

Análise de estruturas de concreto armado em situação de incêndio**Analysis of reinforced concrete structures in a fire situation**

DOI:10.34117/bjdv6n8-473

Recebimento dos originais: 03/07/2020

Aceitação para publicação: 21/08/2020

Calvin Mariano Rêgo Crispim

Mestrando em Engenharia Elétrica pela Universidade de Brasília - UNB

Instituição: Centro Universitário de Brasília - UniCEUB

Endereço:707/907 - Campus Universitário, SEPN-Asa Norte, Brasília-DF, 70790-075

E-mail: calvin.mariano@gmail.com

Honório Assis Filho Crispim

Doutorado em Engenharia Elétrica pela Universidade de Brasília - UNB

Instituição: Centro Universitário de Brasília - UniCEUB

Endereço:707/907-Campus Universitário, SEPN - Asa Norte, Brasília-DF, 70790-075

E-mail: hcrispim@gmail.com

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 para uma compatibilidade entre os dois métodos, contudo estudos mais completos para toda a estrutura (lajes, vigas e pilares) são sugeridos para conclusões mais abrangentes. Contudo, 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 imperative. In Brazil, we have already had cases in which dozens of people were victimized both by the fire itself and by the effects of smoke and panic on the escape process. This study presents an initial view of two methods of verifying structural elements (tabular and simplified, both supported by norms). For this purpose, the Eberick V9 fire module was used to check the results of the tabular method. As for the simplified method, the formulations for obtaining the remarkable temperatures and the respective calculations of the resistant efforts were presented. The results pointed to a compatibility between the two methods, however more complete studies for the entire structure (slabs, beams and columns) are suggested for more comprehensive conclusions. However, the explanations contained in this study report are placed in such a way as to allow a clear, concise and accurate view of the application of specific verification methods in this area that is incipient in Brazil.

Keywords: fire, structure, simplified, tabular, Eberick

1 INTRODUÇÃO**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). Neste cenário, o incêndio prolongou-se por seis dias seguidos até que pudesse ser controlado¹.

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, através 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, este 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, o que se percebe é a utilização de materiais e compósitos que possuem alta inflamabilidade (usados notadamente em acabamentos e decorações). Tais materiais exigem atenção especial quanto ao uso dos mesmos na obra, notadamente quanto à qualidade e contribuição para alastramento ou retardo do fogo.

Além disto, o comportamento das pessoas acaba por influenciar diretamente nas 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).

¹ FERREIRA FH., O.A. **A moradia romana**. Portal Templodeapolo.net, Porto Alegre-RS. Disponível em <http://www.historia.templodeapolo.net>. Visitada em: 06/03/2016.

Assim, considerando o exposto, este estudo se fundamenta na necessidade de se dotar a estrutura de uma edificação das condições de segurança normativa. Dos 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.

O COMPORTAMENTO FÍSICO-QUÍMICO DO FOGO

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. Esta 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 desta classe deixa resíduos e tem como exemplos: tecidos, madeira, papel etc.

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

Temperaturas notáveis

Para o estudo do incêndio é necessário ter em mente 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. Desta forma, mesmo que se retire a chama, o fogo não se apagará, pois a temperatura faz gerar a partir do material combustível vapores ou gases inflamáveis suficientes para manter o fogo.

A Tabela 1 apresenta 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

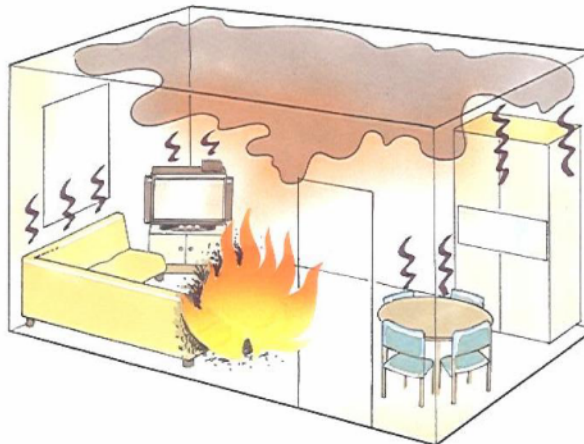
Fonte: (MARCELLI, 2007)

O DESENVOLVIMENTO DE UM INCÊNDIO

O estudo do desenvolvimento e a propagação de um incêndio não é algo simples. Contudo, tal complexidade pode ser minimizada através da divisão do mesmo 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. Desta 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. Neste contexto, percebe-se que o teto é um elemento importante no 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_2O), dióxido de carbono (CO_2), monóxido de carbono (CO) e outros gases. Os tipos dos demais gases estão diretamente relacionados com os 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 a 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*). Desta forma, toda a área fica envolvida pelas chamas, ver a 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. Desta 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 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 esta 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 nesta fase são altíssimas e poderão atingir valores iguais ou maiores a 1.100°C.

Em síntese, o *flashover* é mais freqüente 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 este 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 esta fase poderá surgir um fenômeno denominado de *rollover* (ou *flameover*), que se distingue do *flashover* porque implica somente na queima dos gases aquecidos do incêndio. Ao contrário, o *flashover* corresponde a 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.

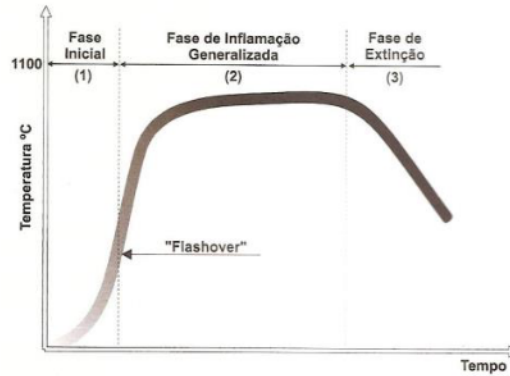
Os incêndios confinados têm os níveis mais altos de temperatura próximo ao teto e níveis mais baixos próximos ao solo. A temperatura nas áreas superiores pode chegar a mais de 700°C, o que permitirá uma rápida saída da fumaça realizando um grande furo no teto.

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.

Nesta 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.

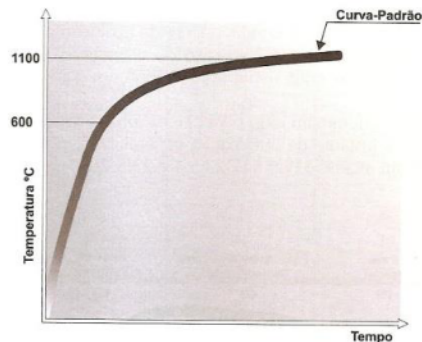
Figura 3: Evolução da temperatura num incêndio real.



Fonte: (MARCELLI, 2007).

Considerando 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 através 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 θ_g e θ_o são expressos em graus Celsius e representam respectivamente as temperaturas final e inicial.

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).

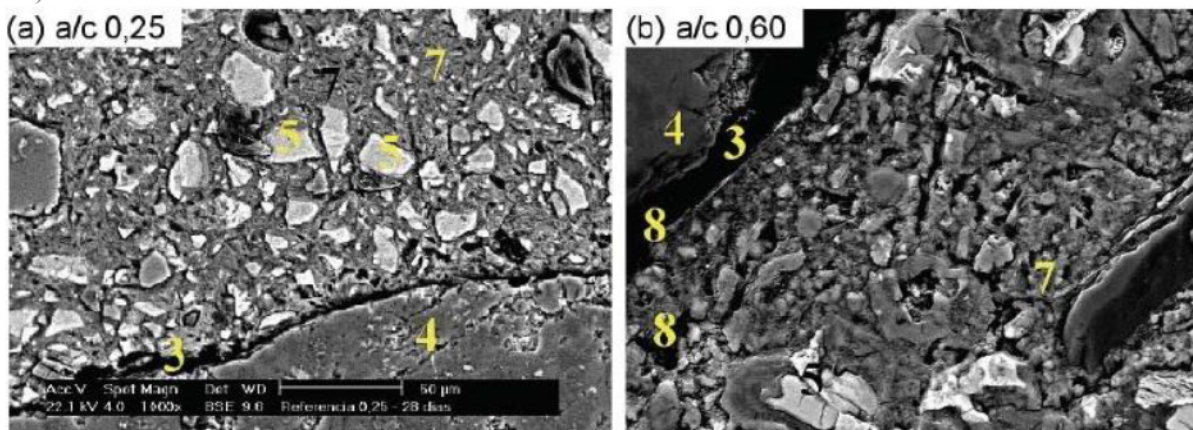
O cimento, por sua vez é composto por clínquer, gesso e adições (filler calcário, escória, pozolana etc). Estas definições básicas evidenciam que o concreto é um composto complexo e que seu estudo, quando submetido a altas temperaturas, é complexo na mesma proporção (ISAIA, 2005). A composição do concreto 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 o mesmo 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 μm). Esta é, geralmente, mais fraca que os demais componentes e, por isto, exerce uma 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 (CaO) e a periclase (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 da mesma. 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 destas 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. Estes 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).

A 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 um estudo sobre as características remanescentes do concreto (MARCELLI, 2007).

Além das modificações nos agregados graúdos e na zona de 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 através 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 os mesmos 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 CO₂ 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 CO₂, 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 também podem ser constatadas através do uso de Microscópio Eletrônico de Varredura e são tratadas em Rodrigues (2008).

COMPORTAMENTO DO AÇO NO INCÊNDIO

Segundo Valdenir (JUNIOR, 2004) o aço, submetido a altas temperaturas, sofre perda de resistência e rigidez. Além disto, 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. Neste 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).

COMPORTAMENTO DO CONCRETO E AÇO À LUZ DA ABNT NBR 15200:2012

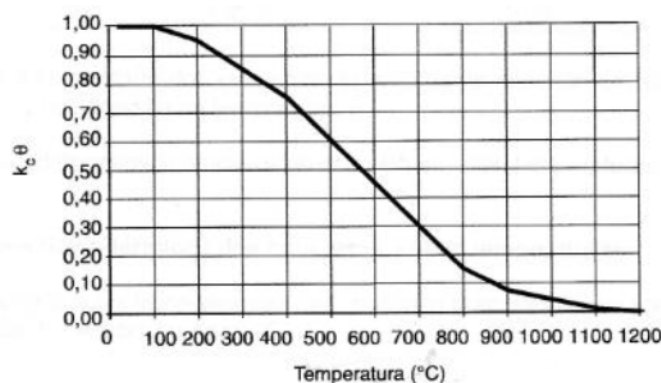
Concreto

O concreto sofre diminuição da resistência a compressão, numa relação $f_{c,\theta} = k_{c,\theta} f_{ck}$, sintetizada na

Figura 6. Onde:

- ✓ 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 θ , 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 silicoso 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). Veja abaixo:

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

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

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

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

Aço

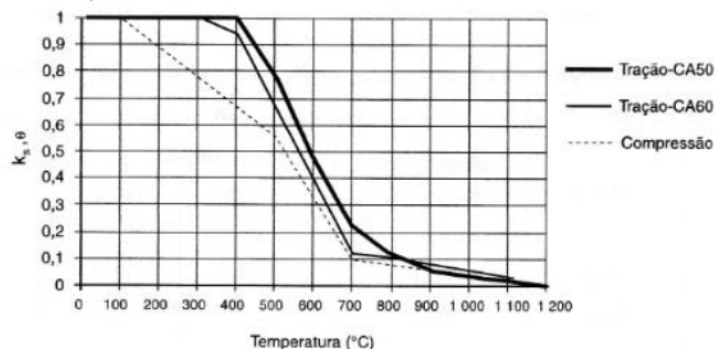
O aço sofre diminuição da resistência de escoamento da armadura passiva a altas temperaturas (item 6.2.1 da Norma). A Figura 7 sintetiza esta relação através da seguinte equação:

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

Onde:

- ✓ 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 θ , 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 $1200^{\circ}C$ é dada por interpolação para as faixas de temperatura, sendo $650 J/kg^{\circ}C$ para valor entre 900 e $1200^{\circ}C$.

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

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 uma 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 disto, a brigada deve treinar combates simulados e empregar os planos de forma frequente junto 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.

ACÇÕES E SEGURANÇA

Como é de senso comum, quando uma estrutura é submetida a altas temperaturas os materiais dos quais a mesma é constituída (aço, concreto, alumínio, vidro etc.) têm suas propriedades físicas alteradas. Consequentemente, estes efeitos devem ser levados em consideração 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 este relacionamento. Contudo, agora temos os esforço solicitante em situação de incêndio ($S_{d,fi}$) e os esforço resistente na mesma situação ($R_{d,fi}$).

DETERMINAÇÃO DOS ESFORÇOS SOLICITANTES

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

Assim, como exemplo, temos:

$$F_{d,fi} = \sum_{i=1}^m \gamma_{g,fi,i} F_{Gi,k} + \gamma_{q,fi} F_{Q,fi} + \gamma_{q,fi} \sum_{j=1}^n \psi_2 F_{Qj,k} \quad \text{Equação 3}$$

Onde:

$F_{d,fi}$	Valor de cálculo da ação na combinação excepcional
$F_{Gi,k}$	Valor característico da ação permanente i
$F_{Q,fi}$	Ação excepcional (valor característico da ação térmica)
$F_{Qj,k}$	Valor característico da ação variável j
$\gamma_{a,fi}$	Coefficiente de ponderação das ações permanentes em situação de incêndio, que pode ser obtido na Tabela 5.2 da Norma
$\gamma_{a,fi}$	Coefficiente de ponderação das ações variáveis em situação de incêndio, que pode ser obtido na Tabela 5.2 da Norma
ψ_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 incluem a análise de vento.

O emprego do Eberick V9² 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.) é obtido, a partir das combinações calculadas, a envoltória dos esforços Normais, Cortantes, Fletores e Torçores. Assim, este estudo utilizará como parâmetro os resultados obtidos a partir do software.

² O Eberick V9 é um software para projeto estrutural em concreto armado moldado *in loco* e concreto pré-moldado que engloba as etapas de lançamento, análise da estrutura, dimensionamento e o detalhamento final dos elementos. <http://www.altoqi.com.br/software/projeto-estrutural/eberick-v9>. Acessado em 29/02/2016 as 15:37

DETERMINAÇÃO DOS ESFORÇOS RESISTENTES

Tendo R_k como o esforço resistente do elemento estrutural, o mesmo é calculado levando-se em conta as 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 $f_{yd,\theta}$ temos:

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

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

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

MÉTODOS DE CÁLCULO E O TEMPO REQUERIDO DE RESISTÊNCIA AO FOGO – TRRF

Segundo Pignatta (SILVA, 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.

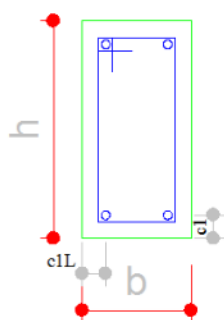
O TRRF é avaliado e por simplicidade trata-se de um valor que é função do risco de incêndio e de suas consequências. Desta forma, não se trata do tempo de duração do incêndio ou tempo resposta do Corpo de Bombeiros/Brigada de Incêndio. O TRRF é um tempo que pode ser calculado segundo a Teoria das Estruturas 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 junto 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.

Este 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 elemento 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 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,

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

Considerando a 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:

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

Equação 12

Para tal, x ou y estão sujeitos a:

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

Equação 13

Onde o valor de t é em horas, a profundidade x e y em metros, a largura máxima b em metros. Esta 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.

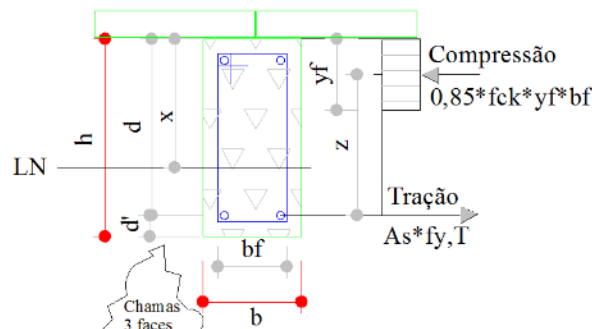
Para o cálculo do momento resistente da viga a uma dada temperatura, será usado um modelo simplificado permitido pela EN 1992-1-2, que corresponde a redução da seção de concreto a 500°C. Este método parte do pressuposto que todo concreto periférico a uma temperatura maior ou igual a 500°C perde suas 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 resistentes em situação de incêndio.

Tomando como base a figura abaixo, vale ressaltar que a resistência à tração do aço empregado na armadura passiva é calculada a partir da 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, obtido na 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 do mesmo. Neste 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:

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

Desta forma, o momento resistente na situação de incêndio é dado, pelo método simplificado, por:

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

2 METODOLOGIA ADOTADA

Este estudo está tomando 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 estes dois métodos, será utilizado o modelo estrutural empregado no tutorial do Eberick V9. Este modelo aborda todas as idiosincrasias das prescrições normativas descritas nas normas ABNT NBR 15200:2012 e ABNT NBR 14432:2001.

Desta forma, foram selecionadas arbitrariamente as Vigas V_{xx} e V_{yyy} (biapoiada e continua respectivamente). Estas vigas serão submetidos ao TRRF de 30 90 120 180 minutos e os valores providos pela verificação do software Eberick V9 serão comparados com os 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 a Tabela 2 e a Tabela 3, que identificam respectivamente as temperaturas obtidas pelos modelos para um incêndio padrão e os valores apresentados por Wickström.

Tabela 2 :Temperaturas obtidas através 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)

Espessura em cm (nx)	Duração 30 min	Duração 60 min	Duração 90 min	Duração 120 min	Duração 180 min	Duração 240 min
	$\Delta\theta$ em °C	$\Delta\theta$ em °C	$\Delta\theta$ em °C	$\Delta\theta$ em °C	$\Delta\theta$ em °C	$\Delta\theta$ 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. Neste caso, presume-se a contribuição do reboco como uma camada de sacrifício,

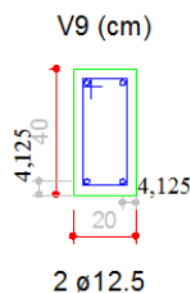
que será perdida em caso de incêndio severo e contribuirá para a segurança da estrutura. Vale ressaltar que a ABNT NBR 15200:2012 permite tal aproveitamento sob condições bem definidas.

3 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.

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/m³
 Vincunlação: contínua
 Ascalc = 2.37 cm² (2ø12.5 – Asefe 2.45 cm²).
 Seção (20x40) cm



Cálculo do Eberick V9

Para c_1 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.

Pela ABNT NBR 15200:2012, pode-se diminuir c_1 de Δc_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:

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

Desta forma, temos:

$$\Delta c_1 = 24.5 - 35 * \frac{2479,56}{3520,47} * \frac{2.37}{2.45} \quad \text{Contudo, a relação máxima para os esforços é } 0,7. \text{ Assim, temos } \Delta c_1 \text{ } 0,85 \text{ mm}$$

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

Considerando 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_{11} , pela norma, soma-se 10 mm. Desta forma, $c_{11} = 21,15$ mm.

Como para c_1 e c_{11} temos 41.25 mm, a viga foi aprovada.

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 $K_{fi} = 1$, segundo a Tabela 2 da ABNT NBR 15200:2012

$$fy := 5000 \frac{kgf}{cm^2} \text{ tensão de escoamento do aço CA50}$$

$$fyT := fy \text{ Tem-se o mesmo valor, pois } k_{fi}=1$$

$$Asef := 2,45 \text{ cm}^2$$

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

$bf := 20 - 2 * 2,1$ valor = 17,6 cm, que corresponde ao desconto da região do concreto que perdeu a resistência a 500 °C

$$yf := \frac{Asef * fyT}{0,85 * fck * bf} \text{ valor} = 3,275 \text{ cm}$$

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

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

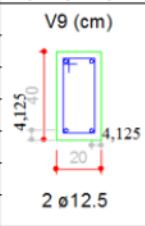
Brazilian Journal of Development

$M_{ri} := A_{sef} * f_{yT} * z * 10^{-2}$ valor = 4194 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, levando-se em consideração 4 valores distintos de TRRF.

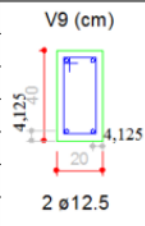
Tabela 4: Resultados para V9

V9 - Contínua	TRRF							
	30 min		60 min		90 min		120 min	
c1 e c1l atuais 41,25 (mm)	Eberick V9	Simplificado	Eberick V9	Simplificado	Eberick V9	Simplificado	Eberick V9	Simplificado
 <p>V9 (cm)</p>	c1 e c1l necessários 11,55 e 21,15 respectivamente	Mri = 4194 Mdi = 2479,56 ambos em kgf.m	c1 e c1l necessários 4,45 e 14,45 respectivamente	Mri = 3115 e Mdi = 2479,56 ambos em kgf.m	c1 e c1l necessários 43,69 e 53,69 respectivamente	Mri = 1579 e Mdi = 2479,56 ambos em kgf.m	c1 e c1l necessários 66,55 e 75,55 respectivamente	Mri = 818,747 e Mdi = 2479,56 ambos em 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 - biapoiada	TRRF							
	30 min		60 min		90 min		120 min	
c1 e c1l atuais 41,25 (mm)	Eberick V9	Simplificado	Eberick V9	Simplificado	Eberick V9	Simplificado	Eberick V9	Simplificado
 <p>V3 (cm)</p>	c1 e c1l necessários 13,73 e 23,73 respectivamente	Mri = 4194 Mdi = 4197,93 ambos em kgf.m	c1 e c1l necessários 33,73 e 43,73 respectivamente	Mri = 3115 e Mdi = 4197,93 ambos em kgf.m	c1 e c1l necessários 56,23 e 66,23 respectivamente	Mri = 1579 e Mdi = 4197,93 ambos em kgf.m	c1 e c1l necessários 0 e 0. bw passa para 19 cm	Mri = 818,747 e Mdi = 4197,93 ambos em kgf.m
Resultado	Aprovada	Aprovada	Reprovada	Reprovada	Reprovada	Reprovada	Reprovada	Reprovada

Fonte: o autor

4 CONCLUSÃO

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 biapoiada. Neste caso específico, os dois métodos apresentaram resultados semelhantes no diz respeito a passar ou não na verificação contra incêndio.

Deve ficar claro que este estudo é um *insight* no que diz respeito ao cálculo de estruturas em situação de incêndio. Conseqüentemente, um estudo mais completo deve ser realizado a *posteriori*. Apesar do 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 da aplicação do mesmo. 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 usando o 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 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. Apesar 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, 2001.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 15200**: Projeto de Estruturas de Concreto em Situação de Incêndio. Rio de Janeiro, 2012.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 5628**: Componentes Construtivos estruturais – Determinação da Resistência ao Fogo. Rio de Janeiro, 2001.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 6118**: Projeto de Estruturas de Concreto – Procedimento. Rio de Janeiro, 2014.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 8681**: Ações e Segurança nas Estruturas - Procedimento. Rio de Janeiro, 2003.
- CAETANO, L. F. **Estudo das fases cristalinas de matrizes cimentícias sujeitas a variações térmicas através de difratometria**. Associação de Universidades do Grupo Montevideo, Curitiba, 2004.
- CARVALHO et al., R. T.. **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 (Vol. D)**. São Paulo: IBRACON. 2005.
- JUNIOR, VALDENIR DE SOUZA. **Simulação computacional do comportamento de estruturas de aço sob incêndio**. Universidade Federal do Rio Grande do Sul – UFRGS. Porto Alegre: 2004.
- MARCELLI, M.. **Sinistros na construção civil: causas e soluções para danos e prejuízos em obras (1º 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**. Third Edition, 3rd Edition. 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. AND 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, Borås 1999.