# UNIVERSIDADE FEDERAL DO ESPÍRITO SANTO CENTRO TECNOLÓGICO PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA CIVIL

CARLITO BOTAZINI BARCELOS FILHO

## ESTUDO TÉRMICO DE PILARES MISTOS DE AÇO E CONCRETO DE SEÇÃO TUBULAR CIRCULAR EM SITUAÇÃO DE INCÊNDIO

Vitória

2018

# UNIVERSIDADE FEDERAL DO ESPÍRITO SANTO CENTRO TECNOLÓGICO PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA CIVIL

**CARLITO BOTAZINI BARCELOS FILHO** 

## ESTUDO TÉRMICO DE PILARES MISTOS DE AÇO E CONCRETO DE SEÇÃO TUBULAR CIRCULAR EM SITUAÇÃO DE INCÊNDIO

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil da Universidade Federal do Espírito Santo como requisito parcial para a obtenção do grau de Mestre em Engenharia Civil.

Orientador: Professor Dr. Macksuel Soares de Azevedo

Vitória 2018

Dados Internacionais de Catalogação-na-publicação (CIP) (Biblioteca Setorial Tecnológica, Universidade Federal do Espírito Santo, ES, Brasil)

Barcelos Filho, Carlito Botazini, 1993-

B242e Estudo térmico de pilares mistos de aço e concreto de seção tubular circular em situação de incêndio / Carlito Botazini Barcelos Filho. – 2018.

99 f. : il.

Orientador: Macksuel Soares de Azevedo. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) – Universidade Federal do Espírito Santo, Centro Tecnológico.

1. Colunas. 2. Pilares. 3. Incêndios. 4. Análise numérica. 5. Método dos elementos finitos. I. Azevedo, Macksuel Soares de. II. Universidade Federal do Espírito Santo. Centro Tecnológico. III. Título.

CDU: 624

### UNIVERSIDADE FEDERAL DO ESPÍRITO SANTO

## ESTUDO TÉRMICO DE PILARES MISTOS DE AÇO E CONCRETO DE SEÇÃO TUBULAR CIRCULAR EM SITUAÇÃO DE INCÊNDIO

#### Carlito Botazini Barcelos Filho

Dissertação apresentada ao Curso de Mestrado em Engenharia Civil do Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil da Universidade Federal do Espírito Santo, como requisito parcial para obtenção do título de Mestre em Engenharia Civil, área de Estruturas.

Aprovada no dia 30 de julho de 2018 por:

Professor Dr. Macksuel Soares de Azevedo

Doutor em Engenharia de Estruturas Orientador - UFES

Professor Dr. Walnório Graça Ferreira Doutor em Engenharia Civil Examinador Interno - UFES

IuM Professor Dr. Valdir Pignatta e Silva

Doutor em Engenharia Civil Examinador Externo – USP-SP Por meio de vídeo conferência

Vitória - ES, julho de 2018

#### AGRADECIMENTOS

Primeiramente, agradeço a Deus por sua imensa bondade.

Ao Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico, CNPQ, e à Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoa de Nível Superior, CAPES, pela bolsa concedida para a realização desta pesquisa.

Ao professor Macksuel Soares de Azevedo pela confiança e pelos conhecimentos transmitidos na orientação deste trabalho.

Ao Programa de Pós-graduação em Engenharia Civil, PPGEC, pela estrutura disponibilizada e pela oportunidade.

Ao amigo André Vasconcelos, pelo auxílio nas rotinas de programação do programa ANSYS e a todos os amigos de pós-graduação, pelas experiências e pelos conhecimentos adquiridos.

Aos meus pais, a minha irmã por todo apoio durante esse período.

Por fim, agradeço aos demais familiares e amigos que me apoiaram.

#### **RESUMO**

Os pilares mistos de aço e concreto possuem algumas qualidades pela combinação das propriedades físicas e mecânicas dos dois materiais, e uma das vantagens do uso desse elemento estrutural é a resistência ao fogo, quando comparado a sistemas estruturais somente de aço ou de concreto. O desempenho de um pilar misto de aço e concreto em situação de incêndio é influenciado por vários parâmetros, como: dimensões, esbeltez, rigidez, carregamento, propriedades dos materiais e a interação do elemento com a estrutura envolvente. Em particular sobre as propriedades do aço e do concreto, essas estão diretamente relacionadas à temperatura na qual os materiais são submetidos, visto que com a elevação de temperatura suas propriedades são diminuídas. Esta pesquisa tem como objetivo a análise numérica, via método dos elementos finitos utilizando o programa computacional ANSYS 17.0, da elevação de temperatura em pilares mistos de aço de seção tubular circular preenchidos com concreto de densidade normal, quando submetidos ao incêndio. Os resultados mostram que as elevações de temperaturas no aço e no concreto dependem de parâmetros como o volume de concreto e o volume de aço, visto que os materiais possuem propriedades térmicas bem distintas. O sistema misto para pilares mostrou-se eficaz na diminuição da temperatura do elemento estrutural quando comparado a pilares de aço.

Palavras-chave: pilares mistos; incêndio; elevação de temperatura; análise numérica; método dos elementos finitos.

#### ABSTRACT

Composite columns made of steel and concrete have some qualities by combining the physical and mechanical properties of the two materials. One of the advantages of using this structural element is the fire resistance when compared to steel or concrete only columns. The performance of composite columns of steel and concrete in a fire situation is influenced by some parameters such as: dimensions; slenderness; stiffness; loading; material properties and the interaction of the element with the surrounding structure. In particular about the properties of steel and concrete, they are related to the temperature that each material are submitted, because the elevation of temperature causes a decrease of properties. The objective of this research was the numerical analysis, via the finite element method using the ANSYS 17.0, the elevation of temperature in steel columns of hollow section filled with concrete of normal density, when submitted to the fire. The results show that the elevation of temperature in steel and concrete and steel, since the materials have different thermal properties. The composite columns system proved effective in decreasing the temperature of the structural element when compared to tubular steel columns.

Keywords: composite columns; fire; elevation of temperature; numerical analysis; finite element method.

## LISTA DE SÍMBOLOS

- *A* Área da seção atravessada pelo calor;
- *c* Calor específico do material;
- $c_a$  Calor específico do aço;
- $c_p$  Calor específico do concreto de densidade normal;
- $\frac{d\theta}{dx}$  Gradiente de temperatura;
- *E* Módulo de elasticidade do aço;
- $E_s$  Módulo de elasticidade do aço de armadura;
- $E_{s,\theta}$  Módulo de elasticidade do aço de armadura a uma temperatura  $\theta$ ;
- $E_{\theta}$  Módulo de elasticidade do aço a uma temperatura  $\theta$ ;
- $f_{ck}$  Resistência característica à compressão do concreto;
- $f_{c,\theta}$  Resistência característica à compressão do concreto a uma temperatura  $\theta$ ;
- $f_y$  Resistência ao escoamento do aço;
- $f_{vs}$  Resistência ao escoamento do aço de armadura;
- $f_{ys,\theta}$  Resistência ao escoamento do aço de armadura a uma temperatura  $\theta$ ;
- $f_{y,\theta}$  Resistência ao escoamento do aço a uma temperatura  $\theta$ ;
- $k_{s,\theta}$  Fator de redução da resistência ao escoamento do aço de armadura na temperatura  $\theta$ ;
- $k_{Es,\theta}$  Fator de redução do módulo de elasticidade do aço de armadura na temperatura  $\theta$ ;
- $k_{y,\theta}$  Fator de redução da resistência ao escoamento do aço a uma temperatura  $\theta$ ;
- $k_{E,\theta}$  Fator de redução do módulo de elasticidade do aço a uma temperatura  $\theta$ ;
- $k_{\sigma,\theta}$  Fator de redução da resistência ao escoamento do aço das seções sujeitas à flambagem local a uma temperatura  $\theta$ ;
- $k_{c,\theta}$  Fator de redução resistência característica à compressão do concreto a uma temperatura  $\theta$ ;

- $l_a$  Comprimento da peça de aço;
- $l_c$  Comprimento da peça do concreto;
- $L_{e,fi}$  Comprimento de flambagem dos pilares para situação de incêndio;
- $N_{fi,Rd}$  Força resistente de cálculo dos pilares mistos em situação de incêndio;
- $N_{fi,Sd}$  Força solicitante de cálculo dos pilares mistos em situação de incêndio;
- $Q_c$  Fluxo de calor por convecção;
- $Q_k$  Fluxo de calor por condução;
- $Q_r$  Fluxo de calor por radiação;
- $R_{fi,d}$  Esforço resistente de cálculo correspondente do elemento estrutural para o estadolimite último, em situação de incêndio;
- $S_{fi,d}$  Esforço solicitante de cálculo em situação de incêndio, obtido a partir das combinações de ações;
- t Tempo;
- $\alpha_c$  Coeficiente de transferência de calor por convecção;
- $\Delta l_a$  Expansão térmica do elemento de aço;
- $\Delta l_c$  Expansão térmica do elemento de concreto;
- $\varepsilon$  Emissividade resultante de duas superfícies;
- $\varepsilon_e$  Emissividade da superfície radiante;
- $\varepsilon_r$  Emissividade da superfície receptora;
- $\theta_0$  Temperatura ambiente;
- $\theta_e$  Temperatura da superfície radiante;
- $\theta_q$  Temperatura dos gases;
- $\theta_r$  Temperatura da superfície receptora;
- $\theta_a$  Temperatura do aço;
- $\theta_c$  Temperatura do concreto;
- $\lambda$  Condutividade térmica do material;

- $\lambda_a$  Condutividade térmica do aço;
- $\lambda_c$  Condutividade térmica do concreto;
- $\rho$  Massa específica do material;
- $\rho_0$  Densidade do concreto a temperatura ambiente;
- $\rho_a$  Massa específica do aço;
- $\rho_c$  Densidade do concreto a uma temperatura  $\theta$ ;
- $\sigma$  Constante de Stefan-Boltzmann;
- $\phi$  Fator de configuração.

## SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	12
	1.1 CONTEXTUALIZAÇÃO E JUSTIFICATIVA	12
	1.2 OBJETIVOS	13
	1.3 ESTRUTURA DA DISSERTAÇÃO	14
2	REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	15
	2.1 CARACTERIZAÇÃO DO INCÊNDIO	15
	2.1.1 CONCEITOS GERAIS SOBRE INCÊNDIO	15
	2.1.2 EVOLUÇÃO DO INCÊNDIO	16
	2.1.3 TIPOS DE INCÊNDIO	17
	2.2 MECANISMOS DE TRANFERÊNCIA DE CALOR	19
	2.3 DIMENSIONAMENTO DE PILARES MISTOS EM SITUAÇÃO DE INCÊNDIO	26
	2.3.1 PROPRIEDADES DOS MATERIAIS	26
	2.3.2 CONSIDERAÇÕES GERAIS DO DIMENSIONAMENTO	35
3	ESTADO DA ARTE	38
	3.1 PESQUISAS EXPERIMENTAIS	38
	3.2 PESQUISAS NUMÉRICAS	45
4	MODELO NUMÉRICO	51
	4.1 ANÁLISE TÉRMICA	51
	4.2 ELEMENTOS FINITOS	52
	4.3 CONSIDERAÇÕES SOBRE O MODELO	53
5	VALIDAÇÃO DO MODELO NUMÉRICO	56
	5.1 MODELO EXPERIMENTAL DE REFERÊNCIA	56
	5.1.1 DESCRIÇÃO DOS ENSAIOS	56
	5.2 PROGRAMA COMPUTACIONAL ATERM	59
	5.3 RESULTADOS DA VALIDAÇÃO	60

	5.3.1	VALIDAÇÃO COM MODELO EXPERIMENTAL	50
	5.3.2	VALIDAÇÃO COM MODELO NUMÉRICO	66
6	ESTU	JDO PARAMÉTRICO	68
	6.1 IN	FLUÊNCIA DO VOLUME DE CONCRETO	58
	6.2 IN	FLUÊNCIA DO VOLUME DE AÇO	70
	6.3 CC	MPARAÇÃO COM PILAR TUBULAR DE AÇO	71
7	CON	CLUSÕES	73
F	REFERÊ	NCIAS BIBLIOGRÁFICAS	75
R A	REFERÊ MEXO A	NCIAS BIBLIOGRÁFICAS	75 79
R A	REFERÊ MEXO 4 ANEXO	NCIAS BIBLIOGRÁFICAS	<b>75</b> 79 79
R A	REFERÊ ANEXO A ANEXO ANEXO	NCIAS BIBLIOGRÁFICAS	<b>75</b> <b>79</b> 79 81
R	REFERÊ ANEXO 4 ANEXO ANEXO ANEXO	NCIAS BIBLIOGRÁFICAS	<b>75</b> <b>79</b> 81 83
R A A	REFERÊ ANEXO A ANEXO ANEXO ANEXO ANEXO	NCIAS BIBLIOGRÁFICAS	75 79 81 83 87

### 1 INTRODUÇÃO

## 1.1 CONTEXTUALIZAÇÃO E JUSTIFICATIVA

O comportamento de pilares mistos de aço e concreto em situação de incêndio é muito importante para a capacidade portante de uma edificação. Pesquisas referentes a essas estruturas em situação de incêndio vêm aumentando de forma significativa no cenário mundial. O aumento gradativo de temperatura provoca alterações nas propriedades mecânicas dos materiais, causando redução de resistência e módulo de elasticidade dos elementos estruturais, podendo ocorrer um colapso prematuro.

Santos (2009) afirma que os elementos estruturais de concreto possuem bom comportamento quando expostos a elevadas temperaturas, em razão da baixa condutividade térmica desse material associada ao fato desses elementos possuírem seções transversais com dimensões consideráveis. Essas características permitem admitir uma taxa reduzida de aquecimento e, consequentemente, uma redução menos acentuada na resistência e módulo de elasticidade do material. No entanto, a tendência da expulsão da água existente no concreto, associado ao comportamento desigual de cada um dos componentes do concreto quando aquecidos, provoca o fenômeno denominado *spalling* (lascamento da superfície do elemento), ocorrendo redução da seção transversal, bem como a exposição das armaduras ao fogo.

Ainda de acordo com Santos (2009), se comparado ao concreto, o aço possui elevada condutividade térmica e elementos com seções transversais mais esbeltas, provocando maior taxa de aquecimento e, consequentemente, uma redução mais acentuada na resistência e no módulo de elasticidade do material. Porém, quando os elementos estruturais de aço são utilizados com revestimento contra fogo (argamassa projetada, mantas, tintas intumescentes etc.) eles melhoram seu comportamento quando submetidos a elevadas temperaturas.

Santos (2009) conclui que a associação dos materiais aço e concreto na forma de pilares mistos, garante à estrutura um maior tempo de exposição às ações térmicas, comparado aos mesmos elementos constituídos desses mesmos materiais utilizados separadamente. Quanto ao elemento de aço do pilar misto, o concreto absorve o calor fazendo com que a elevação de temperatura nesse material ocorra de forma menos intensa.

Segundo Costa (2005), pilares mistos de aço e concreto preenchidos mantêm sua capacidade de carga por um logo período de exposição ao incêndio, inclusive quando comparados aos pilares mistos totalmente ou parcialmente revestidos por concreto. Os pilares mistos preenchidos quando são submetidos à ação térmica, reduzem ou mesmo evitam o fenômeno chamado *spalling*, devido ao confinamento imposto pelo tubo de aço.

Nos últimos anos, o uso de estruturas mistas e em particular o uso de pilares mistos preenchidos se tornou mundialmente popular em edifícios altos e construções industriais por se mostrar uma boa solução para situações de incêndio. A escolha por esse tipo de pilar também é justificado pela estética, rápida construção e alta capacidade portante à temperatura ambiente e em situação de incêndio.

O dimensionamento à temperatura ambiente dos pilares mistos de aço e concreto é regido pela ABNT NBR 8800:2008. A norma brasileira que trata do dimensionamento de pilares mistos de aço e concreto em situação de incêndio é a ABNT NBR 14323:2013.

No Brasil, apesar do crescimento do uso de estruturas mistas de aço e concreto, ainda são poucas as pesquisas sobre o comportamento de pilares mistos de aço e concreto em situação de incêndio. As incertezas sobre o comportamento podem levar a colapsos prematuros, ocasionando danos e acidentes.

Visto que o dimensionamento adequado desse elemento estrutural é realizado de acordo com as propriedades que os materiais possuem em altas temperaturas e que essas propriedades são reduzidas ao passo que a temperatura aumenta, este trabalho aborda um estudo térmico de pilares mistos de aço e concreto preenchidos de seção circular em situação de incêndio por meio do desenvolvimento de análise numérica, via método dos elementos finitos utilizando o programa computacional ANSYS 17.0.

#### **1.2 OBJETIVOS**

O objetivo geral desta dissertação é realizar análise térmica de pilares mistos de aço e concreto de seção tubular circular preenchidos em situação de incêndio, ou seja, verificar a evolução da temperatura no elemento estrutural quando esse é submetido a uma carga térmica.

Os objetivos específicos são:

Revisão bibliográfica dos principais estudos sobre o comportamento de pilares mistos preenchidos de seção circular em situação de incêndio.

Propor modelo numérico via método dos elementos finitos, a fim de verificar a evolução térmica dos pilares mistos quando submetidos ao incêndio.

Avaliar a influência dos parâmetros volume de aço e volume de concreto na evolução da temperatura.

Comparar os resultados numéricos para pilares mistos com os resultados numérico e analítico para pilares de aço, sendo o último obtido a partir da formulação da ABNT NBR 14323:2013.

### 1.3 ESTRUTURA DA DISSERTAÇÃO

O capítulo 1 contextualiza o trabalho proposto, assim como apresenta a justificativa e os objetivos do estudo térmico de pilares mistos preenchidos de seção circular em situação de incêndio.

No capítulo 2 são abordados conceitos importantes para o estudo, como a caracterização do incêndio, mecanismos de transferência de calor, fator de massividade e ainda serão descritos os métodos analíticos para dimensionamento de pilares mistos de seção circular em situação de incêndio segundo a ABNT NBR 14323:2013.

O capítulo 3 mostra o estado da arte, onde são apresentadas as principais pesquisas realizadas em âmbito nacional e internacional sobre o tema.

No capítulo 4 é detalhado o experimento utilizado para a elaboração do modelo numérico e no capítulo 5, descrevem-se os procedimentos desenvolvidos no programa computacional até a validação do modelo numérico obtido.

O capítulo 6 apresenta os principais resultados obtidos no estudo, detalhando a análise numérica realizada. Os resultados obtidos pela análise numérica são comparados aos resultados analíticos obtidos, para pilares de aço, pela norma brasileira de referência, a ABNT NBR 14323:2013. As conclusões, as considerações finais e demais observações do trabalho são apresentadas no capítulo 7.

Por fim são apresentadas as referências bibliográficas utilizadas para a realização do trabalho, sendo essas: normas, pesquisas nacionais e internacionais, teses, dissertações e livros.

## 2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

## 2.1 CARACTERIZAÇÃO DO INCÊNDIO

Para o estudo da evolução térmica dos pilares mistos de aço e concreto preenchidos é importante apresentar os conceitos gerais sobre incêndio e o seu desenvolvimento, bem como as características do incêndio-padrão e do incêndio natural.

#### 2.1.1 CONCEITOS GERAIS SOBRE INCÊNDIO

Cada incêndio é único, pois a evolução da temperatura no tempo dependente de vários fatores que se inter-relacionam e são característicos de um determinado ambiente. Segundo Vargas e Silva (2003), os principais fatores que influenciam na severidade de um incêndio em uma edificação são: a quantidade, o tipo e o posicionamento da carga de incêndio; as características físicas do edifício, que definem a compartimentação dos ambientes e o risco de incêndio; as condições de ventilação do ambiente; as propriedades térmicas dos materiais que constituem a estrutura e o sistema de segurança contra incêndio.

A combustão é caracterizada por uma reação de oxidação, com emissão de calor e luz. Para que a combustão ocorra, devem coexistir três elementos, sendo eles: o combustível (material oxidável), o comburente (material oxidante) e a fonte de ignição (calor).

Esses três elementos constituem o chamado triângulo do fogo, conforme mostra a Figura 2.1.

O combustível pode ser sólido, liquido ou gasoso, e ao reagir com o comburente, geralmente o gás oxigênio que está presente na atmosfera, formam uma mistura altamente inflamável, onde uma fonte de calor é capaz de iniciar um incêndio. As fontes de ignição podem ser, por exemplo, uma chama, uma superfície aquecida ou uma fagulha. Para encerrar um incêndio é necessário eliminar um dos três elementos, assim impedindo a reação em cadeia.



#### 2.1.2 EVOLUÇÃO DO INCÊNDIO

Segundo Silva et al. (2010), a evolução de um incêndio se dá em três fases bem distintas, a fase inicial de elevação progressiva da temperatura, a fase de aquecimento brusco e por fim, a fase de resfriamento e extinção, conforme demonstra a curva temperatura versus tempo de um incêndio real apresentada na Figura 2.2.

Figura 2.2 – Curva temperatura versus tempo de um incêndio real temperatura





A fase inicial de elevação progressiva da temperatura se caracteriza pelo surgimento da ignição inicial e por grandes variações de temperatura devido à inflamação sucessiva dos objetos presentes no ambiente. Nessa fase, a combustão pode gerar gases tóxicos ou asfixiantes, porém, o risco de dano à estrutura é baixo.

Após a propagação do fogo, ocorre a repentina elevação da temperatura no local, com rápido desenvolvimento de fumaça e gases inflamáveis, ocasionado pela combustão simultânea de vários materiais envolvidos. Com a constante inflamação dos objetos, há um aumento cada vez maior da temperatura até que se chega a um momento em que ocorre a transição para inflamação generalizada, ou "flashover", a partir do qual o ambiente é completamente tomado por chamas e gases quentes.

Ainda segundo Silva *et al.* (2010), a última fase, de resfriamento e extinção, ocorre devido ao total consumo do combustível presente no local ou pela falta de comburente, geralmente o oxigênio. Nessa fase, o incêndio terá sua intensidade reduzida até sua extinção.

#### 2.1.3 TIPOS DE INCÊNDIO

A caracterização de um incêndio por meio de curvas tempo *versus* temperatura de um incêndio real nem sempre é possível, uma vez que há uma gama de parâmetros que influenciam seu comportamento. Dessa forma, existem dois tipos de curvas de incêndio, uma chamada de incêndio-padrão e outra de incêndio natural.

#### a) INCÊNDIO-PADRÃO

Os primeiros ensaios de resistência ao fogo de elementos estruturais, realizados nos Estados Unidos no início do século XX, levaram a uma curva temperatura *versus* tempo característica conhecida como incêndio-padrão. Nesse modelo de incêndio se admite que a temperatura dos gases do ambiente em chamas segue as curvas padronizadas para ensaios.

Embora não represente o desenvolvimento de um incêndio real, convencionou-se adotar a curva de incêndio-padrão como modelo para análise experimental de estruturas, de materiais de revestimento contra fogo, de portas corta- fogo, etc.

De acordo com Silva (1997), a principal característica dessa curva é possuir apenas um ramo ascendente, o que admite que a temperatura dos gases seja sempre crescente com o tempo e independente das características do ambiente.

A ABNT NBR 14323:2013 recomenda a aplicação da curva de incêndio-padrão fornecida pela ISO 834 (1975). Essa curva é definida pela Equação 2.1 e apresentada na Figura 2.3.

$$\theta_g = \theta_0 + 385\log(8t+1) \tag{2.1}$$

onde:

 $\theta_g$  é a temperatura dos gases, em graus Celsius, no instante t;

 $\theta_0$  é a temperatura do ambiente antes do início do aquecimento, em graus Celsius, geralmente tomada igual a 20 °C;

*t* é o tempo, em minutos.





Fonte: Autor

#### b) INCÊNDIO NATURAL

É denominado incêndio natural aquele em que se admite que a temperatura dos gases respeite as curvas naturais de temperatura *versus* tempo, obtidas a partir de ensaios ou modelos matemáticos aferidos em ensaios que simulem a real situação de um compartimento em chamas. Os ensaios acontecem em compartimentos com aberturas de ventilação, nos quais o incêndio ocorre sem possibilidade de propagação para fora dos mesmos. Isso é possível devido às características apresentadas pelo compartimento, como isolamento térmico, estanqueidade e resistência dos elementos de vedação.

As curvas de incêndio natural representam uma simplificação das condições de incêndio real, desconsiderando a fase de ignição e ajustando a fase de resfriamento por uma reta.

A principal característica dessas curvas é a de possuírem um ramo ascendente, fase de aquecimento, e um ramo descendente, fase de resfriamento. Admite-se, portanto, que os gases que envolvem o fogo não têm sua temperatura sempre crescente com o tempo, como ocorre no incêndio-padrão. A Figura 2.4 mostra o comportamento de uma curva de incêndio natural.



Fonte: Silva (1997)

## 2.2 MECANISMOS DE TRANFERÊNCIA DE CALOR

O calor pode ser definido como a taxa de energia térmica transferida devido a uma diferença de temperatura entre duas regiões. Para compreensão do comportamento do incêndio e, consequentemente, a análise térmica das estruturas mistas, é importante o conhecimento sobre os conceitos de transferência de calor. Existem três modos distintos de transferência de calor, sendo eles: a condução, a convecção e a radiação.

#### a) CONDUÇÃO

Silva *et al.* (2010) define o fenômeno de condução como a transferência de calor através de um material sólido, de uma região de temperatura elevada em direção a uma outra região de temperatura mais baixa.

A relação básica para a transmissão de calor por condução, conhecida como lei de Fourier, estabelece que o calor transferido por condução por unidade de tempo em um material é igual ao produto da condutividade térmica do material, da área da seção perpendicular à direção do

20

fluxo de calor por condução e do gradiente de temperatura na seção. A lei de Fourier é descrita na Equação 2.2.

$$Q_k = \lambda A \left( -\frac{d\theta}{dx} \right) \tag{2.2}$$

onde:

 $Q_k$  é o fluxo de calor por condução (W);

- $\lambda$  é a condutividade térmica do material (W/m°C);
- A é a área da seção atravessada pelo calor  $(m^2)$ ;
- $\frac{d\theta}{dx}$  é o gradiente de temperatura.

Os valores numéricos das condutividades térmicas são esparsos, dependendo de o sólido ser um bom condutor de calor, tal como um metal, ou um mau condutor, como o asbesto. Apesar de a condução de calor estar geralmente associada à transmissão de calor através de sólidos, ela também se aplica, mesmo que com limitações, a gases e líquidos. A Tabela 2.1 apresenta a condutividade térmica de alguns materiais utilizados na construção.

Tabela 2.1 – Condutividade térmica de alguns materiais

Material	Temperatura	Condutividade Térmica
	[°C]	[W/m°C]
Alumínio	20	164
Aço carbono	20	43
Cobre puro	20	386
Asfalto	20 - 55	0,74 - 0,76
Tijolo	20	0,69
Argamassa	23	1,16
Concreto	20	1,37
Vidro	20	0,78
Emboço, Gesso	20	0,48
Madeira Pinho (perpendicular a fibra)	23	0,11
Lã de rocha (não compactada)	32	0,04
E (1002)		

Fonte: Holman (1983)

O gradiente de temperatura é a razão da variação da temperatura com a distância, na direção do fluxo de calor. Como o calor flui de pontos com temperaturas mais altas para os pontos de temperaturas mais baixas, quando o fluxo de calor for positivo, o gradiente de temperatura será negativo, como ilustrado na Figura 2.5.





Fonte: Kern (1982)

A lei de Fourier, apresentada na Equação 2.2, governa o fenômeno da transferência de calor por condução em regime permanente, ou seja, a temperatura não apresenta variação com o tempo. Para o caso em estudo, o fluxo de calor é transitório, uma vez que a temperatura varia com o tempo. Para a transferência de calor por condução, em regime transitório, utiliza-se a Equação 2.3.

$$\rho c \frac{d\theta}{dt} = \frac{d}{dx} \left( \lambda \frac{d\theta}{dx} \right)$$
(2.3)

onde:

 $\rho$  é a massa específica do material (kg/m<sup>3</sup>);

*c* é o calor específico do material (J/kg °C).

#### b) CONVECÇÃO

Silva *et al.* (2010) define que o fluxo de calor por convecção é gerado pela diferença de densidade entre os gases do ambiente em chamas. Os gases quentes, que possuem menor densidade, tendem a ocupar a atmosfera superior, enquanto os gases frios tendem a se movimentar para a atmosfera inferior do ambiente, visto que possuem maior densidade. Esse movimento gera o contato entre os gases quentes e o mobiliário ou os elementos construtivos, dessa forma ocorrendo a transferência de calor. A Figura 2.6 mostra como ocorre o fenômeno de convecção.





Fonte: Silva (2007) apud Silva et al. (2010)

A transferência de calor por convecção é um importante fator na propagação da chama, no transporte ascendente da fumaça e na permanência dos gases quentes no teto ou para fora das janelas do compartimento incendiado.

De acordo com Kreith (1977), o cientista inglês Isaac Newton em 1701 propôs uma relação que permite calcular o efeito global da convecção, chamada de Lei de Newton de resfriamento, apresentada na Equação 2.4.

$$Q_c = \alpha_c A (\theta_g - \theta_a) \tag{2.4}$$

onde:

- $Q_c$  é o fluxo de calor por convecção (W);
- $\alpha_c$  é o coeficiente de transferência de calor por convecção (W/m<sup>2</sup>°C);
- A é a área da seção atravessada pelo calor  $(m^2)$ ;
- $\theta_q$  é a temperatura dos gases quentes (°C);
- $\theta_a$  é a temperatura na superfície exposta ao fogo (°C).

#### c) RADIAÇÃO

Segundo Silva *et al.* (2010), o calor radiante transfere-se na forma de ondas, podendo ocorrer no gás ou no vácuo, de um corpo em alta temperatura para a superfície de outro em temperatura mais baixa.

A radiação é mais eficiente no vácuo, pois a existência de um meio material a ser atravessado implica na dissipação da energia trocada entre dois corpos afastados. A radiação quando atinge um corpo receptor, parte é refletida, parte é absorvida e parte é transmitida conforme mostra a Figura 2.7.





Segundo Buchanan (2001), a radiação é o principal mecanismo de transferência de calor das chamas para a superfície do combustível. A transferência de calor por radiação em um ponto da superfície radiante é indicada na Equação 2.5.

$$Q_r = \phi \varepsilon_e \sigma A(\theta_e + 273, 15)^4 \tag{2.5}$$

onde:

- $Q_r$  é o fluxo de calor por radiação (W);
- $\phi$  é o fator de configuração;
- $\varepsilon_e$  é a emissividade da superfície radiante;
- $\sigma$  a constante de Stefan-Boltzmann (5,67x10<sup>-8</sup> W/m<sup>2</sup> °C);
- A é a área da seção atravessada pelo calor  $(m^2)$ ;
- $\theta_e$  é a temperatura da superfície emissora (°C).

A transferência de calor da superfície radiante para a superfície receptora é fornecida pela Equação 2.6.

$$Q_r = \phi \varepsilon \sigma A[(\theta_e + 273, 15)^4 - (\theta_r + 273, 15)^4]$$
(2.6)

onde:

 $\theta_r$  é a temperatura da superfície receptora (°C);

 $\varepsilon$  é a emissividade resultante das duas superfícies, dada pela Equação 2.7.

$$\varepsilon = \frac{1}{\frac{1}{\varepsilon_e} + \frac{1}{\varepsilon_r} - 1}$$
(2.7)

onde:

 $\varepsilon_r$  é a emissividade da superfície receptora.

A emissividade  $\varepsilon$  indica a eficiência da superfície radiante, atribuindo valores entre zero e 1,0. No entanto, ela pode mudar durante o incêndio. Em situação de incêndio, a maioria das superfícies quentes, partículas de fumaça ou chamas luminosas tem a emissividade entre 0,7 e 1,0. O fator de configuração  $\phi$ , calculado pela Equação 2.8, é a medida de quanto o emissor da radiação é visto pela superfície receptora, como ilustrado na Figura 2.8.

$$\phi = \int^{A_1} \frac{\cos\theta_1 \cos\theta_2}{\pi r^2} dA_1 \tag{2.8}$$





Fonte: Buchanan (2001)

Para o caso particular de duas faces paralelas, como mostra a Figura 2.9, o fator de configuração  $\phi$ , em um ponto da superfície receptora a uma distância r do centro da superfície retangular que emite a radiação, é obtido pela Equação 2.9.

$$\phi = \frac{1}{90} \left[ \frac{a}{\sqrt{1+a^2}} \tan^{-1} \left( \frac{b}{\sqrt{1+a^2}} \right) + \frac{b}{\sqrt{1+b^2}} \tan^{-1} \left( \frac{a}{\sqrt{1+b^2}} \right) \right]$$
(2.9)

onde:

a é igual a H/2r, sendo H a altura do retângulo da superfície radiante;

*b* é igual a W/2r, sendo W a largura do retângulo da superfície radiante.





Fonte: Buchanan (2001)

## 2.3 DIMENSIONAMENTO DE PILARES MISTOS EM SITUAÇÃO DE INCÊNDIO

A norma brasileira que rege o dimensionamento dos pilares mistos de aço e concreto em situação de incêndio é a ANBT NBR 14323:2013. O dimensionamento de estruturas em situação de incêndio se faz necessário devido às alterações de propriedades mecânicas e físicas dos materiais quando são submetidos a altas cargas térmicas.

A seção 2.3.1 apresenta quais as principais alterações nas propriedades do aço e do concreto quando expostos ao incêndio. A seção 2.3.2 apresenta as considerações gerais para o dimensionamento de estruturas mistas em situação de incêndio.

#### 2.3.1 PROPRIEDADES DOS MATERIAIS

#### a) AÇO

O aço quando exposto a elevadas temperaturas, apresenta alterações nas suas propriedades mecânicas, causando redução da resistência. A Figura 2.10 mostra o gráfico tensão *versus* deformação do aço, onde é possível perceber a perda de resistência do material à medida que a temperatura de exposição aumenta.



Figura 2.10 - Gráfico tensão versus deformação do aço para diferentes temperaturas

Fonte: Autor

Tendo em vista que ocorre redução da resistência com a elevação da temperatura, as propriedades mecânicas são reduzidas no dimensionamento dos elementos de aço. As Equações 2.10 a 2.12 e a Tabela 2.2 fornecem os fatores de redução, relativos aos valores a 20 °C, da resistência ao escoamento do aço em temperatura elevada  $(k_{y,\theta})$ , do módulo de elasticidade do aço em temperatura elevada  $(k_{E,\theta})$  e da resistência ao escoamento do aço das seções sujeitas à flambagem local em temperatura elevada  $(k_{\sigma,\theta})$ , para taxa de aquecimento entre 2 e 50 °C/min.

$$k_{y,\theta} = \frac{f_{y,\theta}}{f_y} \tag{2.10}$$

$$k_{E,\theta} = \frac{E_{\theta}}{E} \tag{2.11}$$

$$k_{\sigma,\theta} = \frac{f_{y,\theta}}{f_y} \tag{2.12}$$

onde:

 $f_{y,\theta}$  é a resistência ao escoamento do aço a uma temperatura  $\theta_a$ ;

- $f_v$  é a resistência ao escoamento do aço a 20 °C;
- $E_{\theta}$  é o módulo de elasticidade do aço a uma temperatura  $\theta_a$ ;
- E é o módulo de elasticidade do aço a 20 °C.

Temperatura do aço ( $\theta_a$ ) [°C]	Fator de redução da resistência ao escoamento <sup>a</sup> (k <sub>y,θ</sub> )	Fator de redução do módulo de elasticidade <sup>a</sup> $(k_{E,\theta})$	Fator de redução <sup>a</sup> $(k_{\sigma,\theta})$
20	1,000	1,000	1,000
100	1,000	1,000	1,000
200	1,000	0,900	0,890
300	1,000	0,800	0,780
400	1,000	0,700	0,650
500	0,780	0,600	0,530
600	0,470	0,310	0,300
700	0,230	0,130	0,130
800	0,110	0,090	0,070
900	0,060	0,068	0,050
1000	0,040	0,045	0,030
1100	0,020	0,023	0,020
1200	0,000	0,000	0,000
<sup>a</sup> Para valores intermediários	da temperatura de aco, pode s	er feita internolação linear	

Tabela 2.2 – Fatores de redução do aço

<sup>a</sup> Para valores intermediários da temperatura de aço, pode ser feita interpolação linear.

Fonte: ABNT NBR 14323:2013

Quanto à massa específica do aço ( $\rho_a$ ), a ABNT NBR 14323:2013 considera o valor independente da temperatura, sendo o valor igual a 7850 kg/m<sup>3</sup>.

Além das propriedades mecânicas já citadas, as propriedades térmicas também são importantes no dimensionamento de pilares mistos em situação de incêndio. As propriedades térmicas são alongamento, calor específico e condutividade térmica.

O alongamento das estruturas de aço é resultado da elevada expansão térmica. As deformações introduzem esforços consideráveis nos componentes de ligação entre perfis, que podem ocasionar perda de estabilidade da estrutura. Segundo a ABNT NBR 14323:2013, o alongamento do aço varia com o aumento da temperatura, conforme mostram as Equações 2.13 a 2.15.

Para 20°C 
$$\leq \theta_a < 750°C$$
  $\frac{\Delta l_a}{l_a} = 1.2 \times 10^{-5} \theta_a + 0.4 \times 10^{-8} \theta_a^2 - 2.416 \times 10^{-4}$  (2.13)

Para 750°C 
$$\leq \theta_a < 860°$$
C  $\frac{\Delta l_a}{l_a} = 1.1 \times 10^{-2}$  (2.14)

Para 860°C 
$$\leq \theta_a \leq 1200°C$$
  $\frac{\Delta l_a}{l_a} = 2 \times 10^{-5} \theta_a - 6.2 \times 10^{-3}$  (2.15)

onde:

- $l_a$  é o comprimento da peça de aço a 20°C;
- $\Delta l_a$  é a expansão térmica da peça de aço provocada pela temperatura;

 $\theta_a$  é a temperatura do aço, expressa em graus Celsius (°C).

De forma simplificada, a relação entre o alongamento do aço e a temperatura pode ser considerada constante, conforme determina a ABNT NBR 14323:2013 e apresentada na Equação 2.16.

$$\frac{\Delta l_a}{l_a} = 14 \times 10^{-6} (\theta_a - 20) \tag{2.16}$$

Os valores do alongamento do aço em função da temperatura, para os dois métodos, são apresentados na Figura 2.11.

Figura 2.11 – Alongamento do aço em função da temperatura



Fonte: ABNT NBR 14323:2013

O calor específico é a quantidade de calor necessária para elevar em 1°C uma unidade de massa do material. Assim como o alongamento, o calor específico do aço aumenta mediante o acréscimo de temperatura. As Equações 2.17 a 2.20 mostram a variação do calor específico em relação à temperatura, sendo expresso em J/kg°C.

Para 20°C 
$$\leq \theta_a < 600°$$
C  $c_a = 425 + 0.773\theta_a - 0.00169\theta_a^2 + 2.22 \times 10^{-6}\theta_a^3$  (2.17)  
Para 600°C  $\leq \theta_a < 735°$ C  $c_a = 666 + \frac{13002}{738 - \theta_a}$  (2.18)  
Para 735°C  $\leq \theta_a < 900°$ C  $c_a = 545 + \frac{17820}{\theta_a - 731}$  (2.19)

Para 900°C 
$$\le \theta_a \le 1200$$
°C  $c_a = 650$  (2.20)

De forma simplificada, a ABNT NBR 14323:2013 permite, para o calor específico do aço, tomar um valor independente da temperatura,  $c_a$  igual a 600 J/kg°C. A Figura 2.12 ilustra as duas situações.

Figura 2.12 - Calor específico do aço em função da temperatura



Fonte: ABNT NBR 14323:2013

A condutividade térmica está associada à capacidade do material em conduzir calor. A variação da condutividade térmica com o aumento da temperatura é expressa em W/m°C, de acordo com as Equações 2.21 e 2.22.

Para 
$$20^{\circ}C \le \theta_a < 800^{\circ}C$$
  $\lambda_a = 54 - 3,33 \times 10^{-2}\theta_a$  (2.21)

Para 800°C 
$$\leq \theta_a \leq 1200$$
°C  $\lambda_a = 27,3$  (2.22)

De forma simplificada, a ABNT NBR 14323:2013 permite tomar a condutividade térmica do aço um valor independente da temperatura,  $\lambda_a$  igual a 45 W/m°C. A Figura 2.13 ilustra as duas situações.



Figura 2.13 - Condutividade térmica do aço em função da temperatura

#### b) CONCRETO

A resistência à compressão do concreto decresce com o aumento da temperatura. Dessa forma, no dimensionamento de estruturas mistas em situação de incêndio, a resistência a compressão do concreto é corrigida pelo fator de redução  $k_{c,\theta}$ , como mostra a Equação 2.23.

$$f_{c,\theta} = k_{c,\theta} f_{ck} \tag{2.23}$$

onde:

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

Para concretos preparados predominantemente com agregados silicosos, a Tabela 2.3 fornece a relação entre a resistência à compressão do concreto submetido a diferentes temperaturas  $(f_{c,\theta})$  e a resistência característica a compressão do concreto à temperatura ambiente  $(f_{ck})$ .

Fonte: ABNT NBR 14323:2013

Temperatura do concreto [°C]	$k_{c,\theta} = f_{c,\theta}/f_{ck}^{a}$
20	1,00
100	1,00
200	0,95
300	0,85
400	0,75
500	0,60
600	0,45
700	0,30
800	0,15
900	0,08
1000	0,04
1100	0,01
1200	0,00

Tabela 2.3 – Fator de redução do concreto

<sup>a</sup> Para valores intermediários de temperatura, pode ser feita interpolação linear.

Fonte: ABNT NBR 15200:2012

Além das propriedades mecânicas já citadas, as propriedades térmicas do concreto também são importantes no dimensionamento de pilares mistos em situação de incêndio. As propriedades térmicas são alongamento, calor específico, condutividade térmica e densidade.

O alongamento do concreto de densidade normal varia com o aumento da temperatura, de acordo com as Equações 2.24 e 2.25.

Para 20°C 
$$\leq \theta_c < 700°C$$
  $\frac{\Delta l_c}{l_c} = 9 \times 10^{-6} \theta_c + 2.3 \times 10^{-11} \theta_c^3 - 1.8 \times 10^{-4}$  (2.24)

Para 700°C 
$$\leq \theta_c \leq 1200°$$
C  $\frac{\Delta l_c}{l_c} = 14 \times 10^{-3}$  (2.25)

onde:

 $l_c$  é o comprimento da peça do concreto a 20 °C;

 $\Delta l_c$  é o alongamento do elemento de concreto provocado pela temperatura;

 $\theta_c$  é a temperatura do concreto, em graus Celsius (°C).

De forma simplificada, a relação entre o alongamento específico do concreto e a temperatura pode ser considerada constante, conforme determina a ABNT NBR 15200:2012 e mostrado na Equação 2.26.

$$\frac{\Delta l_c}{l_c} = 18 \times 10^{-3} (\theta_c - 20) \tag{2.26}$$

O calor específico do concreto, assim como o alongamento, se dá em função da temperatura a que o material foi exposto. O calor específico é expresso nas Equações 2.27 a 2.30 em J/kg°C.

Para 20°C  $\leq \theta_c \leq 100$ °C  $c_p = 900$  (2.27)

Para 100°C 
$$< \theta_c \le 200°$$
C  $c_p = 900 + (\theta_c - 100)$  (2.28)

Para 200°C < 
$$\theta_c \le 400°$$
C  $c_p = 1000 + \frac{\theta_c - 200}{2}$  (2.29)

Para  $400^{\circ}C \le \theta_c \le 1200^{\circ}C$   $c_p = 1100$  (2.30)

De forma simplificada, a ABNT NBR 15200:2012 permite, para o calor específico do concreto de densidade normal, tomar um valor constante,  $c_p$  igual a 1000 j/kg°C.

A condutividade térmica do concreto pode ser determinada pela Equação 2.31, para temperaturas do concreto variando de 20 a 1200 °C, ou pode ser considerado constante no valor de 1,3 W/m°C.

$$\lambda_c = 1,36 - 0,136 \frac{\theta_c}{100} + 0,0057 \left(\frac{\theta_c}{100}\right)^2$$
(2.31)

Por fim, a densidade do concreto também é variável em função da temperatura a que o material foi exposto, conforme as Equações 2.32 a 2.35.

Para 20°C 
$$\leq \theta_c \leq 115$$
°C  $\rho_c = \rho_0$  (2.32)

Para 115°C < 
$$\theta_c \le 200°$$
C  $\rho_c = \rho_0 \left(1 - 0.02 \frac{\theta_c - 115}{85}\right)$  (2.33)

Para 200°C < 
$$\theta_c \le 400°$$
C  $\rho_c = \rho_0 \left( 0.98 - 0.03 \frac{\theta_c - 200}{200} \right)$  (2.34)

Para 400°C 
$$\leq \theta_c \leq 1200$$
°C  $\rho_c = \rho_0 \left( 0.95 - 0.07 \frac{\theta_c - 400}{800} \right)$  (2.35)

onde:

 $\rho_0$  é a densidade do concreto a temperatura de 20 °C.

#### c) AÇO DE ARMADURA DO CONCRETO

Assim como o aço do perfil e o concreto, o aço de armadura do concreto também perde resistência quando submetido a altas temperaturas. A resistência ao escoamento e o módulo de elasticidade do aço são decrescidos para o dimensionamento.

A resistência ao escoamento do aço da armadura e o módulo de elasticidade são reduzidos em função do aumento da temperatura conforme as equações 2.36 e 2.37, respectivamente.

$$f_{ys,\theta} = k_{s,\theta} f_{ys} \tag{2.36}$$

$$E_{s,\theta} = k_{Es,\theta} E_s \tag{2.37}$$

onde:

 $k_{s,\theta}$  é o fator de redução da resistência ao escoamento do aço na temperatura  $\theta_c$ ;

 $f_{ys}$  é a resistência ao escoamento do aço de armadura à temperatura ambiente (20°C);

 $k_{ES,\theta}$  é o fator de redução do módulo de elasticidade do aço na temperatura  $\theta_c$ ;

 $E_s$  é o módulo de elasticidade do aço de armadura à temperatura ambiente (20°C).

A Tabela 2.4 apresenta os valores para  $k_{s,\theta}$  e  $k_{Es,\theta}$  para aços, CA-50 e CA-60, de armadura passiva comprimida em diferentes temperaturas. Para temperaturas intermediárias é feita interpolação linear.

Temperatura do aço [°C]	Fator de redução da resistência do aço $(k_{s,\theta})$	Fator de redução do módulo de elasticidade do aço ( $k_{Es,\theta}$ )	
1 3 5 3	CA-50 ou CA-60	CA-50	CA-60
20	1,00	1,00	1,000
100	1,00	1,00	1,000
200	0,89	0,90	0,87
300	0,78	0,80	0,72
400	0,67	0,70	0,56
500	0,56	0,60	0,40
600	0,33	0,31	0,24
700	0,10	0,13	0,08
800	0,08	0,09	0,06
900	0,06	0,07	0,05
1000	0,04	0,04	0,03
1100	0,02	0,02	0,02
1200	0,00	0,00	0,00

Tabela 2.4 – Fatores de redução para aços comprimidos de armadura passiva

Fonte: ABNT NBR 15200:2012

#### 2.3.2 CONSIDERAÇÕES GERAIS DO DIMENSIONAMENTO

Segundo o método dos estados limites, as condições de segurança da estrutura, quando verificadas isoladamente para cada um dos esforços solicitantes, podem ser expressas na forma da Equação 2.38.

$$S_{fi,d} \le R_{fi,d} \tag{2.38}$$

onde:

- $S_{fi,d}$  é o esforço solicitante de cálculo em situação de incêndio, obtido a partir das combinações de ações;
- $R_{fi,d}$  é o esforço resistente de cálculo correspondente do elemento estrutural para o estadolimite último em consideração, em situação de incêndio.

As combinações de ações para os estados limites últimos em situação de incêndio devem ser consideradas como combinações últimas excepcionais e obtidas de acordo com a ABNT NBR 8681:2004. Deve-se considerar que as ações transitórias excepcionais, ou seja, aquelas
decorrentes da elevação da temperatura na estrutura em virtude do incêndio têm um tempo de atuação muito pequeno.

Para os estados-limites últimos em situação de incêndio, o esforço resistente de cálculo deve ser determinado usando-se coeficiente de ponderação unitário. Dessa forma, o esforço resistente de projeto possui valor igual ao esforço resistente nominal correspondente.

Pilares mistos de aço e concreto de seção circular são elementos estruturais submetidos principalmente à força axial de compressão. Dessa forma, a verificação a ser realizada no dimensionamento em situação de incêndio se restringe a Equação 2.39.

$$N_{fi,Sd} \le N_{fi,Rd} \tag{2.39}$$

onde:

$$N_{fi,Sd}$$
 é a força solicitante de cálculo dos pilares mistos em situação de incêndio;

 $N_{fi,Rd}$  é a força resistente de cálculo dos pilares mistos em situação de incêndio.

Uma variável importante a ser determinada para o dimensionamento é o comprimento de flambagem dos pilares para situação de incêndio,  $L_{e,fi}$ . O comprimento de flambagem em situação de incêndio pode ser determinado como no dimensionamento à temperatura ambiente, porém os pilares contínuos que se comportam como elementos contraventados dos andares intermediários de edifícios de vários andares podem ser considerados com a rotação perfeitamente impedida nas extremidades do compartimento incendiado, desde que a resistência ao fogo dos componentes que isolam o compartimento não seja menor que a resistência ao fogo do pilar. Os pilares do primeiro pavimento devem ser considerados com rotação impedida acima do compartimento incendiado (na base deve ser adotado o tipo de apoio efetivamente existente). Os pilares do último pavimento devem ser considerados com rotação impedida apenas na extremidade inferior do compartimento incendiado. Essas observações são mostradas na Figura 2.14.

Os procedimentos de cálculo para o dimensionamento de pilares mistos de aço e concreto preenchidos de seção circular em situação de incêndio foram descritos em forma de fluxograma, Apêndice A, facilitando a compreensão da rotina de cálculo. Também foi descrita

em fluxograma a rotina de cálculo para o dimensionamento de pilares mistos de aço e concreto preenchidos de seção circular em temperatura ambiente, conforme Apêndice B.



Figura 2.14 – Comportamento de pilares em estruturas contraventadas

Fonte: ABNT NBR 14323:2013

#### **3 ESTADO DA ARTE**

Tendo em vista a importância dos elementos estruturais resistirem aos efeitos do fogo por um período de tempo suficiente para que a desocupação da edificação seja de forma segura, diminuindo ou até mesmo impedindo que ocorram danos patrimoniais e humanos, estudos voltados a esse tema têm sido realizados por pesquisadores ao redor do mundo.

Neste capítulo, são abordadas as principais pesquisas experimentais e numéricas referentes ao comportamento de pilares mistos de aço preenchidos de concreto em situação de incêndio.

### 3.1 PESQUISAS EXPERIMENTAIS

Kodur (1998) afirma que o comportamento do pilar misto de aço preenchido com concreto, quando exposto ao fogo, é influenciado pelo nível de temperatura e pela duração do incêndio e destaca três estágios de resistência ao fogo, como pode ser observado na Figura 3.1.



Figura 3.1 – Deformação do pilar misto de aço preenchido com concreto durante o incêndio

Fonte: Kodur (1998)

No estágio inicial de exposição ao fogo, o aço resiste a maior parcela da força aplicada, tendo em vista o fato da seção de aço se expandir mais rapidamente que o núcleo do concreto. Com o aumento da temperatura, a seção de aço começa a se deformar por conta da perda da resistência ao escoamento e diminuição do módulo de elasticidade, quando então o pilar subitamente contrai após 20 a 30 minutos de exposição ao fogo e é observada a instabilidade local na seção de aço.

Num segundo estágio, com a temperatura ainda em crescimento, o concreto passa a receber cada vez mais carga, visto que o tubo de aço perde resistência. O concreto, devido sua baixa condutividade térmica e alto calor específico, perde resistência mais lentamente quando comparado ao aço, e praticamente assume a capacidade de resistência ao fogo neste estágio. Por fim, a resistência do concreto também diminui com o tempo e ocorre a ruptura tanto por instabilidade global quanto por compressão.

Han *et al.* (2003) apresentaram um estudo experimental com pilares mistos preenchidos, os quais foram ensaiados com e sem revestimento de proteção ao fogo, bem como submetidos a carregamentos axiais ou excêntricos. O aquecimento do forno seguiu a curva padrão de incêndio, curva ISO 834 (1975).

O objetivo dos experimentos foi avaliar a influência de parâmetros como o diâmetro, o tipo de carregamento, a espessura dos revestimentos e a resistência dos materiais aço e concreto, almejando o desenvolvimento de um modelo matemático a ser utilizado para determinar a resistência ao fogo. Os autores destacam os benefícios dos pilares mistos em relação aos sistemas tradicionais em aço ou em concreto armado, como: o aumento da resistência mecânica e ao fogo; o menor risco de ocorrência de *spalling* e a ausência de fôrmas.

Foi observado nos experimentos que inicialmente o tubo de aço começa a expandir axialmente, passando a absorver a maior parte da força aplicada, fazendo com que a tensão de compressão no núcleo de concreto diminua. Posteriormente, com o aumento da temperatura, o aço começa a apresentar instabilidade local e a força é gradualmente transferida para o concreto. Em um estágio final de carregamento, o perfil de aço não consegue mais confinar o concreto e a amostra rompe geralmente de forma brusca.

Os resultados experimentais mostraram que, dentre os parâmetros analisados, o diâmetro da seção transversal e a esbeltez tem grande influência na resistência ao fogo, sendo que a resistência aumenta com o aumento do diâmetro e com a diminuição da esbeltez. Essa relação pode ser observada na Figura 3.2, em que *SI* é o índice de resistência associado ao pilar em

relação à resistência em temperatura ambiente. As variações na espessura, excentricidade, resistência dos materiais aço e concreto, têm influência moderada sobre a resistência ao fogo da amostragem. Os aumentos da espessura do tubo de aço e da excentricidade de carga resultam numa pequena diminuição da resistência do pilar, enquanto o aumento na resistência dos materiais provoca um pequeno aumento.



Figura 3.2 – Resistência do pilar em relação ao tempo de exposição ao fogo

Fonte: Han et al. (2003)

Han *et al.* (2005) realizaram ensaios de compressão e flexão em pilares mistos curtos de aço e concreto, com exposição das amostras à curva de incêndio-padrão por 90 minutos e, em seguida, resfriados naturalmente com a finalidade de obter a resistência residual.

Ao final, os resultados obtidos experimentalmente foram comparados aos resultados de resistência calculados pelas normas AISC–LRFD (1999) e EN 1994 1-1:2004 em temperatura ambiente. Foram verificados os seguintes aspectos: o modo de falha foi idêntico àquele observado em temperatura ambiente; a ruptura ocorreu de forma dúctil; houve um aumento da resistência e ductilidade do núcleo de concreto e uma redução da flexão local do tubo de aço. A Figura 3.3 mostra o resultado do experimento em uma amostra, destacando o tubo de aço e o núcleo de concreto.







(a) Seção Circular





(b) Seção Quadrada

Fonte: Han et al. (2005)

Pires *et al.* (2012) investigaram o comportamento de pilares mistos tubulares circulares com restrições térmicas. Foram testados experimentalmente 40 pilares mistos de seção circular com restrições axial e rotacional, e foram analisados parâmetros relevantes que influenciam na resistência dos pilares, sendo eles: esbeltez e diâmetro dos pilares; nível de carga; rigidez da estrutura envolvente que impõe as restrições térmicas; porcentagem de aço da armadura do concreto e a relação aço-concreto.

Os pilares foram submetidos ao incêndio-padrão por todos os lados. Os experimentos foram desenvolvidos no forno mostrado na Figura 3.4 e esquematizado na Figura 3.5. O aparato experimental é constituído de: viga de restrição de aço (1); pinos rosqueáveis para controle da força de restrição (2); macaco hidráulico para aplicação da força (3); célula de carga (4); viga de apoio (5); estrutura de segurança (6); forno elétrico modular (7); dispositivo para mensurar a força de restrição gerada pelo alongamento térmico do pilar (8); dispositivo para medir a rotação do pilar (9) e dispositivos para medir a deformação lateral do pilar (10).



Figura 3.4 – Visão geral da instalação experimental

Fonte: Pires et al. (2012)



Figura 3.5 – Esquematização da instalação experimental

Nos ensaios realizados foi observado que o tempo crítico dos pilares mistos não sofre grande influência da restrição do pilar, porém, observou que quanto maior a taxa de concreto na seção transversal do pilar, menores são as forças de restrição. Parâmetros como nível de carregamento e esbeltez do pilar são fatores que exercem bastante influência na resistência dos pilares mistos submetidos ao incêndio, sendo que, um maior carregamento e uma maior esbeltez diminuem a resistência do pilar. Quanto ao nível de armadura do concreto, foi verificado que o uso de barras de armadura aumenta consideravelmente o tempo crítico do pilar, ou seja, aumenta a resistência.

O tempo crítico dos pilares estudados foi menor que 46 minutos quando o valor do carregamento era 30% do valor de cálculo da força de flambagem em temperatura ambiente, e para 70% do valor de cálculo da força de flambagem em temperatura ambiente, o valor do tempo crítico encontrado foi 19 minutos. A comparação dos tempos críticos obtidos para os dois níveis de cargas, 30% e 70%, podem ser observados na Figura 3.6. Isso sugere que o nível de carga de 70% é demasiado alto para o dimensionamento de pilares mistos de aço e concreto de seção circular em situação de incêndio.

Fonte: Pires et al. (2012)



Figura 3.6 - Comparação do tempo crítico dos pilares mistos para diferentes níveis de carga

Fonte: Pires et al. (2012)

Pires *et al.* (2012) encontraram como critério de falha, a instabilidade global, apesar de em casos críticos ter ocorrido a instabilidade local. A Figura 3.7(a) mostra a forma de deformação apresentada pelos pilares testados (instabilidade global), e na Figura 3.7(b) é destacada a instabilidade local do tubo de aço em casos críticos.





Fonte: Pires et al. (2012)

## 3.2 PESQUISAS NUMÉRICAS

Zha (2002) aplicou o Método dos Elementos Finitos para determinar a resistência ao fogo dos pilares mistos preenchidos, submetidos ao incêndio por todos os lados, com a justificativa de que com esse método é possível prever com maior precisão o colapso dos pilares em altas temperaturas.

No estudo, a distribuição da temperatura foi determinada pelo programa computacional FIRES-T, o qual depende basicamente das propriedades térmicas dos materiais como dados de entrada. O cálculo da resistência ao fogo dos pilares envolveu a determinação da distribuição da temperatura, a deformação dos elementos e a redução da resistência em resposta à elevação da temperatura. Para fins de análise termo-estrutural, foi utilizado o programa computacional DYNA 3D, para análise em campo tridimensional por meio de elementos finitos não lineares. Os comportamentos do aço e do concreto foram assumidos como isotrópicos.

Ao analisar os resultados numéricos, Zha (2002) observou uma proximidade com os calculados por meio do EN 1994 1-2:2005 (via Método Tabular), sendo o colapso causado principalmente pela instabilidade global. A variação do diâmetro do pilar indicou que quanto maior a seção, maior a resistência ao incêndio (Figura 3.8), e quanto menor a espessura do tubo de aço, também maior será a resistência (Figura 3.9). O autor também concluiu que o colapso é causado pela combinação da redução das propriedades dos materiais devido à elevação da temperatura, consequentemente da perda de capacidade resistente na região exposta ao incêndio e da instabilidade do elemento estrutural.

Nóbrega (2003) analisou a precisão e a consistência do Método Tabular e do Método Simplificado Analítico de Cálculo, previstos pelo EN 1994 1-2:2005 para o dimensionamento em situação de incêndio de pilares mistos parcialmente revestidos e preenchidos de seção circular. Foi utilizado um programa desenvolvido na Universidade Federal de Minas Gerais (UFMG) para análise térmica bidimensional, baseado no Método dos Elementos Finitos. Os pilares foram submetidos à curva de incêndio-padrão, curva ISO 834 (1975) e tempos requeridos de resistência ao fogo (TRRF) foram de 30, 60, 90 e 120 minutos. O concreto estudado foi de densidade normal.

Nesse estudo, foi observado que os resultados da resistência obtidos pelos Métodos Simplificados e pelo Método Avançado de Cálculo indicaram que o Método Tabular fornece resultados bastante favoráveis à segurança, o que pode elevar os custos de construção. Esses resultados indicaram também que o Método Simplificado Analítico apresenta resultados mais corretos, quando comparados aos resultados obtidos pelo Método Tabular, mas ainda bastante conservadores quando comparados aos Métodos Avançados de Cálculo.



Figura 3.8 – Influência de diâmetro de seção na resistência do pilar misto

Figura 3.9 – Influência da espessura do tubo de aço na resistência do pilar misto



Fonte: Zha (2002)

Costa (2005) estudou a capacidade resistente à compressão axial do pilar misto tubular circular preenchido com concreto refratário de alto desempenho (CRAD) e comparou com os preenchidos com concreto convencional. O objetivo da pesquisa foi apresentar um método tabular para o dimensionamento de pilares mistos constituídos por perfis de aço tubulares preenchidos com CRAD. Para determinação da distribuição de temperatura na seção transversal do pilar foi utilizado o programa computacional THERSYS, e para dimensionamento do pilar, o autor desenvolveu um programa computacional, o PCRAD.

Foi observado no estudo que, o uso de concreto refratário de alto desempenho aumenta em alguns casos até 70% da resistência do pilar, quando a espessura do tubo é maior. Porém quando os pilares atingem altas temperaturas, para uma resistência maior, os tubos com menor espessura são mais indicados, pois nesses casos quem desempenha a função resistente é o concreto, e com tubos mais finos a área de concreto é maior.

Yin *et al.* (2006) apresentaram estudos analíticos do comportamento de pilares mistos preenchidos com concreto, com seções do tipo quadrada e circular, carregados axialmente e expostos a elevadas temperaturas.

O cálculo da resistência ao incêndio e a comparação dos resultados sugerem que pilares mistos de seção circular apresentam resistência ao incêndio ligeiramente superior quando comparados àqueles de seção quadrada, ainda que para seções de mesma área. Yin *et al.* (2006) afirmam que tal diferença, provavelmente, ocorre devido a seção quadrada possuir maior perímetro se comparado a circular, bem como pelo fato de que quando suas quatro faces são expostas ao fogo, essas absorvem mais calor e seu campo de temperatura é superior em intensidade com relação ao pilar de seção circular.

Os autores apresentaram um modelo de análise numérica não-linear para predizer a resistência ao fogo de pilares mistos de aço preenchidos com concreto. O modelo desenvolvido teve por base as curvas de tensão-deformação para elevadas temperaturas. Como a análise estrutural em incêndio resulta, em geral, bastante complexa, pois envolve muitas variáveis, o processo foi dividido em três etapas: exposição ao fogo; transferência de calor dos gases para a estrutura e a resposta estrutural.

Yin *et al.* (2006) ainda sugerem que a capacidade resistente do pilar misto exposto ao fogo depende da espessura do tubo de aço. Nesse caso, quanto menor a espessura do tubo, mais lenta é a perda de capacidade resistente do pilar. Para um pilar circular com um raio igual a 250 mm e espessura do tubo igual a 10 mm, a capacidade resistente é reduzida em 68% se

exposto ao fogo por duas horas, enquanto que, para um pilar de mesmo diâmetro com espessura do tubo igual a 30 mm, a capacidade é reduzida em 86% após as mesmas duas horas de exposição.

Ding e Wang (2008) apresentaram resultados de modelagem numérica em contexto térmico e também térmico-estrutural de pilares mistos de seção transversal quadrada preenchida com concreto, em situação de incêndio com base na curva de incêndio-padrão e sem proteção ao fogo, utilizando o programa computacional Ansys.

Segundo os autores, a maioria dos pesquisadores assume simplificadamente que, durante a exposição ao fogo, o contato é perfeito na interface entre o aço e o concreto nos pilares mistos preenchidos. No entanto, também se ressalta o fato de a dilatação do aço ser maior que a do concreto no início do aquecimento, impondo um deslocamento no contato dando origem a existência de uma "folga" (Gap de ar) entre ambos, fenômeno esse que deve ser levado em consideração em análises experimentais e numéricas. Os autores afirmam que a resistência ao fogo cresce inexpressivamente devido à folga, consequentemente, as análises de modelos convencionais, sem Gap, são conservadoras.

Ainda sobre os estudos realizados por Ding e Wang (2008), foram elaborados dois modelos numéricos, um com escorregamento na face aço-concreto e outro sem escorregamento. Quando analisado o deslocamento vertical no topo do pilar misto, no modelo com escorregamento (*with slip*) o comportamento se aproxima do experimental, enquanto no modelo sem escorregamento (*without slip*) o comportamento é diferente, porém, apenas para trecho inicial e intermediário, como pode ser observado na Figura 3.10. No entanto, de acordo com os autores, o principal fator de interesse nesse caso é o tempo de colapso, de modo que os resultados obtidos em ambos os modelos numéricos podem ser considerados representativos.

Santos (2009) buscou simular o comportamento estrutural de pilares mistos curtos em situação de incêndio-padrão, buscando verificar a influência da elevação da temperatura na resistência do elemento e indicar para qual tempo e em quais níveis de temperatura o acréscimo de resistência devido ao confinamento se tornava irrelevante. A metodologia adotada foi análise estrutural numérica via método dos elementos finitos, com o uso do programa computacional ANSYS.

Santos (2009) observou que para os instantes iniciais de aquecimento do elemento misto, 15 minutos de exposição, os modelos estudados apresentam capacidade resistente 10% menor

que à temperatura ambiente, sinalizando que o efeito do confinamento deixa de colaborar para níveis de temperatura da ordem de 700°C.



Figura 3.10 - Deslocamento vertical no topo do pilar misto

Pires (2013) estudou o comportamento de pilares mistos de aço e concreto pelo método numérico com uso do programa computacional ABAQUS. Numericamente foram desenvolvidos modelos não-lineares tridimensionais, com o uso do método dos elementos finitos, objetivando realizar uma analise paramétrica de fatores que influenciam na resistência dos pilares em situação de incêndio. Os modelos foram validados com os experimentos realizados em Pires *et al.* (2012), mencionado no item 3.1 desta dissertação.

Os resultados obtidos numericamente foram próximos aos resultados experimentais, afirmando que a análise pelos modelos numéricos é uma boa opção para estudo do comportamento de pilares mistos em situação de incêndio. Na comparação dos resultados, observou-se que apesar de próximos, os tempos críticos obtidos numericamente são maiores que os obtidos experimentalmente, com diferença menor que 5 minutos. As forças de restrição obtidas numericamente apresentaram erros menores que 10% quando comparados aos experimentos. Quando analisadas os deslocamentos obtidos nos experimentos e nos modelos numéricos, foram observadas diferenças máximas de cinco milímetros, e o autor destaca o fato das formas finais de deformação estarem bastante próximas quando comparadas visivelmente (Figura 3.11).

Fonte: Ding e Wang (2008)



Figura 3.11 - Deformação dos pilares mistos experimental e numérico

Quanto à relação entre a geometria e o modo de falha, observou-se que em pilares mistos mais esbeltos o modo de falha que predomina é a instabilidade global, enquanto para pilares com grandes diâmetros é frequente a instabilidade local, caso seja mantido a mesma espessura do tubo de aço. Essa afirmação pode ser observada na Figura 3.12.





Fonte: Pires (2013)

Por fim, o autor afirma que, quando são comparados os resultados obtidos experimentalmente e numericamente com os resultados obtidos analiticamente por meio do Método Tabular apresentado pelo EN 1994 1-2:2005, o método analítico da norma é ligeiramente inseguro, principalmente para pilares com diâmetros maiores.

Fonte: Pires (2013)

## 4 MODELO NUMÉRICO

A análise numérica realizada nesta pesquisa utilizou rotinas de programação denominadas APDL (ANSYS Parametric Development Language) de um programa computacional de elementos finitos, o pacote computacional ANSYS 17.0.

A análise térmica foi possível a partir da elaboração de modelos tridimensionais, que permitiram a determinação da ação térmica e do campo térmico na seção transversal do pilar misto e ao longo de seu comprimento.

# 4.1 ANÁLISE TÉRMICA

A base para análise térmica no ANSYS é a equação de equilíbrio térmico obtida do princípio de conservação de energia. Segundo o *Mechanical APDL Thermal Analysis Guide*, no programa é possível realizar dois tipos de análise térmica, a estacionária e a transiente.

A análise térmica estacionária determina a temperatura e outras grandezas térmicas sob condições estacionárias de carregamento, onde a variação das grandezas térmicas com o tempo pode ser desconsiderada. Essa análise ainda pode ser do tipo linear, com as propriedades dos materiais constantes, ou do tipo não linear, com as propriedades dos materiais dependentes da temperatura.

A análise térmica transiente, realizada nesta dissertação, determina a distribuição de temperatura e outras grandezas térmicas na dependência do tempo. Comumente, na engenharia é utilizado esse tipo de análise e as temperaturas obtidas servem como dados para análises estruturais para avaliação das tensões induzidas pela temperatura.

O ANSYS considera os três modos de transferência de calor: condução, convecção e radiação. Para a transferência de calor por condução, devem ser fornecidas as propriedades de condutividade térmica e densidade dos materiais, no caso específico, do aço e do concreto.

A transferência de calor por convecção é especificada como carregamento de superfície em elementos finitos do tipo sólido ou casca. É necessário fornecer ao programa o coeficiente de transferência de calor por convecção ( $\alpha_c$ ) e a temperatura do fluido incidente na superfície do elemento.

O ANSYS 17.0 permite considerar a transferência de calor por radiação de quatro modos distintos: pelo uso de elemento finito linear de radiação; pelo uso de elemento finito de superfície de contato com a opção radiação; pela geração de uma matriz de radiação ou pelo uso do método solução de irradiação. No presente trabalho optou-se pelo uso do elemento de superfície de contato com a opção radiação, onde os elementos de superfície modelados sobre os elementos sólidos permitem a introdução do efeito da radiação entre um ponto e uma superfície, sendo necessário fornecer como dados de entrada a emissividade dos materiais e a constante de Stefan-Boltzmann.

#### 4.2 ELEMENTOS FINITOS

Na elaboração dos modelos numéricos para a análise térmica foram utilizados dois tipos de elementos finitos seguindo a mesma estratégia adotada em Regobello (2007): o SOLID70, para modelar o pilar misto de aço preenchido por concreto, e o SURF152, para aplicar ao modelo as condições de contorno referentes à carga térmica.

O SOLID70, mostrado na Figura 4.1, é um elemento finito tridimensional do tipo sólido que possui oito nós, com um grau de liberdade em cada nó, no caso, a temperatura. O SURF152, mostrado na Figura 4.2, possui de quatro a nove nós, além de um nó extra para simular efeitos térmicos, todos com apenas um grau de liberdade, a temperatura.





Pyramid Option

O.P

Fonte: ANSYS 17.0



Fonte: ANSYS 17.0

O elemento SURF152 pode ser usado para vários carregamentos e efeitos de superfície em análises térmicas tridimensionais, ele pode ser sobreposto à face de vários elementos, permitindo que vários carregamentos e efeitos de superfície possam ser aplicados simultaneamente.

Esse elemento possui um nó, denominado "extra", que possibilita a aplicação de efeitos de radiação ou convecção, apenas um por vez. Dessa forma, dois elementos finitos foram sobrepostos, um para a ação térmica de convecção e outro para a ação térmica de radiação.

As propriedades atribuídas ao elemento SURF152 são o fator de emissividade, constante de Stefan-Boltzmann e o coeficiente de convecção.

A propagação da temperatura da face externa do tubo de aço para o seu interior ocorre por condução, de modo que a temperatura do aço se transfere para o núcleo de concreto pelo acoplamento dos nós do aço e do concreto que estão em contato na interface dos dois materiais. Nesse caso, a mesma temperatura identificada no nó do elemento de aço é imposta ao nó do elemento do concreto, então a propagação da temperatura da face externa do núcleo de concreto para o seu interior também ocorre por condução.

# 4.3 CONSIDERAÇÕES SOBRE O MODELO

O modelo de pilar misto foi criado com dois volumes, um tubo com espessura da parede igual ao do perfil de aço e um cilindro interno ao tubo para representar o núcleo de concreto. As propriedades inerentes a cada material foram atribuídos aos volumes correspondentes.

A malha do modelo foi criada visando o acoplamento dos nós na interface aço e concreto, para que a transferência de calor ocorresse de forma correta. Na Figura 4.3 é possível notar que os nós para os elementos de aço e de concreto, na interface entre os dois materiais, são correspondentes.

Figura 4.3 - Malha do modelo com destaque aos nós acoplados na interface aço e concreto



Fonte: Autor

No cálculo da matriz de condutividade da superfície de radiação utilizou-se o valor da emissividade, inserido como propriedade do material, a constante Stefan-Boltzmann e o fator de forma, sendo esses últimos inseridos como constantes reais. O fator de forma padrão foi adotado igual a 1 (um), como sugerido por Regobello (2007).

O cálculo da matriz de condutividade da superfície de convecção utilizou o coeficiente de convecção, que foi inserido sobre o elemento como carregamento térmico.

As propriedades térmicas inerentes aos materiais, como o calor específico, a emissividade, o alongamento térmico, a condutividade térmica e a densidade foram definidas com base na

ABNT NBR 14323:2013 para o aço e com base na NBR 15200:2012 para o concreto. Todas essas propriedades já foram demonstradas no Capítulo 2.

Vale ressaltar, sobre a definição das propriedades térmicas do aço e do concreto, que as normas brasileiras seguem de forma idêntica os cálculos estabelecidos pelas normas EN 1993 1-2:2005, que determina as propriedades térmicas do aço, e EN 1994 1-2:2005, que determina as propriedades térmicas do concreto.

Para que não fosse necessário fazer conversão de unidade de temperatura para Kelvin, utilizou-se o comando TOFFST, do ANSYS, com o valor de 273. Desse modo, a temperatura e os demais dados relacionados a ela foram fornecidos em °C. A temperatura ambiente inicial adotada foi de 20 °C.

# 5 VALIDAÇÃO DO MODELO NUMÉRICO

A validação do modelo numérico criado no programa computacional ANSYS 17.0 foi realizada de duas formas. Utilizou-se uma pesquisa experimental e o programa computacional desenvolvido na Universidade de São Paulo, o ATERM.

### 5.1 MODELO EXPERIMENTAL DE REFERÊNCIA

Os dados experimentais utilizados para a validação do presente trabalho foram obtidos por Pires (2013) em ensaios de pilares mistos de aço e concreto com restrições axial e rotacional em situação de incêndio.

O programa experimental foi realizado no Laboratório de Ensaios de Materiais e Estruturas da Universidade de Coimbra, em Portugal. O objetivo principal do trabalho foi verificar a influência de alguns parâmetros na resistência dos pilares mistos quando submetidos a altas cargas térmicas.

As principais características desses ensaios foram analisadas, em específico as características que influenciam nos resultados de variação de temperatura, visto que o presente trabalho é um estudo térmico.

#### 5.1.1 DESCRIÇÃO DOS ENSAIOS

Todos os corpos de prova ensaiados foram fabricados com perfis de aço de seção tubular circular, de aço S355, com dois diferentes diâmetros externos, 219,1 mm e 168,3 mm, ambos com 6,0 mm de espessura. Concreto de classe C25 e C30 foram utilizados na fabricação dos corpos de prova.

Os pilares mistos ensaiados possuíam comprimento total de 3,0 metros, porém somente os 2,5 metros centrais eram diretamente expostos ao aquecimento do forno. Nas extremidades superior e inferior do pilar, foi previsto uma placa de aço com furos, a fim de permitir a liberação do vapor de água proveniente do concreto no momento do aquecimento.

O modelo do ensaio foi composto principalmente por um pórtico que simula as restrições oriundas da estrutura envolvente do pilar, um forno para simular o incêndio e aparatos de medição de carga e temperatura, conforme Figuras 3.4 e 3.5.

Para a medição da temperatura, todos os pilares mistos totalmente preenchidos possuíam quatro termopares por seção e cinco seções ao longo do comprimento. A Figura 5.1 mostra as dimensões geométricas dos pilares ensaiados, com a definição dos cinco pontos onde a temperatura foi medida.





Fonte: Pires (2013)

O aquecimento do pilar ocorre por meio de um forno composto por três módulos, dois com 1 m de altura e outro de 0,5 m de altura. Os módulos foram superpostos um ao outro formando uma câmara de 1,5 m x 1,5 m x 2,5 m em volta dos elementos ensaiados. O forno aquece os elementos por meio do calor gerado pelas resistências elétricas distribuídas nas quatro paredes do mesmo, conforme mostra a Figura 5.2. Cada módulo possui uma fonte de alimentação

individual, de forma que o calor gerado por cada seguimento do forno pode ser controlado separadamente.



Figura 5.2 - Forno modular do ensaio

Fonte: Pires (2013)

Para as curvas temperatura *versus* tempo a serem atingidas pelo forno, buscou-se assemelhar a curva de incêndio-padrão, curva ISO 834 (1975). Apesar dos resultados próximos, nos 30 minutos iniciais não se conseguiu com exatidão a concomitância das curvas, como pode ser observado na Figura 5.3.



Figura 5.3 - Curva temperatura versus tempo para os ensaios realizados

Fonte: Pires (2013)

No total, Pires (2013) ensaiou 40 pilares, onde oito eram mistos totalmente preenchidos. Nesses oito pilares mistos havia as variações de dois diâmetros; dois carregamentos centrados e dois níveis de restrições axial e rotacional. Visto que o presente trabalho corresponde a um estudo térmico, a única das variações citadas que influenciam no gradiente térmico é o diâmetro dos tubos.

### 5.2 PROGRAMA COMPUTACIONAL ATERM

O programa computacional ATERM, desenvolvido por Pierin (2011) em sua Tese de Doutorado, pela Universidade de São Paulo, tem como base o Método dos Elementos Finitos e é utilizado para efetuar análise térmica de estruturas em domínios bidimensionais de qualquer geometria em regime transiente ou permanente. A Figura 5.4 apresenta o fluxograma com os módulos que compõem o programa de análise térmica.



Figura 5.4 – Fluxograma do programa ATERM

Fonte: Pierin (2011)

Como mostrado no fluxograma da Figura 5.4, o programa computacional é dividido em seis módulos principais. No módulo ESTRU são feitas as leituras das coordenadas nodais, das conectividades dos elementos e das temperaturas nodais prescritas, quando houver. O módulo CONV é responsável pela leitura das regiões do modelo a ser analisado onde ocorre transferência de calor por convecção ou radiação.

O terceiro módulo, o QUAD, é responsável pela leitura das propriedades térmicas dos materiais. No módulo INICIAL ocorre a formação da matriz de condutividade e do vetor de ação térmica global do modelo a ser analisado. A análise térmica transiente é permitida pelo módulo TERMICA, onde as matrizes de rigidez são atualizadas no tempo de acordo com as propriedades térmicas dos materiais.

Por fim, no módulo ATERMVIEW, desenvolvido no ambiente MATLAB, permite a visualização gráfica da distribuição de temperaturas para todos os instantes de tempo, além da construção de gráficos que mostram a evolução da temperatura nodal com o passar do tempo.

Para validar o programa de análise térmica ATERM, Pierin (2011), realizou três simulações numéricas cujos resultados foram comparados aos obtidos por meio do programa Super Tempcalc, reconhecido mundialmente na análise térmica de estruturas em situação de incêndio.

# 5.3 RESULTADOS DA VALIDAÇÃO

#### 5.3.1 VALIDAÇÃO COM MODELO EXPERIMENTAL

Nos ensaios realizados por Pires (2013), dois diâmetros de tudo de aço foram utilizados, sendo um com diâmetro de 168,3 mm e outro com 216,1 mm, ambos com espessura da parede de 6 mm.

A elevação da temperatura na região aquecida tem como base as curvas temperatura *versus* tempo do forno apresentada pelo autor e a curva padrão para incêndio, e foram aplicadas a um nó extra criado bem próximo à viga. Como o ensaio durou aproximadamente 30 minutos, a análise térmica foi realizada durante o mesmo tempo.

Conforme descrito no item 5.1.1, o forno é composto por dois módulos de 1 metro e um módulo de 0,5 metros. Dessa forma, a ação térmica foi aplicada em apenas 2,5 metros do comprimento total do pilar misto.

Para o pilar misto preenchido com concreto com diâmetro de 168,3 mm, a Figura 5.5 mostra a variação de temperatura no pilar ao longo do seu comprimento e o gradiente da temperatura na região interna do pilar considerando a curva de temperatura do forno, enquanto a Figura 5.6 mostra os mesmos resultados considerando o pilar aquecido segundo a curva de incêndio-padrão, curva ISO 834 (1975). Percebe-se que a distribuição de temperatura no pilar em ambas as considerações é semelhante, sendo que nos pontos nodais as temperaturas são diferentes.

Os gráficos das Figuras 5.7 e 5.8 comparam os resultados nodais obtidos numericamente, quando considerada a curva temperatura *versus* tempo do forno e quando considerada a curva padrão de incêndio, com os obtidos experimentalmente por Pires (2013) nos termopares instalados nas seções S1 e S3. A localização das seções S1 e S3 e o posicionamento dos pontos nodais (T1 ao T4) foram mostrados na Figura 5.1.

Figura 5.5 – Gradiente de temperatura no pilar de 168,3 mm de diâmetro considerando a curva de temperatura do forno



Fonte: Autor



Figura 5.6 – Gradiente de temperatura no pilar de 168,3 mm de diâmetro considerando a curva ISO 834

Fonte: Autor

Figura 5.7 – Comparação da evolução da temperatura em pontos da seção S1 do pilar de 168,3 mm



Fonte: Autor



Figura 5.8 – Comparação da evolução da temperatura em pontos da seção S3 do pilar de 168,3 mm

Fonte: Autor

Os mesmos resultados são apresentados nas Figuras 5.9 a 5.12 para o pilar misto preenchido com concreto de densidade normal com diâmetro de 219,1 mm.

Figura 5.9 – Gradiente de temperatura no pilar de 219,1 mm de diâmetro considerando a curva de temperatura do forno



Fonte: Autor



Figura 5.10 – Gradiente de temperatura no pilar de 219,1 mm de diâmetro considerando a curva ISO 834

Figura 5.11 – Comparação da evolução da temperatura em pontos da seção S1 do pilar de 219,1 mm



Fonte: Autor



Figura 5.12 – Comparação da evolução da temperatura em pontos da seção S3 do pilar de 219,1 mm

Fonte: Autor

Quando comparados os resultados numéricos que consideram a curva real do forno, nota-se pelos gráficos apresentados que os resultados, nos 30 minutos iniciais, não são próximos aos obtidos experimentalmente por Pires (2013). Porém é possível perceber em algumas curvas que a tendência é de aproximação à medida que o tempo de incêndio aumenta. Ocorre que em fornos elétricos os resultados experimentais começam a apresentar proximidades com os numéricos após os 30 minutos, porém não foram apresentados os dados da curva do forno após esse tempo. Esse fato é visto nas diferenças percentuais dos resultados obtidos que diminuem ao passo que o tempo de incêndio aumenta. Como exemplo, no caso do pilar de diâmetro de 168,3 mm, após 28 minutos de incêndio as diferenças percentuais dos resultados para o ponto T1 e T4 são respectivamente 6% e 4%.

Em alguns casos, considerar a curva de incêndio-padrão e não a real do forno resultou em diferenças menores nas temperaturas. Ocorre que na curva real do forno a temperatura inicial é de aproximandamente 100°C, então o pilar misto sofre um aquecimento mais rápido nos instantes iniciais, dessa forma, para o mesmo instante de tempo, resulta em temperaturas maiores do que quando os mesmo modelos consideram a curva ISO 834 (1975), que posssui temperatura inicial de 20°C.

Algumas diferenças que se destacam, como a evolução da temperatura na seção S1 de ambos os pilares, podem ser explicadas por imprevistos que podem ocorrer em experimentos. Visto o comportamento de alguns resultados experimentais suspeita-se que o posicionamento dos termopares dentro do pilar foram comprometido no momento da fabricação dos corpos de prova, e em alguns casos é possível que esses tenham sofrido algum dano.

#### 5.3.2 VALIDAÇÃO COM MODELO NUMÉRICO

Os modelos também foram validados com os resultados numéricos obtidos no programa computacional ATERM. Para essa comparação, ambos modelos numéricos consideraram que os pilares mistos estavam expostos ao incêndio-padrão, ou seja, foi utilizada a curva ISO 834 (1975).

Nas Figuras 5.13 e 5.14 são mostrados, respectivamente, para pilares mistos de 168,3 mm e 219,1 mm de diâmetro com 6 mm de espessura do tubo de aço em ambos, o gráfico com a comparação dos resultados obtidos no programa computacional ATERM e obtidos no modelo numérico proposto desenvolvido no ANSYS 17.0. As curvas representam a evolução da temperatura no ponto externo do tubo de aço, ponto T1, e no ponto central do núcleo do concreto, ponto T4.







Figura 5.14 – Comparação da evolução da temperatura em pontos da seção S3 do pilar de 219,1 mm utilizando o ANSYS e o ATERM

Fonte: Autor

Os resultados são satisfatórios, visto que as curvas são muito próximas e as diferenças percentuais máximas dos valores de temperatura são da ordem de 1%.

## 6 ESTUDO PARAMÉTRICO

Após validação do modelo numérico com os ensaios experimentais de Pires (2013) e com o programa computacional ATERM, desenvolvido por Pierin (2011), foram realizadas análises paramétricas para o estudo da influência do volume de concreto e do volume de aço na elevação de temperatura do pilar misto quando esses são submetidos a cargas térmicas de um incêndio-padrão determinado pela ISO 834 (1975).

Foram utilizados trinta e cinco perfis tubulares circulares comerciais, sendo que os perfis selecionados variam em cinco diâmetros e em sete espessuras da parede do tubo. Todos os pilares mistos estudados são perfis de aço preenchidos com concreto de densidade normal.

Os diâmetros utilizados na análise foram: 141,3 mm; 168,3 mm; 219,1 mm; 273,0 mm e 323,8 mm. As espessuras do tubo de aço utilizadas foram: 6,4 mm; 7,1 mm; 8,0 mm; 10,0 mm; 12,5 mm; 16,0 mm e 17,5 mm.

Os trinta a cinco modelos estudados serão identificados pelo perfil tubular correspondente, por exemplo, o modelo TC\_141,3\_6,4 corresponde ao pilar misto tubular circular preenchido com concreto com 141,3 mm de diâmetro e 6,4 de espessura de parede do tubo.

Para comparações, foi analisada numericamente, via Ansys, a elevação de temperatura dos tubos de aço sem preenchimento com concreto e foi calculada analiticamente a elevação de temperatura para pilares de aço seguindo a formulação proposta pela ABNT NBR 14323:2013.

# 6.1 INFLUÊNCIA DO VOLUME DE CONCRETO

As curvas temperatura *versus* tempo na Figura 6.1 mostram a evolução da temperatura para os pilares mistos com espessurado tubo de aço de 6,4 mm e 17,5 mm. As curvas representam, para cada um dos cinco diâmetros estudados, as temperaturas na face externa do tubo de aço, ponto T1, e as temperaturas no núcleo de concreto, ponto T4, pontos definidos na Figura 5.1. Vale destacar que quanto maior o diâmetro do pilar misto e mantendo-se a mesma espessura da parede de aço, a área do núcleo de concreto e consequentemente o volume de concreto aumenta.

Nota-se que que o tamanho do núcleo de concreto não exerce grande influência na temperatura do ponto T1, porém pode-se perceber que quanto maior o diâmetro do pilar, menor é a temperatura nesse ponto. Esse comportamento se deve ao fato de que o concreto absorve a temperatura do aço, dessa forma diminuindo a sua temperatura. Portanto uma maior área preenchida com concreto diminui as temperaturas finais ao que o aço é exposto.

Ainda sobre as temperaturas alcançadas no ponto T1 dos pilares em estudo, percebe-se que no pilar misto com espessura do tubo de 17,5 mm, as diferenças de temperatura nesse ponto sofrem maior influência do que quando comparados ao pilar misto com espessura menor do tubo.

Quando observadas as curvas nos pontos T4 dos pilares, percebe-se que a influência exercida nas temperaturas alcançadas no núcleo de concreto é considerável. O fenômeno de condução de calor para o interior do pilar ocorre da mesma forma para pilares com grandes diâmetros e pequenos diâmetros, porém em pilares mais robustos o calor atinge o núcleo do concreto em tempo maior do que aquele que atinge em pilares mais esbeltos. Dessa forma, para um mesmo tempo de incêndio, a temperatura no núcleo de concreto é, como se esperava, maior em pilares mistos mais esbeltos.



Figura 6.1 - Variação de temperatura em função do diâmetro do pilar misto

Fonte: Autor

No Anexo A.1 são mostrados todas as curvas temperatura *versus* tempo utilizadas para a análise da influência do volume de concreto na evolução da temperatura dos pilares mistos quando submetidos ao incêndio-padrão. Os gráficos são para cada uma das sete espessuras dos tubos de aço, com as curvas variando os diâmetros dos pilares mistos tubulares circulares.

### 6.2 INFLUÊNCIA DO VOLUME DE AÇO

Os gráficos temperatura *versus* tempo da Figura 6.2 mostram a evolução da temperatura para os pilares mistos com diâmetro de 141,3 mm e 168,3 mm. As curvas representam, para cada um dos cinco diâmetros estudados, as temperaturas na face externa do tubo de aço, ponto T1, e as temperaturas no núcleo de concreto, ponto T4. Vale destacar que mantendo o diâmetro do tubo e alterando a espessura do mesmo, a área e consequentemente o volume de aço também se altera, sendo ele maior ao passo que a espessura aumenta.

É percebido pela análise das curvas que o volume de aço tem baixa influência na temperatura alcançada no ponto da face externa do tubo de aço. Porém, nota-se que quanto maior a espessura do tubo, menor é a temperatura final nesse ponto. Um volume de aço maior exige um tempo maior para ele se aquecer, dessa forma resultando em uma temperatura menor.

Ao contrário do que ocorre com a variação do volume de concreto, o volume de aço não apresenta grande influência na variação de temperatura no núcleo. Apesar de as diferenças não serem muito grandes, é possível perceber um aumento de temperatura no ponto central do pilar misto à medida que área de aço aumenta.





Fonte: Autor

No Anexo A.2 são mostrados todas as curvas temperatura *versus* tempo utilizadas para a análise da influência do volume de aço na evolução da temperatura dos pilares mistos quando submetidos ao incêndio-padrão. Os gráficos são para cada um dos cinco diâmetros dos pilares, com as curvas variando nas espessuras dos tubos de aço.

## 6.3 COMPARAÇÃO COM PILAR TUBULAR DE AÇO

As curvas temperatura *versus* tempo da Figura 6.3 mostram a evolução da temperatura para os pilares mistos com 219,1 mm de diâmetro no ponto da face externa do tubo de aço, ponto T1, e no ponto central do núcleo do concreto, ponto T4. Nas mesmas curvas são mostradas a evolução de temperatura para o pilar de aço, ou seja, tubo de aço sem preenchimento de concreto, e a curva obtida pela formulação apresentada pela ABNT NBR 14323:2013 para o cálculo da temperatura em pilares de aço.

A curva obtida pela ABNT NBR 14323:2013 se aproxima da curva obtida numericamente para os pilares de aço. Ambas se distanciam das curvas de temperatura versus tempo para os pilares mistos. Isso demonstra a capacidade do concreto em resfriar o elemento estrutural.

Após 30 minutos de incêndio, as diferenças são de aproximadamente 20% quando comparadas a temperatura no pilar misto tubular, obtida via análise numérica, e a temperatura obtida analiticamente para pilares tubulares de aço. Já quando comparadas as temperaturas obtidas numericamente para pilares mistos e para pilares de aço, ambos tubulares, as diferenças são de aproximadamente 12% sendo a maior no pilar de aço.

Como o dimesionamento desses sistemas estruturais dependem da temperatura a ser atingida, pois os fatores de redução das propriedades dos materiais são menores ao passo que a temperatura aumenta, é de se esperar que os pilares mistos de aço e concreto apresentem um comportamento mais adequado ao incêndio do que os pilares somente de aço ou somente de concreto.

No Anexo A.3 são mostradas as curvas temperatura *versus* tempo, referentes aos outros modelos estudados, utilizados para a comparação dos resultados obtidos numericamente para pilares mistos com os resultados numericos e analíticos segundo a ABNT NBR 14323:2013 para pilares de aço.


Figura 6.3 - Comparação da evolução da temperatura com a ABNT NBR 14323:2013

Fonte: Autor

#### 7 CONCLUSÕES

O presente trabalho apresentou um estudo térmico de pilares mistos de aço e concreto, sem revestimento contra fogo, quando submetidos a cargas térmicas de incêndio, prescrito pela ISO 834 (1975). Os pilares mistos estudados são do tipo tubulares circulares totalmente preenchidos com concreto de densidade normal.

O estudo foi elaborado por meio de modelos numéricos em elementos finitos utilizando o programa computacional ANSYS 17.0 que simularam o experimento realizado por Pires (2013) da Universidade de Coimbra. Nesse experimento, um pilar misto tubular circular sem revestimento foi aquecido no forno modular elétrico e submetido a vários níveis de carregamento e restrições.

Os resultados obtidos numericamente para a elevação de temperatura em pontos do pilar misto foram comparados aos experimentais e as observações foram descritas no capítulo 5.

Para efeito de comparação e validação dos modelos propostos, os resultados obtidos numericamente também foram comparados aos resultados obtidos no programa ATERM, desenvolvido por Pierin (2011). O comportamento das curvas temperatura *versus* tempo foram similares em ambos resultados, conforme é mostrado no capítulo 5.

Após a validação numérica, foram realizadas análises paramétricas considerando trinta e cinco perfis comerciais, sendo esses perfis com cinco diferentes diâmetros e sete diferentes espessuras da parede do tubo de aço. Os resultados térmicos obtidos foram usados para analisar a influência do volume de concreto e do volume de aço na elevação da temperatura do elemento estrutural.

O primeiro parâmetro estudado foi o volume de concreto, e notou-se que ele influencia principalmente no aumento de temperatura no núcleo de concreto do pilar, sendo que um menor diâmetro resulta em temperaturas mais elevadas no núcleo.

O segundo parâmetro foi o volume de aço, onde ele demostrou exercer mais influência na temperatura alcançada no perfil de aço, ou seja, o oposto do que ocorre com o volume de concreto. Quanto maior a área de aço e consequentemente o volume de aço, menor é a temperatura na face externa do pilar.

Também foram modelados pilares de aço, ou seja, não preenchidos com concreto e os resultados térmicos obtidos foram comparados aos obtidos para os pilares mistos. Também

foram obtidos resultados analíticos segundo a ABNT NBR 14323:2013 para pilares de aço a fim de comparação com os resultados numéricos para pilares mistos de aço e concreto.

A partir dessa comparação foi possível concluir a vantagem do uso do sistema estrutural misto, ao menos no que se refere à diminuição da temperatura no elemento estrutural. Como as temperaturas para um mesmo instante de tempo são sempre menores para os pilares mistos do que para os pilares de aço, resultando em menor perda das propriedades dos materiais, há indícios, como exposto por Santos (2009), que o comportamento estrutural dos pilares mistos em situação de incêndio é melhor que os pilares de aço.

A análise de estruturas em situação de incêndio, em especial estruturas mistas de aço e concreto, é uma área de estudo muito ampla que requer maior aprofundamento. Sendo assim, sugere-se como temas futuros:

- Análise numérica estrutural e termo-estrutural de pilares mistos de aço e concreto de seção circular em situação de incêndio;
- Análise numérica de pilares mistos de aço e concreto de seção circular restrigidos axialmente e rotacionalmente em situação de incêndio;
- Análise numérica de outros tipo de pilares mistos de aço e concreto (preenchidos, totalmente revestidos e parcialmente revestidos) em situação de incêndio;
- Análise de outros elementos mistos, vigas mistas e lajes mistas, em situação de incêndio, com e sem restrições.

### **REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS**

ANSYS INC. (2016). Ansys Release 17.0 – Documentation. Canonsburg, Estados Unidos.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. (2004). ABNT NBR 8681:2004 Ações e segurança nas estruturas - Procedimento. Rio de Janeiro.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. (2008). ABNT 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. (2012). ABNT NBR 15200:2012 Projeto de estruturas de concreto em situação de incêndio. Rio de Janeiro.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. (2013). ABNT NBR 14323:2013 Projeto de estruturas de aço e de estruturas mistas de aço e concreto de edifícios em situação de incêndio. Rio de Janeiro.

AZEVEDO, M. S. (2005). Determinação da temperatura em elementos estruturais de aço externos a edificações em situação de incêndio. Dissertação de Mestrado, Universidade Federal do Espírito Santo, ES.

BUCHANAN, A. H. (2001). *Structural Design for Fire Safety*. 1<sup>a</sup> ed. Editora Wiley & Sons. New Zealand.

COSTA, R.E.N. (2005). *Projeto de pilares mistos preenchidos com concreto refratário de alto desempenho à temperatura ambiente e em situação de incêndio*. Dissertação de Mestrado, Escola de Engenharia, Universidade Federal de Minas Gerais, MG.

DING, J., WANG, Y.C. (2008). *Realistic modelling of thermal and structural behavior of unprotected concrete filled tubular columns in fire*. Journal of Constructional Steel Research. vol. 64, p. 1086–1102.

EUROPEAN COMMITTEE FOR STANDARDIZATION. (2005). EN 1993 1-2:2005 Eurocode 3 - Design of steel structures - Part 1-2: General rules - Structural fire design. Brussels.

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

HAN, L.H., ZHAO, X.L., YANG, Y.F., FENG, J.B. (2003). *Experimental Study and Calculation of Fire Resistance of Concrete-Filled Hollow Steel Columns*. Journal of Structure Engineering. vol. 129, p. 346–356.

HAN, L.H., HUO, J.S., WANG, Y.C. (2005). *Compressive and flexural behavior of concrete filled steel tubes after exposure to standard fire*. Journal of Constructional Steel Research. vol. 61, p. 882–901.

HOLMAN, J. P. (1983). *Transferência de Calor*. 1<sup>a</sup> ed. Editora McGraw-Hill do Brasil. São Paulo.

INTERNATIONAL ORGANIZATION FOR STANDARDIZATION. (1975). ISO 834:1975 *Fire-resistance tests - Elements of building construction*. Switzerland.

KERN, D. Q. (1982). *Processos de Transmissão de Calor*. Editora Guanabara Dois. Rio de Janeiro.

KODUR, V.K.R. (1998). *Performance of high strength concrete-filled steel columns exposed to fire*. Canadian Journal of Civil Engineering. vol. 25, p. 975–981.

KREITH, F. (1977). Princípios da transmissão de calor. Editora Edgard Blücher. São Paulo.

NÓBREGA, A.P.M. (2003). Análise do comportamento de pilares mistos aço-concreto em situação de incêndio. Dissertação de Mestrado, Escola de Engenharia, Universidade Federal de Minas Gerais, MG.

PIERIN, I. (2011). A instabilidade de perfis formados a frio em situação de incêndio. Tese de Doutorado, Escola Politécnica, Universidade de São Paulo, SP.

PIRES, T.A.C, RODRIGUES, J.P.C, SILVA, J.J.R. (2012). *Fire resistance of concrete filled circular hollow columns with restrained thermal elongation*. Journal of Constructional Steel Research. vol. 77, p. 82–94.

PIRES, T.A.C. (2013). *Fire resistance of composite columns made of concrete filled circular hollow sections and with restrained thermal elongation*. Tese de Doutorado, Faculty of Sciences and Technology, University of Coimbra, Coimbra.

REGOBELLO, R. (2007). Análise numérica de seções transversais e de elementos estruturais de aço e mistos de aço e concreto em situação de incêndio. Dissertação de Mestrado, Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, SP.

SANTOS, R.T. (2009). *Modelos numéricos de pilares mistos curtos de seções circulares de aço preenchidos com concreto em situação de incêndio*. Dissertação de Mestrado, Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, SP.

SILVA, V. P. (1997). *Estruturas de aço em situação de incêndio*. Tese de Doutorado, Escola Politécnica, Universidade de São Paulo, SP.

SILVA, V.P; VARGAS, M.R; ONO, R. (2010). *Prevenção contra incêndio no Projeto de Arquitetura (Construção com Aço).* 1<sup>ª</sup> ed. Instituto Aço Brasil / Centro Brasileiro de Construção em Aço. Rio de Janeiro.

VARGAS, M.R.; SILVA, V.P. (2003). *Resistência ao Fogo das Estruturas de Aço*. 1<sup>a</sup> ed. Instituto Brasileiro de Siderurgia / Centro Brasileiro da Construção em aço. Rio de Janeiro.

YIN, J., ZHA, X., LI, L. (2006). *Fire resistance of axially loaded concrete filled steel tube columns*. Journal of Constructional Steel Research. vol. 62, p. 723–729.

ZHA, X. (2002). *FE analysis of fire resistance of concrete filled CHS columns*. Journal of Constructional Steel Research. vol. 59, p. 769–779.

#### ANEXO A.1 – INFLUÊNCIA DO VOLUME DE CONCRETO

















Fonte: Autor



Fonte: Autor

Figura A.6 – Espessura de 16,0 mm



Fonte: Autor



Fonte: Autor

## ANEXO A.2 – INFLUÊNCIA DO VOLUME DE AÇO





Fonte: Autor



Figura A.11 – Diâmetro de 273,0 mm



Fonte: Autor









Figura A.13 – Pilares mistos com 141,3 mm de diâmetro

Fonte: Autor



Figura A.14 – Pilares mistos com 168,3 mm de diâmetro

Fonte: Autor



Figura A.15 – Pilares mistos com 273,0 mm de diâmetro

Fonte: Autor



Figura A.16 – Pilares mistos com 323,8 mm de diâmetro

Fonte: Autor

# **APÊNDICE A**

Fluxograma de cálculo para dimensionamento de pilares mistos de aço e concreto preenchidos de seção circular em situação de incêndio.







### **APÊNDICE B**

Fluxograma de cálculo para dimensionamento de pilares mistos de aço e concreto preenchidos de seção circular à temperatura ambiente.

















