



UNIVERSIDADE FEDERAL DE UBERLÂNDIA

FACULDADE DE ENGENHARIA CIVIL



TRABALHO DE CONCLUSÃO DE CURSO

**ANÁLISE COMPORTAMENTAL DE LAJES DE
CONCRETO ARMADO EM SITUAÇÃO DE INCÊNDIO**

BRUNO RAVAGNANI RODRIGUES SILVA

BRUNO RAVAGNANI RODRIGUES SILVA

**ANÁLISE COMPORTAMENTAL DE LAJES DE
CONCRETO ARMADO EM SITUAÇÃO DE INCÊNDIO**

Trabalho de Conclusão de Curso
apresentado à Faculdade de
Engenharia Civil da Universidade
Federal de Uberlândia como
requisito parcial para obtenção do
título de bacharel em engenharia
civil.

Orientador: Professor Dr.
Arquimedes Diógenes Ciloni

AGRADECIMENTOS

À esta universidade e à FECIV, pela oportunidade de compor como discente a instituição e por todo conhecimento adquirido ao longo dos anos, conseqüentemente, aos professores pela dádiva de compartilharem o saber.

Ao meu orientador Professor Dr. Arquimedes Diógenes Ciloni, pelas correções acertadas, orientação e apoio durante a escrita deste trabalho e, também, por acreditar e lutar por um país com maior acesso à educação.

Aos amigos que encontrei durante a minha vida, por todas palavras de apoio, carinho e afeto em momentos que mais precisei. Em especial, à Dayanne, que sempre esteve comigo nos melhores momentos e também nos mais desafiadores, foi um prazer construir parte desse estudo ao seu lado.

Mas, principalmente, aos meus pais Simone e Lorival, minha irmã Bianca e meus sobrinhos Manuelly, Pedro e Lucas por não só acreditarem em meu potencial, mas também apoiar todos meus sonhos que não seriam possíveis de serem realizados sem o auxílio de cada um deles. Serei eternamente grato à vocês.

Por fim, um agradecimento geral a todos que, direta ou indiretamente, colaboraram durante toda minha jornada.

RESUMO

O estudo sobre a influência do fogo em materiais tem sido feito ao longo de mais de 150 anos, através desse tempo, com a evolução da engenharia civil, foi possível descobrir novas tecnologias e soluções que garantem maior segurança estrutural para que edifícios, quando submetidos a incêndios, não cedam. Dessa forma, entende-se a importância de levantar pontos relevantes que resultem em discussões benéficas e que gerem avanço em relação a esse assunto. A partir dos anos 1970, as instituições de prevenção e combate ao fogo de todo país estruturaram diversas normativas com o objetivo de reduzir o número de incêndios em edifícios. Porém, acontecimentos recentes no país fizeram com que a segurança estrutural de edifícios submetidos a incêndio se tornasse um dos fatores prioritários no dimensionamento de elementos estruturais. Esse estudo apresenta além de contexto geral e histórico, o estudo de caso de um edifício devidamente dimensionado para a ABNT NBR 6118:2014 – Projeto de estruturas de concreto, com o intuito de verificar se a edificação encontra-se dimensionada conforme recomendações da ABNT NBR 15200:2012 - Projeto de estruturas de concreto em situação de incêndio – Procedimento.

Palavras-chave: Análise térmica, lascamento, resistência ao fogo, lajes, concreto armado.

ABSTRACT

The study on the influence of fire on materials has been carried out for more than 150 years, throughout that time, with the ascension of civil engineering, it was possible to discover new technologies and solutions that guarantee a greater structural safety so that buildings, when subjected to fires, do not collapse. Thus, it is possible to understand the importance of the relevant points that result in beneficial discussions and therefore end up being useful to the progress related to this subject. In the mid-1970s, fire prevention and firefighting institutions across the country have structured many regulations with the aim of reducing the number of fires in buildings. However, recent events in the country have made the structural safety of buildings subjected to fire become one of the priority factors in the design of structural elements. This study presents, besides the general and historical context, the case of a building properly designed for ABNT NBR 6118:2014 – Design of concrete structures, in order to verify if the building is designed according to ABNT NBR 15200:2012 – Design of concrete structures under fire influence – Procedure, recommendations.

Keywords: Thermal analysis, spalling, standard fire resistance, slabs, reinforced concrete.

Sumário

1. Introdução	11
1.1 Objetivos	14
1.2 Estrutura do texto	14
2. Contextualização histórica	15
3. Contextualização geral	28
3.1. Características dos incêndios	28
3.1.1 Tetraedro do Fogo	28
3.1.2 Transferência de Calor	30
3.1.2.1 Convecção	31
3.1.2.2 Radiação	31
3.1.3.3 Condução	32
3.1.3 Curvas de incêndio	33
3.1.3.1 Curva de incêndio natural	33
3.1.3.2 Curva de incêndio-padrão	34
3.1.4 Tempo requerido de resistência ao fogo (TRRF)	35
3.1.5 Efeitos da temperatura na estrutura	36
3.2 Características dos materiais	37
3.2.1 Concreto	37
3.2.1.1 Massa específica	37
3.2.1.2 Calor específico	39
3.2.1.3 Condutividade térmica	40
3.2.1.4 Alongamento térmico	42
3.2.1.5 Resistência à tração	43
3.2.1.6 Resistência à compressão	44
3.2.1.7 Módulo de elasticidade	45
3.2.1.8 Tensão-deformação	46
3.2.2 Aço	48
3.2.2.1 Massa específica	48
3.2.2.2 Calor específico	49
3.2.2.3 Condutividade térmica	49
3.2.2.4 Alongamento térmico	50
3.2.2.5 Resistência à tração e compressão	50
3.2.2.6 Módulo de elasticidade	53
3.2.2.7 Tensão-deformação	54
3.3 Lascamento do concreto	56

4. Dimensionamento de lajes em situação de incêndio	58
4.2 Método Tabular Geral	60
4.3 Método do tempo equivalente (reduzidor de TRRF)	68
4.4 Método tabular NBR 15200:2012 - Dimensionamento de lajes	70
4.5 Ações de segurança em situação de incêndio	75
5. Aplicação em edifício-modelo	77
5.1 Verificação de lajes em situação de incêndio - Método do tempo equivalente	80
5.2 Verificação de lajes em situação de incêndio pelo TQS® - Método tabular	81
5.2.1 Determinação do tempo requerido de resistência ao fogo (TRRF)	81
5.2.2 Critérios de verificação	82
5.2.3 Resultados obtidos na verificação de lajes	83
5.3 Redimensionamento de lajes não conformes	86
6. Considerações finais	91
Referências	92
ANEXO A	97

Lista de figuras

Figura 1 - Edifício Wilton Paes de Almeida em chamas	11
Figura 2 - Museu Nacional durante incêndio	12
Figura 3 - Destroços causados pelo incêndio no Gran Circus Norte-Americano	17
Figura 4 - Efeito moisture clog em laje submetida a incêndio	19
Figura 5 - Edifício Andraus após incêndio	21
Figura 6 - Diagrama de tensão em peça de concreto submetida a altas temperaturas dos dois lados	22
Figura 7 - Ordem de descamação de peça estrutural em contato com o fogo	22
Figura 8 - Edifício Joelma em chamas	23
Figura 9 - Tetraedro do Fogo	29
Figura 10 - Trocas de calor em um forro	33
Figura 11 - Curva temperatura x tempo de um incêndio natural compartimentado	33
Figura 12 - Curva temperatura x tempo de um incêndio-padrão	34
Figura 13 - Áreas equivalentes em incêndio natural x incêndio padrão	35
Figura 14 - Transformações físico-químicas do concreto em altas temperaturas	37
Figura 15 - Variação da massa específica do concreto em função da temperatura	38
Figura 16 - Calor específico do concreto de densidade normal de acordo com a umidade (u)	40
Figura 17 - Comportamento da condutividade térmica em função da temperatura	41
Figura 18 - Limites de condutividade térmica do concreto de densidade normal	42
Figura 19 - Coeficiente $k_{c,\theta}$ de acordo com a temperatura θ	45
Figura 20 - Diagrama tensão-deformação do concreto	46
Figura 21 - Fator de redução da resistência do aço em armaduras em função da temperatura θ	52
Figura 22 - Fator de redução do módulo de elasticidade do aço em função da temperatura θ	53
Figura 23 - Diagrama de tensão-deformação do aço em armaduras passivas e ativas	55
Figura 24 - Efeito sloughing-off em estrutura de concreto armado	56
Figura 25 - Lajes do Channel Tunnel após lascamento explosivo	57
Figura 26 - Propagação de tensões térmicas em cantos vivos e superfície convexa	57
Figura 27 - Classificação dos tipos de lascamento	58
Figura 28 - Curvas de temperatura-tempo	60
Figura 29 - Corte esquemático de edifício-modelo, utilizando o TQS®	77
Figura 30 - Planta baixa do edifício, utilizando o TQS®	78
Figura 31 - Modelo espacial de edificação, utilizando TQS®	79
Figura 32 - Determinação do TRRF utilizando o TQS®	82
Figura 33 - Critérios de verificação de elementos estruturais em situação de incêndio pelo TQS®	83
Figura 34 - Critérios de revestimentos de lajes, pelo TQS®	83
Figura 35 - Verificação das lajes em situação de incêndio - Fundação	84
Figura 36 - Verificação das lajes em situação de incêndio - 1º Pavimento	84
Figura 37 - Verificação das lajes em situação de incêndio - 2º Pavimento	84
Figura 38 - Verificação das lajes em situação de incêndio - 3º Pavimento	85
Figura 39 - Verificação das lajes em situação de incêndio - 4º Pavimento	85
Figura 40 - Verificação das lajes em situação de incêndio - 5º Pavimento	85
Figura 41 - Verificação das lajes em situação de incêndio - Cobertura	85
Figura 42 - Comparação entre lajes L1 e E1 pelo TQS®	87
Figura 43 - Especificações de laje subdimensionada E1	87
Figura 44 - Verificação de resultados do primeiro pavimento, pelo TQS®	88
Figura 45 - Especificações de laje redimensionada E1	89
Figura 46 - Comparação entre lajes L1 e E1 redimensionada pelo TQS®	89

Lista de Tabelas

Tabela 1 - Causas de lascamento em estruturas de concreto armado	25
Tabela 2 - Causas de lascamento em estudos realizados no século XX	25
Tabela 3 - Profundidades máximas causadas por lascamento em laje	28
Tabela 4 - Valor do calor específico de pico entre 100°C e 200°C	39
Tabela 5 - Coeficiente de redução da resistência à compressão do concreto	45
Tabela 6 - Deformação do concreto em função da temperatura conforme Eurocode 2 (2004)	47
Tabela 7 - Deformação do concreto em função da temperatura conforme NBR 15200 (2012)	48
Tabela 8 - Valores de $k_{s,\theta}$ de acordo com a temperatura	51
Tabela 9 - Tempos Requeridos de Resistência ao Fogo (TRRF), em minutos	62
Tabela 10 - Classificação de edificações e áreas de risco em função da ocupação	64
Tabela 11 - Fatores das medidas de segurança contra incêndio	69
Tabela 12 - Valores de γ_1	69
Tabela 13 - Valores de γ_2	70
Tabela 14 - Dimensões mínimas para lajes simplesmente apoiadas (ABNT 15200:2012)	72
Tabela 15 - Dimensões mínimas para lajes contínuas (ABNT 15200:2012)	73
Tabela 16 - Dimensões mínimas para lajes lisas ou cogumelo (ABNT 15200:2012)	73
Tabela 17 - Dimensões mínimas para lajes nervuradas simplesmente apoiadas (ABNT 15200:2012)	74
Tabela 18 - Dimensões mínimas para lajes contínuas em pelo menos uma das bordas (ABNT 15200:2012)	74
Tabela 19 - Dimensões mínimas para lajes nervuradas armadas em uma só direção (ABNT 15200:2012)	75
Tabela 20 - Valores de $G_{m,Z}$ para carregamentos de vento	79
Tabela 21 - Lajes subdimensionadas do edifício analisado	86
Tabela 22 - Dimensões mínimas para lajes lisas ou cogumelos, pelo TQS®	88

1. Introdução

Desde os primórdios da civilização, onde se estabelecia a relação entre propriedade e poder, o fogo tem sido uma ferramenta para conquistas tecnológicas e a evolução dos seres humanos. A história mostra que, na construção civil, mesmo em tempos remotos e com a dificuldade de encontrar registros, sempre existiram incêndios e o consequente impacto que eles causavam em edifícios e moradias dos povos. Sousa (2015) levanta fatos históricos que relacionam a necessidade de se prevenir ou antecipar os danos causados por incêndios, como a criação de novas profissões para o controle de focos incendiários, elementos regulamentados para prevenção e também o levantamento de normativas que facilitaram a execução de projetos de combate.

Nos últimos anos ocorreram diversos acidentes que ocasionaram incêndios em edifícios conhecidos ou mesmo vitimaram pessoas que neles se encontravam. Como exemplo, em 2018, dois edifícios foram acometidos por incêndios que causaram danos irreparáveis à história e à sociedade. O primeiro ocorreu em maio no edifício Wilton Paes de Almeida, localizado no Largo do Paissandu em São Paulo, que ocasionou em 7 vítimas fatais devido ao colapso total da estrutura após o início do incêndio.

Figura 1 - Edifício Wilton Paes de Almeida em chamas



Fonte: Jornalistas Livres¹, 2019.

Além disso, em setembro, o Museu Nacional-RJ, um prédio histórico e de grande valor cultural para o Brasil, foi acometido por um incêndio que danificou diversas obras expostas no museu, fazendo com que se tornasse um dos incêndios que mais causaram perdas patrimoniais e históricas para nosso país.

¹ Disponível em: <<https://jornalistaslivres.org/estrutura-do-predio-wilton-paes-propagou-o-fogo-e-causou-desabamento>>. Acesso em 05 out. 2021.

Figura 2 - Museu Nacional durante incêndio



Fonte: Futura Press/Folhapress², 2018

De acordo com Jansson (2013), o estudo do comportamento de estruturas expostas ao fogo acontece, provavelmente, há mais de 150 anos. Tal fato, explicita a necessidade do entendimento do impacto que incêndios podem causar em edifícios, ocasionando danos ou até mesmo colapsos completos.

Como fato, é amplamente conhecido que existem ações consideradas acidentais, ou seja, aquelas que não são permanentes e conseqüentemente não podem ser precisamente quantificadas. Desse modo, entende-se a importância do dimensionamento de estruturas considerando os efeitos causados por terremotos ou fenômenos semelhantes em países com alta atividade sísmica, de maneira análoga, o dimensionamento estrutural precisa considerar os danos causados por incêndios a fim de se obter margem para fuga das pessoas no local ou mesmo para a contenção do fogo.

Em 2005, a *Centre of Fire Statistics of the International Association of Fire and Rescue Service* (CTIF) realizou um estudo em cerca de 85 países que aponta que a cada quatro

² Disponível em:

<<https://www.acidadeon.com/campinas/cotidiano/NOT,0,0,1366463,incendio+de+grandes+proporcoes+atinge+museu+nacional+no+rio.aspx>>. Acesso em 05 out. 2021.

segundos, pelo menos um incêndio ocorre (BRUSHLINSKY et al., 2006). Por ser pouco difundido no país, o estudo de conflagrações em edifícios se mostra cada vez mais importante, visto que o principal objetivo da segurança contra incêndio é o de proteger vidas humanas. Ademais, projetos adequados facilitam a preservação da segurança de equipes de resgate e reduzem drasticamente os danos e perdas patrimoniais (ALBUQUERQUE, 2012).

Dado ao contexto levantado, entende-se a importância da criação de legislações e normativas com o objetivo de regulamentar, auxiliar e estabelecer parâmetros mínimos para garantir a segurança dos edifícios. Existem diversas instituições que estabelecem essas normativas em âmbitos municipal, estadual, federal e internacional. O Corpo de Bombeiros Militar de Minas Gerais (CBMMG) possui cerca de 44 instruções técnicas (IT) que se dividem em normatizar terminologias, procedimentos, medidas de segurança e sistemas focados na prevenção e combate ao incêndio. Dentre as instruções técnicas, a IT 06 tem como principal objetivo:

Esta Instrução Técnica estabelece as condições a serem atendidas pelos elementos estruturais e de compartimentação que integram as edificações para que, em situação de incêndio, seja evitado o colapso estrutural por tempo suficiente para possibilitar o atendimento das prescrições contidas nas disposições preliminares do Regulamento de Segurança Contra Incêndio e Pânico do Estado de Minas Gerais. (CBMMG, 2020, p. 01)

Atualmente, existem diversas normativas propostas que são dadas pela Associação Brasileira de Normas Técnicas (ABNT), porém, destacam-se duas normas focadas no estudo da influência do fogo em estruturas de concreto armado, sendo elas a NBR 14432:2001 - Exigências de resistência ao fogo de elementos construtivos de edificações - Procedimento, que determina uma série de exigências que os edifícios precisam atender a fim de garantir a segurança e estabilidade da estrutura para que haja fuga e controle do fogo. Além disso, a NBR 15200:2012 estabelece parâmetros para o dimensionamento de estruturas buscando evitar colapsos causados devido à ação do fogo.

Por fim, a *European Committee for Standardization* (EUROCODE) também possui normas que regulamentam o estudo e dimensionamento de estruturas submetidas a incêndio. Como exemplo, a Eurocode 2: *design of concrete structures*, sendo essa dividida

em diversas partes. Com o decorrer deste trabalho serão apresentadas as metodologias e os procedimentos expostos pelas normas citadas anteriormente.

1.1 Objetivos

A partir do contexto apresentado, entende-se a importância do estudo da influência que altas temperaturas podem causar em edifícios, de pequenas rupturas até grandes colapsos. Assim, os principais objetivos deste trabalho são de fazer a análise histórica do impacto que incêndios causam em estruturas e utilizar as metodologias de verificação da segurança estrutural em lajes submetidas ao incêndio, de acordo com as proposições da ABNT NBR 15200:2012 e a Eurocode 2: parte 1-2 (2004).

Dos objetivos específicos:

- Fazer análise histórica e demonstrar a importância de pesquisas e investigações no que tange o estudo de estruturas em situação de incêndio.
- Apresentar o método analítico e o método tabular geral para lajes, de acordo com a NBR 15200:2012, tomando como base a Eurocode 2: parte 1-2 (2004).
- Comparar o efeito de altas temperaturas em um edifício dimensionado para situações normais, de acordo com a NBR 6118:2014, no programa computacional TQS®, além de verificar quais lajes estão subdimensionadas de acordo com as instruções dadas pela NBR 15200:2012.

1.2 Estrutura do texto

Este trabalho está dividido em seis tópicos principais:

- **Tópico 1 - Introdução:** Levantar contextos recentes de incêndios a fim de se demonstrar a importância da análise comportamental de estruturas quando submetidas a altas temperaturas, informar parte das normativas referentes à influência do fogo nessas estruturas, além de descrever superficialmente os objetivos gerais do trabalho;
- **Tópico 2 - Contextualização histórica:** Apontar a evolução na identificação de fenômenos decorrentes de incêndios que acometem edifícios. Como dito, as observações e elaboração de artigos em relação a estruturas submetidas a incêndio acontece há mais de 150 anos, assim, serão apontados os avanços nos estudos que

possibilitaram a criação de metodologias importantes para o desenvolvimento do trabalho proposto pelo autor;

- **Tópico 3 - Contextualização geral:** Neste tópico serão apresentados preceitos básicos de como ocorrem os incêndios, troca de calor, calor específico, comportamento do concreto armado quando aplicadas altas temperaturas, bem como apresentação de preceitos básicos para o dimensionamento das peças estruturais posteriormente;
- **Tópico 4 - Dimensionamento de lajes em situação de incêndio:** Descrever e demonstrar a aplicação do método analítico e método tabular geral para o dimensionamento de lajes submetidas a altas temperaturas a partir de diretrizes da NBR 15200:2012 e a Eurocode 2: parte 1-2 (2004);
- **Tópico 5 - Análise estrutural de edifício:** Com a utilização de uma estrutura devidamente dimensionada de acordo com as diretrizes da NBR 6118:2014 e com o auxílio do programa computacional TQS®, será possível a realização da comparação dessa mesma estrutura em condições normais e quando submetida a altas temperaturas, buscando entender quais lajes seriam colapsadas em caso de um incidente envolvendo o incêndio desses elementos estruturais;
- **Tópico 6 - Considerações finais:** Levantamento geral das considerações finais observadas durante o decorrer do trabalho, bem como as principais noções de sucesso e possíveis ações corretivas para o caso analisado.

2. Contextualização histórica

Ao longo dos últimos séculos surgiram diversas tecnologias, estudos e artigos que possibilitaram o avanço da construção civil como marco para a evolução humana, é fato que o desenvolvimento tecnológico foi um dos efeitos catalisadores da sociedade em relação a esse ponto. Como exemplo, a descoberta dos arcos como estruturas mais estáveis, que possibilitaram a construção de pontes, aquedutos e, conseqüentemente, a ampliação de províncias e cidades que puderam utilizar da engenharia envolvida na construção desses arcos.

Contudo, os estudos iniciais da influência do fogo em estruturas de concreto armado datam de pouco mais de 150 anos, sendo assim, faz-se necessário revisitar os avanços feitos em relação a esse tópico e promover novos estudos que possibilitem chegar a um consenso no que

tange os fenômenos que envolvem estruturas de concreto armado submetidas a incêndio. Jansson (2013) levanta os principais acontecimentos dos últimos dois séculos.

1854: O primeiro registro da influência do fogo em estruturas de concreto acontece a partir da segunda metade do século XIX, em artigo publicado na revista inglesa *Civil Engineering and Architect's Journal*, versão XVII. Em breve descrição, o autor do artigo explana que, ao utilizar o sílex como agregado ao traço do concreto, provavelmente a estrutura iria romper e colapsar sob a ação do fogo.

1866: De acordo com Ingle (1866), em estudo realizado com estrutura de concreto, o uso de água no controle de incêndio pode acelerar o fenômeno de lascamento em elementos estruturais, visto que os agregados do concreto analisado, em contato com a água, dobram de tamanho e geram “fraturas” devido sua expansão.

1911: Após diversos ensaios em estruturas de concreto, Gary (1916) pôde identificar diversos e distintos fenômenos de lascamento nessas estruturas, sendo esses fenômenos categorizados e identificados por Meyer-Ottens (1972). Conforme descrito no item 2.3.

1918: Durante o ano de 1918 se tem um dos primeiros registros do fenômeno de lascamento descrito como efeito causador no colapso de estruturas. O estudo realizado em um edifício inaugurado em 1909 explicita que o uso de cascalho na estrutura de concreto armado, de acordo com Woolson (1918), foi um dos agentes que culminou no colapso da estrutura. Isso se deve a expansão térmica do agregado usado, a qual foi descrita como principal causa da ruptura do local, pois o cascalho passa por grande expansão em temperaturas acima de 575°C. Além disso, outras soluções foram descritas pela American Concrete Institute, como a predileção em utilizar pilares sem quinas, maior cobrimento e proteção do concreto quando não utilizados *sprinklers*³.

1920: Conforme descrito por Hull (1920), agregados como o cascalho são causadores do fenômeno de lascamento na estrutura. Em seu estudo, Hull sugere o uso de uma camada a mais de armação para reforçar o elemento estrutural e limitar os efeitos de lascamento. Porém, pesquisas mais recentes indicam que o uso de camadas extras de armadura não são assertivas em concretos de alta resistência.

³ *Sprinklers*: São chamados de rociadores de incêndio ou chuveiros automáticos, sendo acionados quando fumaça ou incêndio são detectados, no intuito de extinguir o fogo.

1935: Na segunda metade da década de 1930, Hasenjäger (1935), em tese na University of Braunschweig, determina os principais agentes causadores do colapso de estruturas submetidas a incêndio. Sendo eles:

- Aquecimento acelerado do concreto;
- Ultrapassar a resistência à tração por tensão unilateral;
- Rápida alteração de volume dos agregados;
- Pressão devido a liberação de vapor de água do agregado e da argamassa.

Sendo possível observar os dois tipos principais de estresse causado na estrutura que levam ao fenômeno de lascamento: estresse térmico e pressão devido a hidratação. Fatores amplamente estudados na comunidade científica.

1961: Ao final do ano de 1961, o Gran Circus Norte-Americano na cidade de Niterói foi acometido pelo que viria ser o maior incêndio da história do país, devido à uma vingança, no dia 17 de dezembro daquele ano, um ex-funcionário do circo ateou fogo na lona do local, que por ser de material altamente inflamável, alastrou o fogo de maneira muito rápida.

Ao todo, o incêndio causou a morte de 503 pessoas, caracterizando o ocorrido como o maior incêndio da história do Brasil. Porém, mesmo após a tragédia, por muitos anos ainda não haviam sido elaboradas normativas que garantissem a segurança estrutural de locais com alto fluxo de pessoas, preocupação que viria se tornar importante apenas nas últimas décadas do século, com a elaboração de normas e diretrizes por parte das organizações de combate e prevenção ao incêndio.

Figura 3 - Destroços causados pelo incêndio no Gran Circus Norte-Americano



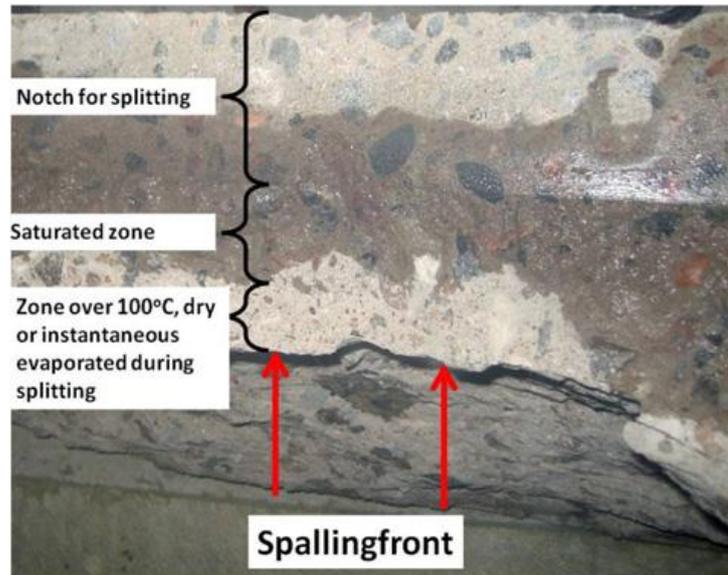
Fonte: Jorge Peter, 1961.

1961 e 1965: Em tese apresentada no início da década de 1960, Shorter e Harmathy (1961) apresentam a *moisture clog theory* que, em suma, descreve uma série de efeitos que ocorrem em uma estrutura submetida a incêndio, como o de dessorção da água em fina camada na superfície. A partir do momento em que a estrutura é submetida a altas temperaturas, o gradiente de pressão faz com que as áreas mais frias da estrutura, ou seja, regiões opostas ao foco de incêndio, fiquem hidratadas devido ao deslocamento de vapor de água para tais regiões, o que faz com que esse vapor ao entrar em contato com os locais mais frios do elemento estrutural se condense. Esse efeito gera uma região na peça chamada de “*moisture clog*”, o que significa, basicamente, que toda essa área está hidratada e em seus níveis máximos de saturação, dificultando o direcionamento de vapor de água.

Esse fenômeno gera altas pressões na região de interseção, entre a região acometida e a superfície hidratada (*moisture clog*), caso essas pressões superem a tensão de resistência à tração, a estrutura se rompe devido ao lascamento. Portanto, a presença da região de hidratação sugere dois principais efeitos que facilitam o colapso dos elementos estruturais: geração de gradiente de temperatura acentuado e pressão causada devido a ação do vapor.

Em testes práticos, Harmathy (1965) descreve que estruturas previamente tratadas e ressecadas, gerando uma camada com saturação próxima a zero de aproximadamente 5-6,5 cm, não sofrem com o lascamento, sugerindo eficácia na tese de superfície hidratada.

Figura 4 - Efeito moisture clog em laje submetida a incêndio



Fonte: Jansson, 2013.

1965: Em reunião na cidade de Braunschweig com tema: “Resistência ao fogo em concreto protendido”, novas considerações sobre causas de colapsos em estruturas de concreto armado foram levantadas. Segundo Kordina (1965), a combinação das seguintes causas podem gerar lascamentos nas estruturas:

- Estresse residual devido aquecimento não uniforme das seções de elementos estruturais;
- Restrição longitudinal excessiva;
- Grande área de superfície hidratada;
- Baixo cobrimento;
- Propriedades minerais dos agregados.

Não obstante, observou-se que os danos em perda de material são mais acentuados quando o fenômeno de lascamento ocorre entre 15 e 30 minutos após o início do incêndio, somado ao aumento rápido de temperatura. Além disso, o efeito de lascamento não ocorre quando não são utilizados agregados com base em cal, dolomita ou quartzo.

Durante o congresso, foram apresentadas novas teorias sobre os efeitos que causam lascamentos em estruturas de concreto, uma dessas teorias apresenta como lascamentos explosivos são iniciados, sendo o efeito causador desses fenômenos os estresses térmicos ocasionando ruptura por compressão.

1966: Em estudo realizado com estruturas de concreto armado submetidas a altas temperaturas, Waubke (1966) demonstra a importância das forças de atrito durante o fluxo de vapor no elemento estrutural. Foi possível perceber que conforme a temperatura em um dos lados da seção da peça aumenta, o fluxo de vapor é direcionado para o lado oposto ao de aplicação do fogo, ocasionando o aumento das forças de atrito nas paredes e, conseqüentemente, tensões de tração no sistema de capilaridade da estrutura analisada.

Considerando que toda a saturação da peça estrutural é liberada, Waubke e Schneider (1973) demonstram que as forças de atrito causadas pelo fluxo de vapor pela estrutura podem causar o fenômeno de lascamento na peça.

1971: Após as diversas teorias apresentadas no congresso na cidade de Braunschweig, Dougill (1971) apresentou otimizações nelas que levam em consideração as propriedades do concreto, que por não se tratar de um material elástico-linear e ser isotrópico, ele não rompe necessariamente quando o ponto de tensão de compressão máxima é atingido.

Outro ponto apresentado por Dougill diz a respeito das propriedades explosivas dos materiais presentes no concreto, portanto, esses fenômenos foram comparados com ensaios de compressão axial e constatado que em ambas ocorre ruptura devido ao acúmulo de energia interna.

1972: Ainda nos primeiros meses do ano, um dos principais prédios da cidade de São Paulo, o edifício Andraus, sofreu um incêndio ocasionado devido à sobrecarga do sistema elétrico no segundo pavimento do prédio. Ao todo, 16 pessoas foram vitimadas pela ação do fogo no prédio.

Além disso, poucos anos depois, em 1974, o Edifício Joelma iria passar pelo mesmo ocorrido, fazendo com que os dois acidentes se tornassem muito importantes para as evoluções nos estudos e aplicação de normativas que garantem segurança estrutural para os usuários. Ao final da década de 1990 diversas regulamentações foram implementadas em vista aos acontecimentos passados.

Figura 5 - Edifício Andraus após incêndio



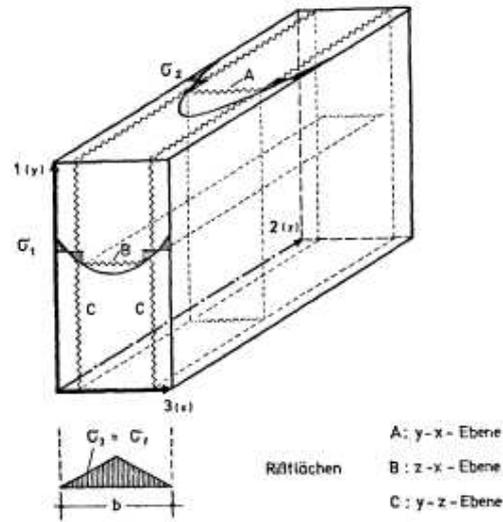
Fonte: São Paulo Antiga⁴, 2008.

1972: Conforme citado anteriormente, no ano de 1972, em estudo conduzido por Meyer-Ottens, o fenômeno de lascamento é amplamente ensaiado com o intuito de se caracterizar não somente os motivos que causam esse efeito, bem como as tipologias de lascamento que podem ser empregadas e subdivididas.

Em suma, foram ensaiadas diversas peças de concreto estrutural com resistência à compressão entre 22,5 e 60 MPa e com os dois lados sendo solicitados a altas temperaturas, um dos principais fatos elucidados foi o do efeito causado pela tensão de compressão e, de maneira direta, os lascamentos ocasionados por conta desse fato. O estudo de Meyer-Ottens foi de extrema importância para a comunidade científica e serviu como base para a elaboração de uma das primeiras versões da Eurocode 1992-1-2.

⁴ Disponível em: <<https://saopauloantiga.com.br/o-incendio-do-andraus-como-nunca-visto-antes>>. Acesso em 05 out. 2021.

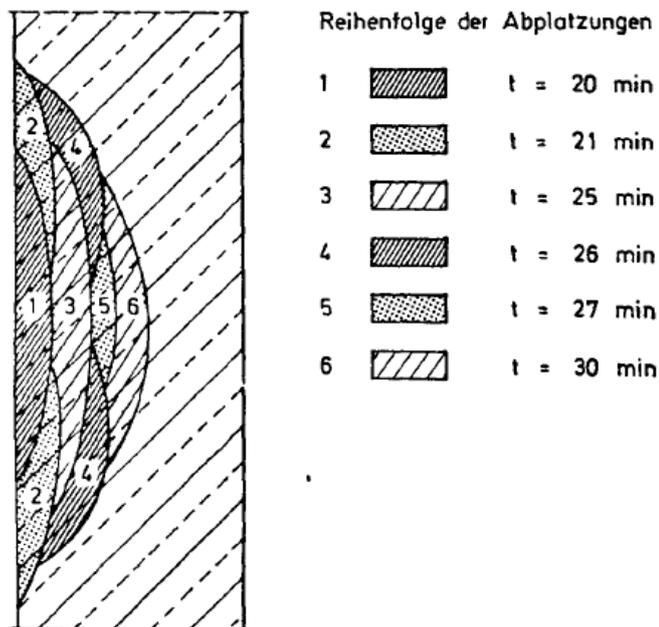
Figura 6 - Diagrama de tensão em peça de concreto submetida a altas temperaturas dos dois lados



Fonte: Meyer-Ottens, 1972.

Por fim, devido ao estudo, foi possível observar com precisão o progresso da perda de material ao longo do tempo das peças estruturais, o que possibilitou o avanço na criação de parâmetros de segurança estrutural, servindo como base, por exemplo, para as normas brasileiras que utilizam o tempo de resistência ao fogo no método de tabulação geral para auxiliar no processo de dimensionamento de sistemas estruturais a fim de se otimizar ao máximo a segurança dos edifícios.

Figura 7 - Ordem de descamação de peça estrutural em contato com o fogo



Fonte: Meyer-Ottens, 1972.

1974: Em menos de dois anos após o ocorrido com o Edifício Andraus, outro prédio na região central da cidade de São Paulo foi acometido por um incêndio que vitimou 187 pessoas, em fevereiro de 1974 o Edifício Joelma pegou fogo após um curto-circuito no sistema de ar-condicionado no 12º pavimento e alastrou até o último pavimento do prédio.

Ainda hoje, o caso do Edifício Joelma é extremamente importante para a criação de normativas de segurança estrutural de prédios. Devido ao incêndio, diversos eventos e causalidades foram consideradas no impacto do incêndio e da propagação dele. Como exemplo, o edifício não possuía escadas externas, o que impossibilitou a rota de fuga das pessoas que estavam dentro do prédio, além disso, conforme relatos, o Edifício Joelma tinha um sistema central de hidrantes que no momento da conflagração estava desativado, o que permitiu que o fogo se espalhasse pela estrutura do prédio (PEREIRA e ARAÚJO JÚNIOR, 2011).

Figura 8 - Edifício Joelma em chamas



Fonte: Wikimedia Commons⁵

1976: Outra revolução para o estudo do efeito de incêndio em estruturas de concreto armado ocorreu na segunda metade da década de 1970. Bennet, Claesson e Thelandersson

⁵ Disponível em: <<https://pt.wikipedia.org/wiki/Ficheiro:Joelma-incendio-011.jpg#/media/Ficheiro:Joelma-incendio-011.jpg>>. Acesso em 07 out. 2021

(1976) desenvolveram um programa computacional capaz de calcular temperatura e pressão distribuídas no concreto exposto ao fogo, a fim de mapear e investigar locais propícios a gerarem lascamento na estrutura. De acordo com o programa, foi possível observar pressões máximas de 1MPa e temperaturas em torno de 200°C, após isso a água presente na estrutura começa evaporar, gerando peças estruturais completamente sem saturação.

1979: Através de estudo empírico e levantamentos bibliográficos anteriores, foi possível identificar os principais causadores do fenômeno de lascamento em estruturas de concreto. Conforme descrito por Copier (1979), o principal efeito causador do fenômeno é a hidratação das camadas exteriores ao local de aquecimento, ao ser combinada com outras causas é possível observar um acréscimo da causalidade ao ser combinada com outros fatores como quantidade de faces aquecidas, armação da estrutura, tensão de compressão e dimensão da peça.

1979: Ao final da década de 1970, em luz aos acontecimentos recentes à época, foi criado o Laboratório de Segurança ao Fogo e a Explosões - LSFEx, no intuito de colaborar com o avanço nos estudos e análises de estruturas comprometidas com incêndio para evitar ou minimizar os efeitos das altas temperaturas em edifícios. Dentre o amplo escopo do laboratório, estão as atividades focadas em avaliações de materiais e elementos construtivos, sistemas de detecção e alarme de incêndio, sistemas de extinção automática e manual etc.

1982: Durante o ano em questão, Hertz (1982) descreveu o estudo realizado com corpos de prova cilíndricos de dimensões 20x10cm, utilizando concreto de alta resistência de 170 MPa. Ao realizar o aquecimento desses corpos de prova com taxa de aquecimento em torno de 1°C por minuto foi possível observar o fenômeno de lascamento explosivo, de acordo com o autor, devido à estrutura possuir uma densa microestrutura, impedindo o vapor escapar e gerando altas tensões no interior da peça.

1984: Conforme os estudos foram avançando, foi possível observar que não existe um consenso específico para os fatores causais do fenômeno de lascamento, portanto, Malhotra (1984) aponta em uma tabela resumida, as principais causas de *spalling* em estruturas de concreto quando submetidas a altas temperaturas. As Tabelas 1 e 2 a seguir são baseadas no estudo apresentado por Malhotra:

Tabela 1 - Causas de lascamento em estruturas de concreto armado

1. Hidratação	1a. Pressão de vapor
	1b. <i>Moisture clogging</i> (zonas saturadas)
	1c. Pressão de vapor amplificada pela resistência ao atrito
2. Estresse	2a. Compressão inicial
	2b. Compressão inicial e estresse térmico
	2c. Compressão inicial, estresse térmico e estresse causado pela resistência ao atrito
3. Fissuração	3a. Expansão de agregado
	3b. Fissuras internas
	3c. Expansão da armadura

Fonte: Autor, 2022

Tabela 2 - Causas de lascamento em estudos realizados no século XX

Pesquisadores	Fatores principais	Fatores secundários
Saito (1965)	2a, 2b, 2c	1a
Harmathy (1965)	1b	
Meyer-Ottens (1972)	1c, 2b	2c, 3c
Sertmehmetoglu (1977)	1b, 3b	2a
Akhtaruzzaman e Sullivan (1970)	1a	Camada de superfície densa
Gustaferrero (1965)	1a	3a
Copier (1979)	2a, 1a	

Fonte: Autor, 2022.⁶

1992: Além de estudo realizado em 1982, Hertz (1992) apresenta em estudo a influência da adição de limalhas (fibras metálicas) no concreto de alta resistência com traços iguais aos dos corpos de prova ensaiados na década anterior. Hertz comprovou que a adição das fibras de aço não impediram que os lascamentos explosivos ocorressem, porém atrasaram o aumento de temperatura do material.

Outro efeito observado foi a pulverização dos corpos de prova devido à explosão causada pelas altas temperaturas, esse fenômeno não foi observado no concreto sem a adição das fibras de aço. Além disso, foi possível observar que a dimensão das peças interferem

⁶ Adaptado de JANSSON, Robert. **Fire spalling of concrete—A historical overview.**

diretamente na ocorrência ou não de lascamento, o autor do artigo não registrou nenhum caso de lascamento em corpos de prova menores, com diâmetros de 100mm e 52mm.

1992: Ainda no segundo ano da década de 90, a European Committee for Standardization (CEN) apresentou a primeira versão da Eurocode 2, norma internacional com objetivo de traçar diretrizes referente ao dimensionamento de peças de concreto armado em situação de incêndio.

Atualmente, a Eurocode 2 é uma das principais normativas que auxiliam na verificação da segurança estrutural em edifícios que sejam acometidos por um incêndio.

1997: Em estudo realizado no final da década, Khoylou (1997) em tese apresentada pela University of London, aponta que o fenômeno de lascamento ocorre devido a presença de poros saturados na estrutura, foi observado que poros com concentração de água acima de 32% fazem com que a água presente expanda durante o aquecimento, causando a saturação total dos poros em temperaturas elevadas. Esse efeito é descrito como predecessor do lascamento nas estruturas.

É possível observar o mesmo efeito em chuveiros automáticos, ou *sprinklers*, que possuem bulbos de vidro com água, conforme a temperatura aumenta, esse líquido expande e faz com que a pressão hidráulica supere a resistência do material, dessa forma, ele se rompe e libera a saída de água para conter o incêndio.

2000: De forma complementar a Khoylou (1997), a teoria BLEVE (*boiling liquid expanding vapour explosion*) de Ichikawa (2000) apresenta que a explosão causada pela expansão de líquidos vaporizados pode ser um dos causadores do fenômeno de lascamento em estruturas de concreto de alta resistência. O estudo mostra que o rápido aquecimento da água presente no concreto acumula energia a um ponto em que os poros do material liberam essa energia causando microexplosões que causam dano a integridade do concreto.

2002: Ainda no início do milênio, Costa (2002) apresenta as diferenciações do fenômeno de lascamentos através de um estudo de caso de diversas estruturas em concreto armado. Foram utilizados como exemplo, o incêndio que acometeu o *Great Belt Tunnel* na Dinamarca em 1994, o *Eurotunnel* entre França e Inglaterra que ocorreu no ano de 1996, entre outros.

2008: Em teoria apresentada por Jansson (2008) foi traçada a relação entre a perda de resistência em áreas de transição do concreto saturado e sem saturação e a redução da peça devido à perda de água.

2012: Após diversos acontecimentos e estudos voltados para a influência do fogo em estruturas de concreto armado, Silva (2012) apresenta em seu livro, *Projetos de estruturas de concreto em situação de incêndio*, aspectos históricos e técnicos que englobam a segurança estrutural de edifícios de concreto.

A publicação desse livro aconteceu após a revisão da ABNT NBR 15200 (2012) e traz as atualizações feitas na última versão da norma base para dimensionamento de peças estruturais de concreto.

2021: Em estudo recente, McNamee;Sjöström; Boström (2021) apresentam a eficiência de fibras de polipropileno quando adicionadas no traço do concreto aplicado nas estruturas. O artigo mostra que mesmo com a adição de pequenas quantidades de fibras é possível reduzir o lascamento de peças estruturais, principalmente com o elemento estrutural estudado, as lajes. Os resultados são apresentados na Tabela 3, abaixo:

Tabela 3 - Profundidades máximas causadas por lascamento em laje

Test specimen	Fibre amount (kg/m ³)	Fire exposure	Maximum spalling depth (mm)	Average spalling depth (mm)
A	0	std	140	97
B	0.2	std	64	38
C	0.2	std	92	49
D	0.3	hc	53	26
E	0.4	std	58	29
F	0.4	std	0	0
G	0.6	std	0	0
H	0.6	std	0	0
I	0.6	hc	0	0
J	0.8	std	0	0
K	0.8	std	0	0
L	0.9	hc	0	0
M	1	std	25	1
N	1	std	0	0
O	1	std	40	19
P	1	std	37	2
Q	1.2	hc	0	0
R	1.5	std	20	0
S ²³	0.7	hc	29	4
T ²³	0.7	hc	0	0
U ²³	1	hc	0	0
V ²³	1	hc	0	0
W ²³	1.5	hc	0	0
X ²³	1.5	hc	0	0
Y ²³	2	hc	0	0
Z ²³	2	hc	0	0

Fonte: McNAMEE;SJÖSTRÖM;BOSTRÖM, 2021.

É possível observar a redução do fenômeno de lascamento conforme as fibras de polipropileno são adicionadas aos traços dos corpos de prova, de A a Z.

3. Contextualização geral

Conforme apresentado no tópico anterior, o estudo da influência do fogo em elementos estruturais é de extrema importância e isto será evidenciado ao longo do trabalho em suas diferentes lentes como materiais, conceituações gerais, normativas, análises e estudo de caso. Porém, de início, se faz necessário explicitar os principais conceitos que ocasionam os incêndios e termos que serão utilizados mais a frente.

3.1. Características dos incêndios

3.1.1 Tetraedro do Fogo

Para que um incêndio ocorra é necessário que em seu foco existam quatro fatores que propiciem o alastramento do fogo no ambiente em que ele for iniciado. A junção destes agentes catalisadores é chamada de Tetraedro do Fogo e, dentre outros estudos, é descrito por Flores, Ornelas e Dias (2016):

A combustão é definida como sendo uma reação química exotérmica que se processa entre um combustível e um comburente liberando luz e calor. Para que esta reação aconteça e se mantenha, são necessários quatro elementos: o combustível, o comburente, o calor e a reação em cadeia. Estes elementos são, didaticamente, simbolizados pelo tetraedro do fogo. (FLORES; ORNELAS; DIAS, 2016, p. 09).

Figura 9 - Tetraedro do Fogo



Fonte: Autor, 2022

Os quatro componentes do Tetraedro do Fogo são descritos a seguir:

Calor: Quando aplicado ao contexto do tetraedro do fogo, é toda energia necessária que é utilizada para principiar e propagar a reação gerada entre o combustível e o comburente. Em suma, o calor é caracterizado pela energia transferida de um local ao outro induzida pelo gradiente térmico entre os dois ambientes;

Combustível: Se caracteriza como todo e qualquer elemento capaz de sofrer combustão e propagar o fogo. Pode se apresentar nos três estados físicos (sólido, líquido e gasoso), além disso, cada material ou substância possui graus de inflamabilidade diferente, isto é, contém maior ou menor facilidade em entrar em combustão devido à sua composição química.

Dentre os diversos combustíveis existentes, os mais comuns são: madeira, carvão, gasolina, etanol, gás de cozinha etc.

Comburente: Durante uma combustão, o comburente é o responsável por manter as chamas, ou seja, é o elemento principal que é consumido para que a chama continue acesa e se propague. Portanto, subentende-se que quanto maior a oferta desse elemento, maior a intensidade das chamas geradas durante o incêndio.

Por estar em abundância na nossa atmosfera, o oxigênio (O_2) é o comburente mais comum nos incêndios e estudos indicam que quando a oferta de oxigênio no ambiente está abaixo dos 9%, a combustão é finalizada (FLORES; ORNELAS; DIAS, 2016).

Reação em cadeia: Para garantir que os três elementos anteriores possam propagar o incêndio é necessário que haja a reação em cadeia durante a combustão, ou seja, após o início do fogo ocorre a decomposição do combustível, que é causada pela irradiação do calor pelo ambiente, assim o comburente reage com esse combustível reduzido em partículas gerando mais calor, dessa forma, o ciclo se repete causando a chamada reação em cadeia. Portanto, é possível afirmar que a sucessão das reações é responsável pela propagação do incêndio.

Por fim, para que uma chama permaneça acesa, é necessário que todos os elementos do Tetraedro do Fogo estejam presentes na reação, a partir do momento que um dos elementos acaba ou finaliza, faz com que o fogo cesse. Assim, a mesma lógica pode ser aplicada para grandes incêndios.

3.1.2 Transferência de Calor

Em estudos da termodinâmica, de maneira resumida, tem-se que o calor é medido pela agitação de moléculas presentes no ambiente analisado, através dessa agitação é gerada a energia cinética média, chamada de energia térmica. Dessa forma, a temperatura é utilizada para quantificar o grau de energia térmica presente em um corpo, quanto maior esse valor, maior o calor do material em análise.

Em suma, o calor pode ser descrito conforme Almeida (2018):

Quando dois corpos com temperaturas diferentes são colocados em contato, acontece uma transferência de energia térmica do corpo de maior temperatura para o corpo de menor temperatura, até que o equilíbrio térmico seja atingido. Esta energia térmica em

trânsito, resultante do gradiente de temperatura entre os corpos, é chamada de calor.
(ALMEIDA, 2018 p. 09)

Durante a troca de calor em um incêndio, ocorrem três fenômenos que são responsáveis por propagar o calor para outros ambientes, são eles: convecção, radiação e condução.

3.1.2.1 Convecção

A convecção é um processo de transferência de energia térmica que acontece através da matéria, sejam elas partículas ou fluidos que estejam presentes na combustão. Em um ambiente acometido por um incêndio, os gases que se encontram nas regiões mais próximas ao fogo se tornam menos densos e, conseqüentemente, sobem para regiões mais altas do local. Assim, esse ciclo se repete conforme os materiais entram em combustão.

Albuquerque (2012), afirma que o aquecimento da estrutura causado pela influência da turbulência dos gases aquecidos é chamado de convecção térmica. A Equação 1 apresentada pela NBR 15200:2012 determina o componente do fluxo de calor convectivo:

$$\varphi_c = \alpha_c(\theta_g - \theta_a) \quad (1)$$

Onde:

φ_c = componente do fluxo de calor causado pela convecção, em W/m²;

α_c = coeficiente de transferência de calor por convecção, em W/m².°C;

θ_g = temperatura dos gases, em °C;

θ_a = temperatura na superfície do aço, em °C.

3.1.2.2 Radiação

A radiação é um processo natural que ocorre quando ondas eletromagnéticas fluem de um material com temperatura maior para um de menor temperatura, esse processo também pode ser chamado de calor radiante ou ondas caloríficas. Essas ondas produzidas durante a radiação

surtem a partir da grande agitação devido ao calor gerado pelo incêndio e podem vir dos materiais, da estrutura ou mesmo dos gases gerados durante a combustão.

Conforme Albuquerque (2022), quando as ondas caloríficas colidem em algum material, elas podem ser absorvidas ou refletidas pela superfície. A Equação 2, a seguir, determina o fluxo de calor radiante absorvido pelas estruturas de concreto:

$$\varphi_r = 5,67 \times 10^{-8} \varepsilon_{res} \left[(\theta_g + 273)^4 - (\theta_a + 273)^4 \right] \quad (2)$$

Onde:

φ_r = componente de fluxo de calor devido à radiação, em W/m²;

ε_{res} = emissividade resultante, que descreve a capacidade que um material tem de irradiar ou absorver calor, normalmente adota-se 0,7.

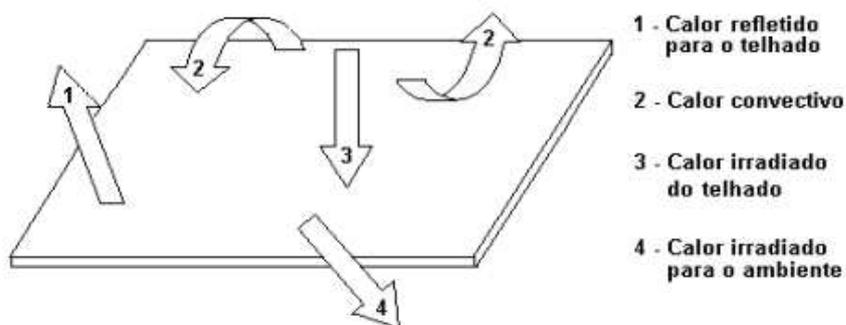
3.1.3.3 Condução

A última propriedade de transmissão de calor é a condução, ela é a única que ocorre através do contato direto entre o corpo de maior temperatura e o de menor temperatura. Este processo é caracterizado pela transferência de energia térmica através da colisão e vibração entre átomos próximos. Assim como os outros processos de transferência de energia, a condução térmica também ocorre a favor do gradiente térmico.

O índice de condutividade térmica é variável, os fatores que alteram esse índice são as propriedades químicas e físicas do material em questão. De maneira geral, os sólidos são considerados melhores condutores térmicos que sólidos e gases, visto que seus átomos estão mais próximos e podem transmitir de maneira mais célere a energia cinética presente no material. Em comparação, o concreto tem um baixo valor de condução térmica quando comparado com outros materiais utilizados na construção civil, o que faz com que isso seja

vantagem para a proteção de estruturas quando submetidas à incêndio. A Figura 10 a seguir descreve a troca de calor em um forro:

Figura 10 - Trocas de calor em um forro



Fonte: VITORINO; SATO; AKUTSU (2003 apud MARTINS, 2004)

3.1.3 Curvas de incêndio

3.1.3.1 Curva de incêndio natural

Por definição, inicialmente, tem-se como preceito básico que incêndio caracteriza-se pela existência de fogo em algum ambiente específico e que não haja a possibilidade de controle sobre esse fogo. Conforme Castro (2005), o incêndio em uma edificação pode ser demonstrado por uma curva em um gráfico que mapeia as temperaturas médias do ambiente acometido pelo fogo ao longo do tempo. O gráfico a seguir discrimina as etapas que compõem um incêndio natural.

Figura 11 - Curva temperatura x tempo de um incêndio natural compartimentado



Fonte: Castro, 2005.

Ignição: É a primeira fase de um incêndio natural, é caracterizado pela ação de iniciar o processo de combustão de alguma substância combustível presente no ambiente e é findada pela inflamação generalizada (*flashover*).

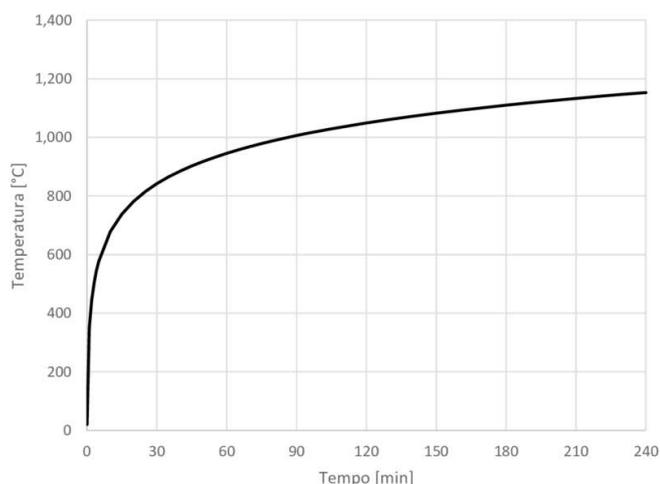
Fase de aquecimento: O início dessa fase é dado pelo *flashover*, que ocorre a partir do momento que o elemento que entrou em ignição começa a irradiar calor por meio dos gases aquecidos e faz com que outros materiais entrem em combustão, podendo estes estarem ou não próximos ao foco do incêndio. Dessa forma, o *flashover* faz com que o ambiente se aqueça até chegar em sua temperatura máxima, com a maioria ou todos os materiais em combustão.

Fase de resfriamento: Após o cessamento do fogo, a estrutura começa a se resfriar naturalmente buscando alcançar o equilíbrio térmico com o ambiente, isso acontece devido a falta de material combustível, o que faz com que não haja mais a liberação de energia térmica e possibilita o resfriamento da estrutura atingida pelo fogo.

3.1.3.2 Curva de incêndio-padrão

Através de diversos ensaios, foi possível chegar a uma curva-padrão que expressa o comportamento da temperatura ao longo do tempo em estruturas em situação de incêndio, como demonstrado abaixo:

Figura 12 - Curva temperatura x tempo de um incêndio-padrão



Fonte: Jorge Saúl Suaznábar, 2018.

A curva descrita na imagem é normatizada pela ISO 834-1 (1999) e pela ABNT NBR 14432:2001 e é representada pela Equação 3 a seguir:

$$\theta_g = \theta_0 + 345 \log (\delta t + 1) \quad (3)$$

Onde:

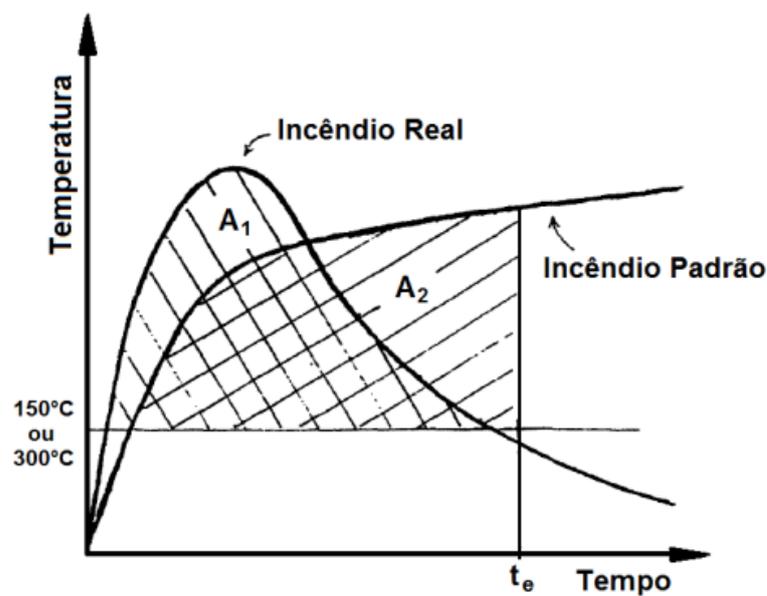
t - tempo de incêndio, a partir do início da queima do elemento combustível, em minutos;

θ_g - temperatura dos gases em função do tempo t;

θ_0 - temperatura ambiente inicial, comumente adotada como 20°C.

A Figura 13 abaixo, demonstra um comparativo entre as curvas de incêndio natural e incêndio padrão:

Figura 13 - Áreas equivalentes em incêndio natural x incêndio padrão



Fonte: Thomas, 1997.

3.1.4 Tempo requerido de resistência ao fogo (TRRF)

O tempo requerido de resistência ao fogo (TRRF) é descrito pela NBR 14432:2001 como o tempo mínimo necessário para que uma estrutura resista à ação de um incêndio-padrão. Portanto, o TRRF pode ser definido a partir do desempenho estrutural através de ensaios e testes executados de maneira isolada. Através desse índice, é possível estimar a temperatura máxima

do incêndio, que será usada para o dimensionamento das peças estruturais por meio do método tabular geral da NBR 15200:2012.

Fatores que podem interferir no tempo requerido de resistência ao fogo:

- Dimensões da edificação;
- Compartimentação do edifício e rotas de fuga;
- Tipo de uso/ocupação da edificação;
- Existência e profundidade de pavimentos subterrâneos que possibilitam a evacuação de pessoas.

Em suma, é importante frisar que o TRRF não deve ser utilizado como parâmetro para fatores como tempo de fuga do edifício, período hábil para ação das unidades de controle de fogo responsáveis ou mesmo o tempo de duração do incêndio. A NBR 14432:2001 preconiza o uso do TRRF exclusivamente para auxiliar no dimensionamento das peças estruturais.

3.1.5 Efeitos da temperatura na estrutura

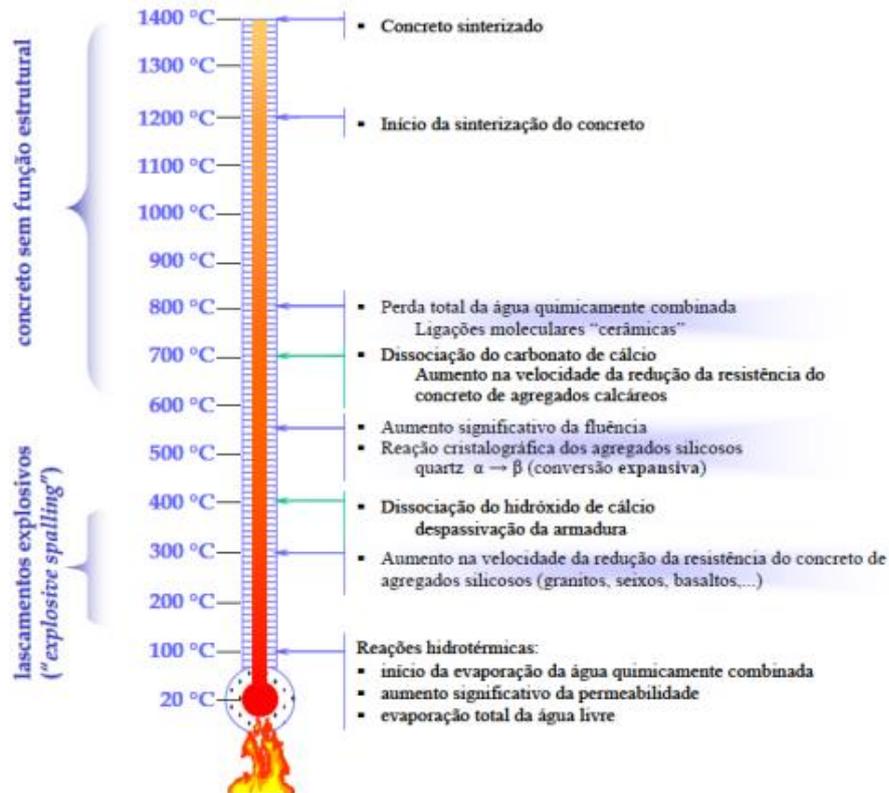
Por mais que sejam amplamente utilizadas no ramo da construção civil e que tenham boas propriedades que reduzem o impacto de incêndios, as estruturas de concreto armado também possuem limitações e precisam ser estudadas justamente para entender como otimizar a eficiência dessas estruturas quando acometidas pela ação do fogo. Por ser um material não combustível e de baixa condutividade térmica, a propagação da energia térmica no concreto acontece de forma mais lenta quando comparada com outros materiais.

Porém, existem algumas propriedades que reduzem a capacidade do concreto em resistir a incêndios, uma delas é a perda das características mecânicas do material quando submetido à altas temperaturas. Além disso, em condições normais de temperatura e pressão, o concreto é considerado um material homogêneo, mas por conter em seu traço agregados com propriedades químicas e físicas diferentes, além do aço, isso faz com que em altas temperaturas esses materiais se comportem de maneiras distintas, podendo causar rupturas nas peças.

Portanto, é importante frisar que essas mudanças ocorrem na microestrutura do concreto quando exposto à situações extremas e seu comportamento pode variar conforme as suas composições

de traço e condições gerais. A Figura 14, a seguir, tem o intuito de demonstrar de maneira geral o comportamento desse material em função da temperatura:

Figura 14 - Transformações físico-químicas do concreto em altas temperaturas



Fonte: COSTA (2008, apud ALMEIDA, 2018)

3.2 Características dos materiais

3.2.1 Concreto

3.2.1.1 Massa específica

A massa específica do concreto, dentro do intervalo de temperatura $20^{\circ}\text{C} \leq \theta \leq 150^{\circ}\text{C}$, depende das massas específicas de seus agregados e da umidade livre presente no concreto. Em temperaturas elevadas é possível observar uma redução considerável na massa específica do concreto endurecido devido à evaporação da água livre e também pelo aumento de volume da

peça por conta da expansão térmica que ocorre quando os agregados passam por uma transformação mineralógica a partir dos 500°C.

A Eurocode 2: part 1-2 (2004) apresenta a Equação 4 que estima os valores de massa específica para o concreto de acordo com a temperatura do material:

$$\rho_{c,\theta} = \rho_c \quad \text{se } 20^\circ\text{C} \leq \theta \leq 115^\circ\text{C}; \quad (4)$$

$$\rho_{c,\theta} = \rho_c * \left[1 - 0,02 * \left(\frac{\theta - 115}{85} \right) \right] \quad \text{se } 115^\circ\text{C} < \theta \leq 200^\circ\text{C};$$

$$\rho_{c,\theta} = \rho_c * \left[0,98 - 0,03 * \left(\frac{\theta - 200}{200} \right) \right] \quad \text{se } 200^\circ\text{C} < \theta \leq 400^\circ\text{C};$$

$$\rho_{c,\theta} = \rho_c * \left[0,95 - 0,07 * \left(\frac{\theta - 400}{800} \right) \right] \quad \text{se } 400^\circ\text{C} < \theta \leq 1200^\circ\text{C}.$$

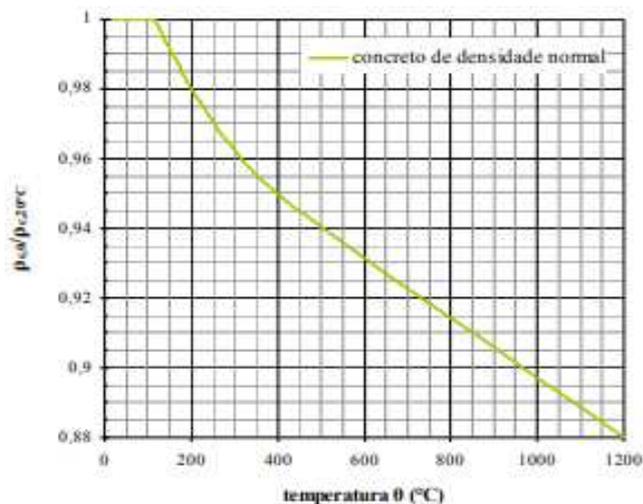
Onde:

ρ_c = massa específica do concreto com densidade normal em temperatura ambiente, em kg/m³;

$\rho_{c,\theta}$ = massa específica do concreto com densidade normal em função da temperatura θ , em kg/m³

Em condições ideais, tem-se que a massa específica do concreto é igual a $\rho_c = 2400 \text{ kg/m}^3$. Por convenção, para dimensionamento de peças estruturais, adota-se $\rho_c = 2500 \text{ kg/m}^3$ como massa específica do concreto armado.

Figura 15 - Variação da massa específica do concreto em função da temperatura



Fonte: Costa, 2008

3.2.1.2 Calor específico

Através dos estudos de calorimetria, define-se que calor específico é a quantidade de calor necessário por unidade de massa para que o material varie em 1°C ou 1K. A Equação 5 explicita os valores de calor específico do concreto com agregados silicosos ou calcários, com umidade $u = 0\%$ e de acordo com a variação de temperatura:

$$c_p(\theta) = 900 \quad \text{se } 20^\circ\text{C} \leq \theta \leq 100^\circ\text{C}; \quad (5)$$

$$c_p(\theta) = c_{p,pico}(\theta) \quad \text{se } 100^\circ\text{C} < \theta \leq 115^\circ\text{C};$$

$$c_p(\theta) = 900 + (\theta - 100) \quad \text{se } 115^\circ\text{C} < \theta \leq 200^\circ\text{C};$$

$$c_p(\theta) = 1000 + \frac{(\theta - 200)}{2} \quad \text{se } 200^\circ\text{C} < \theta \leq 400^\circ\text{C};$$

$$c_p(\theta) = 1100 \quad \text{se } 400^\circ\text{C} < \theta \leq 1200^\circ\text{C}.$$

Onde:

$c_p(\theta)$ = calor específico do concreto com densidade normal em função da temperatura θ , em J/kg/°C.

$c_{p,pico}(\theta)$ = valor de calor específico máximo por unidade de massa do concreto com densidade normal em função da umidade do material e a temperatura θ , em J/kg/°C.

Tabela 4 - Valor do calor específico de pico entre 100°C e 200°C

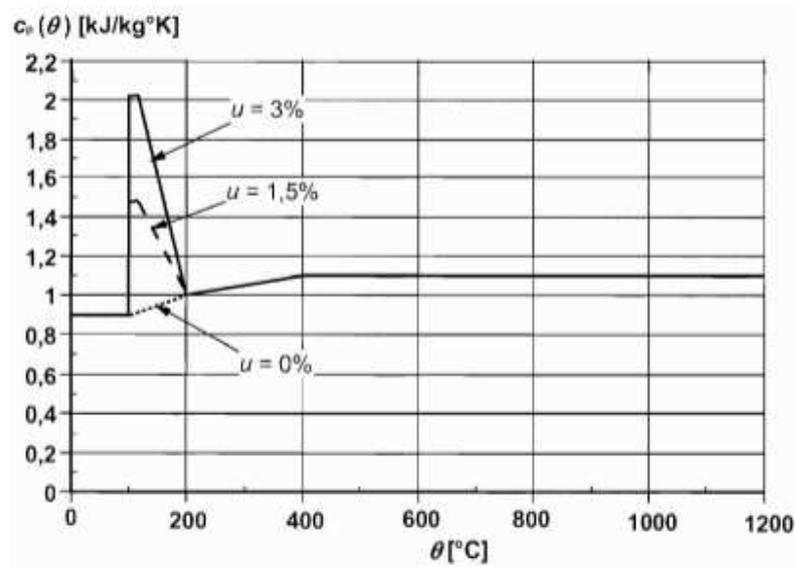
$c_{p,pico}(\theta)$ (J/kg/°C)	U (%)
900	0
1470	1,5
2020	3

Fonte: Autor, 2022.⁷

⁷ Adaptado de EN 1992-1-2: Eurocode 2: design of concrete structures - Part 1.2: general rules – structural fire design, 2004.

Na Figura 16, a seguir, é possível observar o comportamento do calor específico de pico de acordo com a umidade presente na peça de concreto. Além disso, é possível aferir que o concreto atinge seu maior calor específico entre 100°C e 115°C e começa a decrescer gradativamente até os 200°C, voltando ao seu comportamento natural, esse fato se dá através do ponto de ebulição da água presente no concreto que faz com que o vapor quente aja como catalisador no aumento de temperatura da peça.

Figura 16 - Calor específico do concreto de densidade normal de acordo com a umidade (u)



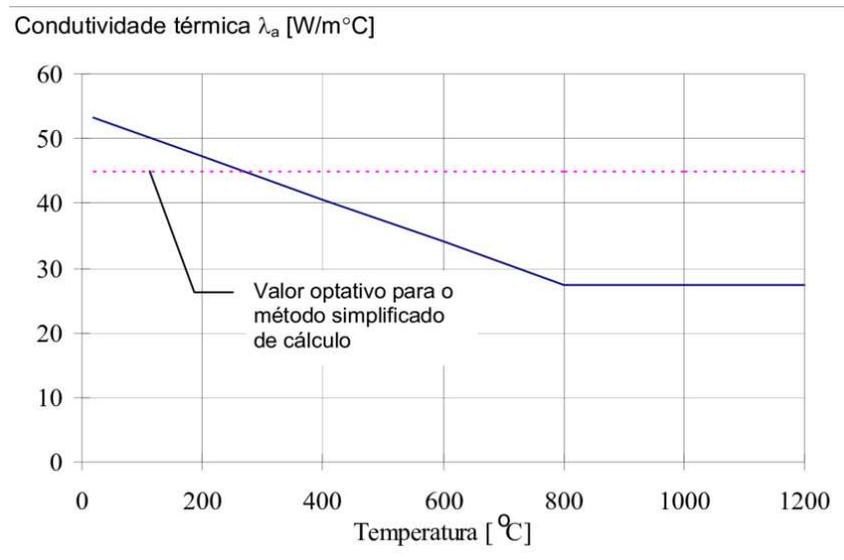
Fonte: Eurocode - European standards, 2004.

3.2.1.3 Condutividade térmica

A condutividade térmica é um índice utilizado para classificar a taxa de condução do calor através de algum material específico. Em termos gerais, quanto maior o valor de condutividade térmica, melhor condutor o material analisado é.

Por meio de diversos estudos foi possível observar que, conforme a temperatura das peças de concreto aumenta, sua condutividade térmica diminui, de maneira análoga ao gráfico apresentado na Figura 17, a seguir:

Figura 17 - Comportamento da condutividade térmica em função da temperatura



Fonte: Silva, 2016.

Dentre as diversas variáveis que podem alterar o valor de condutividade térmica, a composição e porcentagem de agregados presentes no concreto estão diretamente relacionadas ao aumento ou diminuição desse valor. Além disso, o grau de porosidade do material também interfere, visto que quanto mais poroso um concreto, maior a facilidade para o calor permear pelo material.

A Eurocode 2 (EN 1992 1-2:2004) preconiza os valores máximos e mínimos de condutividade térmica que o concreto de densidade normal pode atingir para que ele atenda as normativas empregues. As equações 6 e 7 estabelecem os limites determinados pela norma:

Limite máximo de λ_c :

$$\lambda_c = 2 - 0,2451(\theta/100) + 0,0107(\theta/100)^2 \text{ para } 20^\circ\text{C} \leq \theta \leq 1200^\circ\text{C} \quad (6)$$

Limite mínimo de λ_c :

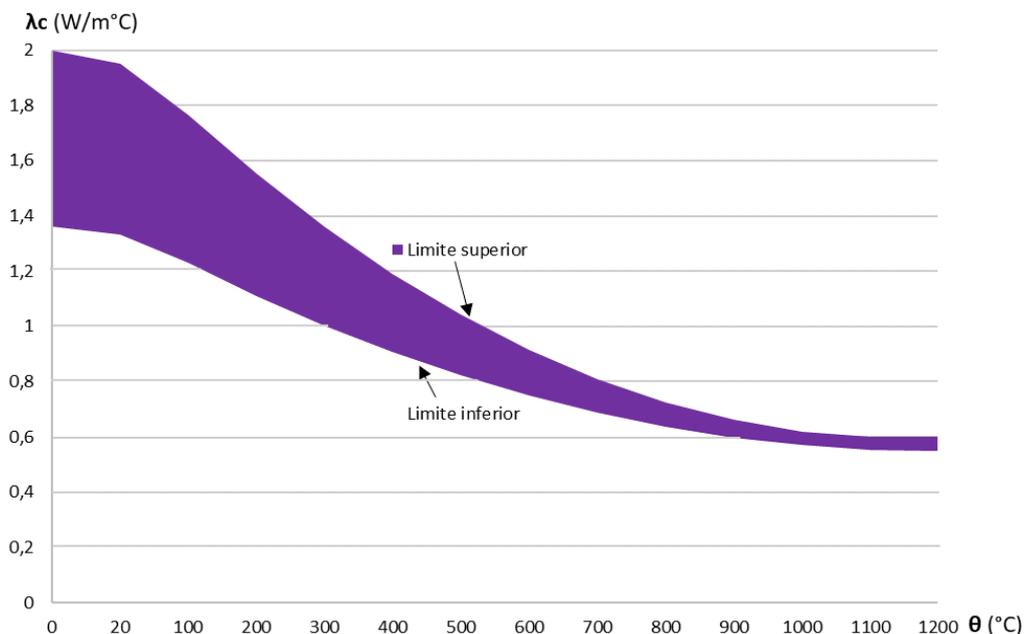
$$\lambda_c = 1,36 - 0,136(\theta/100) + 0,0057(\theta/100)^2 \text{ para } 20^\circ\text{C} \leq \theta \leq 1200^\circ\text{C} \quad (7)$$

Onde:

λ_c = condutividade térmica do concreto em função da temperatura (θ), em W/m°C.

A Figura 18, a seguir, demonstra os limites para os valores de condutividade térmica do concreto:

Figura 18 - Limites de condutividade térmica do concreto de densidade normal



Fonte: Autor, 2022.⁸

3.2.1.4 Alongamento térmico

O alongamento térmico do concreto é definido pela deformação axial do material devido à variação de temperatura. Esse fenômeno está descrito em normativas nacionais e internacionais e varia de acordo com a composição do agregado presente no concreto.

Alongamento térmico em concreto de densidade normal com agregados silicosos:

$$\frac{\Delta l}{l} = -1,8 \times 10^{-4} + 9 \times 10^{-6} \theta + 2,3 \times 10^{-11} \theta^3 \text{ para } 20^{\circ}\text{C} \leq \theta \leq 700^{\circ}\text{C} \quad (8)$$

$$\frac{\Delta l}{l} = 14 \times 10^{-3} \text{ para } 700^{\circ}\text{C} < \theta \leq 1200^{\circ}\text{C}$$

⁸ Adaptado de EN 1992-1-2: Eurocode 2: design of concrete structures - Part 1.2: general rules – structural fire design, 2004.

Onde:

l = comprimento da peça de concreto aos 20°C;

Δl = deformação axial do concreto provocado pelo aumento de temperatura;

θ = temperatura da peça, em °C.

Alongamento térmico em concreto de densidade normal com agregados calcários:

$$\frac{\Delta l}{l} = -1,2 \times 10^{-4} + 6 \times 10^{-6} \theta + 1,4 \times 10^{-11} \theta^3 \text{ para } 20^\circ\text{C} \leq \theta < 805^\circ\text{C} \quad (9)$$

$$\frac{\Delta l}{l} = 12 \times 10^{-3} \text{ para } 805^\circ\text{C} \leq \theta \leq 1200^\circ\text{C}$$

Por fim, a NBR 15200:2012 apresenta a seguinte equação para padronizar a dilatação térmica em peças de concreto:

$$\frac{\Delta l}{l} = 18 \times 10^{-3} (\theta - 20) \text{ para } 20^\circ\text{C} \leq \theta \leq 1200^\circ\text{C} \quad (10)$$

3.2.1.5 Resistência à tração

Mesmo que seja uma das principais propriedades dos materiais, a resistência à tração do concreto em temperaturas ambientes ou elevadas normalmente é desconsiderada por representar cerca de apenas 10% da resistência à compressão do material. Porém, pode-se afirmar que até 100°C pode-se considerar que a resistência à tração permanece no mesmo valor que em temperatura ambiente.

Para temperaturas superiores, a resistência à tração é apresentada pela Equação 11 da Eurocode 2 (2004):

$$f_{ct,\theta} = f_{ct} \text{ para } \theta \leq 100^\circ\text{C} \quad (11)$$

$$f_{ct,\theta} = \left[1 - \left(\frac{\theta - 100}{500} \right) \right] f_{ct} \text{ para } 100^\circ\text{C} < \theta < 600^\circ\text{C}$$

Onde:

$f_{ct,\theta}$ = resistência à tração do concreto em temperaturas elevadas, em MPa;

f_{ct} = resistência à tração do concreto em temperatura ambiente, em MPa.

3.2.1.6 Resistência à compressão

Sabe-se que a resistência à compressão do concreto é uma das propriedades mais importantes do material, porém, conforme a temperatura do ambiente se eleva seu valor diminui. A Equação 12 a seguir descreve a resistência característica em função da temperatura:

$$f_{ck,\theta} = k_{c,\theta} \times f_{ck} \quad (12)$$

A resistência de cálculo é dada pela Equação 13:

$$f_{cd,\theta} = f_{ck,\theta} \quad (13)$$

Onde:

f_{ck} = resistência característica à compressão do concreto em temperatura ambiente, em MPa;

$f_{ck,\theta}$ = resistência característica à compressão do concreto em altas temperaturas, em MPa;

$k_{c,\theta}$ = coeficiente de redução da resistência à compressão do concreto em função da temperatura, descritos da Tabela 5;

$f_{cd,\theta}$ = resistência de cálculo à compressão do concreto em altas temperaturas, em MPa.

Assim como em outras propriedades, a Eurocode 2 (2004) diferencia na Tabela 5, a seguir, o coeficiente de redução da resistência à compressão do concreto conforme os tipos de agregados presentes no traço, sejam silicosos ou calcários:

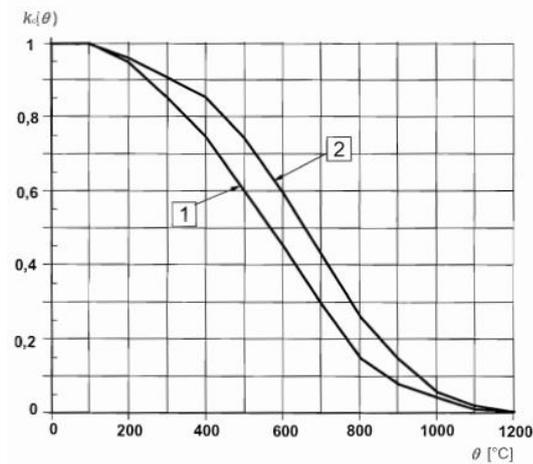
Tabela 5- Coeficiente de redução da resistência à compressão do concreto

Temperatura do concreto (°C)	Agregados Silicosos $f_{ck,\theta}/f_{ck}$	Agregados Calcários $f_{ck,\theta}/f_{ck}$
20	1,00	1,00
100	1,00	1,00
200	0,95	0,97
300	0,85	0,91
400	0,75	0,85
500	0,60	0,74
600	0,45	0,60
700	0,30	0,43
800	0,15	0,27
900	0,08	0,15
1000	0,04	0,06
1100	0,01	0,02
1200	0,00	0,00

Fonte: Autor, 2022.⁹

A Figura 19, descreve a relação entre o coeficiente $k_{c,\theta}$ de acordo com a temperatura θ :

Figura 19 – Coeficiente $k_{c,\theta}$ de acordo com a temperatura θ



Fonte: Eurocode - European standards, 2004.

3.2.1.7 Módulo de elasticidade

⁹ Adaptado de EN 1992-1-2: Eurocode 2: design of concrete structures - Part 1.2: general rules – structural fire design, 2004.

Conforme a temperatura aumenta, o módulo de elasticidade do concreto diminui. A Eurocode 2 (2004) determina a Equação 14 para descrever tal propriedade:

$$E_{c,\theta} = k_{cE,\theta} \times E_c \quad (14)$$

Onde:

$E_{c,\theta}$ = módulo de elasticidade do concreto em temperatura elevada, em MPa;

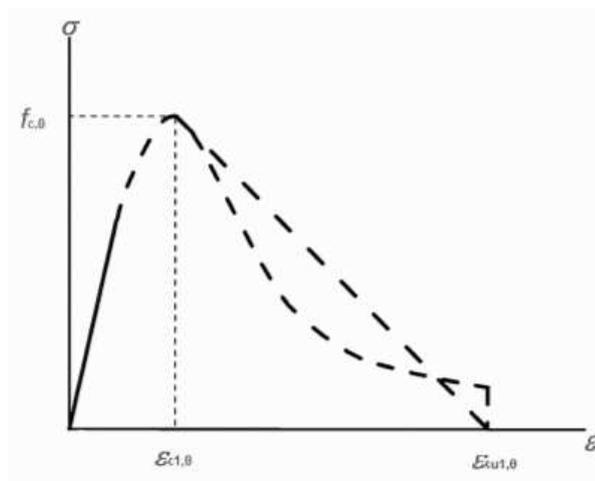
$k_{cE,\theta}$ = coeficiente de redução do módulo de elasticidade do concreto;

E_c = módulo de elasticidade do concreto em temperatura ambiente, em MPa.

3.2.1.8 Tensão-deformação

Conforme a Figura 20, a seguir, é possível observar que o diagrama de tensão-deformação do concreto é dividido em duas partes, a ascendente limitado pelo valor de $\varepsilon_{c1,\theta}$ e o descendente limitado por $\varepsilon_{cu,\theta}$:

Figura 20 - Diagrama tensão-deformação do concreto



Fonte: Eurocode - European standards, 2004.

A Equação 15, apresentada pela Eurocode (2004), descreve a curva apresentada na figura anterior:

$$\sigma_{c,\theta} = f_{c,\theta} \times \frac{3\left(\frac{\varepsilon_{c,\theta}}{\varepsilon_{cl,\theta}}\right)}{2+\left(\frac{\varepsilon_{c,\theta}}{\varepsilon_{cl,\theta}}\right)^3} \quad (15)$$

Onde:

$\sigma_{c,\theta}$ = tensão à compressão em função da temperatura, em MPa;

$f_{c,\theta}$ = resistência à compressão do concreto em altas temperaturas, em MPa;

$\varepsilon_{c,\theta}$ = deformação linear do concreto em função da temperatura;

$\varepsilon_{cl,\theta}$ = deformação linear do concreto correspondente a sua resistência máxima à compressão.

Para o trecho descendente, as normativas definem que a Equação 15 pode ser usada, mas também pode-se adotar o trecho linear entre $\varepsilon_{cl,\theta}$ e $\varepsilon_{cu,\theta}$. Os valores de deformação são dados pelas Tabelas 6 e 7, a seguir:

Tabela 6 - Deformação do concreto em função da temperatura conforme Eurocode 2 (2004)

Temperatura do concreto (°C)	Agregados Silicosos		Agregados Calcários	
	$\varepsilon_{cl,\theta}$	$\varepsilon_{cu,\theta}$	$\varepsilon_{cl,\theta}$	$\varepsilon_{cu,\theta}$
20	0,0025	0,0200	0,0025	0,0200
100	0,0040	0,0225	0,0040	0,0225
200	0,0055	0,0250	0,0055	0,0250
300	0,0070	0,0275	0,0070	0,0275
400	0,0100	0,0300	0,0100	0,0300
500	0,0150	0,0325	0,0150	0,0325
600	0,0250	0,0350	0,0250	0,0350
700	0,0250	0,0375	0,0250	0,0375
800	0,0250	0,0400	0,0250	0,0400
900	0,0250	0,0425	0,0250	0,0425
1000	0,0250	0,0450	0,0250	0,0450
1100	0,0250	0,0475	0,0250	0,0475

Fonte: Autor, 2022.¹⁰

¹⁰ Adaptado de EN 1992-1-2: Eurocode 2: design of concrete structures - Part 1.2: general rules – structural fire design, 2004.

Tabela 7 - Deformação do concreto em função da temperatura conforme NBR 15200 (2012)

Temperatura do concreto	Agregados Silicosos	
	θ_c (°C)	$\epsilon_{cl,\theta}$ (%)
20	0,25	2,00
100	0,35	2,25
200	0,45	2,50
300	0,60	2,75
400	0,75	3,00
500	0,95	3,25
600	1,25	3,50
700	1,40	3,75
800	1,45	4,00
900	1,50	4,25
1000	1,50	4,50
1100	1,50	4,75
1200	1,50	-

Fonte: Autor, 2022.¹¹

3.2.2 Aço

O aço tem uma importante função em elementos estruturais compostos de concreto armado, complementar a resistência à tração do material e criar rigidez para a estrutura. Existem diversas normativas que descrevem as propriedades térmicas e mecânicas do aço quando submetido à ação do fogo, conforme a seguir:

3.2.2.1 Massa específica

A massa específica do aço é considerada constante, isso se deve ao fato do material possuir uma estrutura microcristalina muito definida, o que o torna estável quando submetido a altas temperaturas. Adota-se $\rho_s = 7850 \text{ kg/m}^3$.

¹¹ Adaptador de NBR 15200:2012 – “Projeto de estruturas de concreto em situação de incêndio”, 2012.

3.2.2.2 Calor específico

O calor específico do aço por ser definido através da equação a seguir:

$$c_{a,\theta} = 425 + 7,73 \times 10^{-1}\theta - 1,69 \times 10^{-3}\theta^2 + 2,22 \times 10^{-6}\theta^3 \text{ para } 20^\circ\text{C} \leq \theta < 600^\circ\text{C} \quad (16)$$

$$c_{a,\theta} = 666 - \left(\frac{13002}{\theta - 738} \right) \text{ para } 600^\circ\text{C} \leq \theta < 735^\circ\text{C}$$

$$c_{a,\theta} = 545 - \left(\frac{17820}{\theta - 731} \right) \text{ para } 735^\circ\text{C} \leq \theta < 900^\circ\text{C}$$

$$c_{a,\theta} = 650 \text{ para } 900^\circ\text{C} \leq \theta \leq 1200^\circ\text{C}$$

Onde:

$c_{a,\theta}$ = calor específico do aço em função da temperatura θ , em J/kg/°C.

A NBR 14323 considera o valor de calor específico do aço como constante e igual a $c_a = 600$ J/kg°C.

3.2.2.3 Condutividade térmica

A equação da condutividade térmica do aço é preconizada pela Eurocode 4 (2005), conforme a Equação 17, a seguir:

$$\lambda_{a,\theta} = 54 - 3,33 \times 10^{-2}\theta \text{ para } 20^\circ\text{C} \leq \theta < 800^\circ\text{C} \quad (17)$$

$$\lambda_{a,\theta} = 27,3 \text{ para } 800^\circ\text{C} \leq \theta \leq 1200^\circ\text{C}$$

Onde:

$\lambda_{a,\theta}$ = condutividade térmica do aço em função da temperatura θ , em W/m°C.

De acordo com a NBR 14323 (2003) o valor de condutividade térmica do aço, para efeitos de cálculo, pode ser considerado constante e igual a $\lambda_{a,\theta} = 45$ W/m°C

3.2.2.4 Alongamento térmico

Assim como as outras propriedades térmicas, o alongamento térmico do aço pode ser dado pela seguinte equação, apresentada pela NBR 14323 (2003):

$$\frac{\Delta l_a}{l_a} = 1,2 \times 10^{-5} \theta_a + 0,4 \times 10^{-8} \theta_a^2 - 2,416 \times 10^{-4} \text{ para } 20^\circ\text{C} \leq \theta_a < 750^\circ\text{C} \quad (18)$$

$$\frac{\Delta l_a}{l_a} = 1,1 \times 10^{-2} \text{ para } 750^\circ\text{C} \leq \theta_a \leq 860^\circ\text{C}$$

$$\frac{\Delta l_a}{l_a} = 2 \times 10^{-5} \theta_a - 6,2 \times 10^{-3} \text{ para } 860^\circ\text{C} < \theta_a \leq 1200^\circ\text{C}$$

Onde:

l_a = comprimento da peça de aço a 20°C ;

Δl_a = expansão térmica da peça de aço provocada pela temperatura;

θ_a = temperatura do aço, em $^\circ\text{C}$.

Além disso, para efeitos de cálculo, o valor de alongamento térmico do aço pode ser simplificado pela seguinte equação:

$$\frac{\Delta l_a}{l_a} = 14 \times 10^{-6} (\theta_a - 20) \quad (19)$$

3.2.2.5 Resistência à tração e compressão

De maneira análoga ao concreto, às propriedades mecânicas do aço também sofrem alterações sob a influência de altas temperaturas. A resistência à tração do aço diminui conforme a temperatura aumenta, através do coeficiente $k_{s,0}$ é possível metrificar essa redução.

As equações a seguir apresentam os valores de resistência à tração do aço em valores característicos e de cálculo:

$$f_{yk,\theta} = k_{s,\theta} \times f_{yk} \quad (20)$$

$$f_{yd,\theta} = f_{yk,\theta} \quad (21)$$

Onde:

$f_{yk,\theta}$ = resistência característica do aço em função da temperatura θ , em MPa;

$k_{s,\theta}$ = coeficiente de redução da resistência em função do aço em função da temperatura θ ;

f_{yk} = resistência característica do aço em temperatura ambiente, em MPa;

$f_{yd,\theta}$ = resistência de cálculo do aço em função da temperatura θ , em MPa;

A Tabela 8, a seguir, presente na NBR 15200 (2012) aponta os valores do coeficiente de redução da resistência à tração do aço.

Tabela 8 - Valores de $k_{s,\theta}$ de acordo com a temperatura

Temperatura do aço, θ °C	$f_{y,\theta}/f_{yk}$			$E_{s,\theta}/E_s$	
	Tração		Compressão CA-50 ou CA-60	CA-50	CA-60
	CA-50	CA-60			
1	2	3	4	5	6
20	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00
100	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00
200	1,00	1,00	0,89	0,90	0,87
300	1,00	1,00	0,78	0,80	0,72
400	1,00	0,94	0,67	0,70	0,56
500	0,78	0,67	0,56	0,60	0,40
600	0,47	0,40	0,33	0,31	0,24
700	0,23	0,12	0,10	0,13	0,08
800	0,11	0,11	0,08	0,09	0,06
900	0,06	0,08	0,06	0,07	0,05
1 000	0,04	0,05	0,04	0,04	0,03
1 100	0,02	0,03	0,02	0,02	0,02
1 200	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00

Fonte: ABNT NBR 15200, 2012.

Para os valores de $k_{s,\theta}$ relativos à resistência à compressão do aço, a Eurocode 2 (2004) preconiza a equação a seguir, que divergem da tabela anterior:

$$k_{s,\theta} = 1,0 \text{ para } 20^\circ\text{C} \leq \theta < 100^\circ\text{C} \quad (22)$$

$$k_{s,\theta} = 0,7 - \frac{0,3(\theta-400)}{300} \text{ para } 100^\circ\text{C} \leq \theta < 400^\circ\text{C}$$

$$k_{s,\theta} = 0,57 - \frac{0,13(\theta-500)}{100} \text{ para } 400^\circ\text{C} \leq \theta < 500^\circ\text{C}$$

$$k_{s,\theta} = 0,1 - \frac{0,47(\theta - 700)}{200} \text{ para } 500^\circ\text{C} \leq \theta < 700^\circ\text{C}$$

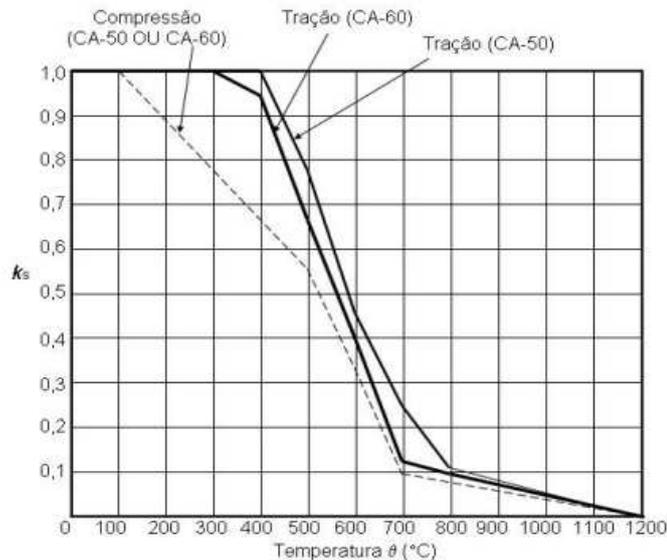
$$k_{s,\theta} = 0,1 - \frac{0,1(1200-\theta)}{500} \text{ para } 700^\circ\text{C} \leq \theta \leq 1200^\circ\text{C}$$

A NBR 15200:2012 aponta que os valores de deformação do aço (ε_{si}) são limitadores para o coeficiente de redução da resistência do aço, conforme abaixo:

- k_s relativo à resistência à tração: Aplicável quando $\varepsilon_{si} \geq 2\%$, usualmente em armaduras tracionadas de vigas, lajes ou tirantes;
- k_s relativo à resistência à compressão: Aplicável quando $\varepsilon_{si} < 2\%$, usualmente em armaduras comprimidas de pilares, vigas ou lajes.

A Figura 21, a seguir, apresenta as informações acima:

Figura 21 - Fator de redução da resistência do aço em armaduras passivas em função da temperatura θ



Fonte: ABNT NBR 15200, 2012.

3.2.2.6 Módulo de elasticidade

O módulo de elasticidade do aço também diminui conforme a temperatura aumenta e é dado pela expressão apresentada pela NBR 15200 (2012):

$$E_{s,\theta} = k_{sE,\theta} E_s \quad (23)$$

Onde:

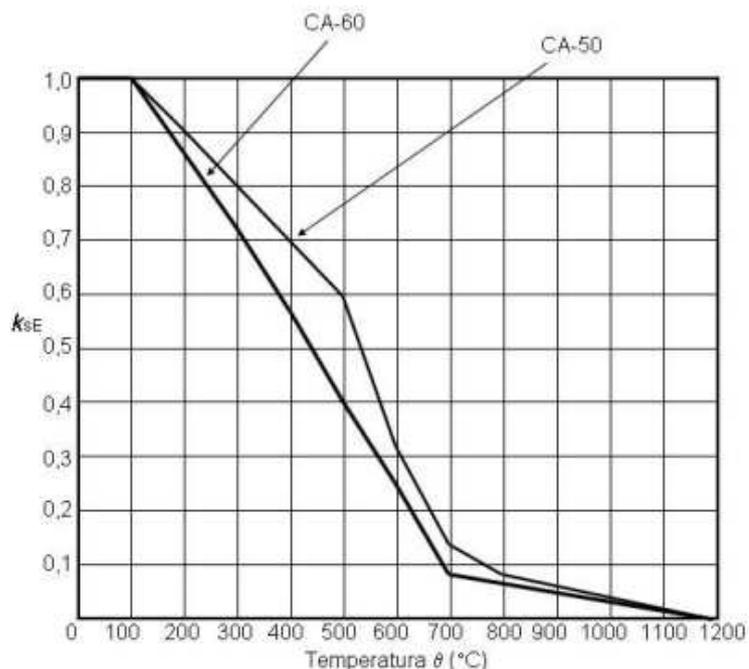
$E_{s,\theta}$ = módulo de elasticidade do aço de armadura passiva em função da temperatura θ ;

E_s = módulo de elasticidade do aço de armadura passiva em condições normais;

$k_{sE,\theta}$ = fator de redução do módulo de elasticidade do aço em função da temperatura θ ;

A Figura 22 apresenta os valores de $k_{sE,\theta}$ em função da temperatura:

Figura 22 - Fator de redução do módulo de elasticidade do aço em função da temperatura θ



Fonte: ABNT NBR 15200, 2012.

3.2.2.7 Tensão-deformação

O diagrama de tensão-deformação do aço de armaduras passivas quando submetido à altas temperaturas é dado pela Eurocode 2 (2004), pela equação a seguir:

$$\sigma_{s,\theta} = \varepsilon_{s,\theta} E_{s,\theta} \quad \text{para } 0 \leq \varepsilon_{s,\theta} < \varepsilon_{p,\theta} \quad (24)$$

$$\sigma_{s,\theta} = f_{p,\theta} - c + \frac{b}{a} \sqrt{a^2 - (\varepsilon_{y,\theta} - \varepsilon_{s,\theta})^2} \quad \text{para } \varepsilon_{p,\theta} \leq \varepsilon_{s,\theta} < \varepsilon_{y,\theta}$$

$$\sigma_{s,\theta} = f_{yk,\theta} \quad \text{para } \varepsilon_{y,\theta} \leq \varepsilon_{s,\theta} < \varepsilon_{t,\theta}$$

$$\sigma_{s,\theta} = f_{yk,\theta} \left[1 - \left(\frac{\varepsilon_{s,\theta} - \varepsilon_{t,\theta}}{\varepsilon_{u,\theta} - \varepsilon_{t,\theta}} \right) \right] \quad \text{para } \varepsilon_{t,\theta} \leq \varepsilon_{s,\theta} < \varepsilon_{u,\theta}$$

$$\sigma_{s,\theta} = 0 \quad \text{para } \varepsilon_{s,\theta} > \varepsilon_{u,\theta}$$

$$a^2 = (\varepsilon_{y,\theta} - \varepsilon_{p,\theta})(\varepsilon_{y,\theta} - \varepsilon_{p,\theta}) + \frac{c}{E_{s,\theta}}$$

$$b^2 = c(\varepsilon_{y,\theta} - \varepsilon_{p,\theta})E_{s,\theta} + c^2$$

$$c = \frac{(f_{yk,\theta} - f_{p,\theta})^2}{(\varepsilon_{y,\theta} - \varepsilon_{p,\theta})E_{s,\theta} - 2(f_{yk,\theta} - f_{p,\theta})}$$

$$\varepsilon_{p,\theta} = \frac{f_{p,\theta}}{E_{s,\theta}}$$

$$\varepsilon_{y,\theta} = 0,02$$

$$f_{p,\theta} = k_{p,\theta} f_{yk}$$

Onde:

$f_{yk,\theta}$ = resistência do aço ao escoamento em função da temperatura θ , em MPa;

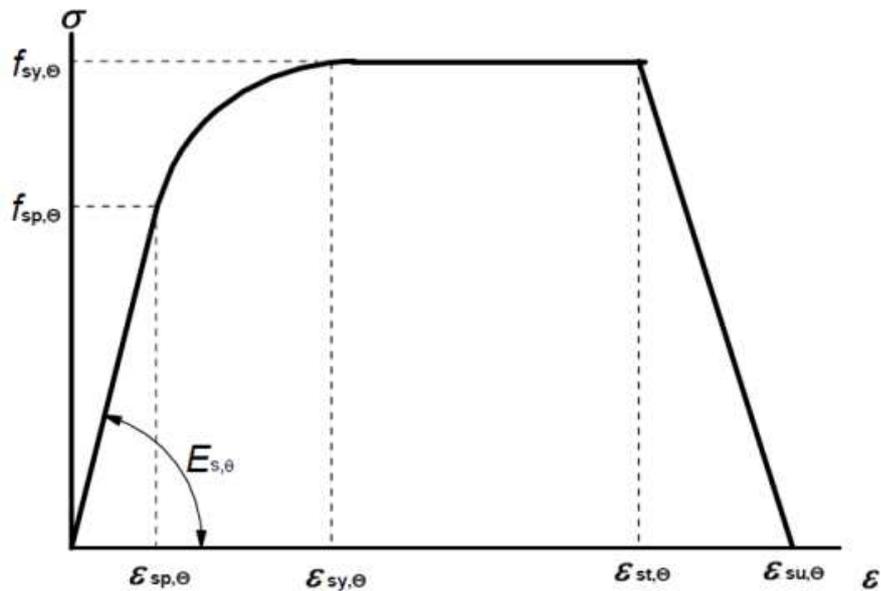
f_{yk} = resistência do aço ao escoamento em temperatura ambiente, em MPa;

$f_{p,\theta}$ = resistência ao limite de proporcionalidade do aço em função da temperatura θ , em MPa;

$k_{p,\theta}$ = coeficiente redutor do limite de proporcionalidade do aço em função da temperatura θ ;

$E_{s,\theta}$ = módulo de elasticidade do aço em função da temperatura θ , em MPa.

Figura 23 - Diagrama de tensão-deformação do aço em armaduras passivas e ativas



Fonte: Eurocode - European standard, 2004

A Eurocode 2 discrimina que os parâmetros $\epsilon_{t,\theta}$ e $\epsilon_{u,\theta}$ relativos à deformação do aço dependem da classe de resistência do material:

Aço CA-25 e CA-50:

$$\epsilon_{t,\theta} = 0,15$$

$$\epsilon_{u,\theta} = 0,20$$

Aço CA-60:

$$\epsilon_{t,\theta} = 0,05$$

$$\epsilon_{u,\theta} = 0,10$$

3.3 Lascamento do concreto

Como definição básica, o lascamento do concreto pode ser descrito conforme Purkiss (1996 apud COSTA, 2002):

O lascamento é um fenômeno natural nas estruturas de concreto, quando elas são expostas a altas temperaturas. Dentro da matriz de concreto, desenvolvem-se tensões de origem térmica, que influem na desintegração das regiões superficiais dos elementos estruturais. (PURKISS, 1996 apud. COSTA, 2002)

O fenômeno do lascamento no concreto pode ocorrer por diversos motivos, dentre eles as propriedades térmicas e mecânicas dos materiais, condições do ambiente, temperatura, entre outros. Os efeitos causados pelo lascamento podem ocasionar rupturas ou mesmo colapsos em estruturas de concreto armado.

As ocorrências de lascamento foram divididas em 4 principais categorias:

- 1. Lascamento de agregado:** Ocorre conforme os agregados mais próximos à superfície dilatam e geram o desprendimento da estrutura, causando pequenas crateras no elemento estrutural e de pouca interferência em sua resistência. (HERTZ, 2003)
- 2. Lascamento superficial:** Também conhecido como *sloughing-off*, ocorre quando gera, a partir da ação do fogo, uma esfoliação gradual e de grandes dimensões na estrutura de concreto armado, causando perdas consideráveis de material e exposição de outras camadas ao fogo.

Figura 24 - Efeito *sloughing-off* em estrutura de concreto armado



Fonte: McNamee, 2021.

3. Lascamento explosivo: De maneira geral, lascamentos explosivos são caracterizados pelo comportamento da mistura cimentícia em contato com altas temperaturas, causando a liberação de energia e o desprendimento de material de forma repentina e rápida. Esse fenômeno causa perda de material e cavidades na estrutura, ocorre normalmente em regiões sem armadura e, quando observados em locais com armadura, não ultrapassa as camadas superiores após sua exposição. (PURKISS apud COSTA, 2002)

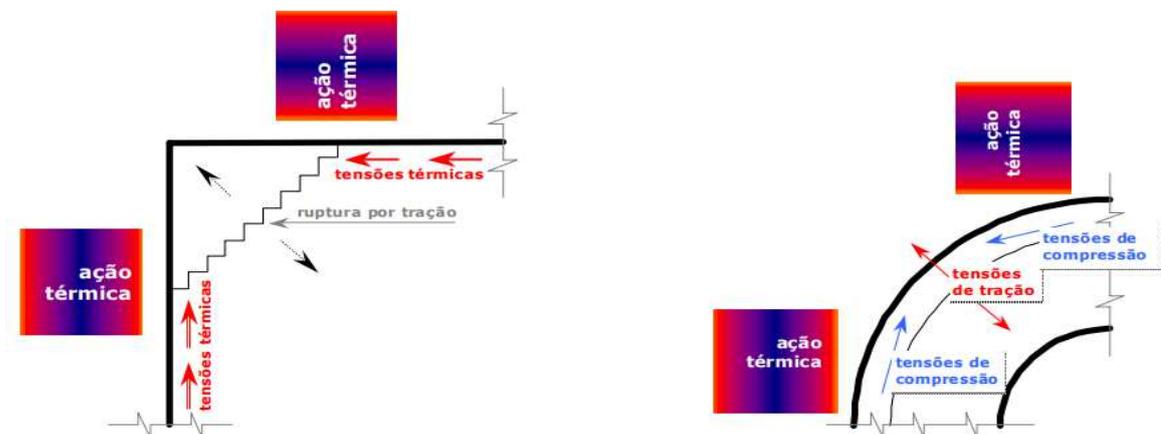
Figura 25 - Lajes do Channel Tunnel após lascamento explosivo



Fonte: ULM, 2000.

4. Lascamento de quina: Esse fenômeno ocorre em cantos vivos de estruturas devido à distribuição de tensões durante o incêndio, conforme indica a Figura 26:

Figura 26 - Propagação de tensões térmicas em cantos vivos e superfície convexa



Fonte: ANDERBERG (1997, apud. NINCE, 2006)

Em estudo apresentado por Khoury e Majorana (2001) os quatro tipos de lascamento são apresentados conforme categoria, tipo, tempo de ocorrência, natureza, som e nível de dano, conforme Figura 27, a seguir:

Figura 27 - Classificação dos tipos de lascamento

Lascamento		Tempo de ocorrência (min)	Natureza	Som	Nível dos danos
Categoria	Tipo				
1	Do agregado	7 - 30	splitting	pipoca	superficial
2	Superficial	7 - 30	violento	fissuração	pode ser sério
3	Explosivo	7 - 30	violento	estouro	sério
4	Das quinas	30 - 90	nao violento	nenhum	pode ser sério

Fonte: KHOURY; MAJORANA (2001, apud. NINCE, 2006)

4. Dimensionamento de lajes em situação de incêndio

O dimensionamento de peças estruturais ocorre em diversas fases e análises, após o estudo das propriedades do material, faz-se necessário estudar a composição do sistema construtivo e determinar a resistência desse sistema de elementos estruturais ao incêndio. Com a evolução dos estudos envolvendo estruturas de concreto armado submetidas a altas temperaturas, é possível, através de diversas normativas, discriminar suas resistências por meio de metodologias empíricas.

4.1 Compartimentação e TRRF

Uma das principais medidas de proteção passiva utilizadas nos edifícios é a compartimentação. Através da criação de compartimentos, é possível impedir que o fogo se alastre rapidamente, o que possibilita maior tempo de fuga aos que se encontram no edifício. Além disso, os compartimentos podem impedir ou retardar a propagação do incêndio para edifícios próximos.

Para isso, é preciso que tanto o edifício, quanto os compartimentos isolados tenham três elementos principais que sirvam para aumentar a resistência ao fogo do edifício, são eles:

Segurança estrutural: Se trata da capacidade da estrutura se manter autoportante e com índice de estabilidade global acima do requerido, a fim de evitar o colapso total da estrutura.

Estanqueidade: Como preceito básico, a estanqueidade de um elemento se dá na capacidade desse material de impedir que ocorram fissuras, rachaduras ou patologias similares que permitam a percolação de chamas ou gases aquecidos o suficiente para fazer um chumaço de algodão entrar em combustão, conforme preconiza a ABNT NBR 5628:2001 e ABNT NBR 10636:1989.

Isolamento térmico: A ABNT NBR 5628:2001 e ABNT NBR 10636:1989 definem que o isolamento térmico é a capacidade de um elemento de impedir que a face não exposta ao incêndio atinja uma média de 140°C nos pontos analisados ou 180°C em qualquer ponto medido. Em suma, os materiais são caracterizados como isolantes térmicos quando evitam a passagem de calor do local acometido pela conflagração.

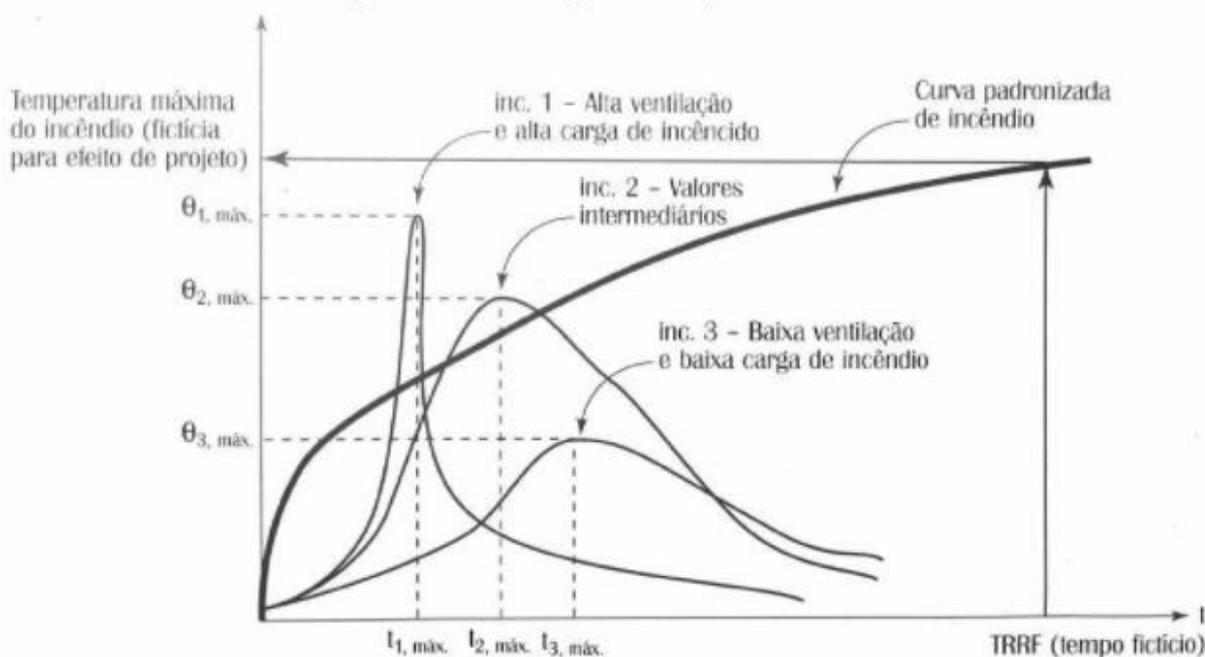
Portanto, para que a compartimentação seja eficiente, é necessário que o elemento estrutural analisado atinja resultados satisfatórios nos três pontos de análise, caso ele tenha apenas uma das funções descritas, faz-se necessário a determinação da duração de resistência ao fogo através do ensaio de resistência mecânica e deformação, apresentada por Gomide (2005).

Através da ABNT NBR 5628:2001 é possível identificar o método de ensaio utilizado para determinar a resistência ao fogo dos elementos estruturais quando estão sob ação de um incêndio-padrão conforme a curva de temperatura-tempo descrita anteriormente. Para o ensaio é preciso que seja utilizada uma amostra que represente o componente estrutural de modo a simular, de maneira mais próxima possível, o contexto do edifício a ser analisado. Através desse ensaio é possível identificar os três elementos necessários para classificar um edifício como seguro quando submetido ao incêndio (segurança estrutural, estanqueidade e isolamento térmico), todos eles são obtidos na unidade de tempo.

Por fim, para mapear o tempo requerido de resistência ao fogo (TRRF) é preciso analisar diversas variáveis que podem alterar o diagrama em função da temperatura máxima atingida pelo ambiente. Dessa forma, através de tempos fictícios atribuídos à curva de um incêndio-

padrão, foi possível observar os fatores divergentes que interferem nos diagramas, conforme expõe a Figura 28:

Figura 28 - Curvas de temperatura-tempo



Fonte: SILVA, 2012.

A metodologia mais usual para obter o TRRF é através do método tabular geral, sendo esse apresentado pela ABNT NBR 14432:2001 e por diversas IT's estaduais, conforme apresentado no item 4.2, a seguir.

4.2 Método Tabular Geral

Através dessa metodologia empírica, obtida por meio de diversos estudos conjuntos apresentados pelo meio acadêmico e técnico, é possível obter os TRRF em função do tipo de ocupação e altura da edificação. Além disso, o TRRF é obtido, também, através do risco de incêndio, de maneira a se considerar o risco do incidente e suas eventuais consequências.

Em conformidade com as normas de segurança estrutural em situação de incêndio, a IT

06: Segurança Estrutural das Edificações (2005) apresenta, conforme Tabela 9, os tempos requeridos de resistência ao fogo em função do uso da edificação e categoria. Através do Decreto Estadual nº 44.746/2008 de Minas Gerais, o entendimento a respeito das tabelas apresentadas pela IT 06 será facilitado. Nesse regulamento encontra-se a Tabela 10, que discrimina as edificações conforme classificação e áreas de risco.

Faz-se importante salientar que os compartimentos e elementos estruturais essenciais precisam ter, no mínimo, o mesmo TRRF da estrutura matriz do edifício, exceto para ambientes subsolo, que possuem classificação específica, conforme apresentado na Tabela 9.

Além de todas as considerações anteriores, a IT 06 (2005) também apresenta edifícios que são isentos de TRRF, para isso é necessário analisar a instrução técnica e verificar se a edificação atende todos os requisitos que são dispostos pela IT relativos à proteção ativa e passiva que os elementos estruturais possuem.

Tabela 9 - Tempos Requeridos de Resistência ao Fogo (TRRF), em minutos

Grupo	Ocupação/Us	Divisão	Profundidade do Subsolo h		Altura da edificação h					
			Class e S2 h > 10m	Classe S1 h ≤ 10m	Edificação Baixa		Edificação Média Altura		Medianamente Alta	Alta
					Classe P1 h ≤ 6m	Classe P2 6m < h ≤ 12m	Classe P3 12m < h ≤ 23m	Classe P4 23m < h ≤ 30m	Classe P5 30m < h ≤ 54m	h > 54m
A	Residencial	A-1 a A-3	90	60	30	30	60	90	120	CT
B	Serviços de hospedagem	B-1 e B-2	90	60	30	60 (30)	60	90	120	CT
C	Comercial varejista	C-1	90	60	60 (30)	60 (30)	60	90	120	CT
		C-2 e C-3	90	60	60	60 (30)	60	90	120	CT
D	Serviços profissionais, pessoais e técnicos	D-1 a D-3	90	60	30	60 (30)	60	90	120	CT
E	Educacional e cultura física	E-1 a E-6	90	60	30	30	60	90	120	CT
F	Locais de reunião de público	F-1, F-2, F-5 e F-6, F-8, F-10, F- 11	90	60	60 (30)	60	60	90	120	CT
		F-3, F-4 e F-7	90	60	60	60	30	30	CT	CT
		F-9	CT							
G	Serviços automotivos	G-1 e G-2 não abertos lateralmente e G-3 a G-6	90	60 (30)	30	60 (30)	60	90	120	CT
		G-1 e G-2 abertos lateralmente	90	60 (30)	30	30	30	30	60	120

Tabela 9 - Tempos Requeridos de Resistência ao Fogo (TRRF), em minutos (continuação)

Grupo	Ocupação/Usos	Divisão	Profundidade do Subsolo h		Altura da edificação h					
			Classe S ₂ h > 10m	Classe S ₁ h ≤ 10m	Edificação Baixa		Edificação Média Altura		Medianamente Alta	Alta
					Classe P ₁ h ≤ 6m	Classe P ₂ 6m < h ≤ 12m	Classe P ₃ 12m < h ≤ 23m	Classe P ₄ 23m < h ≤ 30m	Classe P ₅ 30m < h ≤ 54m	h > 54m
H	Serviços de saúde e institucionais	H-1 e H-4	90	60	30	60	60	90	120	CT
		H-2, H-3 e H-5	90	60	30	60	60	90	120	CT
I	Industrial	I-1	90 (60)	60 (30)	30	30	30	60	120	CT
		I-2	120	90	30	30	60 (30)	90	120	CT
		I-3	120	90	60 (30)	60 (30)	90 (60)	120 (90)	120	CT
J	Depósitos	J-1	60	30	30	30	30	30	60	CT
		J-2	90	60 (30)	30	30	30	30	60	CT
		J-3	90	60 (30)	30	60	60	120 (90)	120	CT
		J-4	120	90	60	60	90 (60)	120 (90)	120	CT
L	Explosivos	L-1, L-2 e L-3	120	120	120	CT	CT			
M	Especial	M-1	150	150	15	CT				
		M-2	CT							
		M-3	120	90	90	90	120	CT		

Fonte: CBMMG, 2005.

Notas da Tabela 9:

1. CT = Consultar Corpo Técnico junto ao Corpo de Bombeiros Militar de Minas Gerais;
2. Os tempos entre parênteses podem ser usados em subsolos nos quais a área bruta de cada pavimento seja menor ou igual a 500m² e em edificações nas quais cada pavimento acima do solo tenha área menor ou igual a 750m², desde que haja compartimentação vertical entre os pavimentos;
3. O TRRF dos subsolos não pode ser inferior ao TRRF dos pavimentos situados acima do solo;
4. Para edificações com altura entre 54m e 80m, poderão ser exigidos os mesmos TRRF das edificações de classe P5.

Tabela 10 - Classificação de edificações e áreas de risco em função da ocupação

Grupo	Ocupação/Uso	Divisão	Descrição	Exemplos
A	Residencial	A-1	Habitação unifamiliar	Casas térreas ou assobradadas (isoladas e não isoladas e condomínios horizontais).
		A-2	Habitação multifamiliar	Edifícios de apartamento em geral.
		A-3	Habitação coletiva	Pensionatos, internatos, alojamentos, mosteiros, conventos, residências geriátricas. Capacidade máxima de 16 leitos, sem acompanhamento médico.
B	Serviços de hospedagem	B-1	Hotel e assemelhado	Hotéis, motéis, pensões, hospedarias, pousadas, albergues, casas de cômodos e divisão A3 com mais de 16 leitos, e assemelhados.
		B-2	Hotel residencial	Hotéis e assemelhados com cozinha própria nos apartamentos (incluem-se apart-hotéis, hotéis residenciais) e assemelhados.
C	Comercial	C-1	Comércio com baixa carga de incêndio	Armarinhos, artigos de metal, louças, artigos hospitalares e outros.
		C-2	Comércio com média e alta carga de incêndio	Edifícios de lojas de departamentos, magazines, galerias comerciais, supermercados em geral, mercados e outros.
		C-3	Shopping center	Centros de compras em geral (<i>shopping centers</i>).
D	Serviço profissional	D-1	Repartições públicas e locais para prestação de serviço profissional ou condução de negócios	Edificações do Executivo, Legislativo e Judiciário, tribunais, cartórios, escritórios administrativos ou técnicos, instituições financeiras (que não estejam incluídas em D-2), cabeleireiros, teleatendimento, centros profissionais e assemelhados.
		D-2	Agência bancária	Agências bancárias e assemelhadas.
		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.
E	Educativa e cultura física	E-1	Escola em geral	Escolas de primeiro, segundo e terceiro graus, cursos supletivos e pré-universitários e assemelhados.
		E-2	Escola especial	Escolas de arte e artesanato, de línguas, de cultura geral, de cultura estrangeira, escolas religiosas e assemelhados.

Tabela 10 - Classificação de edificações e áreas de risco em função da ocupação (continuação)

Grupo	Ocupação/Usos	Divisão	Descrição	Exemplos
E	Educativa e cultura física	E-3	Espaço para cultura física	Locais de ensino e/ou prática de práticas de artes marciais, ginásticas (artística, dança, musculação e outros), esportes coletivos (tênis, futebol e outros que não estejam incluídos em F-3), sauna, casas de fisioterapia e assemelhados.
		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 deficiência	Escola para excepcionais, deficientes visuais e auditivos e assemelhados.
F	Local de reunião de público	F-1	Local onde há objeto de valor inestimável	Museus, centros de documentos históricos, bibliotecas e assemelhados.
		F-2	Local religioso ou velório	Igrejas, capelas, sinagogas, mesquitas, templos, cemitérios, crematórios, necrotérios, salas de funerais e assemelhados.
		F-3	Centro esportivo de exibição	Estádios, ginásios e piscinas com arquibancadas, rodeios, autódromos, sambódromos, arenas em geral, pistas de patinação e assemelhados.
		F-4	Estação e terminal de passageiro	Estações rodoferroviárias e lacustres, portos, metrô, aeroportos, helipontos, estações de transbordo em geral e assemelhados.
		F-5	Arte cênica	Teatros em geral, cinemas, óperas, auditórios de estúdios de rádio e televisão e assemelhados.
		F-6	Local de diversão	Boates, salões de baile, restaurantes dançantes e casas de show.
		F-7	Evento temporário	Circos, feiras em geral, shows e assemelhados.
		F-8	Local para refeição	Restaurantes, lanchonetes, bares, cafés, refeitórios, cantinas e assemelhados.
		F-9	Recreação	Edificações permanentes de jardins zoológicos, parques recreativos, clubes sociais, bilhares, boliches, casas de jogos e assemelhados.
		F-10	Exposição de objetos e animais	Salões e salas de exposição de objetos e animais, <i>show-room</i> , galerias de arte, aquários, planetários e assemelhados. Edificações permanentes.
		F-11	Auditórios	Auditórios em geral, com palco sem movimentação de cenários.

Tabela 10 - Classificação de edificações e áreas de risco em função da ocupação (continuação)

Grupo	Ocupação/Usos	Divisão	Descrição	Exemplos
G	Serviços automotivos e assemelhados	G-1	Garagem sem acesso de público	Garagens automotivas, garagens de veículos de carga e coletivos.
		G-2	Garagem com acesso de público	Garagens coletivas sem automação.
		G-3	Local dotado de abastecimento de combustível	Postos de abastecimento e serviço.
		G-4	Serviço de conservação, manutenção e reparos	Oficinas de conserto de veículos, borracharias (sem recauchutagem), oficinas de veículos de carga e coletivos, máquinas agrícolas e rodoviárias, retificadoras de motores.
		G-5	Hangares	Abrigos para aeronaves com ou sem abastecimento.
H	Serviço de saúde e institucional	H-1	Hospital veterinário	Hospitais, clínicas veterinárias (inclui-se alojamento com ou sem adestramento).
		H-2	Locais onde pessoas requerem cuidados especiais por limitações físicas ou mentais	Asilos, orfanatos, abrigos geriátricos, hospitais psiquiátricos, reformatórios, locais para tratamento de dependentes químicos e assemelhados. Todos sem cela.
		H-3	Hospital e assemelhado	Hospitais, casa de saúde, prontos-socorros, clínicas com internação, ambulatórios e postos de atendimento de urgência, postos de saúde e puericultura e assemelhados com internação.
		H-4	Edificações das forças armadas e policiais	Centrais de polícia, delegacias e quartéis sem carceragem, postos policiais e assemelhados.
		H-5	Local onde a liberdade de pessoas sofre restrição	Hospitais psiquiátricos, manicômios, reformatórios, prisões em geral (casa de detenção, penitenciárias, presídios, cadeias públicas, delegacias e quartéis com carceragem) e instituições assemelhadas. Todos com celas.
		H-6	Clínicas médicas, odontológicas e veterinárias	Clínicas médicas em geral, unidades de hemodiálise, ambulatórios e assemelhados. Todos sem internação.
I	Indústria	I-1	Locais onde as atividades exercidas e os materiais utilizados apresentam baixo potencial de incêndio. Locais com carga de incêndio até 300MJ/m ²	Atividades que manipulam materiais com baixo risco de incêndio, tais como fábricas em geral, onde os processos não envolvem a utilização intensiva de materiais combustíveis (aço; aparelhos de rádio e som; armas; artigos de metal; gesso; esculturas de pedra; ferramentas; fotogravuras; jóias; relógios, sabão; serralheria; suco de frutas; louças; metais; máquinas).

Tabela 10 - Classificação de edificações e áreas de risco em função da ocupação (continuação)

Grupo	Ocupação/Usos	Divisão	Descrição	Exemplos
I	Indústria	I-2	Locais onde as atividades exercidas e os materiais utilizados apresentam médio potencial de incêndio. Locais com carga de incêndio acima de 300 até 1.200MJ/m ²	Atividades que manipulam materiais com médio risco de incêndio, tais como: artigos de vidro; automóveis; bebidas destiladas; instrumentos musicais; móveis; alimentos; marcenarias; fábricas de caixas e assemelhados.
		I-3	Locais onde há alto risco de incêndio. Locais com carga de incêndio superior a 1.200MJ/m ²	Fabricação de explosivos, atividades industriais que envolvam líquidos e gases inflamáveis, materiais oxidantes, destilarias, refinarias, ceras, espuma sintética, elevadores de grãos, tintas, borracha e assemelhados.
J	Depósito	J-1	Depósitos de material incombustível	Edificações sem processo industrial que armazenam tijolos, pedras, areias, cimentos, metais e outros materiais incombustíveis.
		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 300 até 1.200MJ/m ² .
		J-4	Todo tipo de Depósito	Depósitos com carga de incêndio acima 1.200MJ/m ² .
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	Túneis rodoferroviários e lacustres, destinados ao transporte de passageiros ou cargas diversas.
		M-2	Tanques ou Parque de Tanques	Locais destinados à produção, manipulação, armazenamento e distribuição de líquidos ou gases combustíveis e inflamáveis.
		M-3	Central de comunicação e energia	Centrais telefônicas, centros de comunicação, centrais de transmissão, de distribuição de energia e central de processamento de dados.
		M-4	Propriedade em transformação	Locais em construção ou demolição.
		M-5	Processamento de lixo	Propriedades destinadas ao processamento, reciclagem ou armazenamento de material recusado/descartado.
		M-6	Terra selvagem	Florestas, reservas ecológicas, parques florestais e assemelhados.
		M-7	Pátio de Containers	Áreas abertas destinadas ao armazenamento de containers.

Fonte: CBMMG, 2008.

4.3 Método do tempo equivalente (reduzidor de TRRF)

Através do método do tempo equivalente (MTE), apresentado pela IT 06 (2005) e ABNT 15200:2012 é possível reduzir o TRRF, seguindo as restrições que são colocadas. Essa metodologia apresentada pelas duas normativas tem como base o MTE apresentado inicialmente na Eurocode 1 (2002).

Conforme apresentado pela IT 06 (2006), o uso do MTE é permitido sem restrições para edificações que possuem no máximo 6 metros de altura, a partir dessa altura, o uso dessa metodologia é permitida com a redução limitada em 30 minutos a menos do apresentado pela tabela que fornece os valores de TRRF. Para as duas situações, o valor mínimo de TRRF é de 30 minutos.

O método do tempo equivalente é restrito em qualquer circunstância para edificações dos grupos L (explosivos), M1 (túnel), M3 (centrais de energia e comunicação) e edifícios de madeira (IT 06, 2005).

Para o cálculo de tempo equivalente de resistência ao fogo de estruturas de concreto, a IT 06 apresenta a Equação 25, a seguir:

$$t_{eq} = 0,07q_{fi}\gamma_n\gamma_s W \quad (25)$$

Onde:

t_{eq} = tempo equivalente, em minutos;

q_{fi} = valor de carga de incêndio do compartimento, em MJ/m²;

$\gamma_{ni} = \gamma_{n1}\gamma_{n2}\gamma_{n3}$ = fator de ponderação relativo às medidas de proteção ativa do edifício, apresentado na tabela a seguir apresentada pela IT 06, caso o edifício não tenha nenhum desses meios de proteção, adota-se $\gamma_{ni} = 1,0$;

Tabela 11 - Fatores das medidas de segurança contra incêndio

Valores de γ_{n1} γ_{n2}			
γ_{n3}			
Existência de chuveiros automáticos (γ_{n1})	Brigada contra incêndio (γ_{n2})		Existência de detecção automática (γ_{n3})
0,60	Não profissional	Profissional	0,90
	0,90	0,60	

Fonte: CBMMG, 2005.

$\gamma_s = \gamma_{s1}\gamma_{s2}$ = coeficiente de segurança em função do risco e consequências do colapso da estrutura. Apresentados nas Tabelas 12 e 13, a seguir:

Tabela 12 - Valores de γ_{s1}

Área do compartimento (m ²)	Altura da edificação (m)						
	Térrea	$h \leq 6$	$6 \leq h \leq 12$	$12 \leq h \leq 23$	$23 \leq h \leq 30$	$30 \leq h \leq 80$	$h > 80$
≤ 750	1,00	1,00	1,10	1,20	1,25	1,45	1,60
≤ 1000	1,05	1,1	1,15	1,25	1,35	1,65	1,85
≤ 2500	1,10	1,25	1,40	1,70	1,85	2,60	3,00
≤ 5000	1,15	1,45	1,75	2,35	2,65	3,00	3,00
≤ 7500	1,25	1,70	2,15	3,00	3,00	3,00	3,00
≤ 10000	1,30	1,90	2,50	3,00	3,00	3,00	3,00
≤ 20000	1,60	2,80	3,00	3,00	3,00	3,00	3,00
≥ 65000	3,00	3,00	3,00	3,00	3,00	3,00	3,00

Fonte: CBMMG, 2005.

Tabela 13 - Valores de γ_{s2}

Valores de γ_{s2}	Risco de ativação do incêndio	Exemplos de ocupação
0,85	Pequena	Biblioteca, correio, escola, galeria de arte, igreja, museu, livraria, frigorífico, escritório, venda de acessórios de automóveis, depósitos em geral.
1,00	Normal	Cinema, consultório médico, farmácia, hotel, hospital, laboratório fotográfico, indústria de papel, oficina elétrica ou mecânica, residência, restaurante, teatro, depósitos de: produtos farmacêuticos, bebidas alcoólicas.
1,20	Média	Montagem de automóveis, hangar, indústria mecânica.
1,45	Alta	Laboratório químico, oficina de pintura de automóveis.

Fonte: CBMMG, 2005.

W = fator de influência da ventilação e altura do compartimento. Apresentado pela Equação 26, a seguir:

$$W = \left(\frac{6}{H}\right)^{0,3} \left[0,62 + \frac{90(0,4 - \frac{A_v}{A_f})^4}{1 + 12,5(1 + 10\frac{A_v}{A_f})\frac{A_h}{A_f}} \right] \geq 0,5 \quad (26)$$

Onde:

H = altura do compartimento, em metros;

A_v = área de ventilação vertical das janelas;

A_f = área de piso do compartimento;

A_h = área de ventilação horizontal do piso.

4.4 Método tabular NBR 15200:2012 - Dimensionamento de lajes

Conforme apresentado no Item 3. Contextualização histórica, a busca por traçar normativas que tenham o intuito de trazer diretrizes no que tange o dimensionamento de peças estruturais em situação de incêndio se intensificou a partir da década de 1970 devido aos fatos elucidados no item apontado.

Em 1980 é apresentada a primeira norma relativa ao estudo de segurança estrutural de edifícios em concreto armado submetidos a incêndio. A ABNT 5627:1980 - “Exigências particulares das obras de concreto armado e protendido em relação à resistência ao fogo” preconizava os valores mínimos de seção transversal e cobrimento das armaduras dos elementos estruturais. Todavia, a norma considerava valores de cobrimentos muito altos, portanto a norma foi cancelada no ano de 2001.

Duas décadas depois, em 2001, surgiu a ABNT NBR 14432:2001 - “Exigência de resistência ao fogo de elementos construtivos de edificações - Procedimento”, que traça diretrizes de resistência para qualquer estrutura, ou seja, independente do material utilizado (concreto, aço, madeira, alvenaria estrutural etc.). Três anos depois, em 2004, foi apresentada a ABNT NBR 15200:2004 - “Projeto de estruturas de concreto em situação de incêndio”, a principal inspiração para a criação dessa norma foi a Eurocode 2: parte 1-2 (1992), nela estão presentes as diretrizes para o dimensionamento de elementos estruturais em concreto armado.

Dentre as 4 metodologias de dimensionamento apresentadas pela norma (método tabular, simplificado, geral e experimental), apenas o método tabular apresenta direcionamentos para o dimensionamento de lajes de concreto armado. No ano de 2012, a ABNT apresentou a primeira revisão da NBR 15200, que corrigiu alguns valores para cobrimento considerados antieconômicos devido ao grande fator de segurança agregado.

O método tabular da ABNT NBR 15200:2012 apresenta diversas tabelas que determinam as espessuras mínimas de lajes e capas de lajes nervuradas aquecidas na face inferior, além do parâmetro c_l (distância entre a face atingida e o eixo da barra transversal), todos em função do TRRF calculado. Para o caso de lajes protendidas, aconselha-se adicionar à dimensão de c_l 10mm para lajes com barras e 15mm com fios e cordoalhas. Além disso, as tabelas indicam valores mínimos de espessura de laje (h) caso haja necessidade de compartimentação de ambientes, porém, caso não seja necessário realizar a compartimentação, pode-se utilizar a espessura obtida através dos cálculos presentes na ABNT NBR 6118:2014.

Outra consideração que pode ser feita é a desconsideração do efeito do vento quando a estrutura está submetida a incêndio, conforme preconiza a ABNT NBR 8681:2003 e a ABNT NBR 15200:2012.

Conforme a ABNT NBR 15200:2012, a espessura dos revestimentos aplicados não podem ser considerados no cálculo das seções transversais dos elementos estruturais, porém, essa espessura pode ser utilizada para o cálculo do parâmetro c_1 porém com a majoração a seguir, em função dos traços desses revestimentos:

- Revestimentos aderentes compostos com argamassa de cal e areia possuem 67% de eficiência em relação ao concreto;
- Revestimentos de argamassa de cimento e areia aderentes possuem 100% de eficiência em relação ao concreto;
- Revestimentos compostos de gesso, vermiculita ou fibras de desempenho equivalente podem ser utilizados, conforme comprovação experimental de sua eficiência e aderência em situação de incêndio.

A ABNT NBR 15200 considera lajes armadas em duas direções todas aquelas lajes que estão apoiadas em seus quatro bordos, caso contrário, deve-se considerar como laje armada em uma direção. As Tabelas 14 e 15, a seguir, apresentam os valores de h e c_1 para lajes simplesmente apoiadas e contínuas, em função do TRRF:

Tabela 14 - Dimensões mínimas para lajes simplesmente apoiadas (ABNT 15200:2012)

TRRF min	h^a mm	c_1 mm		
		Laje armada em duas direções ^b		Laje armada em uma direção $\ell_y/\ell_x > 2$
		$\ell_y/\ell_x \leq 1,5$	$1,5 < \ell_y/\ell_x \leq 2$	
30	60	10	10	10
60	80	10	15	20
90	100	15	20	30
120	120	20	25	40
180	150	30	40	55

^a Dimensões mínimas para garantir a função corta-fogo.
^b Lajes apoiadas nas quatro bordas; caso contrário, a laje deve ser considerada armada em uma direção.
^c Os valores de c_1 indicados nesta tabela são válidos para armadura passiva. No caso de elementos protendidos, os valores de c_1 para as armaduras ativas são determinados acrescentando-se 10 mm para barras e 15 mm para fios e cordoalhas.

Fonte: ABNT NBR 15200, 2012.

Tabela 15 - Dimensões mínimas para lajes contínuas (ABNT 15200:2012)

TRRF min	h^a mm	c_1^b mm
30	60	10
60	80	10
90	100	15
120	120	20
180	150	30

^a Dimensões mínimas para garantir a função corta-fogo.
^b Válido para lajes armadas em uma ou duas direções.
^c Os valores de c_1 indicados nesta tabela são válidos para armadura passiva. No caso de elementos protendidos, os valores de c_1 para as armaduras ativas são determinados acrescentando-se 10 mm para barras e 15 mm para fios e cordoalhas.

Fonte: ABNT NBR 15200, 2012.

As Tabelas 16, 17 e 18, a seguir, apresentam as mesmas dimensões mínimas apresentadas anteriormente para lajes lisas ou cogumelo, lajes nervuradas simplesmente apoiadas e lajes nervuradas contínuas em pelo menos uma das bordas, respectivamente.

Tabela 16 - Dimensões mínimas para lajes lisas ou cogumelo (ABNT 15200:2012)

TRRF min	h mm	c_1 mm
30	150	10
60	180	15
90	200	25
120	200	35
180	200	45

^a Os valores de c_1 indicados nesta tabela são válidos para armadura passiva. No caso de elementos protendidos, os valores de c_1 para as armaduras ativas são determinados acrescentando-se 10 mm para barras e 15 mm para fios e cordoalhas.

Fonte: ABNT NBR 15200, 2012.

Tabela 17 - Dimensões mínimas para lajes nervuradas simplesmente apoiadas (ABNT 15200:2012)

TRRF min	Nervuras Combinações de b_{\min}/c_1 a mm/mm			Capa ^b h/c_1 mm/mm
	1	2	3	
30	80/15			60/10
60	100/35	120/25	190/15	80/10
90	120/45	160/40	250/30	100/15
120	160/60	190/55	300/40	120/20
180	220/75	260/70	410/60	150/30

^a b_{\min} corresponde à largura mínima da nervura ao nível do centro geométrico das armaduras.
^b h é a altura mínima da laje para garantir a função corta-fogo.
^c Os valores de c_1 indicados nesta tabela são válidos para armadura passiva. No caso de elementos protendidos, os valores de c_1 para as armaduras ativas são determinados acrescentando-se 10 mm para barras e 15 mm para fios e cordoalhas.

Fonte: ABNT NBR 15200, 2012.

Tabela 18 - Dimensões mínimas para lajes contínuas em pelo menos uma das bordas (ABNT 15200:2012)

TRRF min	Nervuras Combinações de b_{\min}/c_1 a mm/mm			Capa ^b h/c_1 mm/mm
	1	2	3	
30	80/10			60/10
60	100/25	120/15	190/10	80/10
90	120/35	160/25	250/15	100/15
120	160/45	190/40	300/30	120/20
180	310/60	600/50		150/30

^a b_{\min} corresponde à largura mínima da nervura ao nível do centro geométrico das armaduras.
^b h é a altura mínima da laje para garantir a função corta-fogo.
^c Os valores de c_1 indicados nesta tabela são válidos para armadura passiva. No caso de elementos protendidos, os valores de c_1 para as armaduras ativas são determinados acrescentando-se 10 mm para barras e 15 mm para fios e cordoalhas.

Fonte: ABNT NBR 15200, 2012.

Excepcionalmente para as duas últimas tabelas apresentadas, é necessário considerar que elas estejam armadas nas duas direções, caso contrário, a Tabela 19 apresenta as dimensões mínimas para lajes nervuradas em apenas uma direção, essas dimensões referem-se às dimensões mínimas das nervuras, para as dimensões da capa é necessário utilizar a Tabela 14.

Tabela 19 - Dimensões mínimas para lajes nervuradas armadas em uma só direção (ABNT 15200:2012)

TRRF min	Nervuras Combinações de b_{\min}/c_1 mm/mm	
	1	2
30	80/25	100/20
60	100/45	120/40
90	130/60	150/50
120	160/65	220/50
180	220/80	

^a Os valores de c_1 indicados nesta tabela são válidos para armadura passiva. No caso de elementos protendidos, os valores de c_1 para as armaduras ativas são determinados acrescentando-se 10 mm para barras e 15 mm para fios e cordoalhas.

Fonte: ABNT NBR 15200, 2012.

4.5 Ações de segurança em situação de incêndio

De forma geral, o dimensionamento de estruturas considera o comportamento dos materiais em temperatura ambiente para que a segurança estrutural seja atingida é necessário que os esforços resistentes sejam maiores ou iguais aos esforços solicitantes. Quando se trata de estruturas sobre a ação do fogo e altas temperaturas, essa verificação também precisa ser feita, considerando as suas características e tipo de ocupação. Todo esse processo é feito de forma análoga ao do dimensionamento de estruturas à temperatura ambiente, através da definição do estado limite último (ELU), expressa conforme abaixo:

$$S_{d,fi} \leq R_{d,fi} \quad (27)$$

Onde:

$S_{d,fi}$ = valor de cálculo do esforço atuante, reduzida em relação ao valor utilizado em condições normais de temperatura, através da combinação última excepcional de ações (descrito na ABNT NBR 8681:2003);

$R_{d,fi}$ = valor de cálculo de esforços resistentes, reduzido em função do aumento de temperatura.

Quando comparado ao tempo de vida útil de um edifício, a ação térmica, quando ocorre, se dá em um curto período de tempo e possui baixa probabilidade de acontecer, portanto, isso faz com que ela seja considerada uma ação excepcional. Assim, para o cálculo dos esforços solicitantes ($S_{d,fi}$), é necessário considerar a combinação excepcional de ações, conforme apresentado na Equação 28, conforme ABNT NBR 8681:2003.

$$F_{d,fi} = \sum_{i=1}^m \gamma_{g,fi} \cdot F_{Gi,k} + \gamma_{q,fi} \cdot F_{Q,fi} + \gamma_{q,fi} \cdot \sum_{j=1}^n \psi_2 \cdot F_{Qj,k} \quad (28)$$

Onde:

$F_{d,fi}$ = valor de cálculo da ação relativa à combinação excepcional;

$F_{Gi,k}$ = valor característico da ação permanente i;

$F_{Q,fi}$ = valor representativo da ação térmica (ação excepcional);

$F_{Qj,k}$ = valor característico da ação variável j;

$\gamma_{g,fi}$ = coeficiente de ponderação de ações permanentes em incêndio;

$\gamma_{q,fi}$ = coeficiente de ponderação de ações variáveis;

ψ_2 = fator de combinação utilizado para determinar os valores reduzidos das ações variáveis.

Para edifícios que sejam construídos em concreto moldado in loco, a ABNT NBR 8661:2003 apresenta o valor $\gamma_{g,fi}=1,2$, $\gamma_{q,fi}=1,0$ e $\psi_2=0$. Além disso, pela ação acidental principal ser do fogo, recomenda-se reduzir o valor de ψ_2 , multiplicando por 0,7.

De acordo com as recomendações da ABNT NBR 15200:2012, todos os esforços adicionais causados durante a deformação térmica ($F_{Q,fi}$) são normalmente desprezados, devido aos seus valores reduzidos e também por causa de grandes deformações plásticas que acontecem em um incêndio. Assim, a Equação 28 pode ser resumida conforme a Equação 29:

$$F_{d,fi} = 1,2 \cdot F_{G,k} + 0,7 \cdot \psi_2 \cdot F_{Q,k} \quad (29)$$

Caso não haja alguma solicitação gerada pela deformação durante a situação de incêndio, a ABNT NBR 15200:2012 permite a minoração das solicitações de cálculo em situação de incêndio ($S_{d,fi}$) em 70% das solicitações de cálculo à temperatura ambiente (S_d), considerando apenas combinações de ações sem influência do vento, conforme equação a seguir:

$$S_{d,fi} = 0,7 \cdot S_d \quad (30)$$

5. Aplicação em edifício-modelo

Para a aplicação prática em edifício-modelo, foi utilizado o mesmo projeto apresentado por Almeida (2018). O edifício apresentado a seguir se trata de um prédio comercial composto por 6 pavimentos, sendo 5 pavimentos tipo e 1 térreo, todos com pé direito de 2,80m, conforme ilustra Figura 29, a seguir:

Figura 29 - Corte esquemático de edifício-modelo, utilizando o TQS®



Fonte: Almeida, 2018.

Conforme exposto no tópico 1. Introdução, o edifício apresentado foi devidamente dimensionado, utilizando o software TQS®, conforme às normativas presentes na ABNT NBR 6118:2014, respeitando todas as dimensões mínimas em temperatura ambiente solicitadas pela norma.

Para o dimensionamento da estrutura considerou-se os seguintes fatores:

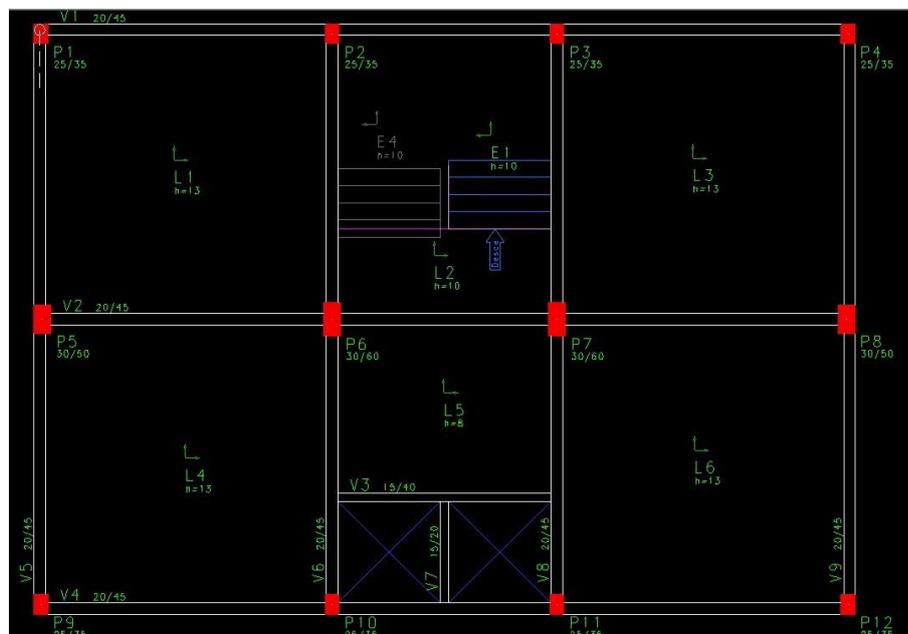
- Construção em centro urbano (classe de agressividade II);
- Cobrimento nominal = 25mm (para lajes);
- $F_{ck} = 25$ MPa;
- Consideração de cargas permanentes (g) e acidentais (q):
 - Carga distribuída: 1,0 kN/m²
 - Sobrecarga: 2,0 kN/m²
 - Alvenaria sobre vigas externas: 3,5 kN/m²
 - Alvenaria sobre vigas internas: 2,5 kN/m²

As ações do vento foram feitas também pelo TQS®, que utiliza como parâmetro a ABNT NBR 6123:1988, foram consideradas as seguintes especificações para o projeto apresentado:

- $V_0 = 45$ m/s (Santa Maria/RS)
- $S_1 = 1,0$ (Terreno plano)
- $S_3 = 1,0$ (Edifício comercial)
- Terreno: Categoria III

A Figura 30, a seguir, apresenta a planta baixa da edificação com a locação das lajes, vigas e dos pilares do edifício apresentado:

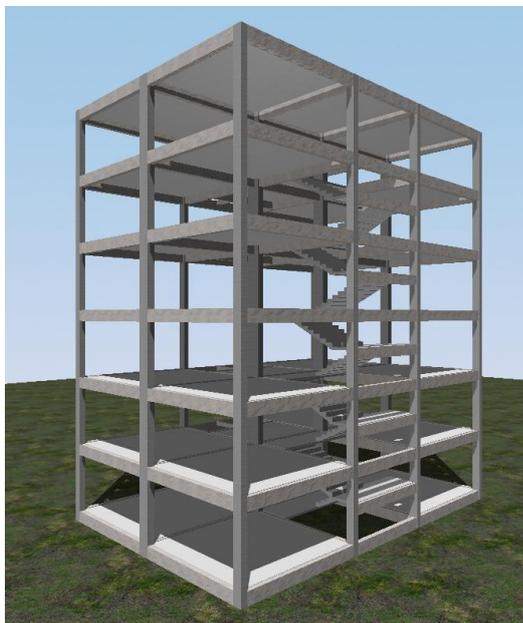
Figura 30 - Planta baixa do edifício, utilizando o TQS®



Fonte: Autor, 2022.

Além disso, a Figura 31 apresenta esquema em 3D da edificação apresentada:

Figura 31 - Modelo espacial de edificação, utilizando TQS®



Fonte: Autor, 2022.

Para analisar a estabilidade global do prédio e os efeitos de segunda ordem, calculou-se o valor do parâmetro *GamaZ* através do software TQS®. Conforme Tabela 20, apresentada abaixo:

Tabela 20 - Valores de *GamaZ* para carregamentos de vento

Caso	Ang	Ctot	M2	CHor	M1	Mig	GamaZ
5	90.	1396,2	18,5	31,4	290,1	28,0	1,088
6	0.	1396,2	18,5	31,4	290,1	28,0	1,088
7	270.	1396,2	13,9	20,0	184,8	28,0	1,106
8	180.	1396,2	13,9	20,0	184,8	28,0	1,106

Fonte: Almeida, 2018.

Onde:

Ang = Ângulo analisado do vento, em graus;

Ctot = Somatória das cargas verticais, em tf;

M2 = Momento de 2ª ordem de cargas verticais, em tf.m;

CHor = Cargas horizontais, em tf;

M_1 = Momento de 1ª ordem de cargas horizontais, em tf.m;

M_{ig} = Momento de desaprumo devido imperfeições globais, em tf.m;

$GamaZ$ = Coeficiente de deslocabilidade dos nós em situações de 2ª ordem.

A Equação 31, apresentada a seguir é utilizada para o cálculo do $GamaZ$, pelo TQS®:

$$GamaZ = \frac{1}{1 - \frac{M_1}{M_3} \times \frac{\gamma_f}{\gamma_{f3}}} \quad (31)$$

Onde:

$$\gamma_f = 1,40;$$

$$\gamma_{f3} = 1,10.$$

Assim, o valor de $GamaZ$ para estrutura apresentada é de 1,11. Dessa forma, a edificação é considerada de nós móveis.

5.1 Verificação de lajes em situação de incêndio - Método do tempo equivalente

Para o cálculo de tempo equivalente do edifício apresentado, foram feitas as seguintes considerações:

- Edifício comercial;
- $H = 2,8\text{m}$;
- A_v = área de ventilação vertical das janelas = 18m^2 ;
- A_f = área de piso = 154m^2 ;
- A_h = área de ventilação horizontal do piso = 0;
- q_{fi} = carga de incêndio específico = 700 MJ/m^2 ;
- Sem medidas de proteção ativa;
- Risco de ativação: pequena.

Para encontrar o valor de q_{fi} , considerou-se a edificação como escritório (divisão D-1), presente em tabela no Anexo A.

Utilizando a Equação 26, apresentada anteriormente, tem-se que:

$$W = \left(\frac{6}{2,8}\right)^{0,3} \left[0,62 + \frac{90(0,4 - \frac{18}{154})^4}{1} \right] \geq 0,5 \approx 1,506$$

Dessa forma, através da Equação 25, obtém-se o valor do tempo equivalente:

$$t_{eq} = 0,07 * 700 * 1 * 1,02 * 1,506$$

$$t_{eq} \approx 75,27 \text{ minutos}$$

5.2 Verificação de lajes em situação de incêndio pelo TQS® - Método tabular

Ao lançar a estrutura no software TQS®, foi possível obter a verificação da segurança estrutural das lajes de concreto armado quando submetido à simulação de um incêndio-padrão. Os resultados obtidos serão apresentados nos próximos itens.

5.2.1 Determinação do tempo requerido de resistência ao fogo (TRRF)

Através da função ‘Determinação do TRRF no TQS®, levando em consideração o tipo de ocupação D-1 (Repartições públicas e locais para prestação de serviço profissional ou condução de negócios) apresentada na seção 4.2 pela Tabela 9, altura de 16,8m e área do pavimento igual a 154,76, obtém-se o TRRF de 60 minutos, conforme Figura 32, a seguir:

Figura 32 - Determinação do TRRF utilizando o TQS®

Determinação do TRRF

Manual TRRF (min)

Automático

Ocupação:

H - Altura de incêndio da edificação (m) Divisão

Área do maior pavimento acima do solo (m2)

TRRF (min)

Reduzir TRRF pelo Método do Tempo Equivalente (NBR 15200 ou IT-08)

TRRF a ser utilizado (min)

Fonte: Autor, 2022.

Conforme apresentado na seção 5.1, o valor de tempo equivalente foi de aproximadamente 75,27 minutos, que excede o TRRF que é de 60 minutos. Portanto, o valor de resistência ao fogo será considerado a favor da segurança, ou seja, adota-se 60 minutos.

5.2.2 Critérios de verificação

Ainda no TQS®, a próxima etapa se caracteriza pela edição dos critérios de análise. De acordo com a Figura 33, a “envoltória Fogo” foi escolhida para representar todas as solicitações de cálculo em situação de incêndio ($S_{d,fi}$). Essa envoltória é baseada através da combinação de esforços, conforme apresentados na Equação 28 presente na norma ABNT NBR 8681:2003. Além disso, o TQS® também considera a simplificação descrita na seção 4.5, considerando $S_{d,fi} = 0,7 * S_d$.

Figura 33 - Critérios de verificação de elementos estruturais em situação de incêndio pelo TQS®

The screenshot shows the 'Solicitações de cálculo (Sd_{fi})' section. It contains two settings: 'Envoltória de combinações a ser considerada' with radio buttons for 'Fogo' (selected) and 'ELU1'; and 'Multiplicador das solicitações de cálculo em situação normal (S_d)' with a text input field containing '0.7'.

Fonte: Autor, 2022.

Além disso, foi considerada uma espessura de 25mm para os revestimentos padrões das lajes, que seguem as regras de eficiência dispostas no Item 4.4. O revestimento de cal e areia foi escolhido a favor da segurança, portanto, conforme apresentado será considerado apenas 67% de rendimento da argamassa quando comparada ao concreto.

Dessa forma, a espessura considerada para o revestimento será de 13,4mm.

Figura 34 - Critérios de revestimentos de lajes, pelo TQS®

The screenshot shows the 'Revestimentos padrões' section. It contains two settings: 'Espessura lajes' with a text input field containing '20' and 'mm'; and 'Material lajes' with radio buttons for 'Argamassa de cal e areia' (selected), 'Argamassa de cimento e areia', and 'Protetores à base de gesso, vermiculita'.

Fonte: Autor, 2022.

5.2.3 Resultados obtidos na verificação de lajes

Após inserir todos os dados necessários para verificação e o processamento do edifício no software TQS®, foi possível obter o relatório descritivo das lajes e também o esquema visual das lajes subdimensionadas.

A primeira análise foi feita na fundação da edificação, conforme mostra Figura 35, a seguir:

Figura 35 - Verificação das lajes em situação de incêndio - Fundação

Lajes

Titulo	Tipo	Dir. As	Ly/Lx	h	c1	b	hc	Situação
L1	Apoiada	2 dir.	1.0	130	28	---	---	OK
L2	Apoiada	1 dir.	2.5	100	28	---	---	OK
L3	Apoiada	2 dir.	1.0	130	28	---	---	OK
L4	Apoiada	2 dir.	1.0	130	28	---	---	OK
L5	Apoiada	2 dir.	1.3	80	28	---	---	OK
L6	Apoiada	2 dir.	1.0	130	28	---	---	OK

Fonte: Autor, 2022.

Os outros pavimentos também geraram relatórios, porém em todos os pavimentos tipo da edificação houve lajes que não passaram pela verificação, os resultados estão descritos nas figuras a seguir:

Figura 36 - Verificação das lajes em situação de incêndio - 1º Pavimento

Titulo	Tipo	Dir. As	Ly/Lx	h	c1	b	hc	Situação
L1	Apoiada	2 dir.	1.0	130	28	---	---	OK
E1	Lisa	---	---	100	28	---	---	Não passou
L2	Apoiada	1 dir.	2.5	100	28	---	---	OK
E2	Apoiada	2 dir.	1.2	100	28	---	---	OK
L3	Apoiada	2 dir.	1.0	130	28	---	---	OK
L4	Apoiada	2 dir.	1.0	130	28	---	---	OK
L5	Apoiada	2 dir.	1.3	80	28	---	---	OK
L6	Apoiada	2 dir.	1.0	130	28	---	---	OK
L8	Apoiada	1 dir.	3.2	100	28	---	---	OK

Figura 37 - Verificação das lajes em situação de incêndio - 2º Pavimento

Titulo	Tipo	Dir. As	Ly/Lx	h	c1	b	hc	Situação
L1	Apoiada	2 dir.	1.0	130	28	---	---	OK
L2	Apoiada	1 dir.	2.5	100	28	---	---	OK
L3	Apoiada	2 dir.	1.0	130	28	---	---	OK
E3	Lisa	---	---	100	28	---	---	Não passou
L4	Apoiada	2 dir.	1.0	130	28	---	---	OK
E4	Apoiada	2 dir.	1.2	100	28	---	---	OK
L5	Apoiada	2 dir.	1.3	80	28	---	---	OK
L6	Apoiada	2 dir.	1.0	130	28	---	---	OK
L8	Apoiada	1 dir.	3.2	100	28	---	---	OK

Figura 38 - Verificação das lajes em situação de incêndio - 3º Pavimento

Título	Tipo	Dir. As	Ly/Lx	h	c1	b	hc	Situação
L1	Apoiada	2 dir.	1.0	130	28	---	---	OK
L2	Apoiada	1 dir.	2.5	100	28	---	---	OK
L3	Apoiada	2 dir.	1.0	130	28	---	---	OK
L4	Apoiada	2 dir.	1.0	130	28	---	---	OK
L5	Apoiada	2 dir.	1.3	80	28	---	---	OK
E5	Lisa	---	---	100	28	---	---	Não passou
L6	Apoiada	2 dir.	1.0	130	28	---	---	OK
E6	Apoiada	2 dir.	1.2	100	28	---	---	OK
L8	Apoiada	1 dir.	3.2	100	28	---	---	OK

Figura 39 - Verificação das lajes em situação de incêndio - 4º Pavimento

Título	Tipo	Dir. As	Ly/Lx	h	c1	b	hc	Situação
L1	Apoiada	2 dir.	1.0	130	28	---	---	OK
L2	Apoiada	1 dir.	2.5	100	28	---	---	OK
L3	Apoiada	2 dir.	1.0	130	28	---	---	OK
L4	Apoiada	2 dir.	1.0	130	28	---	---	OK
L5	Apoiada	2 dir.	1.3	80	28	---	---	OK
L6	Apoiada	2 dir.	1.0	130	28	---	---	OK
E7	Lisa	---	---	100	28	---	---	Não passou
L8	Apoiada	1 dir.	3.2	100	28	---	---	OK
E8	Apoiada	2 dir.	1.2	100	28	---	---	OK

Figura 40- Verificação das lajes em situação de incêndio - 5º Pavimento

Título	Tipo	Dir. As	Ly/Lx	h	c1	b	hc	Situação
L1	Apoiada	2 dir.	1.0	130	28	---	---	OK
L2	Apoiada	1 dir.	2.5	100	28	---	---	OK
L3	Apoiada	2 dir.	1.0	130	28	---	---	OK
L4	Apoiada	2 dir.	1.0	130	28	---	---	OK
L5	Apoiada	2 dir.	1.3	80	28	---	---	OK
L6	Apoiada	2 dir.	1.0	130	28	---	---	OK
L8	Apoiada	1 dir.	3.2	100	28	---	---	OK
E9	Lisa	---	---	100	28	---	---	Não passou
E10	Apoiada	2 dir.	1.2	100	28	---	---	OK

Figura 41- Verificação das lajes em situação de incêndio - Cobertura

Título	Tipo	Dir. As	Ly/Lx	h	c1	b	hc	Situação
L1	Apoiada	2 dir.	1.0	130	28	---	---	OK
L2	Apoiada	2 dir.	1.3	130	28	---	---	OK
L3	Apoiada	2 dir.	1.0	130	28	---	---	OK
L4	Apoiada	2 dir.	1.0	130	28	---	---	OK
L5	Apoiada	2 dir.	1.3	80	28	---	---	OK
L6	Apoiada	2 dir.	1.0	130	28	---	---	OK
L7	Apoiada	2 dir.	1.0	130	28	---	---	OK
L8	Apoiada	2 dir.	1.0	130	28	---	---	OK

Fonte: Autor, 2022.

Importante saliente que, todas as lajes de tipologia “E” são as escadas do edifício. Portanto, após análise crítica, é possível aferir que a estrutura está, em sua maioria, dimensionada conforme preconiza a ABNT NBR 15200:2012, porém alguns elementos estruturais não

passaram pela verificação da segurança estrutural em simulação de incêndio feita pelo software. A resolução para as peças não conformes será apresentada no Item 5.3.

5.3 Redimensionamento de lajes não conformes

Conforme apresentado anteriormente, algumas lajes estão subdimensionadas conforme recomenda a ABNT NBR 15200:2012, o presente item tem o objetivo de explicitar os motivos da não conformidade desses elementos e sugerir uma solução para que as peças estruturais levantadas estejam conforme solicita a norma citada.

Primeiramente, se faz necessário mapear os elementos que não estão dimensionados conforme a ABNT NBR 15200:2012. A Tabela 21, a seguir, apresenta a relação de acordo com o tipo de laje e a pavimento na edificação:

Tabela 21 - Lajes subdimensionadas do edifício analisado

Título	Tipo de laje	Pavimento	c1 (mm)	h (mm)
E1	Lisa	1°	28	100
E3	Lisa	2°	28	100
E5	Lisa	3°	28	100
E7	Lisa	4°	28	100
E9	Lisa	5°	28	100

Fonte: Autor, 2022.

Conforme apresentado, as lajes com títulos iniciados por “E” representam as escadas, que para fins de dimensionamento, foram consideradas como lajes de acordo com sua tipologia construtiva e formas de distribuição de tensão. Para fins comparativos, a Figura 42, a seguir, apresenta os resultados de uma laje não conforme em relação à outra devidamente dimensionada:

Figura 42 - Comparação entre lajes L1 e E1 pelo TQS®

Vigas Pilares Lajes	
L1	
Tipo	Apoiada em vigas
Dir. As	2 direções
Ly/Lx	1,0
h	147
c1	44
b	---
hc	---
Passou	Sim
E1	
Tipo	Lisa/cogumelo
Dir. As	---
Ly/Lx	---
h	117
c1	44
b	---
hc	---
Passou	NÃO

Fonte: Autor, 2022.

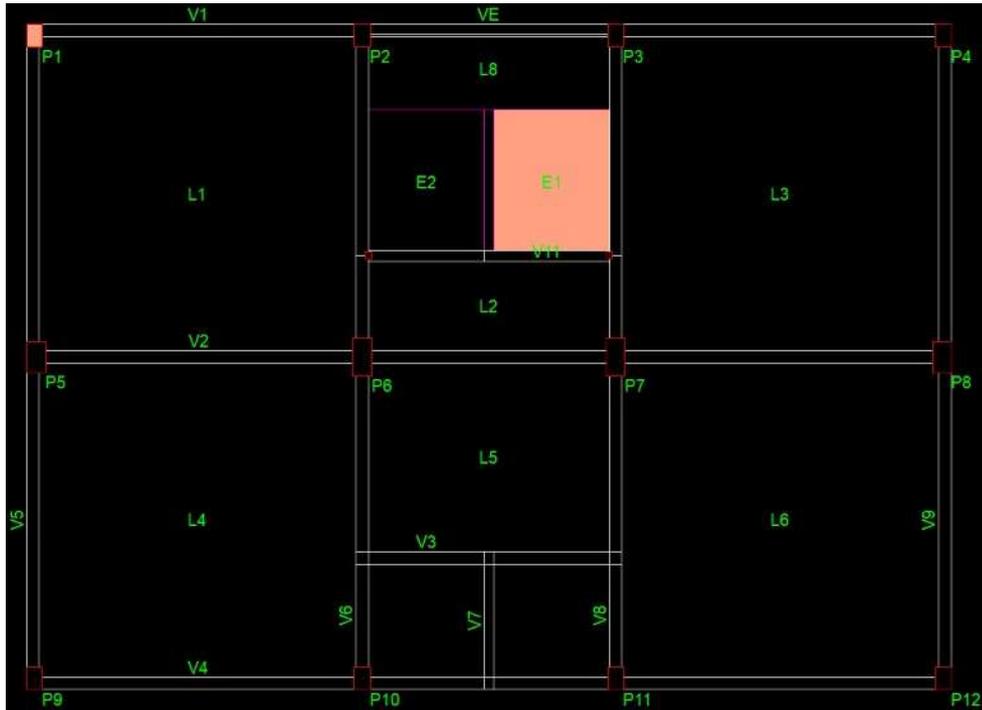
A Figura 43, a seguir, apresenta de forma mais detalhada as especificações da escada E1 que não são suficientes para atender a ABNT NBR 15200:2012:

Figura 43 - Especificações de laje subdimensionada E1

Fonte: Autor, 2022.

Na seção de “Verificação de resultados” do TQS® é possível observar a escada E1 está em destaque devido sua não conformidade em relação à ABNT NBR 15200:2012, conforme ilustra Figura 44:

Figura 44 - Verificação de resultados do primeiro pavimento, pelo TQS®



Fonte: Autor, 2022.

A partir da análise crítica das lajes não conformes, é possível aferir que todas que estão definidas como apoiadas estão devidamente dimensionadas, porém as lajes lisas do edifício (escadas) não atendem todos os requisitos da ABNT NBR 15200:2012. A Tabela 22, a seguir, foi retirada a partir da seção de verificação de incêndio do TQS® e é baseada na Tabela 16, do Item 4.4, do presente estudo.

Tabela 22 - Dimensões mínimas para lajes lisas ou cogumelos, pelo TQS®

Lisas ou Cogumelos

ⓘ C1mín (mm)

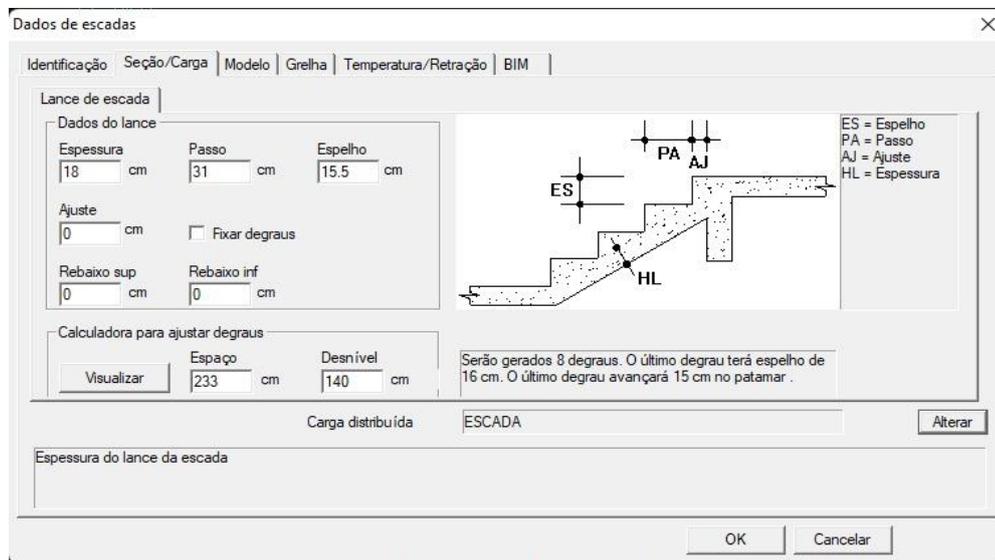
TRRF (min)	h (mm)	c1 (mm)
30	150	10
60	180	15
90	200	25
120	200	35

Fonte: Autor, 2022.

Portanto, a espessura mínima das lajes lisas ou cogumelo precisa ser de $h=180\text{mm}$, considerando o TRRF obtido de 60 minutos. Para a resolução desse ponto, existem pelo menos duas opções, alterar o tipo de distribuição de carga da laje ou aumentar a altura da laje, com o

intuito de não alterar o tipo de laje aplicada e realizar a redistribuição de cargas, a segunda opção foi aplicada no software TQS®, os resultados obtidos se encontram a seguir.

Figura 45 - Especificações de laje redimensionada E1



Fonte: Autor, 2022.

A espessura de todas as lajes lisas do edifício (escadas) foi alterada de 10cm para 18cm, conforme solicita a ABNT NBR 15200:2012. A Figura 46, a seguir, demonstra o resultado obtido a partir dessa alteração.

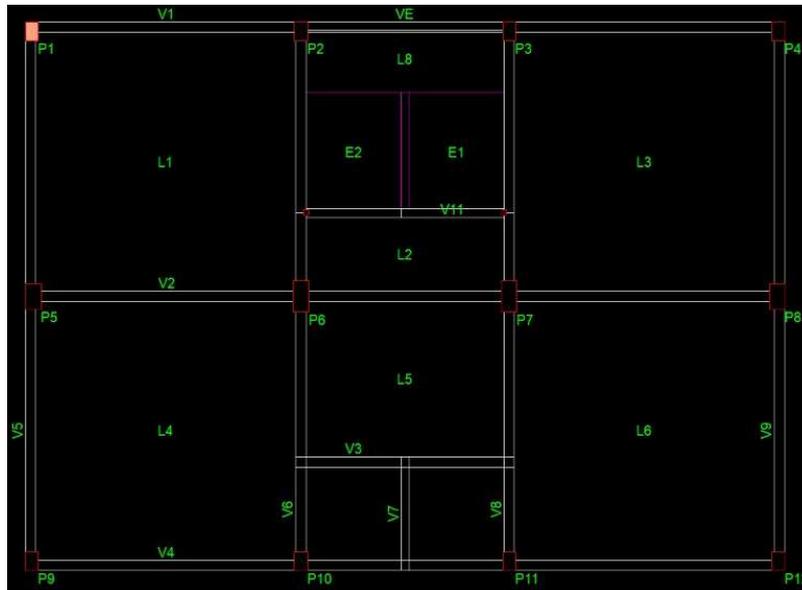
Figura 46 - Comparação entre lajes L1 e E1 redimensionada pelo TQS®

TRRF = 60 min	
Vigas Pilares Lajes	
[-] L1	
Tipo	Apoiada em vigas
Dir. As	2 direções
Ly/Lx	1,0
h	147
c1	44
b	---
hc	---
Passou	Sim
[-] E1	
Tipo	Lisa/cogumelo
Dir. As	---
Ly/Lx	---
h	197
c1	44
b	---
hc	---
Passou	Sim

Fonte: Autor, 2022.

Após essa alteração, todas as lajes dos pavimentos da edificação analisada se tornaram dimensionadas conforme recomendação da ABNT NBR 15200:2012. Conforme apresenta a Figura 47, a seguir:

Figura 47 - Verificação de resultados atualizados do primeiro pavimento, pelo TQS®



Fonte: Autor, 2022.

6. Considerações finais

Através da evolução do presente trabalho, foi possível observar a quantidade reduzida de artigos e estudos focados em analisar a influência do fogo em estruturas. Porém, cada vez mais estudos vêm sendo feitos de forma a agregar conhecimento e embasamento para o dimensionamento de estruturas em situação de incêndio. Outrossim, com o advento da tecnologia é possível buscar soluções que agreguem no processo de verificação da segurança estrutural das edificações projetadas, como o TQS e outros diversos softwares.

De acordo com a análise do edifício apresentado neste trabalho foi possível concluir, juntamente com os trabalhos de Almeida (2018) e Reis (2022), que parte dos elementos estruturais, por mais que estejam dimensionados em conformidade com a NBR 6118:2014, ainda necessitam passar por outras verificações de ações acidentais para que possam garantir o maior conforto às pessoas presentes no local, em qualquer situação. Como exemplo, se faz importante frisar a respeito da escada subdimensionada E1, ou seja, o principal elemento para a rota de fuga em um possível incêndio não estava dimensionada conforme recomenda a NBR 15200:2012, esse fato desperta a necessidade de se considerar o efeito dos incêndios durante o processo de dimensionamento das estruturas, visto que infelizmente são acidentes comuns e que causam grandes interferências nos elementos estruturais.

Por fim, foi possível observar que ainda existem artigos que podem complementar o presente estudo, como ensaios laboratoriais de materiais que cessam ou retardam a influência do fogo sobre estruturas em concreto armado, a proposição de outras metodologias e sistemas construtivos que possam ser mais eficientes quando submetidos a incêndio em relação ao concreto armado, a elaboração de artigos considerando o uso de tecnologias em situações de incêndio, como modelos espaciais e inteligência artificial, entre outros. Portanto, entende-se a amplitude de estudos que podem agregar e desenvolver essa área que ainda carece de informações para atingirmos a maior otimização de peças estruturais, para que elas se tornem econômicas e seguras, principalmente.

Referências

- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 8681:2003 – “Ações e segurança nas estruturas”**. Rio de Janeiro, 2003.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 10636:1989 – “Paredes Divisórias Sem Função Estrutural - Determinação da resistência ao fogo”**. Rio de Janeiro, 1989.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 14323:2003 – “Dimensionamento de estruturas de aço e de estruturas mistas aço-concreto de edifícios em situação de incêndio”**. Rio de Janeiro, 2003.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 14432:2001 – “Exigências de resistência ao fogo de elementos construtivos de edificações – Procedimento”**, Rio de Janeiro, 2001.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 15200:2004 – “Projeto de estruturas de concreto em situação de incêndio”**. Rio de Janeiro, 2004.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 15200:2012 – “Projeto de estruturas de concreto em situação de incêndio”**. Rio de Janeiro, 2012.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 5628:2001 – “Componentes construtivos estruturais - Determinação da resistência ao fogo”**. Rio de Janeiro, 2001.
- ALBUQUERQUE, G. B. M. L. de. **Dimensionamento de vigas de concreto armado em situação de incêndio**. 2012. 245 páginas. Tese (Mestrado em engenharia) – Escola Politécnica, Universidade de São Paulo, 2012.
- ALMEIDA, Mateus Carvalho de et al. **Verificação da segurança estrutural de pilares de concreto armado em situação de incêndio**. 2018.
- BENNET, J.; CLAEISSON, J.; THELANDERSSON, S. **Calculations of temperature, moisture, and pressure distributions in concrete exposed to fire**. Report from the Department of Mathematical Physics, Division of structural Mechanics, University of Lund, 1976.

BRUSHLINSKY, N. N. et al. **World fire statistics**. Berlin: Centre of Fire Statistics of the International Association of Fire and Rescue Service, 2005.

CASTRO, Gleidismar das Graças Simão. **Um método geral de cálculo para verificação de estruturas de concreto em situação de incêndio**. 2005.

COPIER, W. J. **The spalling of normal weight and lightweight concrete exposed to fire**. Special Publication, v. 80, p. 219-236, 1983.

COSTA, Carla Neves; FIGUEIREDO, AD de; SILVA, V. P. **O fenômeno do lascamento (“spalling”) nas estruturas de concreto armado submetidas a incêndio—uma revisão crítica**. In: Congresso Brasileiro de Concreto. 2002.

COSTA, Carla Neves. **Dimensionamento de elementos de concreto armado em situação de incêndio**. São Paulo. Universidade de São Paulo, 2008.

CORPO DE BOMBEIROS MILITAR DE MINAS GERAIS. **Instrução técnica nº CBMMG 06/61/20. Dispõe sobre Segurança estrutural das edificações**. DOEMG, n. 260, 28 dez 2020.

CORPO DE BOMBEIROS MILITAR DE MINAS GERAIS. **Instrução técnica nº CBMMG 09: Carga de incêndio nas edificações e área de risco**. DOEMG, n. 260, 28 dez 2020.

EUROPEAN COMMITTEE FOR STANDARDIZATION. **EN 1991-1-1: Eurocode 1: Actions on structures**, Brussels: CEN, 2002. 47p.

EUROPEAN COMMITTEE FOR STANDARDIZATION. **EN 1992-1-1: Eurocode 2: design of concrete structures - Part 1.1: general rules and rules for buildings**, Brussels: CEN, 2004. 225p.

EUROPEAN COMMITTEE FOR STANDARDIZATION. **EN 1992-1-2: Eurocode 2: design of concrete structures - Part 1.2: general rules – structural fire design**, Brussels: CEN, 2004. 97p.

EUROPEAN COMMITTEE FOR STANDARDIZATION. **EN 1994-1-2: Eurocode 4: Design of composite steel and concrete structures – Part 1-2: General rules - Structural fire design**, Brussels: CEN, 2005. 93p.

FLORES, B.; ORNELAS, E. A.; DIAS, L. E. **Fundamentos de combate a incêndio—Manual de Bombeiros**. Goiânia (GO): Corpo de Bombeiros Militar do Estado de Goiás, 2016.

GOMIDE, K. A. **Contribuição ao projeto de estruturas de concreto em situação de incêndio. Monografia (Graduação).** Universidade São Francisco, 2005. 70 p.

HARMATHY, T. Z., **Effect of moisture on the fire endurance of building materials, Moisture in Materials in Relation to Fire Tests**, ASTM Special Technical Publication No. 385, p. 74–95, 1965.

HERTZ, K. D. **Limits of spalling of fire-exposed concrete.** Fire Safety Journal, Oxford. v. 38, p. 103-116, 2003.

HERTZ, K. **Explosion og reststyrke af varmepåvirket silikabeton.** Report, v. 162.

ICHIKAWA, Y. **Predictions of pressures, heat and moisture transfer leading to spalling of concrete in fire.** 2000. Tese de Doutorado. PhD Thesis, Imperial Collage, London, Great Britain.

ISO 834-1, 1999, **Fire-Resistance Tests - Elements of Building Construction, Part 1: General Requirements**, ISO - International Organization for Standardization, Geneva.

JANSSON, Robert. **Fire spalling of concrete—A historical overview.** In: MATEC Web of Conferences. EDP Sciences, 2013. p. 01001.

JANSSON, Robert. **Material properties related to fire spalling of concrete.** Division of Building Materials, Lund Institute of Technology, Lund University, 2008.

KHOYLOU, Naysan. **Modelling of moisture migration and spalling behaviour in non-uniformly heated concrete.** 1997. Tese de Doutorado. Imperial College London (University of London).

KORDINA, K. **Fire resistance of prestressed concrete**, F.I.P. Commission on Fire resistance of prestressed concrete em Braunschweig, Germany, June 1965.

MCNAMEE, Robert; SJÖSTRÖM, Johan; BOSTRÖM, Lars. **Reduction of fire spalling of concrete with small doses of polypropylene fibres.** Fire and Materials, 2021.

MELÃO¹, Arthur Ribeiro; SILVA, Valdir Pignatta. **Equivalência entre incêndio-padrão e curvas paramétricas aplicados a estruturas de aço.** 2014.

MEYER-OTTENS, Claus. **Zur Frage der Abplatzungen an Betonbauteilen aus Normalbeton bei Brandbeanspruchung/von Claus Meyer-Ottens.** 1972.

MORAIS, Caroline Santana de. **Desempenho térmico de coberturas vegetais em edificações na cidade de São Carlos-SP**. 2004.

NINCE, Andréia Azeredo. **Lascamento do concreto exposto a altas temperaturas**. 2006. Tese de Doutorado. Universidade de São Paulo.

PEREIRA, A. G.; ARAÚJO JÚNIOR, C. F. D. **Prevenção de incêndios nas edificações e áreas de risco no Estado de São Paulo**. VIII Congresso Virtual Brasileiro. São Paulo, p. 15. 2011.

PURKISS, John A. **Fire Safety Engineering Design of Structures**. Butterworth Heinemann. Oxford, 1996.

REIS, D.C. **Verificação da segurança estrutural de vigas de concreto armado em situação de incêndio**. 2022.

SHORTER, G.W.; HARMATHY, T. Z. Discussão sobre artigo “**The fire resistance of concrete beams**” de Ashton and Bate, Proceedings, Institute of Civil Engineers, Vol. 20, 1961, p. 313.

SILVA, Valdir Pignatta. **Projeto de estruturas de concreto em situação de incêndio: conforme ABNT NBR 15200: 2012**. Editora Blucher, 2012.

SILVA, Valdir Pignatta; PIMENTA, Paulo. **Estruturas de aço em situação de incêndio**, 2016.

SOUSA, Douglas Alves de; SILVA, Guilherme Pereira. **Estrutura de Concreto em Situação de Incêndio**. 2015. 137 f. TCC (Graduação) - Curso de Engenharia Civil, Universidade Federal de Goiás, Goiânia, 2015.

SUAZNÁBAR, Jorge Saúl; SILVA, Valdir Pignatta. **Flexão composta oblíqua em pilares curtos de concreto armado em situação de incêndio: curvas do estado-limite último pelo método da isoterma de 500° C**. Revista IBRACON de Estruturas e Materiais, v. 11, p. 163-182, 2018.

THOMAS, G. C.; BUCHANAN, A. H.; FLEISCHMANN, C. M. **Structural fire design: the role of time equivalence**. Fire Safety Science, v. 5, p. 607-618, 1997.

ULM, Franz-Josef. **Fire in Transport Tunnel / Research on Rapidly Heated Concrete**. In: <http://cist.mit.edu/fire.htm> [acesso em 15.03.2002]. CIST-MIT. Cambridge (Massachusetts, U.S.A.), 2000.

WAUBKE, Nils Valerian. **Transportphänomene in Betonporen**. 1966. Tese de Doutorado. Inst. f. Baustoffkunde u. Stahlbetonbau d. Techn. Hochsch. Braunschweig.

WAUBKE, N. V.; SCHNEIDER, U., **Tensile stress in concrete due to fast vapour flow**, Apresentação do simpósio “Pore Structure and Properties of Materials”, Praga, 1973.

WOOLSON, I. **Fire in a reinforced concrete warehouse at Far Rockaway**. 1918.

ANEXO A

Cargas de incêndio específicas por ocupação (IT 09 - 2020)

Ocupação/Uso	Descrição	Divisão	Carga de Incêndio (q_{fi}) em MJ/m ²
Residencial	Alojamentos estudantis	A-3	300
	Apartamentos	A-2	300
	Casas térreas ou sobrados	A-1	300
	Pensionatos	A-3	300
Serviços de Hospedagem	Hotéis	B-1	500
	Motéis	B-1	500
	Apart-hotéis	B-2	300
Comercial varejista, loja	Açougue	C-1	40
	Antiguidades	C-2	700
	Aparelhos domésticos	C-1	300
	Armarinhos	C-1	300
	Armas	C-1	300
	Artigos de bijuteria, metal ou vidro	C-1	300
	Artigos de cera	C-2	2100
	Artigos de couro, borracha, esportivos	C-2	800
	Automóveis	C-1	200
	Bebidas destiladas	C-2	700
	Brinquedos	C-2	500
	Calçados	C-2	500
	Drogarias (incluindo depósitos)	C-2	1000
	Ferragens	C-1	300
	Floricultura	C-1	80
	Galeria de quadros	C-1	200
	Livrarias	C-2	1000
	Lojas de departamento ou centro de compras (Shoppings)	C-2 / C-3	800
	Máquinas de costura ou de escritório	C-1	300
	Materiais fotográficos	C-1	300
	Móveis	C-2	400
	Papelarias	C-2	700
	Perfumarias	C-2	400
	Produtos têxteis	C-2	600
	Relojoarias	C-2	600
	Supermercados	C-2	400
Tapetes	C-2	800	

Ocupação/Usos	Descrição	Divisão	Carga de Incêndio (qfi) em MJ/m ²
Comercial varejista, loja	Tintas e vernizes	C-2	1000
	Verduras frescas	C-1	200
	Vinhos	C-1	200
	Vulcanização	C-2	1000
Serviços profissionais, pessoais e técnicos	Agências bancárias	D-2	300
	Agências de correios	D-1	400
	Centrais telefônicas	D-1	100
	Cabeleireiros	D-1	200
	Copiadora	D-1	400
	Encadernadoras	D-1	1000
	Escritórios	D-1	700
	Estúdios de rádio ou de televisão ou de fotografia	D-1	300
	Laboratórios químicos	D-4	500
	Laboratórios (outros)	D-4	300
	Lavanderias	D-3	300
	Oficinas elétricas	D-3	600
	Oficinas hidráulicas ou mecânicas	D-3	200
	Pinturas	D-3	500
	Processamentos de dados	D-1	400
Educacional e cultura física	Academias de ginástica e similares	E-3	300
	Pré-escolas e similares	E-5	300
	Creches e similares	E-5	300
	Escolas em geral	E-1 / E-2 / E-4 / E-6	300
Locais de reunião de público	Bibliotecas	F-1	2000
	Cinemas, teatros e similares	F-5	600
	Circos e assemelhados	F-7	500
	Centros esportivos e de exibição	F-3	150
	Clubes sociais, boates e similares	F-6	600
	Estações e terminais de passageiros	F-4	200
	Exposições	F-10	Levantamento de carga de incêndio, conforme IT 09 (2017).
	Igrejas e templos	F-2	200
	Museus	F-1	300
	Restaurantes	F-8	300
Serviços automotivos e assemelhados	Estacionamentos	G-1 / G-2	200
	Oficinas de conserto de veículos e manutenção	G-4	300

Ocupação/Uso	Descrição	Divisão	Carga de Incêndio (qfi) em MJ/m ²
Serviços automotivos e assemelhados	Postos de abastecimento (tanques enterrados)	G-3	300
	Hangares	G-5	200
Serviços de saúde e institucionais	Asilos	H-2	350
	Clínicas e consultórios médicos e odontológicos	H-6	200
	Hospitais em geral	H-1 / H-3	300
	Presídios e similares	H-5	100
	Quartéis e similares	H-4	450
Industrial	Aparelhos eletroeletrônicos, fotográficos, ópticos	I-2	400
	Acessórios para automóveis	I-1	300
	Acetileno	I-2	700
	Alimentação	I-2	800
	Artigos de borracha, cortiça, couro, feltro, espuma	I-2	600
	Artigos de argila, cerâmica ou porcelanas	I-1	200
	Artigos de bijuteria	I-1	200
	Artigos de cera	I-2	1000
	Artigos de gesso	I-1	80
	Artigos de mármore	I-1	40
	Artigos de peles	I-2	500
	Artigos de plásticos em geral	I-2	1000
	Artigos de tabaco	I-1	200
	Artigos de vidro	I-1	80
	Automotiva e autopeças (exceto pintura)	I-1	300
	Automotiva e autopeças pintura)	I-2	500
	Aviões	I-2	600
	Balanças	I-1	300
	Baterias	I-2	800
	Bebidas destiladas	I-2	500
	Bebidas não alcoólicas	I-1	80
	Bicicletas	I-1	200
	Brinquedos	I-2	500
	Café (inclusive torrefação)	I-2	400
	Caixotes, barris ou pallets de madeira	I-2	1000
	Calçados	I-2	600
	Carpintarias e marcenarias	I-2	800
	Cera de polimento	I-3	2000
	Cerâmica	I-1	200

Ocupação/Us	Descrição	Divisão	Carga de Incêndio (qfi) em MJ/m ²
Industrial	Cereais	I-3	1700
	Cervejarias	I-1	80
	Chapas de aglomerado ou compensado	I-1	300
	Chocolate	I-2	400
	Cimento	I-1	40
	Cobertores, tapetes	I-2	600
	Colas	I-2	800
	Colchões (exceto espuma)	I-2	500
	Condimentos, conservas	I-1	40
	Confeitarias	I-2	400
	Congelados	I-2	800
	Couro sintético	I-2	1000
	Defumados	I-1	200
	Discos de música	I-2	600
	Doces	I-2	800
	Espumas	I-3	3000
	Farinhas	I-3	2000
	Feltros	I-2	600
	Fermentos	I-2	800
	Fiações	I-2	600
	Fibras sintéticas	I-1	300
	Fios elétricos	I-1	300
	Flores artificiais	I-1	300
	Fornos de secagem com grade de madeira	I-2	1000
	Forragem	I-3	2000
	Fundições de metal	I-1	40
	Galpões de secagem com grade de madeira	I-2	400
	Geladeiras	I-2	1000
	Gelatinas	I-2	800
	Gesso	I-1	80
	Gorduras comestíveis	I-2	1000
	Gráficas (empacotamento)	I-3	2000
	Gráficas (produção)	I-2	400
	Guarda-chuvas	I-1	300
	Instrumentos musicais	I-2	600
	Janelas e portas de madeira	I-2	800
	Jóias	I-1	200
	Laboratórios farmacêuticos	I-1	300

Ocupação/Uso	Descrição	Divisão	Carga de Incêndio (q _{fi}) em MJ/m ²
Industrial	Laboratórios químicos	I-2	500
	Lápis	I-2	600
	Lâmpadas	I-1	40
	Laticínios	I-1	200
	Malharias	I-1	300
	Máquinas de lavar de costura ou de escritório	I-1	300
	Massas alimentícias	I-2	1000
	Mastiques	I-2	1000
	Materiais sintéticos ou plásticos	I-3	2000
	Metalurgia	I-1	200
	Montagens de automóveis	I-1	300
	Motocicletas	I-1	300
	Motores elétricos	I-1	300
	Móveis	I-2	600
	Óleos comestíveis	I-2	1000
	Padarias	I-2	1000
	Papéis (acabamento)	I-2	500
	Papéis (preparo da celulose)	I-1	80
	Papéis (procedimento)	I-2	800
	Papelões betuminados	I-3	2000
	Papelões ondulados	I-2	800
	Pedras	I-1	40
	Perfumes	I-1	300
	Pneus	I-2	700
	Produtos adesivos	I-2	1000
	Produtos de adubo químico	I-1	200
	Produtos alimentícios (expedição)	I-2	1000
	Produtos com ácido acético	I-1	200
	Produtos com ácido carbônico	I-1	40
	Produtos com ácido inorgânico	I-1	80
	Produtos com albumina	I-3	2000
	Produtos com alcatrão	I-2	800
	Produtos com amido	I-3	2000
	Produtos com soda	I-1	40
Produtos de limpeza	I-3	2000	
Produtos graxos	I-1	1000	
Produtos refratários	I-1	200	
Rações	I-3	2000	

Ocupação/Usos	Descrição	Divisão	Carga de Incêndio (<i>q_{fi}</i>) em MJ/m ²
Industrial	Relógios	I-1	300
	Resinas	I-3	3000
	Roupas	I-2	500
	Sabões	I-1	300
	Sacos de papel	I-2	800
	Sacos de juta	I-2	500
	Sorvetes	I-1	80
	Sucos de fruta	I-1	200
	Tapetes	I-2	600
	Têxteis em geral	I-2	700
	Tintas e solventes	I-3	4000
	Tintas látex	I-2	800
	Tintas não inflamáveis	I-1	200
	Transformadores	I-1	200
	Tratamento de madeira	I-3	3000
	Tratores	I-1	300
	Vagões	I-1	200
	Vassouras ou escovas	I-2	700
	Velas de cera	I-3	1300
	Vidros ou espelhos	I-1	200
Vinagres	I-1	80	
Demais usos	Demais atividades não enquadradas acima	Levantamento de carga de incêndio, conforme IT 09 (2017).	

Fonte: CBMMG (2020)