

Coefficientes estruturais de tempo mínimo requeridos dos elementos construtivos quando sujeitos a incêndio em estruturas metálicas

Required minimum structural coefficients of constructive elements when subjected to fire in metallic structures

Coefficientes estructurales de tiempo mínimo requerido de elementos constructivos sometidos a incendio en estructuras metálicas

Recebido: 22/11/2022 | Revisado: 18/12/2022 | Aceitado: 20/12/2022 | Publicado: 23/12/2022

Jardel Santos Lima

ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-0183-3704>
Centro Universitário Santo Agostinho, Brasil
E-mail: jardelsl@outlook.com

Ismara Machado dos Santos Lima

ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-0768-8173>
Centro Universitário Santo Agostinho, Brasil
E-mail: ismaramachado4@gmail.com

Diego Silva Ferreira

ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-2556-354X>
Centro Universitário Santo Agostinho, Brasil
E-mail: diegof.engenheiro@gmail.com

Resumo

O objetivo do estudo são os coeficientes de resistência de estruturas metálicas em situação de incêndio. Estes estão em tudo que podemos imaginar, desde o simples caminhar para o trabalho de todos os dias à incrível e sistemática produção de maquinários pesados para a indústria. Existem vários fatores para determinar as baixas e altas de se atrasar ou chegar cedo no trabalho, ou a falência ou lucros de empresas. Em fatores de segurança também estão inseridos, mas em formato de proporção e, conforme a variabilidade de um determinado corpo de estudo, será possível definir se o mesmo terá aumento ou diminuição em seu grau segurança e precisão do teórico para o real. Em estruturas metálicas, o metal tem uma grande desvantagem quando se tem como agressor altas temperaturas. Materiais metálicos têm uma boa densidade, mas essa mesma densidade, por se tratar de material metálico, sofre com um aumento de vibração elevado das partículas internas, fazendo com que o material metálico perca coesão e comece a sentir deformações plásticas naturais e grosso modo se torne “mole”. O perfil metálico tem uma baixa resistência à compressão e, se a peça ainda tiver esbelteza elevada, terá essa fragilidade no mínimo duplicada, tendo frágil resistência à flexão por influência da esbelteza. Os coeficientes serão tratados como preenchimentos para preencher os furos causados pela deficiência de resistência do componente metálico, podendo ser retratados tanto como aumento da seção transversal do elemento metálico quanto com estrutura de apoio como proteção dos materiais contra o incêndio.

Palavras-chave: Aço; Fogo; Coeficiente.

Abstract

The objective of the study is the resistance coefficients in metallic structures in fire situation. The coefficients are in everything we can imagine, from the simple walk to work every day to the incredible and systematic production of heavy machinery for the industry. There are several factors that determine the lows and highs of being late or early to work, or the bankruptcy or profits of companies. Safety factors are also included, but in proportion format and, according to the variability of a given body of study, it will be possible to define whether it will have an increase or decrease in its degree of safety and precision from theoretical to real. In metallic structures, the metal itself has a great disadvantage when it has high temperatures as an aggressor. Metallic materials have a good density, but this same density, as it is a metallic material, suffers from an increase in the high vibration of the internal particles, causing the metallic material to lose cohesion and begin to feel natural plastic deformations and, roughly speaking, become "soft". The metallic profile has a low compressive strength and, if the part still has high slenderness, it will have this fragility at least doubled, having fragile flexural strength due to the influence of slenderness. The coefficients will be treated as fillers to fill the holes caused by the resistance deficiency of the metallic component and can be portrayed either as an increase in the cross section of the metallic element or as a support structure as protection of materials against fire.

Keywords: Steel; Fire; Coefficient.

Resumen

El objetivo del estudio son los coeficientes de resistencia en estructuras metálicas en situación de incendio. Los coeficientes están en todo lo que podamos imaginar, desde el simple caminar al trabajo todos los días hasta la increíble y sistemática producción de maquinaria pesada para la industria. Hay varios factores que determinan los altibajos de llegar tarde o temprano al trabajo, o la quiebra o las ganancias de las empresas. También se incluyen factores de seguridad, pero en formato de proporción y, de acuerdo a la variabilidad de un determinado cuerpo de estudio, se podrá definir si tendrá un aumento o disminución en su grado de seguridad y precisión de teórico a real. En las estructuras metálicas, el propio metal tiene una gran desventaja cuando tiene como agresor las altas temperaturas. Los materiales metálicos tienen una buena densidad, pero esta misma densidad, al ser un material metálico, sufre un aumento en la alta vibración de las partículas internas, haciendo que el material metálico pierda cohesión y comience a sentir deformaciones plásticas naturales y, en términos generales, se vuelven "suaves". El perfil metálico tiene una baja resistencia a la compresión y, si la pieza sigue teniendo una gran esbeltez, tendrá esta fragilidad al menos duplicada, teniendo una frágil resistencia a la flexión por influencia de la esbeltez. Los coeficientes serán tratados como rellenos para rellenar los huecos producidos por la deficiencia de resistencia del componente metálico, pudiendo representarse tanto como un aumento de la sección transversal del elemento metálico como como estructura soporte como protección de los materiales frente al fuego.

Palabras clave: Acero; Fuego; Coeficiente.

1. Introdução

Até recentemente, o desenvolvimento de medidas de prevenção e proteção a incêndios em edificações ocorreram em resposta aos desastres verificados anteriormente. Nas últimas décadas, inúmeros recursos foram empregados no desenvolvimento de pesquisas em segurança contra incêndios, para que encontrassem soluções viáveis e eficientes que reduzissem a incidência de novos incêndios, diminuísse os prejuízos estruturais e ambientais, além de atenuar os danos e acidentes com humanos. Buscou-se também flexibilizar as prescrições normativas para dimensionamento de edificações, que atualmente ainda leva a projetos pouco econômicos e inflexíveis (Dias, 2002).

Um bom redimensionamento de estrutura permite que os esforços solicitantes resistam o suficiente para que não haja a ruína total da estrutura no tempo estimado para o incêndio. O fogo desde seu descobrimento vem sendo um dos principais pilares do desenvolvimento humano e, com todas as tecnologias atuais, temos a impressão de que o domamos, mas não é bem assim. Uma vez ou outra pequenos descuidos podem se tornar grandes desastres e é nesse ponto no qual residem as preocupações, pois o descuido de um pode causar a ruína de muitos, custando a vida de inúmeros inocentes. É nessa ruína que deve ser trabalhada, procurando estimar os coeficientes para que a estrutura possa suportar o suficiente para evitar maiores prejuízos (Silva, 2004). Para evitar os estragos que o fogo pode causar, evitar o tão famoso "*flashover*", jargão utilizado para denominar o aumento brusco da temperatura do incêndio, temos os coeficientes de resistência ao fogo, que pode ser o simples aumento ou diminuição (em alguns casos) da seção transversal do material, a escolha do tipo de material ou aditivos, que pode ser obtido com cálculos simples de majoração virtual e estimativas (Costa, 2017).

O desenvolvimento de modelos numéricos para o estudo do comportamento de estruturas em situação de incêndio é uma das ferramentas desse trabalho. A importância de temperatura crítica, na qual as estruturas de aço devem ser protegidas, limitando o aço a chegar em elevadas temperaturas. Hoje em dia os modelos analíticos, numéricos e experimentais estão a cada vez mais sofisticados, permitindo um melhor estudo, conhecimento e entendimento do comportamento estrutural e dos componentes construtivos em situação de incêndio. Podem ser utilizados tanto em aproximação prescritiva, quanto em base em desempenho em cálculos avançados para o conhecimento e estudo dos perfis metálicos (Maximiano, 2018).

O fogo é um elemento que beneficia a humanidade desde o início dos tempos, possui um alto poder destrutivo e, mesmo com soluções corretivas, que é no caso de sistemas de segurança de incêndio (detectores de calor ou fumaça, chuveiros automáticos, extintores, hidrantes, sistemas de iluminação de emergência, sistemas de controle e exaustão de fumaça), a falta de dimensionamento da estrutura para a ocorrência de incêndio pode levar o prédio inteiro à ruína. Hoje em dia todos os materiais por leis devem já vir prevenidos contra esses riscos de incêndio, como por exemplo cabos elétricos devem vir com materiais não

combustíveis, o próprio plástico protetor do cabo deve vir com o componente de extinguir o fogo, assim como quadros de distribuição de energia, dutos de passagem de gás etc. (Abnt, 2003).

Com tudo isso devemos sempre equilibrar as condições financeiras e a segurança e, se for preciso priorizar alguma, escolher sempre a segurança. Contudo, todo o calculista sempre é chamado de exagerado ao dimensionar qualquer estrutura, pois toda a responsabilidade está sobre ele, com o cálculo do dimensionamento estrutural for considerado acidentes como o incêndio a estrutura será ainda mais dimensionada (Gonçalves, 2012).

Ao dimensionar uma estrutura metálica, se tem uma enorme preocupação com os futuros acidentes que podem ocorrer. O próprio cálculo estrutural já é complicado de se fazer, e mais difícil ainda é estimar o aumento repentino da temperatura do local com as enormes variabilidades de situações e ocasiões que podem ocorrer em determinados tipos de obras e cômodos da edificação, já que terão um comportamento diferente, com o aumento gradativo da temperatura (Abnt, 2013).

Neste sentido, o objetivo desse estudo é determinar os coeficientes estruturais de combate ao incêndio em estruturas metálicas. Buscou-se métodos matemáticos e computacionais para assim facilitar a determinação destes em edifícios comerciais, pois na maioria dos casos esses valores são simplesmente estimados, por experiência ou não, podendo assim prejudicar a trabalhabilidade de distribuição de cargas da estrutura, ou elevando o custo desnecessário da obra.

2. Metodologia

A pesquisa bibliográfica desenvolvida foi de tipo explicativa, qualitativa e descritiva (Gil, 2002). A pesquisa qualitativa pode ser definida como um estudo não estatístico, que identifica e analisa em profundidade dados de difícil mensuração de determinado grupo de indivíduos em relação a um problema específico. Entre eles são fornecidas informações sobre um problema ou ajuda para desenvolver ideias ou hipóteses. Nesse sentido, essa pesquisa tem como intuito fazer uma descrição através de estudos de casos para determinar os coeficientes estruturais de combate a incêndio em estruturas metálicas. Conforme Selltiz *et al.* (1987) e Trivinos (1987), a presente pesquisa, levando-se em conta o objetivo principal do trabalho, se caracteriza como explicativa e descritiva. Descritiva por se conduzir de forma a apresentar os dados exatamente da forma em que se encontram e explicativa a partir do momento em que se pretende procurar conectar as ideias para compreender causas e efeitos, buscando melhores soluções para que sejam minimizados os problemas causados pela ausência desses coeficientes estruturais.

A pesquisa qualitativa considera que há uma relação dinâmica entre o mundo real e o sujeito, isto é, um vínculo indissociável entre o mundo objetivo e a subjetividade do sujeito que não pode ser traduzido em números. A interpretação dos fenômenos e a atribuição de significados são básicas no processo de pesquisa qualitativa, pois não requer o uso de métodos e técnicas estatísticas. O ambiente natural é a fonte direta para a coleta de dados e o pesquisador é o instrumento-chave. Já na pesquisa descritiva, os pesquisadores tendem a analisar seus dados indutivamente. O processo e seu significado são os focos principais de abordagem.

Para alcançar o objetivo deste estudo, utilizou-se a pesquisa bibliográfica de fonte secundária como método. Para Cervo e Bervian (2002, p.65, 89), a pesquisa bibliográfica é desenvolvida a partir de materiais já elaborados, constituído principalmente por livros e artigos científicos, além de textos divulgados por meios magnéticos e eletrônicos, procurando explicar um problema a partir de referenciais teóricas publicadas, tendo a intenção de recolher os conhecimentos acerca de um problema, constituindo-se no processo básico para os estudos monográficos. O estudo foi realizado através da busca pelos artigos nessa revisão. Dentre esse montante, somente 21 artigos foram selecionados, os quais enfatizaram a importância dos coeficientes estruturais de combate ao incêndio em estruturas metálicas. A análise das informações foi realizada por meio de leitura exploratória do material encontrado, em uma abordagem qualitativa.

O desenvolvimento de modelos numéricos para o estudo do comportamento de estrutura em situação de incêndio é uma das ferramentas desse trabalho, considerando a importância da temperatura crítica, da qual as estruturas de aço devem ser

protegidas, limitando o aço a alcançar elevadas temperaturas. Hoje em dia os modelos analíticos, numéricos e experimentais estão cada vez mais sofisticados e permitem um melhor estudo, conhecimento e entendimento do comportamento estrutural e dos componentes construtivos em situação de incêndio. Podem ser utilizados tanto em aproximação prescritiva quanto em base, em desempenho e em cálculos avançados para o conhecimento e estudo dos perfis metálicos (Maximiano, 2018).

Neste sentido, o objetivo desse estudo é determinar os coeficientes estruturais de combate ao incêndio em estruturas metálicas, buscando métodos matemáticos e computacionais, para assim facilitar a determinação deles em edifícios comerciais, pois na maioria dos casos esses valores são simplesmente estimados, por experiência ou não, podendo assim prejudicar a trabalhabilidade de distribuição de cargas da estrutura, ou elevando o custo desnecessário da obra.

3. Resultados e Discussão

3.1 Estrutura Metálica

Desde a antiguidade o aço já era conhecido, só não era usado com grande porte por motivo do preço e da dificuldade, que era a forja do mesmo. Somente em 1856 foi inventado o forno que permitiu a produção do aço em larga escala. Em 1864, os irmãos Martin desenvolveram um outro tipo de forno de maior capacidade e, desde então, o aço rapidamente substituiu o ferro fundido e o forjado na indústria da construção. O primeiro material siderúrgico empregado na construção foi o ferro fundido. Entre 1780 e 1820 construíram-se pontes em arco ou treliçadas, com elementos em ferro fundido trabalhando em compressão (Bellei, 1998).

A primeira ponte construída em ferro fundido foi a de *Coalbrookdale*, sobre o rio *Severn* na Inglaterra, que é uma ponte do tipo em arco com vão de incríveis 30 metros, construído em 1779. Já no Brasil, a ponte sobre o rio Paraíba do Sul, no estado do Rio de Janeiro, foi inaugurada em 1857. Os vãos de 30 metros são vencidos por arcos atarantados, sendo os arcos constituídos de peças de ferro fundido montadas por encaixe e o tirante em ferro forjado. Foram também construídos o Edifício Garagem América em 1957, o Edifício Avenida Central em 1961 e o Edifício CSN em 1966, todos no Rio de Janeiro (Queiroz & Pimenta, 2001)

No final do último século, a posição de liderança na construção de edifícios altos foi assumida por Nova York, não somente na quantidade de edifícios que estavam sendo construídos, mas também em recordes de altura e de grau de desenvolvimento e qualidade arquitetônico. Foi em 1913 que foi construída a *Woolworth Tower*, com 234 metros de altura, 55 andares, considerado o edifício mais alto do mundo até 1930. Já em 1929 foi construído o *Chrysler Building* com 320 metros de altura e 75 andares, e em 1931 o *Empire State* com 380 metros de altura e 102 andares, que durante os 40 anos que se seguiram não encontrou rival no mundo, mas desde esse tempo se buscam tecnologias para se construir prédios maiores com (Kimura, 2009).

As vantagens do uso de estruturas metálicas nas obras são muitas, mas se destaca a alta resistência do material nos diversos estados de tensão, se traduzindo em tração, compressão, flexão, torção e outros efeitos. Outra vantagem do uso de estruturas metálicas é que os elementos em aço oferecem uma grande margem de segurança na execução do trabalho e dimensionamento. Se tem um controle tecnológico mais aprimorado por seguir regras severas de qualidade e há a possibilidade de desmontar as estruturas e posteriormente montá-las em outro local. Também podem ser reaproveitados os materiais que ficarem em estoque, ou mesmo as sobras de obra (Fratz, 2011).

Os pórticos transversais são importantes para suprir as ações transversais da estrutura, transferindo-as para as fundações. Apresentam-se como coberturas em vigas-tesoura compostas por perfis tipo “I” ou treliçados, como tesouras por exemplo. Existem dois tipos, que são de alma cheia ou treliçados, e sua seção é constante ou também pode ser variável. As barras rígidas suprimem os esforços à compressão e normalmente são formadas por cantoneiras simples, cantoneiras duplas ou com perfil laminado do tipo I. Essa barra faz o travamento do banzo superior (Azevedo, 2009).

Para se fazer a escolha do' arranjo estrutural correto de uma edificação, devem ser considerados vários aspectos construtivos da estrutura em um contexto geral e específico de cada elemento construtivo. Por exemplo, deve ser analisada a distância necessária entre pórticos em função da utilização da edificação, além de seus vãos e esforços específicos que cada elemento construtivo irá receber. Deve-se atender os aspectos economia e segurança, para que não se estime demais a estrutura de forma exagerada, além de estipular sempre a balança econômica e a segurança para que esta fique equilibrada, mas tendendo sempre para o lado da segurança e para o consumo de aço que será necessário. (Chaves, 2007).

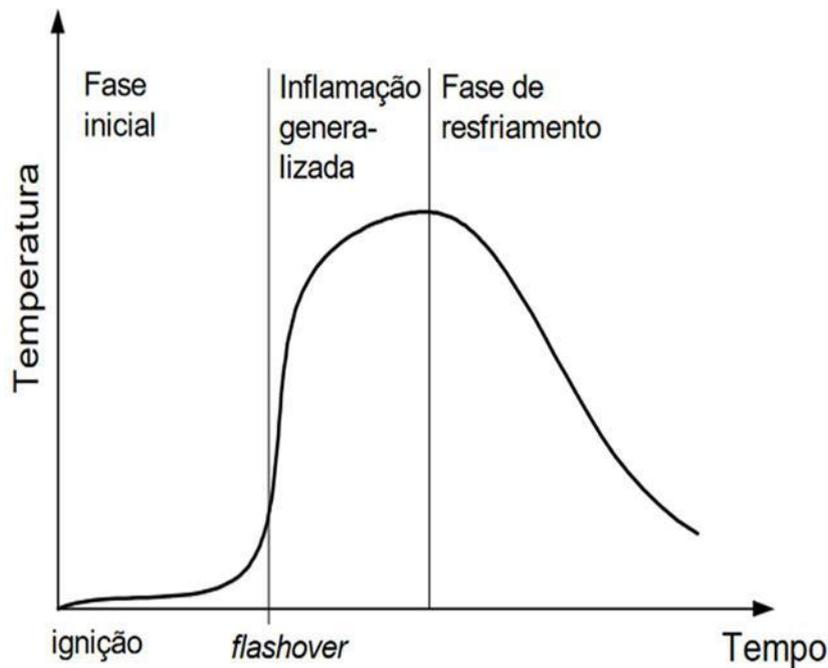
Dos tipos de estruturas, temos também os pórticos do tipo em arco, que é um arco treliçado em muitos casos. O arco atirantado pode ser muito econômico, contanto que carregamentos no sentido vertical na direção da gravidade sejam predominantes. Em casos de inversão de carregamento, o arco pode se fechar e o tirante não terá mais nenhuma finalidade. Seu detalhamento geral de estrutura se trata de uma cobertura em formato de arco sustentada por pilares, os quais vão se encontrar no gênero, que resistirá aos esforços normais, cisalhantes e refletos. Normalmente seus banzos são paralelos e sua fabricação é muito trabalhosa, pois é necessário que sejam feitas formas específicas, o que aumenta o tempo de execução (Ribeiro, 2004).

3.2 Resistência ao fogo

Quando tratamos de estruturas em situação de incêndio, o projeto de se torna mais complexo em comparação ao projeto em temperatura ambiente. Quando seus elementos e componentes são submetidos a elevadas temperaturas, além da perda de resistência mecânica, há uma série de efeitos que também não estão presentes em temperatura ambiente, tais como a acentuação das não-linearidades geométricas do material e a alteração das condições do contorno do sistema da estrutura, que podem influenciar em pioras imediatas ou a longo prazo da estrutura, também como erros de prumadas, irregularizações do projeto executado diferente do planejado e muitos outros (Pierin, 2011).

O desenvolvimento de um incêndio pode ser representado por três etapas. A fase inicial é a ignição, o início do incêndio, sendo está por um curto-circuito ou acidente inflamável. A segunda etapa é a inflamação generalizada (*flashover*), quando o incêndio está tomando uma proporção quase descontrolada, na qual o aumento de temperatura se eleva exponencialmente. Por fim há a fase de esfriamento, quando quase não se tem mais combustível para queimar e aos poucos o incêndio começa a apagar.

Figura 1 - Desenvolvimento de um incêndio em um compartimento.



Fonte: Elaborado pelos autores (2022).

Para que se tenha uma proteção melhor na edificação ou parte dela, no intuito de evitar a combustão das chamas, cada pavimento deve ter ventilação permanente em duas ou mais fachadas externas, provida por aberturas que possam ser consideradas uniformemente distribuídas e que tenham comprimentos em planta que somados atinjam pelo menos 40% do perímetro e áreas que somadas correspondam a pelo menos 20% da superfície total das fachadas externas; ou tenha ventilação permanente em duas ou mais fachadas externas, provida por aberturas cujas áreas somadas correspondam a pelo menos 1/3 da superfície total das fachadas externas, e pelo menos 50% destas áreas abertas situadas em duas fachadas opostas (Abnt, 2000).

Na falta de um espectro de carga que defina a frequência de repetição de cada nível de carga, permitindo a aplicação da regra de Palmgren-Miner, a verificação da fadiga pode ser feita para um único nível de carga. Esse nível de carga é definido pela carga frequente de fadiga à qual corresponde um certo número de ciclos de carga. A combinação frequente de fadiga é o número de repetições dessa condição de carregamento, N , ao longo da vida útil, que pode causar a ruptura por fadiga. Com o aumento da temperatura, a resistência do metal diminui exponencialmente inversa, sendo que o cume dessa curva seria a ruptura (Abnt, 2012).

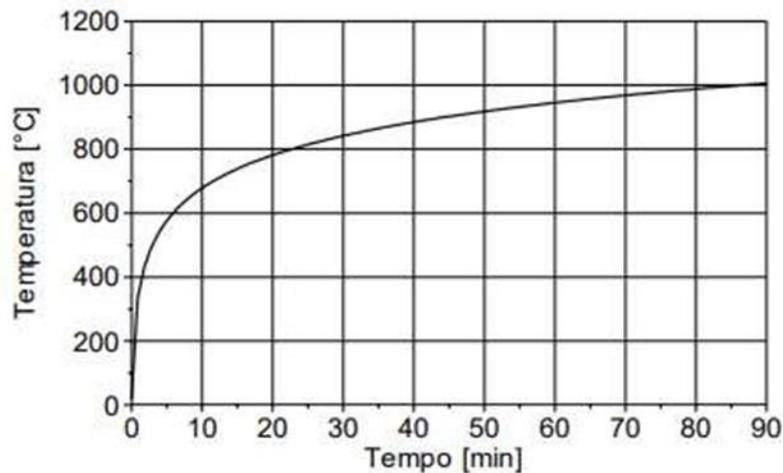
O comportamento da coluna, como composta global, depende da flexibilidade devido à flexão causada pela excentricidade de desaprumo, ou não uniformidade das cargas no mesmo e também ao cisalhamento Normal, causado pela carga que o pilar tem a resistir e a deformabilidade das ligações. O efeito das deformações cisalhantes mostra a distorção de uma seção originalmente reta na flambagem de uma coluna múltipla. Com a presença da alta temperatura, essa resistência ao esforço normal é ainda mais prejudicada, pelo fato de o aço perder sua consistência, se deslocando das ligações e prejudicando ainda mais a resistência à flexão, levando a estrutura à ruína (Dias, 2002).

A Flambagem é um dos estudos mais preocupantes do calculista, se não o mais preocupante, ainda mais quando o pilar tem um vão muito grande. Com isso, deve ser feito um estudo muito específico para os diferentes compartimentos da estrutura, pois cada local terá um esforço, excentricidade e reação à alta temperatura diferente. Dessa maneira, as tabelas de TRRF com os diferentes tipos de cômodos, tipos de obras e peculiaridades do tipo de obra ajudarão no dimensionamento e redimensionamento da estrutura, que sofrerá com o aumento leve, mediano e bruto de temperatura (Abnt, 2003).

3.3 Coeficientes de Resistência

Na curva padrão “Temperatura-fogo”, é definido o programa térmico a ser adotado no ensaio, na qual já podemos perceber um dos coeficientes de resistência ao fogo ao subtrair onde o objeto chegou à ruína da temperatura inicial. Dessa maneira, poderemos definir a temperatura de determinado objeto a ser estudado utilizando como teoria de ensaio a temperatura final da estrutura subtraída da temperatura ambiente, na qual a temperatura ambiente deve estar de acordo com cada região, pois conforme regiões obteremos comportamentos de incêndio diferentes, sendo uns mais agressivos que outros (Abnt, 2001).

Figura 2 - Curva de incêndio padrão.



Fonte: Elaborado pelos autores (2022).

Sendo o gás a principal característica do incêndio, a curva do aumento de temperatura em função do tempo é como uma montanha. No *flashover* o crescimento é exponencial e, ao chegar na metade do crescimento, o aumento segue uma função de raiz até chegar no cume. Em seguida desce com concavidade para baixo, mudando a concavidade para baixo no meio da descida até a temperatura se igualar à inicial anterior ao incêndio. A partir dessa curva é possível calcular a máxima temperatura atingida pelas peças estruturais e, portanto, sua correspondente resistência a altas temperaturas, sendo essa a evolução da temperatura dos gases em incêndio (Martins, 2000).

Dentre os coeficientes, tem como impactos nas estruturas tanto nos estados de limite último quanto nos estados limites de serviços, sendo preciso dois tipos de coeficientes para a mesma situação de incêndio e estrutura, sendo que para cada etapa do incêndio teremos tipos de deformações e esforços causados nas estruturas e ligamentos, até que, de acordo com o tempo de incêndio decorrente, o coeficiente possa perder índice de impacto na estrutura. Com o aumento de tempo de estrago, podem se tornar plásticos os efeitos causados na estrutura e, dentre os estados limites de serviço, deve-se ter uma estimativa de quando ainda é seguro adentrar no edifício, tanto para socorro quanto para correções (Abnt, 2003).

As condições de segurança de uma estrutura podem ser resumidas ao esforço solicitante de cálculo, estando este em situação de incêndio a partir de combinações feitas em estudos numéricos e utilizada a pior situação existente, sendo maior que o esforço de resistente de cálculo de um elemento. Explanando, é como fazer o estudo da resistência de uma corrente, sendo a resistência da combinação de esforços sofrida na corrente maior do que o esforço maior que um elo da corrente poderá suportar, porém considerando o estado limite último e o de serviço para obtenção de um coeficiente mais seguro de acordo com a variabilidade da estrutura (Ribeiro, 2004).

Sendo a flambagem um dos esforços mais prejudiciais para a estrutura metálica, por se tratar de um material menos resistente à compressão, deve-se determinar um enorme fator de segurança para combate à flambagem local e global na estrutura

em situação de incêndio, ou utilizar suportes estruturais resistentes ao fogo, como suportes estruturais de concreto, madeira adequada, aumento da seção de perfil, ou preenchimento dos vazamentos do perfil. A madeira não é tão frágil ao fogo assim quanto se imagina, pois a mesma quando tem sua superfície queimada cria uma camada de carvão ininflamável, que protege o restante da madeira e garante certa resistência. (Costa, 2017).

Tirantes têm seu melhor aproveitamento de resistência por serem totalmente tração. Com isso, seu coeficiente de proteção ao incêndio se torna melhor e apresenta mais soluções, sendo que também muito desses tirantes podem ser protendidos, e com a combinação de tirantes eles mesmos podem ser o apoio de resistência a incêndio. Se a distribuição dos esforços não for possível, pode ser proteger a superfície do tirante com uma superfície de plástico que quando queimada se torna ininflamável, tornando assim sua superfície protegida até o próprio incêndio se extinguir conforme a temperatura ou combates corretivos (Abnt, 2012).

Em situações de incêndios de grandes proporções em pequenos tempos de incêndio, teremos uma fadiga imensa pela agitação e desagregação extrema dos ligamentos metálicos, tendo sido estudado em artigos passados que, em suma, pela plasticidade e/ou cisalhamento extremo de componentes metálicos necessitam de estudos à parte de seus componentes em locais diferentes da estrutura, pois a ruína nem sempre vem do local específico do aumento brusco de temperatura (Regobello, 2007).

As análises serão obtidas pelo estudo da variabilidade de cada segmento metálico, conforme as fórmulas padronizadas de cálculo para determinação dos módulos de resistência dos esforços fundamentais, sendo eles axial, cisalhante, fletor e torço, sendo os resultados das resistências da estrutura inseridos à perda de resistência por reação do aumento de temperatura. Essas perdas de resistência serão abordadas desde o *flashover* ao pico do incêndio, contando também com a estagnação e extinção do incêndio (Pannoni, 2004).

3.4 Comportamento Estrutural

Como exemplo teremos um galpão comum com coeficiente C_e , sendo os coeficientes de pressão externa são gerados a partir das características geométricas da edificação e, para ventos a 0° e 90° , respectivamente, coeficientes C_{pi} . De acordo com as características da edificação serão consideradas as seguintes hipóteses de abertura e consequentes valores de C_{pi} : quatro faces igualmente permeáveis, $C_{pi} = -0,3$ ou $C_{pi} = 0$; duas faces igualmente permeáveis e outras duas impermeáveis vento a 0° $C_{pi} = -0,3$ ou 0 , vento a 90° $C_{pi} = -0,3$ ou $0,2$ (Dias, 2002).

Sendo submetido a diferentes condições de incêndio, o aumento de temperatura no ambiente é caracterizado pela curva tempo-temperatura padronizada (ISO 834-1, 1999). Adota-se a combinação de carregamentos externos recomendada pela AISC-LRFD (2005), na qual se prevê a consideração de cargas nodais fictícias N e são previstos dois cenários básicos de incêndios compartimentados. Para cada cenário, a hipótese da inflamação generalizada (*flashover*) ocorre, simultaneamente, em dois pavimentos consecutivos, ou inicia no pavimento inferior, propagando-se em tempo mínimo estimado (Silva, 2004).

Os elementos finitos foram escolhidos de forma a representar satisfatoriamente o comportamento dos elementos estruturais na análise térmica, procurando concomitantemente limitar a complexidade do problema, de forma que a análise possa ser concluída dentro do prazo e padrões de qualidade esperados. Na análise dos pilares e vigas de aço, bem como da mesa de concreto que forma a viga mista, foi utilizado o elemento sólido SOLID70, de forma a bem representar o comportamento dos elementos estruturais. O elemento finito possui a capacidade de condução nas três dimensões. Cada elemento SOLID70 possui oito nós, com um grau de liberdade cada associado à temperatura (Gonçalves, 2012).

O cálculo do tempo requerido de resistência ao fogo é essencial nesta fase do projeto, pois corresponde ao tempo fictício que a edificação deve suportar a carga térmica, de acordo com a curva de incêndio padrão dada pela ISO 834. O cálculo desta é base para a análise térmica dos elementos. Por se tratar de uma edificação de três pavimentos com área total igual a aproximadamente $1750m^2$, o galpão comercial em questão não está isento da análise, e o tempo requerido de resistência ao fogo

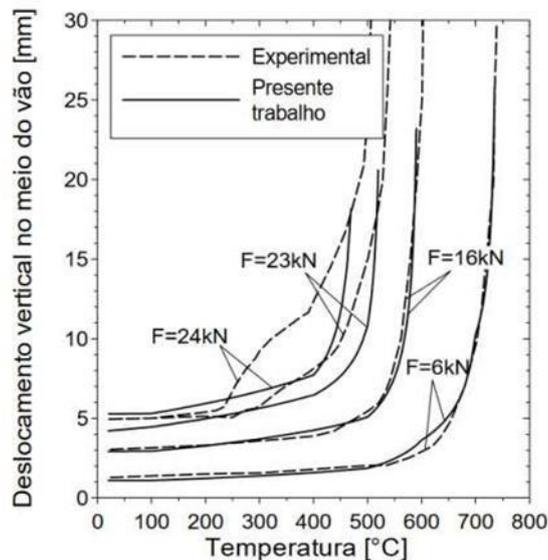
exigido da estrutura é dado pela tabela A.1 da ABNT NBR 14432:2001 (Abnt, 2001).

Com a finalidade de simular o incêndio, é adicionado um nó extra ao modelo, que tem o papel de gerar o aumento de temperatura do sistema. Este aumento de temperatura segue um padrão comumente utilizado para edificações urbanas, já que o incêndio é proposto pela ISO 834. Segundo esta norma internacional, a temperatura média dos gases no incêndio pode ser calculada através da equação a seguir $\theta_g = 345 * \log_{10}(8t + 1) + 20$, sendo que, na equação, a temperatura é dada em graus Celsius e o tempo 60 em segundos. A equação, fornecida ao pacote computacional em forma de *Array*, pode ser plotada para fins de melhor visualização da curva em questão. O tempo final da análise é aquele encontrado através da TRRF (item anterior), de 60 minutos (Maximiano, 2018).

Dentre esses coeficientes, podemos inserir um valor de constante para cada elemento estrutural na ferramenta de cálculo (TQS, FToll etc). Esses valores irão automaticamente baixar a resistência dos metais de acordo com as recomendações do fabricante do mesmo, obtendo-se assim seus coeficientes individuais, sendo que para cada elemento estrutural deve se obedecer às recomendações de cada fabricante, pois somente estes têm as ferramentas necessárias para a execução desses testes. Sobre os móveis e outros de cada pavimento, a norma do corpo de bombeiro TRRF informa o valor adotado para cada ocasião (Ribeiro, 2004).

Em um experimento hipotético temos um exemplo de um pórtico Vogel, onde foi feito um experimento matemático, com estrutura metálica com seção transversal IPE 80 de comprimento inicial de 1140mm, e os valores adotados de cargas foram 24, 23, 16 e 6 kN, representando 85, 70, 50 e 20% de carga necessárias para formar rótulas plásticas na temperatura ambiente. A tensão de escoamento do material é 399MPa a 20°C, exceto para 24 kN, que é 352 na mesma temperatura, sendo o modulo de elasticidade 210Gpa, com taxa de aquecimento a 5,33 °C/min, revelando o deslocamento vertical no meio do vão.

Figura 3 – Resultado de experimento.



Fonte: Elaborado pelos autores (2022).

4. Considerações Finais

Considerando o problema inicial, os objetivos eram os coeficientes estruturais de tempo mínimo requerido dos elementos construtivos quando sujeito à incêndio em estruturas metálicas, tendo estes sido alcançados. Com o exemplo teórico em um pórtico Vogel, obtivemos os resultados: com cargas com 85% necessárias para o comprometimento plástico da peça, a 450°C a peça se encontra em ruínas; com 70% necessárias para o comprometimento plástico da peça, a 475°C a peça se encontra

em ruínas; com 50% necessárias para o comprometimento plástico da peça, a 550°C a peça se encontra em ruínas; e com 20% necessárias para o comprometimento plástico da peça, a 650°C a peça se encontra em ruínas.

Tendo em conta a curva de incêndio padrão máxima de 1000°C, temos que o próprio metal não pode resistir sozinho ao incêndio, sendo necessários materiais de revestimento ou mecanismos que não permita altas elevações de temperatura em caso de incêndio. Tendo com função principal de cálculo da curva da tensão de deformação do aço $\varepsilon = \sigma + 0,01 \cdot (\sigma - \sigma_0)$, e tendo que A B com 85% se precisa de 450°C para a ruína, deve-se procurar meios de vedações do aço que insiram um coeficiente de proteção contra incêndio no mínimo de 2,5 de resistência de tensão do aço.

Referências

- ABNT. (2013) NBR 14323:2013. Dimensionamento de estruturas de aço de edifícios em situação de incêndio – Procedimento. Rio de Janeiro: Associação Brasileira De Normas Técnicas. ABNT.
- ABNT. (2000). NBR 14432:2000. NBR 14432:2000. Exigências de resistência ao fogo de elementos construtivos de edificações – Procedimento. Rio de Janeiro: Associação Brasileira De Normas Técnicas. ABNT.
- ABNT. (2001). NBR 5628:2001. NBR 5628:2001. Componentes construtivos estruturais –determinação da resistência ao fogo. Rio de Janeiro: Associação Brasileira De Normas Técnicas. ABNT.
- ABNT. (2012) NBR 6355:2012. Perfis Estruturais de Aço Formados a Frio - Padronização. Rio de Janeiro: Associação Brasileira De Normas Técnicas. ABNT.
- ABNT. (2003) NBR 8681:2003. Ações e segurança nas estruturas. Rio de Janeiro: Associação Brasileira De Normas Técnicas. ABNT.
- ABNT. (2008). NBR 8800:2008. Projeto de estruturas de aço e de estruturas mistas de aço e concreto de edifícios. Rio de Janeiro: Associação Brasileira De Normas Técnicas. ABNT.
- Azevedo, M. S. (2009). *Segurança das estruturas de aço externas a edificações em situação de incêndio, sem revestimento contrafogo*, Tese (Doutorado). Escola Politécnica da Universidade de São Paulo.
- Bellei, I. H. (2010). *Edifícios industriais projeto e cálculo em aço*. Copyright Editora Pini Ltda.
- Brasil. (2011) Decreto-lei no 56.819, de 10 de março de 2011. Lex: coletânea de legislação: edição estadual, São Paulo.
- Chaves, M. R. (2007) *Avaliação do desempenho de soluções estruturais para galpões industriais leves*. Ouro Preto: Minas Gerais.
- Costa, C. N. (2017). *Procedimento para redução do tempo requerido de resistência ao fogo de edifícios de múltiplos andares*. São Paulo.
- Dias, L. A. M. (1997) *Estruturas de aço conceito, técnicas e linguagem*. Editora Zigurate, São Paulo.
- Fratz, J. L. (2011) *Dimensionamento de Pavilhão Industrial com Estrutura em Aço*. Santa Cruz do Sul, Rio Grande do Sul.
- Gonsalves, B. R. (2012). *Análise termoestrutural de um edifício em estrutura de aço em situação de incêndio*. São Paulo.
- Guanabara, M. K. (2010). *Dimensionamento de estruturas metálicas: Rotina computacional para seleção de perfis metálicos*. Porto Alegre: Rio Grande do Sul.
- Kimura, E. F. A (2009). *Análise termoestrutural de pilares de aço em situação de incêndio*. São Carlos. Dissertação (Mestrado) – Escola de engenharia de São Carlos – Universidade de São Paulo.
- Leal, L. N. (1999). *MP fiscaliza com autonomia total*. Jornal do Brasil, 3.
- Martins, M. M. (2000). *Dimensionamento de estruturas de aço em Situação de Incêndio*. Minas Gerais.
- Maximiniano, D. P. (2004). *Análise Numérica Avançada de Estruturas de Aço e de Concreto Armado em Situação de Incêndio*. Ouro Preto, 2018. Pannoni, F. D. Princípios da proteção de estruturas metálicas em situação de corrosão e incêndio. São Paulo. Gerdau Açominas.
- Pfeil, W., & Pfeil, M. (2016) *Estruturas de aço: dimensionamento prático. Diagrama Ação*, 1, (8), 6-65.
- Pierin, I. (2011) *A instabilidade de perfis formados a frio em situação de incêndio*. São Paulo.
- Queiroz G., & Pimenta R. J. (2001) *Elementos das Estruturas Mistas Aço-Concreto*. Editora O Lutador: Belo Horizonte.
- Regobello, R (2007). *Análise numérica de seções transversais e de elementos estruturais de aço e mistos de aço e concreto em situação de incêndio*. São Carlos. Dissertação (Mestrado) – Escola de engenharia de São Carlos – Universidade de São Paulo.
- Ribeiro, J. C. (2004) *Simulação via método dos elementos finitos da distribuição tridimensional de temperatura em estruturas em situação de incêndio*, Dissertação (Mestrado). Universidade Federal de Minas Gerais.
- Silva, V. P. (2004) *Estruturas de aço em situação de incêndio*. Editora Zigurate.
- Souza, V. J. (2004) *Simulação computacional do Comportamento de estruturas de aço Sob incêndio*, Tese (Doutorado). Universidade Federal do Rio Grande do Sul.