conforme a Equação 30:

$$\varphi_{0,fi} = 0,5 (1 + \alpha \lambda_{0,fi} + \lambda_{0,fi}^2)$$

$$\varphi_{0,fi} = 0,5 (1 + 0,62 \times 1,25 + 1,25^2) = 1,67$$

- Fator de redução χ_{fi} para a direção y, conforme a Equação 29:

$$\chi_{fi,y} = \frac{1}{\varphi_{0,fi} + \sqrt{\varphi_{0,fi}^2 + \lambda_{0,fi}^2}}$$

$$\chi_{fi,y} = \frac{1}{1,67 + \sqrt{1,67^2 - 1,25^2}} = 0,36$$

7.7.3 Verificação da segurança do elemento

a) Domínio da temperatura:

O domínio da temperatura é garantido quando a condição da Equação 14, apresentada abaixo, é satisfeita.

$$\theta_{cr} \geq \theta_a$$

Para o cálculo da temperatura crítica, θ_{cr} , aplica-se a Equação 20.

$$\theta_{cr} = 39,19 \ln \left(\frac{1}{0,9674 k_{y,\theta}^{3,833}} - 1 \right) + 482 \geq \theta_a$$

$$\theta_{cr} = 39,19 \ln \left(\frac{1}{0,9674 \times 0,093^{3,833}} - 1 \right) + 482 \geq 833,56 \text{ } ^\circ\text{C}$$

$$840,08 \text{ } ^\circ\text{C} > 833,56 \text{ } ^\circ\text{C} \rightarrow \text{ATENDE!}$$

b) Domínio das resistências:

O domínio da resistência é garantido quando a condição da Equação 15, apresentada abaixo, é satisfeita.

$$R_{fi,d} \geq S_{fi,d}$$

Assim, temos:

$$N_{fi,Rd} = 13,89 \text{ kN} < N_{fi,Sd} = 162,33 \text{ kN} \rightarrow \text{NÃO ATENDE!}$$

8 APRESENTAÇÃO E ANÁLISE DOS RESULTADOS

O presente capítulo apresenta e analisa os resultados obtidos no dimensionamento da estrutura de aço do mezanino à temperatura ambiente, apresentado no capítulo 6, e em situação de incêndio, apresentado no capítulo 7. Por fim, faz-se uma observação acerca da influência da elevação da temperatura devida ao incêndio na capacidade resistente à temperatura ambiente dos perfis dos elementos estruturais.

8.1 RESULTADOS OBTIDOS NO DIMENSIONAMENTO DA ESTRUTURA DO MEZANINO À TEMPERATURA AMBIENTE (20°C)

A Tabela 16 expressa os resultados obtidos na verificação do estado limite último (ELU) à temperatura ambiente, conforme a NBR 8.800 (ABNT,2008). As colunas de verificação da mesma tabela, apresentam os índices percentuais da capacidade resistente última dos elementos estruturais, que não devem superar o valor 1,0 (condição de segurança). Deste modo, conforme pode-se verificar, todos os elementos estruturais atendem ao ELU.

Tabela 16 - Resultados obtidos na verificação dos elementos (vigas e pilares) à temperatura ambiente 20°C – Estado Limite Último (ELU)

Elementos	Perfil	Solicitações			Resistências			Verificações		
		M_{sd} kN.m	V_{sd} kN	N_{csd} kN	M_{rd} kN.m	V_{rd} kN	N_{crd} kN	(M_{sd}/M_{rd})	(V_{sd}/V_{rd})	(N_{sd}/N_{rd})
V1	W360X58	109,16	67,18	-	230,64	357,68	-	0,47	0,19	-
V2	W360X58	218,33	134,35	-	230,64	357,68	-	0,95	0,37	-
V3	W360X58	218,33	134,35	-	230,64	357,68	-	0,95	0,37	-
V4	W360X58	109,16	67,18	-	230,64	357,68	-	0,47	0,19	-
V5	W410X75	336,00	134,4	-	345,14	504,0	-	0,97	0,27	-
V6	W410X75	336,00	134,4	-	345,14	504,0	-	0,97	0,27	-
P1	W150X13	-	-	201,6	-	-	235,79	-	-	0,85
P2	W150X13	-	-	201,6	-	-	235,79	-	-	0,85
P3	W150X13	-	-	201,6	-	-	235,79'	-	-	0,85
P4	W150X13	-	-	201,6	-	-	235,79	-	-	0,85

Fonte: Próprios Autores (2017).

A Tabela 17 expressa os resultados obtidos na verificação do estado limite de serviço (ELS) à temperatura ambiente, conforme a NBR 8.800 (ABNT,2008). É importante reafirmar que a verificação a esse estado, consiste na limitação dos deslocamentos elásticos atuantes nos elementos estruturais. Por não haver ações horizontais atuantes na estrutura, efetua-se somente a verificação dos deslocamentos das vigas.

Conforme pode-se observar na coluna de verificação, nenhum dos deslocamentos supera o limite imposto, deste modo, atendendo ao ELS.

Tabela 17 - Resultados obtidos na verificação dos elementos (vigas e pilares) à temperatura ambiente 20°C – Estado Limite de Serviço (ELS)

Elementos	Perfil	Deslocamentos		Verificações
		$\delta_{atuante}$ (cm)	δ_{limite} (cm)	$(\delta_{atuante}/\delta_{limite})$
V1	W360X58	0,76	1,86	0,409
V2	W360X58	1,52	1,86	0,817
V3	W360X58	1,52	1,86	0,817
V4	W360X58	0,76	1,86	0,409
V5	W410X75	0,02	2,14	0,009
V6	W410X75	0,02	2,14	0,009

Fonte: Próprios Autores (2017).

8.2 RESULTADOS OBTIDOS NO DIMENSIONAMENTO DA ESTRUTURA DO MEZANINO EM SITUAÇÃO DE INCÊNDIO

A Tabela 18 apresenta os resultados obtidos nos procedimentos de verificação do estado limite último excepcional de incêndio da estrutura do mezanino desenvolvidos no capítulo 7, observando-se a segurança dos elementos estruturais nos domínios da resistência e da temperatura. Frente aos resultados, pode-se concluir que os elementos estruturais, de forma geral, não atendem ao domínio da resistência, entretanto, todos atendem ao domínio da temperatura.

Tabela 18 - Resultados obtidos na verificação dos elementos (vigas e pilares) em situação de incêndio - Estado Limite Último (ELU)

Elementos	Perfil	Nº de lados expostos ao fogo	Temperaturas		Solicitações			Resistências 20 °C			Verificações			
			θ_a °C	θ_{cr} °C	$M_{fi,Sd}$ kN.m	$V_{fi,Sd}$ kN	$N_{fi,Sd}$ kN	$M_{fi,Rd}$ kN.m	$V_{fi,Rd}$ kN	$N_{fi,Rd}$ kN	Domínio da Resistência			Domínio da Temperatura
											$(M_{fi,Sd}/M_{fi,Rd})$	$(V_{fi,Sd}/V_{fi,Rd})$	$(N_{fi,Sd}/N_{fi,Rd})$	
V1	W360X58	3	774,66	778,62	87,93	54,11	-	49,72	55,08	-	1,77	0,98	-	0,99
V2	W360X58	3	774,66	778,62	175,86	108,22	-	49,72	55,08	-	3,54	1,96	-	0,99
V3	W360X58	3	774,66	778,62	175,86	108,22	-	49,72	55,08	-	3,54	1,96	-	0,99
V4	W360X58	3	774,66	778,62	87,93	54,11	-	49,72	55,08	-	1,77	0,98	-	0,99
V5	W410X75	3	762,56	763,32	270,6	108,2	-	82,38	85,93	-	3,28	1,26	-	0,99
V6	W410X75	3	762,56	763,32	270,6	108,2	-	82,38	85,93	-	3,28	1,26	-	0,99
P1	W150X13	4	833,56	840,08	-	-	162,33	-	-	13,89	-	-	11,69	0,99
P2	W150X13	4	833,56	840,08	-	-	162,33	-	-	13,89	-	-	11,69	0,99
P3	W150X13	4	833,56	840,08	-	-	162,33	-	-	13,89	-	-	11,69	0,99
P4	W150X13	4	833,56	840,08	-	-	162,33	-	-	13,89	-	-	11,69	0,99

Fonte: Próprios Autores (2017).

8.3 INFLUÊNCIA DA ELEVAÇÃO DA TEMPERATURA NA CAPACIDADE RESISTENTE DOS ELEMENTOS ESTRUTURAIS

A temperatura tem grande importância no comportamento dos elementos estruturais de aço. Sua elevação influi diretamente no comportamento dos mesmos, reduzindo, de forma acentuada, os valores das suas propriedades mecânicas e térmicas.

Analisando-se os resultados obtidos nos dimensionamentos à temperatura ambiente e em situação de incêndio da estrutura do mezanino, percebe-se uma drástica diminuição das capacidades resistentes dos elementos quando submetidos ao incêndio. A Tabela 19 apresenta os percentuais de redução das resistências dos elementos decorrentes da elevação da temperatura.

Tabela 19 - Percentual de redução da capacidade resistente dos elementos estruturais devido a elevação da temperatura

Elementos	Perfil	Percentual da Redução das Resistências		
		Momento Fletor Resistente (%)	Esforço Cortante Resistente (%)	Força Normal de Compressão Resistente (%)
V1	W360X58	78,44	84,60	-
V2	W360X58	78,44	84,60	-
V3	W360X58	78,44	84,60	-
V4	W360X58	78,44	84,60	-
V5	W410X75	76,16	82,95	-
V6	W410X75	76,13	82,95	-
P1	W150X13	-	-	94,41
P2	W150X13	-	-	94,41
P3	W150X13	-	-	94,41
P4	W150X13	-	-	94,41

Fonte: Próprios Autores (2017).

9 CONSIDERAÇÕES FINAIS

A estrutura de aço do mezanino analisado nos capítulos 6 e 7, constituída de perfis laminados, apresentou excelentes resultados nas verificações dos estados limites último e de serviço, realizadas à temperatura ambiente em conformidade com as prescrições da norma NBR 8.800 (ABNT, 2008). Tais resultados, conforme apresentados nas Tabelas 16 e 17, expressam um dimensionamento seguro e econômico, pois os elementos mais solicitados atingiram taxas de serviço entre 85 e 97% da capacidade total resistente dos perfis de aço.

Para o dimensionamento em situação de incêndio, aplicando-se o método simplificado de dimensionamento prescrito pela NBR 14.323 (ABNT, 2013) na verificação da capacidade resistente das barras aquecidas sem proteção contra a ação do fogo, observa-se a total incapacidade das mesmas em resistir as solicitações provenientes das ações térmicas. A partir dos dados apresentados na Tabela 18, observa-se que a segurança estrutural dos elementos analisados não é satisfeita em nenhum dos elementos para os domínios de temperatura e de resistência, eliminando-se, desta maneira, a possibilidade da adoção da hipótese de barras sem a proteção contra o fogo. Assim, fica evidente que uma solução, talvez a mais econômica, seria a adoção de revestimentos de proteção contra a ação do fogo nos elementos estruturais, tomando-se as formulações e considerações atribuídas a essa hipótese de projeto na aplicação do método simplificado de dimensionamento previsto pela NBR 14.323 (ABNT, 2013) para a verificação da capacidade resistente em situação de incêndio dos elementos estruturais. Os revestimentos de proteção, conforme apresentados no item 2.4 desta obra, se adequadamente dimensionados, conduzem a uma solução economicamente viável e segura.

Em resumo, pode-se propor, como possibilidade de um futuro trabalho, a análise dos elementos da estrutura do mezanino adotando-se, desta vez, a hipótese de barras com proteção contra a ação do fogo, de modo a avaliar a eficiência do revestimento adotado na melhora do desempenho e da capacidade resistente das barras de aço estrutura.

REFERÊNCIAS

- ABNT – ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 8681: Ações e segurança nas estruturas – procedimento.** Rio de Janeiro, 2003. 15p.
- _____. **NBR 8.800: Projeto de estruturas de aço e de estruturas mistas de aço e concreto de edifícios.** Rio de Janeiro, 2008. 237p.
- _____. **NBR 14.323: Projeto de estruturas de aço e de estruturas mistas de aço e concreto de edifícios em situação de incêndio.** Rio de Janeiro, 2013. 66p.
- _____. **NBR 14.432: Exigências de resistência ao fogo de elementos construtivos de edificações - Procedimento.** Rio de Janeiro, 2001. 14p.
- _____. **NBR 5628: Componentes construtivos estruturais -Determinação da resistência ao fogo.** Rio de Janeiro, 2001. 6p.
- _____. **NBR 6120: Cargas para cálculo de estruturas de edificações.** Rio de Janeiro, 1980. 5p.
- _____. **NBR 13.860: Glossário de termos relacionados com a segurança contra incêndios.** Rio de Janeiro, 1997. 10p.
- ANDRADE, C.C, **Proteção térmica em elementos estruturais de aço.** 2010. 191p. Dissertação apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Arquitetura e Urbanismo – Universidade Federal de Santa Catarina, Centro Tecnológico – UFSC, Santa Catarina.
- BELLEI, I.H. (2008). **Edifícios de Múltiplos Andares em Aço,** PINI Editora, Segunda Edição, São Paulo.2008. 558p.
- BERNARDES, G.F., **Dimensionamento em situação de incêndio de perfis em aço estruturais convencionais aço resistente ao fogo.** 2002. 283p. Dissertação apresentada ao Programa de Pós-Graduação Engenharia de Estrutura – Escola de Engenharia da Universidade Federal de Minas Gerais – UFMG, Belo Horizonte.
- BRENTANO, T. **A proteção contra incêndios no projeto de edificações.** 3. ed. Porto Alegre: edição do autor, 2015. 640p.
- COELHO, R.A. **Sistema construtivo empregado em estruturas metálicas.** Dissertação apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Estruturas da Escola de Engenharia da Universidade Federal de Minas Gerais - UFMG, Belo Horizonte, 2003. 157p.
- GUARUTHERM COMERCIAL & ENGENHARIA LTDA. Argamassa projetada estrutura metálica. Disponível em: < <http://www.guarutherm.com.br/argamassa-projetada-estrutura-metalica>>. Acesso em: 07 de set. 2017.
- GUSMÕES, E.Z et al. Temperatura de perfis de aço sem revestimentos contrafogo em situação de incêndio. **Revista da estrutura de aço.** São Paulo. Volume 1. nº3. p.133-146. Out.,2012.

INSTITUO SPRINKLER BRASIL. Brasil é o 3º país com maior número de mortes por incêndio. Newsletter, nº 5, 2015.

INSTITUTO SPRINKLER BRASIL. Estatísticas 2015. Disponível em: <<http://www.sprinklerbrasil.org.br/instituto-sprinkler-brasil/estatisticas/estatisticas-2015-anual/>>. Acesso em: 20 de ago.2017.

INTERNATIONAL ORGANIZATION FOR STANDARDIZATION (1999). **ISO 834: Fire-resistance tests: elements of building construction - part 1.1: general requirements for fire resistance testing**. Geneva, 25 p. (Revision of first edition ISO 834:1975).

MARTINS, M. M. **Dimensionamento de estruturas de aço em situação de incêndio**. 2000. 213 p. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) – Curso de Pós-Graduação em Engenharia Civil, Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte, 2000.

PANNONI, F.D. **Princípios da proteção de estruturas metálicas em situação de corrosão e incêndio**. 4º Ed. Brasil. 2007.90p.

SEITO, A. I. et al. **A segurança contra incêndio no Brasil**. São Paulo: Projeto Editora, 2008. 496p.

SILVA V.P. (2001). **Estruturas de Aço em Situação de Incêndio**, Ziguarate Editora, São Paulo. 2001. 249P.

SILVA, V. P. **Estruturas de aço em situação de incêndio**. São Paulo, Ziguarate. Editora, 2004.

SILVA, V.P et al. **Prevenção contra incêndio no projeto de arquitetura**. Rio de Janeiro: IABr/CBCA, 2010. 72p.

SILVA, V.P., **Estruturas de aço em situação de incêndio**. 1997. 170p. Tese (Doutorado em Engenharia Civil) –Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, Departamento de Engenharia de Estruturas e Fundações, São Paulo, 1997.

VARGAS, M.R. e SILVA, V.P. **Resistência ao fogo das estruturas de aço**. Rio de Janeiro: IBS/CBCA, 2003. 78p.

VIEIRA,L.L et al. **Análise da resistência dos elementos de aço em situação de incêndio: um estudo comparativo entre a ABNT NBR 14323:2013 e sua versão de 1999**. CILAMCE 2016 – XXXVII Iberian latin american congresso on computational methods in engineering. Brasília – DF – Brasil, 2016. 16 p.

ANEXOS

ANEXO A - Valores dos Coeficientes (γ_g) de Ponderação das Ações	143
ANEXO B - Parâmetros Referente ao Momento Fletor Resistente	144
ANEXO C - Valores dos Fatores (Ψ_j) de Combinação para as Ações Variáveis	145
ANEXO D - Deslocamentos Máximos conforme NBR 8.800 (ABNT, 2008)	146
ANEXO E - Valores dos Coeficientes (γ) de Ponderação das Resistência – NBR 8.880 (ABNT, 2008)	147
ANEXO F - Coeficientes de Flambagem por Flexão de Elementos Isolados	148
ANEXO G - Valores Fator de Redução (χ) associado a Resistência à Compressão ...	149
ANEXO H - Valores de $(b/t)_{lim}$	150
ANEXO I - Tabela de Bitolas de Perfis Estruturais Gerdau Aço Minas	151

ANEXO A – Valores dos Coeficientes (γ_g) de Ponderação das Ações

Combinações	Ações permanentes (γ_g) ^{a,c}					
	Diretas					Indiretas
	Peso próprio de estruturas metálicas	Peso próprio de estruturas pré-moldadas	Peso próprio de estruturas moldadas no local e de elementos construtivos industrializados e empuxos permanentes	Peso próprio de elementos construtivos industrializados com adições <i>in loco</i>	Peso próprio de elementos construtivos em geral e equipamentos	
Normais	1,25 (1,00)	1,30 (1,00)	1,35 (1,00)	1,40 (1,00)	1,50 (1,00)	1,20 (0)
Especiais ou de construção	1,15 (1,00)	1,20 (1,00)	1,25 (1,00)	1,30 (1,00)	1,40 (1,00)	1,20 (0)
Excepcionais	1,10 (1,00)	1,15 (1,00)	1,15 (1,00)	1,20 (1,00)	1,30 (1,00)	0 (0)
	Ações variáveis (γ_q) ^{a,d}					
	Efeito da temperatura ^b	Ação do vento	Ações truncadas ^e	Demais ações variáveis, incluindo as decorrentes do uso e ocupação		
Normais	1,20	1,40	1,20	1,50		
Especiais ou de construção	1,00	1,20	1,10	1,30		
Excepcionais	1,00	1,00	1,00	1,00		

^a Os valores entre parênteses correspondem aos coeficientes para as ações permanentes favoráveis à segurança; ações variáveis e excepcionais favoráveis à segurança não devem ser incluídas nas combinações.

^b O efeito de temperatura citado não inclui o gerado por equipamentos, o qual deve ser considerado ação decorrente do uso e ocupação da edificação.

^c Nas combinações normais, as ações permanentes diretas que não são favoráveis à segurança podem, opcionalmente, ser consideradas todas agrupadas, com coeficiente de ponderação igual a 1,35 quando as ações variáveis decorrentes do uso e ocupação forem superiores a 5 kN/m², ou 1,40 quando isso não ocorrer. Nas combinações especiais ou de construção, os coeficientes de ponderação são respectivamente 1,25 e 1,30, e nas combinações excepcionais, 1,15 e 1,20.

^d Nas combinações normais, se as ações permanentes diretas que não são favoráveis à segurança forem agrupadas, as ações variáveis que não são favoráveis à segurança podem, opcionalmente, ser consideradas também todas agrupadas, com coeficiente de ponderação igual a 1,50 quando as ações variáveis decorrentes do uso e ocupação forem superiores a 5 kN/m², ou 1,40 quando isso não ocorrer (mesmo nesse caso, o efeito da temperatura pode ser considerado isoladamente, com o seu próprio coeficiente de ponderação). Nas combinações especiais ou de construção, os coeficientes de ponderação são respectivamente 1,30 e 1,20, e nas combinações excepcionais, sempre 1,00.

^e Ações truncadas são consideradas ações variáveis cuja distribuição de máximos é truncada por um dispositivo físico, de modo que o valor dessa ação não possa superar o limite correspondente. O coeficiente de ponderação mostrado nesta Tabela se aplica a este valor-limite.

ANEXO B – Parâmetros Referente ao Momento Fletor Resistente

Tipo de seção e eixo de flexão	Estados-limites aplicáveis	M_r	M_{cr}	λ	λ_p	λ_r
Seções I e H com dois eixos de simetria e seções U não sujeitas a momento de torção, fletidas em relação ao eixo de maior momento de inércia	FLT	$(f_y - \sigma_t)W$ Ver Nota 5	Ver Nota 1	$\frac{L_b}{r_y}$	$1,76 \sqrt{\frac{E}{f_y}}$	Ver Nota 1
	FLM	$(f_y - \sigma_t)W$ Ver Nota 5	Ver Nota 6	$\frac{b/t}{\text{Ver Nota 8}}$	$0,38 \sqrt{\frac{E}{f_y}}$	Ver Nota 6
	FLA	$f_y W$	Viga de alma esbelta (Anexo H)	$\frac{h}{t_w}$	$3,76 \sqrt{\frac{E}{f_y}}$	$5,70 \sqrt{\frac{E}{f_y}}$
Seções I e H com apenas um eixo de simetria situado no plano médio da alma, fletidas em relação ao eixo de maior momento de inércia (ver Nota 9)	FLT	$(f_y - \sigma_t)W_c$ $\leq f_y W_t$ Ver Nota 5	Ver Nota 2	$\frac{L_b}{r_{yc}}$	$1,76 \sqrt{\frac{E}{f_y}}$	Ver Nota 2
	FLM	$(f_y - \sigma_t)W_c$ Ver Nota 5	Ver Nota 6	$\frac{b/t}{\text{Ver Nota 8}}$	$0,38 \sqrt{\frac{E}{f_y}}$	Ver Nota 6
	FLA	$f_y W$	Viga de alma esbelta (Anexo H)	$\frac{h_c}{t_w}$	$\frac{\frac{h_c}{h_b} \sqrt{\frac{E}{f_y}}}{\left(0,54 \frac{M_{pe}}{M_r} - 0,09\right)^2} \leq \lambda_r$	$5,70 \sqrt{\frac{E}{f_y}}$
Seções I e H com dois eixos de simetria e seções U fletidas em relação ao eixo de menor momento de inércia	FLM Ver Nota 3	$(f_y - \sigma_t)W$	Ver Nota 6	$\frac{b/t}{\text{Ver Nota 8}}$	$0,38 \sqrt{\frac{E}{f_y}}$	Ver Nota 6
	FLA Ver Nota 3	$f_y W_{ef}$ Ver Nota 4	$\frac{W_{ef}^2}{W} f_y$ Ver Nota 4	$\frac{h}{t_w}$	$1,12 \sqrt{\frac{E}{f_y}}$	$1,40 \sqrt{\frac{E}{f_y}}$
Seções sólidas retangulares fletidas em relação ao eixo de maior momento de inércia	FLT	$f_y W$	$\frac{2,00 C_b E}{\lambda} \sqrt{JA}$	$\frac{L_b}{r_y}$	$\frac{0,13 E}{M_{pe}} \sqrt{JA}$	$\frac{2,00 E}{M_r} \sqrt{JA}$
Seções-caixão e tubulares retangulares, duplamente simétricas, fletidas em relação a um dos eixos de simetria que seja paralelo a dois lados	FLT Ver Nota 7	$(f_y - \sigma_t)W$ Ver Nota 5	$\frac{2,00 C_b E}{\lambda} \sqrt{JA}$	$\frac{L_b}{r_y}$	$\frac{0,13 E}{M_{pe}} \sqrt{JA}$	$\frac{2,00 E}{M_r} \sqrt{JA}$
	FLM	$f_y W_{ef}$ Ver Nota 4	$\frac{W_{ef}^2}{W} f_y$ Ver Nota 4	$\frac{b/t}{\text{Ver Nota 8}}$	$1,12 \sqrt{\frac{E}{f_y}}$	$1,40 \sqrt{\frac{E}{f_y}}$
	FLA	$f_y W$	-	$\frac{h}{t_w}$	Ver Nota 10	$5,70 \sqrt{\frac{E}{f_y}}$

ANEXO C – Valores dos Fatores (Ψ_j) de Combinação para as Ações Variáveis

Ações		γ_{Ω}^a		
		Ψ_0	Ψ_1^d	Ψ_2^e
Ações variáveis causadas pelo uso e ocupação	Locais em que não há predominância de pesos e de equipamentos que permanecem fixos por longos períodos de tempo, nem de elevadas concentrações de pessoas ^{b)}	0,5	0,4	0,3
	Locais em que há predominância de pesos e de equipamentos que permanecem fixos por longos períodos de tempo, ou de elevadas concentrações de pessoas ^{c)}	0,7	0,6	0,4
	Bibliotecas, arquivos, depósitos, oficinas e garagens e sobrecargas em coberturas (ver B.5.1)	0,8	0,7	0,6
Vento	Pressão dinâmica do vento nas estruturas em geral	0,6	0,3	0
Temperatura	Variações uniformes de temperatura em relação à média anual local	0,6	0,5	0,3
Cargas móveis e seus efeitos dinâmicos	Passarelas de pedestres	0,6	0,4	0,3
	Vigas de rolamento de pontes rolantes	1,0	0,8	0,5
	Pilares e outros elementos ou subestruturas que suportam vigas de rolamento de pontes rolantes	0,7	0,6	0,4
^a Ver alínea c) de 4.7.5.3. ^b Edificações residenciais de acesso restrito. ^c Edificações comerciais, de escritórios e de acesso público. ^d Para estado-limite de fadiga (ver Anexo K), usar ψ_1 igual a 1,0. ^e Para combinações excepcionais onde a ação principal for sismo, admite-se adotar para ψ_2 o valor zero.				

ANEXO D – Deslocamentos Máximos conforme NBR 8.800 (ABNT, 2008)

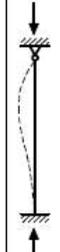
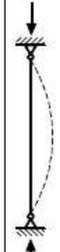
Descrição	δ^a
- Travessas de fechamento	$L/180^b$
	$L/120^{c,d}$
- Terças de cobertura ^{g)}	$L/180^e$
	$L/120^f$
- Vigas de cobertura ^{g)}	$L/250^h$
- Vigas de piso	$L/350^h$
- Vigas que suportam pilares	$L/500^h$
Vigas de rolamento: ⁱ⁾	
- Deslocamento vertical para pontes rolantes com capacidade nominal inferior a 200 kN	$L/600^i$
- Deslocamento vertical para pontes rolantes com capacidade nominal igual ou superior a 200 kN, exceto pontes siderúrgicas	$L/800^i$
- Deslocamento vertical para pontes rolantes siderúrgicas com capacidade nominal igual ou superior a 200 kN	$L/1000^i$
- Deslocamento horizontal, exceto para pontes rolantes siderúrgicas	$L/400$
- Deslocamento horizontal para pontes rolantes siderúrgicas	$L/600$
Galpões em geral e edifícios de um pavimento:	
- Deslocamento horizontal do topo dos pilares em relação à base	$H/300$
- Deslocamento horizontal do nível da viga de rolamento em relação à base	$H/400^{k,l}$
Edifícios de dois ou mais pavimentos:	
- Deslocamento horizontal do topo dos pilares em relação à base	$H/400$
- Deslocamento horizontal relativo entre dois pisos consecutivos	$h/500^m$
Lajes mistas	Ver Anexo Q
<p>^a L é o vão teórico entre apoios ou o dobro do comprimento teórico do balanço, H é a altura total do pilar (distância do topo à base) ou a distância do nível da viga de rolamento à base, h é a altura do andar (distância entre centros das vigas de dois pisos consecutivos ou entre centros das vigas e a base no caso do primeiro andar).</p> <p>^b Deslocamento paralelo ao plano do fechamento (entre linhas de tirantes, caso estes existam).</p> <p>^c Deslocamento perpendicular ao plano do fechamento.</p> <p>^d Considerar apenas as ações variáveis perpendiculares ao plano de fechamento (vento no fechamento) com seu valor característico.</p> <p>^e Considerar combinações raras de serviço, utilizando-se as ações variáveis de mesmo sentido que o da ação permanente.</p> <p>^f Considerar apenas as ações variáveis de sentido oposto ao da ação permanente (vento de sucção) com seu valor característico.</p> <p>^g Deve-se também evitar a ocorrência de empoçamento, com atenção especial aos telhados de pequena declividade.</p> <p>^h Caso haja paredes de alvenaria sobre ou sob uma viga, solidarizadas com essa viga, o deslocamento vertical também não deve exceder a 15 mm.</p> <p>ⁱ Valor não majorado pelo coeficiente de impacto.</p> <p>^j Considerar combinações raras de serviço.</p> <p>^k No caso de pontes rolantes siderúrgicas, o deslocamento também não pode ser superior a 50 mm.</p> <p>^l O diferencial do deslocamento horizontal entre pilares do pórtico que suportam as vigas de rolamento não pode superar 15 mm.</p> <p>^m Tomar apenas o deslocamento provocado pelas forças cortantes no andar considerado, desprezando-se os deslocamentos de corpo rígido provocados pelas deformações axiais dos pilares e vigas.</p>	

ANEXO E – Valores dos Coeficientes (γ) de Ponderação das Resistência – NBR 8.880 (ABNT, 2008)

Combinções	Aço estrutural ^a		Concreto γ_c	Aço das armaduras γ_s
	γ_a			
	Escoamento, flambagem e instabilidade γ_{a1}	Ruptura γ_{a2}		
Normais	1,10	1,35	1,40	1,15
Especiais ou de construção	1,10	1,35	1,20	1,15
Excepcionais	1,00	1,15	1,20	1,00

^a Inclui o aço de fôrma incorporada, usado nas lajes mistas de aço e concreto, de pinos e parafusos.

ANEXO F – Coeficientes de Flambagem por Flexão de Elementos Isolados

	(a)	(b)	(c)	(d)	(e)	(f)
A linha tracejada indica a linha elástica de flambagem						
Valores teóricos de K_x ou K_y	0,5	0,7	1,0	1,0	2,0	2,0
Valores recomendados	0,65	0,80	1,2	1,0	2,1	2,0
Código para condição de apoio	   	Rotação e translação impedidas Rotação livre, translação impedida Rotação impedida, translação livre Rotação e translação livres				

ANEXO H – Valores de $(b/t)_{lim}$

Elementos	Grupo	Descrição dos elementos	Alguns exemplos com indicação de b e t	$(b/t)_{lim}$
AA	1	<ul style="list-style-type: none"> Mesas ou almas de seções tubulares retangulares Lamelas e chapas de diafragmas entre linhas de parafusos ou soldas 		$1,40 \sqrt{\frac{E}{f_y}}$
	2	<ul style="list-style-type: none"> Almas de seções I, H ou U Mesas ou almas de seção-caixão Todos os demais elementos que não integram o Grupo 1 		$1,49 \sqrt{\frac{E}{f_y}}$
AL	3	<ul style="list-style-type: none"> Abas de cantoneiras simples ou múltiplas providas de chapas de travessamento 		$0,45 \sqrt{\frac{E}{f_y}}$
	4	<ul style="list-style-type: none"> Mesas de seções I, H, T ou U laminadas Abas de cantoneiras ligadas continuamente ou projetadas de seções I, H, T ou U laminadas ou soldadas Chapas projetadas de seções I, H, T ou U laminadas ou soldadas 		$0,56 \sqrt{\frac{E}{f_y}}$
	5	<ul style="list-style-type: none"> Mesas de seções I, H, T ou U soldadas^a 		$0,64 \sqrt{\frac{E}{(f_y/k_c)}}$
	6	<ul style="list-style-type: none"> Almas de seções T 		$0,75 \sqrt{\frac{E}{f_y}}$

^a O coeficiente k_c é dado em F.2.

ANEXO I – Tabela de Bitolas de Perfis Estruturais Gerdau Aço Minas

BITOLA mm x kg/m	Massa Linear kg/m	d mm	b ₁ mm	ESPESSURA		h mm	d' mm	Área cm ²	EIXO X - X				EIXO Y - Y				r _t cm	I _y cm ⁴	ESBELTEZ		C _w cm ⁶	u m ² /m	BITOLA in x lb/ft
				t _w mm	t _t mm				I _x cm ⁴	W _x cm ³	r _x cm	Z _x cm ³	I _y cm ⁴	W _y cm ³	r _y cm	Z _y cm ³			MESA-λ _y b ₁ /2t _t	ALMA-λ _w d'/t _w			
W 150 x 13,0	13,0	148	100	4,3	4,9	138	118	16,6	635	85,8	6,18	96,4	82	16,4	2,22	25,5	2,60	1,72	10,20	27,49	4.181	0,67	W 6 x 8,5
W 150 x 18,0	18,0	153	102	5,8	7,1	139	119	23,4	939	122,8	6,34	139,4	126	24,7	2,32	38,5	2,69	4,34	7,18	20,48	6.683	0,89	W 6 x 12
W 150 x 22,5 (H)	22,5	152	152	5,8	6,6	139	119	29,0	1229	161,7	6,51	179,6	387	50,9	3,65	77,9	4,10	4,75	11,52	20,48	20.417	0,88	W 6 x 15
W 150 x 24,0	24,0	160	102	6,6	10,3	139	115	31,5	1384	173,0	6,63	197,6	183	35,9	2,41	55,8	2,73	11,08	4,95	17,48	10.206	0,69	W 6 x 16
W 150 x 29,8 (H)	29,8	157	153	6,6	9,3	138	118	38,5	1739	221,5	6,72	247,5	556	72,6	3,80	110,8	4,18	10,95	8,23	17,94	30.277	0,90	W 6 x 20
W 150 x 37,1 (H)	37,1	162	154	8,1	11,6	139	119	47,8	2244	277,0	6,85	313,5	707	91,8	3,84	140,4	4,22	20,58	6,64	14,67	39.930	0,91	W 6 x 25
W 200 x 15,0	15,0	200	100	4,3	5,2	190	170	19,4	1305	130,5	8,20	147,9	87	17,4	2,12	27,3	2,55	2,05	9,62	39,44	8.222	0,77	W 8 x 10
W 200 x 19,3	19,3	203	102	5,8	6,5	190	170	25,1	1686	166,1	8,19	190,6	116	22,7	2,14	35,9	2,59	4,02	7,85	29,31	11.098	0,79	W 8 x 13
W 200 x 22,5	22,5	206	102	6,2	8,0	190	170	29,0	2029	197,0	8,37	225,5	142	27,9	2,22	43,9	2,63	6,18	6,38	27,42	13.868	0,79	W 8 x 15
W 200 x 26,6	26,6	207	133	5,8	8,4	190	170	34,2	2611	252,3	8,73	282,3	330	49,6	3,10	76,3	3,54	7,65	7,92	29,34	32.477	0,92	W 8 x 18
W 200 x 31,3	31,3	210	134	6,4	10,2	190	170	40,3	3168	301,7	8,86	338,6	410	61,2	3,19	94,0	3,60	12,59	6,57	26,50	40.822	0,93	W 8 x 21
W 200 x 35,9 (H)	35,9	201	165	6,2	10,2	181	161	45,7	3437	342,0	8,67	379,2	764	92,6	4,09	141,0	4,50	14,51	8,09	25,90	69.502	1,03	W 8 x 24
W 200 x 41,7 (H)	41,7	205	166	7,2	11,8	181	157	53,5	4114	401,4	8,77	448,6	901	108,5	4,10	165,7	4,53	23,19	7,03	21,86	83.948	1,04	W 8 x 28
W 200 x 46,1 (H)	46,1	203	203	7,2	11,0	181	161	58,6	4543	447,6	8,81	495,3	1535	151,2	5,12	229,5	5,58	22,01	9,23	22,36	141.342	1,19	W 8 x 31
W 200 x 52,0 (H)	52,0	206	204	7,9	12,6	181	157	66,9	5298	514,4	8,90	572,5	1784	174,9	5,16	265,8	5,61	33,34	8,10	19,85	166.710	1,19	W 8 x 35
HP 200 x 53,0 (H)	53,0	204	207	11,3	11,3	181	161	68,1	4977	488,0	8,55	551,3	1673	161,7	4,96	248,6	5,57	31,93	9,16	14,28	155.075	1,20	HP 8 x 36
W 200 x 59,0 (H)	59,0	210	205	9,1	14,2	182	158	76,0	6140	584,8	8,99	655,9	2041	199,1	5,18	303,0	5,64	47,69	7,22	17,32	195.418	1,20	W 8 x 40
W 200 x 71,0 (H)	71,0	216	206	10,2	17,4	181	161	91,0	7660	709,2	9,17	803,2	2537	246,3	5,28	374,5	5,70	81,66	5,92	15,80	249.976	1,22	W 8 x 48
W 200 x 86,0 (H)	86,0	222	209	13,0	20,6	181	157	110,9	9498	855,7	9,26	984,2	3139	300,4	5,32	458,7	5,77	142,19	5,07	12,06	317.844	1,23	W 8 x 58
W 200 x 100,0 (H)*	100,0	229	210	14,5	23,7	182	158	127,1	11355	991,7	9,45	1152,2	3664	349,0	5,37	533,4	5,80	212,61	4,43	10,87	385.454	1,25	W 8 x 62
W 250 x 17,9	17,9	251	101	4,8	5,3	240	220	23,1	2291	182,6	9,96	211,0	91	18,1	1,99	28,8	2,48	2,54	9,53	45,92	13.735	0,88	W 10 x 12
W 250 x 22,3	22,3	254	102	5,8	6,9	240	220	28,9	2939	231,4	10,09	267,7	123	24,1	2,06	38,4	2,54	4,77	7,39	37,97	18.629	0,89	W 10 x 15
W 250 x 25,3	25,3	257	102	6,1	8,4	240	220	32,6	3473	270,2	10,31	311,1	149	29,3	2,14	46,4	2,58	7,06	6,07	36,10	22.955	0,89	W 10 x 17
W 250 x 28,4	28,4	260	102	6,4	10,0	240	220	36,6	4046	311,2	10,51	357,3	178	34,8	2,20	54,9	2,62	10,34	5,10	34,38	27.636	0,90	W 10 x 19
W 250 x 32,7	32,7	258	146	6,1	9,1	240	220	42,1	4937	382,7	10,83	428,5	473	64,8	3,35	99,7	3,86	10,44	8,02	36,03	73.104	1,07	W 10 x 22
W 250 x 38,5	38,5	262	147	6,6	11,2	240	220	49,6	6057	462,4	11,05	517,8	594	80,8	3,46	124,1	3,93	17,63	6,56	33,27	93.242	1,08	W 10 x 26
W 250 x 44,8	44,8	266	148	7,6	13,0	240	220	57,6	7158	538,2	11,15	606,3	704	95,1	3,50	146,4	3,96	27,14	5,69	28,95	112.398	1,09	W 10 x 30
HP 250 x 62,0 (H)	62,0	246	256	10,5	10,7	225	201	79,6	8728	709,6	10,47	790,5	2995	234,0	6,13	357,8	6,89	33,46	11,96	19,10	414.130	1,47	HP 10 x 42
W 250 x 73,0 (H)	73,0	253	254	8,6	14,2	225	201	92,7	11257	889,9	11,02	983,3	3880	305,5	6,47	463,1	7,01	56,94	8,94	23,33	552.900	1,48	W 10 x 49
W 250 x 80,0 (H)	80,0	256	255	9,4	15,6	225	201	101,9	12550	980,5	11,10	1088,7	4313	338,3	6,51	513,1	7,04	75,02	8,17	21,36	622.878	1,49	W 10 x 54
HP 250 x 85,0 (H)	85,0	254	260	14,4	14,4	225	201	108,5	12280	966,9	10,64	1093,2	4225	325,0	6,24	499,6	7,00	82,07	9,03	13,97	605.403	1,50	HP 10 x 57
W 250 x 89,0 (H)	89,0	260	256	10,7	17,3	225	201	113,9	14237	1095,1	11,18	1224,4	4841	378,2	6,52	574,3	7,06	102,81	7,40	18,82	712.351	1,50	W 10 x 60
W 250 x 101,0 (H)	101,0	264	257	11,9	19,6	225	201	128,7	16352	1238,8	11,27	1395,0	5549	431,8	6,57	656,3	7,10	147,70	6,56	16,87	828.031	1,51	W 10 x 68
W 250 x 115,0 (H)	115,0	269	259	13,5	22,1	225	201	146,1	18920	1406,7	11,38	1597,4	6405	494,6	6,62	752,7	7,16	212,00	5,86	14,87	975.265	1,53	W 10 x 77
W 250 x 131,0 (H)*	131,0	275	261	15,4	25,1	225	193	167,8	22243	1617,7	11,51	1855,6	7448	570,7	6,66	870,7	7,21	321,06	5,20	12,52	1.161.225	1,54	W 10 x 88
W 250 x 149,0 (H)*	149,0	282	263	17,3	28,4	225	193	190,5	26027	1845,9	11,69	2137,5	8624	655,8	6,73	1001,7	7,27	462,06	4,63	11,17	1.384.436	1,55	W 10 x 100
W 250 x 167,0 (H)*	167,0	289	265	19,2	31,8	225	193	214,0	30110	2083,7	11,86	2435,3	9880	745,7	6,79	1140,2	7,33	644,95	4,17	10,07	1.631.156	1,57	W 10 x 112
W 310 x 21,0	21,0	303	101	5,1	5,7	292	272	27,2	3776	249,2	11,77	291,9	98	19,5	1,90	31,4	2,42	3,27	8,86	53,25	21.628	0,98	W 12 x 14
W 310 x 23,8	23,8	305	101	5,6	6,7	292	272	30,7	4346	285,0	11,89	333,2	116	22,9	1,94	36,9	2,45	4,65	7,54	48,50	25.594	0,99	W 12 x 16
W 310 x 28,3	28,3	309	102	6,0	8,9	291	271	36,5	5500	356,0	12,28	412,0	158	31,0	2,08	49,4	2,55	8,14	5,73	45,20	35.441	1,00	W 12 x 19
W 310 x 32,7	32,7	313	102	6,6	10,8	291	271	42,1	6570	419,8	12,49	485,3	192	37,6	2,13	59,8	2,58	12,91	4,72	41,12	43.612	1,00	W 12 x 22
W 310 x 38,7	38,7	310	165	5,8	9,7	291	271	49,7	8581	553,6	13,14	615,4	727	88,1	3,82	134,9	4,38	13,20	8,51	46,66	163.728	1,25	W 12 x 26
W 310 x 44,5	44,5	313	166	6,6	11,2	291	271	57,2	9997	638,8	13,22	712,8	855	103,0	3,87	158,0	4,41	19,90	7,41	41,00	194.433	1,26	W 12 x 30
W 310 x 52,0	52,0	317	167	7,6	13,2	291	271	67,0	11909	751,4	13,33	842,5	1026	122,9	3,91	188,8	4,45	31,81	6,33	35,61	236.422	1,27	W 12 x 35
W 310 x 60,0*	60,0	303	203	7,5	13,1	277	245	76,1	12908	852,0	13,42	944,3	1829	228,7	4,90	275,4	5,48	40,46	6,29	26,11	383.747	1,38	W 12 x 40

W 310 x 67,0*	67,0	306	204	8,5	14,6	277	245	85,3	14559	951,5	13,06	1060,4	2069	202,8	4,92	310,5	5,51	55,35	6,99	28,80	438.542	1,38	W 12 x 45
W 310 x 74,0*	74,0	310	205	9,4	16,3	277	245	95,1	16501	1064,6	13,17	1192,0	2344	180,2	4,96	350,5	5,54	75,51	7,75	32,64	504.715	1,39	W 12 x 50
HP 310 x 79,0 (H)	79,0	299	306	11,0	11,0	277	245	100,0	16316	1091,3	12,77	1210,1	5258	343,7	7,25	525,4	8,20	46,72	13,91	22,27	1.089.258	1,77	HP 12 x 53
HP 310 x 93,0 (H)	93,0	303	308	13,1	13,1	277	245	119,2	19682	1299,1	12,85	1450,3	6387	414,7	7,32	635,5	8,26	77,33	11,76	18,69	1.340.320	1,78	HP 12 x 63
W 310 x 97,0 (H)	97,0	308	305	9,9	15,4	277	245	123,6	22284	1447,0	13,43	1594,2	7286	477,8	7,68	725,0	8,38	92,12	9,90	24,77	1.558.682	1,79	W 12 x 65
W 310 x 107,0 (H)	107,0	311	306	10,9	17,0	277	245	136,4	24839	1597,3	13,49	1768,2	8123	530,9	7,72	806,1	8,41	122,68	9,00	22,48	1.754.271	1,80	W 12 x 72
HP 310x110,0 (H)	110,0	308	310	15,4	15,5	277	245	141,0	23703	1539,1	12,97	1730,6	7707	497,3	7,39	763,7	8,33	125,66	10,00	15,91	1.646.104	1,80	HP 12 x 74
W 310 x 117,0 (H)	117,0	314	307	11,9	18,7	277	245	149,9	27563	1755,6	13,56	1952,6	9024	587,9	7,76	893,1	8,44	161,61	8,21	20,55	1.965.950	1,80	W 12 x 79
HP 310x125,0 (H)	125,0	312	312	17,4	17,4	277	245	159,0	27076	1735,6	13,05	1963,3	8823	565,6	7,45	870,6	8,38	177,98	8,97	14,09	1.911.029	1,81	HP 12 x 84
W 310 x 129,0 (H)*	129,0	318	308	13,1	20,6	277	245	165,4	30819	1938,3	13,65	2167,6	10039	651,9	7,79	991,2	8,48	214,66	7,48	18,69	2.218.146	1,81	W 12 x 87
HP 310 x 132 (H)	132,0	314	313	18,3	18,3	277	245	167,5	28731	1830,0	13,10	2075,5	9371	598,8	7,48	922,4	8,41	206,79	8,55	13,41	2.044.445	1,82	HP 12 x 89
W 310 x 143,0 (H)*	143,0	323	309	14,0	22,9	277	245	182,5	34812	2155,6	13,81	2422,2	11270	729,4	7,86	1109,2	8,52	288,76	6,75	17,51	2.535.314	1,83	W 12 x 96
W 310 x 158,0 (H)*	158,0	327	310	15,5	25,1	277	245	200,7	38681	2365,8	13,88	2675,7	12474	804,8	7,88	1225,2	8,55	379,96	6,18	15,79	2.839.709	1,84	W 12 x 106
W 310 x 179,0 (H)*	179,0	333	313	18,0	28,1	277	245	227,9	44580	2677,5	13,99	3056,2	14378	918,7	7,94	1401,7	8,62	541,03	5,57	13,60	3.337.666	1,85	W 12 x 120
W 310 x 202,0 (H)*	202,0	341	315	20,1	31,8	277	245	258,3	52030	3051,6	14,19	3513,7	16589	1053,2	8,01	1608,7	8,69	777,99	4,95	12,21	3.959.374	1,87	W 12 x 136
W 360 x 32,9	32,9	349	127	5,8	8,5	332	308	42,1	8358	479,0	14,09	547,6	291	45,9	2,63	72,0	3,20	9,15	7,47	53,10	84.111	1,17	W 14 x 22
W 360 x 39,0	39,0	353	128	6,5	10,7	332	308	50,2	10331	585,3	14,35	667,7	375	58,6	2,73	91,9	3,27	15,83	5,98	47,32	109.551	1,18	W 14 x 26
W 360 x 44,6	44,6	352	171	6,9	9,8	332	308	57,7	12258	696,5	14,58	784,3	818	95,7	3,77	148,0	4,43	16,70	8,72	44,70	239.091	1,35	W 14 x 30
W 360 x 51,0	51,0	355	171	7,2	11,6	332	308	64,8	14222	801,2	14,81	899,5	968	113,3	3,87	174,7	4,49	24,65	7,37	42,75	284.994	1,36	W 14 x 34
W 360 x 58	58,0	358	172	7,9	13,1	332	308	72,5	16143	901,8	14,92	1014,8	1113	129,4	3,92	199,8	4,53	34,45	6,56	38,96	330.394	1,37	W 14 x 38
W 360 x 64,0	64,0	347	203	7,7	13,5	320	288	81,7	17890	1031,1	14,80	1145,5	1885	185,7	4,80	284,5	5,44	44,57	7,52	37,40	523.362	1,46	W 14 x 43
W 360 x 72,0	72,0	350	204	8,6	15,1	320	288	91,3	20169	1152,5	14,86	1285,9	2140	209,8	4,84	321,8	5,47	61,18	6,75	33,47	599.082	1,47	W 14 x 48
W 360 x 79,0	79,0	354	205	9,4	16,8	320	288	101,2	22713	1283,2	14,98	1437,0	2416	235,7	4,89	361,9	5,51	82,41	6,10	30,68	685.701	1,48	W 14 x 53
W 360 x 91,0 (H)	91,0	353	254	9,5	16,4	320	288	115,9	26755	1515,9	15,19	1680,1	4483	353,0	6,22	538,1	6,90	92,61	7,74	30,34	1.268.709	1,68	W 14 x 61
W 360 x 101,0 (H)	101,0	357	255	10,5	18,3	320	288	129,5	30279	1696,3	15,29	1888,9	5063	397,1	6,25	606,1	6,93	128,47	6,97	27,28	1.450.410	1,68	W 14 x 68
W 360 x 110,0 (H)	110,0	360	256	11,4	19,9	320	288	140,6	33155	1841,9	15,36	2059,3	5570	435,2	6,29	664,5	6,96	161,93	6,43	25,28	1.609.070	1,69	W 14 x 74
W 360 x 122,0 (H)	122,0	363	257	13,0	21,7	320	288	155,3	36599	2016,5	15,35	2269,8	6147	478,4	6,29	732,4	6,98	212,70	5,92	22,12	1.787.806	1,70	W 14 x 82
W 410 x 38,8	38,8	399	140	6,4	8,8	381	357	50,3	12777	640,5	15,94	736,8	404	57,7	2,83	90,9	3,49	11,69	7,95	55,84	153.190	1,32	W 16 x 26
W 410 x 46,1	46,1	403	140	7,0	11,2	381	357	59,2	15690	778,7	16,27	891,1	514	73,4	2,95	115,2	3,55	20,06	6,25	50,94	196.571	1,33	W 16 x 31
W 410 x 53,0	53,0	403	177	7,5	10,9	381	357	68,4	18734	929,7	16,55	1052,2	1009	114,0	3,84	176,9	4,56	23,38	8,12	47,63	387.194	1,48	W 16 x 36
W 410 x 60,0	60,0	407	178	7,7	12,8	381	357	76,2	21707	1066,7	16,88	1201,5	1205	135,4	3,98	209,2	4,65	33,78	6,95	46,42	467.404	1,49	W 16 x 40
W 410 x 67,0	67,0	410	179	8,8	14,4	381	357	86,3	24678	1203,8	16,91	1362,7	1379	154,1	4,00	239,0	4,67	48,11	6,22	40,59	538.546	1,50	W 16 x 45
W 410 x 75,0	75,0	413	180	9,7	16,0	381	357	95,8	27616	1337,3	16,98	1518,6	1559	173,2	4,03	269,1	4,70	65,21	5,63	36,80	612.784	1,51	W 16 x 50
W 410 x 85,0	85,0	417	181	10,9	18,2	381	357	108,6	31658	1518,4	17,07	1731,7	1804	199,3	4,08	310,4	4,74	94,48	4,97	32,72	715.165	1,52	W 16 x 57
W 460 x 52,0	52,0	450	152	7,6	10,8	428	404	66,6	21370	949,8	17,91	1095,9	634	83,5	3,09	131,7	3,79	21,79	7,04	53,21	304.837	1,47	W 18 x 35
W 460 x 60,0	60,0	455	153	8,0	13,3	428	404	76,2	25652	1127,6	18,35	1292,1	796	104,1	3,23	163,4	3,89	34,60	5,75	50,55	387.230	1,49	W 18 x 40
W 460 x 68,0	68,0	459	154	9,1	15,4	428	404	87,6	29851	1300,7	18,46	1495,4	941	122,2	3,28	192,4	3,93	52,29	5,00	44,42	461.163	1,50	W 18 x 46
W 460 x 74,0	74,0	457	190	9,0	14,5	428	404	94,9	33415	1462,4	18,77	1657,4	1661	174,8	4,18	271,3	4,93	52,97	6,55	44,89	811.417	1,64	W 18 x 50
W 460 x 82,0	82,0	460	191	9,9	16,0	428	404	104,7	37157	1615,5	18,84	1836,4	1862	195,0	4,22	303,3	4,96	70,62	5,97	40,81	915.745	1,64	W 18 x 55
W 460 x 89,0	89,0	463	192	10,5	17,7	428	404	114,1	41105	1775,6	18,98	2019,4	2093	218,0	4,28	339,0	5,01	92,49	5,42	38,44	1.035.073	1,65	W 18 x 60
W 460 x 97,0	97,0	466	193	11,4	19,0	428	404	123,4	44658	1916,7	19,03	2187,4	2283	236,6	4,30	368,8	5,03	115,05	5,08	35,44	1.137.180	1,66	W 18 x 65
W 460 x 106,0	106,0	469	194	12,6	20,6	428	404	135,1	48978	2088,6	19,04	2394,6	2515	259,3	4,32	405,7	5,05	148,19	4,71	32,05	1.260.063	1,67	W 18 x 71
W 530 x 66,0	66,0	525	165	8,9	11,4	502	478	83,6	34971	1332,2	20,46	1558,0	857	103,9	3,20	166,0	4,02	31,52	7,24	53,73	562.854	1,67	W 21 x 44
W 530 x 72,0	72,0	524	207	9,0	10,9	502	478	91,6	39969	1525,5	20,89	1755,9	1615	156,0	4,20	244,6	5,16	33,41	9,50	53,13	1.060.548	1,84	W 21 x 48
W 530 x 74,0	74,0	529	166	9,7	13,6	502	478	95,1	40969	1548,9	20,76	1804,9	1041	125,5	3,31	200,1	4,10	47,39	6,10	49,26	688.558	1,68	W 21 x 50
W 530 x 82,0	82,0	528	209	9,5	13,3	501	477	104,5	47569	1801,8	21,34	2058,5	2028	194,1	4,41	302,7	5,31	51,23	7,86	50,25	1.340.255	1,85	W 21 x 55
W 530 x 85,0	85,0	535	166	10,3	16,5	502	477	107,7	48453	1811,3	21,21	2099,8	1263	152,2	3,42	241,6	4,17	72,93	5,03	46,41	845.463	1,69	W 21 x 57
W 530 x 92,0	92,0	533	209	10,2	15,6	502	478	117,8	55157	2069,7	21,65	2359,8	2379	227,6	4,50	354,7	5,36	75,50	6,70	46,84	1.588.565	1,86	W 21 x 62

W 530 x 101,0	101,0	537	210	10,9	17,4	502	470	130,0	62198	2316,5	21,87	2640,4	2693	256,5	4,55	400,6	5,40	106,04	6,03	43,14	1.812.734	1,86	W 21 x 68
W 530 x 109,0	109,0	539	211	11,6	18,8	501	469	139,7	67226	2494,5	21,94	2847,0	2952	279,8	4,60	437,4	5,44	131,38	5,61	40,47	1.991.291	1,87	W 21 x 73
W 530 x 123,0*	123,0	544	212	13,1	21,2	502	470	157,8	76577	2815,3	22,03	3228,1	3378	318,7	4,63	500,2	5,47	186,69	5,00	35,85	2.300.400	1,88	W 21 x 83
W 530 x 138,0*	138,0	549	214	14,7	23,8	501	469	177,8	87079	3172,3	22,13	3653,3	3904	364,8	4,69	574,5	5,53	262,76	4,50	31,93	2.680.751	1,90	W 21 x 93
W 610 x 82,0	82,0	599	178	10,0	12,8	573	541	105,1	56628	1890,8	23,21	2219,9	1210	135,9	3,39	219,0	4,29	51,82	6,95	54,14	1.033.595	1,86	W 24 x 55
W 610 x 92,0	92,0	603	179	10,9	15,0	573	541	118,4	65277	2165,1	23,48	2535,8	1442	161,1	3,49	259,3	4,37	74,73	5,97	49,63	1.239.349	1,87	W 24 x 62
W 610 x 101,0	101,0	603	228	10,5	14,9	573	541	130,3	77003	2554,0	24,31	2922,7	2951	258,8	4,76	405,0	5,76	81,68	7,65	51,54	2.544.966	2,07	W 24 x 68
W 610 x 113,0	113,0	608	228	11,2	17,3	573	541	145,3	88196	2901,2	24,64	3312,9	3426	300,5	4,86	469,7	5,82	116,50	6,59	48,34	2.981.078	2,08	W 24 x 76
W 610 x 125,0	125,0	612	229	11,9	19,6	573	541	160,1	99184	3241,3	24,89	3697,3	3933	343,5	4,96	536,3	5,89	159,50	5,84	45,45	3.441.766	2,09	W 24 x 84
W 610 x 140,0	140,0	617	230	13,1	22,2	573	541	179,3	112619	3650,5	25,06	4173,1	4515	392,6	5,02	614,0	5,94	225,01	5,18	41,27	3.981.687	2,10	W 24 x 94
W 610 x 153,0*	153,0	623	229	14,0	24,9	573	541	196,5	125783	4038,0	25,30	4622,7	4999	436,6	5,04	683,3	5,94	303,29	4,60	38,66	4.456.995	2,11	W 24 x 103
W 610 x 155,0	155,0	611	324	12,7	19,0	573	541	198,1	129583	4241,7	25,58	4749,1	10783	665,6	7,38	1022,6	8,53	200,77	8,53	42,60	9.436.714	2,47	W 24 x 104
W 610 x 174,0	174,0	616	325	14,0	21,6	573	541	222,8	147754	4797,2	25,75	5383,3	12374	761,5	7,45	1171,1	8,58	286,88	7,52	38,63	10.915.665	2,48	W 24 x 117
W 610 x 195,0	195,0	622	327	15,4	24,4	573	541	250,1	168484	5417,5	25,96	6095,4	14240	870,9	7,55	1341,0	8,66	405,29	6,70	35,14	12.695.302	2,49	W 24 x 131
W 610 x 217,0	217,0	628	328	16,5	27,7	573	541	278,4	191395	6095,4	26,22	6868,8	16316	994,9	7,66	1531,6	8,73	570,21	5,92	32,76	14.676.643	2,51	W 24 x 146