

UNIVERSIDADE CATÓLICA DE PERNAMBUCO
CARLOS ALEXANDRE SANTOS SALES

**ANÁLISE DA RESISTÊNCIA AO FOGO DE BLOCOS DE ALVENARIA CERÂMICA
DE VEDAÇÃO UTILIZANDO PROTEÇÃO DE TINTA INTUMESCENTE**

Recife
2016

CARLOS ALEXANDRE SANTOS SALES

**ANÁLISE DA RESISTÊNCIA AO FOGO DE BLOCOS DE ALVENARIA CERÂMICA
DE VEDAÇÃO UTILIZANDO PROTEÇÃO DE TINTA INTUMESCENTE**

Dissertação apresentada à Universidade Católica de Pernambuco como exigência para obtenção do título de Mestre Engenharia Civil.

Orientadora: Prof^a D.Sc. Eliana Cristina Barreto Monteiro

Recife

2016

CARLOS ALEXANDRE SANTOS SALES

**ANÁLISE DA RESISTÊNCIA AO FOGO DE BLOCOS DE ALVENARIA CERÂMICA
DE VEDAÇÃO UTILIZANDO PROTEÇÃO DE TINTA INTUMESCENTE**

Dissertação apresentada à Universidade Católica de Pernambuco como exigência para obtenção do título de Mestre Engenharia Civil.

Aprovado em ____/____/____

BANCA EXAMINADORA

Prof^a. D.Sc. Eliana Cristina B. Monteiro

Prof. D.Sc. Romilde Almeida de Oliveira

Prof. D.Sc. Ângelo Just da Costa e Silva

Dedico este trabalho a Deus por tudo aquilo que fez em minha vida e por toda força e ajuda necessária para que isso fosse possível.

AGRADECIMENTOS

Para que pudesse chegar até esse momento, muitas pessoas foram importantes e devem ser lembradas como forma singela de agradecimento.

Aos meus pais por todo apoio, conhecimento, sabedoria e amor com os quais me educaram e incentivaram ao longo de minha jornada.

Aos meus filhos, Bruna Vitória e Carlos Artur, pelo amor incondicional e compreensão que sempre tiveram em meus momentos de ausência.

A minha amada companheira Adriana Frazão por todo amor, apoio e incentivo em minha carreira profissional.

Ao meu amigo e Comandante Geral do Corpo de Bombeiros Militar de Pernambuco, Coronel BM Manoel Francisco de Oliveira Cunha Filho, por toda ajuda e incentivo que sempre teve para meu crescimento profissional.

À minha orientadora Professora D.Sc. Eliana Cristina Barreto Monteiro por todo apoio, compreensão, e valiosas contribuições que tornaram esse trabalho possível.

Aos demais professores do Mestrado Acadêmico em Engenharia Civil da Universidade Católica de Pernambuco, por todos os ensinamentos e incentivos ao longo desses dois anos.

Aos laboratoristas Washington e Glaizer da Universidade Católica de Pernambuco por todo apoio e ajuda durante a parte experimental deste trabalho.

Ao Sr. Rogério Lin da empresa CKC do Brasil por todo apoio e incentivo a essa pesquisa, bem como em prevenção e proteção contra incêndio no Brasil.

RESUMO

Os incêndios estão presentes na história de várias cidades do mundo e, em algumas delas, chegaram a protagonizar mudanças significativas no desenho urbano e nas características construtivas de suas edificações. No Brasil, o conhecimento sobre segurança contra incêndio em edificações só se tornou assunto de importância após duas grandes tragédias nacionais: os incêndios nos edifícios Andraus (em 1972, com dezesseis mortos) e Joelma (em 1974, com cento e oitenta e nove mortos), ambos na cidade de São Paulo. Atualmente, após a tragédia ocorrida na boate Kiss em Santa Maria - RS em 2013, que culminou com a morte de 242 jovens, muitas alterações nas legislações estaduais de proteção contra incêndio estão sendo sugeridas no Congresso Nacional e nas Assembleias Legislativas Estaduais, porém, em sua maioria, sem respaldo científico e normativo. Juntamente com as mudanças legislativas, muitos produtos e equipamentos surgem diariamente com o objetivo de proteger a vida humana e o patrimônio histórico e cultural. Nesse sentido, surgem as proteções passivas por tintas intumescentes que, conforme se verifica com os resultados desse trabalho, possuem a propriedade de manter o conforto e isolamento térmico adequados, além de manter a resistência a compressão e capacidade máxima de carga dos blocos cerâmicos de vedação em níveis aceitáveis pela norma brasileira, após a exposição direta a chama durante um período de 60 minutos.

Palavras chave: resistência, fogo, alvenaria, tintas intumescentes.

ABSTRACT

Fires are present in the history of cities around the world, and some of them came to star in significant changes in urban design and the construction characteristics of their buildings. In Brazil, the knowledge Fire Safety in buildings only became a matter of importance after two great national tragedies: fires in Andraus buildings (in 1972, with sixteen dead) and Joelma (in 1974 with one hundred eighty-nine dead) both in São Paulo. Currently, after the tragedy at Kiss nightclub in Santa Maria - RS in 2013, which culminated in the death of 242 young people, many changes in state laws fire protection are being suggested in Congress and in State Legislative Assemblies, however, in mostly without scientific and regulatory support. Along with legislative changes, many products and equipment appear daily in order to protect human life and the historical and cultural heritage. In this sense, there are passive protections for intumescent coatings that, as evidenced by the results of this work, have the property to maintain comfort and thermal insulation appropriate, while maintaining resistance to compression and maximum load capacity of sealing ceramic blocks at acceptable levels by the Brazilian standard, after direct exposure to flame for a period of 60 minutes.

Keywords: resistance, fire, brick, intumescent coatings.

LISTA DE ILUSTRAÇÕES

Figura 1 – Estatísticas de Incêndios - Brasil e Pernambuco (2012 a 2015).....	21
Figura 2 – Triângulo do fogo.....	25
Figura 3 – Tetraedro do fogo.....	26
Figura 4 – Curvas padrão tempo x temperatura Eurocode 1 e ASTM E119.....	36
Figura 5 – Gráfico comparativo entre as principais curvas teóricas de incêndio.....	38
Figura 6 – Modelo de um incêndio natural.....	39
Figura 7 – Conceito de Tempo Requerido de Resistência ao Fogo (TRRF).....	40
Figura 8 – Curva de evolução do incêndio celulósico.....	43
Figura 9 – Calor específico para blocos cerâmicos e blocos de concreto.....	52
Figura 10 – Esquema da transferência de calor em uma parede submetida ao fogo.....	60
Figura 11 – Variação da condutividade térmica (W/m°C) para alvenarias com diferentes massas específicas.....	61
Figura 12 – Variação do calor específico para alvenarias.....	62
Figura 13 - Desempenho dos meios de proteção no comportamento do incêndio real.....	64
Figura 14 - Curva de crescimento da temperatura em forno de resistência ao fogo...	77
Figura 15 - Equipamentos para ensaios de ignitibilidade, propagação superficial de chamas e densidade óptica de fumaça.....	80
Figura 16 – Ensaio SBI – Single Burning Item de acordo com a EN 13823.....	81
Figura 17 – Conjunto de Blocos de referência do Tipo 1 (Não Saturados).....	85
Figura 18 – Medição das principais dimensões dos blocos.....	85
Figura 19 – Marcação dos blocos de referência (tipo 1).....	86
Figura 20 – Pesagem dos blocos de referência (tipo 1).....	86
Figura 21 – Capeamento dos blocos de referência (tipo 1).....	87
Figura 22 – Imersão dos blocos de referência (tipo 2).....	87
Figura 23 – Blocos do Tipo 3 após aplicação de 2 demãos de tinta intumescente..	89
Figuras 24 e 25 – Ensaio de Resistência à Compressão (antes e depois) do bloco 4 (Tipo 1).....	91
Figura 26 – Resultado do Ensaio de Resistência à Compressão do bloco 4 (Tipo 1).....	92
Figuras 27 e 28 – Ensaio de Resistência à Compressão (antes e depois) do bloco 9 (Tipo 2).....	94

Figuras 29 e 30 – Esquema para exposição dos blocos com proteção passiva.....	96
Figura 31 – Exposição direta à chama por 60 minutos dos blocos 14 e 15 (Tipo 3) temperatura referente ao bloco 15 (a direita).....	97
Figuras 32 e 33 – Ensaio de Resistência à Compressão (antes e depois) do bloco 15 (Tipo 3).....	97
Figura 34 – Exposição direta à chama por 60 minutos dos blocos 14 e 15 (Tipo 4)	99
Figuras 35 e 36 – Ensaio de Resistência à Compressão (antes e depois) do bloco 15 (Tipo 4).....	99
Figura 37 – Comparativo da resistência à compressão dos blocos dos tipos 1 e 2...	104
Figura 38 – Comparativo da carga máxima dos blocos dos tipos 1 e 2.....	105
Figura 39 – Comparativo das temperaturas das faces diretamente expostas para os blocos com e sem proteção passiva, tipos 3 e 4 respectivamente.....	106
Figura 40 – Comparativo das temperaturas das faces imediatamente opostas para os blocos com e sem proteção passiva, tipos 3 e 4 respectivamente.....	107
Figura 41 – Comparativo das temperaturas das faces opostas para os blocos com e sem proteção passiva, tipos 3 e 4 respectivamente.....	108
Figura 42 – Comparativo das resistências à compressão para os blocos com e sem proteção passiva, tipos 3 e 4 respectivamente.....	111
Figura 43 – Comparativo das resistências à compressão para os blocos com e sem proteção passiva, tipos 3 e 4 respectivamente.....	111
Figura 44 –Comparativo da Resistência à Compressão entre Blocos de Referência e Blocos com Proteção Passiva.....	113
Figura 45 –Comparativo da capacidade máxima de carga entre Blocos de Referência e Blocos com Proteção Passiva.....	113

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Temperatura dos gases em função da temperatura.....	35
Tabela 2 – Tempo requerido de resistência ao fogo (TRRF) em minutos.....	41
Tabela 3 – Resistência ao fogo para paredes.....	46
Tabela 4 - Condutividade térmica de materiais cerâmicos.....	49
Tabela 5 – Calor específico de materiais cerâmicos.....	51
Tabela 6 – Condutância térmica de blocos cerâmicos e de concreto.....	53
Tabela 7 - Espessura equivalente mínima (cm) para resistência ao fogo de alvenarias cerâmicas.....	56
Tabela 8 – Medidas de proteção ativa e passiva.....	69
Tabela 9 - Tintas intumescentes empregadas no mercado nacional.....	73
Tabela 10 - Resumo das principais características dos sistemas de proteção antitérmica.....	73
Tabela 11 – Levantamento de dados para os blocos do tipo 1 (não saturado).....	92
Tabela 12 – Levantamento de dados para os blocos do tipo 2 (saturado).....	94
Tabela 13 – Levantamento de dados para os blocos do tipo 3 (com aplicação de tinta intumescente e exposição direta a chama).....	98
Tabela 14 – Levantamento de dados para os blocos do tipo 4 (sem aplicação de tinta intumescente e exposição direta a chama).....	100
Tabela 15 – Dados estatísticos para blocos dos tipos 1 e 2.....	103
Tabela 16 – Resumo de Dados (Resistência Tipos 1 e 2)	103
Tabela 17 – ANOVA (Resistência Tipos 1 e 2).....	103
Tabela 18 – Valores médios e desvios padrão para blocos do tipo 3.....	105
Tabela 19 – Valores médios e desvios padrão para blocos do tipo 4.....	106
Tabela 20 – Resumo de Dados (temperatura direta tipos 3 e 4).....	108
Tabela 21 – ANOVA (temperatura direta tipos 3 e 4).....	109
Tabela 22 – Resumo de Dados (temperatura indireta tipos 3 e 4).....	109
Tabela 23 – ANOVA (temperatura indireta tipos 3 e 4).....	109
Tabela 24 – Resumo de Dados (temperatura - lado oposto do bloco - tipos 3 e 4)	109
Tabela 25 – ANOVA (temperatura - lado oposto do bloco - tipos 3 e 4))	109

Tabela 26 – Resumo de Dados (temperaturas - tipos 3 e 4).....	110
Tabela 27 – ANOVA (temperaturas - tipos 3 e 4)	110
Tabela 28 – Resumo de Dados (resistência à compressão - tipos 3 e 4).....	112
Tabela 29 – Resumo de Dados (resistência à compressão - tipos 3 e 4).....	112
Tabela 30 – ANOVA (Resistência a Compressão- tipos 1 e 3).....	114
Tabela 31 - Ciclos de Manutenção para tintas intumescentes.....	115

LISTA DE SÍMBOLOS

$\vec{q}$	vetor de fluxo de calor por unidade de área;
λ	tensor condutividade térmica;
θ	temperatura;
$\vec{\nabla}$	operador nabla;
A	área de contato (m ²);
θ_2 e θ_1	temperaturas na face fria e aquecida respectivamente (°C);
R	resistência térmica (m ² .° C/W);
ρ_m	massa específica do material (kg/m ³);
$c_m(\theta)$	calor específico do material a temperatura (J/kg.°C);
$\lambda_m(\theta)$	condutividade térmica do material a temperatura (W/m.°C);
Q_k	fluxo de calor por condução no material (W);
λ_m	condutividade térmica do material (W/m°C);
A_m	área exposta ao fogo do material (m ²);
Q	fluxo de calor que atravessa a fronteira por unidade de superfície(W.m ⁻²);
λ	condutibilidade térmica do material em causa (W.m ⁻¹ K ⁻¹);
ΔT	gradiente de temperatura na direção de estudo ($\Delta T = (T_2 - T_1)$);
Δx	espessura da parede (m);
$\dot{m}''$	razão de queima do material (g/m ² s);
$\dot{Q}_F''$	fluxo de calor fornecido pela chama (kW/m ²);
$\dot{Q}_L''$	fluxo de perda de calor na superfície do combustível (kW/m ²);
$\dot{Q}_C''$	razão de desenvolvimento de calor no material (kW);
L_v	calor necessário para produzir os voláteis (kJ/g), (para líquido é o calor latente de evaporação);
A_f	área da superfície do combustível (m ²);
ΔH	calor de combustão dos voláteis (kJ/g);
χ	fator de correção (<1,0) devido a combustão incompleta;
t	tempo (min);

θ_0	temperatura inicial do forno ($10^{\circ}\text{C} \leq \theta_0 \leq 40^{\circ}\text{C}$);
t_e	tempo equivalente (min);
$q_{fi,k}$	valor característico da carga de incêndio específica (MJ/m^2);
γ_n	coeficiente adimensional que leva em conta a presença de medidas de proteção ativa na edificação;
γ_s	coeficiente de segurança que depende do risco de incêndio e das consequências do colapso da edificação;
W	fator associado à ventilação e a altura do compartimento;
K	fator associado às características do material de vedação do compartimento ($\text{min m}^2/\text{MJ}$);
M	fator que depende do material da estrutura;
K	condutividade térmica ($\text{W}/\text{m.K}$);
P	densidade (kg/m^3);
c	calor específico ($\text{J}/\text{kg.K}$);
U_x	condutância térmica ($\text{Kcal}/(\text{m}^2.\text{h}^{\circ}\text{C})$);
R_x	resistência térmica ($\text{m}^2.\text{h}^{\circ}\text{C}/\text{Kcal}$);
k	condutibilidade térmica ($\text{Kcal}/(\text{m}.\text{h}^{\circ}\text{C})$);
x	espessura do material (m);
E_T	espessura equivalente (mm);
V	volume líquido (volume total menos vazios) (m^3);
l	comprimento da unidade(m);
h	altura da unidade (m);
λ_0	condutividade térmica para alvenaria seca ($\text{W}/\text{m}^{\circ}\text{C}$);
$E_{equi.s}$	Espessura Equivalente do bloco (m);
V_s	Volume sólido do bloco (m^3);
C	Comprimento real do bloco (m);e
H	Altura real do bloco (m).

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	16
1.1	JUSTIFICATIVA	16
1.2	CONTEXTUALIZAÇÃO	20
1.3	OBJETIVOS	22
1.3.1	Objetivo Geral	22
1.3.2	Objetivos Específicos	22
1.4	ESTRUTURA DO TRABALHO	22
2	REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	24
2.1	Diferença entre fogo e incêndio	24
2.2	Representação do fogo	25
2.3	Calor e métodos de propagação	26
2.4	Transferência de Calor	29
2.4.1	Radiação	29
2.4.2	Convecção	29
2.4.3	Condução	30
2.5	Tipos de combustão	31
2.6	Produtos resultantes de uma combustão	32
2.7	Razão de queima e de desenvolvimento de calor	33
2.8	Curvas nominais de temperatura	33
2.8.1	Curva padrão tempo-temperatura	34
2.8.2	Curva de fogo externo	36
2.8.3	Curva hidrocarboneto	37
2.9	Curvas naturais	38
2.10	Modelo avançado	39
2.11	Tempo Requerido de Resistência ao Fogo (TRRF)	40
2.12	Processo de desenvolvimento do incêndio	42
2.13	Legislações sobre incêndio	44
2.14	Propriedades de materiais frente ao fogo	48
2.15	Inércia térmica	48
2.16	Propriedades termofísicas dos materiais	49
2.17	Propriedades térmicas das paredes	53
2.18	Teste de alvenaria ao fogo	55

2.18.1 Fatores que influenciam o desempenho ao fogo de paredes de alvenaria.....	57
2.18.2 Resistência ao fogo das paredes de alvenaria	57
2.18.3 Comportamento das paredes em situação de incêndio.....	59
2.18.4 Tijolos.....	60
2.19 Cálculo da resistência ao fogo pela ASTM E119	62
2.20 Sistemas de proteção contra incêndios.....	63
2.20.1 Proteção Ativa	63
2.20.2 Proteção Passiva.....	64
2.21 A reação ao fogo e o sistema global da segurança contra incêndio	65
2.21.1 O edifício seguro e seus requisitos funcionais	65
2.21.2 A segurança contra incêndio nas fases do processo produtivo e de uso do edifício	66
2.21.3 O sistema global da segurança contra incêndio	66
2.22 Conceitos básicos e parâmetros de projeto	68
2.23 Tintas intumescentes.....	70
2.24 Considerações sobre a norma de desempenho – 15575 (2013).....	75
2.24.1 Desempenho estrutural em situações de incêndio	76
2.24.2 Resistência ao fogo de elementos estruturais e de compartimentação	78
2.24.3 Exigências para dificultar inflamação generalizada e limitar a fumaça..	79
3 MATERIAIS E MÉTODOS	82
3.1 MATERIAIS E EQUIPAMENTOS	82
3.2 CARACTERIZAÇÃO DOS TIPOS DE CORPOS DE PROVA	82
3.2.1 Corpo de Prova Tipo 1 (Bloco de Referência – Não Saturado)	84
3.2.2 Corpo de Prova Tipo 2 (Bloco de Referência –Saturado)	88
3.2.3 Corpo de Prova Tipo 3 (com aplicação de tinta intumescente e exposição direta a chama)	88
3.2.4 Corpo de Prova Tipo 4 (sem aplicação de tinta intumescente e exposição direta a chama)	90
3.3 LEVANTAMENTO DE DADOS DOS TIPOS DE CORPOS DE PROVA	91
3.3.1 Corpo de Prova Tipo 1 (Bloco de Referência – Não Saturado)	991
3.3.2 Corpo de Prova Tipo 2 (Bloco de Referência – Saturado)	93
3.3.3 Corpo de Prova Tipo 3 (com aplicação de tinta intumescente e exposição direta a chama)	95

3.3.4 Corpo de Prova Tipo 4 (sem aplicação de tinta intumescente e exposição direta a chama)	99
4 ANÁLISE DOS RESULTADOS	101
5 CONCLUSÕES E SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS.....	117
5.1 CONCLUSÕES	117
5.2 SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS	119
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	120

1 INTRODUÇÃO

1.1 JUSTIFICATIVA

Os incêndios estão presentes na história de várias cidades no mundo e, em algumas delas, chegaram a protagonizar mudanças significativas no desenho urbano e nas características construtivas de suas edificações. Podem ser citados como exemplos os incêndios que ocorreram na cidade de Tóquio, no Japão, ao longo da Era Meiji (total de duzentos e noventa e oito casos com mais de cinquenta casas atingidas entre 1868 e 1912), em Londres (anos 798, 982, 1212 e 1666) no Reino Unido, e em várias cidades dos Estados Unidos (Nova York (1835), Chicago (1871) e Boston (1872)). Tais incêndios aconteceram em escala urbana, ou seja, atingiram centenas ou milhares de edificações.

No Brasil, o conhecimento sobre segurança contra incêndio em edificações só se tornou assunto de importância após duas grandes tragédias nacionais: os incêndios nos edifícios Andraus (em 1972 com dezesseis mortos) e Joelma (em 1974 com cento e oitenta e nove mortos), ambos na cidade de São Paulo.

Apesar dos constantes avanços e preocupações com a questão da segurança contra incêndio nos países desenvolvidos, que refletem na implementação e no desenvolvimento contínuo de normas técnicas e regulamentações, pouco ou quase nada se fez no Brasil até então.

Tanto o incêndio no edifício Andraus como no edifício Joelma demonstraram as consequências da ausência de segurança contra incêndio nos projetos arquitetônicos: a falta de saídas de emergência; a facilidade de propagação de chamas e fumaça tanto pelo interior como pelo exterior do edifício; a falta de controle sobre a utilização de materiais combustíveis; a dificuldade de salvamento e de combate ao fogo; entre outros.

Atualmente, já existem normas e regulamentações brasileiras sobre o assunto e o projetista deve, no mínimo, respeitá-las e empregá-las em seu projeto. No entanto, essas ainda são poucas e muitas necessitam de revisão e atualização. É preciso estar

também ciente que garantir o mínimo exigido legalmente nem sempre corresponde à segurança desejada para um projeto específico. Soluções genéricas podem, em alguns casos, ser menos eficazes. Daí a importância da incorporação de medidas de segurança contra incêndio pelo projetista de forma adequada desde a concepção do projeto, equilibrando custos e benefícios.

No país, o ensaio de resistência frente ao fogo de elementos de vedação é normalizado pela NBR 5628 (2001). Esta norma define, entre outros aspectos, que o ensaio deve ser realizado em escala real e sob a carga real. Entretanto, esse procedimento é de difícil execução, pois exige que o forno ou câmara de ensaio possua uma dimensão compatível com o pé direito da edificação, além de demandar equipamentos especiais para simular o carregamento do qual o elemento estará submetido em obra.

As normas e legislações nacionais de segurança contra incêndio definem que as paredes e elementos de vedação devem possuir um determinado tempo de resistência ao fogo, o qual varia com o tipo de ocupação da edificação e com a altura total. Contudo as sugestões de desempenho de materiais oferecidas pela grande parte desses códigos normalmente são baseadas em conhecimentos empíricos, sendo que os mesmos denotam uma resistência ao fogo bem superior, quando ensaiados em laboratório.

Uma das poucas legislações nacionais que apresenta um leque maior de sugestões de materiais e suas respectivas resistências é a Instrução Técnica 08 (2004) do Corpo de Bombeiros de São Paulo. Esta legislação apresenta a resistência ao fogo de diversos tipos de materiais de vedação, derivados de ensaios em laboratório em escala real.

Pelo fato de na construção civil haver diferentes tipos de materiais de vedação e dentro destes, haver ainda diversas variações, é de grande importância que a resistência ao fogo desses elementos seja definida experimentalmente. O ensaio em escala real é bastante dispendioso e no país existem poucos laboratórios que possuam equipamentos compatíveis para a execução de ensaios na área, motivo pelo qual não existem muitos dados na literatura.

Os tipos de materiais hoje utilizados pela construção civil como fechamento são diversos, podendo ser compostos de blocos cerâmicos, blocos de concreto, paredes de PVC recheadas ou não de concreto, paredes de gesso, blocos sílico calcáreos, paredes de concreto, entre outros. Sendo ainda que esses materiais podem ou não ter função estrutural.

A cerâmica possui uma série de características que a fazem um dos materiais de construção mais utilizados no mundo todo, tais como a resistência, a durabilidade, o isolamento térmico e acústico. Também apresenta bom desempenho ao fogo, pois é um material incombustível, não propaga chamas e não produz fumaça ou gases tóxicos durante o incêndio (ROMAN, 1991).

Como os blocos cerâmicos possuem bom desempenho ao fogo, logicamente, espera-se que uma parede construída com tais blocos também possua boa resistência ao fogo, que, segundo a NBR 14432 (2001), pode ser definida como a propriedade de um elemento de construção de resistir à ação do fogo por determinado período de tempo, mantendo sua *segurança estrutural, estanqueidade e isolamento*, onde aplicável.

A resistência ao fogo das paredes de uma edificação é muito importante para a segurança contra incêndio, uma vez que, em incêndios ocorridos em edifícios de grande altura, constatou-se que as vias de circulação apresentavam uma grande vulnerabilidade à fumaça, ao calor e às chamas, o que dificultava o abandono da edificação e permitia ao incêndio propagar-se rapidamente (ONO, 2007).

Como apresenta boa resistência ao fogo e não produz fumaça ou gases tóxicos, uma parede de alvenaria com blocos cerâmicos torna-se uma boa alternativa para minimizar a propagação do incêndio, proporcionando tanto o isolamento térmico e quanto a estabilidade necessária ao edifício (OLIVEIRA, 1998).

Entretanto, foram encontrados poucos estudos sobre a resistência ao fogo de paredes de alvenaria com blocos cerâmicos, os quais envolveram somente paredes com 14 cm de espessura (CHICHIERCHIO, 1990; THOMAZ; HELENE, 2000).

Ao se projetar uma edificação, o profissional necessita verificar inúmeros aspectos relativos ao desempenho, entre eles funcionalidade, conforto, resistência estrutural, revestimentos e materiais de vedação empregados. Em relação ao tipo de material escolhido para o fechamento e que pode também ter função resistente, o projetista ao especificar, deve levar em consideração qual o desempenho que este possui no caso de um incêndio.

É importante que o projetista, ao definir o tipo de estrutura que será utilizado na edificação, conheça a resistência frente a altas temperaturas deste material, como forma de avaliar o nível de segurança da construção.

Após especificado o tipo de material usado para vedação, é preciso obter conhecimento sobre qual o tempo necessário para o aquecimento do lado oposto, e caso ocorra um grande aquecimento num dos lados da parede é necessário responder várias questões. Não haverá o aparecimento de fissuras devido ao aquecimento? O material não irá sofrer ruína? O tempo de resistência ao fogo da parede é superior ao requerido em normas?

A proteção passiva contra incêndio é constituída por meios de proteção incorporados à edificação e que não requer nenhum tipo de acionamento para o seu funcionamento em situação de incêndio. Esses meios de proteção atendem às necessidades dos usuários em situação normal de funcionamento do edifício, porém, em situação de incêndio têm um comportamento especial que retarda o crescimento do incêndio, impede uma grande emissão de fumaça ou permite uma saída segura para os ocupantes do prédio, entre tantas outras finalidades. São exemplos de proteção passiva o controle de materiais de acabamento e revestimento, proteção das rotas de fuga, compartimentação e isolamento de risco.

A solução mais frequentemente empregada para evitar o aumento excessivo da temperatura das estruturas de aço em situação de incêndio é revesti-las por meio de materiais de proteção antitérmica. Esses materiais possuem características muito diversas, e podem ser aplicados de diferentes modos.

As tintas intumescentes foram desenvolvidas há muito tempo - a primeira patente é de 1938 e os princípios que regem sua atuação já são muito bem conhecidos. Desde sua criação, e, em particular, durante os últimos vinte anos, seu uso tem crescido em todos os países.

Os revestimentos intumescentes mais empregados na construção civil podem ser tanto de base solvente quanto base de água, e tipicamente possuem uma espessura de película seca menor do que 3 mm. Revestimentos intumescentes são muito utilizados na proteção de estruturas de aço para períodos de trinta e sessenta minutos, e seu uso para noventa minutos tem aumentado em alguns países.

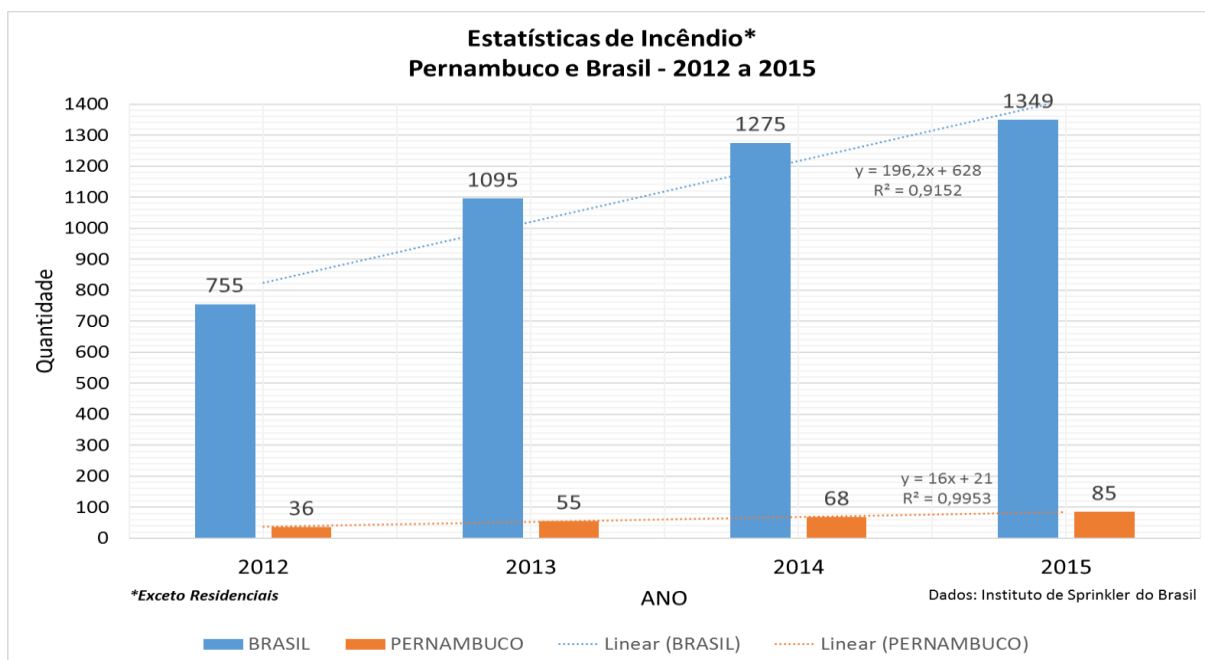
Devido à falta de informações técnicas sobre esse assunto, este trabalho de visa estudar a variação da resistência à compressão de blocos cerâmicos de alvenaria de vedação com furos na horizontal e dimensões de 9 cm X 19 cm X 19 cm, quando submetidos ao fogo e protegidos por tintas intumescentes. Deste modo, poderemos verificar a eficiência da proteção passiva no que se refere a resistência mecânica e o isolamento térmico.

1.2 CONTEXTUALIZAÇÃO

O maior incêndio no Brasil em cinco décadas, a tragédia da boate Kiss, em Santa Maria/RS, em janeiro de 2013, despertou a atenção da sociedade para a necessidade de proteger pessoas e edificações contra incêndios. Contudo, um aspecto em particular do sinistro, responsável direto pela dimensão catastrófica do desastre, ainda permanece pouco abordado em projetos arquitetônicos, normas e regulamentos. A escolha do revestimento em pisos, forros e paredes, que em Santa Maria se revelou desastrosa e cuja queima produziu uma fumaça tóxica que causou a maioria das 242 mortes, deve levar em conta o seu desempenho em termos de reação ao fogo.

O Brasil, nos últimos quatro anos, já contabiliza 4.474 incêndios e o Estado de Pernambuco 244 incêndios (exceto residenciais), havendo uma tendência crescente tanto em termos nacionais como no estado, conforme pode se verificar na figura 1.

Figura 1 – Estatísticas de Incêndios - Brasil e Pernambuco (2012 a 2015)



Quando materiais combustíveis são utilizados e, por isto, seu comportamento em um incêndio fica aquém do previsto nas normas, os chamados retardantes de chama podem ser aplicados em sua superfície com grande eficácia. Com a criação das Normas de Desempenho na Construção Civil (NBR 15.575, 2013) e legislações estaduais que visam reduzir os riscos de incêndios em edificações, o Brasil passa hoje por um momento importante para retratar seus avanços nas áreas de retardantes de chamas.

O problema é que o país ainda não acompanha o desenvolvimento mundial na área. Isto se deve a uma série de fatores, como pouco conhecimento de projetistas, baixo incentivo ao ensino e pesquisa, carências normativas, ausência de certificação nacional e escassez de laboratórios para ensaios de qualidade e desempenho. Se há deficiências no mercado, no entanto, elas não se explicam por uma baixa demanda.

Ao contrário, a aplicação de proteção passiva pode se dar, não apenas no isolamento termo acústico de um espaço de reunião de público, como a Boate Kiss, mas aparece em itens presentes em residências e ambientes de trabalho, nos meios de transporte - automóvel, trem ou ônibus - e até mesmo no interior de aviões.

1.3 OBJETIVOS

1.3.1 Objetivo Geral

Estudar a resistência ao fogo, com aplicação de proteção passiva de tinta intumescente, de blocos de alvenaria cerâmica de vedação, por exposição direta à chama.

1.3.2 Objetivos Específicos

Os objetivos específicos deste trabalho são:

- Avaliar experimentalmente a variação da resistência à compressão de blocos cerâmicos de alvenaria de vedação expostos diretamente a chama com e sem proteção passiva;
- Avaliar a eficiência da proteção por tintas intumescentes no isolamento térmico quando da incidência direta da chama;

1.4 ESTRUTURA DO TRABALHO

A dissertação está estruturada em 5 capítulos.

O capítulo 1 é dedicado à introdução ao tema, apresentando a relevância, justificativa, problema da pesquisa, contextualização, bem como aos objetivos gerais e específicos propostos.

O capítulo 2 é reservado a revisão bibliográfica do assunto, trazendo os principais conceitos referentes à proteção e prevenção contra incêndio, conceitos de proteção ativa e passiva, considerações sobre a norma brasileira de desempenho, parâmetros de projeto, bem como da resistência ao fogo de blocos de alvenaria cerâmica.

O capítulo 3 trata dos materiais e métodos utilizados na pesquisa, bem como a caracterização do programa experimental.

O capítulo 4 é reservado à análise de dados e discussão dos resultados obtidos com a pesquisa.

O capítulo 5 apresenta as considerações finais que puderam ser extraídas com a pesquisa realizada e traz sugestões para trabalhos futuros.

2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

2.1 Diferença entre fogo e incêndio

O fogo foi primordial para o desenvolvimento da civilização, desde seu descobrimento na Pré-história, onde era usado para aquecimento das pessoas e cozimento dos alimentos, passando por fins menos nobres como seu uso em armas de guerra o que contribuiu para o desenvolvimento de alguns povos em detrimento de outros ao longo da história.

No cotidiano, as pessoas leigas algumas vezes utilizam erroneamente os termos fogo e incêndio, sendo importante diferenciar de maneira técnica esses dois termos.

O fogo é uma reação química, denominada combustão, que é uma oxidação rápida entre o material combustível, sólido, líquido ou gasoso, e o oxigênio do ar, provocada por uma fonte de calor que gera luz e calor (BRENTANO, 2004). De uma forma simplista o fogo é a reação química exotérmica com liberação de luz e calor e incêndio é uma forma generalizada dessa reação.

Steckel (2004) designa o fogo como sendo uma reação de oxidação denominada combustão, ocorrendo o desprendimento de calor e luz que pode ser proveniente de material sólido, líquido ou gasoso.

Seito et al.(2008) descrevem que, mesmo com o avanço da ciência do fogo, inexistia ainda um consenso entre as normatizações ao definir esses termos, citando as definições dadas pelas diferentes normas. A norma brasileira NBR 13860 (1997) define o fogo como processo de combustão caracterizado pela emissão de calor e luz. A National Fire Protection Association (NFPA) define como oxidação rápida autossustentada acompanhada de evolução variada da intensidade de calor e de luz. A ISO 8421-1 define como sendo um processo de combustão caracterizado pela emissão de calor acompanhado de fumaça, chama ou ambos.

Para a definição de incêndio, as normas são mais coerentes. A NBR 13860 (1997) destaca que incêndio é o fogo fora de controle e a ISO 8421-1 como incêndio é a combustão rápida disseminando-se de forma descontrolada no tempo e espaço.

2.2 Representação do fogo

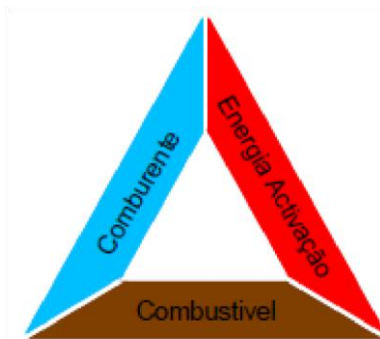
Para a ocorrência da combustão é necessário que exista combustível e oxigênio em proporções adequadas, além de uma fonte de calor para promover a ignição da mistura.

Dependendo do estado físico do combustível, as fases que antecedem a ignição são distintas, mas Seito et al.(2008) mostram que, independente do estado físico do combustível, a etapa de ignição é precedida por um aquecimento do material, que causa desprendimento dos gases e vapores inflamáveis, sendo que após essa etapa a reação é autossuficiente.

Após essa fase, o calor desprendido pela reação exotérmica inicial do material, promove a retroalimentação do sistema. Esse processo ocorre através do aquecimento do material no entorno das chamas, o qual promove um maior desprendimento de vapores voláteis que dão continuidade à reação de pirólise e consequente aumento do calor desprendido, que aumenta a velocidade desse processo.

Para a ocorrência do fogo é necessário a existência de combustível, comburente e calor. Essa combinação é denominada triângulo do fogo (Figura 2).

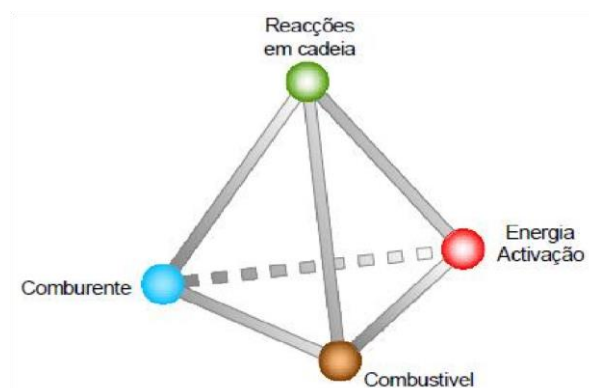
Figura 2 – Triângulo do fogo



Fonte: INÁCIO(2011)

Entretanto, numa definição mais moderna, os autores acrescentam mais um componente, a reação em cadeia, substituindo o triângulo do fogo pelo tetraedro do fogo ou quadrado do fogo (Figura 3).

Figura 3 – Tetraedro do fogo



Fonte: INÁCIO(2011)

O combustível é toda matéria suscetível à queima, podendo ser sólida, líquida ou gasosa. O comburente é o agente oxidante, normalmente o oxigênio, o qual inicia e conserva a reação de combustão, sendo o elemento que se combina com os vapores dos combustíveis possibilitando a expansão do fogo (PIOLLI, 2003). O calor é o elemento ativante e que, em associação com o comburente, reagem com o combustível. Já a reação em cadeia é a transferência de calor que se processa para as moléculas vizinhas, ativando a reação nessas que, por sua vez, repetem o processo para as demais moléculas.

2.3 Calor e métodos de propagação

No cotidiano, costuma-se usar a palavra calor como sinônimo de temperatura, entretanto, fisicamente, essas duas palavras denotam ideias distintas.

Tipler (1984) define temperatura como sendo uma medida da energia cinética translacional das moléculas. O mesmo autor destaca ainda que, no século XVIII, se propôs uma teoria de que o calor era um fluído invisível denominado calórico que se transferia de um corpo para outro. Essa ideia foi derrubada mais tarde, pois o calor podia ser criado a partir do atrito, indo de encontro à teoria do calórico. Pela física, o calor é uma forma de energia permutável numa taxa fixa.

Halliday (1994) define o calor como sendo a energia que é transferida entre um sistema e seu ambiente, devido a uma diferença de temperatura que existe entre eles.

O calor na edificação pode se propagar de três formas distintas. Podendo se propagar por condução, por convecção e por radiação, sendo ainda que a propagação pode ser feita concomitantemente pelas três maneiras.

A análise de transferência de calor para um elemento pode ser subdivida em duas partes. A primeira parte se restringe à transferência de calor entre as faces e a borda do material, a qual se processa pela combinação de convecção e radiação, e a segunda é o processo de transferência de calor ao longo do material, que ocorre por condução, sendo governado por equações expressas pela equação de Fourier (Equação 1).

$$\vec{q} = -\lambda \vec{\nabla} \theta \quad (1)$$

Onde:

$\vec{q}$ é o vetor de fluxo de calor por unidade de área;

λ é o tensor condutividade térmica;

θ é a temperatura;

$\vec{\nabla}$ é o operador nabla.

A condução é a forma de transferência de calor mais efetiva em meios sólidos, onde existe a transferência de energia de molécula a molécula, através das moléculas que possuem um maior grau de agitação que transferem calor às vizinhas, havendo a migração de energia ao longo do material.

A taxa de transmissão de calor (Φ) ao longo de um único material é definida pela Equação 2.

$$\Phi = A \cdot \frac{\theta_2 - \theta_1}{R} \quad (2)$$

Onde:

A é a área de contato (m^2);

θ_2 e θ_1 são as temperaturas na face fria e aquecida respectivamente ($^{\circ}C$);

R é a resistência térmica ($\text{m}^2 \cdot ^\circ\text{C}/\text{W}$).

No caso de haver mais de um material, por exemplo, alvenaria rebocada em ambos lados, a resistência térmica do conjunto sofre aumento, devendo ser somada, dessa forma a equação fica reescrita como $\Phi = A \cdot \frac{\theta_2 - \theta_1}{\sum R}$, sendo que $\sum R$ é o somatório da resistência de cada um dos materiais.

Vale salientar ainda que a resistência térmica é definida experimentalmente e depende de diversos fatores como a espessura do material, além das características das ligações químicas entre suas moléculas.

Num caso geral, onde existe a variação de temperatura ao longo do tempo (regime transitório), e se deseja conhecer o processo de transferência de calor por condução em um elemento, a modelagem matemática deve ser feita a partir de equação diferencial (Equação 3). Esse processo é característico na etapa de elevação da temperatura em um forno (SILVA, 2004).

$$\rho_m c_m(\theta) \frac{\partial \theta}{\partial x}(x, t) = \frac{\partial}{\partial x} \lambda_m(\theta) \frac{\partial \theta}{\partial x}(x, t) \quad (3)$$

Onde:

ρ_m é a massa específica do material (kg/m^3);

$c_m(\theta)$ é o calor específico do material a temperatura ($\text{J}/\text{kg} \cdot ^\circ\text{C}$);

$\lambda_m(\theta)$ é a condutividade térmica do material a temperatura ($\text{W}/\text{m} \cdot ^\circ\text{C}$).

Para a situação de transferência de calor em regime permanente (temperatura constante) a equação diferencial que governa o fenômeno pode ser simplificada, sendo definida pela Equação 4.

$$Q_k = \lambda_m A_m \frac{\partial \theta}{\partial x} \quad (4)$$

Onde:

Q_k é o fluxo de calor por condução no material (W);

λ_m é a condutividade térmica do material (W/m°C);

A_m é a área exposta ao fogo do material (m²).

2.4 Transferência de Calor

Basicamente, a transferência de calor ocorre quando dois ou mais corpos, que estão com temperaturas diferentes, são colocados em contato ou em mesmo local, fazendo com que a energia térmica de um corpo seja transferida para o outro (BARROSA, 2004).

A transmissão de calor pode ocorrer em regime estacionário, isto é, à temperatura constante, ou em regime variável, como é aquele que se verifica em um incêndio, em que a temperatura varia no tempo e no espaço (COELHO, 2010). Logo, tais mecanismos estão intimamente ligados aos processos de transferência de calor que são: radiação, convecção e condução.

2.4.1 Radiação

A radiação é um processo pelo qual o calor é transmitido de um corpo a alta temperatura para um de mais baixa quando tais corpos estão separados no espaço, ainda que exista vácuo entre eles (KREITH e BOHN, 1977).

Neste processo de transmissão, o calor na superfície de um corpo é transformado, segundo às leis da termodinâmica, em radiação eletromagnética. A transformação de calor em radiação é denominada emissão, enquanto a transformação de radiação em calor se designa por absorção (COELHO, 2010).

2.4.2 Convecção

A convecção é o processo de transporte de energia pela ação combinada da condução de calor, armazenamento de energia e movimento de mistura. A convecção é importante principalmente como mecanismo de transferência de energia entre uma superfície sólida e um líquido ou gás. (KREITH e BOHN, 1977). Este processo de

transmissão de calor, importante na propagação de incêndios, transporta a energia libertada pelos movimentos dos gases quentes e ocorre quando partes de um sistema, que estão em movimento, transportam o calor que receberam (COELHO, 2010).

2.4.3 Condução

A condução é um processo pelo qual o calor flui de uma região de temperatura mais alta para outra de temperatura mais baixa, dentro de um meio (sólido, líquido ou gasoso) ou entre meios diferentes em contato físico direto (KREITH e BOHN, 1977).

A transferência de calor por condução é regida pela equação de Fourier, Equação 5, podendo em determinados casos a sua resolução tornar-se difícil devido à complexidade das geometrias, sendo assim necessários métodos de cálculos mais avançados (COELHO, 2010).

A equação de Fourier é dada por:

$$Q = -\lambda \frac{\Delta T}{\Delta x} \quad (5)$$

Onde,

Q fluxo de calor que atravessa a fronteira por unidade de superfície (W.m^{-2});

λ condutibilidade térmica do material ($\text{W.m}^{-1}\text{K}^{-1}$);

ΔT gradiente de temperatura na direção de estudo ($\Delta T = (T_2 - T_1)$);

Δx espessura da parede (m).

O sinal negativo na expressão significa que a transmissão de calor se efetua no sentido das temperaturas mais altas para as mais baixas.

Apesar da condução ter uma maior importância em meios sólidos, nos líquidos e gases o principal meio de transmissão é a convecção, logo, se a temperatura em um elemento estrutural é uniformemente distribuída, é possível a partir de expressões

da transferência de calor determinar a curva temperatura-tempo no elemento (COELHO, 2010).

2.5 Tipos de combustão

A combustão tem uma importância crucial na produção de energia eléctrica nas centrais térmicas, na indústria, no aquecimento de edifícios, transportes, entre outros. No entanto, existe também um conjunto de desvantagens como a poluição do planeta, para a qual a combustão contribui com uma significativa parcela, ou a ocorrência de fogos e explosões.

Pode-se classificar uma combustão como:

- ✓ Incompleta;
- ✓ Completa;
- ✓ Lenta;
- ✓ Viva;
- ✓ Muito viva;

Uma combustão incompleta ocorre quando o comburente, ou seja, oxigénio não existe em quantidade suficiente para queimar todo o combustível. Na combustão completa, por sua vez, todo o combustível existente é consumido (INÁCIO,2011).

As combustões podem desenvolver-se a velocidades distintas, dependendo de várias condições, com especial atenção para as características dos combustíveis envolvidos, como o grau de inflamabilidade. Assim sendo, é considerada uma combustão lenta quando o combustível e os produtos resultantes da combustão atingem valores de temperatura inferiores a 500 °C (INÁCIO,2011).

Numa combustão viva o combustível e os produtos da combustão atingem temperaturas superiores a 500 °C, sendo caracterizada por chamas e emissão de fumos, mais ou menos opacos, dependendo da natureza do material, e da quantidade de ar (INÁCIO,2011).

A combustão muito viva ocorre quando a combustão deflagra de forma quase instantânea estendendo-se a todo o volume em frações de segundo (INÁCIO,2011).

2.6 Produtos resultantes de uma combustão

A combustão de um material dá geralmente origem a um conjunto de produtos resultantes dessa reação, tais como calor, chama, fumos e gases (INÁCIO,2011).

Calor – é o principal responsável pela propagação do fogo, uma vez que leva a que no espaço envolvente sejam atingidas as temperaturas características dos materiais, também combustíveis, mesmo que ainda não tenham sido afetados pela chama. Este tem uma influência direta na manutenção das reações em cadeia uma vez que fornece a energia de ativação, não permitindo a rotura do tetraedro do fogo.

Chama – associada ao calor e à radiação luminosa, a chama tem uma forma ascendente devido ao aquecimento que promove do ar. Esta é a fonte de transferências de energia a outros materiais, propagando-se de uma forma multidirecional.

Gases de combustão – são um produto resultante da combustão. Os mais comuns são o monóxido de carbono (CO) e o dióxido de carbono (CO₂). O monóxido de carbono é geralmente originado quando a combustão é incompleta, por falta de comburente, sendo responsável por inúmeras mortes em incêndios. O dióxido de carbono, em baixas concentrações, não tem um efeito muito grave, mas a sua presença em concentrações elevadas numa atmosfera que tenha de ser respirável pode apresentar um elevado perigo para os ocupantes desse espaço.

Fumos – Os fumos são frequentes quando ocorre uma combustão incompleta, sendo a sua produção mais intensa quanto mais incompleta for a combustão. Estes não são mais que partículas voláteis que se desprendem do corpo em combustão. Dependendo da cor (relacionada com o tipo de combustível), tamanho e quantidade das partículas em suspensão, podem dificultar muito o combate a um incêndio devido à falta de visibilidade que induzem.

Produtos não voláteis – normalmente surgem no estado sólido como no caso das cinzas devido a substâncias minerais que não sofrem combustão nos combustíveis sólidos.

Vapor de água - Sendo o oxigênio o mais usual comburente numa combustão, da sua combinação com um combustível normalmente resulta o vapor de água, que é assim um habitual produto de combustão.

2.7 Razão de queima e de desenvolvimento de calor

O consumo de material na combustão é diretamente dependente da diferença entre o calor fornecido pela chama e a perda de calor na superfície do material em combustão e inversamente proporcional ao calor necessário para decompor o material em voláteis (Equações 6 e 7).

$$\dot{m}'' = \frac{\dot{Q}_F'' - \dot{Q}_L''}{L_v} \quad (6)$$

$$\dot{Q}_C'' = \chi \cdot \dot{m}'' \cdot A_f \cdot \Delta H \quad (7)$$

Onde:

$\dot{m}''$ é a razão de queima do material (g/m²s);

$\dot{Q}_F''$ é o fluxo de calor fornecido pela chama (kW/m²);

$\dot{Q}_L''$ é o fluxo de perda de calor na superfície do combustível (kW/m²);

$\dot{Q}_C''$ é a razão de desenvolvimento de calor no material (kW);

L_v é o calor necessário para produzir os voláteis (kJ/g), (para líquido é o calor latente de evaporação);

A_f é a área da superfície do combustível (m²);

ΔH é o calor de combustão dos voláteis (kJ/g);

χ é o fator de correção (<1,0) devido a combustão incompleta.

2.8 Curvas nominais de temperatura

Na ocasião de um incêndio real, este começa de forma lenta e gradual, havendo um aumento lento na temperatura do compartimento até a ocorrência do “flashover”

em torno de 600°C, havendo um rápido ganho de temperatura e alastramento das chamas até o consumo total dos materiais combustíveis, onde após essa fase ocorre o resfriamento do ambiente.

Num incêndio a curva real tempo-temperatura é de difícil definição, pois conforme enfatiza Alva (2000), depende de vários fatores como a quantidade, a natureza e a distribuição do material combustível, do grau de ventilação do ambiente e dos materiais de vedação que impedem a propagação do incêndio no compartimento. O vento pode dissipar as chamas mudando a forma de transferência por convecção e dependendo da geometria da peça, a deflagração das chamas pode ser diferenciada. Dessa maneira é comum a substituição dessas curvas reais por curvas teóricas as quais simulam de forma aproximada a evolução da temperatura ao longo do tempo num incêndio a partir da fase do “flashover”, possuindo apenas o ramo ascendente da curva real.

2.8.1 Curva padrão tempo-temperatura

Conforme mostra Silva (2004), a curva padrão tempo-temperatura é utilizada pela maioria das normatizações internacionais como o Eurocode 1 (2003) e ISO 834 (1999), além disso, é também usada por normas nacionais de outros países como o Chile e Canadá.

Essa mesma curva é usada ainda pelas normatizações brasileiras como a NBR 5628 (2001), a NBR 6479 (1992) e NBR 10636 (1989), por exemplo. Esta curva é baseada na evolução da temperatura de um incêndio formado predominantemente por material celulósico (madeira).

Casonato (2007) lembra que esta curva não representa um incêndio real, mas por simplicidade, é comum associá-la a tempos fictícios condensados no meio técnico com o objetivo de definir parâmetros de projeto. A Equação 8 define a curva padrão tempo-temperatura conforme é apresentada pelo Eurocode 2 Part:1-2 (2004), sendo a curva mais aceita no meio técnico.

$$\theta = 20 + 345 \log(8.t + 1) \quad (8)$$

Onde:

θ é a temperatura (°C);

t é o tempo (min).

As normas brasileiras apresentam a mesma equação acima adaptada em função da temperatura inicial do forno (Equação 9).

$$\theta - \theta_0 = 345 \log(8.t + 1) \quad (9)$$

Onde:

θ é a temperatura no instante “t” (°C);

θ_0 é a temperatura inicial do forno ($10^\circ\text{C} \leq \theta_0 \leq 40^\circ\text{C}$);

t é o tempo (min).

A “American Specification of Testing and Materials” (ASTM) através da norma ASTM E119 (2008) – “Standard test methods for fire tests of building construction”, utiliza uma curva padrão tempo x temperatura de acordo com a tabela 1.

Tabela 1 - Temperatura dos gases em função da temperatura.

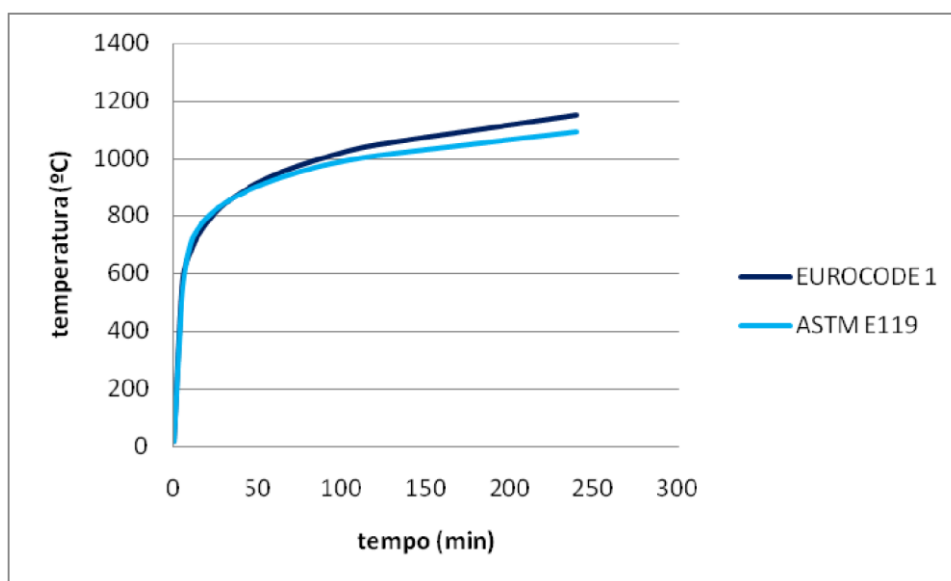
Tempo (min.)	Temperatura (°C)	Tempo (min.)	Temperatura (°C)
0	20	55	916
5	538	60	927
10	704	65	937
15	760	70	946
20	795	75	955
25	821	80	963
30	843	85	971
35	862	90	978
40	878	120	1010
45	892	240	1093
50	905	480	1260

Fonte: SILVA (2004).

De acordo com Silva (2004) essa curva foi adotada pela ASTM a partir de 1918, fundamentada pelo UL – “Underwriters Laboratory” de Chicago, o qual a utilizava para ensaios de pilares frente ao fogo. Os pesquisadores não possuem uma certeza das condições de obtenção desses valores, supondo que a obtenção foi a partir de incêndios reais.

O gráfico da Figura 4 compara as curvas padronizadas pelo Eurocode 1 (2003) e ASTM E119 (2008) para a evolução da temperatura dos gases ao longo do tempo, onde é verificado que as duas normatizações expressam praticamente os mesmos valores ao longo do tempo. Harmathy et al. (1987) relata que em ensaios de curta duração a Curva Padrão é levemente mais severa que o ensaio da ASTM E119 (2008), entretanto para ensaios mais longos essa diferença é irrelevante.

Figura 4 – Curvas padrão tempo x temperatura Eurocode 1 e ASTM E119.



Fonte: Harmathy et al. (1987)

2.8.2 Curva de fogo externo

Essa curva é definida para paredes perimetrais expostas às chamas de acordo com Wald (2005), sendo uma curva que apresenta a temperatura máxima de 680 °C

(Equação 10). A norma Eurocode 6 (2003) permite a utilização dessa curva nominal, entretanto é necessário deixar claro que esta foi a curva adotada.

$$\theta = 660(1 - 0,687e^{-0,32t} - 0,31e^{-3,8t}) + 20 \quad (10)$$

Onde:

θ é a temperatura próxima ao elemento (°C);

t é o tempo (min).

2.8.3 Curva hidrocarboneto

Essa curva também é chamada de curva H, sendo utilizada em situações onde no incêndio, predominam hidrocarbonetos como materiais combustíveis, apresentando temperatura máxima de 1100 °C (Equação 11).

$$\theta = 1080(1 - 0,325e^{-0,167t} - 0,675e^{-2,5t}) + 20 \quad (11)$$

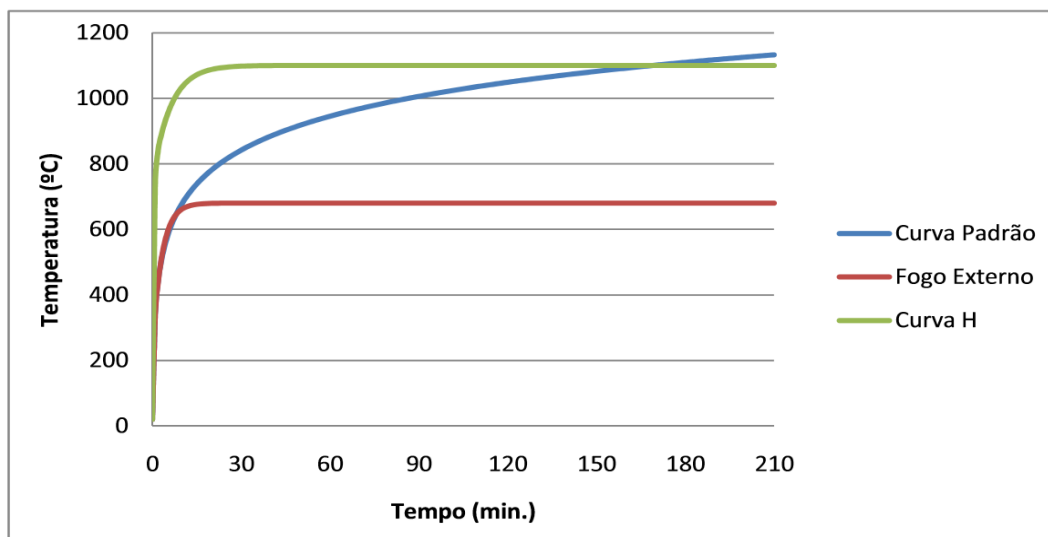
Onde:

θ é a temperatura próxima ao elemento (°C);

t é o tempo (min).

As curvas citadas acima diferem, entre outras coisas, pelo fato da curva padrão não possuir (teoricamente) uma temperatura máxima e as outras duas curvas a partir de certo tempo, estabilizar a temperatura. Todas as curvas mostram um crescimento rápido de temperatura, entretanto, tanto a curva H, quanto a curva de Fogo Externo apresentam um crescimento abrupto a partir da origem, atingindo a temperatura máxima num curto intervalo de tempo. A Figura 5 ilustra de forma gráfica o comportamento dessas curvas.

Figura 5 – Gráfico comparativo entre as principais curvas teóricas de incêndio.



Fonte: Harmathy et al. (1987)

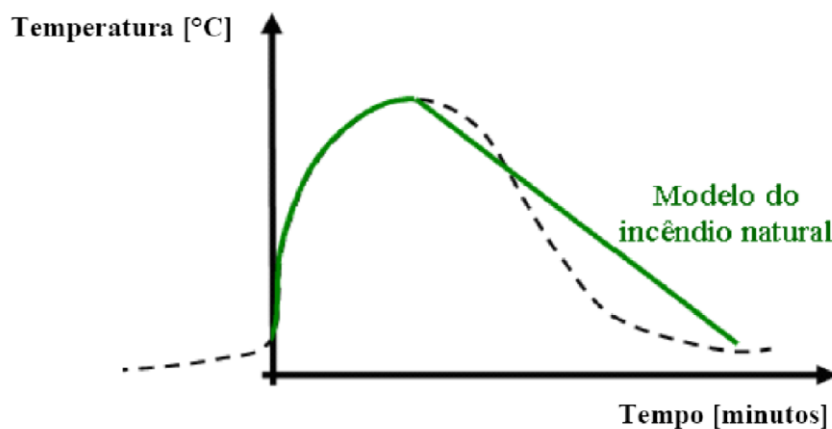
2.9 Curvas naturais

Além das curvas teóricas, existem também curvas de incêndio natural as quais são determinadas experimentalmente através de ensaios que simulam a situação real de incêndio. Essas curvas desconsideram a fase inicial de ignição, por se entender que essa fase não altera a capacidade portante da estrutura. O crescimento da temperatura é exponencial até atingir um valor máximo em que, em seguida, a fase de resfriamento é linearizada (Figura 6). Dessa forma, a curva de incêndio natural aborda desde a fase de inflamação generalizada (“flashover”) até o resfriamento dos gases.

As curvas de incêndio naturais são realizadas a partir de ambientes controlados em áreas compartimentadas, não havendo possibilidade de propagação de incêndio fora delas. Os ensaios mostram que a curva de incêndio natural depende da quantidade de material combustível (carga incêndio) e do grau de ventilação do ambiente.

O Eurocode 2 part 1-2 (2004) apresenta dois modelos de incêndio natural: o modelo simplificado e o modelo avançado.

Figura 6 – Modelo de um incêndio natural.



Fonte: Kimura (2009).

O modelo simplificado tem um campo de utilização bem limitado, em que se assume uma distribuição uniforme de temperatura. É recomendado utilizar em áreas inferiores a 100 m², sendo o comportamento da curva tempo x temperatura definido por equações parametrizadas.

2.10 Modelo avançado

Kimura (2009) cita que o modelo avançado de determinação de incêndio natural leva em consideração a troca de massa e energia, bem como as propriedades dos gases. Além disso, sua implementação pode ser feita de duas maneiras distintas: por meio do modelo de uma zona, no qual uma distribuição uniforme de temperatura é variável no tempo ou por meio do modelo de duas zonas que define espessura variável de aquecimento ao longo do tempo para camada inferior (menos aquecida) e a camada superior (mais aquecida).

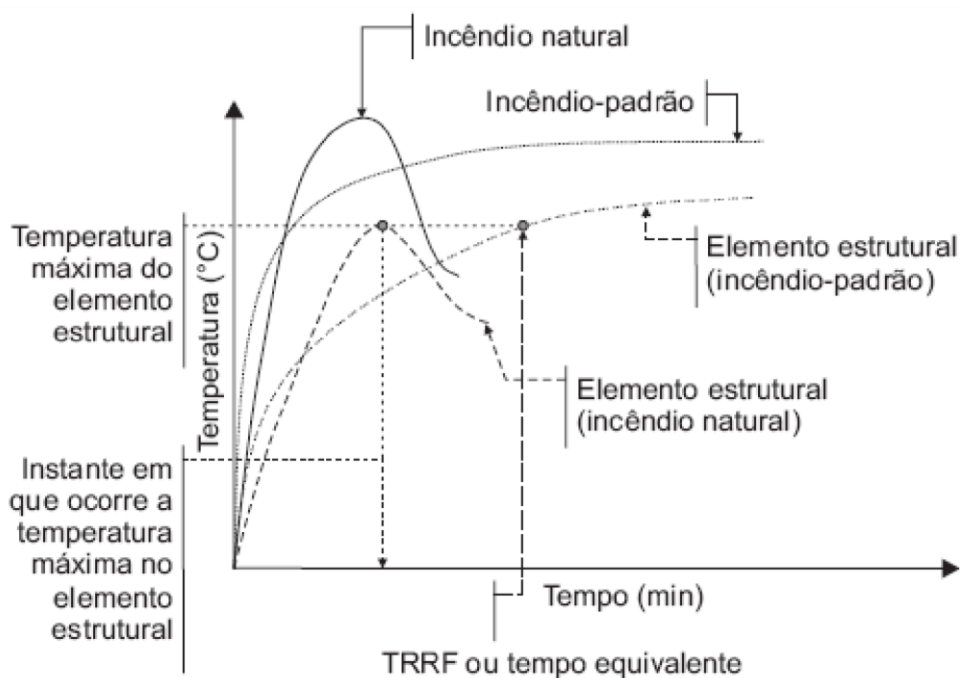
O modelo avançado necessita de implementação computacional para sua resolução uma vez que este é modelado através de modelos de fluidos dinâmicos, fornecendo a evolução da temperatura ao longo do tempo através de resoluções de equações diferenciais parciais por algoritmos computacionais específicos.

2.11 Tempo Requerido de Resistência ao Fogo (TRRF)

Na ocorrência de um incêndio real, a temperatura máxima atingida pelos elementos da edificação não é a mesma das chamas. A temperatura do ambiente depende de fatores ligados à quantidade e distribuição dos materiais combustíveis, ventilação do ambiente e das características térmicas dos materiais de vedação.

O TRRF de acordo com a definição da NBR 14432 (2000) é o tempo mínimo que um elemento estrutural ou elemento de compartimentação resiste a um fogo que obedece ao incêndio padrão. Este elemento deve manter a segurança estrutural, estanqueidade e isolamento, garantindo assim a fuga dos ocupantes da edificação em segurança e combate ao fogo. A Figura 7 ilustra a definição do TRRF.

Figura 7 – Conceito de Tempo Requerido de Resistência ao Fogo (TRRF).



Fonte: Silva (2004).

O tempo requerido de resistência ao fogo pode ser definido de maneira simplificada através de tabelas que levam em consideração o tipo de uso predominante da edificação e sua altura. A tabela 2 define o tempo requerido de resistência ao fogo de acordo com os parâmetros já descritos acima.

Tabela 2 – Tempo requerido de resistência ao fogo (TRRF) em minutos.

Ocupação/ Uso	Divisão (NBR 9077)	Altura da Edificação (m)				
		Classe P ₁ h6	Classe P ₂ 6<h 12	Classe P ₃ 12<h 23	Classe P ₄ 23<h 30	Classe P ₅ h 30
Residencial	A1 a A-3	30	30	60	90	120
Serviços de hospedagem	B-1 e B-2	30	60 (30)	60	90	120
Comercial varejista	C-1 a C-3	60 (30)	60 (30)	60	90	120
Serviços profissionais, pessoais e técnicos	D-1 a D-3	30	60 (30)	60	90	120
Educacional e cultura física	E-1 a E-6	30	30	60	90	120
Locais de reunião de público	F-1, F-2, F-5, F-6 a F-8	60(30)	60	60	90	120
Serviços automotivos	G-1 e G-2 não abertos lateralmente e G-3 a G-5	30	60 (30)	60	90	120
	G-1 e G-2 abertos lateralmente	30	30	30	30	60
Serviços de saúde e institucionais	H-1 a H-5	30	60	60	90	120
Industrial	I-1	30	30	60	90	120
	I-2	60 (30)	60 (30)	90 (60)	120 (90)	120
Depósitos	J-1	30	30	30	30	60
	J-2	60	60	90 (60)	120 (90)	120

Obs: valores entre parênteses se referem a edificações com área de pavimento menor que 750 m².

Fonte: NBR 14432:2000.

Outra maneira mais refinada de definir o TRRF é através de cálculos analíticos, por meio da determinação do tempo equivalente conforme a Equação 12 (Eurocode 1 Part 1-5 (2003)).

$$t_e = q_{fi,k} \cdot \gamma_n \cdot \gamma_s \cdot W \cdot K \cdot M \quad (12)$$

Onde:

t_e é o tempo equivalente (min);

$q_{fi,k}$ é o valor característico da carga de incêndio específica (MJ/m²);

γ_n é o coeficiente adimensional que leva em conta a presença de medidas de proteção ativa na edificação;

γ_s é o coeficiente de segurança que depende do risco de incêndio e das consequências do colapso da edificação;

W é o fator associado à ventilação e a altura do compartimento;

K é o fator associado às características do material de vedação do compartimento (min m²/MJ);

M é o fator que depende do material da estrutura.

Se define $M=1$ para os casos onde a estrutura seja de concreto ou metálica com proteção ao fogo através de revestimento e $M=13,7v$ para a situações de aço sem proteção, sendo que v é o grau de ventilação.

2.12 Processo de desenvolvimento do incêndio

O incêndio ocorre a partir de uma fonte de calor que vai aquecendo os materiais que estão em contato e próximos a ela. Esses materiais vão intensificando as chamas, iniciando o processo de alastramento dessas e aumentando a temperatura do ambiente. O calor vai se propagando principalmente por radiação e convecção. Quando a temperatura ambiente atinge em torno de 600°C, todo o ambiente é tomado por gases e vapores combustíveis desenvolvidos na pirólise dos combustíveis sólidos (SEITO et al., 2008). Nesta temperatura ocorre a inflamação generalizada (“flashover”) dos materiais com o ambiente tomado por labaredas.

Conforme Beard (2010) houve, nas últimas três décadas, grande avanço na implementação de modelos matemáticos que descrevessem o desenvolvimento do fogo em edificações. Isso trouxe grande ajuda no estudo do processo de queima dos materiais e do comportamento das chamas e fluxo de gases, por exemplo.

O Eurocode 1 Part 1-5 (2003) no seu item 1.5.3.10 define “flashover” como ignição simultânea de toda a carga incêndio do compartimento (“simultaneous ignition of all fire loads in a compartment”) (Tradução livre).

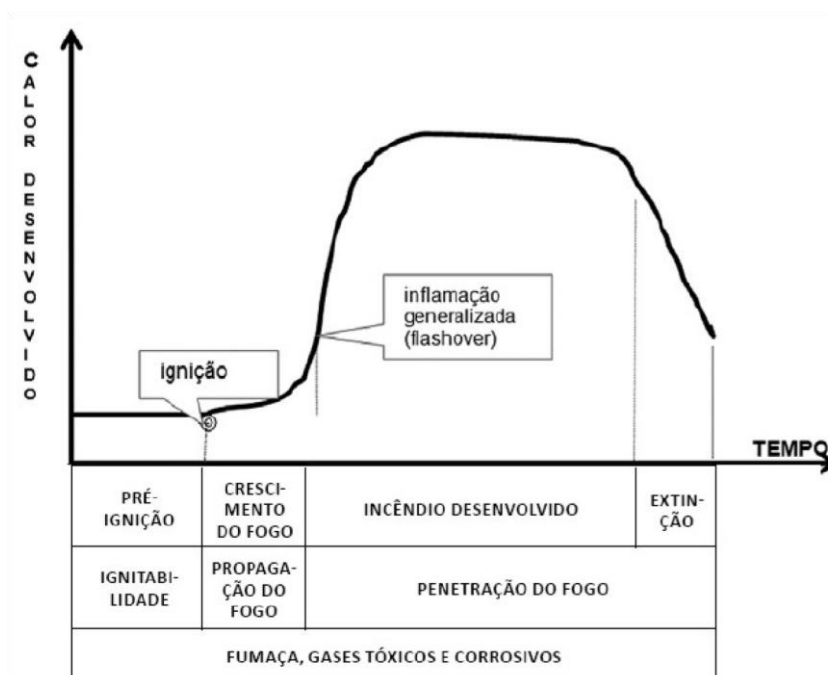
Pelo esquema da Figura 8 se observa que o incêndio é formado por três fases distintas.

A primeira, chamada de pré-ignição onde o crescimento das chamas é lento, com um período compreendido de cinco a vinte minutos de acordo com Seito et al. (2008).

A segunda fase inicia-se após a ignição com um aumento rápido da temperatura, passando pela inflamação generalizada, onde há um crescimento abrupto da temperatura até a queima total de todo combustível.

A terceira fase é da extinção das chamas e resfriamento do ambiente pela falta de combustível.

Figura 8 – Curva de evolução do incêndio celulósico.



Fonte: Seito et al. (2008).

O tempo de duração de um incêndio e consequentemente o formato da curva de evolução do incêndio, depende de diversos fatores como o tipo de material combustível predominante no compartimento, que interfere, principalmente, na

temperatura máxima atingida, do nível de ventilação e nas dimensões do compartimento, interferindo no fornecimento de oxigênio para as chamas e nos gases formados, por exemplo.

2.13 Legislações sobre incêndio

Seito et al. (2008) cita que o desenvolvimento tecnológico das últimas décadas trouxe grandes modificações nos sistemas construtivos como utilização de grandes áreas sem compartimentação, emprego de grandes fachadas de vidro e incorporação de novos materiais.

Além dessas modificações, as edificações erigidas passaram a ter uma altura maior, o que dificulta o combate a incêndios por parte do corpo de bombeiros.

Portanto, tornou-se necessário uma maior preocupação por parte das autoridades acerca de fixar regulamentos que promovam a maior proteção dos ocupantes. Propondo medidas que facilitem o combate inicial do fogo, como adoção de extintores e equipamentos hidráulicos de combate a incêndio nas edificações, bem como medidas construtivas que dificultem a propagação do incêndio, como compartimentação vertical e horizontal através de lajes e paredes resistentes ao fogo.

Sendo necessário, para isso, que se procedam ensaios para definir a resistência ao fogo dos elementos que participam da compartimentação.

A NBR 9077 (2001) define para as paredes de rotas de fuga e paredes que isolam unidades autônomas um tempo mínimo de resistência ao fogo de duas ou quatro horas de acordo com as características da edificação e seu tipo de ocupação.

Entretanto, no que se refere a que tipo de material pode ser utilizado e qual a espessura mínima requerida para alcançar o período de resistência ao fogo, esta norma é relapsa, apresentando apenas uma forma de se obter esses períodos de proteção. Em relação à maneira de alcançar os períodos de duas ou quatro horas de resistência ao fogo, a norma no final do seu item 4.5.2.7 comenta que na ausência de norma brasileira específica, paredes de tijolos maciços com espessura de 15 cm e 25 cm devem ser adotadas como resistentes a 2 h e 4 h de fogo, respectivamente.

Casonato (2007) obteve para paredes de concreto armado com 15 centímetros de espessura, desempenho satisfatório frente a altas temperaturas, com elevação na temperatura entre 100°C e 107°C na face oposta ao aquecimento, após 4 horas de exposição a 900°C, porém, essas paredes possuíam dimensão inferior à mínima exigida pela NBR 5628 (2001). Portanto, devido ao fator da taxa de aquecimento e dimensão dos protótipos, os dados desses pesquisadores servem apenas de indicativo que as prescrições normativas podem ser conservadoras quanto ao real desempenho dos materiais.

A Instrução Técnica 08 (2004) do Corpo de Bombeiros de São Paulo é mais refinada quanto às medidas a serem adotadas para garantir a segurança da edificação. Atualmente a IT do Corpo de Bombeiros de São Paulo, revisada, é comparável com as normas brasileiras (CASONATO, 2007).

De acordo com Tavares (2009), São Paulo tem o código de incêndio mais avançado do Brasil, sendo usado como modelo para os códigos de outras cidades. Esta legislação utiliza o TRRF (Tempo Requerido de Resistência ao Fogo) para definir os níveis de proteção para os elementos estruturais, de vedação e de compartimentação das construções. A Instrução Técnica aceita que a comprovação do TRRF seja feita através de ensaios específicos em laboratório, feito através de tabelas comprovadas em laboratório, ou através de modelos matemáticos (analíticos) normatizados ou reconhecidos internacionalmente. Esta legislação apresenta no seu Anexo B uma tabela mostrando a resistência ao fogo de alvenarias cerâmicas maciças e vazadas com e sem revestimento argamassado (Tabela 3).

No ensaio, o traço da argamassa de assentamento, utilizado para os tijolos cerâmicos maciços, é de 1:5 (cimento: areia), para os blocos vazados de concreto é de 1:1:8 (cimento: cal: areia), já para os tijolos vazados cerâmicos é de 1:4 (cimento: areia). Nas paredes revestidas ensaiadas, o traço do emboço utilizado é de 1:2:9 (cimento: cal: areia). Salienta-se ainda que os dados foram obtidos a partir do ensaio de paredes de dimensões 2,8 m X 2,8 m, com uma das faces totalmente exposta ao fogo, com paredes não possuindo função estrutural.

Tabela 3 – Resistência ao fogo para paredes.

Paredes ensaiadas (*)		Espessura da parede (cm)	Atendimento aos critérios de avaliação (horas)			Resistência ao fogo (horas)
			Integridade	Estanqueidade	Isolação térmica	
Tijolos maciços dimensões: (5x10x20) massa: 1,5kg (revestim. 2,5 cm)	Meio tijolo sem revestimento	10	2	2	1 ½	1 ½
	Um tijolo sem revestimento	20	6	6	6	6
	Meio tijolo com revestimento	15	4	4	4	4
	Um tijolo com revestimento	25	6	6	5	> 6
Blocos vazados de concreto (2 furos) dimensões: (14x19x39) e (19x19x39) massa: 13kg e 17kg (revestim. 1,5 cm)	Bloco de 14 cm sem revestimento	14	1 ½	1 ½	1 ½	1 ½
	Bloco de 19 cm sem revestimento	19	2	2	1 ½	1 ½
	Bloco de 14 cm com revestimento	17	2	2	2	2
	Bloco de 19 cm com revestimento	22	3	3	3	3
Tijolos cerâmicos de oito furos dimensões: (10x20x20) massa: 2,9kg (revestim. 1,5 cm)	Meio tijolo com revestimento	13	2	2	2	2
	Um tijolo com revestimento	23	4	4	4	> 4
		11,5	2	2	1	1 ½

Paredes de concreto armado monolítico sem revestimento	16	3	3	3	3
--	----	---	---	---	---

Fonte: IT-08 de São Paulo (2004).

Verificando a tabela 3, se observa que a exigência de alvenaria de 15 e 25 centímetros com tijolos maciços para o desempenho de duas e quatro horas de fogo definido pela NBR 9077 (2001) é conservadora, pois, conforme os dados apresentados, a alvenaria maciça de 15 centímetros com revestimento possui resistência de quatro horas e a de 25 centímetros com revestimento, resistência superior a seis horas. É importante destacar que o revestimento melhora o desempenho da alvenaria frente ao fogo.

Por meio de códigos de edificações e normas técnicas, são estabelecidos os requisitos que devem ser obrigatoriamente apresentados pelos elementos construtivos de um determinado tipo de edificação. Tais requisitos são definidos com base nos princípios de segurança contra incêndios e visam à proteção da vida humana e dos bens materiais (MITIDIÉRI, 2008).

Para o caso das paredes de alvenaria, os códigos de edificações estabelecem que, para algumas situações, as mesmas apresentem um determinado nível de resistência ao fogo, de forma a proteger os ocupantes da edificação e prover meios de escape e resgate. Este nível de resistência ao fogo exigido é mensurado através do tempo requerido de resistência ao fogo (TRRF).

De forma simplificada, o tempo requerido de resistência ao fogo pode ser entendido como o tempo mínimo que as paredes de alvenaria devem resistir a uma ação térmica padronizada, em um ensaio laboratorial, continuando a apresentar características de integridade, estanqueidade e isolamento (BONITESE, 2007; OLIVEIRA, 1998; SILVA *et al*, 2008).

Os códigos estabelecem o tempo requerido de resistência ao fogo considerando fatores ligados às características construtivas e ao tipo de utilização da edificação. A NBR 14432 – Exigências de resistência ao fogo de elementos construtivos de edificações – Procedimento (ABNT, 2000) fixa os critérios de resistência ao fogo com base no tipo de ocupação, área, profundidade do subsolo,

altura da edificação e facilidade de acesso para combate ao incêndio. Os tempos são estabelecidos entre 30 e 120 minutos, com intervalos de 30 minutos. Outros códigos ainda levam em consideração outros fatores, tais como a quantidade de materiais combustíveis e a presença de sistemas de extinção de fogo (BEALL, 1994; BRICK INDUSTRY ASSOCIATION, 2008; MITIDIERI, 2008).

2.14 Propriedades de materiais frente ao fogo

O comportamento de um elemento estrutural exposto ao fogo depende tanto das propriedades térmicas e mecânicas de seus materiais, como da sua composição química (BONITESE, 2007). A grande maioria dos materiais comumente usados na construção civil sofre alteração nas suas propriedades físico-químicas ao longo da fase de aquecimento, alterando a sua microestrutura.

A alteração na microestrutura dos materiais ocasiona modificação dos parâmetros intrínsecos destes como a condutividade térmica, módulo de elasticidade e calor específico, por exemplo, o que modifica totalmente o comportamento do material dentro da estrutura na edificação a qual está inserido.

2.15 Inércia térmica

A transmissão térmica através de materiais sólidos não é instantânea, havendo um atraso no tempo a partir do momento que a parede passa a receber calor até ela iniciar o aumento de temperatura, este processo é chamado de inércia térmica. A inércia térmica é caracterizada pela capacidade de um material em armazenar e dissipar calor.

Beall (1997) cita que a velocidade com que uma parede aquece ou resfria é descrita como inércia térmica. Paredes com alta densidade e grandes massas causam absorção mais lenta, e por consequência, retenção mais longa de calor.

Os fatores que influenciam na inércia térmica de uma parede são a espessura da parede, densidade, calor específico e condutibilidade do material, sendo que de

acordo com Beall (1997), este fenômeno contribui para a segurança ao fogo em alvenarias, retardando a transferência de calor.

2.16 Propriedades termofísicas dos materiais

Uma das principais propriedades termofísicas dos materiais utilizados é a condutividade térmica. A condutividade térmica (k) indica a capacidade do material de transportar calor. Ela representa a taxa de calor transferida ao longo da espessura de material por unidade de diferença de temperatura, e é expressa em W/m.K, no sistema internacional de medidas (INCROPERA; DEWITT, 1992).

Para tijolos e blocos cerâmicos utilizados em alvenaria, os valores de condutividade térmica relatados na literatura, para materiais secos e em temperatura ambiente (20 °C), situam-se em uma faixa entre 0,35 e 2,00 W/m.K (ZSEMBERY; CLARKE; MCNEILLY, 2006; AL NAHHAS *et al*, 2007), conforme mostra a Tabela 4.

Tabela 4 - Condutividade térmica de materiais cerâmicos.

Cond. Térmica (W/m.K)	Descrição	Origem	Autor
0,35 a 1,11	Tijolo comum	Austrália	Zsemary, 2006
0,52	Tijolo comum	EUA	Incropera; Dewitt, 2002
0,69	Tijolo comum	Inglaterra	Buchanan, 2002
0,70 a 1,05	Tijolo comum	Brasil	Lamberts, 1997
0,72	Tijolo vazado esp. 10 cm	EUA	Incropera; Dewitt, 2002
1,00	Bloco vazado esp. 14 cm	Brasil	Chichierchio, 1990
1,08	Tijolo comum	Brasil	Pinto, 2006
1,27	Tijolo vazado 10×30×57 cm	França	Nguyen <i>et al</i> , 2009
2,00	Bloco vazado 19,7×19,7×49 cm	França	Al Nahhas <i>et al</i> , 2007

Fonte: ZSEMBERY; CLARKE; MCNEILLY (2006)

Entretanto, a condutividade térmica de um material depende de vários fatores, principalmente a temperatura em que o material se encontra, conforme verificado em diversos trabalhos (NGUYEN *et al*, 2009; PADILHA, 1997; PINTO *et al*, 2006).

Em alguns estudos da condutividade térmica de blocos cerâmicos, verificou-se que a condutividade permanece praticamente constante até a temperatura de 300 °C, quando então inicia uma fase de decaimento, na qual sofre uma perda superior a 50% de seu valor a temperatura ambiente (NGUYEN *et al*, 2009). Em sentido contrário, outros estudos mostraram que a condutividade térmica aumenta com a elevação da temperatura (PINTO *et al*, 2006).

No caso de materiais porosos, como a cerâmica e os produtos de cimento, além da temperatura, a condutividade térmica também sofre a influência do teor de umidade presente nos poros do material, aumentando conforme o aumento da umidade. Mendes *et al* (2001) mostraram resultados de ensaios de condutividade térmica realizados com tijolos cerâmicos e argamassas, tanto com o material seco quanto com o material saturado. Nestes ensaios, a condutividade térmica do tijolo cerâmico seco era de 0,98, enquanto do saturado era de 2,08 W/m.K.

Para uma argamassa com porosidade de 31%, a condutividade da argamassa seca era de 0,70, e quando saturada era de 2,95 W/m.K. Já para outra argamassa com porosidade menor, de 18%, portanto com menor teor de umidade, a condutividade aumentou de 1,92 quando seca para 2,57 W/m.K quando saturada.

Em ensaios realizados com argamassas de cimento, foi medida a condutividade térmica de amostras ao ar livre e depois de secas em estufa. Nos resultados, obteve-se uma redução de cerca de 40% na condutividade térmica das amostras, após a secagem em estufa (ROUSAN; ROY, 1983).

O motivo pelo qual a presença de umidade nos poros do material aumenta a condutividade térmica não se restringe apenas ao fato de que a condutividade térmica da água seja maior do que do ar. Mingzhi *et al* (2009) mostraram que, a temperaturas mais elevadas, a água presente nos poros começa a evaporar, se difundindo pela rede de poros do material. Ao se difundir, o vapor transporta calor, contribuindo para o aumento da condutividade térmica.

Outra propriedade térmica importante é o calor específico (c), que define a quantidade de calor que cada grama de uma substância necessita trocar para variar sua temperatura em 1 °C. Sua unidade de medida no sistema internacional é o J/kg.K (CHICHIERCHIO, 1990). Desse modo, quanto menor o calor específico de uma substância, mais facilmente ela pode sofrer variações em sua temperatura.

Os valores de calor específico encontrados na literatura (Tabela 5), para os materiais cerâmicos utilizados em alvenaria, em temperatura ambiente, situam-se entre 835 e 920 J/kg.K (INCROPERA; DEWITT, 1992; LAMBERTS *et al*, 2007).

Tabela 5 – Calor específico de materiais cerâmicos.

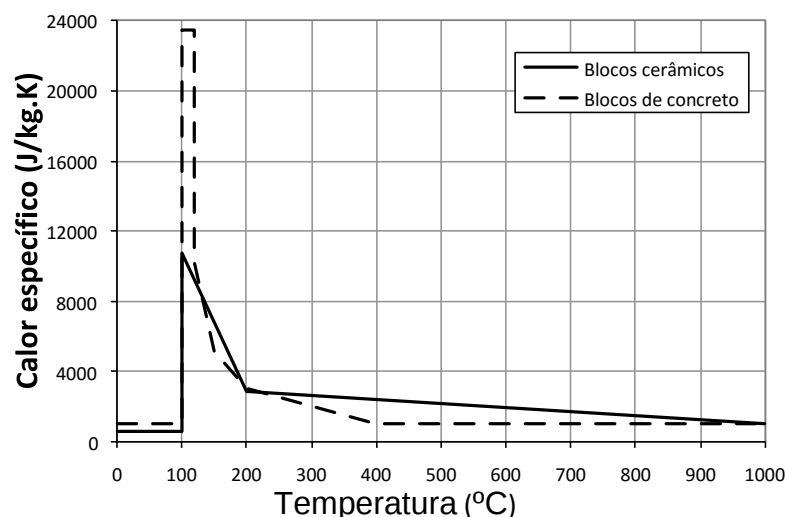
Calor Específico (J/kg.K)	Descrição	Origem	Autor
835	Tijolo comum	EUA	Incropera; Dewitt, 2002
840	Tijolo comum	Inglaterra	Buchanan, 2002
870	Tijolo vazado 10×30×57 cm	França	Nguyen <i>et al</i> , 2009
900	Bloco vazado 19,7×19,7×49 cm	França	Al Nahhas <i>et al</i> , 2007
920	Tijolo comum	Brasil	Lamberts <i>et al</i> , 2007

Fonte: LAMBERTS *et al* (2007)

No entanto, o calor específico de um material também sofre grande influência da temperatura em que o mesmo se encontra. Estudos realizados com materiais cerâmicos secos mostraram que, de modo geral, o calor específico sofre um aumento com a elevação da temperatura, até atingir um valor aproximadamente constante (PADILHA, 1997; PINTO *et al*, 2006).

O Eurocódigo 1 (2003), em seu Anexo D, também tratou da influência da temperatura no calor específico para blocos cerâmicos e de concreto, conforme reproduzido na Figura 8.

Figura 9 – Calor específico para blocos cerâmicos e blocos de concreto



Fonte: Eurocode (2005)

Na Figura 9, percebe-se a ocorrência de um aumento súbito no calor específico para temperaturas por volta de 100 °C. Tal aumento deve-se ao calor latente de evaporação da umidade incorporada nos poros do material, o qual é somado ao calor específico do material, obtendo o calor específico efetivo.

Nguyen *et al* (2009) também sugerem a adoção de um calor específico efetivo para a cerâmica, somando ao calor específico deste material o calor latente de evaporação da umidade presente nos poros, de forma a simplificar os cálculos de transferência de calor.

O valor do acréscimo equivalente ao calor latente de evaporação da água depende do teor de umidade presente e do intervalo de temperatura em que se considera a mudança da fase líquida para a fase gasosa (NGUYEN *et al*, 2009).

Após a apresentação da condutividade térmica e do calor específico, pode-se introduzir o conceito de difusividade térmica. A difusividade térmica (α) é uma propriedade que exprime a relação entre a capacidade do material conduzir energia térmica e a capacidade deste material de acumular energia térmica, estabelecendo uma relação entre a condutividade térmica (k) e o calor específico (c). Tem como unidade o m^2/s , e é definida pela Equação (13).

$$\alpha = \frac{k}{\rho \cdot c} \quad (13)$$

Onde:

k condutividade térmica (W/m.K);

ρ densidade (kg/m³); e

c calor específico (J/kg.K).

Os materiais com alta difusividade térmica respondem rapidamente às variações do ambiente térmico, enquanto que materiais com baixa difusividade térmica respondem mais lentamente, levando mais tempo para atingir novas condições de equilíbrio (INCROPERA; DEWITT, 1992).

Após a apresentação dos fenômenos envolvidos na transferência de calor através de uma parede de alvenaria em situação de incêndio, pode-se partir para a identificação dos fatores que influenciam o desempenho ao fogo das paredes de alvenaria estrutural com blocos cerâmicos, uma vez que o desempenho está diretamente relacionado ao isolamento térmico proporcionado pela parede, assim como depende da resistência mecânica dos blocos e da argamassa.

2.17 Propriedades térmicas das paredes

A eficiência térmica de um material de construção é normalmente avaliada pela sua resistência ao fluxo de calor, denominada resistência térmica. A resistência térmica depende da densidade do material. Baseado neste parâmetro, a alvenaria tem um isolamento pobre. Por outro lado, ela possui espaços vazios que inibem a transferência de calor. As características térmicas de alguns tipos de blocos estão listadas na Tabela 6.

Tabela 6 – Condutância térmica de blocos cerâmicos e de concreto

Material (tijolo vazado)	Massa específica (Kg/m ³)	Condutância (Kcal/h.m ² . °C)
<i>Não preenchido</i>		

10 cm (62,9% sólido)	1297	6,64
15 cm (67,3% sólido)	1377	5,22
20 cm (61,2% sólido)	1249	4,59
25 cm (60,9% sólido)	1249	4,05
Preenchido com vermiculita		
10 cm (62,9% sólido)	1329	4,44
15 cm (67,3% sólido)	1409	3,22
20 cm (61,2% sólido)	1281	2,54
25 cm (60,9% sólido)	1281	2,05

Fonte: Beall (1997).

Materiais nos quais o fluxo de transferência de calor é idêntico em todas as direções são denominados termicamente homogêneos. A condutância ou transmitância térmica (U) e a resistência térmica (R) para materiais homogêneos para qualquer espessura podem ser calculadas pelas equações 14 e 15.

$$U_x = \frac{k}{x} \quad (14)$$

$$R_x = \frac{x}{k} \quad (15)$$

Onde:

U_x é a condutância térmica (Kcal/(m².h.°C));

R_x é a resistência térmica (m².h.°C/Kcal);

k é a condutibilidade térmica (Kcal/(m.h.°C));

x é a espessura do material (m).

Quando uma parede opaca é analisada, é preciso tanto os espaços de ar dentro e fora das superfícies, os quais afetam a parcela de transmissão por condução e convecção do calor. A inclusão desses espaços de ar é feita adotando a parede composta por camadas. Ao analisar a transmissão de calor por essas camadas, o caminho do fluxo de calor precisa ser determinado.

2.18 Teste de alvenaria ao fogo

A alvenaria é composta normalmente de blocos cerâmicos ou de concreto assentados sobre uma junta de argamassa a qual deve existir para absorver e distribuir os esforços de compressão, cisalhamento e pequenas tensões de tração a qual esta pode estar sujeita. Para blocos cerâmicos, a queima deste material ocorrida durante a fase de fabricação gera uma conexão forte entre os poros, a qual evita poropressões durante um cenário de incêndio, favorecendo a estabilidade estrutural dos blocos, conforme Nguyen et al. (2009).

Beall (1997) afirma que experiências feitas com paredes de alvenarias submetidas a incêndios reais têm desempenho muito bom e a falha, se ocorre, é normalmente devido ao deslocamento lateral excessivo, resultando em colapso da estrutura.

Os materiais que compõem uma edificação podem ser combustíveis ou resistentes ao fogo. Beall (1997) designa a alvenaria como um material incombustível. O mesmo autor cita ainda que a capacidade de resistência ao fogo da alvenaria é baseada nas normas ASTM, NFPA ou “National Institute of Standards and Technology” (NIST) de ensaio a resistência ao fogo.

A avaliação da resistência ao fogo de elementos cerâmicos é função da massa e espessura do material e depende da porcentagem de área vazada nos blocos. Tijolos com menos de 25% de áreas vazadas são considerados “sólidos” e mais de 25% considerados “vazados”. “Solid brick wall (...) offers less resistance to fire and heat transmission” (BEALL, 1997) (“parede de tijolo maciço (...) oferece menos resistência ao fogo e transmissão de calor”) (tradução livre). Isso se deve ao fato de haver menos ar aprisionado dentro dos blocos, portanto a condutividade térmica fica mais eficiente.

A avaliação de resistência ao fogo pode ser calculada tendo por base a espessura equivalente sólida (E_T) do bloco. Beall (1997) relata que ensaios feitos pelo NBS mostraram que o aumento de 50% no volume de material sólido por unidade de área de parede, resultou em incremento de 100% no período de resistência ao fogo.

A espessura equivalente sólida é encontrada a partir do volume total de uma unidade da parede e subtraindo o volume de vazios ou espaços de células e dividindo esse valor pela área da face exposta da unidade (Equação 16).

$$E_T = \frac{V}{l.h} \quad (16)$$

Onde:

E_T é a espessura equivalente;

V é o volume líquido (volume total menos vazios);

l é o comprimento da unidade;

h é a altura da unidade.

A tabela 7 lista o período de resistência ao fogo em minutos para blocos cerâmicos vazados, baseado no “Standard Building Code”, o qual utiliza como critério a espessura equivalente sólida (E_T).

Tabela 7 - Espessura equivalente mínima (cm) para resistência ao fogo de alvenarias cerâmicas.

Tipo de material	Período de resistência ao fogo (min)			
	60	120	180	240
Bloco de argila, não preenchido	5,84 (2,3)*	8,64 (3,4)*	10,92 (4,3)*	12,7 (5,0)*
Bloco de argila, grauteado ou preenchido com perlita, vermiculita ou agregado de argila expandida	7,62 (3,0)*	11,18 (4,4)*	13,97 (5,5)*	16,76 (6,6)*
* O valor entre parênteses se refere à espessura em polegadas.				

Fonte: Beall (1997)

2.18.1 Fatores que influenciam o desempenho ao fogo de paredes de alvenaria

O desempenho ao fogo de uma parede de alvenaria depende de diversos fatores. Primeiramente, destacam-se fatores ligados ao tipo de bloco utilizado na alvenaria, compreendendo as características do material utilizado e a geometria dos blocos (THOMAZ; HELENE, 2000).

Além do bloco, as características construtivas como o tipo das juntas de assentamento, dos revestimentos e do preenchimento dos vazados também exercem influência na resistência ao fogo (THOMAZ; HELENE, 2000; MEYER, 2006). Por fim, Meyer (2006) ainda apresenta alguns fatores ligados à estabilidade estrutural da parede, como o índice de esbeltez da parede, o carregamento aplicado e a presença de excentricidades.

2.18.2 Resistência ao fogo das paredes de alvenaria

Para que possam exercer a função de compartimentação horizontal em situação de incêndio, as paredes de alvenaria dependem de sua resistência ao fogo. Em termos simplificados, a resistência ao fogo pode ser definida como a propriedade que um elemento construtivo ou uma combinação destes possui de se opor ao avanço do fogo ou de proteger dele (BUCHANAN, 2002).

No caso de uma parede de alvenaria, a resistência ao fogo compreende três níveis de segurança: adequação estrutural, estanqueidade e isolamento térmico (THINK BRICK AUSTRALIA, 2006). Estes três requisitos estão presentes nas principais normas nacionais e estrangeiras sobre a realização do ensaio para determinação da resistência ao fogo, tais como a NBR 5628 (2001), a NBR 10636 (1989), a ASTM E119 (2008) e a ISO 834 (1999).

Segundo tais normas, durante a realização dos ensaios, as amostras dos elementos que se deseja testar são submetidas a uma ação térmica padrão, sendo monitorado o atendimento aos requisitos estabelecidos.

A adequação estrutural é a habilidade da parede de preservar sua resistência mecânica de modo a continuar a desempenhar sua função estrutural na edificação

durante todo o período de resistência ao fogo. Tal propriedade torna-se ainda mais importante no sistema construtivo em alvenaria estrutural, uma vez que as paredes são responsáveis pela distribuição das cargas e dos esforços até as fundações.

Já a estanqueidade está ligada à capacidade da parede de manter sua continuidade, prevenindo a passagem de chamas e gases quentes através de fissuras que venham a surgir. Também auxilia no controle do espalhamento de fumaça, que é o produto da combustão que mais afeta as pessoas no interior da edificação, uma vez que causa diversos danos à saúde, como lacrimejamento, tosse, sufocação e intoxicação, podendo inclusive levar à morte. Além disso, a presença de fumaça no ambiente diminui a visibilidade, contribuindo para o aumento do pânico (SEITO, 2008).

Por fim, o isolamento térmico é a habilidade da parede de fornecer isolamento suficiente, de forma que o lado da parede oposto ao fogo não exceda um valor predefinido de temperatura durante o período de resistência ao fogo. Deste modo, o isolamento térmico auxilia na proteção à vida dos ocupantes da edificação, além de impedir a propagação do fogo. Geralmente, o isolamento térmico tem sido o parâmetro determinante da resistência ao fogo, ocorrendo antes dos critérios de adequação estrutural e de estanqueidade (BEALL, 1994).

O desempenho ao fogo das paredes de alvenaria depende das características físicas dos materiais, tais como a condutibilidade térmica e a porosidade, das características construtivas das paredes, como o peso próprio e as juntas de assentamento, além das características estruturais, como a esbeltez e as restrições existentes (THOMAZ; HELENE, 2000).

É importante entender os conceitos de período e de classe de resistência ao fogo. O período de resistência ao fogo é o intervalo de tempo determinado por um teste de resistência ao fogo, ou por um método nele baseado, em que um elemento construtivo continua a desempenhar suas funções exigidas no ensaio.

Por sua vez, a classe de resistência ao fogo é determinada com base em um período de resistência ao fogo, em minutos, sendo usualmente dada em períodos de 30 ou 60 minutos. A classe de resistência ao fogo que um elemento construtivo deve apresentar é estabelecida pelos códigos de edificações (BRICK INDUSTRY ASSOCIATION, 2008).

2.18.3 Comportamento das paredes em situação de incêndio

Em uma parede de alvenaria submetida a uma situação de incêndio, devido à diferença de temperatura entre o ambiente onde ocorre o incêndio e o ambiente do lado oposto da parede, ocorrerá a transferência de calor através da parede. Contudo, este é um fenômeno bastante complexo, pois o aquecimento dos materiais constituintes da parede pode acarretar diversas reações químicas endo e exotérmicas, com alterações na constituição das argamassas.

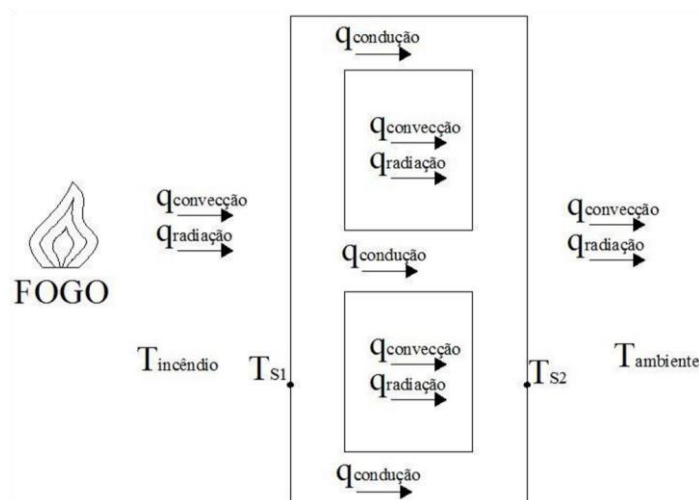
Além disso, com a mudança de fase da umidade presente nos materiais, ocorre transporte de massa através do meio poroso parcialmente saturado, afetando a transferência de calor.

A transferência de calor pode ser definida como o trânsito de energia provocado por uma diferença de temperatura num meio, ou entre vários meios (INCROPERA; DEWITT, 1992; BUCHANAN, 2002). Em situação de incêndio, a transmissão de calor através da parede de alvenaria estrutural com blocos cerâmicos pode ocorrer pelos processos de condução, convecção e radiação, de acordo com a camada da parede atravessada, sendo um fenômeno transiente, devido à variação das condições de contorno e do campo de temperatura no interior do material ao longo do tempo (Figura 10).

Primeiramente, com o início do fogo, a temperatura dos gases no interior do compartimento submetido ao incêndio irá aumentar, apresentando uma temperatura $T_{\text{incêndio}}$, superior à temperatura da superfície da parede exposta à ação do fogo T_{S1} , ocorrendo a transferência de calor por convecção e radiação do ar aquecido no interior do compartimento para a face da parede (NGUYEN *et al*, 2009).

Com a elevação da temperatura da superfície da face exposta ao fogo T_{S1} , haverá uma diferença entre esta e a temperatura da superfície não exposta ao fogo T_{S2} , que se traduzirá na troca de calor entre as duas superfícies, através dos blocos e demais materiais constituintes da parede.

Figura 10 – Esquema da transferência de calor em uma parede submetida ao fogo.



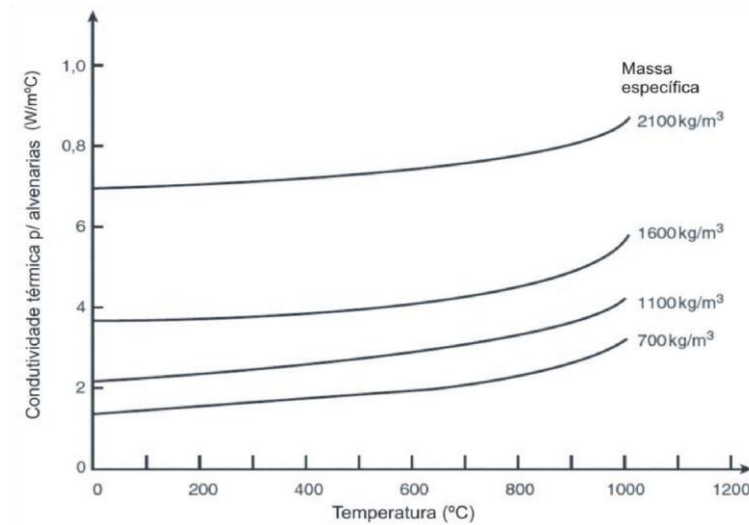
Fonte: NGUYEN *et al* (2009)

A curva de distribuição de temperatura depende de fatores como a espessura da parede e a taxa de aquecimento a qual a mesma foi submetida. Quanto maior a espessura da parede e quanto maior a taxa de aquecimento aplicada, maior será a concavidade da curva de temperaturas ao longo da parede (NADJAI *et al*, 2006).

2.18.4 Tijolos

Os tijolos cerâmicos possuem sua condutividade térmica dependente da densidade da alvenaria (Figura 11). Blocos com densidades maiores apresentam valores mais elevados para a condutividade térmica. Esse fato é influenciado pela compacidade da microestrutura do material, uma vez que, quanto maior a densidade, menor é a quantidade de vazios do material. Essa característica melhora a condutibilidade térmica do material. Além disso, para uma mesma densidade, se observa que ocorre um pequeno incremento na capacidade de condutividade térmica das alvenarias para temperaturas mais elevadas.

Figura 11 – Variação da condutividade térmica (W/m°C) para alvenarias com diferentes massas específicas.



Fonte: PURKISS (2007)

A condutividade térmica para alvenarias úmidas é aumentada pela presença de água. A Equação 17 definida por Purkiss (2007), indica o efeito da umidade na condutividade térmica efetiva (λ').

$$\lambda' = \lambda_0(1 + M)^{0,25} \quad (17)$$

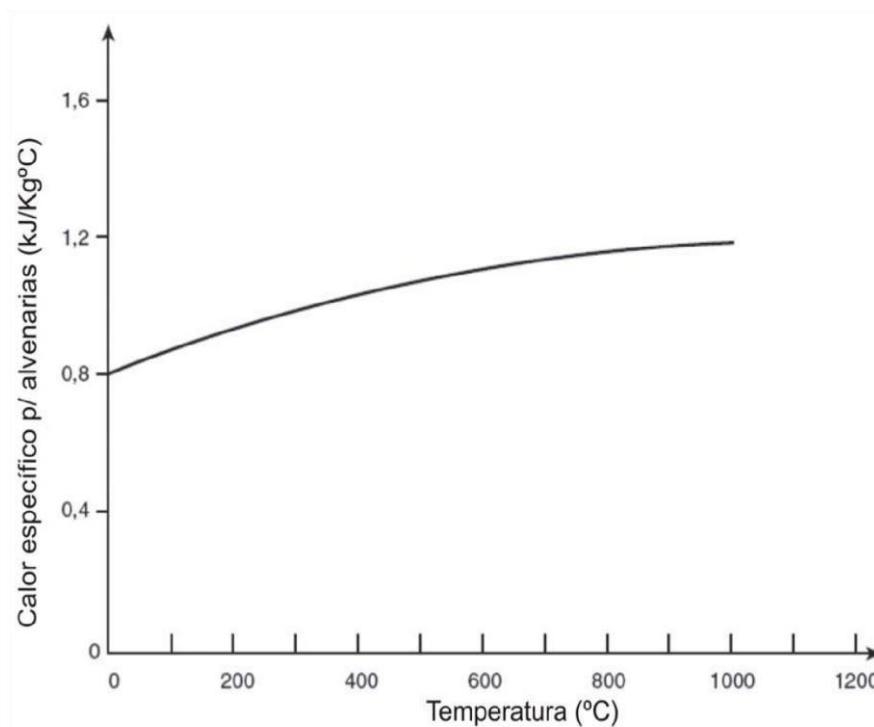
Onde:

λ_0 é a condutividade térmica para alvenaria seca (W/m°C);

M é o teor de umidade (%).

O calor específico da alvenaria é independente da densidade do bloco, conforme Purkiss (2007). A Figura 12 ilustra a variação do calor específico para alvenarias em relação ao aumento da temperatura. Assim como a condutividade térmica, essa propriedade também apresenta um ligeiro crescimento quando se analisa o comportamento em temperaturas mais elevadas.

Figura 12 – Variação do calor específico para alvenarias.



Fonte: PURKISS (2007)

O Eurocode 1 Part 1-5 (2003) sugere valores médios para o coeficiente de expansão linear de alvenarias entre 6×10^{-6} e $10 \times 10^{-6} \text{ } ^\circ\text{C}^{-1}$ e, para o concreto estrutural convencional, um valor médio de $10 \times 10^{-6} \text{ } ^\circ\text{C}^{-1}$.

2.19 Cálculo da resistência ao fogo pela ASTM E119

Devido à complexidade e ao alto custo da realização do ensaio de resistência ao fogo, alguns métodos de cálculo têm sido utilizados em substituição ao método experimental. Estes testes permitem reduzir os custos e o tempo necessário para a determinação da resistência ao fogo de elementos de construção.

O International Building Code (IBC) de 2010 diz que a classificação de resistência ao fogo de elementos de construção, pelos critérios de estanqueidade as chamas e isolamento térmico, deve ser determinada de acordo com os procedimentos de teste estabelecidos na ASTM E 119 (2008), este apresenta um método

reconhecido internacionalmente que permite determinar a resistência ao fogo de forma rápida e simples.

2.20 Sistemas de proteção contra incêndios

A obtenção das condições de segurança ao incêndio requer adequados meios de combate, visando não permitir o colapso estrutural do edifício, facilitando a fuga dos usuários e garantindo a aproximação e ingresso no edifício para ações de combate (COELHO, 2010).

2.20.1 Proteção Ativa

As medidas de proteção ativa vêm a complementar as medidas de proteção passiva sendo compostas basicamente de equipamentos e instalações prediais que serão acionadas em caso de emergência, de forma manual ou automática, usualmente não exercendo nenhuma função em situação normal de funcionamento da edificação (SEITO, *et al.*, 2008). Dentre os principais sistemas de proteção ativa encontram-se:

- Detecção e alarme manual ou automático de incêndio;
- Extinção manual e/ou automática de incêndio;
- Iluminação e sinalização de emergência;
- Controle de movimento de fumaça.

Para o projeto e a instalação adequados das medidas ativas, é necessária uma boa integração entre o projeto arquitetônico e os projetos de cada sistema, normalmente divididos por especialidade, a saber: elétrica, hidráulica e mecânica. É importante o acompanhamento pelo arquiteto ou projetista para que exista uma compatibilização entre as medidas passivas e ativas propostas, visando o melhor desempenho das medidas de segurança contra incêndio como um todo, pois em caso de se ocorrer um sinistro a segurança à vida deve ser assegurada pela segurança da estrutura até a fuga dos ocupantes da edificação (SEITO, *et al.*, 2008)

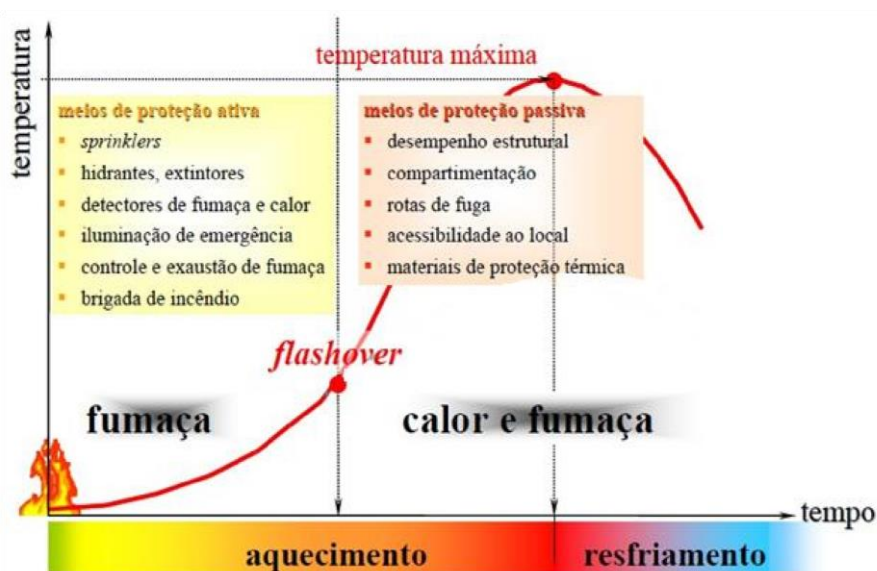
A Figura 13 apresenta, em função do desenvolvimento do incêndio, o local onde se aplicam mais eficientemente os meios de proteção ativa e passiva.

2.20.2 Proteção Passiva

Proteção passiva é o conjunto de medidas de proteção contra situações de incêndio incorporadas à construção do edifício e que devem, portanto, ser previstas pelo arquiteto. Seu desempenho ao fogo independe de qualquer ação externa (SEITO, *et al.*, 2008). Os principais meios de proteção passiva são:

- Saídas de emergência (localização, quantidade e projeto);
- Reação ao fogo de materiais de acabamento e revestimento (escolha de materiais);
- Resistência ao fogo dos elementos construtivos;
- Controle de fumaça;
- Separação entre edificações.

Figura 13 - Desempenho dos meios de proteção no comportamento do incêndio real



Fonte: COSTA (2008).

2.21 A reação ao fogo e o sistema global da segurança contra incêndio

Para que um edifício seja seguro contra incêndio, deve-se de antemão saber quais os objetivos dessa segurança e os requisitos funcionais a serem ali atendidos.

As ações adotadas para se alcançar uma segurança adequada em um edifício devem ser coerentes e implantadas de maneira conjunta. Essas ações constituem o sistema global de segurança contra incêndio, o qual é particular a cada edifício, e sua concepção e seu desenvolvimento cabem a uma equipe de profissionais, devido ao grande número de aspectos abordados.

Berto (1991) diz que um edifício seguro contra incêndio pode ser definido como aquele em que há alta probabilidade de que todos os ocupantes sobrevivam a um incêndio sem sofrer qualquer ferimento e no qual os danos à propriedade serão confinados às vizinhanças imediatas ao local em que o fogo se iniciou.

2.21.1 O edifício seguro e seus requisitos funcionais

Os requisitos funcionais a serem atendidos por um edifício seguro estão ligados à sequência de etapas de um incêndio, as quais se desenvolvem no seguinte fluxo: início do incêndio, crescimento do incêndio no local de origem, combate, propagação para outros ambientes, evacuação do edifício, propagação para outros edifícios e ruína parcial e/ou total do edifício.

Estabelecida a sequência de etapas de um incêndio, pode-se considerar que os requisitos funcionais atendidos pelos edifícios consistem em:

- a) Dificultar a ocorrência do princípio de incêndio.
- b) Ocorrido o princípio de incêndio, dificultar a ocorrência da inflamação generalizada do ambiente.
- c) Possibilitar a extinção do incêndio no ambiente de origem, antes que a inflamação generalizada ocorra.
- d) Instalada a inflamação generalizada no ambiente de origem do incêndio, dificultar a propagação para outros ambientes.

- e) Permitir a fuga dos usuários do edifício.
- f) Dificultar a propagação do incêndio para edifícios adjacentes.
- g) Manter o edifício íntegro, sem danos, sem ruína parcial e/ou total.
- h) Permitir operações de natureza de combate ao fogo e de resgate/salvamento de vítimas.

2.21.2 A segurança contra incêndio nas fases do processo produtivo e de uso do edifício

Em todas as fases que envolvem o processo produtivo, assim como o uso do edifício, a segurança contra incêndio deve ser considerada, passando pelo estudo preliminar, pela concepção do anteprojeto, pelo projeto executivo e pela construção, operação e manutenção. Se a segurança contra incêndio for desconsiderada em qualquer uma das etapas, o edifício ficará suscetível a riscos de inconveniências funcionais, gastos excessivos e níveis de segurança inadequados. Grande parte da segurança contra incêndio dos edifícios é resolvida na fase de projeto. Muitas diretrizes também são, nessa fase, encaminhadas para a solução geral do problema.

Tudo o que foi previsto em projeto deve ser considerado na fase de construção do edifício, garantindo assim tanto a confiabilidade como a efetividade anteriormente previstas. Deve-se, ainda, ressaltar que parte considerável dos problemas com relação à proteção contra incêndio ocorre durante a fase de operação do edifício e depende da caracterização do tipo de ocupação, de usuário e das regulamentações compulsórias existentes.

2.21.3 O sistema global da segurança contra incêndio

O sistema global da segurança contra incêndio resulta da garantia do atendimento aos requisitos funcionais, que devem ser contemplados no processo produtivo e no uso do edifício.

Segundo Berto (1991), as medidas de prevenção e proteção contra incêndio, quando relacionadas aos requisitos funcionais visando à garantia de níveis adequados de segurança contra incêndio são:

- a) “Precaução” contra o início do incêndio.
- b) Limitação do crescimento do incêndio.
- c) Extinção inicial do incêndio.
- d) Limitação da propagação do incêndio.
- e) Evacuação segura do edifício.
- f) “Precaução” contra a propagação do incêndio entre edifícios.
- g) “Precaução” contra o colapso estrutural.
- h) Rapidez, eficiência e segurança das operações relativas ao combate e resgate.

A precaução contra o incêndio constitui-se em medidas que se destinam a prevenir a ocorrência do início do incêndio. Já as medidas de proteção contra incêndio são aquelas que visam à proteção da vida humana, da propriedade e dos bens materiais dos danos causados pelo incêndio instalado no edifício.

Dentro do sistema global de segurança contra incêndio, as medidas de proteção se manifestam quando as medidas de prevenção falham, ocasionando o surgimento do incêndio. Essas medidas compõem os elementos do sistema global, ou seja, limitação do crescimento do incêndio, limitação da propagação do incêndio, evacuação segura do edifício, precaução contra o colapso estrutural e rapidez, eficiência e segurança nas operações de combate e resgate.

Para uma melhor compreensão do sistema global, as medidas que o compõem podem ser dispostas com relação aos aspectos construtivos (resultantes do processo produtivo do edifício) e ao uso do edifício (resultantes das fases de operação e manutenção do edifício).

2.22 Conceitos básicos e parâmetros de projeto

Considerando o amplo campo de atuação do arquiteto, dentro dos requisitos que definem a segurança contra incêndio nas áreas urbanas, onde se inserem os edifícios de grande altura, foram definidos os principais itens a serem considerados num projeto arquitetônico, desde o ponto de vista da escala urbana até o detalhamento do interior de um edifício específico. Os itens definidos e propostos, intimamente relacionados às diferentes fases de definição do projeto, são os seguintes:

(a) No planejamento urbano:

- Distribuição de postos de bombeiros na cidade;
- Características e condições das vias públicas;
- Existência de equipamentos urbanos de apoio;

(b) Na implantação do edifício no interior do lote:

- Leis de zoneamento, que condicionam a geometria do edifício e o afastamento dos limites do lote;

(c) No projeto paisagístico:

- Fatores que determinam a existência de obstáculos, ou não, para acesso ao edifício pelo exterior;

(d) No projeto do edifício, quanto à proteção passiva, em que se determinam:

- A facilidade de ocorrência de um incêndio e de sua propagação pelo interior e pelo exterior do edifício;
- A estabilidade estrutural;
- O abandono rápido e seguro dos ocupantes; e

- A facilidade de acesso seguro dos bombeiros para salvamento de pessoas e combate ao fogo.

Para que um edifício seja considerado seguro contra incêndio, deve-se, de antemão, verificar quais os objetivos dessa segurança e os requisitos funcionais a serem ali atendidos.

Considerando, então, que a segurança está associada ao risco de ocorrência de determinados eventos que proporcionam perigo às pessoas e aos bens, percebe-se que ela pode ser obtida a partir da isenção de tais riscos. Como a isenção total de riscos é, na prática, impossível, pode-se entender a segurança contra incêndio como o conjunto de medidas de proteção que devem estar compatibilizadas e racionalmente integradas.

Tabela 8 – Medidas de proteção ativa e passiva.

Elemento	Medidas de proteção passiva	Medidas de proteção ativa
Limitação do crescimento do incêndio	Controle da quantidade de materiais combustíveis incorporados aos elementos construtivos. Controle das características de reação ao fogo dos materiais e produtos incorporados aos elementos construtivos.	Provisão de sistema de alarme manual. Provisão de sistema de detecção e alarme automáticos.
Extinção inicial do incêndio	-----	Provisão de equipamentos portáteis (extintores de incêndio)
Limitação da propagação do incêndio	Compartimentação vertical. Compartimentação horizontal.	Provisão de sistema de extinção manual (hidrantes e mangotinhos). Provisão de sistema de extinção automática de incêndio.
Evacuação segura do edifício	Provisão de rotas de fuga seguras e sinalização adequada.	Provisão de sinalização de emergência. Provisão do sistema de iluminação de emergência. Provisão do sistema do controle do movimento da fumaça.

		Provisão de sistema de comunicação de emergência.
Precaução contra a propagação do incêndio entre edifícios	Resistência ao fogo da envoltória do edifício, bem como de seus elementos estruturais. Distanciamento seguro entre edifícios.	-----
Precaução contra o colapso estrutural	Resistência ao fogo da envoltória do edifício, bem como de seus elementos estruturais.	-----
Rapidez, eficiência e segurança das operações de combate e resgate	Provisão de meios de acesso dos equipamentos de combate a incêndio e sinalização adequada.	Provisão de sinalização de emergência. Provisão do sistema de iluminação de emergência. Provisão do sistema do controle do movimento da fumaça.

Fonte: ONO (2007)

2.23 Tintas intumescentes

As tintas intumescentes foram desenvolvidas há muito tempo - a primeira patente é de 1938 - e os princípios que regem sua atuação já são muito bem conhecidos. Desde sua criação, e, em particular, durante os últimos vinte anos, seu uso tem crescido em todos os países.

O termo intumescente deriva do latim “tumescere”, que significa iniciar, expandir. A intumescência ocorre pela reação de componentes ativos sob influência do calor, produzindo uma expansão significativa. Esses componentes ativos, ou intumescentes, expandem muitas vezes sua espessura inicial aplicada quando aquecidos (tipicamente mais do que 60x), produzindo uma massa carbonácea que protege qualquer substrato sobre o qual o revestimento tenha sido aplicado.

Um sistema intumescente possui, de modo geral, três componentes: um primer, a tinta intumescente (a fase que reage) e um selante (a pintura de acabamento). Em algumas situações, o primer ou o acabamento podem não ser necessários.

Os revestimentos intumescentes possuem os seguintes ingredientes:

- Um catalisador que se decompõe sob efeito do calor, produzindo um ácido mineral (como o ácido fosfórico). O polifosfato de amônio é o catalizador comumente utilizado.
- Um agente carbonizante, como o amido, que se combina com o ácido mineral, formando uma massa carbonácea.
- Um aglutinante, ou resina, que amolece a uma temperatura predeterminada.
- Um agente espumífico que se decompõe juntamente com a fusão do ligante, liberando grandes volumes de gases não-inflamáveis. Esses gases incluem o dióxido de carbono, amônia e vapor de água. A produção desses gases promove o inchamento (intumescimento) da massa carbonácea, gerando uma espuma carbonácea, que se expande cerca de 60x (ou mais) o volume original da tinta, promovendo a proteção térmica.

Os revestimentos intumescentes mais empregados na construção civil podem ser tanto de base solvente quanto base de água, e tipicamente possuem uma espessura de película seca menor do que 3 mm. Revestimentos intumescentes são muito utilizados na proteção de estruturas de aço para períodos de trinta e sessenta minutos, e seu uso para noventa minutos tem aumentado em alguns países.

A maior parte dos revestimentos intumescentes é dedicada ao uso interno ou em locais abrigados, em ambientes externos. Durante a fase de construção, algum revestimento intumescente pode ficar temporariamente exposto ao ambiente externo e o uso de um selante pode ser necessário. Para exposições externas, deve-se consultar o fabricante da tinta.

O uso destes produtos corresponde, em certos países, a mais do que 40% do mercado de produtos de proteção térmica utilizados em edifícios de múltiplos andares. No Reino Unido, esse número já ultrapassa os 50%, sendo que 2/3 correspondem à aplicação em campo (“on-site”) e 1/3 à aplicação no fabricante (“off-site”).

Alguns dos benefícios provenientes da aplicação “off-site” de tintas intumescentes são:

- Construção mais rápida, pois a proteção deixa de ser uma etapa crítica do processo de construção.
- Qualidade na aplicação, pois é feita sob condições cuidadosamente controladas e supervisionadas.
- Redução de interferências no canteiro de obra, pois não há necessidade de alocação de equipamento.
- Benefícios ambientais, como resultado da redução das emissões de solventes no site e de materiais particulados diversos, algumas vezes associados a outras formas de proteção.

Embora o revestimento intumescente seja o principal componente do sistema de proteção antitérmica, ele é somente parte de um sistema de proteção. Importância semelhante tem outros componentes e processos que permitem sua aplicação. Para um sistema típico, haverá:

- Preparo de superfície.
- Aplicação, quando necessário, de uma tinta de fundo (primer).
- Aplicação da tinta intumescente.
- Aplicação, quando necessário, de um selante.
- Aplicação de um acabamento decorativo, quando especificado.

Na maior parte dos sistemas intumescentes, o selante e o acabamento decorativo são combinados em um único produto. Considera-se uma boa prática na aplicação “off-site” o uso de um selante, mas, de qualquer modo, o fabricante da tinta intumescente deve ser consultado.

A seleção de cada um dos componentes individuais deve ser específica às necessidades de aplicação, em questão a que cada componente deve ser considerado com respeito à compatibilidade, em temperatura ambiente e em altas temperaturas, com os outros componentes do sistema de proteção.

Quando se especifica um sistema intumescente, devem-se considerar que condições ambientais específicas, isto é, a longevidade do sistema dependerá das condições ambientais a que ele estará sujeito, durante a vida da edificação.

Na maior parte dos casos, um sistema intumescente corretamente aplicado, exposto internamente (categoria C1 ou mesmo C2, segundo a Norma ISO 9223) não exigirá qualquer manutenção adicional ao longo da vida útil da edificação além daquela de caráter puramente decorativo (ou onde danos mecânicos tenham ocorrido). Para todas as outras categorias de agressividade, a manutenção periódica pode ser necessária. De qualquer modo, é prudente consultar o fabricante da tinta intumescente. Como ilustração, descrevem-se na tabela 9 alguns dos produtos empregados no mercado nacional.

Tabela 9 - tintas intumescentes empregadas no mercado nacional

PRODUTO	FABRICANTE	REPRESENTANTE NO BRASIL
Nullifire S605 e S707	Carboline	Unifrax Brasil
Firetex	Leigh's Paints	Morganite do Brasil
Sprayfilm	Isolatek International	Morganite do Brasil
Interchar 963	Tintas International	Produzido no Brasil
Firesteel 47-A	Firetherm	CKC do Brasil
Calatherm 600	Tintas Calamar	Produzido no Brasil

Fonte: Seito et al. (2008).

Na tabela 10 resumem-se as principais características dos diversos sistemas de proteção.

Tabela 10 - Resumo das principais características dos sistemas de proteção antitérmica.

	MATERIAIS PROJETADOS	MATERIAIS RÍGIDOS OU SEMI-RÍGIDOS	MATERIAIS INTUMESCENTES
Custo relativo	Baixo a médio	Baixo a médio	Médio a alto
Aplicação (úmido ou seco)	Úmido	Em geral, seco	Úmido

Limpeza durante aplicação	Suja - A proteção de superfícies adjacentes é necessária	Relativamente limpa	Proteção é necessária às superfícies adjacentes
Equipamentos necessários à aplicação	Equipamentos especiais são necessários	Ferramental simples	Equipamentos utilizados normalmente em pintura
Uso interno/externo	Interno e externo	Interno; para uso externo, existe a necessidade de proteção adicional	Interno, com alguns sistemas externos
Preparação	Nenhum tipo de primer é requerido para uso interno, mas as superfícies devem estar limpas e serem compatíveis	Não há necessidade de preparo prévio	Uma tinta de fundo compatível é necessária, aplicada sobre superfícies de aço previamente limpas
Robustez	Relativamente frágil. Pode ser vulnerável a danos mecânicos. Alguns revestimentos são inadequados às áreas abertas	Algumas placas rígidas são relativamente frágeis e podem ser vulneráveis ao dano mecânico. Materiais semi-rígidos podem requerer cobertura adicional	Semelhante aos sistemas de pintura tradicionais

Acabamento	Acabamento texturizado	Variável: materiais rígidos são normalmente lisos, com juntas visíveis, a menos que um acabamento seja aplicado. Materiais semi-rígidos são texturizados, com a fixação visível	Liso ou levemente texturizado. Um acabamento decorativo colorido pode ser aplicado
Retenção mecânica	Necessária quando a espessura é elevada, e em algumas geometrias específicas	Requer, normalmente, algum tipo de retenção	Normalmente não necessita
Faixa de espessuras	10 a 75 mm	Camadas múltiplas podem ser necessárias. Placas de 6 a 100 mm e mantas de 12 a 76 mm	Camadas de 0,3 a 6,5 mm
Resistência ao fogo máxima	240 minutos	240 minutos	120 minutos

Fonte: Seito et al. (2008).

2.24 Considerações sobre a norma de desempenho – 15575 (2013)

A norma NBR 15575 (2013) foi redigida segundo modelos internacionais de normalização de desempenho. Ou seja, para cada necessidade do usuário e condição de exposição, aparece a sequência de requisitos de desempenho, critérios de

desempenho e respectivos métodos de avaliação. O conjunto normativo compreende seis partes:

Parte 1: Requisitos gerais;

Parte 2: Requisitos para os sistemas estruturais;

Parte 3: Requisitos para os sistemas de pisos;

Parte 4: Requisitos para os sistemas de vedações verticais internas e externas;

Parte 5: Requisitos para os sistemas de coberturas; e

Parte 6: Requisitos para os sistemas hidrossanitários.

Cada parte da norma foi organizada por elementos da construção, percorrendo uma sequência de exigências relativas à segurança (desempenho mecânico, segurança contra incêndio, segurança no uso e operação), habitabilidade (estanqueidade, desempenho térmico e acústico, desempenho lumínico, saúde, higiene e qualidade do ar, funcionalidade e acessibilidade, conforto tátil) e sustentabilidade (durabilidade, manutenibilidade e adequação ambiental).

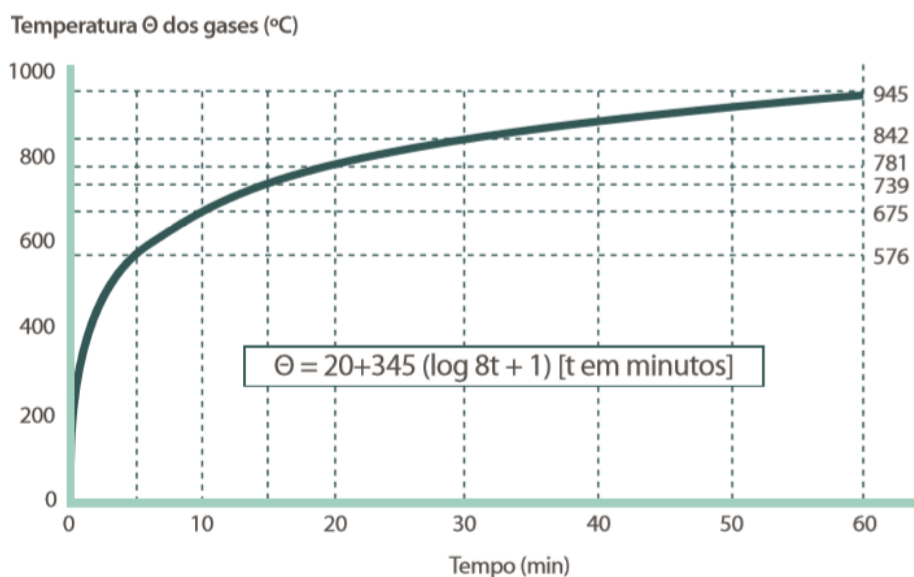
2.24.1 Desempenho estrutural em situações de incêndio

Em situação de incêndio, há necessidade de se minimizar o risco de colapso estrutural da edificação. Os materiais empregados na estrutura e nas compartimentações devem estar em acordo com o TRRF – Tempo Requerido de Resistência ao Fogo, conforme a norma NBR 14432(2000). Devem também ser atendidas normas específicas para o tipo de estrutura em questão, como a NBR15200 (2005) e a NBR 14323 (2013). Para outros tipos de estrutura, a NBR 15575 (2013) estabelece que deve ser obedecido o Eurocode correspondente, em sua última edição.

O tempo de resistência ao fogo de lajes, paredes, portas corta-fogo e outros elementos é normalmente determinado em fornos de ensaios horizontais ou verticais, obedecendo o crescimento da temperatura no interior do forno a uma curva padronizada (norma ISO 834), conforme ilustrado na Figura 14. Medições de

temperatura, em pontos determinados da face submetida ao fogo (afastamento de 10cm em relação a essa face) e também da face oposta, são feitas por meio de termopares.

Figura 14 - Curva de crescimento da temperatura em forno de resistência ao fogo



Fonte: CBIC (2013)

São considerados os critérios abaixo para classificação da resistência ao fogo de componentes e elementos da construção (pilares, paredes, portas, portas corta-fogo, lajes de piso, etc.):

Estanqueidade: permite avaliar se as chamas e os gases quentes desenvolvidos no interior do ambiente em combustão são liberados por fissuras ou aberturas no elemento construtivo, podendo expor as pessoas e os objetos que se encontram na face não exposta ao fogo aos efeitos do incêndio;

Isolamento térmico: permite avaliar se o calor transmitido por radiação e condução através da superfície do elemento construtivo pode ameaçar a segurança das pessoas e dos objetos que se encontram na face não exposta ao fogo. Considera-se que o isolamento térmico deixa de ser atendido quando a temperatura da face não exposta ao fogo atinge $140^{\circ}\text{C} + T_{\text{ambiente}}$ na média, ou $180^{\circ}\text{C} + T_{\text{ambiente}}$ em qualquer ponto de medida;

Estabilidade: permite avaliar se o elemento ou sistema construtivo não perde seu caráter funcional, ou seja, se não apresenta ruína durante o tempo de ensaio. Vale ressaltar que, no caso de componentes com função estrutural, o ensaio é realizado com atuação da carga vertical de serviço a que o elemento estará submetido na obra real.

Em função desses critérios os elementos construtivos são classificados em:

- **Estável ao fogo:** atende ao critério de estabilidade citado;
- **Pára-chamas:** atende ao critério de estabilidade e isolamento térmico citado;
- **Corta-fogo:** atende aos três critérios anteriores.

Os ensaios de reação e de resistência ao fogo são indispensáveis no caso da necessidade de caracterização de estruturas mistas, novos materiais e elementos submetidos à ação do fogo, podendo os dados obtidos alimentar softwares de cálculo estrutural, de estimativa da intensidade do fogo baseada na carga de incêndio, de desenvolvimento e fluxo de fumaça no interior dos edifícios e até para simular o crescimento de um incêndio no interior de uma edificação e estimar o tempo requerido para abandono pelos seus ocupantes.

Sob o ponto de vista estrutural, uma grande vantagem dos modelos computacionais é a possibilidade que eles apresentam de estimar as deformações que podem surgir na estrutura, considerando grandes trechos nas análises e não se limitando, geometricamente, às dimensões do forno de ensaio.

2.24.2 Resistência ao fogo de elementos estruturais e de compartimentação

Os sistemas estruturais e os elementos de vedação vertical que integram as edificações habitacionais devem atender à NBR 14432(2000) para controlar os riscos de propagação de incêndio e preservar a estabilidade estrutural da edificação.

As paredes estruturais devem apresentar resistência ao fogo por um período mínimo de 30 minutos, assegurando condições de estabilidade, estanqueidade e

isolação térmica, no caso de edificações habitacionais de até cinco pavimentos. Para os demais casos, o tempo requerido de resistência ao fogo deve ser considerado conforme a NBR 14432(2000).

As paredes de geminação (paredes entre unidades) de casas térreas e de sobrados, bem como as paredes entre unidades habitacionais e que fazem divisa com as áreas comuns nos edifícios multifamiliares, são elementos de compartimentação horizontal e devem apresentar resistência ao fogo por um período mínimo de 30 minutos, considerando os critérios de avaliação relativos à estabilidade, estanqueidade e isolamento térmica, no caso de edifícios até cinco pavimentos. Para os demais casos, o tempo requerido de resistência ao fogo deve ser considerado conforme a NBR 14432(2000).

No caso de unidade habitacional unifamiliar isolada e de até dois pavimentos, é requerida resistência ao fogo de 30 minutos para as paredes internas e de fachada somente nas áreas correspondentes a cozinhas e ambientes fechados que abriguem equipamentos de gás.

2.24.3 Exigências para dificultar inflamação generalizada e limitar a fumaça

A inflamação generalizada é preponderantemente determinada pela natureza dos materiais presentes nas superfícies dos elementos construtivos. Estes podem sustentar a combustão e propagar o fogo. Os materiais de revestimento, acabamento e isolamento termo acústico empregados na face interna dos sistemas ou elementos que compõem a edificação devem ter as características de reação ao fogo controladas, incluindo-se a incombustibilidade, propagação superficial de chamas e geração de fumaça.

A combustibilidade é avaliada introduzindo-se amostra do material em forno apropriado, registrando-se: ΔT – Variação da temperatura / aumento da temperatura no interior do forno pela queima do material, Δm – Variação da massa – perda de massa por calcinação do corpo de prova e t_f – Tempo de flamejamento do corpo de prova.

A propagação superficial de chamas consiste em submeter amostra de material a um fluxo radiante padronizado, gerado por um painel radiante poroso, com uma chama piloto aplicada na extremidade superior do corpo de prova. Mede-se o tempo necessário para atingir distâncias padronizadas inseridas no suporte do corpo de prova e o fator de evolução do calor desenvolvido (por meio de termopares), computando-se o Índice de Propagação Superficial de Chamas pela multiplicação dos fatores resultantes do Tempo e do Calor gerado.

A geração de fumaça é avaliada pela Densidade Ótica de Fumaça, grandeza estabelecida como função de diversos fatores: área da superfície exposta, transmitância de luz com e sem a presença da fumaça etc. Em última instância, procura-se determinar a perda de transmitância de um feixe de luz padronizado que atravessa a fumaça gerada pelo corpo de prova simplesmente aquecido (decomposição pirolítica) ou em processo de combustão com chama.

Figura 15 - Equipamentos para ensaios de ignitibilidade, propagação superficial de chamas e densidade ótica de fumaça.



Fonte: CBIC (2013)

Os métodos de ensaio de reação ao fogo utilizados como base da avaliação dos materiais empregados são especificados nas normas EN 13823 e ISO 11925 - Parte 2.

Os ensaios para avaliação dos materiais devem considerar a maneira como são aplicados na edificação. Caso o material seja aplicado sob o substrato

combustível, este deve ser incluído no ensaio. Caso o material seja aplicado a um substrato incombustível, o ensaio pode ser realizado utilizando-se substrato de placas de fibrocimento de 6mm de espessura.

Figura 16 – Ensaio SBI – Single Burning Item de acordo com a EN 13823.



Fonte: CBIC (2013)

3 MATERIAIS E MÉTODOS

3.1 MATERIAIS E EQUIPAMENTOS

- ❑ 60 (sessenta) Blocos Cerâmicos de Alvenaria de vedação com 8 furos na horizontal e dimensões 9 cm X 19 cm X 19 cm, adquiridas no comércio de Recife-PE;
- ❑ Maçarico com Gás Butano (Temperatura da chama 1200 °C);
- ❑ Termômetro Infravermelho Marca BENETECH modelo GM300 (Temperatura: -50°C a 380°C);
- ❑ Termômetro digital Salvterm 1200K (Temperatura: -50°C a 1350°C) com sensor de superfície com haste de 6,5mm de diâmetro por 260mm de comprimento;
- ❑ Tinta Intumescente CKC-333® (revestimento interno à base de água acrílica, atóxico, inodoro, anti-mofo e anti-fungos, que a aproximadamente 200°C, dá início a um processo de expansão volumétrica;
- ❑ Rolo de espuma para aplicação da tinta intumescente;
- ❑ Equipamentos de Proteção individual: máscara, luvas e óculos de Proteção;
- ❑ Proteção do laboratório: Extintor Portátil de Pó Químico Seco de 4Kg.

3.2 CARACTERIZAÇÃO DO TIPOS DE CORPOS DE PROVA

Os 60 (sessenta) corpos de prova foram distribuídos em 4 grupos (tipos) de 15 (quinze) blocos, sendo os dois primeiros grupos utilizados como base de referência para fins de análise de resistência à compressão (condição saturada e não saturada). Podemos verificar o organograma com o resumo dos ensaios, bem como, em seguida, o detalhamento da execução experimental por tipo.

É interessante ressaltar que o tempo de exposição ao fogo definido para os grupos 3 e 4 foi de 60 minutos em função de limitações de custo do combustível, por ser o tempo indicado pelo fabricante como tempo de proteção para 2 demãos de tinta

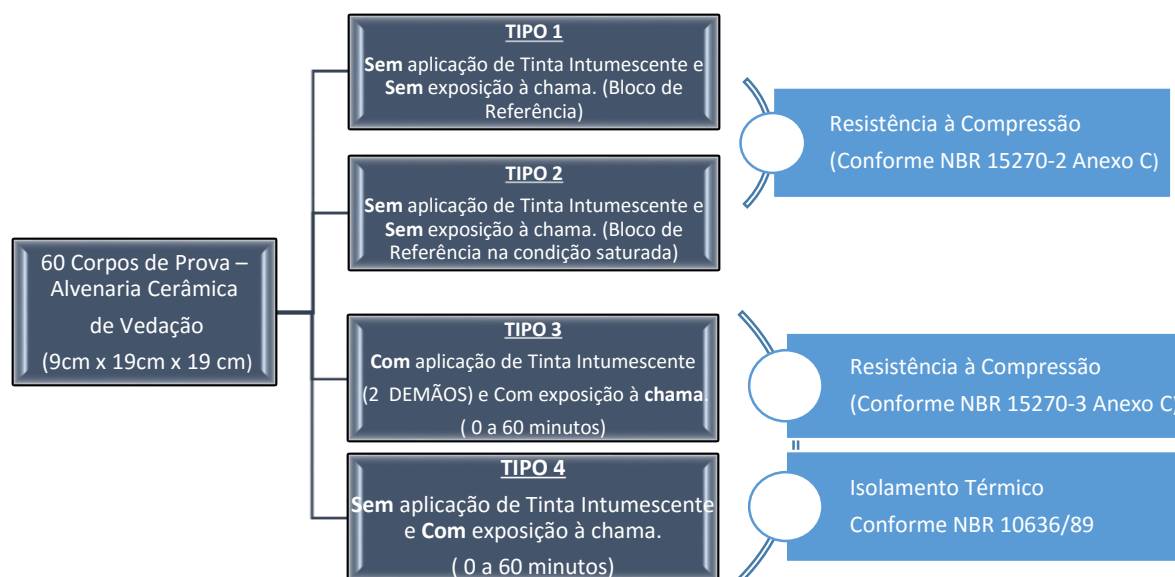
bem como por ser o dobro do tempo mínimo exigido para paredes estruturais até cinco pavimentos, segundo a norma de desempenho.

É importante mencionar que existem diferenças significativas entre ensaios para o sistema de vedação, prismas e blocos individualmente, bem como que os revestimentos desses últimos também influenciam nos testes. A análise será realizada no bloco cerâmico de vedação, sem qualquer tipo de revestimento que não seja a proteção da tinta intumescente (para os blocos do tipo 3).

Essa condição, além de simular condições de muitas unidades habitacionais de baixa renda, também simula a condição mais extrema possível do material no caso de um incêndio.

Outras análises também ficam inviáveis de serem realizadas por questões de limitações do laboratório da Universidade, assim como pela inviabilidade de custos e tempo dos testes que poderiam ser realizados no único laboratório com equipamentos necessários do país para tal que é o Instituto de Pesquisas Tecnológicas (IPT) em São Paulo-SP.

A aplicação da chama, bem como as medições de temperatura foram realizadas no centro geométrico de todas as faces, com a finalidade de encontrarmos os maiores valores a que foram expostos, ficando a lata contendo o combustível a uma distância de 20 centímetros dos blocos expostos. A temperatura média ambiente durante os ensaios foi de 33°C



3.2.1 Corpo de Prova Tipo 1 (Bloco de Referência – Não Saturado)

Os 15 (quinze) blocos caracterizados como do tipo 1 são aqueles utilizados como referência para efeito de resistência à compressão. Para esses blocos não foram aplicadas proteções passivas nem exposição a nenhum tipo de chama, sendo conservados a temperatura ambiente.

❖ Recebimento, preparação e acondicionamento dos corpos de prova:

a) Os corpos de prova foram recebidos, identificados, limpos, retiradas as rebarbas e colocados em ambiente protegido que preservando suas características originais.

b) Cada corpo de prova é constituído por um bloco íntegro e isento de defeitos, amostrado de acordo com as ABNT NBR 15270-1 e ABNT NBR 15270-2.

❖ Procedimentos

a) Foram medidas através de paquímetro a largura (L), altura (H) e o comprimento (C) dos blocos segundo ABNT NBR 15270-3;

b) Para a regularização das faces de trabalho dos corpos de prova, foi utilizada pasta de cimento com resistência superior às resistências dos blocos na área bruta;

c) O capeamento foi realizado em placa de vidro de 5,0 mm apresentando-se plano e uniforme no momento do ensaio;

d) A espessura máxima do capeamento não excedeu 3 mm;

e) O ensaio de compressão foi regulado o comando da prensa, de forma que a tensão aplicada, calculada em relação à área bruta se elevou progressivamente à razão de $(0,05 \pm 0,01)$ MPa/s;

f) Todos os corpos de prova foram ensaiados de modo que a carga foi aplicada na direção do esforço que o bloco deve suportar durante o seu emprego, ou seja, sempre perpendicular ao comprimento e na face destinada ao assentamento.

Figura 17 – Conjunto de Blocos de referência do Tipo 1 (Não Saturados).



Figura 18 – Medição das principais dimensões dos blocos



Figura 19 – Marcação dos blocos de referência (tipo 1)



Figura 20 – Pesagem dos blocos de referência (tipo 1)



Figura 21 – Capeamento dos blocos de referência (tipo 1)



Figura 22 – Imersão dos blocos de referência (tipo 2)



3.2.2 Corpo de Prova Tipo 2 (Bloco de Referência –Saturado)

Os 15 (quinze) blocos caracterizados como do tipo 2 são aqueles utilizados como referência para efeito de resistência à compressão, porém, diferentemente do modelo anterior (tipo 1), esses blocos, foram ensaiados após 24h de imersão em água, tendo em vista o que prevê o anexo C da NBR 15270-3.

Para esses blocos também não foram aplicadas proteções passivas nem exposição a nenhum tipo de chama, sendo conservados a temperatura ambiente. Os procedimentos foram idênticos ao citado anteriormente com exceção do tempo de saturação dos blocos antes do rompimento.

3.2.3 Corpo de Prova Tipo 3 (com aplicação de tinta intumescente e exposição direta a chama)

Nos 15 (quinze) blocos caracterizados como do tipo 3, foram executados os procedimentos iniciais de caracterização e preparação (capeamento) idênticos aos já descritos para o tipo 1, porém, nesse tipo de bloco foram aplicadas 2 (duas) demãos de tinta intumescente, conforme descrição a seguir, além de exposição de cada bloco à 60 minutos de exposição direta a chama.

Foram levantadas, após a aplicação dos 60 minutos de exposição direta a chama, a temperatura da face que sofreu diretamente a aplicação da chama, a temperatura da face imediatamente oposta, através do primeiro septo do bloco e a temperatura da face do bloco sem aplicação de tinta intumescente.

Além do levantamento de temperaturas visando verificação da eficiência do isolamento térmico, após a exposição à chama, os blocos foram levados à prensa hidráulica para fins de verificação da resistência a compressão e carga máxima suportada.

Figura 23 – Blocos do Tipo 3 após aplicação de 2 demãos de tinta intumescente.



A tinta escolhida para o ensaio foi a tinta intumescente da marca CKC-333, a qual foi selecionada em função da gama de certificações internacionais (ASTM E119 - Southwest Research Institute; USA; UL 723 – Underwriters Laboratories; ASTM E84 - Southwest Research Institute, USA; ASTM D5116 – SGS; ASTM D5590 - Accugen Laboratories, USA; UBC 26-2 - Southwest Research Institute, USA; NFPA 286 Southwest Research Institute – USA), bem como por ter sido a única marca, dentre as disponíveis no mercado nacional, que se dispuseram a apoiar esta pesquisa encaminhando amostra para teste.

A tinta intumrescente CKC-333 é um revestimento interno à base de água acrílica, atóxico, inodoro, anti-mofo e anti-fungos, que a aproximadamente 200°C, dá início a um processo de expansão volumétrica, provocando o retardamento da elevação das temperaturas nos elementos de concretos, alvenarias e drywall.

Quando ativada pelo calor, a camada de proteção poderá expandir-se em até 60 vezes sua espessura, quando exposta ao fogo.

Com relação ao procedimento para aplicação da proteção passiva utilizada podemos descrever o seguinte:

a) Todas as superfícies foram secas e limpas antes da aplicação do produto. É importante ressaltar que a proteção pode ser aplicada na maioria das pinturas já existentes.

b) A tinta foi misturada até obter uma textura homogênea e aplicada diretamente com rolo de espuma. Não foi realizado nenhum tipo de diluição, conforme descrição da ficha técnica e recomendações do fabricante.

c) O rendimento da tinta para até 60 minutos de proteção segundo o fabricante é de 90m² para aplicação de 2 demãos

d) O tempo de espera para aplicação entre as demãos foi de 24h, onde o fabricante recomenda no mínimo 6h. O tempo para cura completa e execução do ensaio foi de 3 dias.

3.2.4 Corpo de Prova Tipo 4 (sem aplicação de tinta intumescente e exposição direta a chama)

Nos 15 (quinze) blocos caracterizados como do tipo 4, foram executados os procedimentos iniciais de caracterização e preparação (capeamento) idênticos aos já descritos para o tipo 1, porém, nesse tipo de bloco não foi aplicada proteção passiva por tinta intumescente, havendo a 60 minutos de exposição direta a chama.

Foram levantadas, após a aplicação dos 60 minutos de exposição direta a chama, a temperatura da face que sofreu diretamente a aplicação da chama, a temperatura da face imediatamente oposta, através do primeiro septo do bloco e a temperatura da face oposta ao bloco.

Além do levantamento de temperaturas visando verificação da eficiência do isolamento térmico, após a exposição à chama, os blocos foram levados a prensa hidráulica para fins de verificação da resistência a compressão e carga máxima suportada, de forma idêntica ao tipo 3.

3.3 LEVANTAMENTO DE DADOS DO TIPOS DE CORPOS DE PROVA

3.3.1 Corpo de Prova Tipo 1 (Bloco de Referência – Não Saturado)

Após marcação e capeamento dos blocos do tipo 1, conforme descrição feita no item anterior, os blocos foram levados a prensa hidráulica, para verificação da resistência a compressão e carga máxima suportada. Esses blocos forma utilizados como blocos de referência e não foram saturados antes do rompimento.

Os dados levantados, referentes aos blocos do tipo 1, se encontram na tabela 12 que segue abaixo.

Figuras 24 e 25 – Ensaio de Resistência à Compressão (antes e depois) do bloco 4



Figura 26 – Resultado do Ensaio de Resistência à Compressão do bloco 4



Tabela 11 – Levantamento de dados para os blocos do tipo 1 (não saturado).

PLANILHA DE LEVANTAMENTO DE DADOS								
TIPO 1 (Não Saturado)								
Bloco	Massa(Kg)	Dimensões			Vol. (cm ³)	Dens.(Kg/cm ³)	Cmax(KN)	R(MPa)
		C (cm)	L(cm)	H(cm)				
1	2,08	18,5	8,6	18,4	2927,44	0,000711	44,627	2,781
		18,6	8,7	18,7	3026,03	0,000000		
	média	18,55	8,65	18,55	2976,74	0,000000		
2	2,10	18,8	8,9	18,7	3128,88	0,000671	44,484	2,681
		18,7	8,8	18,7	3077,27	0,000682		
	média	18,75	8,85	18,7	3103,08	0,000677		
3	2,08	18,7	8,6	18,6	2991,25	0,000695	43,575	2,733
		18,6	8,5	18,7	2956,47	0,000704		
	média	18,65	8,55	18,65	2973,86	0,000699		
4	2,14	19	8,7	19	3140,70	0,000681	30,469	1,843
		19,1	8,7	18,8	3124,00	0,000685		
	média	19,05	8,7	18,9	3132,35	0,000683		
5	2,10	18,9	8,7	18,8	3091,28	0,000679	35,778	2,182
		18,8	8,7	18,7	3058,57	0,000687		
	média	18,85	8,7	18,75	3074,93	0,000683		
6	2,10	19	8,8	18,8	3143,36	0,000668	33,674	2,081
		18	8,7	18,6	2912,76	0,000721		
	média	18,5	8,75	18,7	3028,06	0,000694		

7	2,12	18,8	8,8	18,8	3110,27	0,000682	37,165	2,265
		18,7	8,7	18,6	3026,03	0,000701		
	média	18,75	8,75	18,7	3068,15	0,000691		
8	2,10	18,9	8,9	18,7	3145,53	0,000668	34,630	2,081
		18,7	8,8	18,7	3077,27	0,000682		
	média	18,8	8,85	18,7	3111,40	0,000675		
9	2,08	18,3	8,5	18,1	2815,46	0,000739	59,742	3,808
		18,4	8,6	18,1	2864,14	0,000726		
	média	18,35	8,55	18,1	2839,80	0,000732		
10	2,08	18,9	8,7	18,7	3074,84	0,000676	28,030	1,720
		19	8,5	18,6	3003,90	0,000692		
	média	18,95	8,6	18,65	3039,37	0,000684		
11	2,08	17,9	8,5	18,1	2753,92	0,000755	61,608	4,062
		18	8,4	18	2721,60	0,000764		
	média	17,95	8,45	18,05	2737,76	0,000760		
12	2,1	18,9	8,8	18,5	3076,92	0,000683	31,043	1,893
		18,8	8,6	18,7	3023,42	0,000695		
	média	18,85	8,7	18,6	3050,17	0,000688		
13	2,06	19	8,5	18,7	3020,05	0,000682	38,074	2,358
		19	8,5	18,8	3036,20	0,000678		
	média	19	8,5	18,75	3028,13	0,000680		
14	2,08	18,7	8,7	18,6	3026,03	0,000687	46,828	2,886
		18,6	8,7	18,5	2993,67	0,000695		
	média	18,65	8,7	18,55	3009,85	0,000691		
15	2,08	18,9	8,4	18,5	2937,06	0,000708	30,230	1,883
		19,1	8,5	18,7	3035,95	0,000685		
	média	19	8,45	18,6	2986,50	0,000696		

3.3.2 Corpo de Prova Tipo 2 (Bloco de Referência – Saturado)

Após marcação e capeamento dos blocos do tipo 2, conforme descrição feita no item 3.2, os blocos foram levados a prensa hidráulica, para verificação da resistência a compressão e carga máxima suportada. Esses blocos foram utilizados como blocos de referência e foram saturados antes do rompimento por 24 horas. Os dados referentes aos blocos do tipo 2, se encontram na tabela 13 que segue abaixo.

Figuras 27 e 28 – Ensaio de Resistência à Compressão (antes e depois) do bloco 9 (Tipo 2)

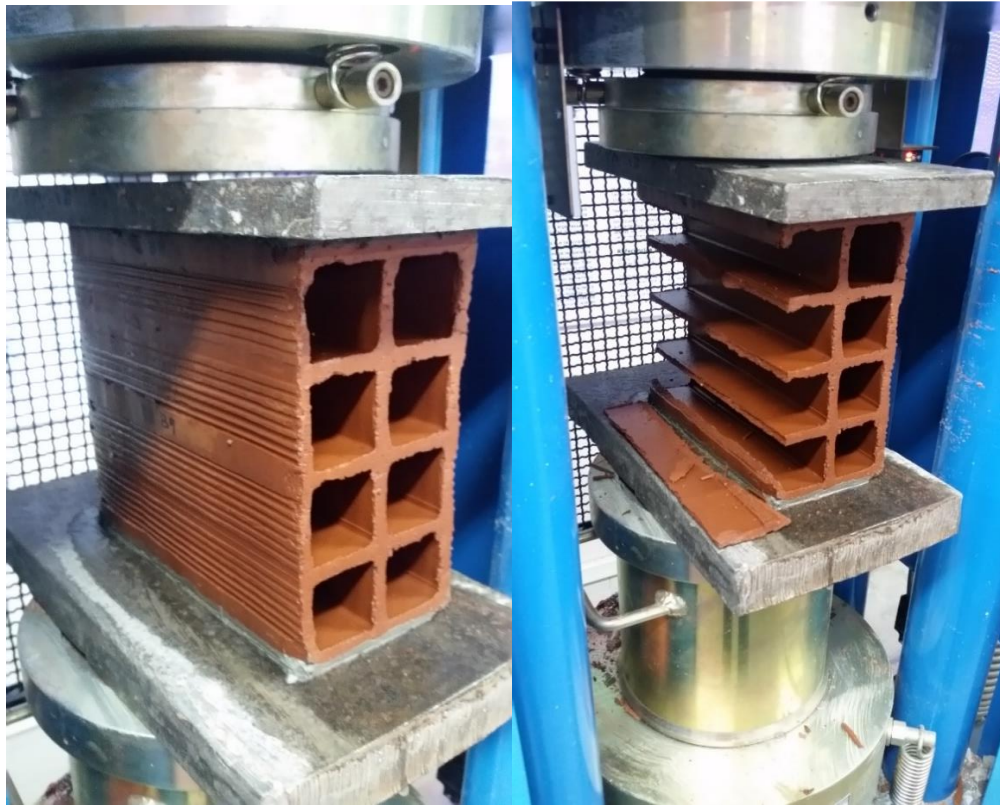


Tabela 12 – Levantamento de dados para os blocos do tipo 2 (saturado).

PLANILHA DE LEVANTAMENTO DE DADOS								
TIPO 2 (Saturado)								
Bloco	Massa (Kg)	Dimensões			Vol. (cm³)	Dens. (Kg/cm³)	Cmax(KN)	R(MPa)
		C (cm)	L(cm)	H(cm)				
1	2,08	18,9	8,7	18,8	3091,28	0,000673	45,058	2,748
		18,8	8,7	18,7	3058,57	0,000680		
	média	18,85	8,7	18,75	3074,93	0,000676		
2	2,08	18,7	8,8	18,8	3093,73	0,000672	39,557	2,405
		18,9	8,7	19	3124,17	0,000666		
	média	18,8	8,75	18,9	3108,95	0,000669		
3	2,08	19	8,6	18,8	3071,92	0,000677	35,348	2,175
		18,8	8,6	18,9	3055,75	0,000681		
	média	18,9	8,6	18,85	3063,84	0,000679		
4	2,10	19	8,9	19	3212,90	0,000654	26,595	1,591
		19	8,7	18,8	3107,64	0,000676		
	média	19	8,8	18,9	3160,27	0,000665		

5	2,10	18,7	8,8	18,7	3077,27	0,000682	44,388	2,706
		18,8	8,7	18,9	3091,28	0,000679		
	média	18,75	8,75	18,8	3084,28	0,000681		
6	2,08	18,8	8,7	18,8	3074,93	0,000676	33,387	2,035
		18,7	8,8	18,7	3077,27	0,000676		
	média	18,75	8,75	18,75	3076,10	0,000676		
7	2,06	18,8	8,4	19	3000,48	0,000687	28,269	1,790
		18,8	8,4	18,9	2984,69	0,000690		
	média	18,8	8,4	18,95	2992,58	0,000688		
8	2,08	18,8	8,6	18,7	3023,42	0,000688	41,375	2,573
		18,6	8,6	18,7	2991,25	0,000695		
	média	18,7	8,6	18,7	3007,33	0,000692		
9	2,10	19,2	8,8	18,7	3159,55	0,000665	20,663	1,247
		19,1	8,5	18,9	3068,42	0,000684		
	média	19,15	8,65	18,8	3113,98	0,000674		
10	2,08	19,2	8,6	18,7	3087,74	0,000674	27,551	1,668
		18,9	8,7	18,8	3091,28	0,000673		
	média	19,05	8,65	18,75	3089,51	0,000673		
11	2,08	19	8,8	18,9	3160,08	0,000658	40,657	2,452
		18,9	8,7	18,8	3091,28	0,000673		
	média	18,95	8,75	18,85	3125,68	0,000665		
12	2,08	19,1	9	18,5	3180,15	0,000654	33,626	1,978
		19,1	8,8	18,8	3159,90	0,000658		
	média	19,1	8,9	18,65	3170,03	0,000656		
13	2,10	19	8,6	19	3104,60	0,000676	26,451	1,633
		18,9	8,5	18,9	3036,29	0,000692		
	média	18,95	8,55	18,95	3070,44	0,000684		
14	2,08	18,7	8,8	18,8	3093,73	0,000672	26,977	1,621
		18,9	8,9	18,9	3179,17	0,000654		
	média	18,8	8,85	18,85	3136,45	0,000663		
15	2,10	19,2	9	18,7	3231,36	0,000650	32,669	1,912
		19,2	8,8	18,7	3159,55	0,000665		
	média	19,2	8,9	18,7	3195,46	0,000657		

3.3.3 Corpo de Prova Tipo 3 (com aplicação de tinta intumescente e exposição direta a chama)

Após marcação e capeamento dos blocos do tipo 3, conforme descrição feita no item 3.2, os blocos receberam duas demãos de tinta intumescente da marca CKC-

333 própria para concretos e alvenarias. O tempo de aplicação entre as demãos foi de 24 horas, conforme descrição já realizada.

Os blocos foram submetidos a uma hora de incidência direta à chama e antes de serem levados a prensa hidráulica, para verificação da resistência a compressão e carga máxima suportada, foram aferidas as temperaturas nas faces onde a chama incidiu diretamente, na face imediatamente oposta, através do primeiro septo e na face mais distante da aplicação da chama. Os dados referentes aos blocos do tipo 3, se encontram na tabela 14 que segue abaixo.

Para medição das temperaturas e aplicação da chama nos blocos foram escolhidos os centros geométricos das faces. A lata contendo o combustível (butano) com maçarico ficou a uma distância de 20 cm do centro geométrico da face com a proteção passiva, conforme figuras 33 e 34.

Figuras 29 e 30 – Esquema para exposição dos blocos com proteção passiva.



Figura 31– Exposição direta à chama por 60 minutos dos blocos 14 e 15 (Tipo 3) temperatura referente ao bloco 15 (a direita).



Figuras 32 e 33 – Ensaio de Resistência à Compressão (antes e depois) do bloco 15



3.3.4 Corpo de Prova Tipo 4 (sem aplicação de tinta intumescente e exposição direta a chama)

O procedimento experimental para os blocos do tipo 4 foi idêntico ao realizado com os blocos do tipo 3, porém, esses corpos de prova não receberam a proteção passiva por tinta intumescente. Os dados referentes aos blocos do tipo 4, se encontram na tabela 15.

Figura 34 – Exposição direta à chama por 60 minutos dos blocos 14 e 15 (Tipo 4)



Figuras 35 e 36 – Ensaio de Resistência à Compressão (antes e depois) do bloco 15



4 ANÁLISE DOS RESULTADOS

Depois dos levantamentos dos dados dos blocos dos tipos 1 e 2 verificamos os valores médios e desvios padrão para cada grupo.

Para a resistência dos blocos dos tipos 1:

$$\bar{R}_1 = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^{15} R_i \rightarrow \bar{R}_1 = 2,484 MPa$$

$$s = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (R_i - \bar{R})^2}{n-1}} \rightarrow s \cong 0,70$$

Segundo o Teorema de Tchebichev a proporção de qualquer conjunto de dados a menos de K desvios padrão a contar da média é sempre ao menos $1-1/k^2$, onde k é um número positivo maior do que 1. Para k=2 e k=3, temos:

- Ao menos 3/4 (75%) de todos os valores estão no intervalo de ± 2 desvios-padrão em torno da média.
- Ao menos 8/9 (89%) de todos os valores estão no intervalo de ± 3 desvios-padrão em torno da média.

Considerando os valores calculados anteriormente para média e desvio padrão, temos:

Para $k = 3$:

$$\bar{R}_1 \pm 3s \rightarrow 2,484 \pm 3.(0,70) \Rightarrow R_{1\min} = 0,40 MPa \text{ e } R_{1\max} = 4,57 MPa$$

Se considerarmos três desvios padrão, temos que todos os valores para a resistência a compressão dos blocos do tipo 1 devem ser considerados como representativos.

Para carga máxima suportada dos blocos dos tipos 1:

$$s = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (c_i - \bar{c})^2}{n-1}} \rightarrow s \cong 10,23$$

Para $k = 3$:

$$\bar{C}_{1\max} \pm 3s \rightarrow 39,997 \pm 3.(10,23) \Rightarrow \bar{C}_{1\max_{\min}} = 9,30KN \text{ e } \bar{C}_{1\max_{\max}} = 70,69KN$$

Se considerarmos três desvios padrão, temos que todos os valores para a carga máxima suportada dos blocos do tipo 1 devem ser considerados como representativos.

Para a resistência dos blocos dos tipos 2:

$$\bar{R}_2 = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^{15} R_i \rightarrow \bar{R}_2 = 2,036MPa$$

$$s = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (R_i - \bar{R})^2}{n-1}} \rightarrow s \cong 0,46$$

Considerando os valores calculados anteriormente para média e desvio padrão, temos:

$$\bar{R}_2 \pm 3s \rightarrow 2,036 \pm 3.(0,46) \Rightarrow R_{2\min} = 0,66MPa \text{ e } R_{2\max} = 3,41MPa$$

Se considerarmos três desvios padrão, temos que todos os valores para a resistência a compressão dos blocos do tipo 2 devem ser considerados como representativos.

Para carga máxima suportada dos blocos dos tipos 2:

$$\bar{C}_{2\max} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^{15} C_i \rightarrow \bar{C}_{2\max} = 33,505KN$$

$$s = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (C_i - \bar{C})^2}{n-1}} \rightarrow s \cong 10,23$$

$$\bar{C}_{2\max} \pm 3s \rightarrow 33,505 \pm 3.(10,23) \Rightarrow \bar{C}_{2\max_{\min}} = 11,20KN \text{ e } \bar{C}_{2\max_{\max}} = 55,81KN$$

Se considerarmos três desvios padrão, temos que todos os valores para a carga máxima suportada dos blocos do tipo 2 devem ser considerados como representativos.

Comparando os valores médios das resistências à compressão e as cargas máximas suportadas dos tipos 1 e 2, temos:

$$\frac{\bar{R}_1 - \bar{R}_2}{\bar{R}_1} = \frac{2,484 - 2,036}{2,484} = 0,18 \text{ ou } 18\%$$

$$\frac{\bar{C}_1 - \bar{C}_2}{\bar{C}_1} = \frac{39,997 - 33,505}{39,997} = 0,16 \text{ ou } 16\%$$

Podemos verificar os dados em tabela resumida com os dados levantados para os blocos dos tipos 1 e 2.

Tabela 15 – Dados estatísticos para blocos dos tipos 1 e 2.

Dados	TIPO 1 (NS)		TIPO 2 (S)	
	Cmax(KN)	R(MPa)	Cmax(KN)	R(MPa)
Média (X)	39,997	2,484	33,505	2,036
Desvio Padrão(s)	10,23	0,70	7,43	0,46
X+3s	70,69	4,57	55,81	3,41
X-3s	9,30	0,40	11,20	0,66

Pode-se ainda realizar a análise de variância (ANOVA) para um único fator, que para os tipos 1 e 2 se distinguem pela condição saturada ou não. O objetivo é verificar se os dados são significativamente diferentes ou não. Realizamos a análise através do software MS Excel 2016, onde para os dados de resistência à compressão resultaram as seguintes tabelas:

Tabela 16 – Resumo de Dados (Resistência Tipos 1 e 2)

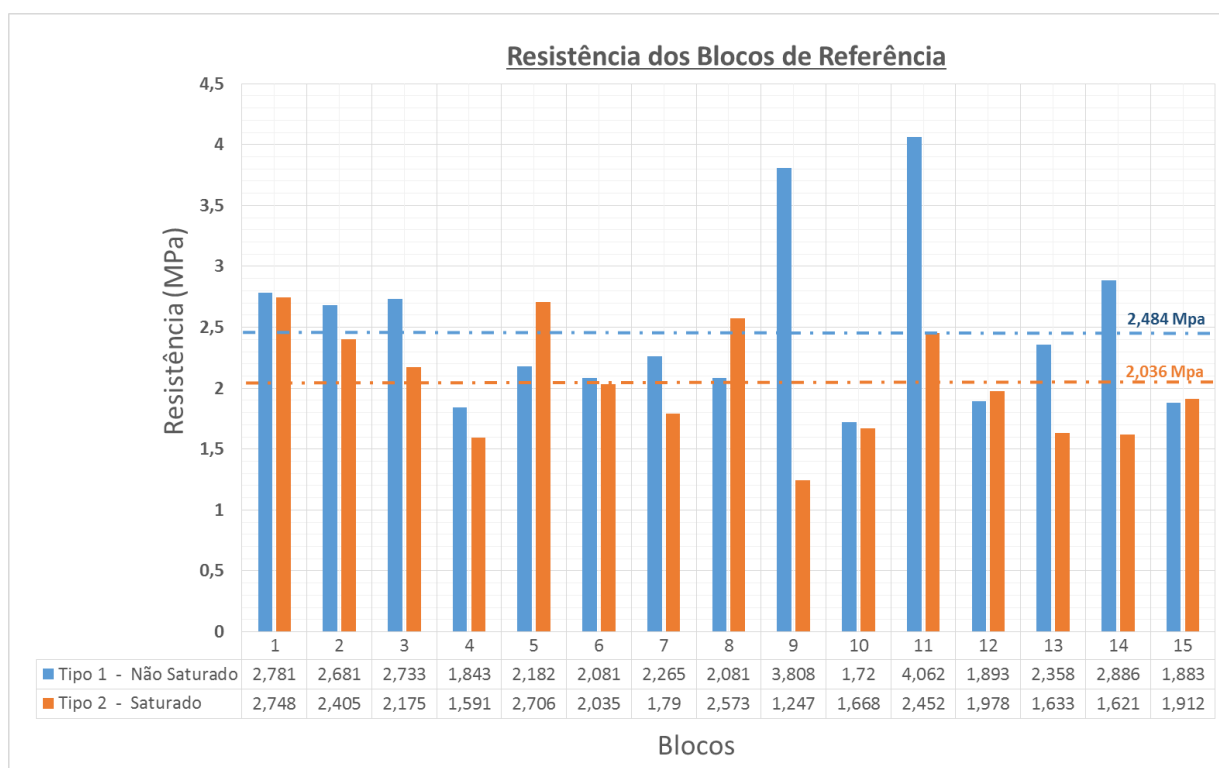
Grupo	Contagem	Soma	Média	Variância
R1(MPa)	15	37,257	2,4838	0,4841857
R2(MPa)	15	30,534	2,0356	0,2101864

Tabela 17 – ANOVA (Resistência Tipos 1 e 2)

Fonte da variação	SQ	gl	MQ	F	valor-P	F crítico
Entre grupos	1,50662	1	1,5066243	4,339529	0,046486	4,195971819
Dentro dos grupos	9,72121	28	0,34718607			
Total	11,2278	29				

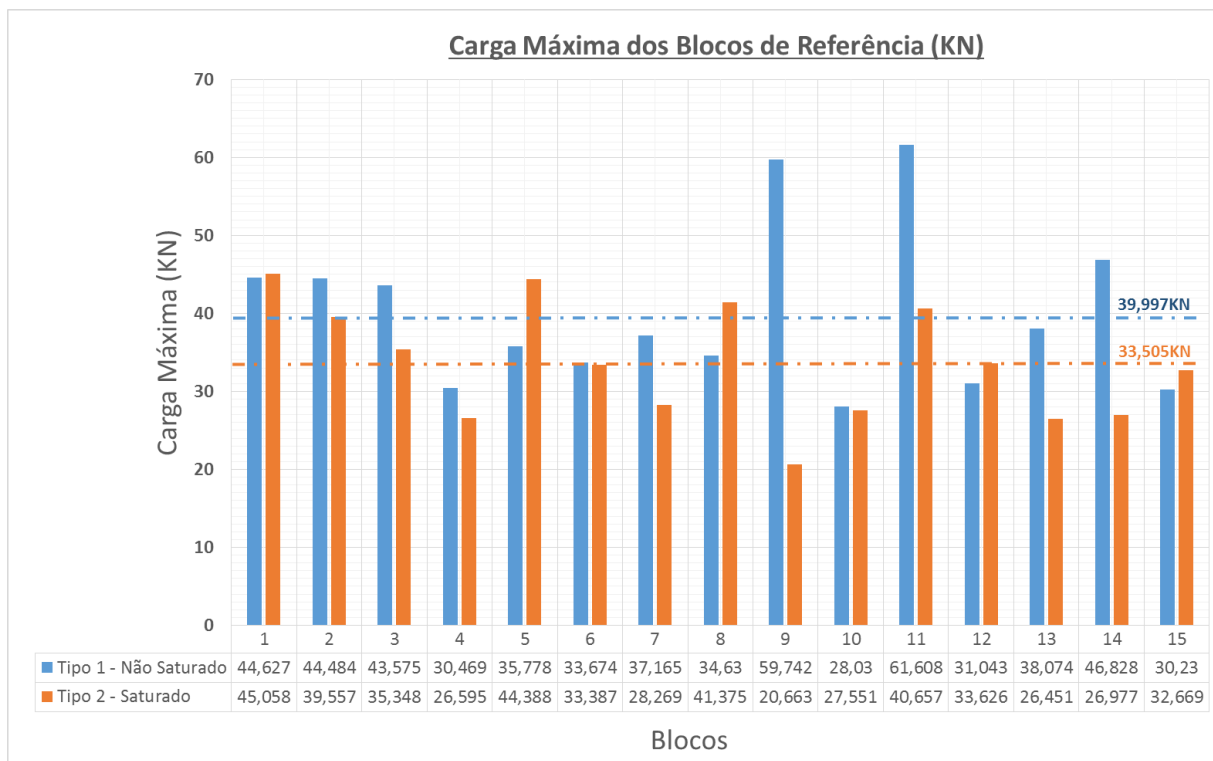
Podemos verificar que, como o valor de P encontrado (0,046) é menor do que o nível de significância estipulado que foi de 5% (0,05) ou, analisando de outra forma, como o valor de F (4,33) encontrado é maior do que o $F_{\text{crítico}}$ (4,19) então devemos rejeitar a hipótese nula (H_0) em que as médias seriam iguais. Dessa forma, podemos afirmar que as condições saturadas e não saturadas influenciam os resultados obtidos para a resistência à compressão.

Figura 37 – Comparativo da resistência à compressão dos blocos dos tipos 1 e 2.



Podemos verificar no gráfico da figura 36 que, em termos médios, os blocos do tipo 1 (não saturados) obtiveram valores superiores de resistência à compressão, sendo cerca de 18% maiores que os blocos do tipo 2. De forma semelhante ocorre com os dados para carga máxima suportada.

Figura 38 – Comparativo da carga máxima dos blocos dos tipos 1 e 2.



Realizando a mesma verificação de representatividade dos dados coletados para os blocos dos tipos 3 e 4, verificamos que, para três desvios padrão, todos os dados são significativos.

Tabela 18 – Valores médios e desvios padrão para blocos do tipo 3.

Dados	TIPO 3 (Com Exposição à Chama e Com Proteção)						
	Temperatura (60' de exposição)					Cmax(KN)	R(MPa)
	Td(°C)	Ti ₁ (°C)	Ti ₂ (°C)	ΔT ₁ (°C)	ΔT ₂ (°C)		
Média (X)	938,067	187,000	40,920	751,067	897,147	37,993	2,380
Desvio Padrão (s)	54,61	10,62	2,00	57,89	54,21	7,19	0,42
X+3s	1101,89	218,85	46,91	924,75	1059,79	59,55	3,64
X-3s	774,25	155,15	34,93	577,39	734,50	16,44	1,12

Da mesma forma, para os blocos do tipo 4, quando consideramos três desvios padrão, todos os valores experimentais se encontram dentro do intervalo.

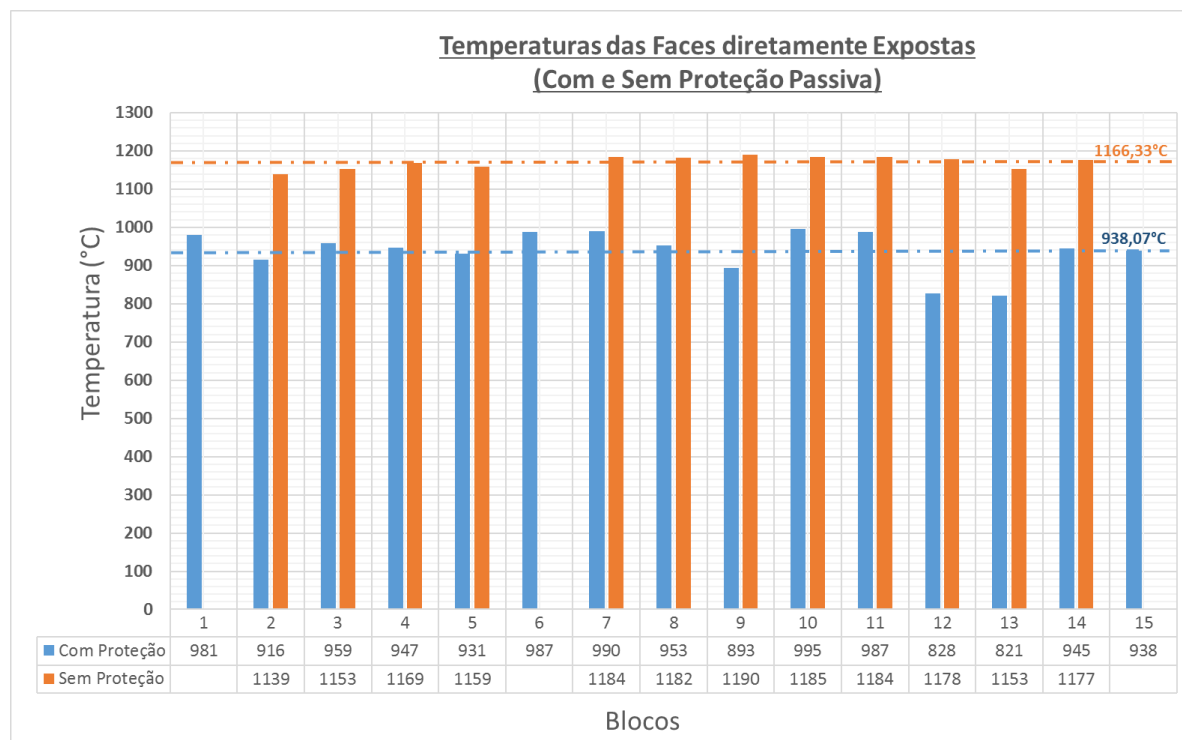
Tabela 19 – Valores médios e desvios padrão para blocos do tipo 4.

Dados	TIPO 4 (Com Exposição à Chama e Sem Proteção)						
	Temperatura (60' de exposição)					Cmax(KN)	R(MPa)
	Td(°C)	Ti ₁ (°C)	Ti ₂ (°C)	ΔT ₁ (°C)	ΔT ₂ (°C)		
Média (X)	1166,33	509,73	92,82	656,60	1073,51	21,86	1,34
Desvio Padrão (s)	34,16	30,46	5,39	44,78	35,09	5,81	0,35
X+3s	1268,81	601,12	108,98	790,95	1178,78	39,28	2,40
X-3s	1063,86	418,35	76,66	522,25	968,24	4,45	0,29

Avaliando inicialmente a temperatura da face onde a chama incidiu diretamente, verificamos que as temperaturas variam aproximadamente 25% em termos médios. Podemos verificar o comparativo entre os blocos individualmente na figura 45.

$$\frac{\bar{T}_{d_s} - \bar{T}_{d_c}}{\bar{T}_{d_c}} = \frac{1166,33 - 938,07}{938,07} = 0,2433 \text{ ou } 24,33\%$$

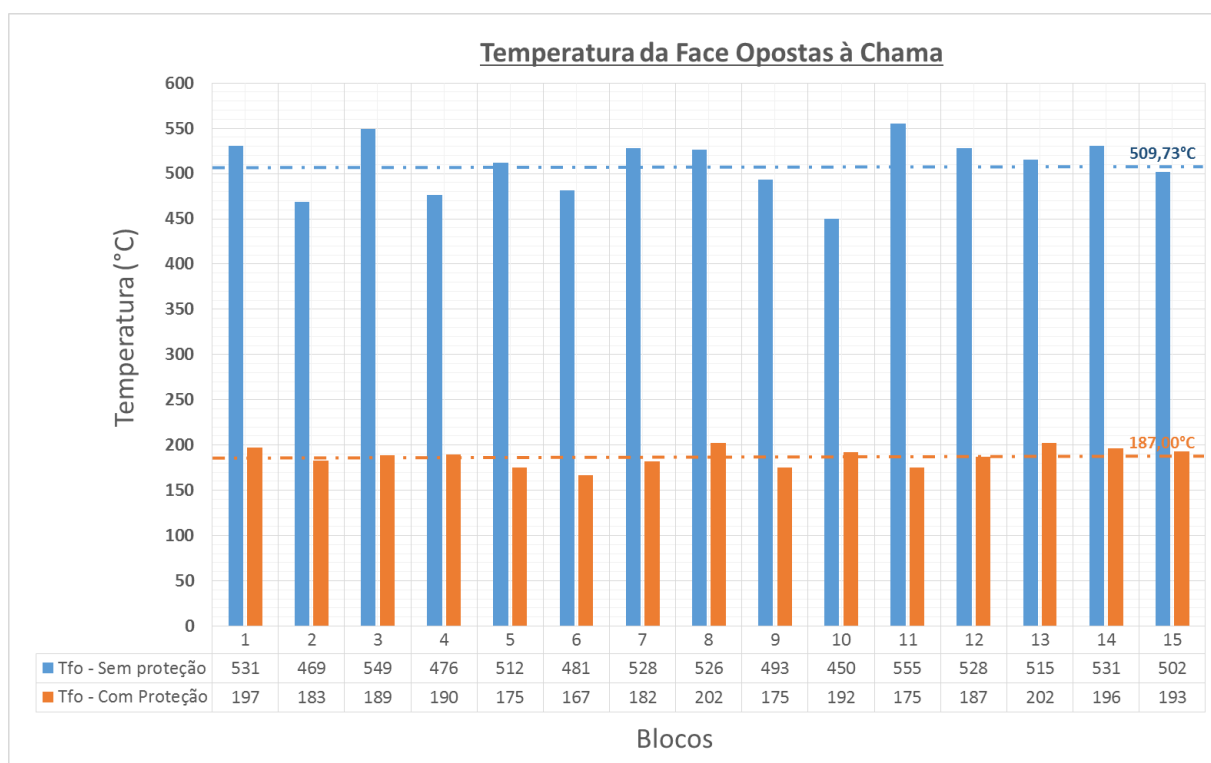
Figura 39 – Comparativo das temperaturas das faces diretamente expostas para os blocos com e sem proteção passiva, tipos 3 e 4 respectivamente.



Quando analisamos as faces imediatamente opostas a aplicação da chama, a variação de temperatura entre os blocos com e sem proteção assume valores médios da ordem de 172% maiores quando os blocos não possuem proteção passiva.

$$\frac{\bar{T}_{fo_s} - \bar{T}_{fo_c}}{\bar{T}_{fo_c}} = \frac{509,73 - 187,00}{187,00} = 1,7258 \text{ ou } 172,58\%$$

Figura 40 – Comparativo das temperaturas das faces imediatamente opostas para os blocos com e sem proteção passiva, tipos 3 e 4 respectivamente.



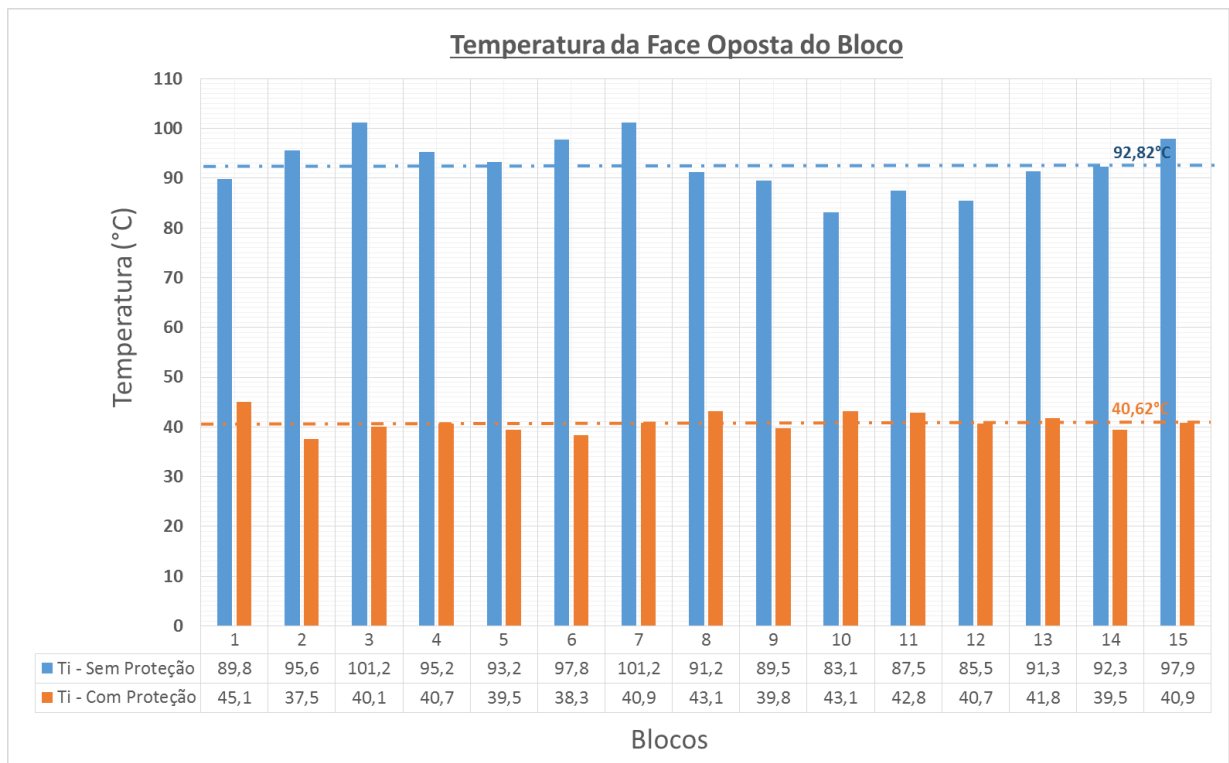
Comparando as temperaturas das faces opostas a aplicação da chama, entre os blocos com e sem proteção verifica-se que os valores médios são cerca de 128% maiores quando os blocos não possuem proteção passiva.

Essa menor diferença entre as variações de temperatura, na face oposta mais distante deve ocorrer em virtude do isolamento térmico natural que o ar entre os septos proporciona ao bloco.

Verifica-se que nenhum dos blocos com proteção passiva atingiu temperaturas maiores que 46°C (figura 47).

$$\frac{\bar{T}_{i_s} - \bar{T}_{i_c}}{\bar{T}_{i_c}} = \frac{92,82 - 40,62}{40,62} = 1,285 \text{ ou } 128,50\%$$

Figura 41 – Comparativo das temperaturas das faces opostas para os blocos com e sem proteção passiva, tipos 3 e 4 respectivamente.



Realizando para o fator temperatura análise de variância dos tipos 3 e 4, considerando as temperaturas de cada face medida, encontra-se as seguintes tabelas:

Tabela 20 – Resumo de Dados (temperatura direta tipos 3 e 4)

Grupo	Contagem	Soma	Média	Variância
Td3(°C)	15	14071	938,0667	2981,924
Td4(°C)	15	17495	1166,333	1166,81

Tabela 21 – ANOVA (temperatura direta tipos 3 e 4)

Fonte da variação	SQ	gl	MQ	F	valor-P	F crítico
Entre grupos	390792,53 3	1	390792,5	188,3913	5,88E-14	4,195972
Dentro dos grupos	58082,266 7	28	2074,367			
Total	448874,8	29				

Tabela 22 – Resumo de Dados (temperatura indireta tipos 3 e 4)

Grupo	Contagem	Soma	Média	Variância
Ti3(°C)	15	613,8	40,92	3,993143
Ti4(°C)	15	7646	509,7333	927,9238

Tabela 23 – ANOVA (temperatura indireta tipos 3 e 4)

Fonte da variação	SQ	gl	MQ	F	valor-P	F crítico
Entre grupos	1648394,56	1	1648395	3537,643	5,09E-31	4,195972
Dentro dos grupos	13046,8373	28	465,9585			
Total	1661441,4	29				

Tabela 24 – Resumo de Dados (temperatura - lado oposto do bloco - tipos 3 e 4)

Grupo	Contagem	Soma	Média	Variância
Ti23(°C)	15	613,8	40,92	3,993143
Ti24(°C)	15	1392,3	92,82	29,02171

Tabela 25 – ANOVA (temperatura - lado oposto do bloco - tipos 3 e 4))

Fonte da variação	SQ	gl	MQ	F	valor-P	F crítico
Entre grupos	20202,075	1	20202,08	1223,817	1,18E-24	4,195972
Dentro dos grupos	462,208	28	16,50743			
Total	20664,283	29				

Verifica-se que para todos os grupos de medições de temperatura realizadas, o valor de P é inferior ao nível de significância estipulado de 5% (0,05), bem como o valor de F é inferior ao F_{crit} . Dessa forma, rejeita-se a hipótese nula (H_0) em que as

médias seriam iguais. Portanto, podemos afirmar que os valores são distintos e as condições de proteção e sem proteção passiva, tornam as amostras distintas. Ao realizar a análise considerando todos os valores agrupados, encontramos resultado semelhante, conforme se verifica abaixo.

Tabela 26 – Resumo de Dados (temperaturas - tipos 3 e 4)

Grupo	Contagem	Soma	Média	Variância
Td3(°C)	15	14071	938,0667	2981,924
Td4(°C)	15	17495	1166,333	1166,81
Ti3(°C)	15	613,8	40,92	3,993143
Ti4(°C)	15	7646	509,7333	927,9238
Ti23(°C)	15	613,8	40,92	3,993143
Ti24(°C)	15	1392,3	92,82	29,02171

Tabela 27 – ANOVA (temperaturas - tipos 3 e 4)

Fonte da variação	SQ	gl	MQ	F	valor-P	F crítico
Entre grupos	18238005	5	3647601	4279,828	1,6E-99	2,323126
Dentro dos grupos	71591,31	84	852,2775			
Total	18309596	89				

No que se refere ao comparativo da resistência à compressão e da capacidade máxima de carga entre os blocos com e sem proteção passiva, temos:

$$\frac{\bar{R}_c - \bar{R}_s}{\bar{R}_s} = \frac{2,38 - 1,34}{1,34} = 0,776 \text{ ou } 77,6\%$$

$$\frac{\bar{C}_c - \bar{C}_s}{\bar{C}_s} = \frac{37,993 - 21,860}{21,860} = 0,738 \text{ ou } 73,8\%$$

Verifica-se que após a exposição ao fogo, durante o período de 60 minutos, os blocos sem proteção diminuíram em média 70% de sua resistência à compressão e 67% da sua capacidade máxima de carga quando comparados aos blocos que possuíam a proteção passiva. Pode-se identificar essa variação por bloco, através das figuras 48 e 49.

Figura 42 – Comparativo das resistências à compressão para os blocos com e sem proteção passiva, tipos 3 e 4 respectivamente.

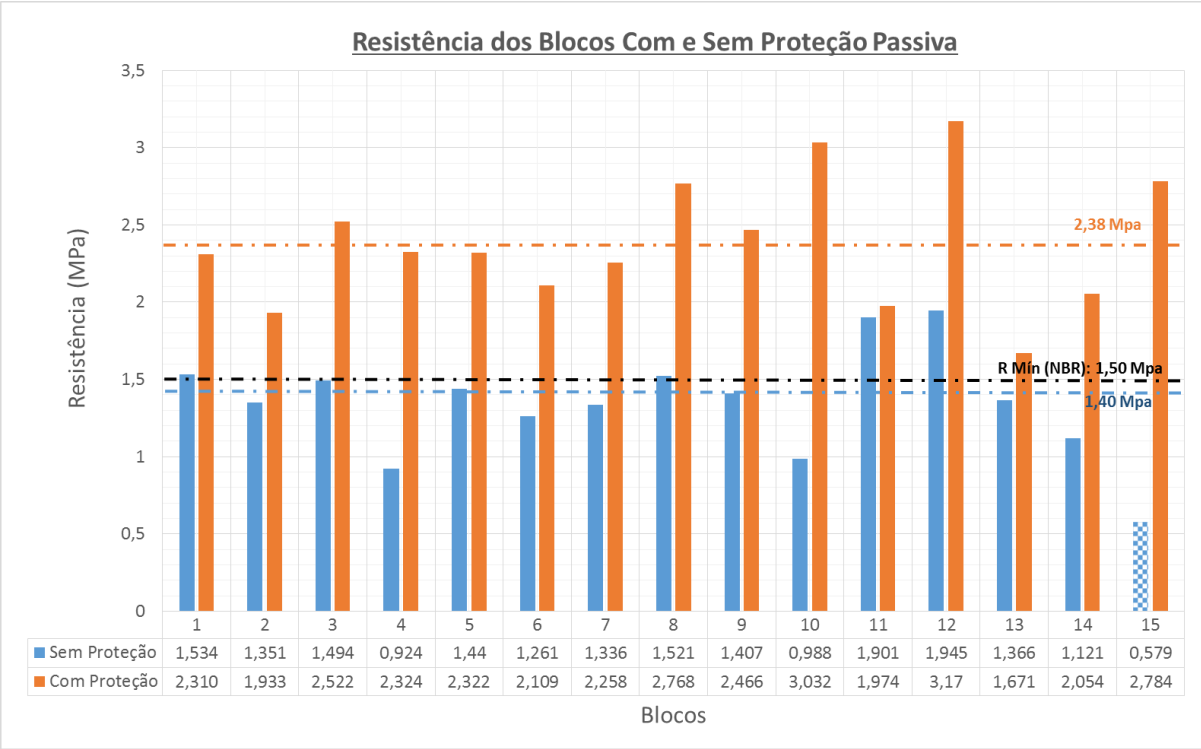
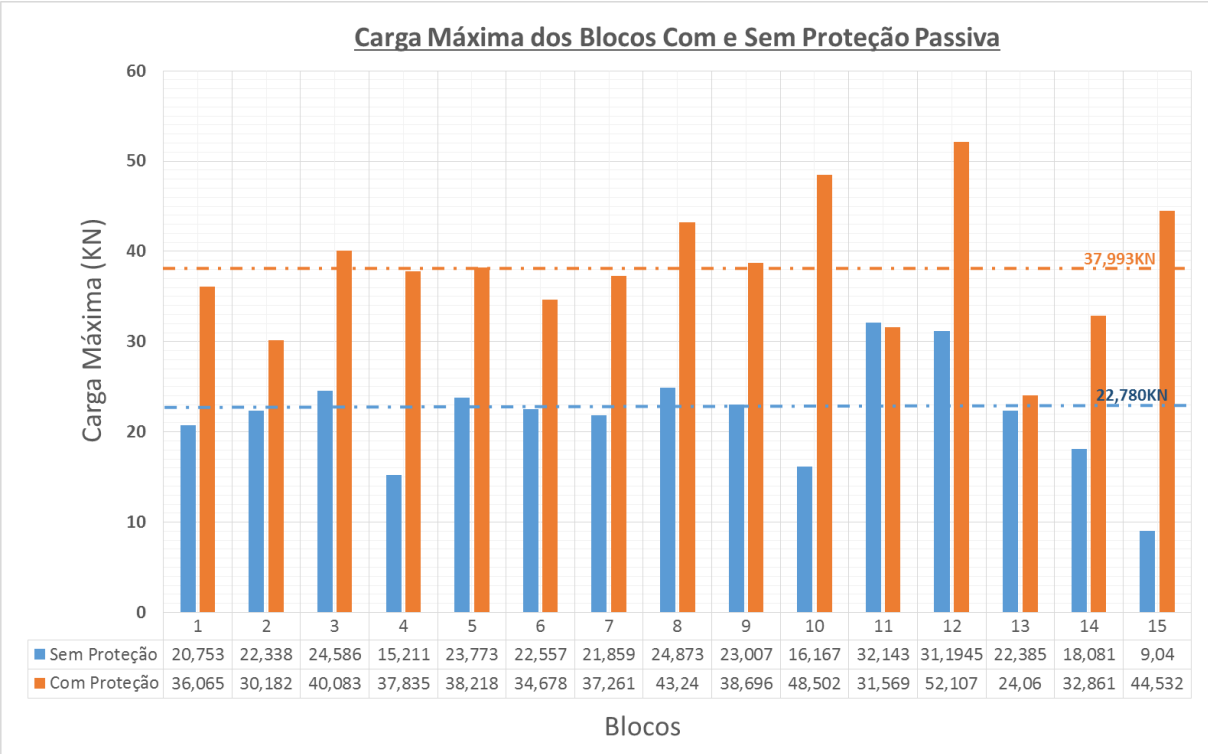


Figura 43 – Comparativo das resistências à compressão para os blocos com e sem proteção passiva, tipos 3 e 4 respectivamente.



Pode-se ainda comparar os valores de resistência à compressão e capacidade de carga entre os blocos com proteção e os blocos do tipo 1 que foram aqueles que tiveram maiores valores de resistência e capacidade de carga, os quais escolhemos como referência.

$$\frac{\bar{R}_1 - \bar{R}_3}{\bar{R}_1} = \frac{2,484 - 2,38}{2,484} = 0,042 \text{ ou } 4,2\%$$

$$\frac{\bar{C}_1 - \bar{C}_3}{\bar{C}_1} = \frac{37,997 - 37,993}{37,997} = 0,000105 \text{ ou } 0,011\%$$

Verifica-se que quando comparamos os valores médios da resistência à compressão, temos uma pequena variação, cerca de 5%, o que também pode ser visto individualmente quando se analisa bloco a bloco (figura 50). Já o valor praticamente nulo da variação da capacidade máxima de carga média, não traduz a mesma análise individual, já que temos uma grande variação dos valores (figura 51)

Ao realizar o teste de análise de variância para o fator resistência à compressão dos blocos dos tipos 3 e 4, encontra-se:

Tabela 28 – Resumo de Dados (resistência à compressão - tipos 3 e 4)

Grupo	Contagem	Soma	Média	Variância
R3(MPa)	15	35,697	2,3798	0,175989
R4(MPa)	15	20,168	1,344533	0,122867

Tabela 29 – Resumo de Dados (resistência à compressão - tipos 3 e 4)

Fonte da variação	SQ	gl	MQ	F	valor-P	F crítico
Entre grupos	8,03832803	1	8,038328	53,79396	5,5E-08	4,195972
Dentro dos grupos	4,18398613	28	0,149428			
Total	12,2223142	29				

Verifica-se que para, o valor de P é inferior ao nível de significância estipulado de 5% (0,05), bem como o valor de F é inferior ao F_{crit} . Pode-se afirmar que os valores são distintos e as condições de proteção e sem proteção passiva, tornam as amostras distintas.

Figura 44 –Comparativo da Resistência à Compressão entre Blocos de Referência e Blocos com Proteção Passiva.

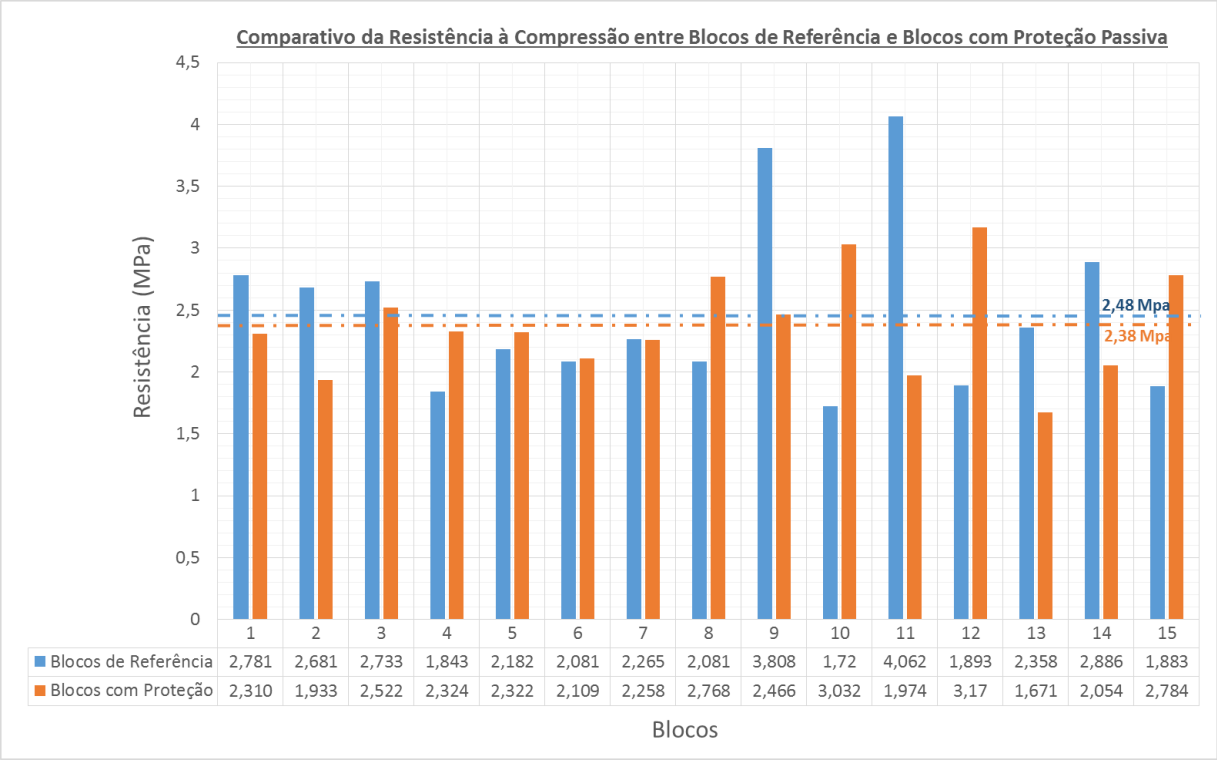
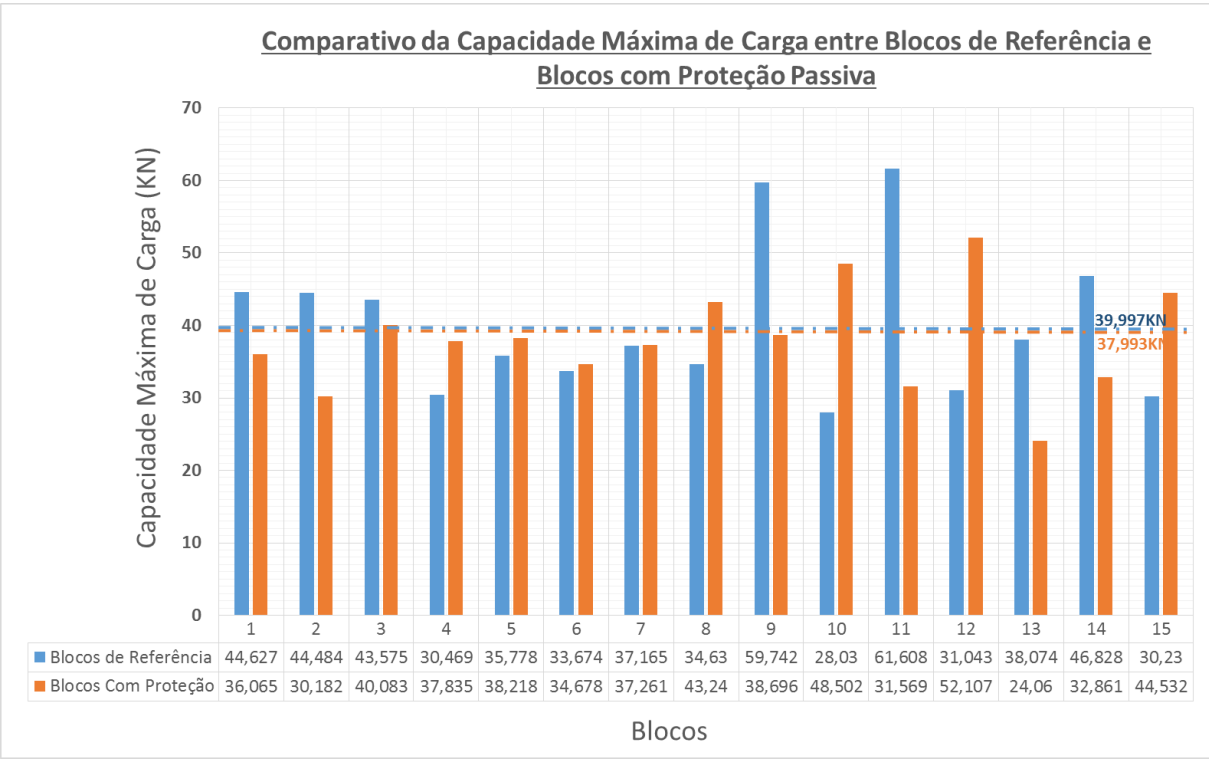


Figura 45 –Comparativo da capacidade máxima de carga entre Blocos de Referência e Blocos com Proteção Passiva.



Verifica-se que mesmo após 60 minutos de incidência direta da chama nos blocos do tipo 3, os quais possuíam proteção passiva por tinta intumescente, que os valores médios da resistência a compressão bem como da capacidade máxima de carga sofreram pequena variação, abaixo de 5%, quando comparados aos valores obtidos dos blocos de referência, demonstrando, além da excelente eficiência no isolamento térmico, que os parâmetros estruturais dos blocos foram mantidos.

Em função dessa pequena variação, realizamos novamente o teste de análise de variância com o intuito de verificar se as médias eram distintas. Verificamos nas tabelas abaixo o resultado.

Tabela 30 – ANOVA (Resistência a Compressão- tipos 1 e 3)

Fonte da variação	SQ	gl	MQ	F	valor-P	F crítico
Entre grupos	0,08112	1	0,08112	0,245753	0,62395	4,195972
Dentro dos grupos	9,242451	28	0,330088			
Total	9,323571	29				

Dessa forma, como o valor de P encontrado (0,624) é bem superior ao nível de significância estipulado que foi de 5% (0,05) ou, analisando de outra forma, como o valor de F (0,245) encontrado é inferior do que o $F_{\text{crítico}}$ (4,19) então devemos aceitar a hipótese nula (H_0) em que as médias seriam iguais. Portanto estamos considerando os conjuntos de blocos de referência, que não foram expostos, ao conjunto de blocos protegidos por tintas intumescentes, após 60 minutos de exposição, como idênticos.

Além disso, no que se refere a exigência da NBR 15270 (2005) - Componentes Cerâmicos - Parte 1 - Blocos Cerâmicos para alvenaria de vedação - Terminologia e requisitos, quanto à resistência à compressão mínima para blocos de vedação com furos da horizontal, todos os blocos com proteção passiva (tipo 3) permaneceram atendendo ao requisito normativo, que exige pelo menos 1,5 MPa. Já para os 15 blocos sem a proteção passiva (tipo 4), tivemos que 11 (onze) blocos tiveram resistência menor do que o exigido pela norma brasileira e 2 (dois) ficaram muito próximos desse valor.

Quando se trata de produtos de proteção passiva, principalmente os retardantes, vernizes e pinturas intumescentes, falamos em CICLO DE

MANUTENÇÃO, que objetivamente significa o período recomendado pela fábrica, que o produto deve ser avaliado, para uma reaplicação ou até uma postergação de mais um ou dois anos de acordo com seu desgaste e seu uso.

Este período depende muito do tipo de desgaste que estas superfícies sofrem ao longo de seu uso. Um piso de madeira de uma boate, por exemplo, sofrerá muito mais que um piso de madeira de um escritório de pouco fluxo. Nestes casos, a média é o período recomendado para esta checagem.

A postergação deste período, somente pode ser realizada por engenheiros certificados pelas empresas e ABNT. Isso porque a responsabilidade é realizada mediante uma nova emissão ART e avaliação do produto. Quanto às garantias do produto, estas se limitam à defeitos de fabricação e são válidas enquanto o produto estiver dentro de sua validade (usualmente 1 a 2 anos).

Tabela 31 - Ciclos de Manutenção para tintas intumescentes.

CICLO DE MANUTENÇÃO RECOMENDADO		Uso	CKC-VR®	CKC-2020®	CKC-268®	CKC-333®
MADEIRA	PISO / CORRIMÃO	INTERNO	3 ANOS	5 ANOS	2 ANOS	
		EXTERNO	2 ANOS	2 ANOS	2 ANOS	
	REVESTIMENTOS (FORRO / PORTA / PAREDE)	INTERNO	8 ANOS	10 ANOS	8 ANOS	
		EXTERNO	3 ANOS	3 ANOS	3 ANOS	
FIBRAS NATURAIS	COBERTURAS	INTERNO		10 ANOS		
		EXTERNO		2 ANOS		
TECIDOS	CORTINAS E TECIDOS EM GERAL (ALGODÃO OU POLIESTER)	INTERNO		5 ANOS		
DRYWALL	PAREDES	INTERNO				8 ANOS
		EXTERNO				3 ANOS
PAINEL WALL SYSTEM	PAREDES	INTERNO				8 ANOS
		EXTERNO				3 ANOS
ALVENARIA	PAREDES / TETO	INTERNO				8 ANOS
		EXTERNO				5 ANOS
CHAPA METÁLICA	PORTAS / TELHAS	INTERNO				3 ANOS
		EXTERNO				

ESPUMA PU		INTERNO				5 ANOS
LONA PLÁSTICA	PAREDES / TETO	INTERNO				
		EXTERNO				
CARPETE / TAPETES	PAREDES / TETO	INTERNO				
		EXTERNO				
	PISO	INTERNO				
CABOS ELÉTRICOS	-	INTERNO				
		EXTERNO				
PVC	PAREDES / TETO	INTERNO				8 ANOS
		EXTERNO				3 ANOS
FIBRA DE VIDRO	PAREDES / TETO	INTERNO				8 ANOS
		EXTERNO				3 ANOS
FIBRA CELULÓSICA	PAREDES / TETO	INTERNO		10 ANOS		8 ANOS
		EXTERNO		3 ANOS		3 ANOS

Fonte: CKC do Brasil (2015)

No caso dos custos benéficos, podemos dizer que os materiais retardantes e de proteção passiva foram beneficiados pelo maior emprego e disseminação no Brasil, o que fez com que os custos também caíssem consideravelmente.

Hoje em dia é possível realizar o tratamento de tecidos a R\$7,00/m² e pinturas intumescentes a R\$17,00/m². As madeiras envernizadas, por ser um material mais nobre, de altíssima tecnologia, e por cima ainda produzido no Reino Unido, apresenta um preço de R\$30-35/m². Para o produto utilizado na pesquisa temos um custo de aproximadamente R\$45/m².

Considere que atualmente os revestimentos empregados em projetos novos ou de reforma, chegam a custar até R\$350/m² sem muita dificuldade, o que justifica e viabiliza bastante o emprego de retardantes e materiais de proteção passiva.

Percentualmente, a proteção passiva de uma edificação completa, incluindo as suas áreas comuns, não passa de 0.3% do seu orçamento total. Se incluir todos revestimentos internos usados pelos arquitetos e decoração, não irá ultrapassar em média 0,6% do custo do prédio.

5 CONCLUSÕES E SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS

5.1 CONCLUSÕES

Gostaríamos, ao final desse trabalho, de fomentar a proteção contra incêndios através da utilização de proteção passiva por meio de tintas intumescentes. Tudo aquilo que em Segurança do Trabalho acreditamos ser custo, na verdade vem a salvar nosso maior bem que é a vida. Sem mencionar outros prejuízos como patrimônio e meio ambiente.

É importante comentar que acreditamos que eventos semelhantes ao de Santa Maria/RS em 2013 ultrapassam os limites da engenharia e das normas de prevenção contra incêndio e adentram em questões de ordem cultural do Brasil. Independentemente da quantidade de saídas de emergência ou de suas dimensões, se, em caso de sinistro, essas vias são interrompidas por seguranças do estabelecimento que são orientados a bloquear a passagem até que o cidadão pague a conta, a questão passa a ser de outra ordem.

Da mesma forma que, estabelecimentos que aprovam seu funcionamento para uma determinada capacidade de público, mas que, na prática, os empresários e proprietários ultrapassam e muito esse limite em função da busca pelo lucro excessivo. Nenhum órgão de fiscalização do Brasil, tais como CREA, Corpos de Bombeiros, Prefeituras conseguem ser onipresentes e suplantam essas questões culturais, que também passam pela consciência do usuário (cidadão) de não frequentar locais inseguros ou que excedam a capacidade de público.

Questões como essas poderiam ser resolvidas através de leis e decretos que estabelecessem, por exemplo, a extinção dos cartões de consumo em boates e locais de reunião de público, devendo o consumo nesses estabelecimentos ser pago de forma imediata, bem como com controle visível e contagem do número de pessoas que estão dentro do estabelecimento em tempo real. Mas infelizmente, essas questões não são prioridades para os empresários e políticos brasileiros, nem tampouco são fiscalizadas pela população em sua maioria.

Após análise e dos dados e resultados obtidos ao longo desse trabalho é possível extrair as seguintes conclusões que seguem abaixo.

Quando submetidos a análise de variância (ANOVA) de um único, foram considerados distintos (médias diferentes) os fatores saturação dos blocos, temperaturas e resistência à compressão dos blocos com e sem proteção, indicando que os fatores escolhidos tornavam as amostras distintas. Já quando realizamos a mesma análise de variância para os blocos de referência e os blocos com proteção após 60 minutos de inocência da chama, verificamos que os grupos seriam idênticos do ponto de vista dessa análise, reforçando ainda mais o efeito da proteção passiva utilizada.

Quando se compara os valores de resistência a compressão e capacidade máxima de carga dos blocos escolhidos como referência (tipo 1 e 2), encontramos uma variação nos valores inferiores a 18%, em termos médios, nas condições não saturadas e saturadas.

A temperatura da face diretamente exposta a chama, medida em seu ponto mais desfavorável, é em média 25% inferior quando o bloco possui proteção passiva por tintas intumescentes, proporcionando uma melhora significativa no ambiente do ponto de vista da evacuação além de preservar ainda mais as características dos materiais construtivos do local.

Após a incidência da chama por 60 minutos e ao analisar as temperaturas das faces imediatamente opostas a aplicação da chama dos blocos dos tipos 3 e 4, encontra-se uma diferença superior a 170% naqueles em que não existe a proteção passiva, o que nos mostra a relevância da aplicação da proteção para redução do gradiente térmico da parede em situação de incêndio.

A variação da temperatura do bloco como um todo (faces opostas mais distantes) tem valor também significativo, em torno de 128%, que é inferior ao anteriormente citado, em função do isolamento térmico natural do ar, fato que nos leva a concluir que a configuração do bloco perfurado é superior, em termos de isolamento térmico, ao bloco maciço.

A resistência a compressão e capacidade máxima de carga dos blocos com proteção passiva foram cerca de 70% superiores aos blocos sem proteção, após 60 minutos de exposição direta a chama;

Mais de 70% dos blocos sem proteção passiva e que foram expostos a chama tiveram resistência a compressão inferior a 1,5MPa, mínimo estipulado pela norma brasileira, enquanto 100% dos blocos com proteção tiveram valores superiores ao que solicita a norma, além de diferir menos que 5% dos valores considerados como padrão de referência, mesmo após 60 minutos de exposição.

Sabe-se que, além da questão cultural e política do Brasil não valorizar a prevenção ou manutenção de obras, os investimentos na área de segurança normalmente são escassos, isso quando ocorrem. A proteção passiva é com certeza uma excelente opção quando estamos tratando de áreas críticas como saídas de emergências, locais com potencial reunião de público, alto risco e concentração de material combustível, bem como edificações cujo perfil e propósito impedem intervenções estruturais como igrejas e sítios históricos.

Nesse sentido, o investimento em proteção passiva teria um custo benefício que justificaria sobremaneira sua utilização, além do ganho de tempo na execução dos serviços para locais críticos ou que forem indicados para tal.

5.2 SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS

- Avaliar a eficiência da proteção passiva por tintas intumescentes em blocos cerâmicos de vedação e estruturais utilizando o aquecimento dos blocos de forma generalizada através de estufa.
- Avaliar a proteção passiva por tintas intumescentes de outros materiais construtivos, tais como concreto e aço;
- Elaboração de normatização interna pelo Corpo de Bombeiros Militar de Pernambuco no sentido exigir a utilização de proteção passiva por tintas intumescentes, em edificações e sítios históricos, locais de reuniões de público confinadas e edificações muito antigas em que não seja viável a alteração da concepção do projeto estrutural para atendimento das novas legislações de proteção contra incêndio.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

AGUILAR, D.Filho. **Combustibilidade e tratamento ignífugo da madeira**. São Carlos. Dissertação (Mestrado) – Escola de Engenharia de São Carlos. Universidade de São Paulo. 1986.

AL NAHHAS, F. et al. **Resistance to fire of walls constituted by hollow blocks: Experiments and thermal modeling**. *Applied Thermal Engineering*, v. 27, n. 1, p. 258-267, 2007.

ALVA, G. M. S. **Sobre o projeto de estrutura mista aço-concreto**. 2000, 277p. Dissertação (Mestrado em Engenharia de Estruturas) - Universidade de São Paulo, USP, São Carlos, 2000.

AMERICAN ASSOCIATION FOR TESTING MATERIALS (ASTM). Standard test method for specific optical density of smoke generated by solid materials – **ASTM E 662**. West Conshohoken, 2005.

_____. **ASTM E119**: Standard methods for fire tests of building construction and materials. Philadelphia, 2008.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 5628**: Componentes construtivos estruturais – Determinação da resistência ao fogo. Rio de Janeiro, 2001.

_____. **NBR 6479**: Portas e vedadores – Determinação da resistência ao fogo. Rio de Janeiro, 1992.

_____. **NBR 9442**: Materiais de Construção – Determinação do índice de propagação superficial de chamas pelo método do painel radiante – Método de ensaio. Rio de Janeiro, 2001.

_____. **NBR 9077**: Saída de emergência em edifícios. Rio de Janeiro, 2001.

_____. **NBR 10636**: Paredes divisórias sem função estrutural – Determinação da resistência ao fogo. Rio de Janeiro, 1989.

_____. **NBR 13860**: Glossário de termos relacionados com a segurança contra incêndio. Rio de Janeiro, 1997.

_____. **NBR 14432**: Exigências de resistência ao fogo de elementos construtivos de edificações – Procedimento. Rio de Janeiro, 2000.

_____. **NBR 15200**: Projeto de estruturas de concreto em situação de incêndio – Procedimento –. Rio de Janeiro, 2005.

_____. **NBR 15270: Componentes cerâmicos Parte 1: Blocos cerâmicos para alvenaria de vedação – Terminologia e requisitos.** Rio de Janeiro, 2005.

_____. **NBR 15270: Componentes cerâmicos Parte 2: Blocos cerâmicos para alvenaria estrutural – Terminologia e requisitos.** Rio de Janeiro, 2005.

_____. **NBR 15270: Componentes cerâmicos Parte 3: Blocos cerâmicos para alvenaria estrutural e de vedação – Método de ensaio.** Rio de Janeiro, 2005.

_____. **NBR 15575: Edificações habitacionais – Desempenho Parte 4: Requisitos para os sistemas de vedações verticais internas e externas.** Rio de Janeiro, 2013.

BARROSA, M. R; **Princípios fundamentais da transferência de calor.** 2004. 48f. Departamento de Engenharia Naval e Oceânica.

BEALL, C. Calculating masonry's fire resistance. **Masonry Construction Magazine**, Agosto 1994. 4 p. Disponível em: <<http://www.masonryconstruction.com/>>. Acesso em: 04 dez. 2015.

BEALL, C. **Masonry Design and Detailing: for architects, engineers and contractors.** 4^a ed., McGraw-Hill, 1997, 613p.

BEARD, A. N. Flashover and boundary properties. **Fire Safety Journal**, Vol 45, Nº 2, Feb. 2010, p. 116-121.

BERTO, A. F. **Medidas de proteção contra incêndio: aspectos fundamentais a serem considerados no projeto arquitetônico dos edifícios.** São Paulo: FAUUSP, 1991.

BONITESE, K. V. **Segurança contra incêndio em edifício habitacional de baixo custo estruturado em aço.** 2007. 253 p. Dissertação (Mestrado em Construção Civil) – Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte.

BRASIL, CKC do. **Proteção Passiva Contra Incêndio.** Disponível em: <<http://ckc.com.br>>. Acesso em: 27 dez. 2015.

BRENTANO, T. – **Como elaborar um plano de proteção contra incêndio (PPCI). Apostila** - (Curso de Extensão Universitária), Departamento de Engenharia Civil, Pontifícia Universidade Católica do Rio Grande do Sul, PUC/RS , Porto Alegre, RS , 2004, 95 p.

BRICK INDUSTRY ASSOCIATION – BIA. **Technical Note 16: Fire resistance of brick masonry.** Reston, VA, 2008. 16 p.

BRITISH STANDARD INSTITUTION – BSI. **BS476 Part 23**: Fire Tests on Building Materials and Structures – Methods for Determination of the Contribution of Components to the Fire Resistance of a Structure. London: 1987.

BUCHANAN, A. H. **Structural design for fire safety**. Canterbury: John Wiley & Sons, 2002. 421 p.

CÂMARA BRASILEIRA DA INDÚSTRIA DA CONSTRUÇÃO (CBIC). **Desempenho de edificações habitacionais: guia orientativo para atendimento à norma ABNT NBR 15575/2013**. Fortaleza, Gadioli Cipolla Comunicação, 2013.

CASONATO, C. A. **Ação de elevadas temperaturas em modelos de paredes de concreto e de alvenaria sob cargas de serviço**. 2007, 136p. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) - Universidade Federal do Rio Grande do Sul, UFRGS, Porto Alegre, 2007.

CHICHIERCHIO, L. C. Conforto ambiental: Desempenho térmico e acústico e proteção contra o fogo. In: ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DA CONSTRUÇÃO INDUSTRIALIZADA - ABCI. **Manual técnico de alvenaria**. São Paulo: ABCI, 1990. p. 119-141

COELHO, A. L. **Incêndios em edifícios**. Editora Orion, primeira edição – outubro de 2010.

COSTA, C. N. **Dimensionamento de elementos de concreto armado em situação de incêndio**. Tese de Doutorado, Universidade de São Paulo. 2008.

EUROPEAN COMMITTEE FOR STANDARDIZATION - **EUROCODE 1** – Actions on structures Part 12: General Actions: Actions on structures exposed to fire. Brussels, 2002, 57p. prEN1991-1-2:2002.

_____. **EUROCODE 1** – Actions on structures Part 1-5: General Actions: Thermal actions. Brussels, 2003, 52p. Pr EN 1991-1-5:2003.

_____. **EUROCODE 2** – Design of concrete structures - Part 1-2: General rules – Structural fire design. Brussels, 2004, 97p. Pr EN 1992-1-2:2004.

_____. **EUROCODE 6** – Design of masonry structures - Part 1-2: General rules – Structural fire design. Brussels, 2003, 73p. Pr EN 1996-1-2:October 2003.

HALLIDAY, D.; RESNICK, R.; WALKER, J. **Fundamentos de Física 2 – Gravitação, ondas e termodinâmica**. Tradução Aldir Moyses Luiz (et al.). 3º ed., LTC – Livros Técnicos e Científicos, Rio de Janeiro, 1994, 288p.

HARMATHY, T. Z.; SULTAN, M. A.; MacLAURIN, J. W. Comparison of severity of exposure in ASTM E 119 and ISO 834 fire resistance tests. **Journal of Testing and Evaluation**, JTEVA, Vol 15, Nº 6, Nov. 1987, p. 371-375.

INÁCIO, P. J. **Evolução da temperatura ambiente em construções sujeitas ao fogo**. Faculdade de Ciências e Tecnologia e a Universidade Nova de Lisboa, 2011.

INCROPERA, F. P.; DEWITT, D. P. **Fundamentos de transferência de calor e de massa**. 3ª edição. Rio de Janeiro: LTC, 1992. 455 p.

INTERNATIONAL ORGANIZATION FOR STANDARDIZATION – **ISO 834-1 Part 1: Fire-resistance tests – Elements of building construction –General requirements**. Genebra, 1999.

_____. **ISO 8421** – Fire Protection – Vocabulary – Part 1: General terms and Phenomena of fire. International Organization for Standardization. Geneva, 1987, 06p.

_____. **ISO 1182** – Reaction to fire tests for buildings products – Noncombustibility test –. Switzerland, 2002.

KIMURA, E. F. A. **Análise termoestrutural de pilares de aço em situação de incêndio**. 2009, 225p. Dissertação (Mestrado em Engenharia de Estruturas) - Universidade de São Paulo, USP, São Carlos, 2009.

KREITH, F.; BOHN, M. S.; **Princípios de Transferência de Calor**. 1977, Editora Edgard Blucher, São Paulo p1 a 21.

LAMBERTS, R.; DUTRA, L.; PEREIRA, F. O. R. **Eficiência energética na arquitetura**. São Paulo: PW, 1997. 192 p.

LEPAGE, E.S et al. **Manual de preservação de madeira**. Instituto de Pesquisas Tecnológicas do Estado de São Paulo - PT. São Paulo: 1986.

MENDES, N. et al. **Moisture content influence on thermal conductivity of porous building materials**. In: 7th INTERNATIONAL IBPSA CONFERENCE, 2001, Rio de Janeiro. p. 957-963

MEYER, U. **Extended Application Rules for the fire performance of masonry walls**. In: 7th INTERNATIONAL MASONRY CONFERENCE, 2006, Londres. Disponível em: < <http://www.masonry.org.uk/> >. Acesso em: 06 dez. 2015.

MINGZHI, A. et al. Influence of moisture content on measurement accuracy of porous media thermal conductivity. **Heat Transfer – Asian Research**, v. 38, n. 8, p. 492-500, 2009.

MITIDIERI, M. L. O comportamento dos materiais e componentes construtivos diante do fogo - reação ao fogo. In: SEITO, A. I. et al. (Coord.). **A segurança contra incêndio no Brasil**. São Paulo: Projeto Editora, 2008. p. 55-75.

NADJAI, A. et al. Compartment masonry walls in fire situations. **Fire Technology**, v. 42, n. 3, p. 211-231, 2006.

NATIONAL FIRE PROTECTION ASSOCIATION - NFPA. **All about fire**. Disponível em: <<http://www.nfpa.org>>. Acesso em: 02 dez. 2015.

NGUYEN, T. et al. The behavior of masonry walls subjected to fire: Modelling and parametrical studies in the case of hollow burnt-clay bricks. **Fire Safety Journal**, v. 44, n. 4, p. 629-641, 2009

ONO, R. Parâmetros para garantia da qualidade do projeto de segurança contra incêndio em edifícios altos. **Ambiente Construído**. Porto Alegre, v. 7, n. 1, p. 97-113, 2007.

PADILHA, A. F. **Materiais de engenharia – Microestrutura e propriedades**. Curitiba: Hemus, 1997. 352 p.

PIOLLI, O. J. **Sistemas fixos de combate a incêndio**. 2003, 82 p. Trabalho de Conclusão de Curso (Engenharia Civil) - Universidade Anhembi Morumbi, São Paulo, 2003.

PINTO, C. S. C. et al. Measurement of thermophysical properties of ceramics by the flash method. **Brazilian Archives of Biology and Technology**, v. 48, p. 31-39, 2006.

POLICIA MILITAR DO ESTADO DE SÃO PAULO, Corpo de Bombeiros. **Instrução Técnica nº 05: Segurança contra Incêndios – Urbanística**. São Paulo, 2004.

_____. **Instrução Técnica no 07: Separação entre edificações (isolamento de risco)**. São Paulo, 2004.

_____. **Instrução Técnica nº 08: Segurança Estrutural nas Edificações – Resistência ao fogo dos elementos de construção**. São Paulo, 2004.

_____. **Instrução Técnica no 09: Compartimentação horizontal e compartimentação vertical**. São Paulo, 2004.

_____. **Instrução Técnica no 14: Carga de incêndio nas edificações e áreas de risco**. São Paulo, 2004.

PURKISS, J. A. **Fire safety engineering design of structures**. Butterworth Heinemann. Great Britain, 2nd ed., 2007, 389 p.

OLIVEIRA, L. A. P. de. **Estimativa da resistência ao fogo de paredes de alvenaria pelo critério de isolamento térmico**. Boletim Técnico da Faculdade de Tecnologia de São Paulo, nº 05, dezembro 1998. 10 p.

ROMAN, H. R. **Características físicas e mecânicas que devem apresentar os tijolos e blocos cerâmicos para alvenaria de vedação e estrutural**. In: III SIMPÓSIO DE DESEMPENHO DE MATERIAIS E COMPONENTES DE CONSTRUÇÃO CIVIL, 1991, Florianópolis. Anais. Florianópolis: UFSC. 1991. p. 101 – 108.

ROUSAN, A. A.; ROY, D. M. A thermal comparator method for measuring thermal conductivity of cementitious materials. **Industrial & Engineering Chemistry Product Research and Development**, v. 22, n. 2, p. 349-351, 1983.

SEITO, A. I. et al. **A Segurança contra Incêndios no Brasil**. São Paulo: Projeto Editora. 2008. p.496,497.

SILVA, V. P. **Estruturas de aço em situação de incêndio**. São Paulo, Zigurate Editora, 2004, 256 p.

SILVA, V. P. et al. Segurança das estruturas em situação de incêndio. In: SEITO, A. I. et al. (Coord.). **A segurança contra incêndio no Brasil**. São Paulo: Projeto Editora, 2008. p. 135-167

STECKEL, A. L. P. A. **Proposta de adequação da NBR 9077 para locais de reunião de público**. Universidade Federal de Santa Maria, Monografia de Especialização, UFSM, Santa Maria, 2004, 113 p.

TAVARES, R. M. An analysis of the fire safety codes in Brazil: Is the performance-based approach the best practice. **Fire Safety Journal**, Vol 44, Nº 5, July 2009, p. 749-755.

THINK BRICK AUSTRALIA. **Design of clay masonry walls for fire resistance**. Baulkham Hills, 2006. Disponível em <<http://www.thinkbrick.com.au/brick-data.cfm>>. Acesso em: 04 dez. 2015.

THOMAZ, E.; HELENE, P. **Qualidade no projeto e na execução de alvenaria estrutural e de alvenarias de vedação em edifícios**. Boletim Técnico da Escola Politécnica da USP, BT/PCC/252. São Paulo: EPUSP, 2000. 31 p.

TIPLER, P. A. **Física**. tradução: Horácio Macedo, Vol 1b, 2º edição. Rio de Janeiro: ed. Guanabara Dois, 1984, 587 p.

WALD, F. **Models of heat development in fire compartment**. Centre Integrated Design of Advanced Structures, 2005, 02 p.

ZSEMBERY, S.; CLARKE, R. E.; MCNEILLY, T. Thermal transmission properties of Australian clay bricks. **Masonry International**. Londres, v. 10, n. 1, p. 30-34, 2006.