

# REVISTA DA ARQUITETURA: CIDADE E HABITAÇÃO

**Análise de estruturas de concreto armado em situação de incêndio: um insight**

**Analysis of reinforced concrete structures in a fire situation: an insight**

Honório Assis Filho Crispim

Calvin Mariano Rêgo Crispim

Dossiê temático: Habitação no Terceiro Milênio  
Volume 1 • Nº 1 • Jan a Jun • 2021

# Análise de estruturas de concreto armado em situação de incêndio: um insight\*

## Analysis of reinforced concrete structures in a fire situation: an insight

Honório Assis Filho Crispim\*\*

Calvin Mariano Rêgo Crispim\*\*\*

### Resumo

O estudo dos reflexos de um Incêndio em edificações é algo imperativo. No Brasil já tivemos casos em que dezenas de pessoas foram vitimadas tanto pelo fogo em si quanto pelos efeitos da fumaça e pânico no processo de escape. Este estudo apresenta uma visão inicial de dois métodos de verificação de elementos estruturais (tabular e simplificado, ambos amparados em norma). Para tal, foi utilizado o módulo de incêndio do Eberick V9 para conferência dos resultados do método tabular. Quanto ao método simplificado, foram apresentadas as formulações para a obtenção das temperaturas notáveis e os respectivos cálculos dos esforços resistentes. Os resultados apontaram uma compatibilidade entre os dois métodos, contudo estudos mais completos para toda a estrutura (lajes, vigas e pilares) são sugeridos para conclusões mais abrangentes. As explicações constantes neste relatório de estudo são colocadas de forma a permitir uma visão clara, concisa e precisa da aplicação de métodos específicos de verificação nesta área que é incipiente no Brasil.

**Palavras-chave:** Incêndio. Estrutura. Simplificado. Tabular. Eberick.

### Abstract

The study of the reflexes of a fire in buildings is something imperative. At the Brazil we have already had cases in which dozens of people have been victimized so much by the fire itself and by the effects of smoke and panic in the process of exhaust. This study presents an initial view of two methods of checking structural elements (tabular and simplified, both supported in norm). For this purpose, the Eberick V9 fire module was used to checking the results of the tabular method. As for the simplified method, the formulations for obtaining the temperatures were presented and the respective calculations of resistance efforts. The results pointed out a compatibility between the two methods, however studies more complete for the entire structure (slabs, beams and columns) are suggested for more comprehensive conclusions. The explanations contained in this study report are placed in such a way as to allow a clear, concise and need the application of specific verification methods in this area which is incipient in Brazil.

\* Recebido em 31/07/2020

Aprovado em 18/03/2021

\*\* Realizou o Curso de Formação de Oficiais do Corpo de Bombeiros Militar do Distrito Federal - CBMDF (1988), possui graduação em Tecnólogo em Processamento de Dados pela Universidade Católica de Brasília (1992), mestrado em Engenharia Eletrônica e Computação pelo Instituto Tecnológico de Aeronáutica (1995), doutorado em Engenharia Elétrica pela Universidade de Brasília (2006), graduação em Engenharia Civil pela Universidade Estadual de Goiás (2010). Leciona na UniCEUB. Atualmente pesquisa sistemas computacionais aplicados a estruturas.  
E-mail: hcrispim@gmail.com

\*\*\* Engenheiro Civil, pós-graduado em projetos de estruturas de aço para edificações, mestre em engenharia elétrica pela UNB, ênfase em tecnologia BIM, projeto de instalações e projetos de prevenção e combate a incêndio.  
E-mail: calvin.mariano@gmail.com

**Keywords:** Fire. Structure. Simplified. Tabular. Eberick.

## 1 Incêndio

Os incêndios, de uma forma geral, sempre fizeram parte da história do homem. Alguns deles tomaram até mesmo dimensão literária como no caso de Nero, que ateou fogo em Roma. Naquela época, os romanos viviam em unidades habitacionais altamente inflamáveis (estrutura de madeira com até três pavimentos). Nesse cenário, o incêndio prolongou-se por seis dias seguidos até que pudesse ser controlado.

A verticalização das cidades e a complexidade dos materiais usados na construção civil pela sociedade moderna configuram os elementos colaborativos à maximização dos riscos relativos ao fogo fora de controle. Com base em tais riscos à vida humana e bens materiais, o fenômeno do fogo passou a ser objeto de rigorosos estudos.

Entre os vários organismos internacionais destinados à realização de experimentos na área de incêndio, destaca-se o *National Institute of Standards and Technology – NIST* nos EUA e, no Brasil, o Instituto de Pesquisas Tecnológicas, através de sua divisão de estudos sobre incêndio. A Associação Brasileira de Normas Técnicas – ABNT, por meio do CB24 e outras Comissões, complementa os organismos de referência quanto às pesquisas e normatização na área de incêndio.

O incêndio é um fenômeno cujo estudo é complexo e dotado de inúmeras variáveis. Assim, esse fenômeno deve ser combatido desde a elaboração dos projetos estrutural e específico de incêndio, passando pelos materiais utilizados na edificação e chegando até ao comportamento das pessoas que habitam o local.

No caso do projeto de uma edificação, apesar de todos os esforços envidados pelos órgãos do Estado, a concepção e aprovação de sistemas contra incêndio e pânico ainda é vista como um óbice a ser vencido e não como algo naturalmente salutar.

Quanto aos materiais utilizados na construção civil, percebe-se a utilização de materiais e com-

pósitos que possuem alta inflamabilidade (usados notadamente em acabamentos e decorações). Tais materiais exigem atenção especial quanto ao uso destes na obra, notadamente quanto à qualidade e contribuição para alastramento ou retardo do fogo.

Além disso, o comportamento das pessoas influencia, diretamente, as ocorrências de incêndio que têm causas desde o esquecimento de algum agente ígneo aceso (panela no fogão) até ações pessoais diretas de origem criminosa (incendiários).

Assim, considerando-se o exposto, este estudo se fundamenta na necessidade de se dotar a estrutura de uma edificação das condições de segurança normativa. Em relação aos vários passos necessários, a verificação dos elementos discretos é preconizada em norma. Logo, este estudo abordará os métodos tabular e simplificado de cálculo de vigas tanto contínuas quanto biapoiadas.

## 2 O comportamento físico-químico do fogo

### 2.1 Classes de materiais em incêndio

Os materiais em incêndios, por motivos didáticos, foram divididos em classes que variam de A a D de acordo com os materiais predominantes. Essa classificação facilita a concepção de projetos de incêndio, que são orientados entre outros aspectos pelos tipos dos materiais presentes em cada ambiente e o agente extintor mais adequado a ser empregado no mesmo (MARCELLI, 2007).

A classe A corresponde aos materiais de fácil combustão com a propriedade de queimar em sua superfície e profundidade. A queima de materiais dessa classe deixa resíduos e tem como exemplos: tecidos, madeira, papel etc.

A classe B é representada pelos produtos inflamáveis que queimam em sua superfície e, geralmente, não deixam resíduo. Assim, os óleos, graxas, tintas, gasolina e outros líquidos inflamáveis são exemplos de materiais dessa classe.

Incêndio classe C corresponde àqueles que ocorrem em equipamentos elétricos energizados, como transformadores, motores, fios etc.

A classe D diz respeito a incêndio que envolva elementos pirofóricos como magnésio, selênio, antimônio, lítio, potássio, alumínio fragmentado, zinco, titânio, sódio, urânio e zircônio. Pirofórico é a característica de uma combustão que se inicia espontaneamente no ar.

## 2.2 Temperaturas notáveis

Para o estudo do incêndio, é necessário considerar três conceitos básicos: ponto de fulgor, ignição e combustão (CARVALHO et al., 2006).

Ponto de fulgor: é a menor temperatura na qual um líquido combustível ou inflamável desprende vapores em quantidade suficiente para que a mistura vapor e ar, logo acima de sua superfície, propague uma chama a partir de uma fonte de ignição. Os vapores liberados a essa temperatura não são suficientes para dar continuidade à combustão.

Ponto de ignição: temperatura na qual os vapores desprendidos entram em combustão de forma espontânea, independentemente da presença de uma chama direta.

Ponto de combustão: é a temperatura mínima necessária para que um combustível desprenda vapores ou gases combustíveis que, combinados com oxigênio do ar e em contato com uma chama, se inflamam. Dessa forma, mesmo que se retire a chama, o fogo não se apagará, porque a temperatura faz gerar, a partir do material combustível, vapores ou gases inflamáveis suficientes para manter o fogo.

Na Tabela 1 apresenta-se um extrato das principais temperaturas (fulgor e ignição) relativas a materiais comumente conhecidos.

**Tabela 1:** temperaturas notáveis

Produto	Temperatura de Fulgor	Temperatura de Ignição
Acetona	-17	538
Gasolina	-42	257
Hidrogênio	Gás	584
Óleo comestível	37	257

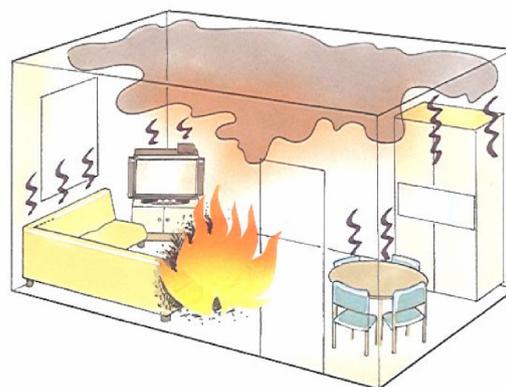
Fonte: MARCELLI, 2007.

## 3 O Desenvolvimento de um Incêndio

O estudo do desenvolvimento e a propagação de um incêndio não é simples. Contudo, tal complexidade pode ser minimizada por meio da divisão deste nas seguintes fases: ignição, crescimento, ignição súbita e generalizada, desenvolvimento completo, diminuição (QUINTIERE, 2007).

A Figura 1 apresenta um princípio de incêndio num ambiente fechado. Assim, tem-se como perceber as diversas fases que serão explicadas sucintamente abaixo.

**Figura 1 -** Princípio de incêndio em um ambiente fechado



Fonte: CARVALHO et al., 2006

A ignição corresponde ao período em que os quatro elementos do tetraedro do fogo (combustível, comburente, calor e reação em cadeia) estão presentes. No início da combustão, o fogo é pequeno e, geralmente, se restringe ao local no qual teve início.

O princípio de qualquer incêndio se dá pela ignição, quando por atuação de um agente ígneo é atingido o ponto de inflamação ou ignição de um material combustível presente. Assim, o material entra no processo de combustão viva (chamas). Os peritos e investigadores de incêndio chamam o lugar onde ocorre a ignição do fogo de foco inicial do incêndio.

Após a ignição (tempo curto), o calor gerado no foco inicial se propaga e propicia o aquecimento gradual de todo o ambiente. Dessa forma, se inicia a formação de uma coluna de gás aquecido (pluma) sobre o material combustível que queima. Enquanto essa coluna de gás se desenvolve e sobe, ocorre

o arrasto de ar do ambiente em volta do local onde está o foco para dentro do ambiente sinistrado.

No caso de um ambiente como um quarto ou sala, a coluna de ar e gases aquecidos se vê afetada pelo teto e pelas paredes laterais. Assim, os gases aquecidos se elevam e, simultaneamente, começam a se propagar para os lados, quando tocam o teto da edificação e começam a descer e chegarem às paredes do compartimento. Nesse contexto, percebe-se que o teto é um elemento importante para o espalhamento dos gases aquecidos e o respectivo preenchimento do ambiente, de cima para baixo. Assim, no ambiente sinistrado as maiores temperaturas estão na parte de cima do mesmo.

Na fase de crescimento, o oxigênio contido no ar está relativamente normalizado e o fogo está produzindo vapor de água (H<sub>2</sub>O), dióxido de carbono (CO<sub>2</sub>), monóxido de carbono (CO) e outros gases. Os tipos dos demais gases estão diretamente relacionados aos materiais que estão sendo queimados e que podem até mesmo produzir gases letais.

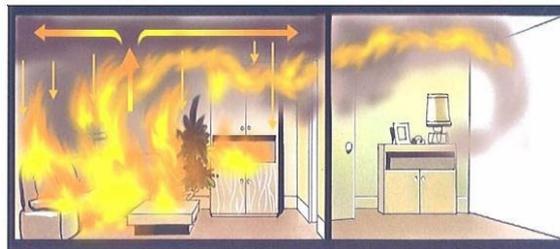
Na fase inicial do crescimento do incêndio, grande parte do calor está sendo consumido no próprio aquecimento dos materiais combustíveis presentes. Com a presença do material combustível (sofá, cama etc.) e de oxigênio, o calor produzido crescerá exponencialmente e, conseqüentemente, a temperatura geral do ambiente. Ainda nesse contexto, a temperatura próxima ao solo será muito menor que à próxima do teto.

A etapa de transição entre a fase do crescimento e o desenvolvimento completo do incêndio é dita ignição súbita generalizada. No caso de a oxigenação ser adequada, a progressão será para a típica ignição generalizada; caso contrário, poderá haver uma ignição explosiva.

Com a oxigenação adequada, as condições do ambiente alteram-se rapidamente à medida que o incêndio atinge todas as superfícies de combustão expostas. Tal fato acontece devido à camada de gás aquecido criada no teto da edificação, que irradia calor para os materiais combustíveis situados longe da origem do fogo. O calor irradiado produz a liberação de gases inflamáveis (pirólise) provenientes dos materiais combustíveis do ambiente. Os gases oriundos da pirólise são aquecidos até a temperatura de ignição, que poderá provocar um fenômeno

denominado de ignição súbita generalizada (*flashover*). Dessa forma, toda a área fica envolvida pelas chamas, conforme Figura 2.

Figura 2 - Flashover



Fonte: CARVALHO et al., 2006

A partir da oxigenação inadequada, a queima se torna lenta e a combustão incompleta porque não há oxigênio suficiente para manter as chamas. Dessa forma, grandes quantidades de calor e gases podem se acumular nos espaços não ventilados, até atingirem a temperatura de ignição (ainda necessitam de oxigênio suficiente para queimarem). Na condição de baixa oxigenação, o calor interior permanece retido e as partículas de carbono não são queimadas, e de outros gases inflamáveis produtos da combustão, estão prontas para auto ingerem-se rapidamente, assim que o oxigênio for suficiente. Assim, na presença de oxigênio, esse ambiente explodirá.

A explosão causada por essa situação é chamada de ignição explosiva (*backdraft*). Depois da ocorrência da ignição súbita generalizada, as superfícies expostas de todos os materiais combustíveis do ambiente sinistrado estarão queimando e a taxa de liberação do calor atingirá seu ponto máximo. As temperaturas produzidas nessa fase são altíssimas e poderão atingir valores iguais ou maiores a 1.100°C.

Em síntese, o *flashover* é mais frequente que o *backdraft*. Enquanto o *flashover*, causado pelo aumento da temperatura e presença de oxigênio, corresponde ao desenvolvimento acelerado do fogo, o *backdraft*, causado pelo aumento da temperatura e ventilação limitada, é um fenômeno explosivo.

A fase do desenvolvimento completo do incêndio ocorre quando todos os materiais combustíveis de um determinado ambiente são envolvidos pelo fogo. Durante esse tempo, os materiais combustíveis que queimam liberam a máxima quantidade de calor, um grande volume de gases e fumaça.

Tanto o calor liberado quanto os gases produzidos na combustão são influenciados pelo número e o tamanho das aberturas de ventilação do ambiente. Assim, os incêndios podem se converter em sinistros controlados pela falta de adequada ventilação, pois as chamas deixam de existir por falta de oxigênio na taxa adequada.

A partir da queima do material combustível, o incêndio é normalmente reduzido a brasas e o ambiente se torna ocupado por fumaça densa. A diferença de temperatura e de pressão entre o ambiente interno e externo ocasionam a saída dos gases e fumaça. Durante essa fase, poderá surgir um fenômeno denominado de *rollover* (ou *flameover*), que se distingue do *flashover* porque implica somente a queima dos gases aquecidos do incêndio. Ao contrário, o *flashover* corresponde à queima das superfícies dos outros materiais combustíveis presentes no ambiente sinistrado (DRYSDALE, 2007).

Ainda durante a fase do desenvolvimento completo, o ar atmosférico, rico em oxigênio, é arrastado para dentro do ambiente pelo efeito da convecção, pois o ar quente tende a subir e sair do ambiente.

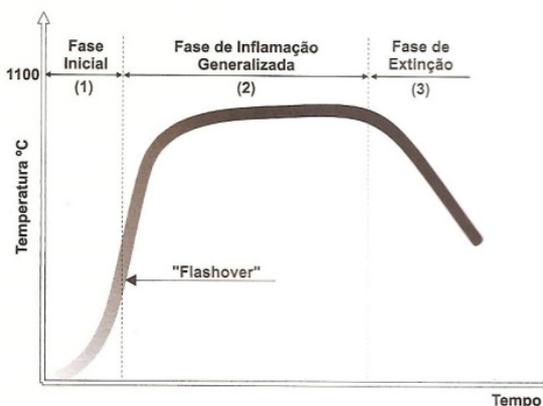
Os incêndios confinados têm os níveis mais altos de temperatura próximo ao teto e níveis mais baixos próximos ao solo. A temperatura nas áreas superiores pode chegar a mais de 700°C, o que permitirá uma rápida saída da fumaça realizando um grande furo no teto.

A diminuição e conseqüente extinção ocorrem com o natural consumo dos materiais combustíveis presentes no ambiente. Afinal, o consumo dos materiais causa a diminuição da taxa de liberação de energia (consumo de massa combustível) e o incêndio é controlado por falta de material combustível.

Nessa fase ainda poderão estar presentes as brasas, que podem manter temperaturas elevadas durante algum tempo. Assim, temos a mitigação do fogo, ou seja, a redução progressiva das chamas até o seu completo desaparecimento.

Em síntese, a extinção deu-se ou pela falta de oxigênio ou por consumo de todo o material combustível, ou pela ação direta sobre os elementos do fogo com agentes extintores (ação dos bombeiros). A Figura 3 apresenta tais fases.

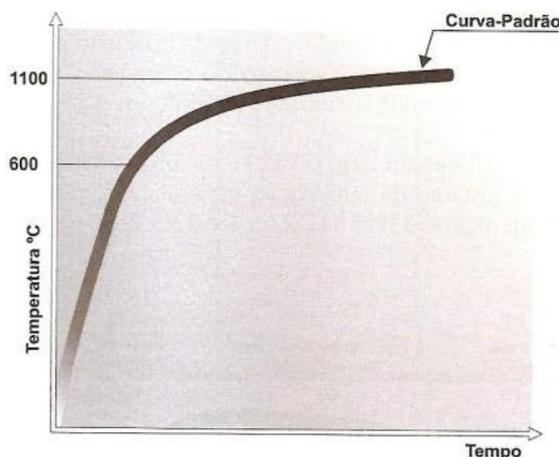
Figura 3 - Evolução da temperatura num incêndio real.



Fonte: MARCELLI, 2007.

Considerando-se que cada incêndio tem uma curva característica própria, o Instituto de Pesquisas Tecnológicas (IPT) de São Paulo produziu uma curva de temperatura padrão, apresentada na Figura 4. Nela, percebe-se que atingir altas temperaturas é uma questão de tempo (tanto menor, quanto maior for a carga incêndio).

Figura 4 - curva padrão de temperatura de um incêndio



Fonte: MARCELLI, 2007.

A Associação Brasileira de Normas Técnicas – ABNT Norma Brasileira (NBR 15200:2012) apresenta o incêndio padrão como a elevação padronizada de temperatura por meio da seguinte expressão  $\theta_g = \theta_o + 345 \log(8t + 1)$ . A elevação da temperatura se dá em função do tempo expresso em minutos. Os valores de  $\theta_g$  e  $\theta_o$  são expressos em graus Celsius e representam, respectivamente, as temperaturas final e inicial.

## 4 Comportamento do concreto no incêndio

Segundo a NBR ABNT 12.655:2015, o concreto é um material homogêneo formado pela mistura de cimento, agregados miúdo, graúdo e água com e sem incorporação de componentes, que desenvolve suas propriedades pelo endurecimento da pasta de cimento (cimento Portland e água).

O cimento, por sua vez, é composto por clínquer, gesso e adições (filler calcário, escória, pozolana etc.). Essas definições básicas evidenciam que o concreto é um composto complexo e que seu estudo, quando submetido a altas temperaturas, é complexo na mesma proporção (ISAIA, 2005).

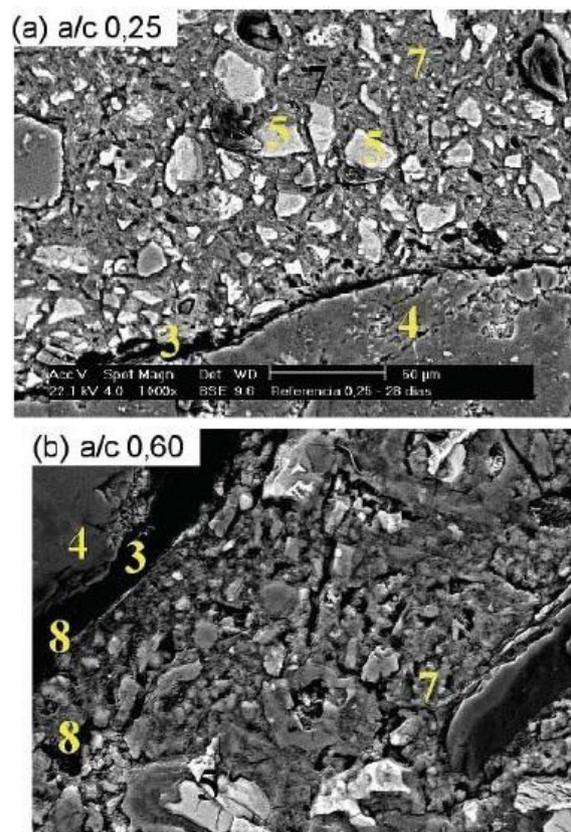
A composição do concreto é um dos fatores que deve ser levado em consideração, uma vez que tanto a pasta de cimento quanto o agregado são constituídos de componentes que se decompõem, em maior ou menor grau, com a exposição do calor (Metha & Monteiro, 1994).

A própria definição de concreto nos leva a uma visão que este é claramente dividido em pasta (cimento e água) e agregados. Contudo, uma abordagem microscópica, como a ilustrada na Figura 5, mostra a presença de zonas como a de transição, o que contrapõe uma visão simples de dois componentes.

A zona de transição corresponde a uma camada delgada ao redor do agregado (espessura entre 10 a 50  $\mu\text{m}$ ). Esta é, geralmente, mais fraca que os demais componentes e, por essa razão, exerce grande influência na resistência mecânica do concreto.

O cimento portland, utilizado na argamassa do concreto, é formado por componentes que reagem ao entrar em contato com a água, formando produtos hidratados e ocasionando um processo de endurecimento (ISAIA, 2005).

**Figura 5** - micrografias obtidas com MEV por elétrons retroespalhados, ampliadas 1000x, de concretos com 28 dias e relações a/c de (a) 0,25 e (b) 0,60 (3 zona de transição; 4 agregado; 5 grão de cimento anidro; 7 pasta de cimento hidratada; 8 vazio)



Fonte: ISAIA, 2005.

A pasta endurecida é formada, principalmente, por silicatos de cálcio (C-S-H), pelos cristais de hidróxido de cálcio ( $\text{Ca}(\text{OH})_2$ ), por cimento não hidratado, espaços residuais da pasta (preenchidos com água ou ar) e outros componentes (NEVILLE, 1997).

Como dito, o cimento Portland resulta da moagem do clínquer, gesso e aditivos. Assim, seus principais componentes são: o silicato tricálcico ou alita (C3S), o silicato dicálcico ou belita (C2S), o aluminato tricálcico (C3A) e o ferroaluminato tetracálcico ou ferrita (C4AF). A cal livre ( $\text{CaO}$ ) e a periclase ( $\text{MgO}$ ) também são importantes, pois suas presenças refletem um potencial para expansão do concreto endurecido (ISAIA, 2005).

No cimento portland hidratado, os silicatos de cálcio hidratados representam 50 a 60 % do volume de sólidos em uma pasta, sendo os principais responsáveis pelas propriedades desta. O C-S-H é composto por fibras pouco cristalinas, já a portlandita (hidróxido de cálcio) constitui 20 a 25 % do

volume de sólidos, e tende a formar cristais grandes sob a forma de prismas hexagonais distintos.

A resistência dos produtos sólidos da pasta do cimento é resultante de atração de Van Der Waals. A adesão entre as superfícies sólidas decorre dessas forças físicas e o grau de aderência é influenciado pela extensão e natureza das superfícies envolvidas.

Os cristais de C-S-H, de sulfoaluminatos de cálcio hidratados e de aluminatos de cálcio hidratados hexagonais possuem maior área específica, e, conseqüentemente, capacidade de adesão elevada. Esses produtos tendem a aderir fortemente, não somente uns aos outros, mas também há sólidos de área específica baixa, tais como hidróxidos de cálcio, grãos de clínquer anidro e partículas de agregados miúdo e graúdo (NEVILLE, 1997).

Análise das conseqüências do fogo nos elementos do concreto que formam uma estrutura deve ser realizada com base na temperatura máxima a que ficou submetido e por quanto tempo. A disponibilidade dessas informações possibilitará fazer estudo sobre as características remanescentes do concreto (MARCELLI, 2007).

Além das modificações nos agregados graúdos e na zonade transição, a exposição a altas temperaturas causam alterações no C-S-H, a portlandita, a etringita, a cal livre, o óxido de cálcio e a calcita. Assim, é possível ter uma noção do comportamento do concreto por meio da estrutura e das propriedades dos constituintes, bem como a relação entre eles. Afinal, a estrutura do concreto é composta, basicamente, pela pasta de cimento, pelos agregados e pela zona de transição entre estes (Caetano, 2004).

De uma forma resumida, ocorrem as seguintes alterações (RODRIGUES, 2008):

- a descalcificação do C-S-H acarreta a produção de CaO, que reage com o CO<sub>2</sub> presente na atmosfera, e produz a calcita;
- a larnita se forma quando toda a fração considerável de C-S-H desaparece, entre 100 e 400° C;
- a portlandita, ao atingir 530° C, instantaneamente se decompõe e forma a cal viva, que entre 400 e 600° C pode provocar microfissuras características devido a sua expansão;

- a etringita vai perdendo água e se decompondo, desaparecendo totalmente aos 100° C;
- acima de 800° C, a pasta sofre reações cerâmicas e, em 1100° C, ocorre o derretimento total dos cristais (CASTELLOTE *et al.*, 2003 apud ANTOCHEVES, 2005);
- Entre os 200 e 300°C, a perda de água capilar é completa, sem que se aprecie, ainda, alteração na estrutura do cimento hidratado e sem que as resistências diminuam de uma forma considerável;
- De 300 a 400°C, produz-se a perda de água do gel do cimento, ocorrendo uma sensível diminuição das resistências e parecendo as primeiras fissuras superficiais;
- Aos 400°C, uma parte do hidróxido de cálcio procedente da hidratação dos silicatos se transforma em cal viva;
- Até os 600°C, os agregados que não têm o mesmo coeficiente de dilatação térmica se expandem fortemente e com diferentes intensidades, dando lugar a tensões internas que começam a desagregar o concreto.

Rodrigues (2008) cita, de forma ordenada, os resultados de Antochaves (2005) utilizando a difratometria de raios-x, que são:

- a etringita desapareceu por completo a partir de 200°C;
- a portlandita apresenta-se estável até 400°C, começando a transformar-se em óxido de cálcio (CaO) a partir dos 600°C e desaparecendo aos 900°C;
- a larnita é encontrada em todas as temperaturas, aumentando os picos a partir dos 600°C, sem condições de afirmações mais específicas;
- o óxido de cálcio, normalmente ausente ou em baixas quantidades à temperatura ambiente, esteve sempre presente nos difratogramas a partir de 600°C.
- a calcita, aos 800°C, decompõe-se em CaO e CO<sub>2</sub>, que pode ser liberado como gás.

Assim, pode-se ter a noção clara que ocorrem nítidas mudanças nos compostos do concreto submetido a altas temperaturas. Tais alterações tam-

bém podem ser constatadas por meio do uso de Microscópio Eletrônico de Varredura e são tratadas em Rodrigues (2008).

## 5 Comportamento do aço no incêndio

Segundo Valdenir (JUNIOR, 2004), o aço, submetido a altas temperaturas, sofre perda de resistência e rigidez. Além disso, ele se expande e suas propriedades térmicas e mecânicas variam com o aumento da temperatura.

A ABNT NBR 14323:2013 trata, especificamente, do projeto de estruturas de aço e de estruturas mistas de aço e concreto de edifícios em situação de incêndio. Nela são abordadas as questões de natureza estrutural que envolvem concreto e aço.

Contudo, o foco neste trabalho é o aço utilizado diretamente na estrutura de concreto para dar origem ao concreto armado. Nesse caso, a ABNT NBR 15200:2012 é a que será utilizada como parâmetro para o estudo realizado neste artigo em composição com a EUROCOD 2:2010, que é a norma Europeia correspondente.

Segundo Purkiss (2013), os valores das propriedades do aço são sensivelmente independentes de suas utilizações (estrutura de aço ou aço para ser usado no concreto armado).

## 6 Comportamento do concreto e aço à luz da ABNT NBR 15200:2012

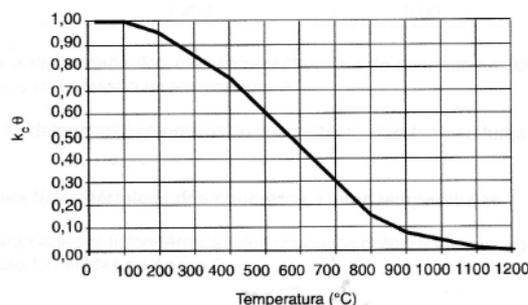
### 6.1 Concreto

O concreto sofre diminuição da resistência à compressão, numa relação  $f_{c,\theta} = k_{c,\theta} f_{ck}$ , sintetizada na Figura 6. Em que:

- $f_{ck}$  é a resistência característica à compressão do concreto à temperatura ambiente.

- $k_{c,\theta}$  é o fator de redução da resistência do concreto na temperatura  $\theta$ , conforme Tabela 1 da referida norma.

Figura 6 - fator de redução da resistência do concreto silicioso em função da temperatura



Fonte: NORMA NBR 15200:2012

O alongamento específico do concreto de densidade normal com agregado silicioso é determinado, de forma simplificada, assim (item C.1 do Anexo C da Norma):

$$\frac{\Delta l}{l} = 18 \times 10^{-3} (\theta_c - 20) \quad \text{Equação 1}$$

A relação entre o calor específico do concreto e a temperatura pode ser considerada constante. Assim, pode ser considerada igual a 1000 J/kg°C (item C.2 do Anexo C da Norma).

A relação entre a condutividade térmica e a temperatura, de uma forma simplificada, pode ser considerada constante e com valor 1,3 W/m°C (item C.3 do Anexo C da Norma).

A densidade varia com a temperatura, sendo influenciada pela perda de água. Sua determinação é feita de acordo com as relações abaixo (item C.4 do Anexo C da Norma):

$$\rho(\theta) = \rho(20^\circ\text{C}) \text{ for } 20^\circ\text{C} \leq \theta \leq 115^\circ\text{C}$$

$$\rho(\theta) = \rho(20^\circ\text{C}) \times (1 - 0,02 (\theta - 115)/85) \text{ para } 115^\circ\text{C} < \theta \leq 200^\circ\text{C}$$

$$\rho(\theta) = \rho(20^\circ\text{C}) \times (0,98 - 0,03 (\theta - 200)/200) \text{ para } 200^\circ\text{C} < \theta \leq 400^\circ\text{C}$$

$$\rho(\theta) = \rho(20^\circ\text{C}) \times (0,95 - 0,07 (\theta - 400)/800) \text{ para } 400^\circ\text{C} < \theta \leq 1200^\circ\text{C}$$

### 6.2 Aço

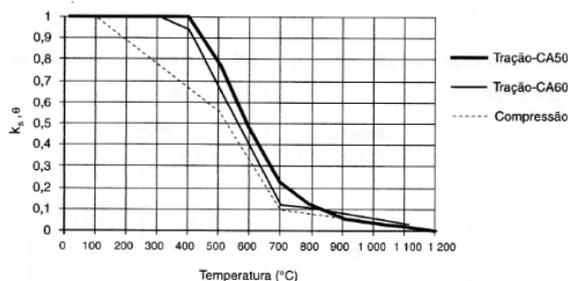
O aço sofre diminuição da resistência de escoamento da armadura passiva a altas temperaturas (item 6.2.1 da Norma). A Figura 7 sintetiza essa relação por meio da seguinte equação:

$$f_{y,\theta} = k_{s,\theta} f_{yk} \quad \text{Equação 2}$$

Em que:

- $f_{yk}$  é a resistência característica do aço de armadura passiva à temperatura ambiente
- $k_{s,\theta}$  é o fator de redução da resistência do aço na temperatura  $\theta$ , conforme Tabela 2.

**Figura 7** - fator de redução da resistência do aço de armadura passiva em função da temperatura



**Fonte:** acervo particular.

A relação entre a calor específico do aço e a temperatura, expresso  $J/kg^{\circ}C$ , segundo EN 1994-1-2 até 1200 °C, é dada por interpolação para as faixas de temperatura, sendo 650  $J/kg^{\circ}C$  para valor entre 900 e 1200 °C.

Os demais parâmetros podem ser vistos na ABNT NBR 15200:2012 e complementados com os constantes na EN 1994-1-2.

## 7 Proteção dos edifícios contra incêndio e pânico

Do ponto de vista estratégico, um incêndio de grandes proporções acontece a partir do somatório de vários fatores, que começa na concepção arquitetônica do edifício, passa pelas atividades e materiais construtivos empregados pela engenharia civil e alcança o comportamento humano inadequado quanto ao uso de dispositivos e instalações da edificação.

Os arquitetos e engenheiros estão envidando esforços tanto no âmbito governamental quanto no privado com vistas à produção de projetos e uso de materiais construtivos mais resistentes ao fogo. Assim, a concepção arquitetônica, além de manter a beleza, deve buscar atender aos regramentos legais que exigem sistemas preventivos fixos e móveis, escadas de incêndio e outros mecanismos de proteção.

De forma geral, cada Estado da Federação tem seu código de edificação local. Em síntese, dentre os vários aspectos a serem observados num projeto, construção e habitação de um edifício destacam-se (MARCELLI, 2007):

- a localização do mesmo em relação aos hidrantes e mananciais de água para combate a incêndio;
- espaço no qual está envolto de forma a permitir o livre acesso das viaturas dos bombeiros;
- compatibilidade entre o poder operacional do quartel que atende a área onde está o edifício (escada prolongável, plataforma e outras viaturas) e a altura do mesmo;
- distância de outros prédios, para evitar a propagação de chamas entre os mesmos;
- características dos materiais construtivos empregados na obra, que devem ser preferencialmente retardantes ao fogo;
- ter compartimentação horizontal e vertical de forma a minimizar a propagação de chamas;
- Ter prevista a instalação dos sistemas de proteção contra incêndio e pânico, de acordo com as normas e recomendações técnicas dos bombeiros;
- Ter, sempre que possível, plano de evacuação e fuga devidamente conhecidos pela brigada de incêndio da edificação. Além disso, a brigada deve treinar combates simulados e empregar os planos de forma frequente juntamente aos usuários do edifício.

A NORMA NBR 14432:2001, que trata das exigências de resistência ao fogo de elementos construtivos de edificações — procedimentos, em composição com outras e demais instruções técnicas normativas dos Corpos de Bombeiros Militares de cada Estado do Brasil, formam o compêndio necessário para o desenvolvimento de projetos com alto grau de segurança contra incêndio e pânico.

## 8 Ações e segurança

Como é de senso comum, quando uma estrutura é submetida a altas temperaturas, os materiais dos quais esta é constituída (aço, concreto, alumínio, vidro etc.) têm suas propriedades físicas alteradas. Consequentemente, esses efeitos devem ser considerados no que diz respeito ao dimensionamento dos elementos discretos (lajes, vigas, pilares etc.).

Na temperatura ambiente, de uma forma simples, a estrutura é considerada segura quando o esforço solicitante global ( $S_d$ ) for menor ou igual ao esforço resistente global ( $R_d$ ).

Na situação de incêndio, também ocorre esse relacionamento. Contudo, agora temos os esforços solicitante em situação de incêndio ( $S_{d,fi}$ ) e os esforços resistente na mesma situação ( $R_{d,fi}$ ).

### 8.1 Determinação dos esforços solicitantes

Os esforços solicitantes são calculados por meio de combinações probabilísticas, que podem ser encontradas na ABNT NBR 8681:2003. As fórmulas combinacionais e ponderadas apresentadas nessa norma consideram, para a situação de incêndio, uma excepcionalidade.

Assim, como exemplo, temos:

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

Equação 3

Em que:

- $F_{d,fi}$  valor de cálculo da ação na combinação excepcional;
- $F_{Gi,k}$  valor característico da ação permanente  $i$ ;
- $F_{Qj,fi}$  ação excepcional (valor característico da ação térmica);
- $F_{Qj,k}$  valor característico da ação variável  $j$ ;
- $\gamma_{g,fi}$  coeficiente de ponderação das ações permanentes em situação de incêndio, que pode ser obtido na Tabela 5.2 da norma;
- $\gamma_{q,fi}$  coeficiente de ponderação das ações variáveis em situação de incêndio, que pode ser obtido na Tabela 5.2 da Norma;

$\psi_2$  fator de combinação dos valores reduzidos, que pode ser obtido na Tabela 5.3 da Norma.

A ABNT NBR 15200:2012 admite, como alternativa para simplificar o cálculo do esforço solicitante em situação de incêndio a seguinte condição:

$$F_{d,fi} = 0,7S_d \quad \text{Equação 4}$$

Ou seja, pode-se adotar o esforço solicitante em situação de incêndio como 70% do valor em situação na temperatura ambiente cujas combinações não incluam a análise de vento.

O emprego do Eberick V9 facilita sobremaneira os cálculos de tais combinações. Este software realiza todas as combinações possíveis, acrescidas de outras jogadas pertinentes pelo usuário. Após isto, para todos os elementos discretizados (laje, viga, pilar etc.) obtém-se, a partir das combinações calculadas, a envoltória dos esforços Normais, Cortantes, Fletores e Torçores. Assim, este estudo utilizará como parâmetro os resultados obtidos com base no software.

## 9 Determinação dos esforços resistentes

Considerando-se  $R_k$  como o esforço resistente do elemento estrutural, este é calculado com base nas características geométricas do elemento, a composição do material do qual o elemento é constituído, sistemas de vínculos ao qual ele está submetido e outros critérios.

Para o valor de cálculo da resistência do concreto  $f_{ck,\theta}$ , temos:

$$f_{ck,\theta} = \frac{f_{ck}}{\gamma_{c,fi}} \quad \text{Equação 5}$$

A ABNT NBR 15200, que trata especificamente da situação de incêndio, recomenda a adoção  $\gamma_{c,fi} = 1$

Para o valor de cálculo da resistência do aço em regime de escoamento  $f_{y\alpha,\theta}$ , temos:

$$f_{y\alpha,\theta} = \frac{f_{yk}}{\gamma_{s,fi}} \quad \text{Equação 6}$$

A ABNT NBR 15200:2012 recomenda a adoção de  $\gamma_{s,fi} = 1$ .

Vale ressaltar que será mantido o valor de  $\alpha = 0,85$  para a redução da resistência do concreto na situação de incêndio, apesar de a norma ABNT NBR 15200:2012 permitir que  $\alpha = 1$ . Essa assunção dará ao estudo uma abordagem mais conservadora a favor da segurança.

## 10 Métodos de cálculo e o Tempo Requerido de Resistência ao Fogo – TRRF

Segundo Pignatta (2012), necessita-se conhecer a resistência dos materiais a uma dada temperatura para calcular a resistência de um dado elemento estrutural. De uma forma geral, emprega-se o modelo de incêndio padrão para tais estudos.

Para determinar as temperaturas em um dado elemento estrutural, é necessário conhecer o tempo de duração do incêndio. O incêndio padrão é uma curva fictícia, que, invariavelmente, cria temperaturas altas para um dado tempo a fim de favorecer a segurança.

A ABNT NBR 15200:2012 define Tempo Requerido de Resistência ao Fogo (TRRF) como o tempo mínimo (expresso em minutos) de resistência ao fogo de um elemento construtivo quando sujeito ao incêndio-padrão mantendo a integridade, estanqueidade e isolamento, onde aplicável.

A ABNT NBR 14432:2001 indica os tempos requeridos de resistência ao fogo que devem ser respeitados pelas edificações brasileiras, estes independem do material estrutural utilizado. Nela são estabelecidas as condições a serem atendidas pelos elementos estruturais e de compartimentação que integram os edifícios para que, em situação de incêndio, seja evitado o colapso estrutural.

Em síntese devem ser atendidos requisitos de estanqueidade e isolamento por um tempo suficiente para possibilitar:

- fuga dos ocupantes da edificação em condições de segurança;
- segurança das operações de combate ao incêndio;
- minimização de danos adjacentes e à infraestrutura pública.

O TRRF é avaliado e por simplicidade trata-se de um valor que é função do risco de incêndio e de suas consequências. Dessa forma, não se trata do tempo de duração do incêndio ou tempo resposta do Corpo de Bombeiros/Brigada de Incêndio. O TRRF é um tempo que pode ser calculado segundo a Teoria das Estruturas e a Transferência de Calor ou encontrado experimentalmente (COSTA e SILVA, 2003).

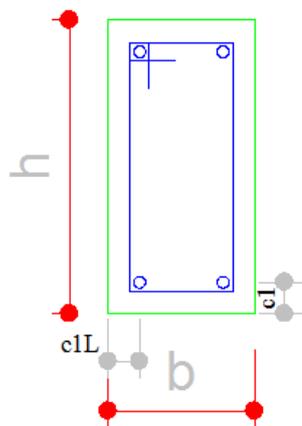
A ABNT NBR 15200:2012 permite o uso dos seguintes métodos de projeto: o tabular, o analítico para pilares, o simplificado, os métodos avançados e o experimental.

Neste estudo serão utilizados dois, o tabular e o simplificado. Assim, eles serão abordados com mais detalhes.

O método de dimensionamento tabular foi elaborado com base no conceito do TRRF. As tabelas do método tabular assumem que a temperatura em um ponto da seção transversal do concreto é menor quanto mais afastado ele estiver da superfície exposta ao fogo. Assim, quanto maior for a seção transversal e o cobrimento, maior será o núcleo frio.

No caso de vigas biapoiadas e contínuas, objeto deste estudo, as Tabela 4 e 5 da NBR 15200:2012 fornecem as dimensões mínimas  $b_{min}$  e  $c1_{min}$ , para uma dada viga (Figura 8). Tais tabelas foram construídas com a hipótese de vigas com aquecimento em três lados sob laje.

Figura 8 - esquemático para consulta das dimensões mínimas



Fonte: o autor.

Segundo o item 8.2.1 da NBR 15200:2012, há concentração de temperatura juntamente às bordas da face inferior das vigas, por isso, em casos com somente uma camada de armaduras e largura não superior ao  $b_{min}$  indicado na coluna 3 da TABELA 4 e na coluna 2 da TABELA 5, conforme o TRRF, a distância  $c1L$  no fundo das vigas deve ser 10 mm maior do que  $c1$  dado pelas referidas tabelas.

Esse mesmo item informa que, para manter iguais os cobrimentos das armaduras tanto em relação à face inferior quanto à lateral da viga, deve-se:

- para concreto armado, especificar barras de canto com um diâmetro imediatamente superior ao calculado.
- para concreto protendido, considerar para efeito de dimensionamento, uma força de protensão igual a 0,7 da indicada para a obra.

Os demais itens do método que forem necessários para o cálculo serão apresentados oportunamente.

Segundo Pignatta (SILVA, 2012), o método simplificado permite as seguintes hipóteses:

- os valores de cálculo dos esforços solicitantes em situação de incêndio podem ser realizados de acordo com a NBR 6118:2014. Neste estudo serão utilizados os valores informados pelo Eberick V9;
- os valores de cálculo dos esforços resistentes em situação de incêndio de cada ele-

mento podem ser calculados com base na distribuição de temperatura obtida da seção transversal do elemento. Considerando a exposição ao fogo conforme TRRF;

- os esforços resistentes podem ser calculados pelos critérios da NBR 6118:2014 para temperatura ambiente, adotando para o concreto e o aço a resistência obtida na situação de incêndio;
- os esforços resistentes podem ser determinados empregando métodos que consideram a seção de concreto reduzida na situação de incêndio.

Neste estudo será calculada a distribuição de temperatura na seção transversal do elemento com base no método de Wickström (WICKSTROM *et al.*, 1999), validado a partir do emprego do software TASEF (*Temperature Analysis of Structures Exposed to Fire*), baseado em elementos finitos.

Segundo Wickström (WICKSTROM apud PURKISS, 2013), a temperatura do concreto a uma dada distância da face exposta ao fogo, com transferência de calor uniaxial, é dada por:

$$\Delta\theta = n_x n_w \Delta\theta_f \quad \text{Equação 7}$$

Para fluxo biaxial, tem-se:

$$\Delta\theta_{xy} = (n_w(n_x + n_y - 2n_x n_y) + n_x n_y) \Delta\theta_f \quad \text{Equação 8}$$

Para  $n_w$  temos:

$$n_w = 1 - 0,0616t^{-0,88} \quad \text{Equação 9}$$

Considerando-se constante a propriedade térmica  $n_x$  ou  $n_y$  com  $y$  substituído por  $x$ , temos:

$$n_x = 0,18 \ln u_x - 0,81 \quad \text{Equação 10}$$

Pois,

$$u_x = \frac{a}{a_c} \frac{t}{x^2} \quad \text{Equação 11}$$

Considerando-se a difusividade térmica do concreto sob análise e  $a_c$  o valor de referência de  $0,417 \times 10^{-6} \text{ m}^2/\text{sec}$ , a equação se reduz a:

$$n_x = 0,18 \ln \frac{t}{x^2} - 0,081 \quad \text{Equação 12}$$

Para tal,  $x$  ou  $y$  estão sujeitos a:

$$x \geq 2b - 3,6\sqrt{0,0015t} \quad \text{Equação 13}$$

Em que o valor de  $t$  é em horas, a profundidade  $x$  e  $y$  em metros, a largura máxima  $b$  em metros. Essa formulação é válida quando a condutividade térmica do concreto reduz linearmente entre 1,25 W/m°C a 100°C e 0,5 W/m°C a 1200°C.

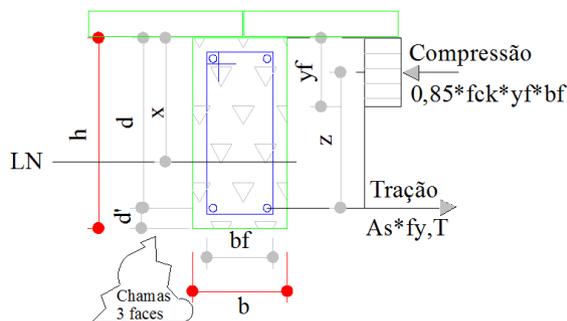
Para o cálculo do momento resistente da viga a uma dada temperatura, será usado um modelo simplificado permitido pela EN 1992-1-2, que corresponde à redução da seção de concreto a 500°C. Esse método parte do pressuposto de que todo concreto periférico a uma temperatura maior ou igual a 500°C perde suas características estruturais, enquanto a uma temperatura menor as mantém.

O novo valor para a tensão de escoamento do aço a uma dada temperatura será obtido a partir da interpolação dos valores constantes na Tabela 2, coluna tração – CA50 da ABNT NBR 15200:2012.

Assim, a Figura 9 apresenta os elementos necessários e suficientes para a elaboração do cálculo do momento resistente em situação de incêndio.

Considerando-se como base a figura abaixo, vale ressaltar que a resistência à tração do aço empregado na armadura passiva é calculada com base na tensão de escoamento do aço a uma dada temperatura ( $f_{y,T}$ ), que invariavelmente é de 500 Mpa para o CA50 com valor mitigado por  $K$ , conforme tabela 2 da NBR 15200:2012, diretamente ou por interpolação.

**Figura 9** - esquemático de uma viga para realização dos cálculos



**Fonte:** o autor

Para a compressão, utiliza-se o  $f_{ck}$  e mantém-se o valor de 0,85 para a redução deste. Nesse caso, será usado como referência o valor de  $f_{ck}$  informado pelo Eberick V9, que usa o mesmo como parte de sua análise estrutural.

Assim, temos (PURKISS apud ANDERBERG, 2013):

$$A_s f_{y,T} = 0,85 f_{ck} * y_f * b_f \quad \text{Equação 14}$$

Logo,

$$y_f = \frac{A_s f_{y,T}}{0,85 f_{ck} * b_f} \quad \text{Equação 15}$$

A partir de  $y_f$ , pode ser calculado o novo braço de alavanca  $z$  dado por:

$$z = d - \frac{y_f}{2} \quad \text{Equação 16}$$

Dessa forma, o momento resistente na situação de incêndio é dado, com base no método simplificado, por:

$$M_{ri} = A_s * f_{y,T} * z \quad \text{Equação 17}$$

## 10.1 Metodologia adotada

Este estudo toma como base dois métodos, o primeiro é o tabular (implementado pelo Eberick V9) e o segundo o simplificado (devidamente evidenciado na revisão literária).

Assim, para se contrastar os resultados entre esses dois métodos, será utilizado o modelo estrutural empregado no tutorial do Eberick V9. Esse modelo aborda todas as idiossincrasias das prescrições normativas descritas nas normas ABNT NBR 15200:2012 e ABNT NBR 14432:2001.

Dessa forma, foram selecionadas, arbitrariamente, as Vigas  $V_{xx}$  e  $V_{yyy}$  (biapoiada e contínua respectivamente). Essas vigas serão submetidas ao TRRF de 30 90 120 180 minutos e os valores providos pela verificação do software Eberick V9 serão comparados aos obtidos pelo emprego do método simplificado.

O objetivo do estudo é comparar o quanto os métodos são alinhados e os reflexos disto nos projetos de verificação de segurança estrutural sob incêndio com e sem o emprego de computador.

Para validar o emprego do método, foram produzidas as Tabela 2 e Tabela 3, que identificam, respectivamente, as temperaturas obtidas pelos modelos para um incêndio padrão e os valores apresentados por Wickström.

Tabela 2 - temperaturas obtidas por meio dos modelos

Duração em Horas	Temperatura Incêndio Padrão °C	Temperatura Wickstrom
0,5	842	746
1	945	888
1,5	1006	963
2	1049	1014
3	1110	1084
4	1153	1132

Fonte: o autor.

A Tabela 3 valida os valores de profundidade em cm, a partir da face exposta ao fogo, relativa a cada TRRF usando as equações preconizadas por Wickström.

Tabela 3 - valores das distâncias (nx) para cada TRRF imediatamente abaixo de 500 °C (Wickström)

	Duração 30 min	Duração 60 min	Duração 90 min	Duração 120 min	Duração 180 min	Duração 240 min
Espessura em cm (nx)	$\Delta\theta$ em °C					
1,00	746,36	887,67	963,04	1014,27	1083,99	1132,05
1,10	514,08	722,17	853,77	951,70	1096,24	1203,47
1,20	490,70	694,36	823,60	919,93	1062,29	1168,01
2,30	315,90	486,46	598,04	682,38	808,40	902,87
3,10	235,69	391,07	494,56	573,39	691,92	781,22
3,80	180,99	326,01	423,97	499,05	612,47	698,24
5,10	101,93	231,98	321,96	391,61	497,65	578,33
6,20	49,45	169,57	254,25	320,30	421,43	498,73

Fonte: o autor.

Neste estudo, os valores da temperatura a uma dada profundidade serão calculados com base no modelo bidimensional  $\Delta\theta_{xy}$ .

O valor obtido da Tabela 3 será utilizado para descontar a área do concreto que não tem resistência estrutural e o valor calculado com a fórmula bidimensional será empregado para mitigar a resistência de escoamento do aço.

Quanto ao Eberick V9, a configuração adotada foi de escolha arbitrária do TRRF, a verificação do cobrimento lateral da viga e, por fim, o não aproveitamento do reboco como parâmetro para verificação. Nesse caso, presume-se a contribuição do reboco como uma camada de sacrifício, que será perdida em caso de incêndio severo e contribuirá para a segurança da estrutura. Vale ressaltar que a ABNT NBR 15200:2012 permite tal aproveitamento sob condições bem definidas.

## 10.2 Resultados

Para ficar claro o emprego do modelo simplificado, será mostrado o cálculo de uma viga do modelo contido no Eberick V9 (verificação para incêndio) tanto por parte do software (método tabular) quanto pelo método simplificado. O TRRF adotado foi de 30 min.

### 10.2.1 Viga V9 do pavimento Tipo 2 – Segundo e terceiro tramo: P17, P18 e P19

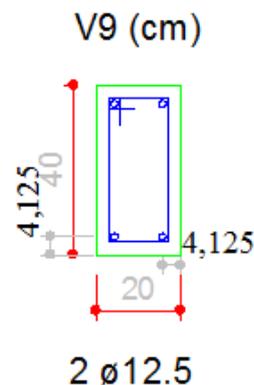
$f_{ck} = 250.00 \text{ kgf/cm}^2$ ,  $E_{cs} = 241500 \text{ kgf/cm}^2$ ,  
Cobrimento = 3.00 cm e

Peso específico = 2500.00 kgf/m<sup>3</sup>

Vincunlação: contínua

Ascale = 2.37 cm<sup>2</sup> (2 $\phi$ 12.5 – Asefe 2.45 cm<sup>2</sup>).

Seção (20x40) cm



### 10.2.2 Cálculo do Eberick V9

Para c1 existente, temos a distância da face exposta ao fogo até o centro da barra à esquerda:  $30 + 5 + 12.5/2 = 41.25 \text{ mm}$ . Sendo 30 mm de cobrimento, 5 mm do diâmetro do estribo.

Conforme a ABNT NBR 15200:2012, pode-se diminuir c1 de  $\Delta c_1$  dado por:

$$\Delta c_1 = 24.5 - 35 * \frac{S_{d,fi}}{S_d} * \frac{A_{s,calc}}{A_{s,ef}} \quad \text{Equação 18}$$

Sendo que:

$$0,4 \leq \frac{S_{d,fi}}{S_d} \leq 0,7 \quad \text{e} \quad 0,7 \leq \frac{A_{s,calc}}{A_{s,ef}} \leq 1,0$$

Dessa forma, temos:

$$\Delta c_1 = 24.5 - 35 * \frac{2479,56}{3520,47} * \frac{2.37}{2.45}$$

Contudo, a relação máxima para os esforços é 0,7. Assim, temos  $\Delta c_1$  0,85 mm.

Para viga contínua, utiliza-se a Tabela 5 da norma, que possui, para 30 min de TRRF, o valor máximo de 160/12. Dessa forma, serão utilizados 12 mm como mínimo para a viga de 20 cm.

Considerando-se  $c_1$  inicial igual a 12 mm e  $\Delta c_1 = 0,85$ , temos o valor necessário de 11,15 (compatível com o cálculo do software). Para  $c_{1l}$ , pela norma, somam-se 10 mm. Dessa forma,  $c_{1l} = 21,15$  mm.

Como para  $c_1$  e  $c_{1l}$  temos 41.25 mm, a viga foi aprovada.

### 10.2.3 Cálculo pelo método simplificado

$$t := 0.5 \text{ em horas}$$

$$temp := 345 \log(t * 60 * 8,10)$$

$$\text{valor} = 821,173 \text{ } ^\circ\text{C}$$

$$nw := 1 - (0,0616 * t^{-0,88}) \text{ valor} = 0,887$$

$$x := 0,04125 \text{ em m}$$

$$y := 0,04125 \text{ em m}$$

$$nx := 0,18 * \ln\left(\frac{1}{x^2}\right) - 0,81 \text{ valor} = 0,213$$

$$ny := 0,18 * \ln\left(\frac{1}{y^2}\right) - 0,81 \text{ valor} = 0,213$$

$$tempX := nx * nw * temp \text{ valor} = 155,045 \text{ } ^\circ\text{C}$$

$$tempY := ny * nw * temp \text{ valor} = 155,045 \text{ } ^\circ\text{C}$$

$$tempXY := (nw * (nx + ny - 2 * nw * ny) + nx * ny) * temp \text{ valor} = 281,295 \text{ } ^\circ\text{C}$$

$$tempFinal := tempXY + 20 \text{ valor} = 301,295 \text{ } ^\circ\text{C}$$

Para 301,295 °C temos o valor de  $K_f = 1$ , segundo a Tabela 2 da ABNT NBR 15200:2012  $f_y = 5000 \frac{kgf}{cm^2}$  tensão de escoamento do aço CA50  $f_y T := f_y$

Tem-se o mesmo valor, pois  $k_f = 1$   
 $A_{sef} := 2.45 \text{ cm}^2$

$f_{ck} := 250 \frac{kgf}{cm^2}$  resistência do concreto usado na viga

$bf := 20 - 2 * 2.1 \text{ valor} = 17,6 \text{ cm}$ , que corresponde ao desconto da região do concreto que perdeu a resistência a 500 °C

$$y_f := \frac{A_{sef} * f_y T}{0,85 * f_{ck} * bf} \text{ valor} = 3,275 \text{ cm}$$

$$d = 40 - 4,125 \text{ valor} = 35,875 \text{ cm}$$

$$z := d - \frac{y_f}{2} \text{ valor} = 34,237 \text{ cm}$$

$M_{ri} := A_{sef} * f_y T * z * 10^{-2} \text{ valor} = 4194 \text{ kgf.m}$ , que corresponde ao momento resistente de incêndio

$M_{di} := 2479,56 \text{ kgf.m}$  Valor fornecido pelo Eberick V9. Logo, a viga passou.

A Tabela 4 apresenta o resumo dos resultados para V9, considerando-se 4 valores distintos de TRRF.

Tabela 4 - resultados para V9

V9 - Contínua c1 e c1l atuais 41,25 (mm)	TRRF							
	30 min		60 min		90 min		120 min	
	Eberick V9	Simplificado	Eberick V9	Simplificado	Eberick V9	Simplificado	Eberick V9	Simplificado
V9 (cm)	c1 e c1l necessários	M <sub>ri</sub> = 4194	c1 e c1l necessários	M <sub>ri</sub> = 3115 e	c1 e c1l necessários	M <sub>ri</sub> = 1579	c1 e c1l necessários	M <sub>ri</sub> = 818,747 e
	11,55 e	2479,56	4,45 e 14,45	2479,56	43,69 e	2479,56	66,55 e	2479,56
	21,15	ambos em	respectivamente	ambos em	53,69	ambos em	75,55	ambos em
	2 e 12,5	kgf.m		kgf.m	respectivamente	kgf.m	respectivamente	kgf.m
Resultado	Aprovada	Aprovada	Aprovada	Aprovada	Reprovada	Reprovada	Reprovada	Reprovada

Fonte: o autor.

A Tabela 5 apresenta o resumo dos resultados para Viga V3 do pavimento Tipo 2 – Segundo e terceiro tramo: P17, P18 e P19.

Tabela 5 - resultados para V3

V3 - biapoada c1 e c1l atuais 41,25 (mm)	TRRF							
	30 min		60 min		90 min		120 min	
	Eberick V9	Simplificado	Eberick V9	Simplificado	Eberick V9	Simplificado	Eberick V9	Simplificado
V9 (cm)	c1 e c1l necessários	M <sub>ri</sub> = 4194	c1 e c1l necessários	M <sub>ri</sub> = 3115 e	c1 e c1l necessários	M <sub>ri</sub> = 1579	c1 e c1l necessários	M <sub>ri</sub> = 818,747 e
	13,73 e	4197,93	33,73 e 43,73	4197,93	56,23 e	4197,93	66,23 e	4197,93
	23,73	ambos em	respectivamente	ambos em	66,23 respectivamente	ambos em	ambos em	ambos em
	2 e 12,5	kgf.m		kgf.m		kgf.m		kgf.m
Resultado	Aprovada	Aprovada	Reprovada	Reprovada	Reprovada	Reprovada	Reprovada	Reprovada

Fonte: o autor.

## 11 Considerações finais

As vigas escolhidas têm as mesmas bitolas para a armadura longitudinal. Assim, o método simplificado apresentou os mesmos resultados de resistência tanto para a contínua, quanto para a biapoada. Nesse caso específico, os dois métodos apresentaram resultados semelhantes no diz respeito a passar ou não na verificação contra incêndio.

Este estudo é um *insight* que diz respeito ao cálculo de estruturas em situação de incêndio. Consequentemente, um estudo mais completo deve ser realizado *a posteriori*.

Apesar de o uso do Eberick V9 facilitar sobremaneira a realização do trabalho, todos os resultados foram confirmados com cálculos a mão. Tal procedimento foi realizado com o objetivo de melhor compreender a implementação da ABNT NBR 15200:2012 por parte do software.

Quanto ao método simplificado, apesar do nome, ele exige uma extrema atenção no emprego dos parâmetros e uma gama considerável de testes para aplicação deste. Assim, pode-se apontar como trabalho futuro o desenvolvimento de uma ferramenta automatizada para facilitar seu uso em projetos de grande envergadura.

Ainda no contexto de trabalhos futuros, pode-se estender este estudo para a comparação dos demais elementos discretos da estrutura como pilares e lajes. Obviamente, o software Eberick V9 já faz isto em seu módulo de incêndio por meio do uso do método tabular para as vigas e lajes e o analítico para os pilares.

O estudo realizado, dentro dos parâmetros delimitados, demonstrou que os métodos são equivalentes inicialmente. Assim, considerando-se que as normas são sempre conservadoras, os dois métodos caminham em favor da segurança estrutural.

Por fim, vale ressaltar que o estudo de estruturas em situação de incêndio ainda é novo no Brasil. A despeito da árdua luta de Institutos e Universidades específicas, o tema carece de publicações abundantes em nossa língua.

## Referências

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. *NBR 14432*: exigências de resistência ao fogo de elementos construtivos de edificações: procedimento. Rio de Janeiro: ABNT, 2001.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. *NBR 15200*: projeto de estruturas de concreto em situação de incêndio. Rio de Janeiro: ABNT, 2012.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. *NBR 5628*: componentes estruturais – determinação da resistência ao fogo. Rio de Janeiro: ABNT, 2001.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. *NBR 6118*: projeto de estruturas de concreto: procedimento. Rio de Janeiro: ABNT, 2014.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. *NBR 8681*: ações e segurança nas estruturas: procedimento. Rio de Janeiro: ABNT, 2003.

CAETANO, L. F. *Estudo das fases cristalinas de matrizes cimentícias sujeitas a variações térmicas através de difratometria*. Curitiba: Associação de Universidades do Grupo Montevideo, 2004.

CARVALHO, R. T. *et al. Manual Básico de Combate a Incêndio do CBMDF*. Brasília: Corpo de Bombeiros Militar do Distrito Federal, 2006.

COSTA, C. N.; SILVA, V. P. *Dimensionamento de estruturas de concreto armado em situação de incêndio*: métodos tabulares apresentados em normas internacionais. V Simpósio Epusp sobre estruturas de concreto. 2003.

DRYSDALE, D. *An introduction to fire dynamics*. England: Wiley, 2007.

EN 1992-1-1:2010. Eurocode 2. *Design of concrete structures*. Part 1-1: General rules and rules for buildings.

EN 1992-1-2:2010. Eurocode 2. *Design of concrete structures*. Part 1-2: General rules Structural fire design.

ISAIA, G. C. *Concreto: ensino, pesquisa e realizações*. São Paulo: IBRACON. 2005. v. 1.

JUNIOR, Valdenir de Souza. *Simulação computacional do comportamento de estruturas de aço sob incêndio*. Porto Alegre: Universidade Federal do Rio Grande do Sul – UFRGS, 2004.

MARCELLI, M. *Sinistros na construção civil: causas e soluções para danos e prejuízos em obras*. 1. ed. São Paulo: PINI, 2007.

METHA, P. K.; MONTEIRO, P. M. *Concreto: estrutura, propriedades e materiais*. São Paulo: PINI, 1994.

NEVILLE, A. M. *Propriedades do concreto*. São Paulo: PINI, 1997.

PURKISS, JOHN A. *Fire Safety Engineering Design of Structures*. 3. ed. CRC Press, 2013.

RODRIGUES, E. E. *A utilização do difratômetro de raios-x e do microscópio eletrônico de varredura na perícia de incêndios através da análise da degradação do concreto*. Brasília: Corpo de Bombeiros Militar do Distrito Federal, 2008.

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

WICKSTRÖM, U.; PÅLSSON, J. Scheme for Verification of Computer Codes for Calculating Temperature in Fire Exposed Structures, SP Swedish Testing and Research Institute, SP REPORT 1999:36, Boras 1999.