



**INSTITUTO LATINO-AMERICANO DE
TECNOLOGIA, INFRAESTRUTURA E
TERRITÓRIO (ILATIT)**

ENGENHARIA CIVIL DE INFRAESTRUTURA

**ESTRUTURAS DE CONCRETO ARMADO EM
SITUAÇÃO DE INCÊNDIO**

ALYSSON PICCININ

Foz do Iguaçu
2022



**INSTITUTO LATINO-AMERICANO DE
TECNOLOGIA, INFRAESTRUTURA E
TERRITÓRIO (ILATIT)**

ENGENHARIA CIVIL DE INFRAESTRUTURA

**ESTRUTURAS DE CONCRETO ARMADO EM
SITUAÇÃO DE INCÊNDIO**

ALYSSON PICCININ

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado ao Instituto Latino-Americano de Tecnologia, Infraestrutura e Território da Universidade Federal da Integração Latino-Americana, como requisito parcial à obtenção do título de Bacharel em Engenharia Civil de Infraestrutura.

Orientador: Dr. André Jacomel Torii

Foz do Iguaçu
2022

ALYSSON PICCININ

**ESTRUTURAS DE CONCRETO ARMADO EM
SITUAÇÃO DE INCÊNDIO**

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado ao Instituto Latino-Americano de Tecnologia, Infraestrutura e Território da Universidade Federal da Integração Latino-Americana, como requisito parcial à obtenção do título de Bacharel em Engenharia Civil de Infraestrutura.

BANCA EXAMINADORA

Orientador: Dr. André Jacomel Torii
UNILA

Prof. Dr. César Winter de Mello
UNILA

Prof. Dr. Ulises Bobadilla Guadalupe
UNILA

Foz do Iguaçu, 20 de julho de 2022.

TERMO DE SUBMISSÃO DE TRABALHOS ACADÊMICOS

Nome completo do autor(a): _____

Curso: _____

Tipo de Documento	
(.....) graduação	(.....) artigo
(.....) especialização	(.....) trabalho de conclusão de curso
(.....) mestrado	(.....) monografia
(.....) doutorado	(.....) dissertação
	(.....) tese
	(.....) CD/DVD – obras audiovisuais
	(.....) _____

Título do trabalho acadêmico: _____

Nome do orientador(a): _____

Data da Defesa: ____/____/____

Licença não-exclusiva de Distribuição

O referido autor(a):

a) Declara que o documento entregue é seu trabalho original, e que o detém o direito de conceder os direitos contidos nesta licença. Declara também que a entrega do documento não infringe, tanto quanto lhe é possível saber, os direitos de qualquer outra pessoa ou entidade.

b) Se o documento entregue contém material do qual não detém os direitos de autor, declara que obteve autorização do detentor dos direitos de autor para conceder à UNILA – Universidade Federal da Integração Latino-Americana os direitos requeridos por esta licença, e que esse material cujos direitos são de terceiros está claramente identificado e reconhecido no texto ou conteúdo do documento entregue.

Se o documento entregue é baseado em trabalho financiado ou apoiado por outra instituição que não a Universidade Federal da Integração Latino-Americana, declara que cumpriu quaisquer obrigações exigidas pelo respectivo contrato ou acordo.

Na qualidade de titular dos direitos do conteúdo supracitado, o autor autoriza a Biblioteca Latino-Americana – BIUNILA a disponibilizar a obra, gratuitamente e de acordo com a licença pública *Creative Commons Licença 3.0 Unported*.

Foz do Iguaçu, ____ de _____ de _____.

Assinatura do Responsável

AGRADECIMENTO

Não seria possível começar sem primeiro agradecer à minha mãe por ter me dado o suporte necessário para concluir essa faculdade, sem ela eu não teria conseguido.

Agradeço aos meus professores por terem compartilhado seu vasto conhecimento nas mais variadas áreas da engenharia comigo, darei o meu máximo para colocar em prática tudo que foi me ensinado e com isso fazer com que a engenharia no Brasil seja cada vez mais valorizada.

Agradeço especialmente ao meu orientador André, não só por ter me ajudado na confecção deste trabalho mas também por toda sua contribuição durante minha graduação, as poucas matérias que tive o prazer de fazer com ele me inspiraram a buscar mais e mais conhecimento e a gostar tanto da área de cálculo estrutural.

Agradeço aos meus amigos por terem trilhado esse caminho ao meu lado tornando a graduação muito mais prazerosa e menos sofrida.

PICCININ, Alysson. **Estruturas de concreto armado em situação de incêndio**. 2022. 65 páginas. Trabalho de Conclusão de Curso de Engenharia Civil de Infraestrutura – Universidade Federal da Integração Latino-Americana, Foz do Iguaçu, 2022.

RESUMO

Com o objetivo de dimensionar estruturas cada vez mais seguras, devemos nos atentar as mais variadas situações que as edificações podem ser submetidas. Ações excepcionais como os incêndios estão cada vez mais corriqueiras no Brasil, de modo que devemos prevê-las no cálculo estrutural utilizando uma das metodologias disponíveis na norma brasileira ABNT NBR-15200:2012 para o dimensionamento de elementos em concreto armado em situação de incêndio. Seguindo as recomendações da norma supracitada, podemos garantir que a estrutura tenha função corta-fogo onde o calor não atravessa os elementos estruturais ao ponto de causar combustão no lado oposto ao incêndio e função de suporte, onde a estrutura resiste aos carregamentos mesmo com sua resistência reduzida em função das altas temperaturas. Em virtude da importância do tema, neste trabalho foram analisadas as lajes e vigas de uma edificação que seguiu o dimensionamento da ABNT NBR-6118:2014 para um tempo requerido de resistência ao fogo – TRRF – de 30, 60 e 90 minutos pelo método tabular e método simplificado e realizado uma comparação entre os métodos. Também foi feita uma análise do comportamento do braço de alavanca das lajes e vigas do projeto que permitiu encontrar expressões simplificadas que correlacionam diretamente a resistência em situação de incêndio com a temperatura na armadura.

Palavras-chave: NBR 15200. Concreto armado em situação de incêndio. Método tabular. TRRF. NBR 6118.

PICCININ, Alysson. **Reinforced concrete structures in fire situation**. 2022. 65 páginas. Trabalho de Conclusão de Curso de Engenharia Civil de Infraestrutura – Universidade Federal da Integração Latino-Americana, Foz do Iguaçu, 2022.

ABSTRACT

In order to design increasingly safe structures, we must pay attention to the most varied situations that buildings can be subjected to. Exceptional actions such as fires are becoming increasingly common in Brazil, so we must predict them in the structural design using one of the methodologies available in the Brazilian standard ABNT NBR-15200:2012 for the design of reinforced concrete elements in fire situations. Following the recommendations of the aforementioned standard, we can ensure that the structure has a fire function where the heat does not cross the structural elements to the point of causing combustion on the opposite side of the fire and a support function, where the structure resists the loads even with its strength reduced due to high temperatures. Due to the importance of the topic, this paper analyzed the slabs and beams of a building that followed the design of ABNT NBR-6118:2014 for the required fire resistance rating – FRR – of 30, 60 and 90 minutes by the tabular and simplified method and performed a comparison between the methods. An analysis of the behavior of the slabs and beams lever arm was also performed, which allowed to find simplified expressions that directly correlate the resistance in fire situation with the temperature in the steel reinforcement.

Key words: NBR 15200. Reinforced concrete in fire situation. Tabular method. FRR. NBR 6118.

PICCININ, Alysso. **Estructuras de hormigón armado en situación de incendio.** 2022. 65 páginas. Trabalho de Conclusão de Curso de Engenharia Civil de Infraestrutura – Universidade Federal da Integração Latino-Americana, Foz do Iguaçu, 2022.

RESUMEN

Para diseñar estructuras cada vez más seguras, debemos prestar atención a las más variadas situaciones a las que pueden estar sometidos los edificios. Las acciones excepcionales como los incendios son cada vez más comunes en Brasil, por lo que debemos predecirlas en el cálculo estructural utilizando una de las metodologías disponibles en la norma brasileña ABNT NBR-15200:2012 para el diseño de elementos de hormigón armado en situaciones de incendio. Siguiendo las recomendaciones de la citada norma, podemos asegurar que la estructura tiene una función cortafuego en la que el calor no atraviesa los elementos estructurales hasta el punto de provocar una combustión en el lado opuesto al fuego y una función de soporte, en la que la estructura resiste las cargas incluso con su resistencia reducida por las altas temperaturas. En virtud de la importancia del tema, en este trabajo se analizaron las losas y vigas de un edificio que seguía el dimensionamiento de la ABNT NBR-6118:2014 para un tiempo de resistencia al fuego - RF - de 30, 60 y 90 minutos por el método tabular y el método simplificado y se realizó una comparación entre los métodos. También se realizó un análisis del comportamiento del brazo de palanca de las losas y vigas del proyecto que permitió encontrar expresiones simplificadas que correlacionan directamente la resistencia en situación de incendio con la temperatura en la armadura.

Palabras clave: NBR 15200. Hormigón armado en situación de incendio. Método tabular. RF. NBR 6118.

LISTA DE ILUSTRAÇÕES

Figura 2.1 – Curva temperatura-tempo de um incêndio natural	14
Figura 2.2 – Condução de calor em uma laje	20
Figura 2.3 – Distâncias de c_1 e c_{1L}	22
Figura 2.4 – Par b/c_1 da VL16 do projeto (Viga bi-apoiada).....	23
Figura 2.5 – Balanceamento das forças no estado limite último de uma viga de concreto armado em situação de incêndio	26
Figura 2.6 – Centróide das armaduras	27
Figura 2.7 – Fluxograma para cálculo do momento fletor resistente em situação de incêndio para lajes e vigas	27
Figura 2.8 – Balanceamento das forças no estado limite último de uma uma laje nervurada de concreto armado	28
Figura 4.1 – Exemplo de levantamento de dados da L1 e L2 do Quadro 4.1	30

LISTA DE QUADROS

Quadro 2.1 – Coeficientes de ponderação para combinações de cálculo	27
Quadro 4.1 – Dados das lajes do pavimento superior para o método tabular	30
Quadro 4.2 – Dados das lajes do pavimento superior para o método simplificado .	32
Quadro 4.3 – Comparação das resistências das lajes para um TRRF 30 e situação normal	32
Quadro 4.4 – Comparação das resistências das lajes para um TRRF 60 e situação normal	33
Quadro 4.5 – Comparação das resistências das lajes para um TRRF 90 e situação normal	33
Quadro 4.6 – Comparação entre as solicitações em situação de incêndio e situação normal das lajes	34
Quadro 4.7 – Comparação dos resultados pelos dois métodos para as lajes no TRRF 30	38
Quadro 4.8 – Comparação dos resultados pelos dois métodos para as lajes no TRRF 60	38

Quadro 4.9 – Comparação dos resultados pelos dois métodos para as lajes no TRRF 90	39
Quadro 4.10 – Levantamento de dados das vigas para o método tabular	39
Quadro 4.11 – Levantamento de dados das vigas para o método simplificado.....	41
Quadro 4.12 – Comparação das solicitações em situação de incêndio e situação de temperatura ambiente para as vigas do pavimento superior.....	41
Quadro 4.13 – Comparação entre as resistências das vigas para TRRF 30 e situação normal	43
Quadro 4.14 – Comparação entre as resistências das vigas para TRRF 60 e situação normal	43
Quadro 4.15 – Comparação entre as resistências das vigas para TRRF 90 e situação normal	44
Quadro 4.16 – Comparação dos resultados pelos dois métodos para as vigas no TRRF 30.....	47
Quadro 4.17 – Comparação dos resultados pelos dois métodos para as vigas no TRRF 60.....	47
Quadro 4.18 – Comparação dos resultados pelos dois métodos para as vigas no TRRF 90.....	48

LISTA DE TABELAS

Tabela 2.1 – Coeficiente de redução da resistência do concreto em função da temperatura.....	17
Tabela 2.2 – Coeficiente de redução da resistência do aço passivo em função da temperatura.....	18
Tabela 2.3 – Dimensões mínimas para vigas biapoiadas	22
Tabela 2.4 – Dimensões mínimas para vigas contínuas ou vigas de pórtico.....	23
Tabela 2.5 – Dimensões mínimas para lajes nervuradas armadas em uma só direção	25

LISTA DE GRÁFICOS

Gráfico 2.1 – Curva temperatura-tempo de um incêndio padrão.....	15
Gráfico 2.2 – Coeficiente de redução da resistência do concreto em função da temperatura.....	17
Gráfico 2.3 – Coeficiente de redução da resistência para o aço em função da temperatura.....	19
Gráfico 2.4 – Variação da temperatura em uma laje para vários TRRF	21
Gráfico 2.5 – Combinações de bmin/c1 de vigas biapoiadas para diferentes TRRF	24
Gráfico 2.6 – Combinações de bmin/c1 de vigas contínuas para diferentes TRRF	24
Gráfico 2.7 – Combinações de bmin/c1 de lajes nervuradas armadas em uma só direção para diferentes TRRF	25
Gráfico 4.1 – Combinação b/c1 das lajes do pavimento superior.....	31
Gráfico 4.2 – Comparação entre as solicitações em situação de incêndio e situação normal das lajes do pavimento superior.....	34
Gráfico 4.3 – Comparação entre as capacidades resistentes das lajes do pavimento superior para diferentes TRRF e as solicitações em situação de incêndio	35
Gráfico 4.4 – Comportamento do braço de alavanca das lajes do pavimento superior para diferentes TRRF e para situação normal.....	36
Gráfico 4.5 – Relação Mri/Mrd e Ks das lajes do pavimento superior para diferentes TRRF	37
Gráfico 4.6 – Combinação b/c1 das vigas biapoiadas do pavimento superior	40
Gráfico 4.7 – Combinação b/c1 das vigas contínuas do pavimento superior	40
Gráfico 4.8 – Relação do momento fletor solicitante em situação de incêndio e em situação normal das vigas	42
Gráfico 4.9 – Comparação das solicitações com resistências das vigas do pavimento superior para diferentes TRRF	44
Gráfico 4.10 – Comportamento do braço de alavanca das vigas para diferentes TRRF	45
Gráfico 4.11 – Relação Mri/Mrd e Ks das vigas do pavimento superior para diferentes TRRF.....	46

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

ABNT	Associação Brasileira de Normas Técnicas
UNILA	Universidade Federal da Integração Latino-Americana
TRRF	Tempo requerido de resistência ao fogo
A_s	Área de aço
b	Largura
b_f	Largura efetiva da mesa
b_{\min}	Largura mínima
c_1	Distância do centro geométrico da armadura até a face inferior da viga
c_{1l}	Distância do centro geométrico da barra no canto da viga até a face lateral
d	Altura útil
f_{ck}	Resistência característica à compressão do concreto à temperatura ambiente
$f_{c,\theta}$	Resistência à compressão do concreto na temperatura theta
f_d	Valor de cálculo das ações para combinação última
F_{gk}	Valor característico das ações permanentes diretas
f_{qk}	Valor característico das ações variáveis diretas
f_{yk}	Resistência característica do aço à temperatura ambiente
$f_{y,\theta}$	Resistência do aço na temperatura theta
h	Altura
h'	Distância entre o centróide da armadura tracionada e a face mais próxima do elemento
$k_{c,\theta}$	Coefficiente de redução da resistência do concreto na temperatura theta
$k_{s,\theta}$	Coefficiente de redução da resistência do aço na temperatura theta
M_{rd}	Momento fletor resistente em situação normal
M_{ri}	Momento fletor resistente em situação de incêndio
R_{cci}	Força resultante da compressão no concreto
t	Tempo de exposição ao fogo
$T(y, t)$	Temperatura em um ponto afastado em y da face exposta ao calor de uma laje
$T_f(t)$	Temperatura dos gases no compartimento
T_0	Temperatura inicial

x	Profundidade da linha neutra
x_i	Profundidade da linha neutra em situação de incêndio
y	Distância do ponto à ser calculado até a face exposta ao fogo
Z_i	Braço de alavanca em situação de incêndio
α	Coefficiente que considera o tempo para elevação da temperatura na laje
α_c	Parâmetro de redução da resistência do concreto na compressão
γ_{ci}	Coefficiente de ponderação da resistência do concreto em situação de incêndio
γ_g	Coefficiente de ponderação para a ação permanente
γ_q	Coefficiente de ponderação para a ação variável
γ_{si}	Coefficiente de ponderação da resistência do aço em situação de incêndio
λ	Relação entre a profundidade y do diagrama retangular de compressão equivalente e a profundidade efetiva x da linha neutra
ψ_2	Fator de redução de combinação para situação de incêndio

SUMÁRIO

1 INTRODUÇÃO	12
1.1 PROBLEMA, HIPÓTESE E OBJETIVOS	13
2 REFERENCIAL TEÓRICO	14
2.1 INCÊNDIO	14
2.2 INCÊNDIO-PADRÃO	15
2.3 TEMPO REQUERIDO DE RESISTÊNCIA AO FOGO – TRRF	16
2.4 USO E OCUPAÇÃO	16
2.5 RESISTÊNCIA À COMPRESSÃO DO CONCRETO EM ALTAS TEMPERATURAS	16
2.6 RESISTÊNCIA AO ESCOAMENTO E MÓDULO DE ELASTICIDADE DO AÇO CA-50 E CA-60 PARA ARMADURA PASSIVA EM ALTAS TEMPERATURAS	18
2.7 COMBINAÇÕES DAS AÇÕES EM SITUAÇÃO DE INCÊNDIO	19
2.9 MÉTODO TABULAR PARA AS VIGAS E LAJES	21
2.10 MÉTODO SIMPLIFICADO DE CÁLCULO	25
3 METODOLOGIA.....	29
4 DESENVOLVIMENTO	30
4.1 VERIFICAÇÃO DAS LAJES PELO MÉTODO TABULAR	30
4.2 VERIFICAÇÃO DAS LAJES PELO MÉTODO SIMPLIFICADO	31
4.3 COMPARAÇÃO DOS RESULTADOS DAS LAJES.....	37
4.3 VERIFICAÇÃO DAS VIGAS PELO MÉTODO TABULAR.....	39
4.4 VERIFICAÇÃO DAS VIGAS PELO MÉTODO SIMPLIFICADO	41
4.5 COMPARAÇÃO DOS RESULTADOS DAS VIGAS.....	46
5 CONSIDERAÇÕES FINAIS	49
REFERÊNCIAS	50
APÊNDICES.....	51
ANEXOS.....	60

1 INTRODUÇÃO

A segurança contra incêndios de uma edificação é determinada por dois tipos de proteção, ativa e passiva. A proteção passiva, como o próprio nome sugere, é uma medida que age por si própria, não necessitando de um acionamento pelo usuário. Dentre elas está a proteção estrutural (ONO, 2019).

Por não emitir gases tóxicos quando exposto à altas temperaturas, nem de ser propagador de chama, o concreto tem sido considerado um bom material frente as ações provenientes de incêndios (COSTA; FIGUEIREDO; SILVA, 2002; METHA; MONTEIRO, 2008).

Entretanto, com o aumento da temperatura, o concreto se deteriora pela propagação de rachaduras e até lascamentos (COSTA; FIGUEIREDO; SILVA, 2002). Além disso, sob altas temperaturas ocorrem transformações químicas no cimento que podem diminuir ainda mais a resistência do concreto (METHA; MONTEIRO, 2008). Essa deterioração ocasiona um decréscimo da resistência à compressão e do módulo de elasticidade do concreto, do aço base e do aço de reforço (ABNT NBR 15200:2012) podendo levar a estrutura à ruína.

Segundo a NBR 15200 (ABNT, 2012), o objetivo da verificação de estruturas em situação de incêndio é limitar o risco à vida, à propriedade e à sociedade. Entretanto, nem sempre foi assim. Antes de ocorrerem casos com grande número de vítimas nos Estados Unidos da América (EUA), as técnicas difundidas para combate a incêndios tinham como objetivo principal apenas a proteção à propriedade. Isso se deve ao fato de que o primeiro *handbook* escrito com essa finalidade ter sido confeccionado por companhias de seguro (SEITO et al., 2008).

O Brasil seguiu a mesma trajetória dos EUA, onde foi necessário acontecer grandes catastrófes envolvendo incêndios para que as normas regulamentadoras e decretos estaduais e municipais comesçassem a sofrer mudanças significativas quanto a segurança das estruturas nessas situações. Dessas catastrofes, a mais marcante foi o incêndio no edifício Joelma, em São Paulo onde 187 pessoas perderam a vida e mais de 300 ficaram feridas (SEITO et al., 2008).

A NBR 6118 (ABNT, 2014) rege os requisitos necessários a se garantir em projeto, deixando claro no item 1.4 que não abrange os estados-limites provocados por determinadas situações como sismos, impactos, explosões e fogo.

Por mais que se tratem de situações extremas, algumas não são nem de

longe uma raridade a nossa realidade. Em 2018, em São Paulo, um edifício de 24 andares foi consumido pelas chamas na madrugada do dia primeiro de maio e colapsou pouco mais de uma hora sob a ação do sinistro (G1, 2018) e segundo o Instituto Sprinkler Brasil (2020), em matéria do ano de 2020, o número de incêndios estruturais noticiados pela mídia no Brasil aumentou em 44% comparado ao ano de 2019.

Portanto, para garantir a segurança das estruturas, apenas a NBR 6118 (ABNT, 2014) não é suficiente. É necessário utilizar normas complementares como a NBR 15200 (ABNT, 2012) que determina os requisitos necessários para a segurança em situação de incêndio e então realizar as mudanças necessárias em projeto para atender ambas.

1.1 PROBLEMA, HIPÓTESE E OBJETIVOS

Atualmente, dependendo do uso da edificação, o Corpo de Bombeiros exige mudanças específicas no projeto arquitetônico, elétrico e hidráulico para atender a situação de incêndio. Entretanto, no que tange ao projeto estrutural, a própria NBR 6118:2014 específica que não inclui em seus critérios de dimensionamento os requisitos exígieis para evitar os estados-limites gerados pela ação do fogo. Tendo em vista o aumento dos casos de incêndio no Brasil nos últimos anos, torna-se necessário a consideração da NBR 15200:2012 no dimensionamento da estrutura.

Hipótese: A consideração da norma de concreto sob situação de incêndio, NBR 15200:2012, pode alterar de maneira significativa o dimensionamento de elementos em concreto armado baseado apenas na NBR 6118:2014.

O objetivo desse estudo é realizar um comparativo entre os resultados do dimensionamento de elementos em concreto armado em temperatura ambiente pela NBR 6118:2014 e em situação de incêndio pela NBR 15200:2012.

Objetivos Específicos:

- Apresentar a metodologia determinada pela ABNT NBR-15200 para a verificação de estruturas de concreto armado sob situação de incêndio.
- Realizar a verificação das vigas e lajes para situação de incêndio de uma edificação dimensionada segundo a NBR 6118:2014.
- Comparar os resultados entre os dois dimensionamentos e apontar as mudanças necessárias no projeto para a garantia da segurança da estrutura sob situação de incêndio.

2 REFERENCIAL TEÓRICO

Para o entendimento deste trabalho, faz-se necessário o conhecimento de como os materiais envolvidos no dimensionamento se comportam sob situação de incêndio e como é definido o comportamento de um incêndio-padrão.

2.1 INCÊNDIO

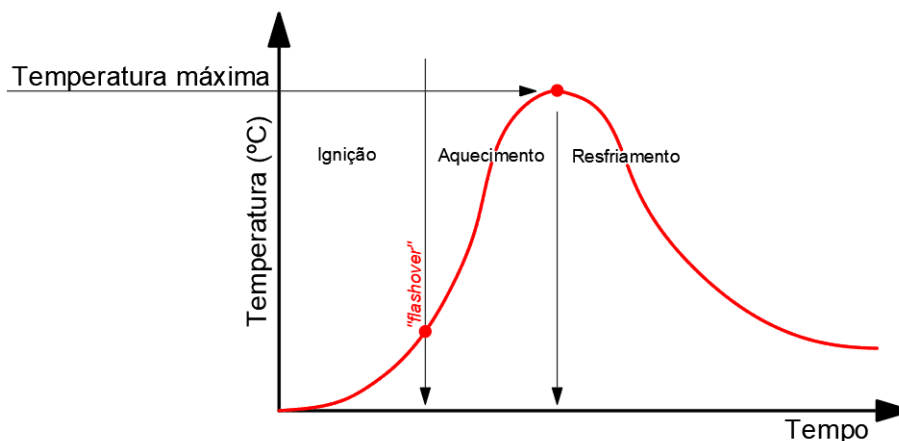
O incêndio é o fogo fora de controle (ABNT, 1997) e sua ocorrência varia conforme diversos fatores como dimensões do ambiente, exposição, distribuição, quantidade e características dos materiais combustíveis no local, ventilação e medidas de prevenções de incêndio adotadas em projeto e efetivamente executadas (ARAÚJO, 2014; SEITO et al., 2008).

Segundo Costa e Silva (2006), o incêndio é caracterizado por três fases, sendo a primeira chamada de ignição, fase que engloba o início da chama. A temperatura cresce lentamente e pode ser controlada por meio de sistemas de prevenção de incêndio, não havendo portanto, dano estrutural.

A fase de aquecimento se dá pelo aumento acentuado da temperatura chegando à valores onde todo e qualquer material combustível presente no compartimento entra em combustão. Fase em que ocorre o dano estrutural em virtude das elevadas temperaturas.

Como pode ser visto na figura 2.1, após a extinção do fogo e diminuição da temperatura do ambiente, vem a fase de resfriamento onde os elementos de concreto continuam a aumentar de temperatura por alguns minutos, em virtude da inércia térmica, para então começarem a resfriar.

Figura 2.1: Curva temperatura-tempo de um incêndio natural



Fonte: Adaptado de Costa e Silva (2006)

2.2 INCÊNDIO-PADRÃO

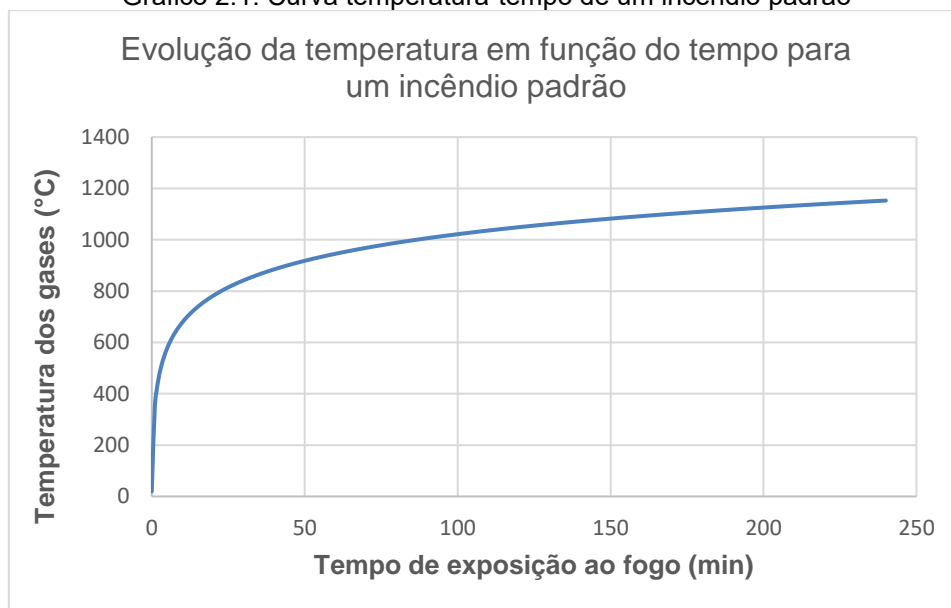
Em virtude da complexidade da situação e das diversas variáveis atribuídas ao problema, faz-se necessário a idealização de um modelo de incêndio por meio de curvas temperatura-tempo que avaliam a variação da temperatura em função da duração do incêndio (ARAÚJO, 2014; COSTA; FIGUEIREDO; SILVA, 2002; COSTA; SILVA, 2006).

Em geral, para estruturas em concreto armado sob situação de incêndio, admite-se uma curva temperatura-tempo ditada pela equação (ABNT, 2012; ARAÚJO, 2014; COSTA; SILVA, 2006):

$$T_f(t) = 345 * \log_{10}(8t + 1) + T_0 \quad (2.1)$$

onde $T_f(t)$ é a temperatura dos gases no compartimento dado em °C, $T_0 = 20^\circ\text{C}$ é a temperatura inicial e t é o tempo de exposição ao fogo, em minutos. Seu comportamento pode ser visualizado no gráfico 2.1.

Gráfico 2.1: Curva temperatura-tempo de um incêndio padrão



Fonte: Autoria própria

Entretanto, em virtude das curvas padronizadas nem sempre apresentarem comportamentos de incêndio realistas, diversos pesquisadores têm apresentado outros métodos com o objetivo de aumentar a precisão da análise (COSTA; FIGUEIREDO; SILVA, 2002; COSTA; SILVA, 2006).

Um dos métodos mais conhecidos internacionalmente, porém não muito utilizado no Brasil é o Método do Tempo Equivalente, que leva em conta as características

da edificação, como os materiais de vedação, a carga de incêndio em virtude do material combustível presente no compartimento e a altura da edificação (COSTA; SILVA, 2006).

O Corpo de Bombeiros do Estado do Paraná traz na Norma de Procedimento Técnico 008 (NPT-008) o Método do Tempo Equivalente como metodologia para redução do tempo requerido de resistência ao fogo da edificação, respeitando os valores mínimos para as categorias de uso e ocupação (BOMBEIROS, 2012).

2.3 TEMPO REQUERIDO DE RESISTÊNCIA AO FOGO – TRRF

O Corpo de Bombeiros do Estado do Paraná assim como a NBR 14432 determinam o tempo requerido de resistência ao fogo da edificação (TRRF), valor este que representa o tempo mínimo que o elemento estrutural deve resistir com base na curva de incêndio-padrão. A NPT-008, na tabela 1 do anexo A, determina o TRRF que deve ser usado no dimensionamento da estrutura sob situação de incêndio com base em algumas características da edificação como uso e ocupação, profundidade do subsolo, caso houver, e altura total o edifício.

2.4 USO E OCUPAÇÃO

O uso e ocupação de uma edificação indica para qual propósito ela é projetada ou utilizada. O código de Segurança Contra Incêndio e Pânico – CSCIP traz uma tabela com diversos tipos de uso e ocupação para classificação das edificações (CSCIP, 2018) anexada no final deste trabalho. Com base nesta classificação, utiliza-se então a tabela 1 do NPT-008 para a determinação do TRRF da edificação. Por exemplo, uma edificação multifamiliar de 60 metros de altura seria caracterizada na divisão A-2 pela tabela do CSCIP e teria um tempo requerido de resistência ao fogo de 120 minutos segundo a tabela 1 do NPT-008, por ter altura entre 30 e 80 metros.

2.5 RESISTÊNCIA À COMPRESSÃO DO CONCRETO EM ALTAS TEMPERATURAS

Segundo a NBR 15200:2012, a resistência à compressão do concreto decresce com o aumento da temperatura seguindo o comportamento descrito pela equação 2.2

$$f_{c,\theta} = k_{c,\theta} f_{ck} , \quad (2.2)$$

onde, $f_{c,\theta}$ é a resistência à compressão do concreto na temperatura θ , f_{ck} é a resistência característica à compressão do concreto à temperatura ambiente e $k_{c,\theta}$ é o coeficiente de redução da resistência do concreto na temperatura θ conforme tabela 2.1.

Para concretos com agregados predominantemente silicosos, o coeficiente de redução da resistência $k_{c,\theta}$ é mostrado na tabela 2.1 em função da temperatura no concreto:

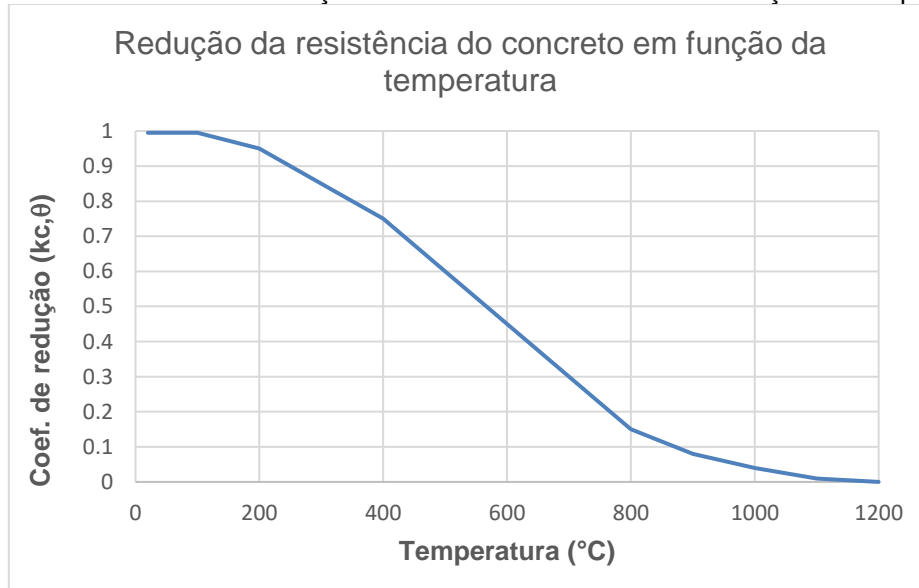
Tabela 2.1: Coeficiente de redução da resistência do concreto em função da temperatura

Temperatura do concreto	$k_{c,\theta}$
20	1,00
100	1,00
200	0,95
300	0,85
400	0,75
500	0,60
600	0,45
700	0,30
800	0,15
900	0,08
1000	0,04
1100	0,01
1200	0,00

Fonte: ABNT NBR 15200:2012

Com os dados da tabela 2.1 construiu-se o gráfico 2.2 para melhor representação dos resultados.

Gráfico 2.2: Coeficiente de redução da resistência do concreto em função da temperatura



Fonte: Autoria própria

2.6 RESISTÊNCIA AO ESCOAMENTO DO AÇO CA-50 E CA-60 PARA ARMADURA PASSIVA EM ALTAS TEMPERATURAS

Similar ao comportamento do concreto, a medida que a temperatura aumenta, a resistência ao escoamento do aço decresce com a função

$$f_{y,\theta} = k_{s,\theta} f_{yk} , \quad (2.3)$$

onde $f_{y,\theta}$ é a resistência do aço na temperatura θ , f_{yk} é a resistência característica do aço à temperatura ambiente e $k_{s,\theta}$ é o coeficiente de redução da resistência do aço na temperatura θ .

A tabela 2.2 fornece os valores das reduções da resistência do aço tracionado, tanto para o aço CA-50 quanto para o CA-60.

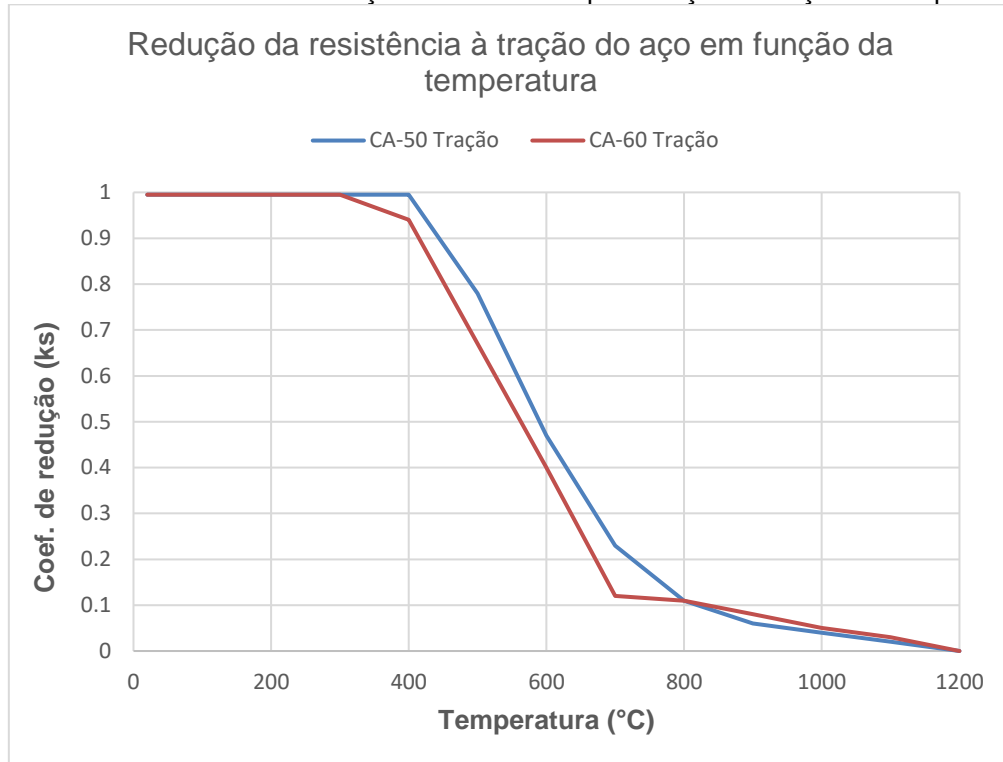
Tabela 2.2: Coeficiente de redução da resistência do aço passivo em função da temperatura

Temperatura do aço °C	Ks,θ	
	Tração	
	CA-50	CA-60
20	1.00	1.00
100	1.00	1.00
200	1.00	1.00
300	1.00	1.00
400	1.00	0.94
500	0.78	0.67
600	0.47	0.40
700	0.23	0.12
800	0.11	0.11
900	0.06	0.08
1000	0.04	0.05
1100	0.02	0.03
1200	0.00	0.00

Fonte: ABNT NBR 15200:2012

Com os dados da tabela 2.2 foi construído o gráfico 2.3 para melhor visualização do comportamento da resistência do aço. Nota-se que até uma temperatura de 400°C, o aço tracionado não sofre alterações na sua resistência, mas, perde resistência rápido a partir dessa temperatura apresentando decréscimo na resistência de mais de 50% com 600°C.

Gráfico 2.3: Coeficiente de redução da resistência para o aço em função da temperatura



Fonte: Autoria própria

2.7 COMBINAÇÕES DAS AÇÕES EM SITUAÇÃO DE INCÊNDIO

Dada a resistência da estrutura, esta deve ser capaz de suportar os carregamentos da ação de incêndio. Mas não é qualquer resistência, nem qualquer carregamento, devem ser utilizados valores de cálculo cujos coeficientes são determinados pela NBR-6118 (ABNT, 2014; ARAÚJO, 2014; CARINI, 2021). No que tange à ação proveniente de incêndios, utiliza-se os parâmetros de majoração das ações e diminuição das resistências para uma ação excepcional (ABNT, 2012, 2014; ARAÚJO, 2014).

A análise da estrutura em situação de incêndio, portanto, é similar ao dimensionamento em temperatura normal, bastando corrigir os valores das propriedades mecânicas dos materiais em função da temperatura que o elemento deve resistir.

Segundo a NBR-6118 a combinação de ações para o estado limite último para carregamentos excepcionais é definido por

$$f_d = \gamma_g F_{gk} + \gamma_q \psi_2 f_{qk}, \quad (2.4)$$

onde $\gamma_g = 1,2$, $\gamma_q = 1,0$ e $\psi_2 = 0,4$ para carregamento excepcional.

Nota-se que há um alívio do carregamento quando comparado a uma situação normal, cuja combinação é definida pela NBR-6118 por

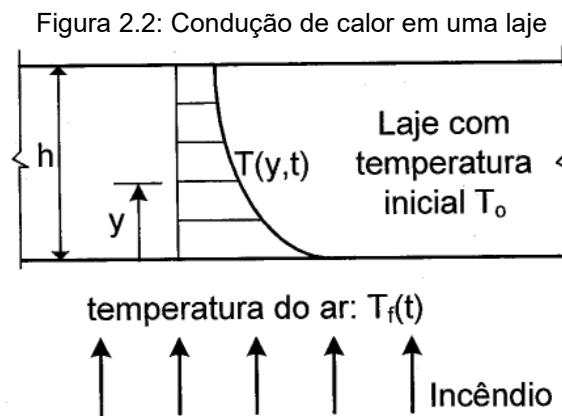
$$f_d = \gamma_g F_{gk} + \gamma_q f_{qk}, \quad (2.5)$$

onde $\gamma_g = 1,4$ e $\gamma_q = 1,4$.

2.8 DISTRIBUIÇÃO DA TEMPERATURA NA ESTRUTURA

Ao encontrar o tempo que o elemento precisa suportar sob ação do incêndio padrão e a temperatura do compartimento, é necessário entender como esse calor se distribui pelo elemento estrutural.

A figura 2.2 ilustra como ocorre a condução de calor ao longo da espessura de uma laje:



Segundo Araújo, a temperatura em um ponto afastado em y da face exposta ao calor pode ser estimado por

$$T = T_0 + [\alpha T_f(t) - T_0] \exp\left(\frac{-0,21y}{\sqrt{t}}\right), \quad (2.6)$$

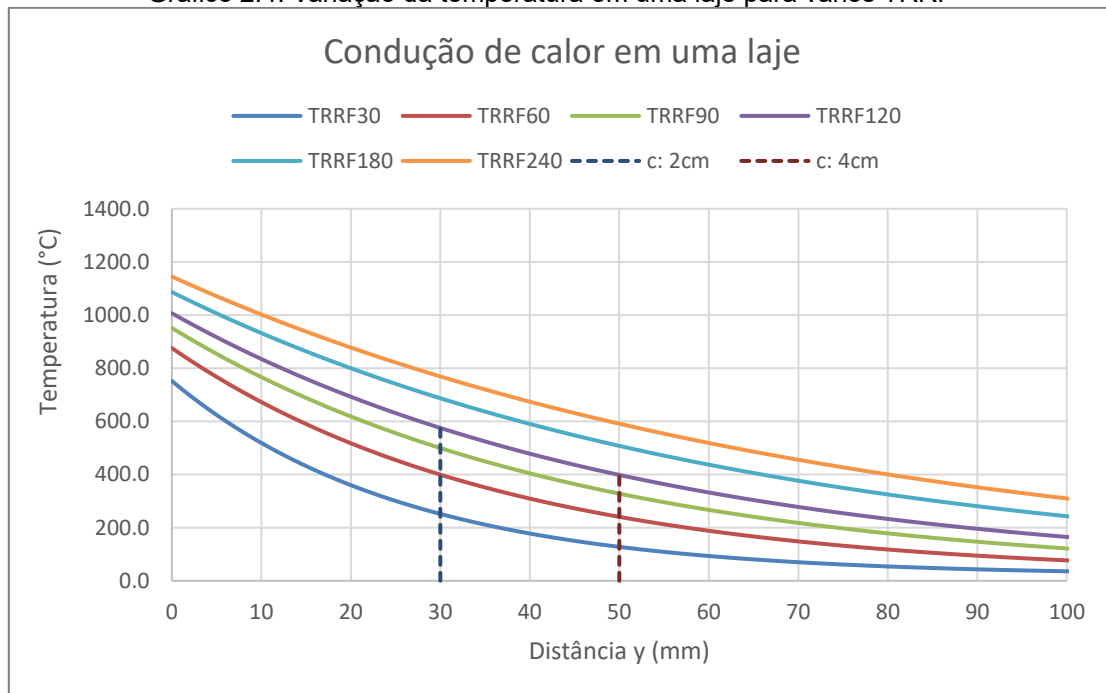
onde a distância y até a face exposta ao incêndio é dada em mm, t é o tempo de exposição ao fogo em minutos e α pode ser estimado por

$$\alpha = 0,73 + 0,048 \ln(t). \quad (2.7)$$

Com o emprego da equações 2.6 e 2.1 foi construído o gráfico 2.4, que

expressa a variação da temperatura em função da distância y até a face exposta ao fogo, para todos os tempos requeridos de resistência ao fogo.

Gráfico 2.4: Variação da temperatura em uma laje para vários TRRF



Fonte: Autoria própria

Analisando o gráfico 2.4, percebe-se a grande eficiência do cobrimento na proteção da armadura contra a propagação das altas temperaturas dos gases proveniente do incêndio.

Por exemplo, supondo que uma edificação precise resistir um tempo requerido de resistência ao fogo de 120 minutos, cuja variação da temperatura dentro de uma laje é representada pela curva roxa no gráfico 2.4. Caso a armadura esteja a 30mm de distância da face exposta ao fogo, a temperatura seria de aproximadamente 600 graus celsius no qual impactaria, segundo o gráfico 2.3, em mais de 50% de perda da resistência do aço. Por outro lado caso o cobrimento fosse um pouco maior e a armadura estivesse a 50mm de distância da face exposta ao fogo, a temperatura estaria em aproximadamente 400 graus celsius, não havendo impacto na resistência do aço.

2.9 MÉTODO TABULAR PARA AS VIGAS E LAJES

O método tabular, determinado pela NBR 15200:2012, tem como objetivo simplificar a verificação dos elementos em concreto submetidos a situação de incêndio.

Neste método, é necessário apenas atender a dimensões mínimas determinadas normativamente, levando como parâmetro o tipo de elemento estrutural e o TRRF.

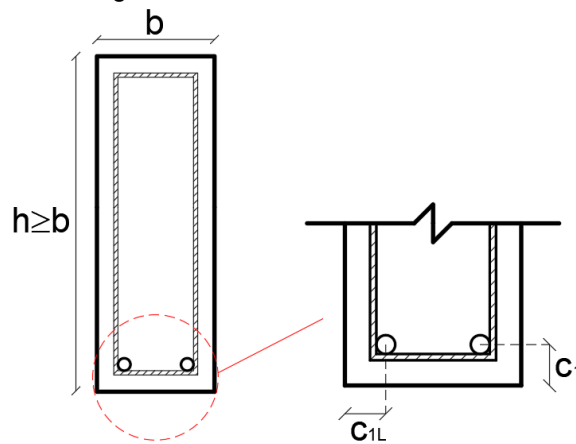
Para vigas e lajes, que são elementos onde a flexão é o esforço mais preponderante, os valores mínimos das dimensões podem ser verificados em tabelas. O esforço de cisalhamento não é considerado nas verificações de segurança pois em situação de incêndio, os elementos de concreto tendem a chegar ao estado limite último por flexão ou flexocompressão (ABNT, 2012).

Os valores de c_1 apresentados nas tabelas 2.3 e 2.4 se referem a distância do centro geométrico da armadura passiva até a face inferior da viga, c_{1L} é a distância do centro geométrico da barra no canto da viga até a face lateral mais próxima, b é a largura da viga e h a altura conforme mostrado na figura 2.3.

As tabelas foram confeccionadas admitindo aquecimento nos três lados da viga, tratando-se portanto de vigas sob lajes.

Em virtude da concentração de temperatura no canto inferior das vigas, quando esta tiver somente uma camada de armadura e largura não superior ao b_{\min} da coluna 3 da tabela 2.3 e na coluna 2 da tabela 2.4, conforme TRRF, a distância c_{1L} (Figura 2.3) deve ser 10mm maior do que o c_1 dado pelas supracitadas tabelas.

Figura 2.3: Distâncias de c_1 e c_{1L}



Fonte: Autoria própria

Tabela 2.3: Dimensões mínimas para vigas biapoiadas

TRRF (min)	Combinações de b_{\min}/c_1 mm/mm			
	1	2	3	4
30	80/25	120/20	160/15	190/15
60	120/40	160/35	190/30	300/25
90	140/60	190/45	300/40	400/35
120	190/68	240/60	300/55	500/50
180	240/80	300/70	400/65	600/60

Fonte: ABNT NBR 15200:2012

Tabela 2.4: Dimensões mínimas para vigas contínuas ou vigas de pórtico

TRRF (min)	Combinações de b_{min}/c_1 mm/mm			
	1	2	3	4
30	80/15	160/12	-	-
60	120/25	190/12	-	-
90	140/37	250/25	-	-
120	190/45	300/25	450/35	500/30
180	240/60	400/50	550/50	600/40

Fonte: ABNT NBR 15200:2012

Os valores indicados na tabela 2.4 só podem ser usados caso o coeficiente de redistribuição de momentos à temperatura ambiente respeitem os limites determinados pela ABNT NBR-6118, caso contrário, deve-se utilizar os valores da tabela 2.3 ou realizada uma análise mais elaborada.

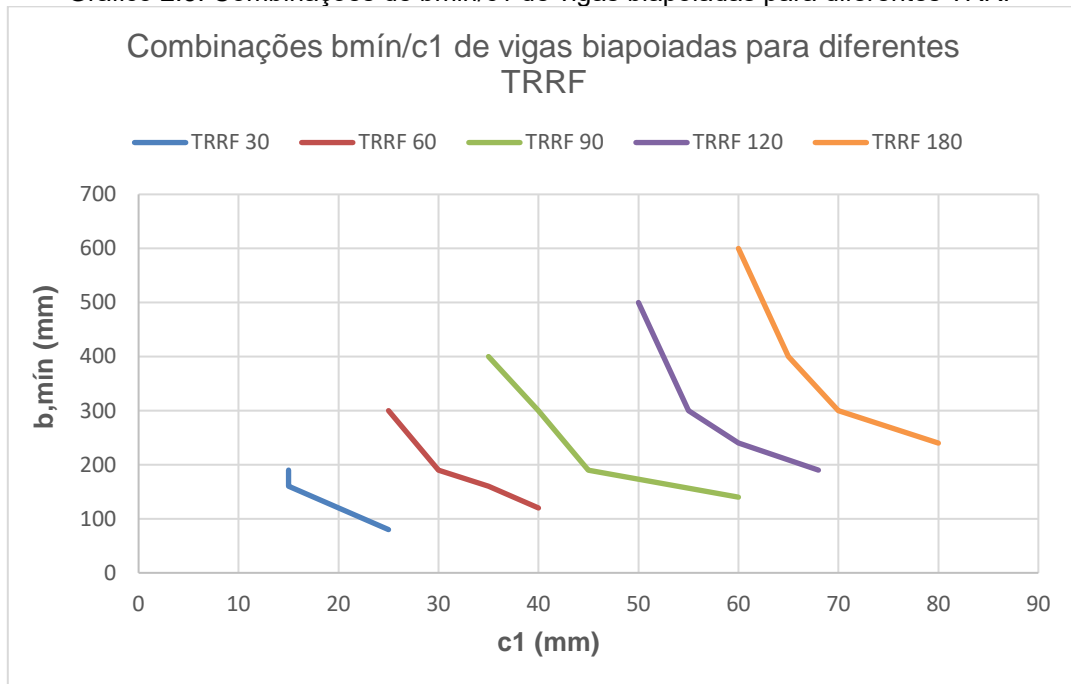
Com as combinações de b_{min} e c_1 dadas na tabela 2.3 e 2.4 os gráficos 2.5 e 2.6 foram construídos com o intuito de tornar o método tabular mais fácil de ser visualizado. As curvas representam os intervalos em que as combinações são válidas e para que uma laje ou viga satisfaça os requisitos de segurança do método tabular, seu respectivo par b/c_1 deve estar localizado à direita da curva do TRRF em análise.

Por exemplo, a viga VL 16 do projeto representada na figura 2.4 é uma viga bi-apoiada pois não apresenta continuidade. Como o valor do cobrimento adotado nas vigas do projeto foi de 2 centímetros, os estribos de 5 milímetros e no caso da VL16, o diâmetro do aço longitudinal de 10 milímetros, resultou em um c_1 de 30 milímetros. Plotando o valor de c_1 e da largura da viga cujo valor é de 140 milímetros no gráfico 2.5, nota-se que o ponto estaria situado à direita da curva de TRRF 30, significando que a viga cumpre os requisitos para um tempo requerido de resistência ao fogo de 30 minutos, mas, à esquerda da curva de TRRF 60, significando que, pelo método tabular, a viga não é adequada para um tempo requerido de resistência ao fogo dessa magnitude.

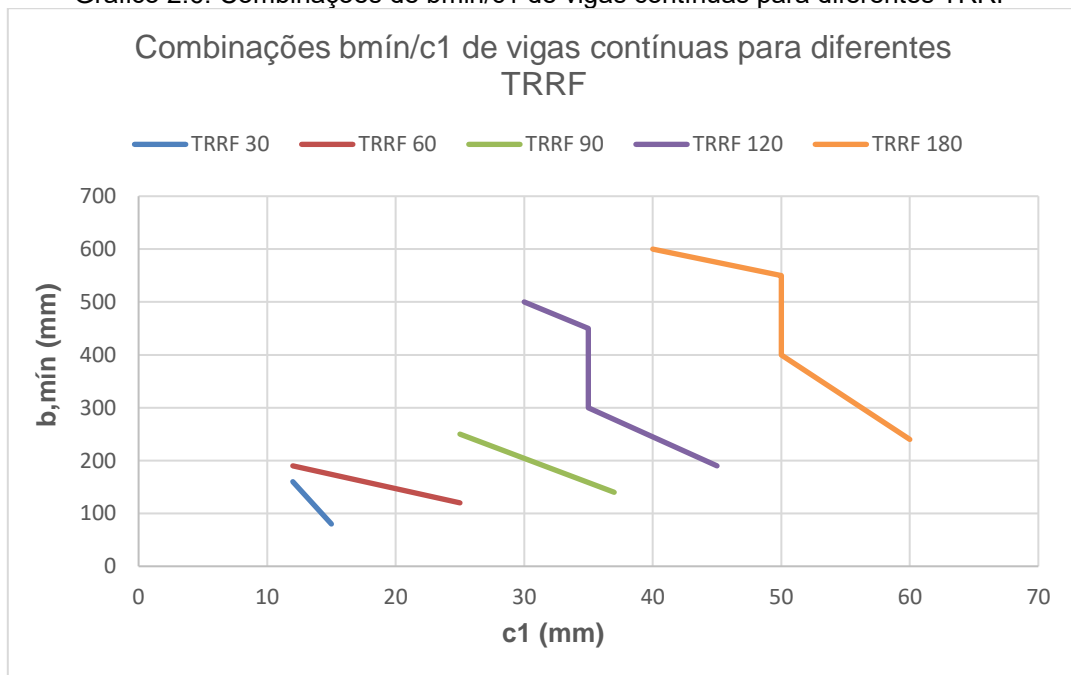
Figura 2.4: Par b/c_1 da VL16 do projeto (Viga bi-apoiada)



Fonte: Aatoria própria

Gráfico 2.5: Combinações de $b_{mín}/c_1$ de vigas biapoiadas para diferentes TRRF

Fonte: Autoria própria

Gráfico 2.6: Combinações de $b_{mín}/c_1$ de vigas contínuas para diferentes TRRF

Fonte: Autoria própria

Para o caso das lajes treliçadas, a ABNT NBR 15200:2012 não traz uma tabela específica com os valores mínimos das combinações de $b_{mín}/c_1$, entretanto, aponta alguns valores na qual foram utilizados para a confecção da tabela 2.5. Importante ressaltar que a garantia da propriedade da laje de corta fogo não é garantida pelo método tabular, devendo portanto, para este fim, utilizar de metodologia mais apropriada.

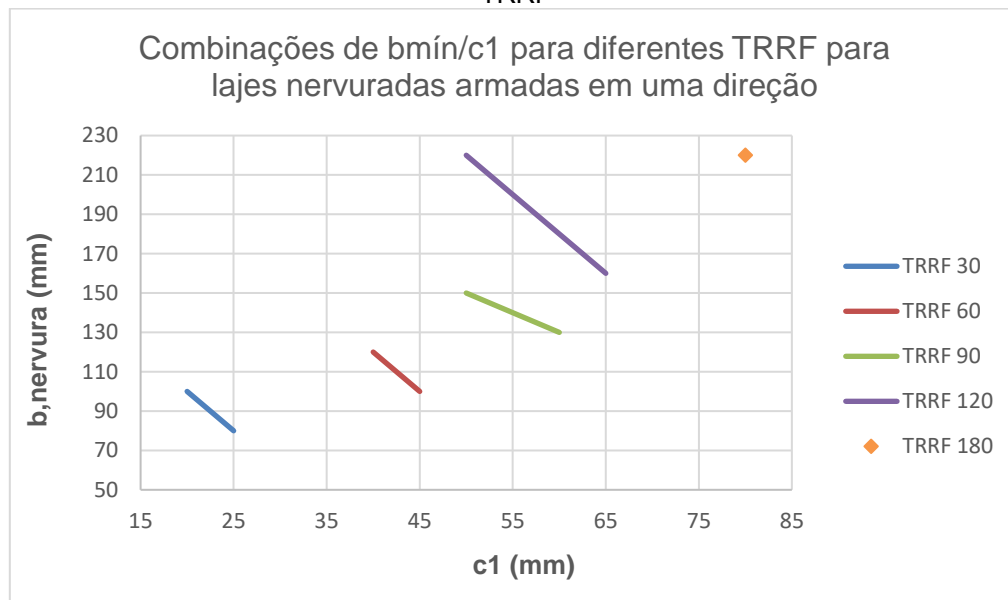
Tabela 2.5: Dimensões mínimas para lajes nervuradas armadas em uma só direção

TRRF (min)	Combinações de b_{min}/c_1 mm/mm		Capa (mm)
	1	2	
30	80/25	100/20	10
60	100/45	120/40	20
90	130/60	150/50	30
120	160/65	220/50	40
180	220/80	-	55

Fonte: Adaptado de ABNT NBR 15200:2012

De maneira similar ao realizado com as tabelas 2.3 e 2.4, o gráfico 2.7 foi construído utilizando os intervalos limites determinados pela tabela 2.5.

Gráfico 2.7: Combinações de b_{min}/c_1 de lajes nervuradas armadas em uma só direção para diferentes TRRF



Fonte: Autoria própria

2.10 MÉTODO SIMPLIFICADO DE CÁLCULO

Segundo a ABNT NBR:15200 as hipóteses de cálculo do método simplificado são:

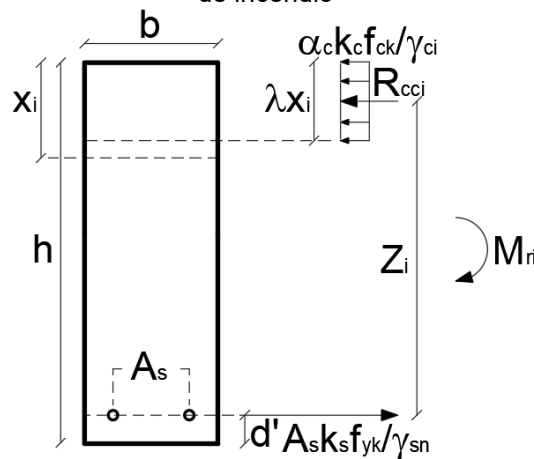
- A solicitação de cálculo pode ser calculada conforme equação 2.4;
- A capacidade resistente do elemento estrutural pode ser calculada baseado em uma distribuição de temperatura na seção transversal para um dado TRRF, podendo essa distribuição ser retirada da literatura técnica ou calculada conforme Anexo F da mesma norma;
- A capacidade resistente pode ser calculada pelos critérios estabelecidos pela ABNT

NBR 6118:2014 para situação normal (temperatura ambiente) considerando os coeficientes que reduzem a resistência do concreto e do aço em função da temperatura, determinados pelos gráficos 2.2 e 2.3, respectivamente.

Para elementos de concreto armado onde a solitação é de flexão, o cálculo da capacidade resistente no estado limite último é determinado pelas equações de somatório de forças e somatório de momentos na seção transversal, com o concreto atuando na parte comprimida e o aço trabalhando na parte tracionada.

O esquema do balanceamento das forças no estado limite último de uma seção retangular de concreto armado para a situação de incêndio está representado na figura 2.5.

Figura 2.5: Balanceamento das forças no estado limite último de uma viga de concreto armado em situação de incêndio



Fonte: Autoria própria

O momento fletor resistente em situação de incêndio pode ser obtido pelo equilíbrio de momentos na posição da resultante da compressão no concreto R_{cci} resultando na equação 2.8.

$$\frac{A_s k_s f_{yk}}{\gamma_{si}} Z_i = M_{ri}, \quad (2.8)$$

com $Z_i = d - 0,5\lambda x_i$. A profundidade da linha neutra x_i é determinada pelo equilíbrio das forças.

$$\lambda b x_i \left(\alpha_c \frac{k_c f_{ck}}{\gamma_{ci}} \right) = A_s \frac{k_s f_{yk}}{\gamma_{si}}, \quad (2.9)$$

onde γ_{ci} e γ_{si} são os coeficientes parciais de segurança para a resistência do concreto e do aço na situação excepcional, respectivamente, conforme quadro 2.1.

Quadro 2.1: Coeficientes de ponderação para combinações de cálculo

Combinações	Concreto γ_c	Aço γ_s
Normais	1.4	1.15
Especiais ou de construção	1.2	1.15
Excepcionais	1.2	1.0

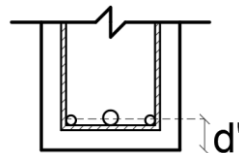
Fonte: ABNT NBR 6118:2014

O cálculo da altura útil d é dada pela equação 2.10.

$$d = h - d', \quad (2.10)$$

onde d' é a distância do centróide da armadura longitudinal até a face inferior da viga representado na figura 2.6.

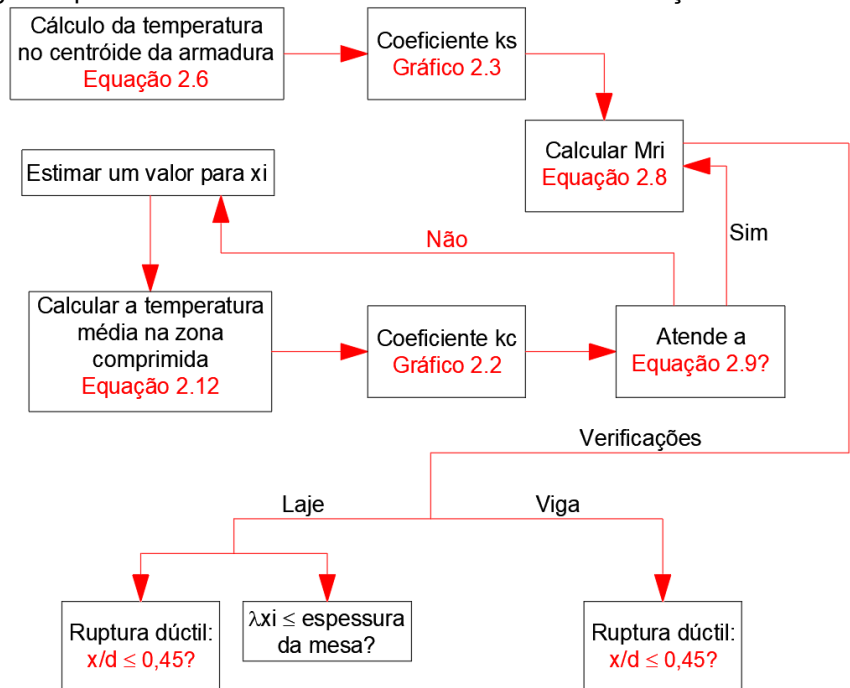
Figura 2.6: Centróide das armaduras



Fonte: Autoria própria

Em decorrência de haver apenas duas equações de equilíbrio – somatório de momentos e de forças – e haver três incógnitas (M_{ri} , x_i e k_c) é necessário empregar um processo iterativo. Os passos para o cálculo do M_{ri} são descritos na figura 2.7.

Figura 2.7: Fluxograma para cálculo do momento fletor resistente em situação de incêndio para lajes e vigas



Caso uma das verificações não seja cumprida, a análise é inválida.

Caso a verificação de ductilidade não seja cumprida, a análise é inválida.

Fonte: Autoria própria

O cálculo da temperatura média na zona comprimida é feito integrando a equação 2.6

$$T_{med} = \int T_0 + [\alpha T_f(t) - T_0] \exp\left(\frac{-0,21\sqrt{y}}{\sqrt{t}}\right) dy . \quad (2.11)$$

Adotando $a = T_0$, $b = \alpha T_f(t) - T_0$ e $c = \frac{-0,21\sqrt{y}}{\sqrt{t}}$ e integrando no intervalo $[\lambda x_i, 0]$, tem-se,

$$T_{med} = \int_0^{\lambda x_i} a + b \cdot \exp(c)$$

resultando na equação 2.12,

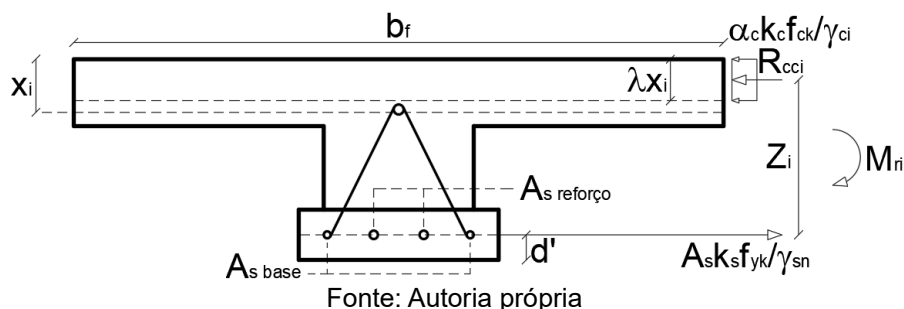
$$T_{med} = a + \frac{b}{c \cdot \lambda x_i} [-1 + \exp(c \cdot \lambda x_i)]. \quad (2.12)$$

Com o momento fletor resistente de cálculo em situação de incêndio é feita a comparação com as solicitações para um carregamento excepcional. A segurança é garantida quando a resistência de cálculo é maior ou igual a solicitação de cálculo.

Vale ressaltar que as lajes e vigas também precisam apresentar comportamento dúctil frente ao momento de ruptura. Para garantir essa característica a NBR-6118 impoe um limite para a profundidade da linha neutra no estado limite último dado por $x/d \leq 0,45$ para concretos com $f_{ck} \leq 50\text{Mpa}$.

O cálculo da capacidade resistente da laje treliçada se baseia na mesma hipótese para o caso das vigas. Assim, dada as dimensões da seção transversal o dimensionamento é idêntico ao apresentado para as seções retangulares, com duas modificações: a largura da laje no dimensionamento é a largura efetiva da mesa b_f e o valor de λx_i deve ser menor que a espessura da capa. O esquema do balanceamento das forças pode ser conferido na figura 2.8 onde foi admitido a posição da linha neutra dentro da mesa, situação mais comum no caso de lajes treliçadas.

Figura 2.8: Balanceamento das forças no estado limite último de uma uma laje nervurada de concreto armado



3 METODOLOGIA

Neste trabalho foi feito um estudo de caso de um projeto realizado em um curso de concreto armado e consiste em um sobrado de três pavimentos (térreo, superior e volume) com lajes pré-fabricadas de vigotas treliçadas.

Primeiramente, fez-se o levantamento de dados das seções das lajes e vigas, principalmente a largura e a distância do centróide da armadura até a face exposta ao fogo para a utilização do método tabular.

Para o método simplificado os valores de área de aço, diâmetro das bitolas utilizadas – tanto para armadura longitudinal quanto para transversal – e resistência do concreto foram todos adquiridos pelo projeto estrutural. Já os valores das solicitações foram pegos diretamente pelo software utilizado no projeto usando a combinação de ações determinada pela NBR 6118:2014.

Fez-se as comparações dos resultados de ambos os métodos e análise do braço de alavanca das vigas e lajes em situação de incêndio.

4 DESENVOLVIMENTO

4.1 VERIFICAÇÃO DAS LAJES PELO MÉTODO TABULAR

Para a análise das lajes treliçadas pelo método tabular é necessário saber a largura da vigota, a posição do centróide da armadura e a espessura da capa de concreto, mostradas no quadro 4.1 para cada laje da edificação. Importante ressaltar que o cobrimento adotado nas lajes foi de 15 milímetros e o concreto de 25 Mpa.

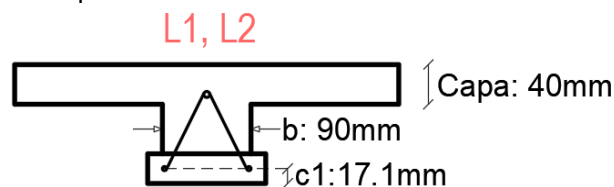
Quadro 4.1: Dados das lajes do pavimento superior para o método tabular

Levantamento de dados das lajes para o método tabular			
Laje	b (mm)	c1 (mm)	Capa (mm)
L1	90	17.1	40
L2		17.1	
L3		17.3	
L4		17.1	
L5		17.1	
L6		17.3	
L7		17.3	
L8		17.7	
L9		18.6	
L10		17.1	

Fonte: Autoria própria

O detalhamento das lajes podem ser conferidos no apêndice deste trabalho.

Figura 4.1: Exemplo de levantamento de dados da L1 e L2 do Quadro 4.1

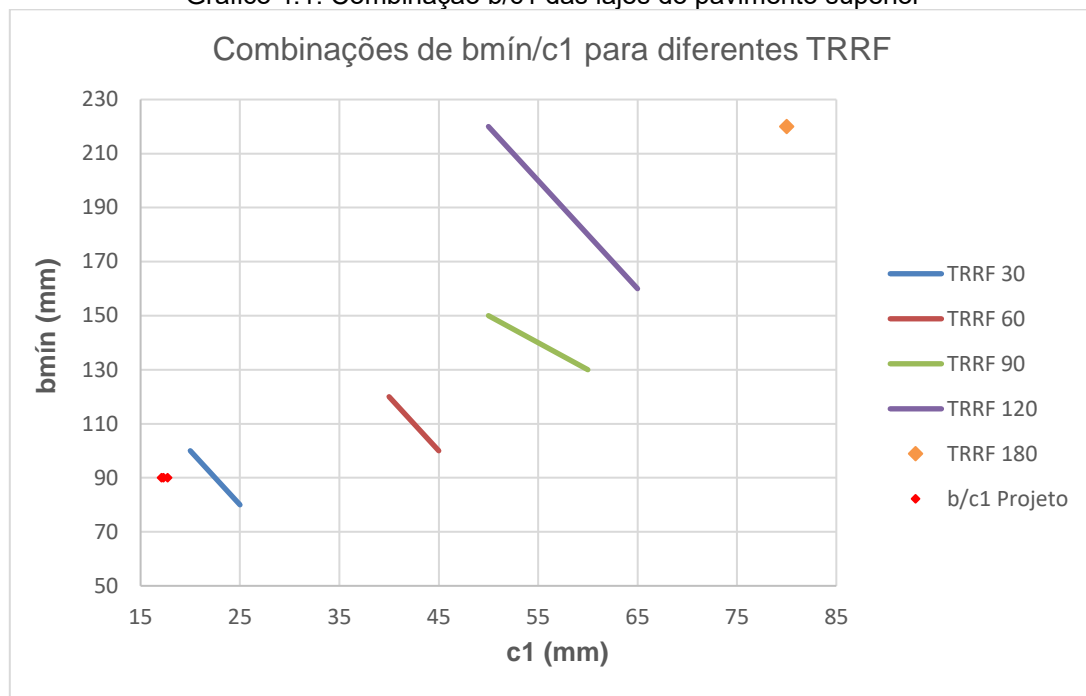


Fonte: Autoria própria

Com os respectivos pares de $[b, c1]$ de cada laje, foi realizada a comparação com os valores mínimos determinados pela ABNT NBR 15200 para determinar se a laje em questão satisfaz os requisitos de segurança determinado pelo método tabular.

O resultado do levantamento dos pares $[b, c1]$ e os valores requeridos pela NBR:15200 podem ser conferidos no gráfico 4.1.

Gráfico 4.1: Combinação b/c1 das lajes do pavimento superior



Fonte: Autoria própria

Como todos os pares $[b/c_1]$ das lajes estão posicionados à esquerda da curva TRRF 30, significa que eles não satisfazem os requisitos normativos de segurança. Isso se deve ao fato de que o método tabular considera o cobrimento um importante protetor das armaduras, demandando valores consideráveis para ele. Entretanto, lajes treliçadas geralmente possuem cobrimento menor pois são fabricadas com concreto superior ao mínimo determinado pela ABNT NBR 6118:2014 e com isso podem ter seus valores reduzidos seguindo critérios da norma supracitada.

4.2 VERIFICAÇÃO DAS LAJES PELO MÉTODO SIMPLIFICADO

Para o método simplificado, além dos valores de b e c_1 , foi levantado os valores do comprimento efetivo da mesa comprimida e das áreas de aço, tanto do aço base quanto do aço de reforço. Os valores respectivos para cada laje podem ser conferidos no quadro 4.2.

Como algumas lajes precisaram vencer vãos significativos foi necessário prever armadura adicionais de reforço. Adicionar barras com diâmetro maior que o diâmetro da armadura base fez com que o centróide das armaduras ficasse mais distante da face exposta ao fogo, resultando na variação dos valores de c_1 .

Quadro 4.2: Dados das lajes do pavimento superior para o método simplificado

Laje	bf (mm)	Aço base	Aço reforço	c1 (mm)	As (cm ²) CA50	As (cm ²) CA60
L1	390	2Ø4.2	-	17.1	-	0.28
L2		2Ø4.2	-	17.1	-	0.28
L3		2Ø4.2	1Ø5.0	17.3	-	0.47
L4		2Ø4.2	-	17.1	-	0.28
L5		2Ø4.2	-	17.1	-	0.28
L6		2Ø4.2	1Ø5.0	17.3	-	0.47
L7		2Ø4.2	1Ø5.0	17.3	-	0.47
L8		2Ø4.2	1Ø6.3	17.7	0.31	0.28
L9		2Ø4.2	2Ø8.0	18.6	1.01	0.28
L10		2Ø4.2	-	17.1	-	0.28

Fonte: Autoria própria

O cálculo da laje no estado limite último para um TRRF 30 seguiu o fluxograma representado pela figura 2.7. A comparação do resultado com a resistência da laje em situação normal pode ser conferida no quadro 4.3.

Quadro 4.3: Comparação das resistências das lajes para um TRRF 30 e situação normal

Laje	Resistências		Mri/Mrd
	TRRF 30 (tf.m/nerv)	Normal (tf.m/nerv)	
L1	0.16	0.15	106%
L2	0.16	0.15	106%
L3	0.26	0.25	105%
L4	0.16	0.15	106%
L5	0.16	0.15	106%
L6	0.26	0.25	105%
L7	0.26	0.25	105%
L8	0.30	0.28	108%
L9	0.61	0.56	108%
L10	0.16	0.15	106%

Fonte: Autoria própria

A relação $Mri/Mrd > 1$ representa que a laje na situação de incêndio tem uma resistência de cálculo maior que na situação normal. Isso se deve ao fato de que a temperatura no aço chegou em aproximadamente 400°C resultando em um coeficiente k_s de aproximadamente 1. Além disso, os coeficientes ponderadores das resistências em situação de incêndio são menores quando comparados à situação normal.

Nota-se que para o TRRF 30, não se faz necessário a comparação entre as resistências das lajes com as solicitações. Como a laje apresentou uma resistência de projeto maior na situação de incêndio, e tendo essa situação solicitações de projeto menores que em situação normal, as lajes satisfazem as condições de segurança

automaticamente.

Isso aconteceu pois, como pode ser visto no quadro 2.1, os coeficientes que minoram a resistência de projeto do concreto e do aço, γ_c e γ_s respectivamente, são menores em situação de incêndio, havendo portanto uma penalidade menor em suas resistências. Além disso, como mostra as equações 2.4 e 2.5, os coeficientes relacionados à combinação das ações em situação de incêndio também são menores quando comparados com os coeficientes para ações normais.

O mesmo procedimento foi aplicado para o TRRF 60 e TRRF 90 e pode ser conferido no quadro 4.4 e 4.5. A medida que a capacidade resistente da laje começa a diminuir é necessário fazer a comparação da resistência com as solicitações para avaliar se a laje cumpre os requisitos de segurança normativos.

Quadro 4.4: Comparação das resistências das lajes para um TRRF 60 e situação normal

Laje	Resistências		Mri/Mrd
	Incendio (tf.m/nerv)	Normal (tf.m/nerv)	
L1	0.08	0.15	57%
L2	0.08	0.15	57%
L3	0.14	0.25	58%
L4	0.08	0.15	57%
L5	0.08	0.15	57%
L6	0.14	0.25	58%
L7	0.14	0.25	58%
L8	0.18	0.28	64%
L9	0.39	0.56	70%
L10	0.08	0.15	57%

Fonte: Autoria própria

Quadro 4.5: Comparação das resistências das lajes para um TRRF 90 e situação normal

Laje	Resistências		Mdi/Mdn
	Incendio (tf.m/nerv)	Normal (tf.m/nerv)	
L1	0.04	0.15	27%
L2	0.04	0.15	27%
L3	0.07	0.25	27%
L4	0.04	0.15	27%
L5	0.04	0.15	27%
L6	0.07	0.25	27%
L7	0.07	0.25	27%
L8	0.09	0.28	33%
L9	0.22	0.56	39%
L10	0.04	0.15	27%

Fonte: Autoria própria

O levantamento das solicitações nas lajes seguiu a equação 2.4 e a comparação dos valores com as solicitações em situação normal pode ser conferido no quadro 4.6 e no gráfico 4.2.

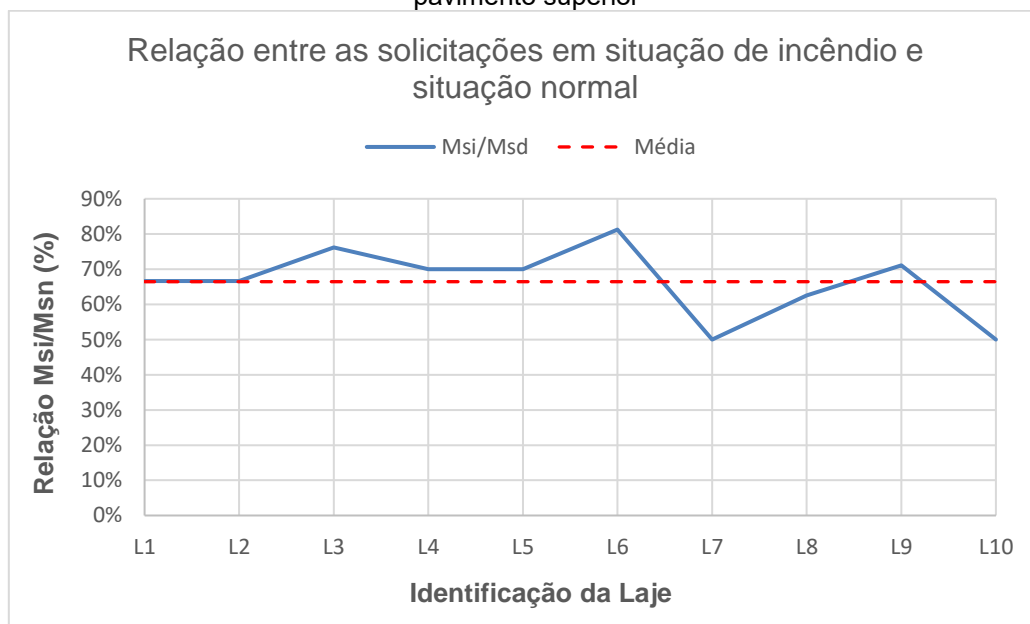
Quadro 4.6: Comparação entre as solicitações em situação de incêndio e situação normal das lajes do pavimento superior

Laje	Solicitações		Msi/Msd
	Incendio (tf.m/nerv)	Normal (tf.m/nerv)	
L1	0.08	0.12	67%
L2	0.08	0.12	67%
L3	0.16	0.21	76%
L4	0.07	0.10	70%
L5	0.07	0.10	70%
L6	0.13	0.16	81%
L7	0.01	0.02	50%
L8	0.15	0.24	63%
L9	0.32	0.45	71%
L10	0.01	0.02	50%

Fonte: Autoria própria

Esses valores mostram que, no geral, a relação entre o carregamento na situação de incêndio e na situação normal é de aproximadamente 70%, compactuando com o item 8.1 da NBR 15200 que permite, na ausência de qualquer solicitação gerada pelas deformações impostas em situação de incêndio, as solicitações de cálculo podem ser calculadas admitindo 70% das solicitação de cálculo à temperatura ambiente.

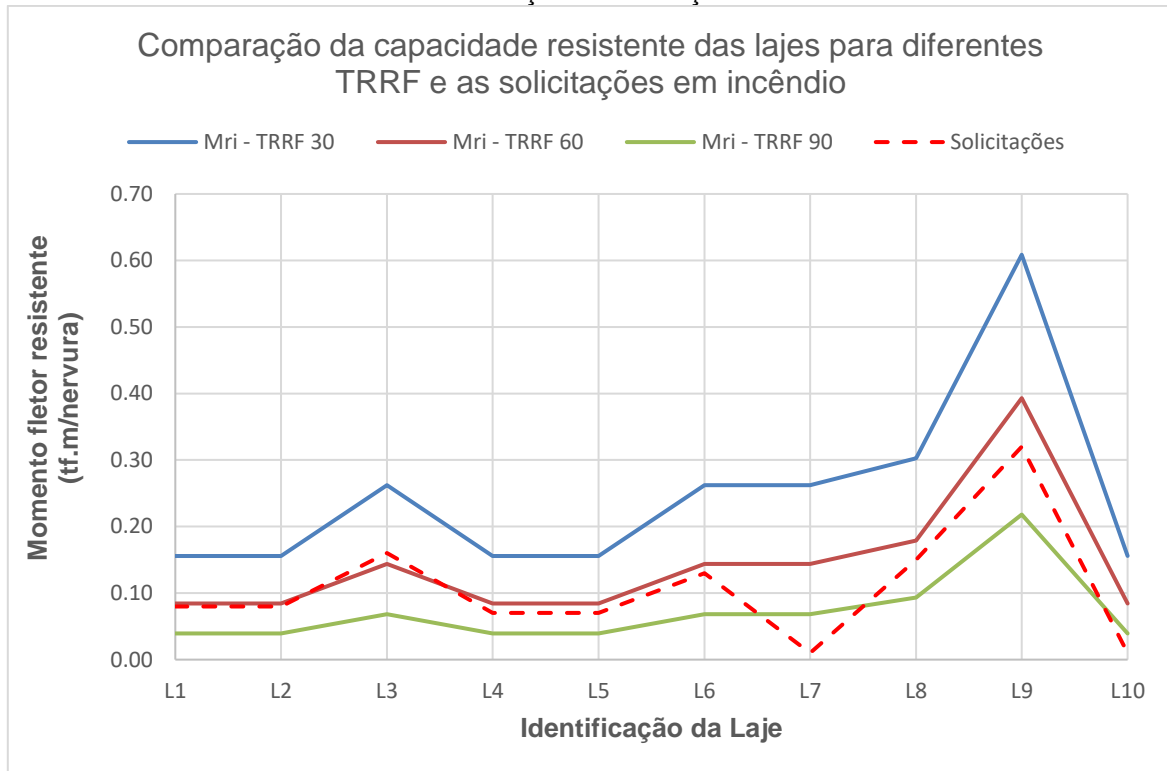
Gráfico 4.2: Comparação entre as solicitações em situação de incêndio e situação normal das lajes do pavimento superior



Fonte: Autoria própria

Com os cálculos das resistências das lajes para TRRF de 30, 60 e 90 minutos, podemos fazer uma comparação global e analisar até qual tempo requerido de resistência ao fogo as lajes podem suportar, comparando as resistências com as solicitações. Os resultados podem ser observados no gráfico 4.3.

Gráfico 4.3: Comparação entre as capacidades resistentes das lajes do pavimento superior para diferentes TRRF e as solicitações em situação de incêndio

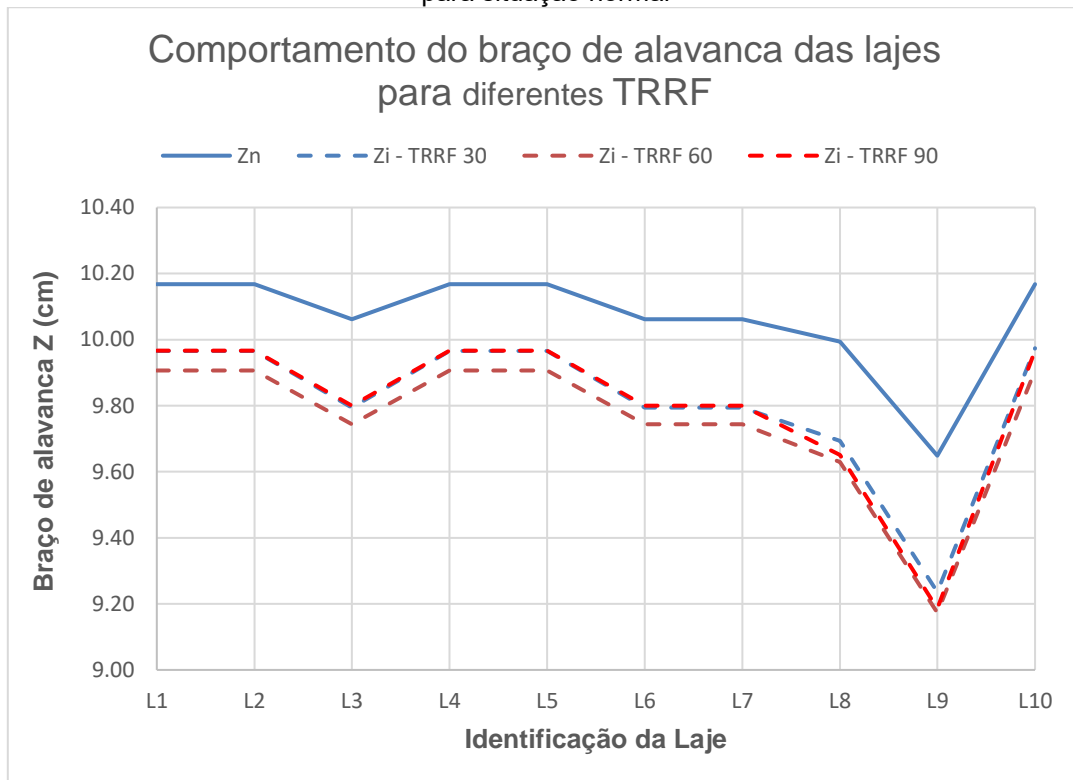


Fonte: Autoria própria

Como é notado, as lajes apresentaram uma boa capacidade resistente até o TRRF 60, tendo apenas a L3 com o valor da solicitação acima do valor de resistência, facilmente contornado por um leve aumento na taxa de aço. Portanto, pelo método simplificado, as lajes possuem segurança para um tempo requerido de resistência ao fogo de até 60 minutos.

Sabemos que a capacidade resistente de um elemento fletido é determinado pela área de aço e o braço de alavanca Z , pode como ser visto pela equação 2.8. Tendo isso em mente, é possível fazer uma correlação simplificada entre a resistência da armadura e o TRRF se soubermos como o braço de alavanca se comporta em diferentes tempos requeridos de resistência ao fogo. Os valores do braço de alavanca, de todas as lajes para os TRRF de 30, 60 e 90 minutos podem ser conferido no gráfico 4.4.

Gráfico 4.4: Comportamento do braço de alavanca das lajes do pavimento superior para diferentes TRRF e para situação normal



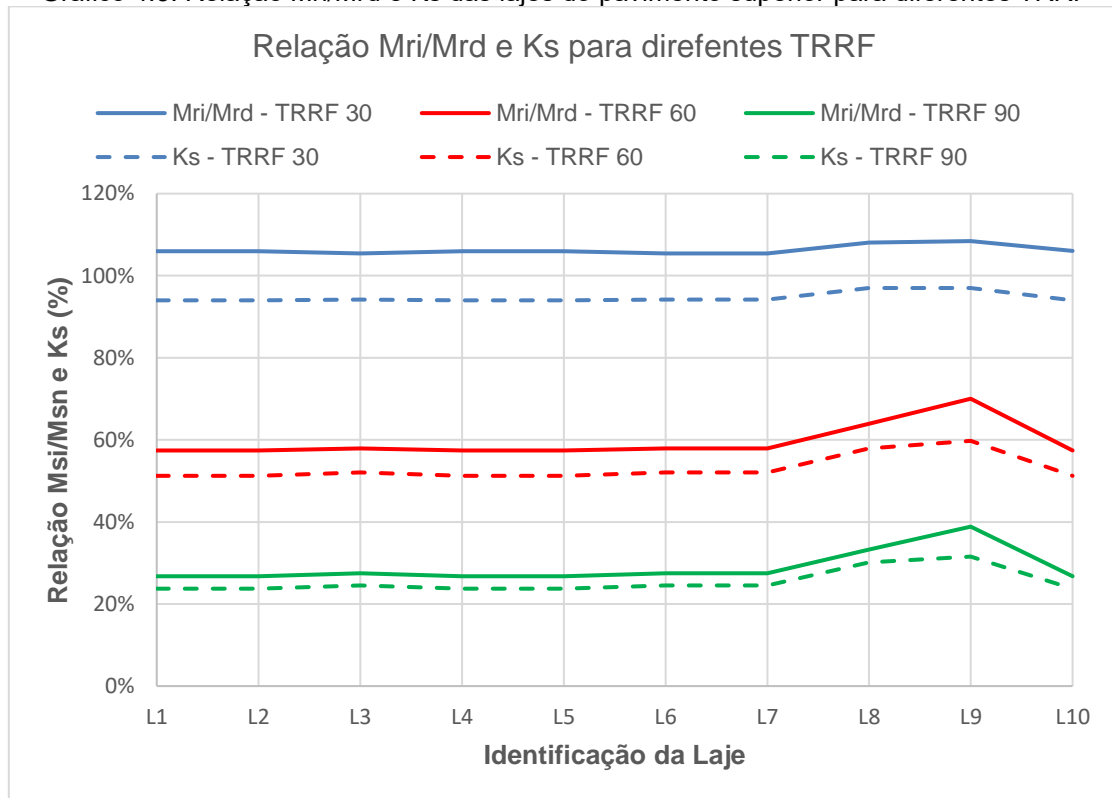
Fonte: Autoria própria

Nota-se que o valor do braço de alavanca em uma situação de incêndio e na situação normal praticamente são os mesmos (a razão entre eles apresenta uma média de 97%). Ou seja, analisando a equação 2.8 podemos afirmar que a relação entre a capacidade resistente da laje para um dado TRRF e a capacidade resistente em situação normal vai ser diretamente proporcional ao fator de redução da resistência do aço k_s .

Isso fica mais claro quando analisamos o gráfico 4.5, onde foi comparado, para cada TRRF, a razão da resistência na situação de incêndio com a resistência em temperatura ambiente e o fator de redução da resistência do aço, k_s .

É possível perceber que as lajes apresentaram uma relação direta entre M_{ri}/M_{rd} e k_s . Isso nos permite fazer algumas correlações simplificadas com o intuito prático de estimar a resistência da laje, para um determinado TRRF, seguindo apenas o comportamento do fator k_s .

Gráfico 4.5: Relação Mri/Mrd e Ks das lajes do pavimento superior para diferentes TRRF



Fonte: Autoria própria

O gráfico 4.5 mostra que $M_{ri}/M_{rd} \approx k_s$, significando que é possível estimar com certa proximidade e segurança, que o valor do momento resistente em situação de incêndio é o momento resistente em situação normal multiplicado por k_s .

4.3 COMPARAÇÃO DOS RESULTADOS DAS LAJES

Com os cálculos em ambos os procedimentos, podemos comparar os resultados e analisar a diferença entre o método tabular e o método simplificado para as lajes do projeto.

O método tabular resultou em uma reprovação de todas as lajes do projeto para o menor TRRF normativo, de 30 minutos. No extremo oposto, o método simplificado resultou na aprovação de todas as lajes para um TRRF de 30 minutos como pode ser visto no quadro 4.7.

Quadro 4.7: Comparação dos resultados pelo dois métodos para as lajes no TRRF 30

Laje	Método tabular	Método simplificado
	TRRF 30	TRRF 30
L1	Não atende	Atende
L2	Não atende	Atende
L3	Não atende	Atende
L4	Não atende	Atende
L5	Não atende	Atende
L6	Não atende	Atende
L7	Não atende	Atende
L8	Não atende	Atende
L9	Não atende	Atende
L10	Não atende	Atende

Fonte: Autoria própria

Para um TRRF de 60 minutos, salvo a laje L3, todas as lajes tiveram a aprovação pelo método simplificado como pode ser visto no quadro 4.8. A reprovação da laje L3 pode ser facilmente revertida com um leve incremento na taxa de aço.

Quadro 4.8: Comparação dos resultados pelo dois métodos para as lajes no TRRF 60

Laje	Método tabular	Método simplificado
	TRRF 60	TRRF 60
L1	Não atende	Atende
L2	Não atende	Atende
L3	Não atende	Não atende
L4	Não atende	Atende
L5	Não atende	Atende
L6	Não atende	Atende
L7	Não atende	Atende
L8	Não atende	Atende
L9	Não atende	Atende
L10	Não atende	Atende

Fonte: Autoria própria

Para um TRRF de 90 minutos a resistência das lajes é consideravelmente reduzida tendo apenas as lajes L7 e L10, ambas com solicitações de cálculo consideravelmente baixas, aprovadas. Os resultados podem ser conferidos no quadro 4.9. Diferente da solução proposta para o TRRF 60, neste caso a armadura já está com a resistência consideravelmente comprometida em virtude das altas temperaturas que chegou em valores de aproximadamente 660°C resultando em uma perda de mais de 75% da resistência do aço.

Quadro 4.9: Comparação dos resultados pelo dois métodos para as lajes no TRRF 90

Laje	Método tabular	Método simplificado
	TRRF 90	TRRF 90
L1	Não atende	Não atende
L2	Não atende	Não atende
L3	Não atende	Não atende
L4	Não atende	Não atende
L5	Não atende	Não atende
L6	Não atende	Não atende
L7	Não atende	Atende
L8	Não atende	Não atende
L9	Não atende	Não atende
L10	Não atende	Atende

Fonte: Autoria própria

4.3 VERIFICAÇÃO DAS VIGAS PELO MÉTODO TABULAR

Foi feito um levantamento de dados necessários para a conferência do método tabular de todas as vigas que suportam as lajes do pavimento superior. As informações necessárias para a análise das vigas consiste no tipo de apoio, da largura b e do centróide da armadura c_1 , representados no quadro 4.10. O cobrimento utilizado nas vigas foi de 2 centímetros e o concreto de 25 Mpa.

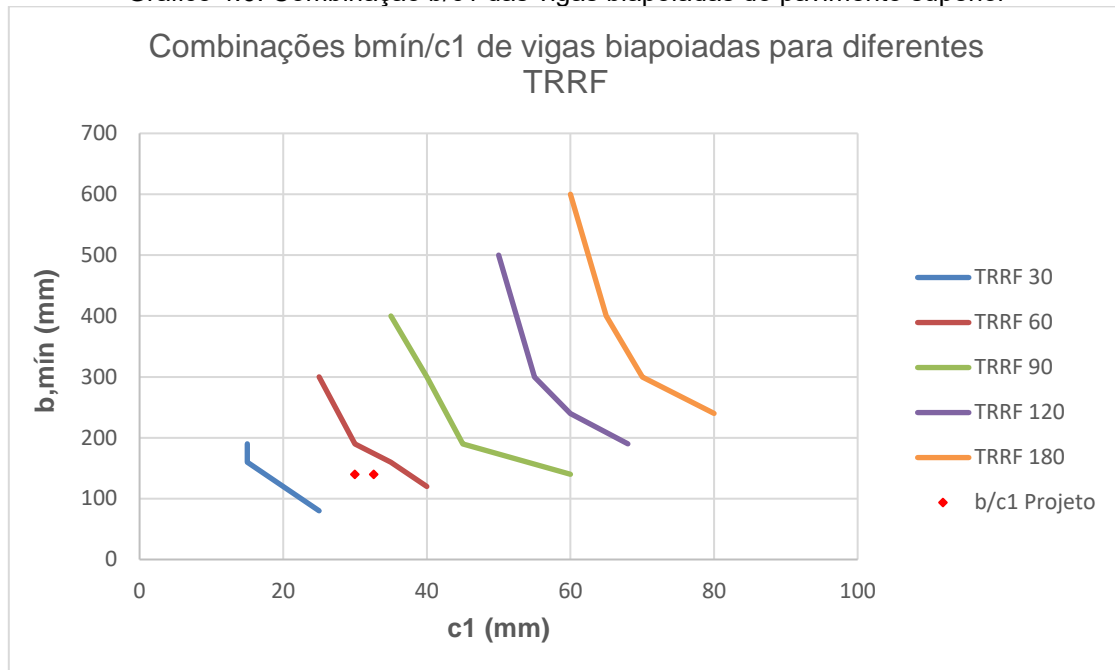
Quadro 4.10: Levantamento de dados das vigas para o método tabular

Viga	Tipo	b (mm)	Aço base	Aço reforço	c1 (mm)
V15	Bi-apoiada	140	2Ø10	-	30.0
V16	Bi-apoiada		2Ø10	-	30.0
V17	Contínua		2Ø10	1Ø12.5	30.5
V18	Contínua		2Ø10	1Ø10	30.0
V19	Bi-apoiada		2Ø16	1Ø12.5	32.6
V20	Contínua		2Ø10	-	30.0
V21	Bi-apoiada		2Ø10	-	30.0
V22	Contínua		2Ø10	1Ø12.5	30.5
V23	Bi-apoiada		2Ø10	-	30.0
V24	Bi-apoiada		2Ø10	1Ø10	30.0
V25	Contínua		2Ø10	-	30.0
V26	Contínua		2Ø10	-	30.0
V27	Contínua		2Ø10	-	30.0
V28	Contínua		2Ø10	1Ø12.5	30.5

Fonte: Autoria própria

No caso das vigas há uma separação entre vigas que possuem ou não continuidade. Para as vigas bi-apoiadas os resultados do método tabular podem ser conferidos no gráfico 4.6.

Gráfico 4.6: Combinação b/c1 das vigas biapoiadas do pavimento superior

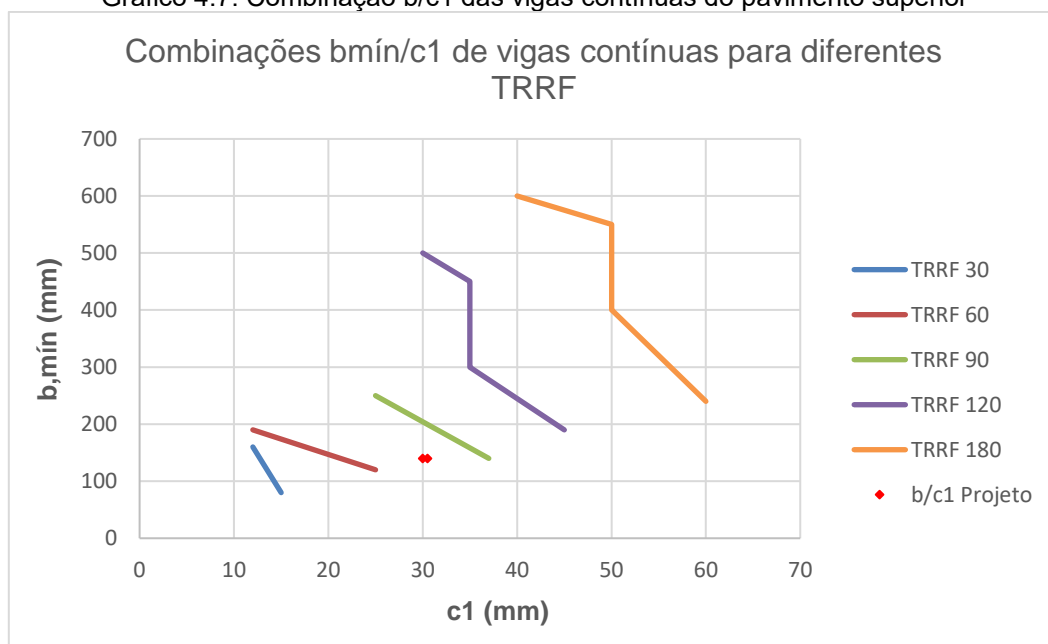


Fonte: Autoria própria

Como todos os pares $[b,c_1]$ das vigas analisadas estão à direita da curva relacionada ao TRRF 30, elas garantem os requisitos mínimos de segurança determinados pelo método tabular. Entretanto, para os outros tempos requeridos de resistência ao fogo, todas as vigas bi-apoiadas falham com a segurança.

Para um TRRF de até 60 minutos todas as vigas contínuas cumprem os requisitos do método tabular como observado no gráfico 4.7.

Gráfico 4.7: Combinação b/c1 das vigas contínuas do pavimento superior



Fonte: Autoria própria

4.4 VERIFICAÇÃO DAS VIGAS PELO MÉTODO SIMPLIFICADO

Para a verificação das vigas pelo método simplificado os dados necessários são a largura b , a altura h , as armaduras base e de reforço adotadas e o centróide da armadura, valores estes que podem ser conferidos no quadro 4.11.

Quadro 4.11: Levantamento de dados das vigas para o método simplificado

Viga	b (mm)	h (mm)	Aço base	Aço reforço	c1 (mm)
V15	140	400	2Ø10	-	30.0
V16			2Ø10	-	30.0
V17			2Ø10	1Ø12.5	30.5
V18			2Ø10	1Ø10	30.0
V19			2Ø16	1Ø12.5	32.6
V20			2Ø10	-	30.0
V21			2Ø10	-	30.0
V22			2Ø10	1Ø12.5	30.5
V23			2Ø10	-	30.0
V24			2Ø10	1Ø10	30.0
V25			2Ø10	-	30.0
V26			2Ø10	-	30.0
V27			2Ø10	-	30.0
V28			2Ø10	1Ø12.5	30.5

Fonte: Autoria própria

Com os dados, o cálculo da capacidade resistente da viga para um dado TRRF pelo método simplificado segue o fluxograma demonstrado na figura 2.7 e seu valor deve ser comparado com as solicitações em situação de incêndio dada pelo quadro 4.12.

Quadro 4.12: Comparação das solicitações em situação de incêndio e situação de temperatura ambiente para as vigas do pavimento superior

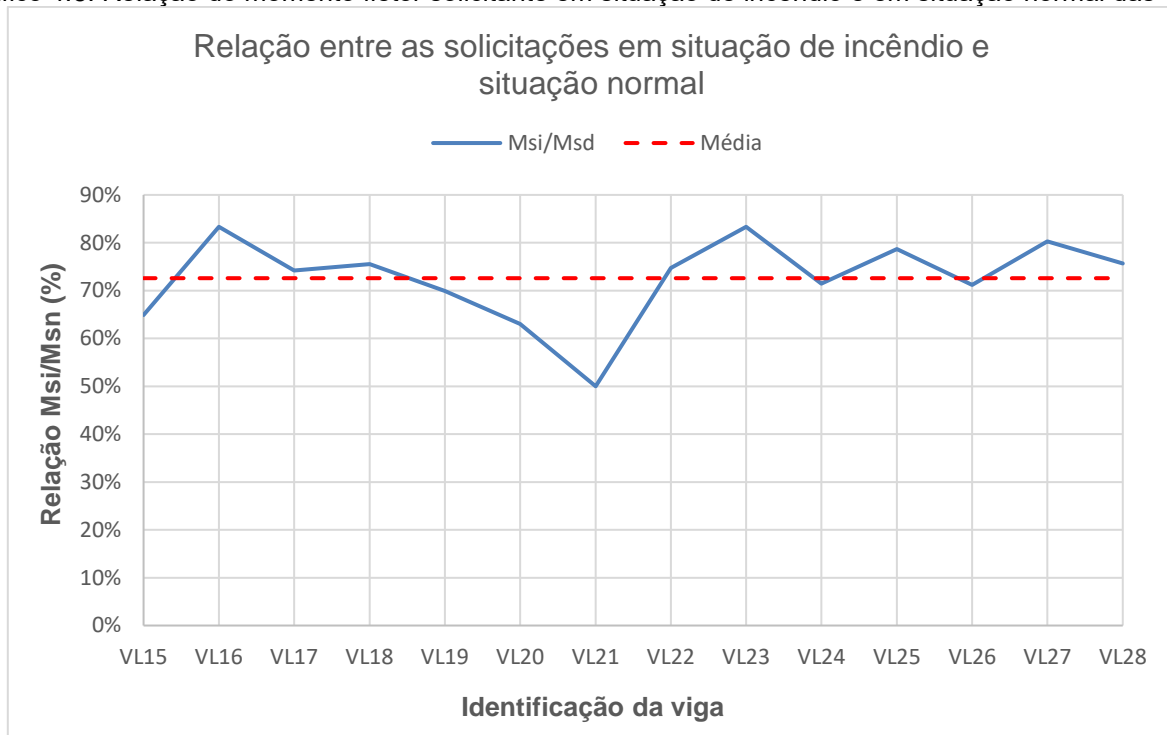
Viga	Incêndio (tf.m)	Normal (tf.m)	Msi/Msd
VL15	0.74	1.14	65%
VL16	0.65	0.78	83%
VL17	2.65	3.57	74%
VL18	2.13	2.82	76%
VL19	3.23	4.62	70%
VL20	1.09	1.73	63%
VL21	0.90	1.80	50%
VL22	2.10	2.81	75%
VL23	0.60	0.72	83%
VL24	1.90	2.66	71%
VL25	1.22	1.55	79%
VL26	0.42	0.59	71%
VL27	1.59	1.98	80%
VL28	2.15	2.84	76%

Fonte: Autoria própria

Esses valores mostram que as vigas apresentam uma razão entre o momento solicitante em situação de incêndio e o momento solicitante em temperatura ambiente maior que as lajes, tendo resultado uma média de 73% contra 66% das lajes, como pode ser visto no gráfico 4.8.

Isso se dá pelo fato das vigas possuírem maior peso permanente em virtude de suportarem paredes, e, o peso permanente, em uma situação de incêndio é tomado em seu valor característico ou seja, sem minorações.

Gráfico 4.8: Relação do momento fletor solicitante em situação de incêndio e em situação normal das vigas



Fonte: Autoria própria

Os momentos fletores resistentes de cálculo em situação de incêndio das vigas para os TRRF de 30, 60 e 90 minutos foram calculados seguindo o fluxograma da figura 4.3 e os resultados podem ser conferidos nos quadros 4.13, 4.14 e 4.15, assim como a comparação entre a resistência em situação de incêndio para o TRRF em questão M_{ri} e a resistência em situação normal M_{rd} .

Quadro 4.13: Comparação entre as resistências das vigas para TRRF 30 e situação normal

Viga	Resistências		Mri/Mrd
	Incendio (tf.m)	Normal (tf.m)	
V15	2.74	2.42	113%
V16	2.74	2.42	113%
V17	4.71	4.15	114%
V18	4.02	3.54	114%
V19	8.19	7.16	114%
V20	2.74	2.42	113%
V21	2.74	2.42	113%
V22	4.71	4.15	114%
V23	2.74	2.42	113%
V24	4.02	3.54	114%
V25	2.74	2.42	113%
V26	2.74	2.42	113%
V27	2.74	2.42	113%
V28	4.71	4.15	114%

Fonte: Autoria própria

De maneira similar ao que aconteceu com as lajes, para o TRRF 30 as vigas apresentam uma relação entre a resistência em situação de incêndio e a resistência em situação normal maior que 1 não necessitando, portanto, a comparação da resistência com as solicitações. O mesmo acontece para o TRRF 60, como pode ser conferido no quadro 4.14.

Quadro 4.14: Comparação entre as resistências das vigas para TRRF 60 e situação normal

Viga	Resistências		Mri/Mrd
	Incendio (tf.m)	Normal (tf.m)	
V15	2.71	2.42	112%
V16	2.71	2.42	112%
V17	4.65	4.15	112%
V18	3.97	3.54	112%
V19	8.06	7.16	113%
V20	2.71	2.42	112%
V21	2.71	2.42	112%
V22	4.65	4.15	112%
V23	2.71	2.42	112%
V24	3.97	3.54	112%
V25	2.71	2.42	112%
V26	2.71	2.42	112%
V27	2.71	2.42	112%
V28	4.65	4.15	112%

Fonte: Autoria própria

Para o TRRF 90, os resultados das resistências podem ser conferidos no quadro 4.15. Nota-se que a relação entre M_{ri}/M_{rd} apresenta valores menores que 1, necessitando portanto a comparação entre a resistência em situação de incêndio com as solicitações em situação de incêndio.

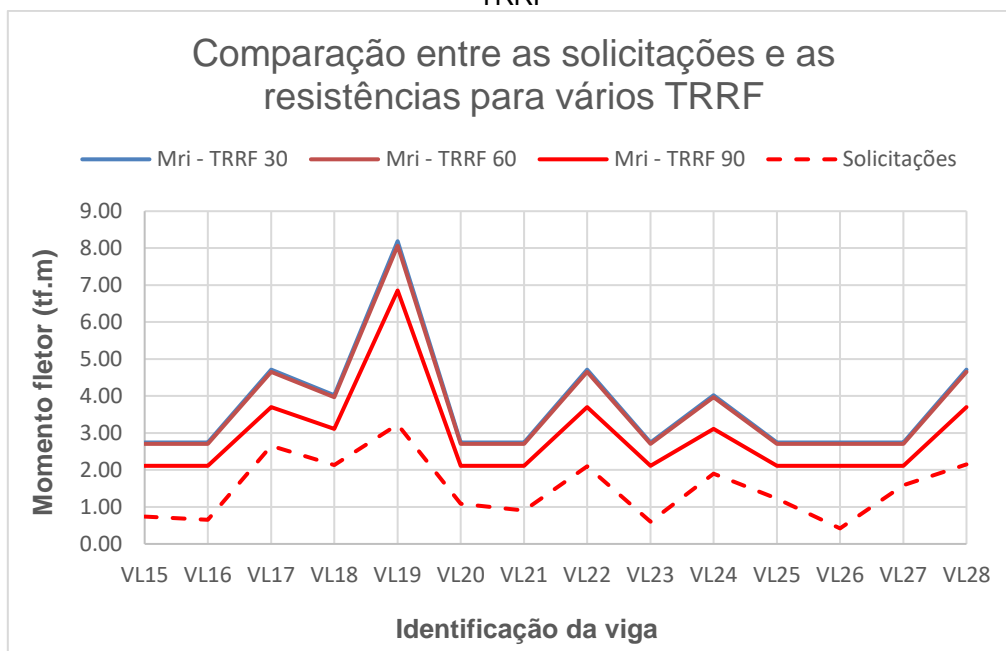
Quadro 4.15: Comparação entre as resistências das vigas para TRRF 90 e situação normal

Viga	Resistências		M _{ri} /M _{rd}
	Incendio (tf.m)	Normal (tf.m)	
V15	2.11	2.42	87%
V16	2.11	2.42	87%
V17	3.70	4.15	89%
V18	3.11	3.54	88%
V19	6.85	7.16	96%
V20	2.11	2.42	87%
V21	2.11	2.42	87%
V22	3.70	4.15	89%
V23	2.11	2.42	87%
V24	3.11	3.54	88%
V25	2.11	2.42	87%
V26	2.11	2.42	87%
V27	2.11	2.42	87%
V28	3.70	4.15	89%

Fonte: Autoria própria

A comparação das resistências nos TRRF supracitados e as solicitações podem ser melhor visualizadas gráfico 4.9.

Gráfico 4.9: Comparação das solicitações com resistências das vigas do pavimento superior para diferentes TRRF

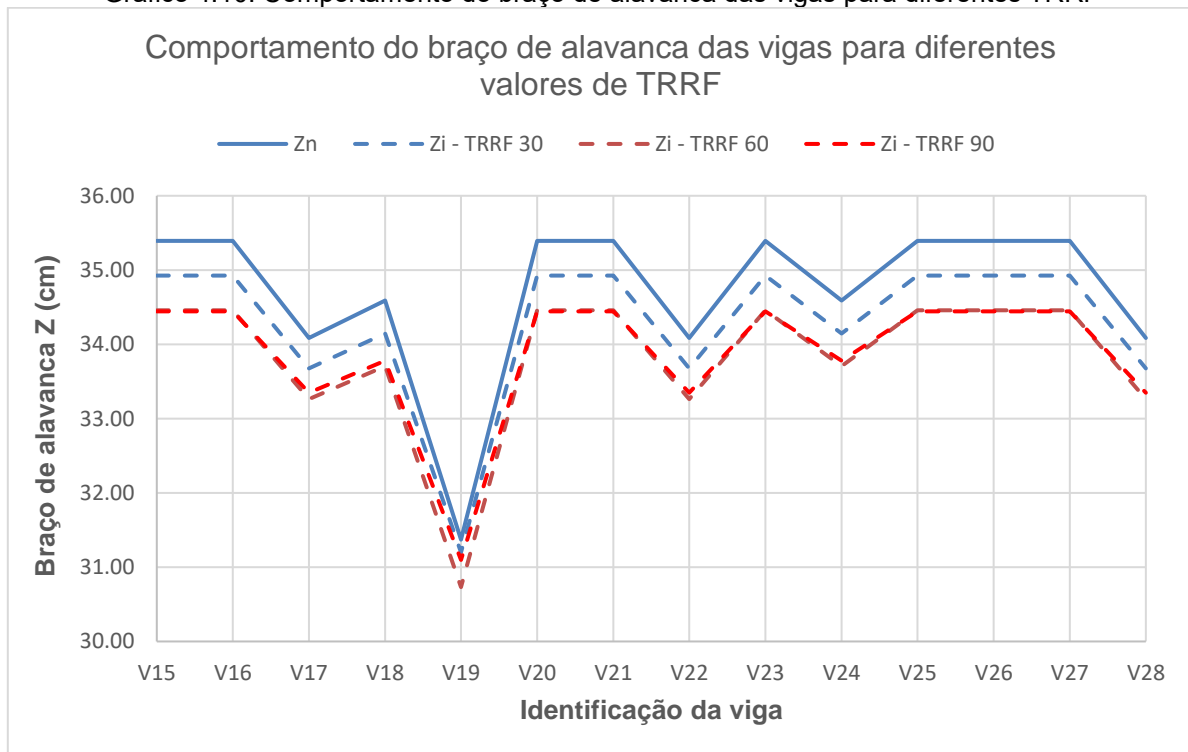


Fonte: Autoria própria

As vigas apresentaram boa resistência até um TRRF de 90 minutos. Isso se dá por alguns motivos: diferente das lajes, as vigas possuem um cobrimento maior (2,0cm para as vigas contra 1,5cm das lajes) e também apresentam uma taxa de armadura maior. Analisando a figura 2.5 sabemos que a resistência da viga é determinada pela área de aço e pelo braço de alavanca, ou seja, para um mesmo braço de alavanca, quanto maior a taxa de aço, maior a resistência.

Similar à situação das lajes, o comportamento do braço de alavanca é de grande importância pois caso ele não apresente grandes variações, podemos estimar o valor da capacidade resistente da viga analisando a variação da resistência do aço. A análise do braço de alavanca para diferentes TRRF das vigas pode ser observada no gráfico 4.10.

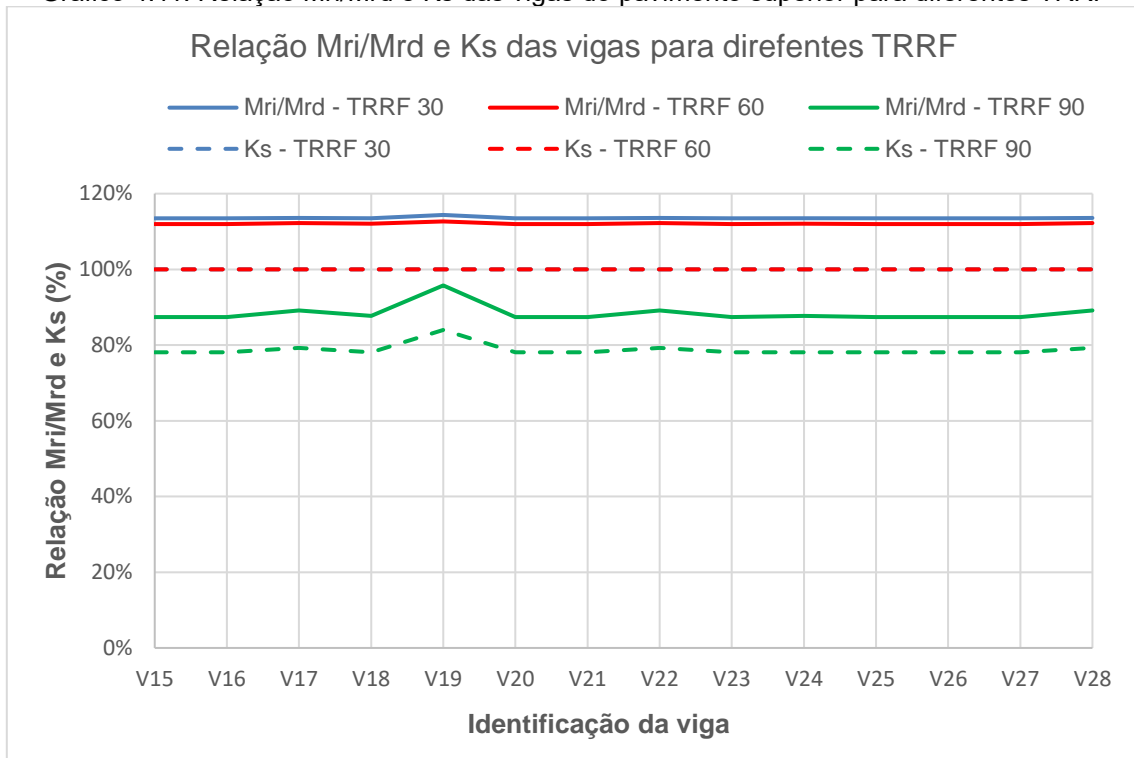
Gráfico 4.10: Comportamento do braço de alavanca das vigas para diferentes TRRF



Fonte: Autoria própria

Como pode ser visto no gráfico 4.10, o braço de alavanca em situação de incêndio para um TRRF de até 90 minutos praticamente não sofre alteração significativa quando comparado ao seu valor em situação normal, apresentando uma diferença de aproximadamente 2%. Essa pequena variação nos permite realizar uma aproximação da resistência da viga analisando o coeficiente de redução da resistência do aço k_s similar ao que foi feito para as lajes. A comparação da razão entre as resistências em situação de incêndio e em situação normal com o coeficiente k_s das vigas para diferentes TRRF pode ser observada no gráfico 4.11.

Gráfico 4.11: Relação Mri/Mrd e Ks das vigas do pavimento superior para diferentes TRRF



Fonte: Autoria própria

Percebe-se que nas vigas, assim como no caso das lajes, há uma relação direta e proporcional entre a resistência da viga com o coeficiente redutor da resistência do aço nos possibilitando estimar com boa precisão e segurança o valor do momento resistente em situação de incêndio multiplicando o momento resistente em situação normal por k_s .

4.5 COMPARAÇÃO DOS RESULTADOS DAS VIGAS

Com os cálculos em ambos os procedimentos, podemos comparar os resultados e analisar a diferença entre o método tabular e o método simplificado para as vigas do projeto.

Tanto o método tabular quanto o método simplificado resultaram em uma aprovação de todas as vigas do projeto para o menor TRRF normativo de 30 minutos como mostra o quadro 4.16.

Quadro 4.16: Comparação dos resultados pelos dois métodos para as vigas no TRRF 30

Viga	Método tabular	Método simplificado
	TRRF 30	TRRF 30
VL15	Atende	Atende
VL16	Atende	Atende
VL17	Atende	Atende
VL18	Atende	Atende
VL19	Atende	Atende
VL20	Atende	Atende
VL21	Atende	Atende
VL22	Atende	Atende
VL23	Atende	Atende
VL24	Atende	Atende
VL25	Atende	Atende
VL26	Atende	Atende
VL27	Atende	Atende
VL28	Atende	Atende

Fonte: Autoria própria

Para um TRRF de 60 minutos, o método tabular reprovou todas as vigas do tipo bi-apoiada, tendo apenas as vigas de pórtico aprovadas. Em contrapartida o método simplificado aprovou todas as vigas do projeto. Os resultados podem ser conferidos no quadro 4.17.

Quadro 4.17: Comparação dos resultados pelos dois métodos para as vigas no TRRF 60

Viga	Método tabular	Método simplificado
	TRRF 60	TRRF 60
VL15	Não atende	Atende
VL16	Não atende	Atende
VL17	Atende	Atende
VL18	Atende	Atende
VL19	Não atende	Atende
VL20	Atende	Atende
VL21	Não atende	Atende
VL22	Atende	Atende
VL23	Não atende	Atende
VL24	Não atende	Atende
VL25	Atende	Atende
VL26	Atende	Atende
VL27	Atende	Atende
VL28	Atende	Atende

Fonte: Autoria própria

Já para um TRRF de 90 minutos todas as vigas foram reprovadas pelo método tabular e no extremo oposto, todas as vigas foram aprovadas no método simplificado como pode ser visto no quadro 4.18.

Quadro 4.18: Comparação dos resultados pelos dois métodos para as vigas no TRRF 90

Viga	Método tabular	Método simplificado
	TRRF 90	TRRF 90
VL15	Não atende	Atende
VL16	Não atende	Atende
VL17	Não atende	Atende
VL18	Não atende	Atende
VL19	Não atende	Atende
VL20	Não atende	Atende
VL21	Não atende	Atende
VL22	Não atende	Atende
VL23	Não atende	Atende
VL24	Não atende	Atende
VL25	Não atende	Atende
VL26	Não atende	Atende
VL27	Não atende	Atende
VL28	Não atende	Atende

Fonte: Autoria própria

O método tabular, diferente do caso das lajes, apresentou alguns resultados similares ao processo simplificado, para um TRRF de 30 minutos. Para os outros, houve grande discrepância nos resultados.

5 CONSIDERAÇÕES FINAIS

Por muito tempo a questão sobre segurança das estruturas em situação de incêndio foi limitada apenas para a proteção à propriedade. Após grandes catastrofes ocorridas no Brasil diversas leis e regulamentações foram criadas baseadas em uma nova perspectiva: limitar o risco à vida, à propriedade e a sociedade.

As diretrizes que determinam quanto tempo uma edificação deve resistir a um incêndio padrão são definidas pelo Corpo de Bombeiros de cada estado, sendo ele também o órgão responsável pela fiscalização do cumprimento das leis.

A medida que a temperatura dos gases dentro de uma edificação aumenta, o aço e o concreto perdem resistência apresentando queda significativa após os 400°C, podendo levar a estrutura à ruína caso a capacidade resistente seja menor que as solicitações impostas.

A ABNT NBR 15200:2012 traz alguns métodos para a verificação dos elementos estruturais em situação de incêndio. O método tabular se mostrou o mais simples de ser implementado porém apresentou grandes imprecisões na análise das lajes e vigas do projeto, refletindo em resultados contraditórios quando comparado ao método simplificado não sendo recomendado seu uso para análise de lajes treliçadas ou para vigas com TRRF acima de 30 minutos.

Com a análise do comportamento do braço de alavanca foi possível encontrar expressões simplificadas que apresentaram resultados relativamente próximos do método simplificado mas sem a necessidade de processos iterativos, bastando apenas analisar a temperatura da armadura junto com o coeficiente K_s .

Os resultados mostram que para um TRRF de 30 minutos as lajes e vigas não tiveram perdas na capacidade resistente e, aliado ao fato de terem coeficientes ponderadores das resistências e das ações menores que em temperatura ambiente, apresentaram uma resistência de cálculo superior quando comparado à situação normal.

Para o TRRF de 60 minutos todas as vigas tiveram aprovação pelo método simplificado e as lajes, salvo a L3, seguiram na mesma direção. Já para o TRRF 90 praticamente todas as lajes tiveram reprovação na resistência principalmente em razão das altas temperaturas na armadura, enquanto que as vigas, por garantirem uma melhor proteção do aço em virtude do maior cobrimento e dos estribos, continuaram aprovadas.

Para trabalhos futuros seria interessante estudar mais a fundo a expressão $M_{ri}/M_{rd} \approx k_s$ para os outros tipos de lajes e fazer uma comparação com o método tabular.

REFERÊNCIAS

ABNT - Associação Brasileira de Normas Técnicas. **NBR 13860**: Glossário de termos relacionados com a segurança contra incêndio. Rio de Janeiro, 1997.

ABNT - Associação Brasileira de Normas Técnicas. **NBR 15200**: Projeto de estruturas de concreto em situação de incêndio. Rio de Janeiro, 2012.

ABNT - Associação Brasileira de Normas Técnicas. **NBR 6118**: Projeto de estruturas de concreto - procedimento. Rio de Janeiro, 2014.

ARAÚJO, J. M. **Curso de Concreto Armado**. Rio Grande: Dunas, 2014.

PARANÁ. Corpo de Bombeiros Militar do Estado do Paraná. **NPT-008**: Resistência ao fogo dos elementos de construção. Paraná, 2012.

CARINI, M. **Metodologia de Projeto**: estados limites. 2021. Notas de aula.

COSTA, C. N.; FIGUEIREDO, A. D. DE; SILVA, V. P. **Aspectos Tecnológicos Dos Materiais De Concreto Em Altas Temperaturas**. ResearchGate, 2002. Disponível em: https://www.researchgate.net/publication/340682609_Aspectos_tecnologicos_dos_materiais_de_concreto_em_altas_temperaturas. Acesso em: 28 de jul. de 2022.

COSTA, C. N.; SILVA, V. P. **Revisão histórica das curvas padronizadas de incêndio**. ResearchGate, 2006. Disponível em: https://www.researchgate.net/publication/340682840_Revisao_historica_das_curvas_padronizadas_de_incendio. Acesso em: 28 de jul. de 2022.

PARANÁ. Corpo de Bombeiros Militar do Estado do Paraná. **CSCIP**: Código de Segurança contra Incêndio e Pânico. Paraná, 2018.

Prédio de 24 andares desaba após incêndio no Centro de SP. G1, 2018. Disponível em: <https://g1.globo.com/sp/sao-paulo/noticia/incendio-atinge-predio-no-centro-de-sp.html>. Acesso em: 01 de jun. de 2022.

METHA, P. K.; MONTEIRO, P. J. M. **Microestrutura, propriedades e materiais**. 2ª Edição. São Paulo: IBRACON, 2014.

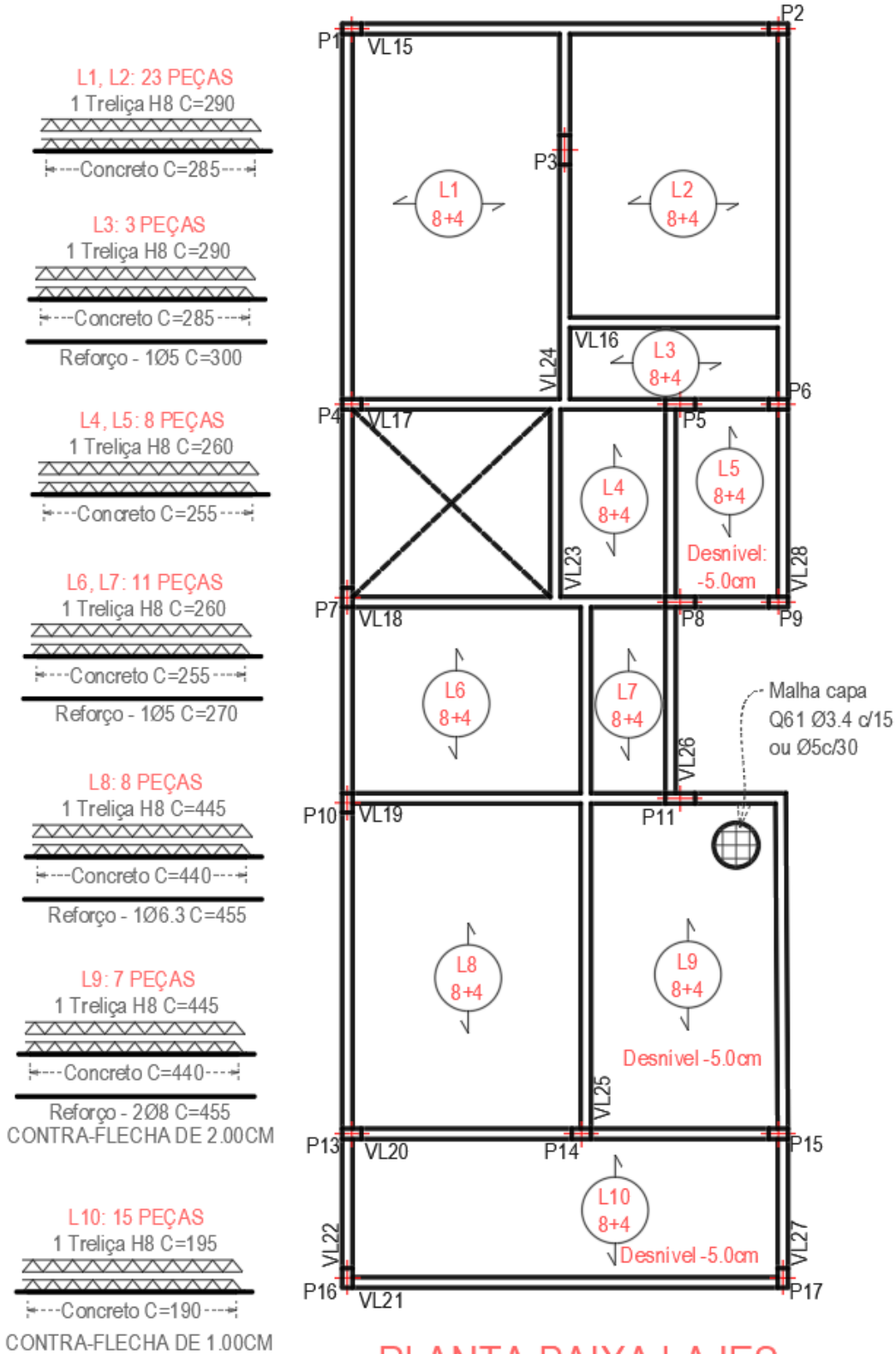
ONO, R. **Arquitetura e Segurança contra incêndios**. 2019. Disponível em: https://icamt.mini.icom.museum/wp-content/uploads/sites/13/2019/01/PALESTRA_22_RosariaOno.pdf. Acesso em: 28 de jul. de 2022.

SEITO, A. I. et al. **A segurança contra incêndio no Brasil**. São Paulo: Projeto, 2008.

Estatísticas 2020. Instituto Sprinkler Brasil, 2020. Disponível em: <https://sprinklerbrasil.org.br/estatisticas-2020/>. Acesso em: 01 de jun. de 2022.

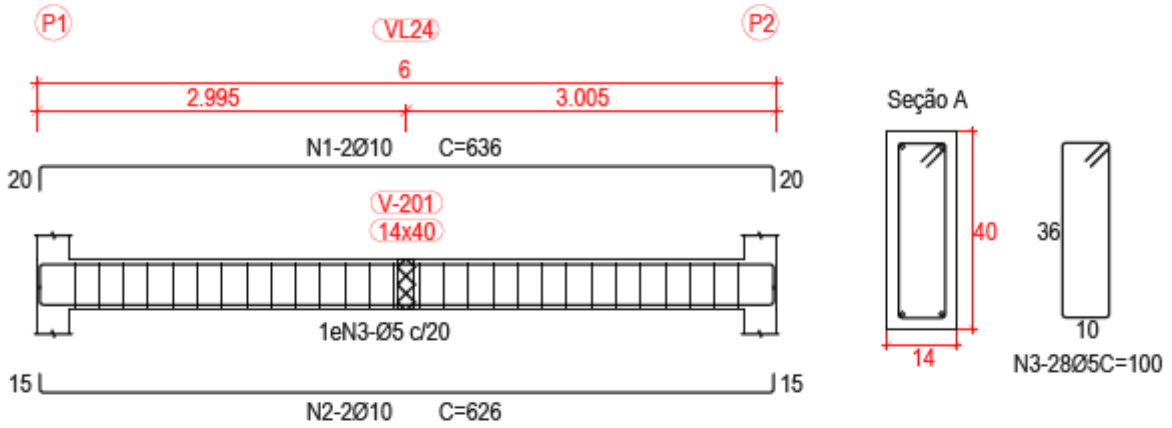
APÊNDICE

– PROJETO DAS LAJES

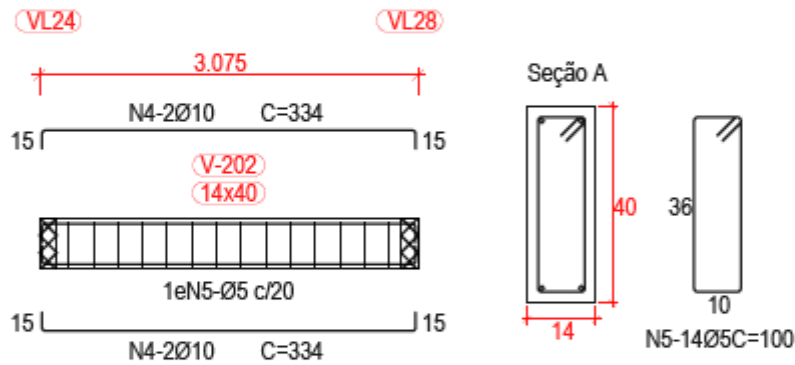


– PROJETO DAS VIGAS

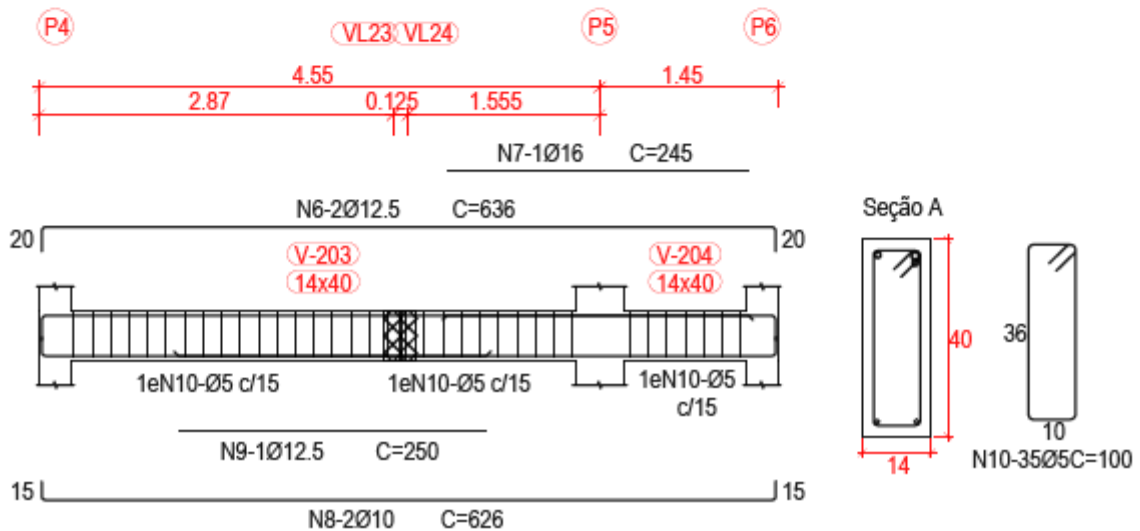
VL15



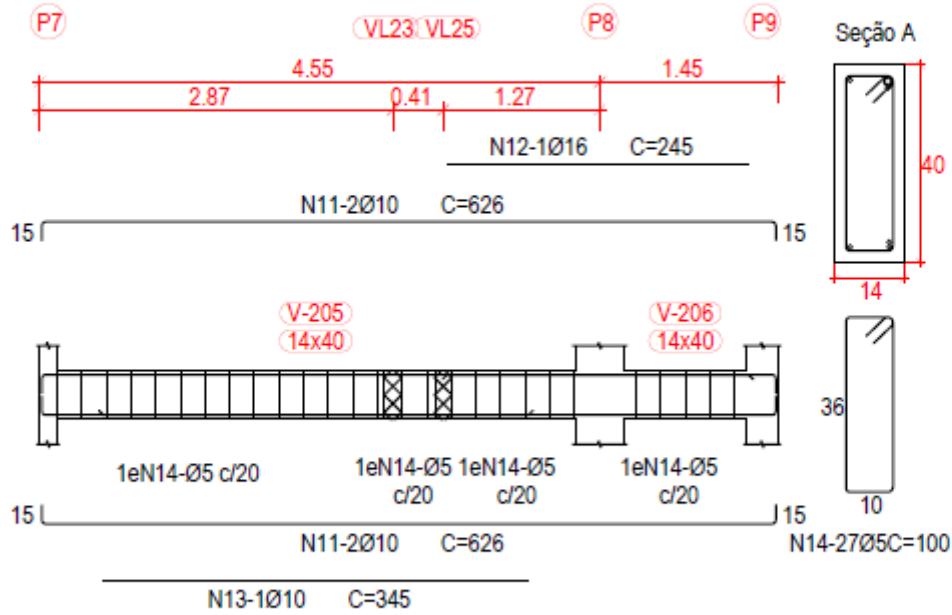
VL16



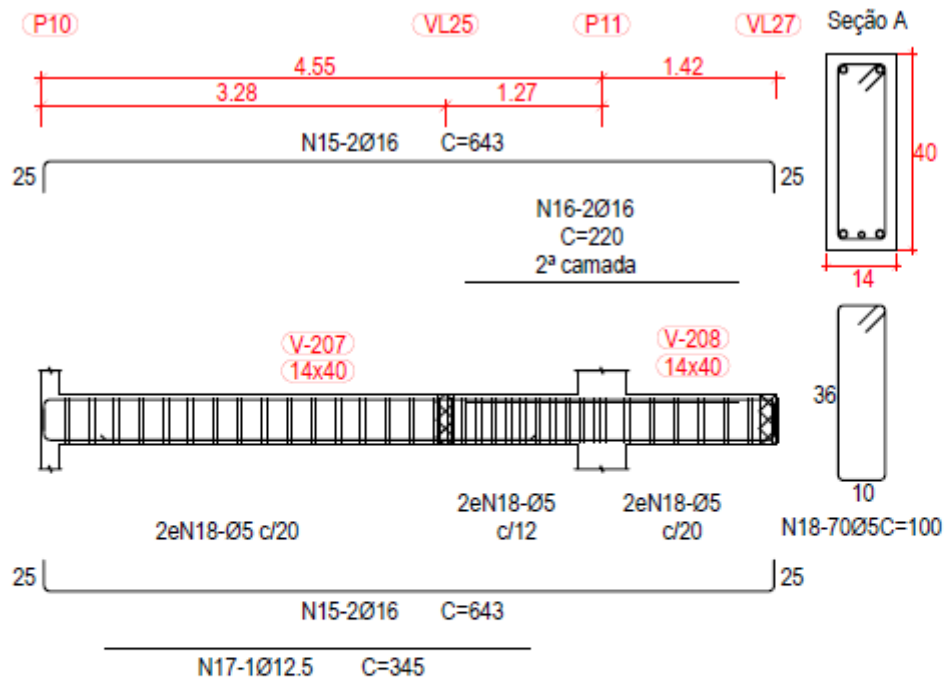
VL17



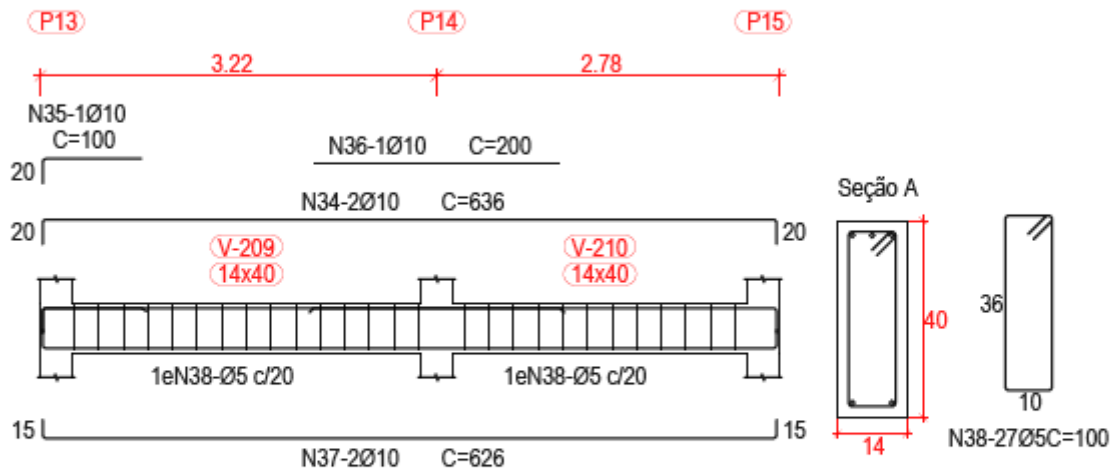
VL18



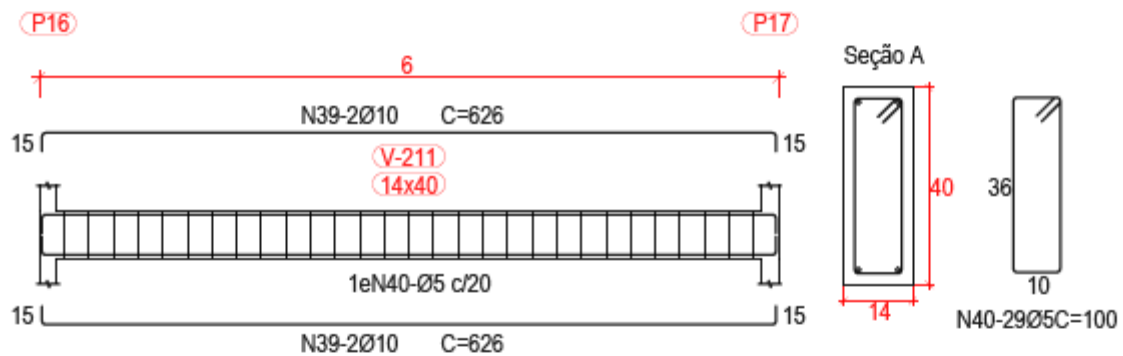
VL19



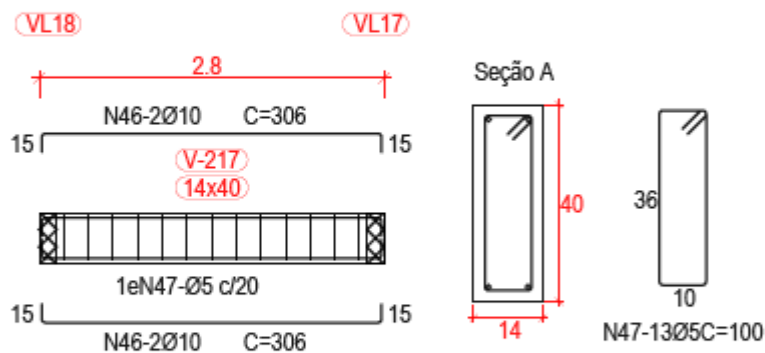
VL20



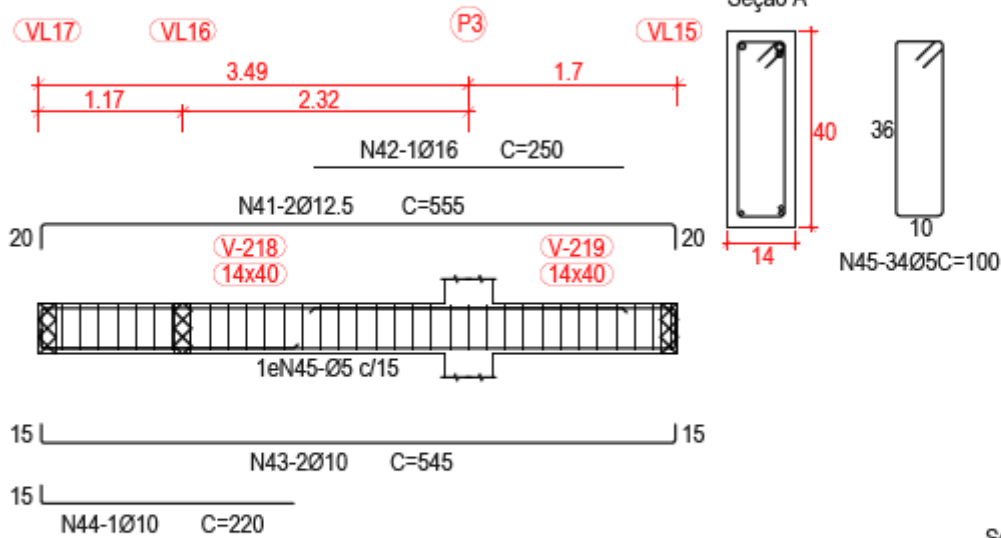
VL21



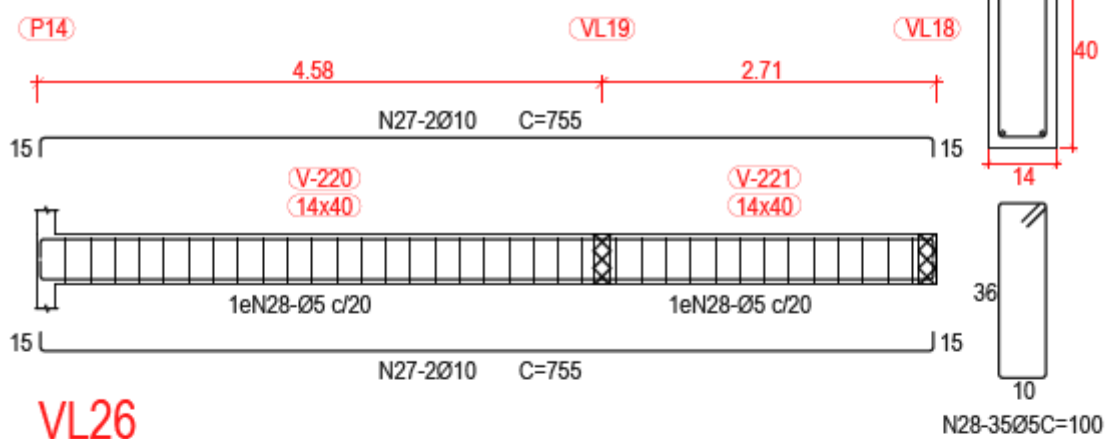
VL23



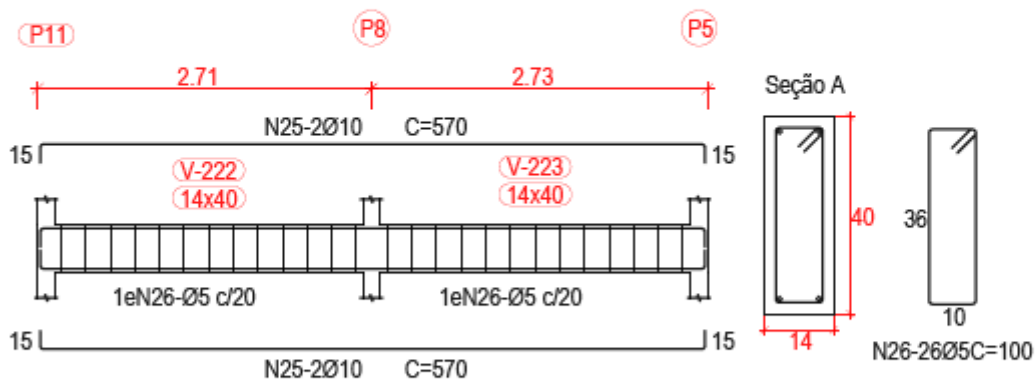
VL24



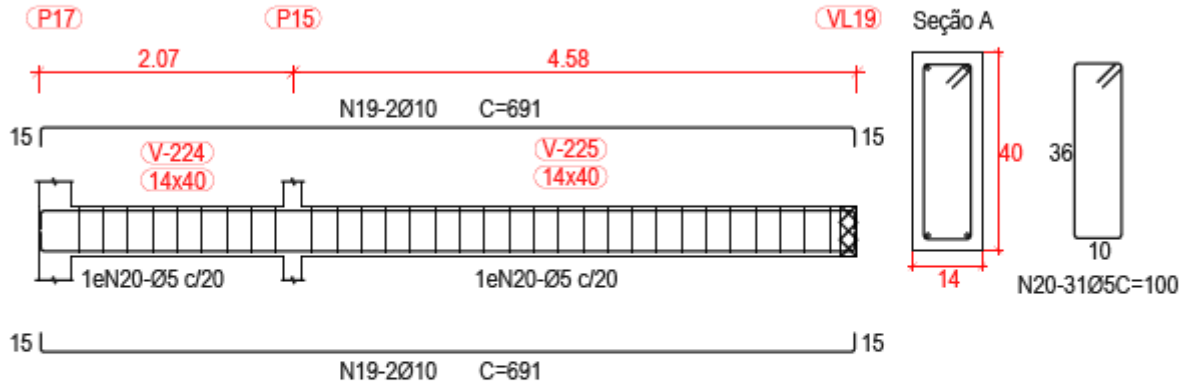
VL25



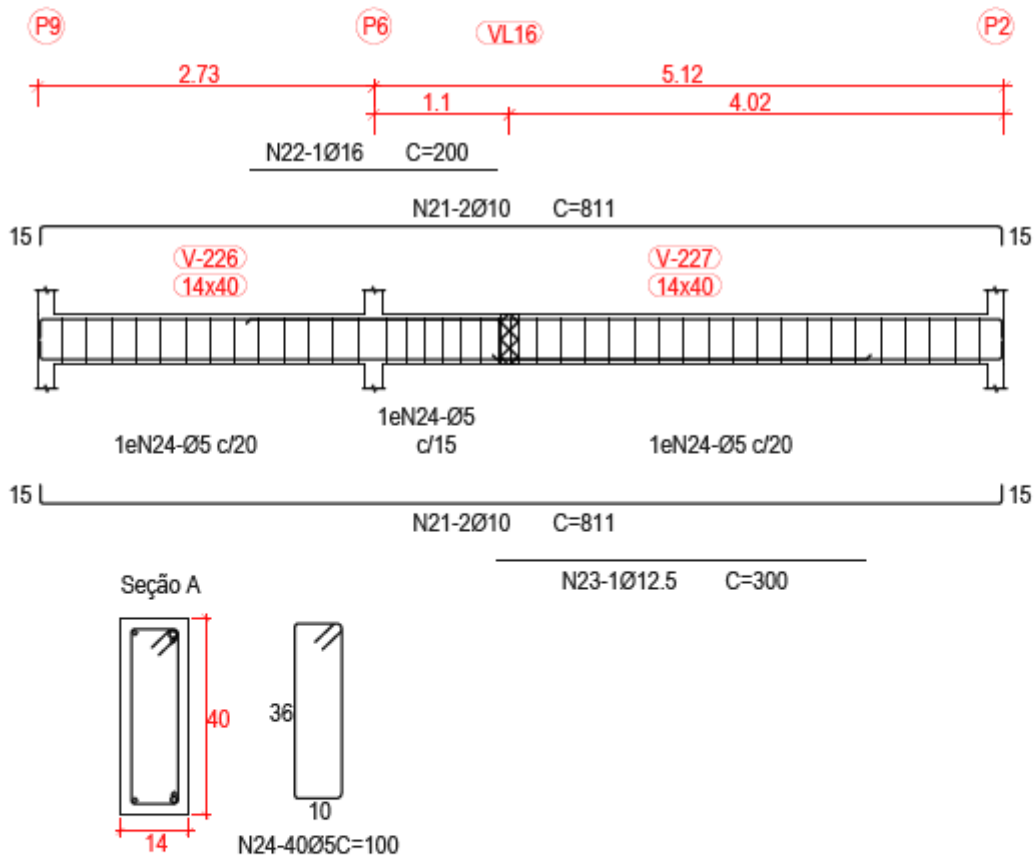
VL26



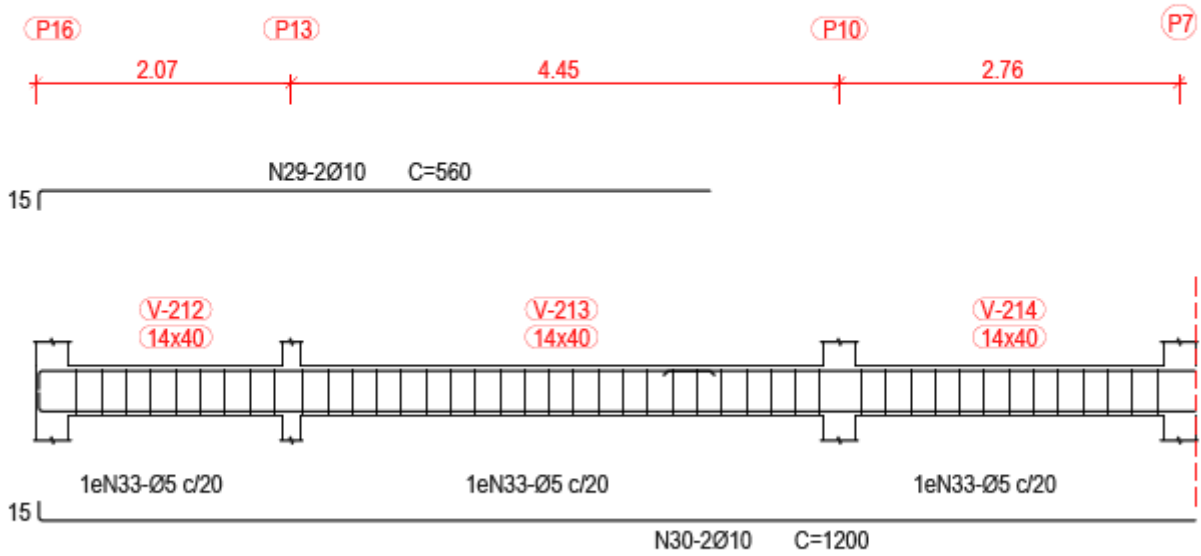
VL27



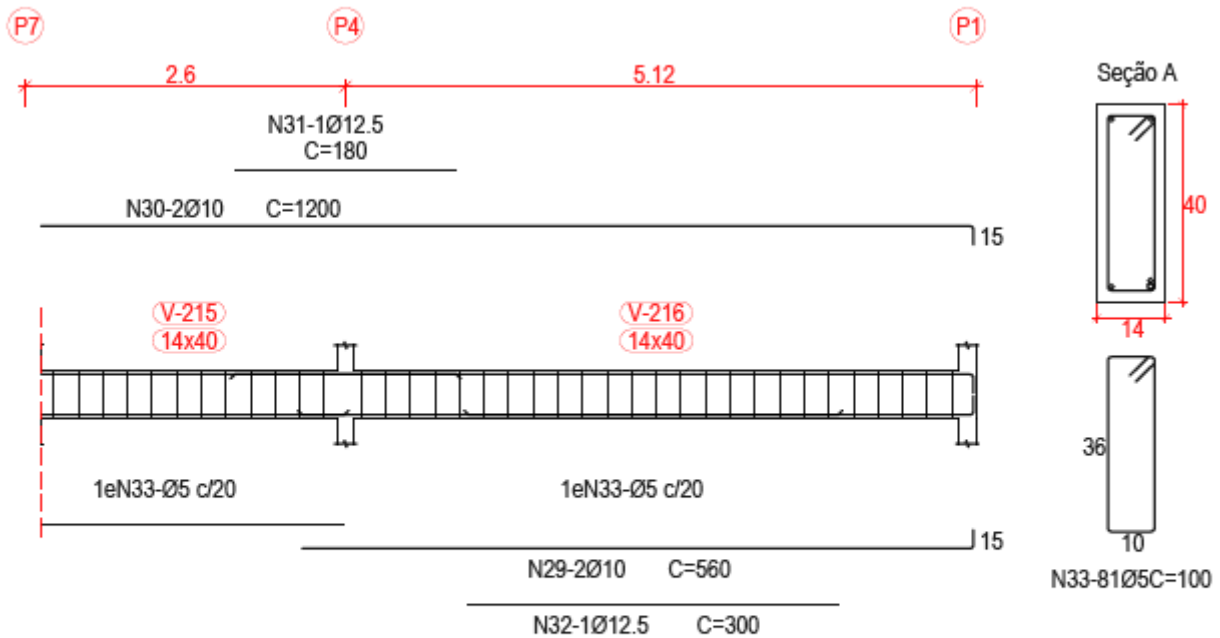
VL28



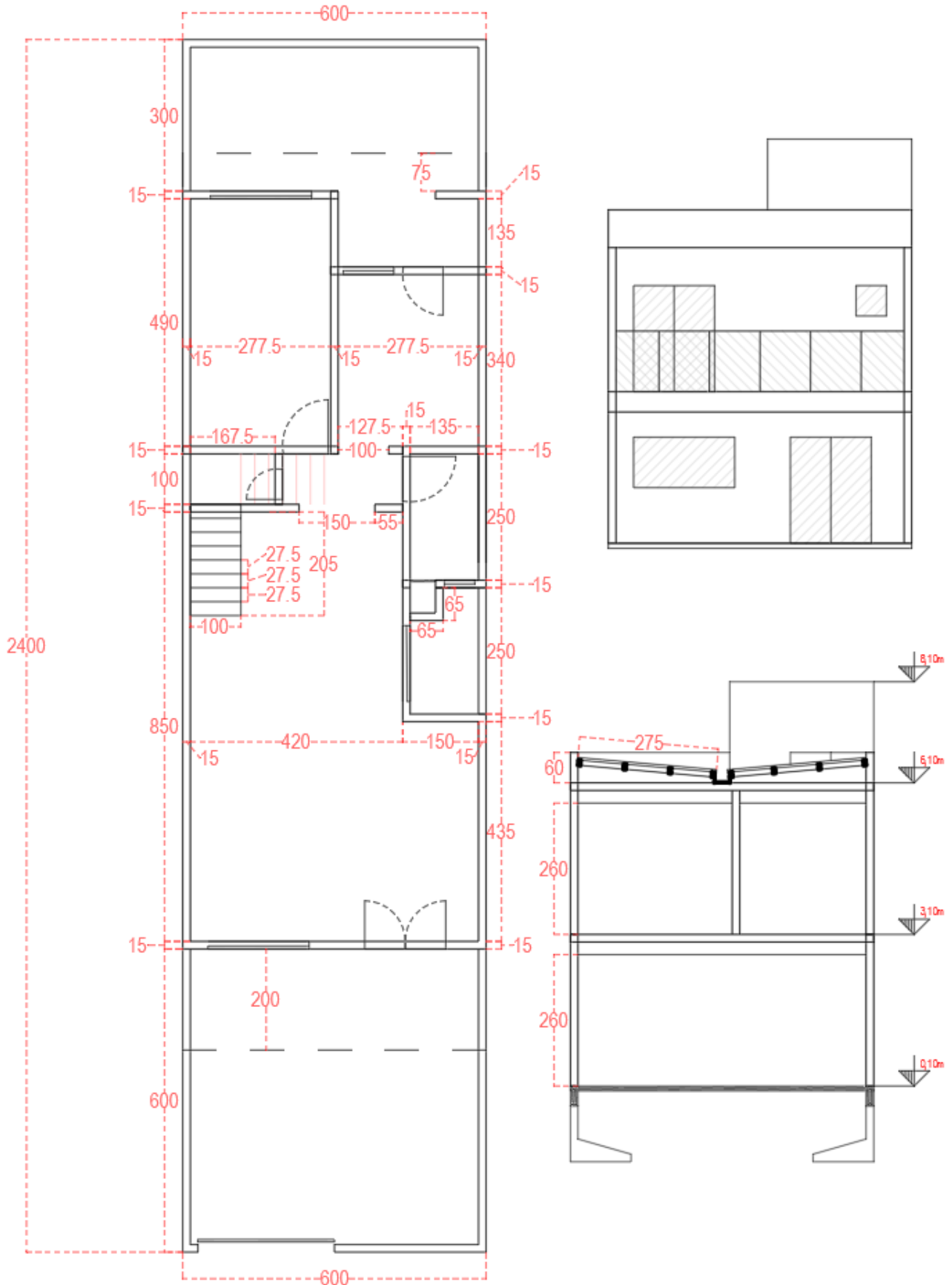
VL22-A



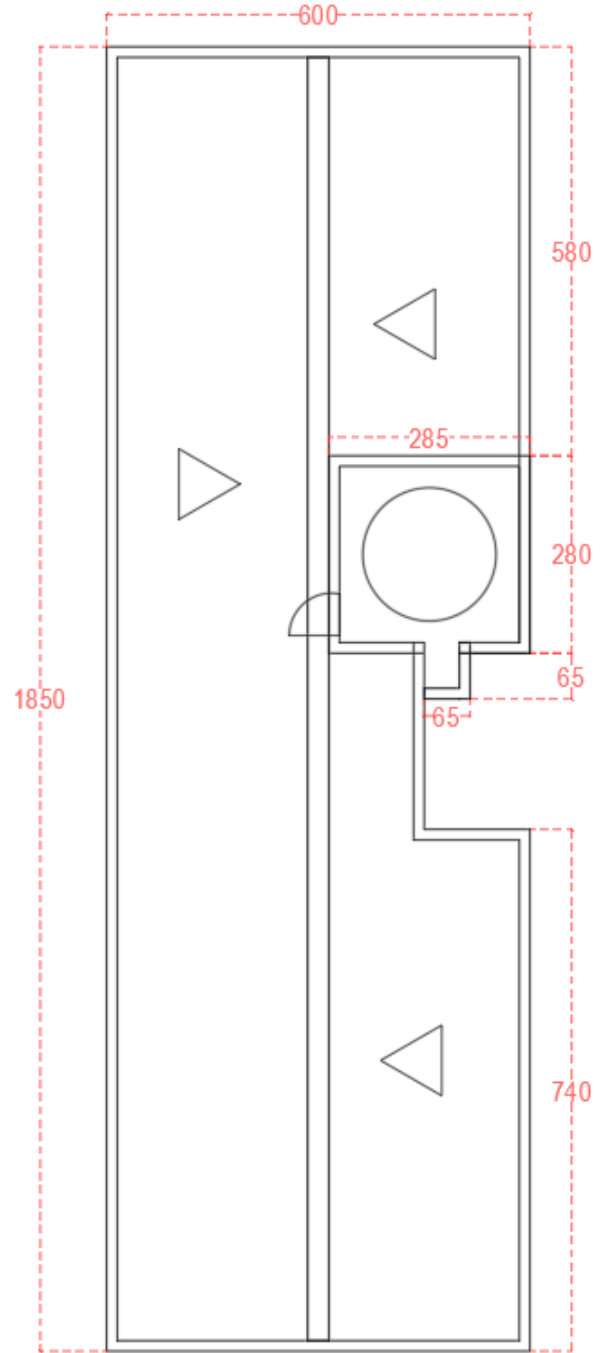
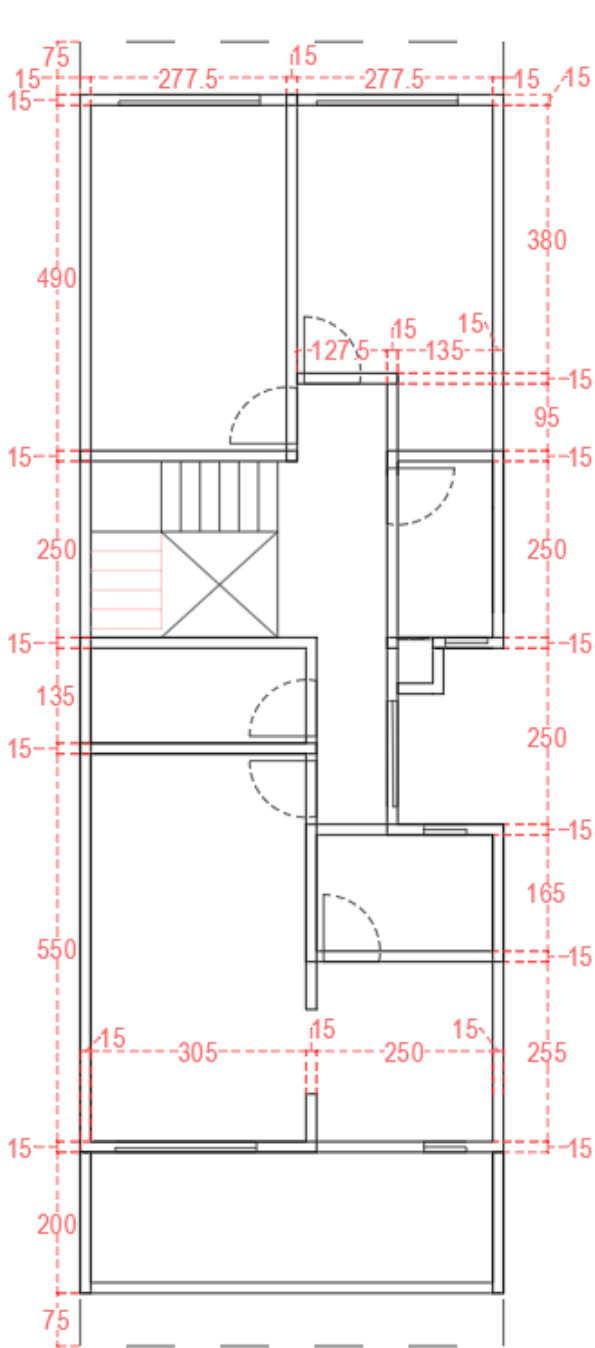
VL22-B



PLANTA BAIXA TÉRREO



PLANTA BAIXA PAV. SUPERIOR E COBERTURA



ANEXOS
– CLASSIFICAÇÃO DAS EDIFICAÇÕES (CSCIP, 2018)

Grupo	Ocupação/Usos	Divisão	Descrição	Exemplos
A	Residencial	A1	Habitação unifamiliar	Casas térreas ou assobradadas (isoladas e não isoladas) e condomínios horizontais
		A-2	Habitação multifamiliar	Edifícios de apartamento em geral
		A-3	Habitação coletiva	Pensionatos, internatos, alojamentos, mosteiros, conventos, residências geriátricas. Capacidade máxima de 16 leitos
B	Serviço de Hospedagem	B-1	Hotel e assemelhado	Hotéis, motéis, pensões, hospedarias, pousadas, albergues, casas de cômodos, divisão A-3 com mais de 16 leitos
		B-2	Hotel residencial	Hotéis e assemelhados com cozinha própria nos apartamentos (incluem-se <i>apart-hotéis</i> , <i>flats</i> , hotéis residenciais)
C	Comercial	C-1	Comércio com baixa carga de incêndio (até 300Mj/m ²)	Artigos de metal, louças, artigos hospitalares e outros
		C-2	Comércio com média e alta carga de incêndio (acima de 300Mj/m ²)	Edifícios de lojas de departamentos, magazines, armarinhos, galerias comerciais, supermercados em geral, mercados e outros
		C-3	<i>Shopping centers</i>	Centro de compras em geral (<i>shopping centers</i>)
D	Serviço Profissional	D-1	Local para prestação de serviço profissional ou condução de negócios	Escritórios administrativos ou técnicos, instituições financeiras (que não estejam incluídas em D-2), repartições públicas, cabeleireiros, centros profissionais, <i>call center</i> e assemelhados
		D-2	Agência bancária	Agências bancárias e assemelhados
		D-3	Serviço de reparação (exceto os classificados em G-4)	Lavanderias, assistência técnica, reparação e manutenção de aparelhos eletrodomésticos, chaveiros, pintura de letreiros e outros
		D-4	Laboratório	Laboratórios de análises clínicas sem internação, laboratórios químicos, fotográficos e assemelhados

Grupo	Ocupação/Usos	Divisão	Descrição	Exemplos
E	Educativa e cultura física	E-1	Escola em geral	Escolas de primeiro, segundo e terceiro graus, cursos supletivos e pré-universitário e assemelhados
		E-2	Escola especial	Escolas de artes e artesanato, de línguas, de cultura geral, de cultura estrangeira, escolas religiosas e assemelhados
		E-3	Espaço para cultura física	Locais de ensino e/ou práticas de artes marciais, natação, ginástica (artística, dança, musculação e outros) esportes coletivos (tênis, futebol e outros que não estejam incluídos em F-3), sauna, casas de fisioterapia e assemelhados. Sem arquibancadas
		E-4	Centro de treinamento profissional	Escolas profissionais em geral
		E-5	Pré-escola	Creches, escolas maternas, jardins de infância
		E-6	Escola para portadores de necessidades especiais	Escolas para excepcionais, deficientes visuais e auditivos e assemelhados
F	Local de Reunião de Público	F-1	Local onde há objeto de valor inestimável	Museus, centro de documentos históricos, galerias de arte, bibliotecas e assemelhados
		F-2	Local religioso e velório	Igrejas, capelas, sinagogas, mesquitas, templos, cemitérios, crematórios, necrotérios, salas de funerais e assemelhados
		F-3	Centro esportivo e de exibição	Arenas em geral, estádios, ginásios, piscinas, rodeios, autódromos, sambódromos, pista de patinação e assemelhados. Todos com arquibancadas
		F-4	Estação e terminal de passageiro	Estações rodoferroviárias e marítimas, portos, metrô, aeroportos, heliponto, estações de transbordo em geral e assemelhados
		F-5	Arte cênica e auditório	Teatros em geral, cinemas, óperas, auditórios de estúdios de rádio e televisão, auditórios em geral e assemelhados
		F-6	Casas de shows	Casas de shows, casas noturnas, boates e assemelhados
		F-7	Construção provisória e eventos temporários	Eventos temporários, circos e assemelhados

Grupo	Ocupação/Usos	Divisão	Descrição	Exemplos
F	Local de Reunião de Público	F-8	Local para refeição	Restaurantes, lanchonetes, bares, cafés, refeitórios, cantinas e assemelhados
		F-9	Recreação pública	Jardim zoológico, parques recreativos e assemelhados
		F-10	Exposição de objetos ou animais	Salões e salas para exposição de objetos ou animais. Edificações permanentes
		F-11	Clubes sociais e diversão	Clubes em geral, restaurantes dançantes, clubes sociais, bingo, bilhares, clube de tiro, centro de eventos, boliche e assemelhados
G	Serviço automotivo e assemelhados	G-1	Garagem sem acesso de público e sem abastecimento	Garagens automáticas, garagens com manobristas
		G-2	Garagem com acesso de público e sem abastecimento	Garagens coletivas sem automação, em geral, sem abastecimento (exceto veículos de carga e coletivos)
		G-3	Local dotado de abastecimento de combustível	Postos de abastecimento e servilo, garagens (exceto veículos de carga e coletivos)
		G-4	Serviço de conservação, manutenção e reparos	Oficinas de conserto de veículos, borracharia (sem recauchutagem). Oficinas e garagens de veículos de carga e coletivos, máquinas agrícolas e rodoviárias, retificadoras e motores
		G-5	Hangares	Abrigos para aeronaves com ou sem abastecimento
		G-6	Marinas	Marinas, iates-clubes, garagens náuticas
H	Serviço de saúde e institucional	H-1	Hospital veterinário e assemelhados	Hospitais, clínicas e consultórios veterinários e assemelhados (inclui-se alojamento com ou sem adestramento)
		H-2	Local onde pessoas requerem cuidados especiais por limitações físicas ou mentais	Asilos, orfanatos, abrigos geriátricos, hospitais psiquiátricos, reformatórios, tratamento de dependentes de drogas, e assemelhados. Todos sem celas
		H-3	Hospital e assemelhado	Hospitais, casa de saúde, prontos-socorros, clínicas com internação, ambulatórios e postos de atendimento de urgência, postos de saúde e puericultura e assemelhados. Com internação

Grupo	Ocupação/Usos	Divisão	Descrição	Exemplos
H	Serviço de saúde e institucional	H-4	Edificações das forças armadas e policiais	Quartéis, delegacias, postos policiais e assemelhados
		H-5	Local onde a liberdade das pessoas sofre restrições	Hospitais psiquiátricos, manicômios, reformatórios, prisões em geral (casa de detenção, penitenciárias, presídios) e instituições assemelhadas. Todos sem internação
		H-6	Clínica e consultório médico e odontológico	Clínicas médicas, consultórios em geral, unidades de hemodiálise, ambulatórios e assemelhados. Todos sem internação
I	Industrial	I-1	Locais onde as atividades exercidas e os materiais utilizados apresentam baixo potencial de incêndio (carga de incêndio até 300MJ/m ²)	Atividades que utilizam pequenas quantidades de materiais combustíveis. Aço, aparelhos de rádio e som, armas, artigos de metal, gesso, esculturas de pedra, ferramentas, jóias, relógios, sabão, serralheria, suco de frutas, louças, máquinas, olaria (cerâmica), criadouros de animais (porcos, aves, gado, etc)
		I-2	Locais onde as atividades exercidas e os materiais utilizados apresentam médio potencial de incêndio (carga de incêndio acima de 300MJ/m ² e até 1.200MJ/m ²)	Artigos de vidro, automóveis, bebidas destiladas, instrumentos musicais, móveis, alimentos, marcenarias, fábricas de caixas
		I-3	Locais onde há alto risco de incêndio (carga de incêndio superior a 1.200MJ/m ²)	Atividades industriais que envolvam inflamáveis, materiais oxidantes, ceras, espuma sintética, grãos, tintas, borracha, processamento de lixo
J	Depósito	J-1	Depósitos de material incombustível	Edificações sem processo industrial que armazenam tijolos, pedras, areias, cimentos, metais e outros materiais incombustíveis. Todos sem embalagem
		J-2	Todo tipo de depósito	Depósitos com carga de incêndio até 300MJ/m ²
		J-3	Todo tipo de depósito	Depósitos com carga de incêndio acima de 300MJ/m ² até 1.200MJ/m ²
		J-4	Todo tipo de depósito	Depósitos onde a carga de incêndio ultrapassa a 1.200MJ/m ²

Grupo	Ocupação/Usos	Divisão	Descrição	Exemplos
L	Explosivos	L-1	Comércio	Comércio em geral de fogos de artifício e assemelhados
		L-2	Indústria	Indústria de material explosivo
		L-3	Depósito	Depósito de material explosivo
M	Especial	M-1	Túnel	Túnel rodoviário e marítimo, destinados a transporte de passageiros ou cargas diversas
		M-2	Líquido ou gás inflamáveis ou combustíveis	Edificação destinada a produção, manipulação, armazenamento e distribuição de líquidos ou gases inflamáveis ou combustíveis
		M-3	Central de comunicação e energia - equipamentos	Central telefônica, centros de comunicação, centrais de transmissão ou de distribuição de energia e assemelhados
		M-4	Propriedade em transformação	Locais em construção ou demolição e assemelhados
		M-5	Unidades de armazenamento e/ou beneficiamento de produtos agrícolas e insumos	Silos, armazéns de grãos a granel, fertilizantes e assemelhados
		M-6	Terra selvagem	Floresta, reserva ecológica, parque florestal e assemelhados
		M-7	Pátio de contêineres	Área aberta destinada a armazenamento de contêineres

– TEMPO REQUERIDO DE RESISTÊNCIA AO FOGO – TRRF (BOMBEIROS, 2012)

Grupo	Divisão	Profundidade do Subsolo h (m)		Altura da Edificação h (m)							
		Classe S2 hs > 10	Classe S1 hs ≤ 10	Classe P1 h ≤ 6	Classe P2 6 < h ≤ 12	Classe P3 12 < h ≤ 23	Classe P4 23 < h ≤ 30	Classe P5 30 < h ≤ 80	Classe P6 80 < h ≤ 120	Classe P7 120 < h ≤ 150	Classe P8 150 < h ≤ 250
A	A-1 a A-3	90	60	30	30	60	90	120	120	150	180
B	B1 e B2	90	60	30	60	60	90	120	150	180	180
C	C-1 a C-3	90	60	60	60	60	90	120	150	150	180
D	D-1 a D-3	90	60	30	60	60	90	120	120	150	180
E	E-1 a E-6	90	60	30	30	60	90	120	120	150	180
F	F-1, F-2, F-5, F-6, F-8 e F-10	90	60	60	60	60	90	120	150	180	-
	F-3, F-4 e F-7	90	60	Ver item A.2.3.3		30	60	60	90	120	-
	F-9	90	60	30	60	60	90	120	-	-	-
G	G-1 e G-2 não abertos lateralmente	90	60	30	60	60	90	120	120	150	180
	G-3 e G-5	90	60	30	60	60	90	120	120	150	180
	G-1 e G-2 abertos lateralmente	90	60	30	30	30	30	60	120	120	150