

**UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO GRANDE DO SUL
ESCOLA DE ENGENHARIA
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA DE MINAS,
METALÚRGICA E DE MATERIAIS**

MICHEL JOHANA MURILLO ACOSTA

**DESEMPENHO DA RESISTÊNCIA AO FOGO DE ELEMENTOS CONSTRUTIVOS
DE VEDAÇÃO VERTICAL DE CONCRETO COM FORMAS PERMANENTES DE
PVC**

Porto Alegre

2019

MICHEL JOHANA MURILLO ACOSTA

**DESEMPENHO DA RESISTÊNCIA AO FOGO DE ELEMENTOS CONSTRUTIVOS
DE VEDAÇÃO VERTICAL DE CONCRETO COM FORMAS PERMANENTES DE
PVC**

Tese de Doutorado submetida ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Minas, Metalúrgica e Materiais da Universidade Federal do Rio Grande do Sul, como requisito parcial à obtenção do título de Doutora em Engenharia. Área de concentração: Tecnologia Mineral, Ambiental e Metalurgia Extrativa

Orientador: Prof. Dr. Carlos Hoffmann Sampaio

Coorientador: Prof. Dr. Luis Felipe Silva Oliveira

Porto Alegre

2019

UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO GRANDE DO SUL

Reitor: Rui Vicente Oppermann

Vice-Reitora: Jane Fraga Tutikian

ESCOLA DE ENGENHARIA

Diretor: Luiz Carlos Pinto Silva Filho

Vice-Diretora: Carla Schwengber Ten Caten

PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO

Coordenador: Afonso Reguly

Vice-Coordenadora: Andréa Moura Bernardes

CIP - Catalogação na Publicação

Murillo Acosta, Michel Johana
Desempenho da resistência ao fogo de elementos
construtivos de vedação vertical de concreto com
formas permanentes de PVC / Michel Johana Murillo
Acosta. -- 2019.
94 f.

Orientador: Carlos H. Sampaio.

Coorientador: Luis Silva Olivera.

Tese (Doutorado) -- Universidade Federal do Rio
Grande do Sul, Escola de Engenharia, Programa de
Pós-Graduação em Engenharia de Minas, Metalúrgica e de
Materiais, Porto Alegre, BR-RS, 2019.

1. Desempenho. 2. Resistência ao fogo . 3.
Concreto. 4. PVC. I. H. Sampaio, Carlos, orient. II.
Silva Olivera, Luis, coorient. III. Título.

MICHEL JOHANA MURILLO ACOSTA

**DESEMPENHO DA RESISTÊNCIA AO FOGO DE ELEMENTOS CONSTRUTIVOS
DE VEDAÇÃO VERTICAL DE CONCRETO COM FORMAS PERMANENTES DE
PVC**

Esta tese foi analisada e julgada adequada para a obtenção do título de Doutora em Engenharia, área de concentração: Tecnologia Mineral, Ambiental e Metalurgia Extrativa e aprovada em sua forma final pelo Orientador e pela Banca Examinadora designada pelo Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Minas, Metalúrgica e Materiais da Universidade Federal do Rio Grande do Sul.

Dr. Carlos Hoffmann Sampaio

Dr. Luis Felipe Silva Oliveira

Aprovado em: 27/09/2019

BANCA EXAMINADORA

Prof. Dr. Bernardo F. Tutikian – Unisinos _____

Prof. Dr. Roberto Christ – Unisinos _____

Prof. Dr. Weslei Ambrós – UFRGS _____

Dedico esta tese à minha mãe Gladys Acosta, pela compreensão dos momentos ausentes que eu tive que estar longe de casa para fazer desse trabalho uma realidade, pelo apoio e amor único e constante dado.

AGRADECIMENTOS

Agradeço especialmente aos irmãos Silva, M. e L., que foram os motivadores essenciais para minha decisão de ser Doutora, me fornecendo a ideia do projeto de pesquisa, muito conhecimento, orientação e dedicação ao longo destes mais de dois anos.

De maneira muito especial eu quero agradecer ao meu grande amigo, Cesar Greff Silveira, pela grande ajuda brindada e por confortar-me nos momentos difíceis.

Igualmente, e não menos importante, agradeço ao Prof. Dr. Bernardo F. Tutikian por todo o apoio fornecido, permitindo o acesso e trabalho no Instituto Tecnológico em Desempenho e Construção Civil (ITT Performance).

Finalmente ao Prof. Dr. Carlos Sampaio, pela disposição e orientação brindada.

RESUMO

O concreto consiste em um material com baixa condutividade térmica e considerada capacidade de isolamento, com propriedades adequadas para fornecer proteção ao fogo, sempre dependendo da sua composição química e molecular, pois as propriedades finais deste material estão relacionadas aos seus materiais constituintes. Diante disso, vem sendo desenvolvidos complementos de proteção contra incêndio, aos mecanismos de vedação e paredes, a fim de melhorar o desempenho térmico destes ao serem expostos ao incêndio. Alguns desses materiais são: cloreto de polivinil (PVC), polipropileno, gesso, fibras, vidro, retardantes de chama, tintas intumescentes, entre outros. Em paralelo, as formas permanentes são uma alternativa mais prática em comparação com as formas tradicionais de aço ou madeira, devido à sua melhor construtibilidade e durabilidade. O objetivo deste trabalho foi estudar o desempenho de resistência ao fogo de painéis de concreto estruturais e não estruturais com formas permanentes de PVC. Nesta pesquisa, três painéis de concreto com formas permanentes PVC de dimensões 3150 mm x 2800 mm x 80 mm foram testados e comparados entre si. Todos os painéis foram envelhecidos por 28 dias, depois expostos à curva de incêndio padrão baseada na norma ISO 834: 2014, e finalmente as temperaturas em cada superfície desses painéis foram registradas. Os resultados indicam que a resistência do concreto influenciou significativamente na estabilidade estrutural e o tempo de resistência ao fogo dos painéis (sob carga), mesmo neste tipo de painéis ao serem expostos a altas temperaturas. Verificou-se que o revestimento de PVC melhorou a propriedade de isolamento térmico, um dos critérios de desempenho de resistência ao fogo. De maneira geral, a importância desta forma alternativa é a redução do uso de recursos florestais, a conscientização da sua conservação e a promoção do seu uso racional, por ser este, um material amigável ao meio ambiente, e, portanto, mais sustentável.

Palavras-chave: Painéis de concreto. Resistência ao fogo. Sistema construtivo industrializado. Concreto-PVC. Cofragem de PVC. Forma permanente.

ABSTRACT

It has been demonstrated that concrete, being a material with low thermal conductivity and considered insulation capacity, has adequate properties to provide protection against fire always depending on its chemical and molecular composition, because the final properties of this are always in relation to the constituent materials. In the same way fire protection complements have been developed to seal mechanism, walls, in order to improve their thermal performance when exposed to fire. Some of these materials are: polyvinyl chloride (PVC), polypropylene, gypsum, fibers, glass, flame retardants, intumescent paints, among others. In parallel, stay-in-place (SIP) formwork is a more-practical alternative to traditional steel or wood formworks due to its improved constructability and durability. The aim of this paper was to study the fire resistance performance of structural and non-structural concrete panels with polyvinyl chloride (PVC) SIP formwork. Three 3150 mm x 2800 mm x 80 mm panels of PVC SIP formwork were tested and compared to one another. All panels were aged for 28 days, then exposed to the standard fire curve based on the ISO 834:2014 standard, and finally the temperatures in each panel surface recorded. The results indicate that concrete strength significantly influenced the structural stability and the fire resistance time of the panels (under load), even in this type of panels when exposed to high temperatures. It was found that the PVC encasement enhanced the thermal insulation property, one of the fire resistance performance criteria. Overall, the importance of this alternative formwork is the reduction in the use of forest resources, the raise of awareness of their conservation, and the promotion of their rational use as this a material is friendly to the environment, and therefore more sustainable.

Keywords: Concrete panels. Fire resistance. Industrialized construction system. concrete-PVC. PVC encased system. Stay-in-place formwork.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 - Estágios de um incêndio	25
Figura 2 - Curvas Padrões de incêndio	26
Figura 3 - Ensaio de Desempenho de Segurança contra incêndio.....	27
Figura 4 - Ilustração do procedimento do Ensaio de Resistência ao Fogo	29
Figura 5 - Ilustração da (A) geometria dos perfis de PVC e da (B) composição dos painéis.....	43
Figura 6 - Ilustração da seção transversal dos painéis e da posição de reforço	43
Figura 7 - Projetos do sistema construtivo Concreto-PVC próprio da Bazze	44
Figura 8 - Disposição dos termopares internos – Vista frontal do forno sem amostra acoplada.....	46
Figura 9 - Disposição dos termopares externos ao forno – Vista frontal do forno com amostra acoplada.....	47
Figura 10 - Ilustração real dos termopares para a amostra localizados (A) no interior, e (B) no exterior do forno empregado nesta pesquisa	48
Figura 11 - Ilustração da acoplagem da amostra ao forno vertical.....	49
Figura 12 - Ilustração do forno vertical empregado	50
Figura 13 - Ilustração dos queimadores do forno empregado	51
Figura 14 - Painel de operação do forno vertical empregado.....	51
Figura 15 - Ilustração da torre de sinalização.....	52
Figura 16 - Ilustração do registrador de dados (<i>FieldLogger</i>) empregado	53
Figura 17 - <i>Layout</i> do <i>Software FieldLoggerConfig</i>	54
Figura 18 - <i>Layout</i> do Programa <i>Flir Tools+</i> empregado.....	55
Figura 19 - Ilustração do teste de choque mecânico.....	58
Figura 20 - Ilustração dos cilindros hidráulicos empregados para o carregamento...59	
Figura 21 - Ilustração do chumaço de algodão do teste de estanqueidade	60
Figura 22 - Ilustração da realização do teste de estanqueidade	60
Figura 23 - Principais eventos ocorridos no ensaio da amostra PVC3: ligeira flambagem (A), deformação do perfil de PVC (B e C) e passagem de gases através do painel (D).....	62
Figura 24 - Aparecimento de bolhas na superfície de PVC não exposta ao fogo de cada amostra.....	64

Figura 25 - Aparência inicial v.s. deslocamento do concreto na face exposta ao fogo de cada amostra.....	65
Figura 26 - Aspectos da perda de integridade das amostras PVC 1-3.....	67
Figura 27 - Medições de temperatura registradas pelos termopares na face externa da amostra PVC1	68
Figura 28 - Medições de temperatura registradas pelos termopares na face externa da amostra PVC2	69
Figura 29 - Medições de temperatura registradas pelos termopares na face externa da amostra PVC3	69
Figura 30 - Aspecto típico de fusão e deformações dos perfis de PVC testados	71
Figura 31 - Aspectos finais das amostras testadas	72
Figura 32 - Detalhes do aspecto final das superfícies dos concretos após o ensaio	73
Figura 33 - Perspectiva frontal do painel.....	90
Figura 34 - Ilustração da localização dos termopares externos na amostra	90
Figura 35 - Aspecto final do concreto após o ensaio.....	90
Figura 36 - Aparência de fissura no centro da amostra.....	90
Figura 37 - Aspecto da face exposta às elevadas temperaturas (A) antes, e (B) após o ensaio.....	90
Figura 38 - Perspectiva final do sistema após o ensaio	91
Figura 39 - Fissura deflagrada no centro da amostra.....	91
Figura 40 - Aspecto final da superfície da amostra exposta às elevadas temperaturas	91
Figura 41 - Ilustração do teste de choque mecânico realizado à amostra	92
Figura 42 - Perfil de PVC superaquecido, visão frontal (A), visão lateral (B)	92
Figura 43 - Aspecto final da face exposta ao fogo da amostra.....	91
Figura 44 - Perfis de PVC	93
Figura 45 - Processo de concretagem dos painéis	94

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Critérios para caracterizar a resistência ao fogo	27
Tabela 2 - Normativas nacionais para o Ensaio de Resistência ao Fogo	28
Tabela 3 - TRRF das edificações habitacionais	30
Tabela 4 - Transformações físico-químicas do concreto em altas temperaturas	32
Tabela 5 - Classificação dos deslocamento e suas respectivas possíveis causas .	34
Tabela 6 - Coeficiente de redução da tensão de escoamento do aço laminado a quente em diferentes temperaturas.....	37
Tabela 7 - TRF de paredes de concreto não portantes segundo suas espessuras ..	39
Tabela 8 - TRF de paredes de concreto portantes segundo suas dimensões	39
Tabela 9 - Traço dos concretos empregados	42
Tabela 10 - Principais características dos materiais componentes dos sistemas	43
Tabela 11 - Nomenclatura dos sistemas ensaiados.....	44
Tabela 12 - Equipamentos utilizados nos ensaios	56
Tabela 13 - Principais eventos registrados durante os ensaios realizados	63
Tabela 14 - Resumo do deslocamento apresentado pelas amostras ensaiadas	66
Tabela 15 - Fotografias em câmera termográfica para as três amostras	70
Tabela 16 - Classificação de resistência ao fogo das amostras ensaiadas	73

LISTA DE SIGLAS

ABNT	Associação Brasileira de Normas Técnicas
ACI	American Concrete Institute
ASTM	American Society for Testing and Materials
CAA	Concreto Auto Adensável
ISO	International Organization for Standardization
ITT Performance	Instituto Tecnológico de Desempenho e construção Civil
NBR	Normas Brasileira de Regulação
SCI	Segurança Contra Incêndio
TRRF	Tempo Requerido de Resistência ao fogo
TRF	Tempo de Resistência ao fogo
RF	Resistência ao fogo
UNISINOS	Universidade do Vale do Rio dos Sinos
f_c	Resistência a compressão do concreto
f_{ck}	Resistência a compressão característica do concreto
°C	Grau Celsius
WFSC	World Fire Statistics Center

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	15
1.1	CONTEXTUALIZAÇÃO DO PROBLEMA E DEFINIÇÃO DO TEMA	15
1.2	JUSTIFICATIVA	18
1.3	OBJETIVOS	20
1.3.1	Objetivo Geral	20
1.3.2	Objetivos Específicos	20
1.4	LIMITAÇÕES DO ESTUDO	20
1.5	ESTRUTURA DA TESE	21
2	SISTEMA CONCRETO-PVC EM SITUAÇÕES DE INCÊNDIO	22
2.1	SISTEMA CONSTRUTIVO INDUSTRIALIZADO DE CONCRETO-PVC	22
2.2	ASPECTOS GERAIS DE INCÊNDIO	24
2.3	SEGURANÇA CONTRA INCÊNDIO DE ESTRUTURAS DE CONCRETO	26
2.3.1	Resistência ao fogo	26
2.3.2	Tempo Requerido de Resistência ao Fogo (TRRF)	29
2.3.3	Desempenho de estruturas de concreto em situação de incêndio	30
2.3.3.1	<i>Transformações físico-químicas</i>	31
2.3.3.2	<i>Perda da resistência mecânica</i>	32
2.3.3.3	<i>Desplacamento</i>	33
2.3.3.4	<i>Comportamento ao fogo das armaduras</i>	37
2.3.3.5	<i>Transferência de calor ao concreto</i>	38
2.3.4	Dimensionamento de paredes de concreto	38
2.3.4.1	<i>Paredes de concreto não portantes</i>	38
2.3.4.2	<i>Paredes de concreto portantes</i>	39
3	PROGRAMA EXPERIMENTAL	41
3.1	SISTEMAS	41

3.2	MÉTODOS	44
3.2.1	Produção das amostras	44
3.2.2	Nomenclatura das amostras	44
3.2.3	Ensaio de Resistência ao fogo	45
3.2.3.1	<i>Verificação de condições e preparação de equipamentos</i>	45
3.2.3.2	<i>Montagem das amostras</i>	45
3.2.3.3	<i>Localização de termopares</i>	46
3.2.3.4	<i>Acoplagem das amostras</i>	48
3.2.3.5	<i>Simulação de incêndio</i>	49
3.2.3.6	<i>Coleta de dados</i>	52
3.2.4	Medição das deformações	54
3.2.4.1	<i>Variáveis de resposta</i>	56
3.2.4.2	<i>Variáveis de controle</i>	57
4	APRESENTAÇÃO DE RESULTADOS	62
4.1	RESISTÊNCIA MECÂNICA.....	65
4.1.1	Estanqueidade	67
4.2	ISOLAMENTO TÉRMICO.....	68
4.3	ASPECTOS FINAIS.....	70
4.4	DISCUSSÕES	73
5	CONCLUSÕES	76
6	SUGESTÃO DE TRABALHOS FUTUROS	78
	REFERÊNCIAS.....	79
	APÊNDICE A – REGISTRO FOTOGRÁFICO DA AMOSTRA PVC1.....	90
	APÊNDICE B – REGISTRO FOTOGRÁFICO DA AMOSTRA PVC2.....	91
	APÊNDICE C – REGISTRO FOTOGRÁFICO DA AMOSTRA PVC3.....	92
	APÊNDICE D - REGISTRO FOTOGRÁFICO DA FABRICAÇÃO DOS SISTEMAS	93

1 INTRODUÇÃO

1.1 CONTEXTUALIZAÇÃO DO PROBLEMA E DEFINIÇÃO DO TEMA

Desde os primeiros tempos, o fogo tem sido considerado como uma das forças elementares da terra (WFSC, 2010). Possui poderosas propriedades tanto destrutivas quanto construtivas, dependendo da sua aplicabilidade. A chama cativante do fogo pode fascinar, seu calor e luz podem ajudar a sustentar vidas, e sua energia elementar introduz a civilização tecnológica; no entanto, em um estágio não controlado, o fogo pode causar destruição severa e até mesmo perda de vidas (WFSC, 2010; GENFU et al., 2008).

Embora dados demonstrem que, em geral, as taxas de mortalidade da população têm diminuído nas últimas décadas (TRIDATA CORPORATION, 2009), em países como os Estados Unidos, a Dinamarca, o Japão e a República Tcheca, tem registrado um aumento na taxa de mortalidade da população (TOPICAL FIRE REPORT SERIES, 2011). Em 2013, mais de três milhões de incêndios (WFSC, 2015) resultaram em um número de mais de 21.000 mortos e uma taxa de feridos de mais de 65.000 (GIL et al., 2017). Os incêndios na Califórnia e na Amazônia vem preocupando a comunidade científica de todos os países, segundo diversos autores e o periódico Nature (ANDRADE et al., 2019; RUMPEL et al., 2019), devido não apenas a perda de vidas, mas também da diversidade ecológica e contaminação global.

O fogo sempre começa com uma ignição de um material e continua até que a chama se espalhe para todas as superfícies combustíveis. Esta etapa é o início do estágio totalmente desenvolvido do incêndio, que é crítico para os elementos estruturais devido ao fato de que eles começam a perder suas resistências e capacidades de carga (GEFU et al., 2008; TRIDATA CORPORATION, 2009; TOPICAL FIRE REPORT SERIES, 2011; WFSC, 2015; GIL et al., 2017; JANSSON, 2013). Durante o evento de fogo, as chamas interagem dinamicamente com seus arredores e sua temperatura, e a sua intensidade depende de diversos fatores, como a massa e a natureza dos combustíveis disponíveis, o grau de ventilação e a

área interna da câmara de combustão. A maioria dos materiais se degradam devido à sua exposição a qualquer uma dessas condições de incêndio (GEFU et al., 2008).

O concreto é o material de construção mais usado globalmente (WATTICK; CHEN, 2017). Cerca de 25 bilhões de toneladas são fabricadas a cada ano (CSI, 2009), oferecendo versatilidade para considerações estruturais e arquitetônicas ao projetista. A forma é basicamente uma estrutura temporária cuja função é apoiar e confinar o concreto fresco até que ele seja curado por tempo suficiente para manter-se em pé por conta própria. Além de garantir a segurança, as formas podem representar um custo significativo dentro do preço geral de uma estrutura de concreto, especialmente para as formas fabricadas *in situ* (WATTICK; CHEN, 2017). Assim, se for dada a devida atenção ao *design* e construção da forma, resultará uma redução significativa nos custos e acidentes.

Devido ao aumento dos prazos mais reduzidos na construção civil, é necessário desmoldar a forma para manter um projeto dentro do cronograma; no entanto, muitas vezes obriga a remoção de formas antes que os concretos obtenham resistências suficientes (YAN et al., 2007). Avanços recentes na tecnologia de materiais introduziram vários polímeros em aplicações civis tais como o polímero reforçado com fibra (ROUSAKIS; TOURTOURAS, 2014; ROUSAKIS et al., 2014; FAKHARIFAR et al., 2015). Por outro lado, o cloreto de polivinil (PVC) é um material à base de polímeros, amplamente utilizado na indústria da construção (ERAMMA; MADHUKAR, 2015) como material de baixa manutenção, principalmente na Irlanda, no Reino Unido e nos Estados Unidos (AWHAM; SALIH, 2011). O PVC é um dos plásticos comerciais mais importantes pelos seus baixos custos e excelentes propriedades: alto isolamento elétrico, alta resistência à abrasão, baixa difusão para umidade, notável resistência à água, bases, ácidos, álcoois, óleos, baixa deformação por fluência, durabilidade e estabilidade mecânica (AWHAM; SALIH, 2011; AL-MALAIKA et al., 1999; TITOW, 1994). A condutividade térmica do PVC é de apenas 0,45 % - 0,6 % de uma tubulação de aço, proporcionando assim uma condição de cura estável no alto desempenho e durabilidade do núcleo do concreto (GUPTA, 2013; WANG; YANG, 2010).

Atualmente, formas permanentes ou "*stay-in-place*" (SIP) estão sendo empregadas mundialmente em construções de concreto como uma alternativa viável às formas convencionais (madeira ou aço), devido às suas múltiplas vantagens em aspectos mecânicos, ambientais e econômicos (WAHAB; SOUDKI, 2013;

ABDULJABAR, 2017). O PVC é comumente usado como uma cofragem SIP pelo seu baixo custo comparado a outros materiais, como polímeros reforçados com fibras, sua durabilidade e facilidade no processo de montagem, se desenvolvendo como uma solução para a construção de concreto rápida, segura e conveniente. Este tipo de forma tem sido empregado principalmente em edifícios comerciais, agrícolas e industriais (SCOTT et al., 2016; HAVEZ et al., 2016). A forma permanente em PVC é constituída por painéis interligados, que servem não só como cofragem permanente para as paredes de concreto, mas também encaixam a superfície da parede. Este sistema é comumente usado para construir fundações, muros de contenção, paredes em tanques de tratamento de água e resíduos, bem como paredes para piscinas (HAVEZ et al., 2016).

A forma de PVC-SIP oferece algumas vantagens importantes para as propriedades mecânicas do concreto, como o aumento da resistência estrutural, a melhoria da durabilidade e a proteção contra corrosão (GEFU et al., 2008). No entanto, essas características vantajosas não têm sido totalmente abordadas pelas normas existentes, como a CSA (CSA, 1994) e a ACI (ACI, 2004). Portanto, alguns autores (CHAHROUR et al., 2005) revelaram que a carga de craqueamento, a carga de escoamento e a carga final foram aumentadas em 36 %, 78 % e 36 %, em média, respectivamente, em comparação com o sistema convencional. Além disso, o índice de ductilidade para espécimes deste mesmo sistema aumentou em 25 %. Em relação às questões ambientais, a forma permanente de PVC é altamente aplicada à construção de infraestrutura em ambientes agressivos marítimos e salinos, onde os depósitos de polímeros atuam como barreiras para impedir a entrada de dióxido de carbono e cloretos em concretos embutidos (ABDULJABAR, 2017). Em comparação com as formas convencionais, a forma permanente de PVC é fixa permanentemente com o elemento construtivo (coluna, parede, piscina etc.), tornando-se parte da estrutura acabada e conferindo uma cobertura de proteção ao concreto. Além disso, o PVC ajuda na prevenção de qualquer perda de umidade, necessária para a configuração e a hidratação do concreto fresco, bem como na eliminação de processos demorados e dispendiosos. Também ajuda na proteção de concretos contra mudanças térmicas, e na melhoria da impermeabilidade, confinando os núcleos de concreto (HAVEZ et al., 2016).

Apesar das vantagens mencionadas anteriormente nas melhorias das propriedades mecânicas do concreto com este novo sistema de encapsulamento, as

investigações produzidas até o momento limitaram-se à simulação do comportamento das estruturas sob a presença de incêndios, sem ter interesse no fato de analisar as razões pelas quais esse material se comporta desta maneira e afeta à saúde humana de uma forma ou de outra (HUANG et al., 2017). Além disto, investigações recentes relataram a importância de estudos como o apresentado nesta proposta de doutorado para evitar acidentes, mortes e problemas para construções civis (AHN et al., 2016; BARADARAN; NEMATZADEH, 2017). Assim sendo, poucos estudos na literatura têm relatado seu comportamento acerca do seu desempenho de resistência ao fogo, justificando assim o presente trabalho.

Nesta ordem de ideias e dentro deste cenário, o objetivo principal desta pesquisa se focará em analisar e comparar o desempenho da resistência ao fogo de diferentes painéis de concreto com cofragem permanente ou *stay-in-place* de PVC, com e sem carga. Para isso, este trabalho será composto das seguintes seções gerais: justificativa, objetivos, referencial teórico, metodologia, resultados e conclusões. Cada uma dessas seções será detalhada abaixo.

1.2 JUSTIFICATIVA

A segurança do usuário é um elemento chave para o projeto de qualquer estrutura, independentemente do uso que esta irá desempenhar, pelo qual os projetistas devem considerar todas e cada uma das possíveis condições atmosféricas e situações às quais podem ser expostos ou enfrentar os seus edifícios, como é o caso de um incêndio (SAMARAKKODY et al., 2017). Em paralelo a esta condição, devido à grande quantidade de recursos naturais consumidos e resíduos gerados pela indústria da construção convencional, identificou-se a necessidade de encontrar alternativas que envolvam todos os três aspectos do desenvolvimento sustentável: o aspecto econômico, social e ambiental. É assim como tomam força no Brasil os sistemas construtivos industrializados, como os sistemas *light wood frame*, *light steel frame* e concreto-PVC, trazendo importantes características que apontam para o desenvolvimento de sistemas de construção mais sustentáveis (DE OLIVEIRA et al., 2014). Além disso, após a implementação da NBR 15575 (ABNT, 2013), a cadeia produtiva da engenharia civil no Brasil, vem

executando com maior frequência ensaios laboratoriais para a qualificação de diferentes elementos construtivos para sua aplicação em distintas estruturas de acordo com o desempenho alcançado.

Hoje em dia vários sistemas de isolamento térmico e proteção contra incêndio têm sido desenvolvidos para diferentes tipos de estruturas, em diferentes situações e materiais de construção. Dentro desses está a opção de usar PVC como material de revestimento fixo para a construção de paredes de concreto.

No contexto normativo nacional, embora a NBR 15575 (ABNT, 2013) e a NBR 15200 (ABNT, 2012) representam um marco para o setor da construção civil no Brasil, definindo os requisitos técnicos de desempenho e segurança das estruturas de concreto em situação de incêndio, não contemplam ainda nada a respeito de elementos estruturais revestidos com formas permanentes de PVC submetidos a altas temperaturas. Apesar das valiosas contribuições científicas realizadas, muito ainda deve continuar sendo estudado, analisado, pesquisado e introduzido nas atuais normas técnicas Brasileiras (MITIDIARI, 2018), principalmente naquelas que estejam relacionadas ao inovador sistema Concreto-PVC. Isso, tendo em conta que as pesquisas sobre este tema desenvolvidas até o momento, concentram-se em estudar outros elementos estruturais (colunas, vigas etc.) ou simplesmente em analisar outros parâmetros (resistência mecânica, durabilidade, deformabilidade, entre outros). Por isso, é necessário a realização de ensaios experimentais em escala real, que sejam capazes de descrever e explicar o comportamento deste tipo de estruturas importantes na construção de edificações como são as paredes, quando expostas a altas temperaturas (BRITEZ, 2011). Sem tais estudos em escalas reais não pode se construir com a devida segurança que as pessoas necessitam, justificando assim a presente tese.

Por todos os itens expostos acima, este trabalho destina-se a executar uma investigação experimental em escala real sobre o desempenho de resistência ao fogo de painéis de concreto (com e sem função estrutural). A importância de considerar ambos os tipos de sistemas, estruturais e não-estruturais, consiste em incluir a simulação de ambos os cenários representativos do uso diário de estruturas residenciais em caso de incêndio.

1.3 OBJETIVOS

1.3.1 Objetivo Geral

Avaliar e comparar o desempenho de três diferentes painéis de concreto construídos com formas permanentes (ou *stay-in-place*) de PVC ao ser expostos a altas temperaturas, com o fim de determinar o tempo de resistência ao fogo destes sistemas com e sem carga estrutural.

1.3.2 Objetivos Específicos

- Determinar, experimentalmente em escala real, o tempo de resistência ao fogo (TRF) de paredes de concreto construídos com formas SIP de PVC, a través da realização de ensaios técnicos laboratoriais padronizados;
- Comparar os desempenhos dos sistemas analisados obtidos dos ensaios previamente realizados, inferindo os resultados com os traços de concreto empregados e a aplicação de carga ou não;
- Estabelecer justificativas do desempenho dos sistemas construtivos avaliados conforme aos preceitos estabelecidos nas referências bibliográficas.

1.4 LIMITAÇÕES DO ESTUDO

Este estudo foi realizado com amostras em escala real do sistema construtivo industrializado comumente conhecido como concreto-PVC no Brasil, analisado unicamente para o caso de paredes. Assim como também se considera exclusivamente o parâmetro de resistência ao fogo, se predeterminando o adequado desempenho ao fogo de seus dois materiais componentes.

1.5 ESTRUTURA DA TESE

Além do capítulo introdutório, esta tese está estruturada em outros quatro capítulos. No segundo, consta de uma revisão do referencial bibliográfico sobre sistemas construtivos inovadores como é o analisado nesta pesquisa, assim como também acerca de resistência ao fogo em geral. No terceiro capítulo detalhou-se o programa experimental deste trabalho, sendo descritas as etapas do estudo, desenvolvidas tanto no laboratório quanto no escritório, incluindo a descrição dos materiais empregados, métodos e demais procedimentos e ensaio ao fogo dos três sistemas de paredes em escala real analisados. No quarto capítulo, os resultados dos ensaios foram apresentados e debatidos, descrevendo-se as manifestações anotadas durante os respectivos ensaios, a aparência, o grau de deslocamento e de deslocamento após o resfriamento dos painéis. Além disso, as curvas de temperatura destes sistemas foram apresentadas assim como também as diferentes discussões e justificativas dos resultados obtidos. No quinto e último capítulo, uma conclusão geral do estudo é apresentada.

2 SISTEMA CONCRETO-PVC EM SITUAÇÕES DE INCÊNDIO

2.1 SISTEMA CONSTRUTIVO INDUSTRIALIZADO DE CONCRETO-PVC

O inovador sistema construtivo concreto-PVC foi desenvolvido no Canadá, com o objetivo de construir e projetar de forma industrializada edificações de até cinco andares (DE OLIVEIRA, 2014). O sistema construtivo de painéis estruturais de PVC preenchidos com concreto é uma alternativa para moradias horizontais, para a construção de paredes estruturais de até 80 mm, para casas isoladas ou geminadas, térreas ou assobradadas. No Brasil, desde 2001, já tem sido construído mais de 70.000 m² entre obras comerciais e residenciais. O tipo de fundação recomendada para este sistema construtivo é o radie ou base de concreto, sendo necessário estar liso nas áreas de apoio dos painéis. Assim, as estruturas são formadas pelo próprio material concreto-PVC e fixadas através de barras de ancoragem, formando uma estrutura de reforço (FARIA, 2008; DOMARASCKI; FAGIANI, 2009; CICHINELLI; CAMPOS, 2013). Para a montagem deste sistema construtivo não há necessidade nem de equipamentos pesados (guindaste) nem de ferramentas especiais (SABBATINI; AGOPYAN, 1991). O PVC tem 57 % da sua composição de origem do sal marinho ou da terra (sal-gema) e 43 % de fontes não renováveis (petróleo e gás natural). Estima-se que 0,25 % do suprimento de gás e petróleo no mundo são consumidos para a produção do PVC. Além disso, o PVC é um material que gera pouco resíduo na sua fabricação e tem uma redução de custos de operação e manutenção na sua aplicação (BRASKEM, 2014).

O sistema concreto-PVC é composto por diferentes perfis modulares vazados de PVC, acoplados entre si por meio de encaixes “fêmea e fêmea” unidos por perfis “chaveta” e, posteriormente, preenchidos com concreto, produzindo paredes e resistentes para a construção de edificações (DE OLIVEIRA, 2014). Domarascki e Fagiani (2009) afirmam que “o PVC é um material resistente à ação de fungos, bactérias, insetos e roedores e à maioria de agentes químicos. É um bom isolante térmico, elétrico e acústico, resistente a choques, a intempéries como sol, chuva, vento e maresia. A vida útil da construção com o PVC é superior a vinte anos e não propaga chamas por ser auto extingüível”. Por outro lado, Cichinelli (2013) afirma

que “o sistema atende aos requisitos da norma NBR 15.575:2013 Edificações Habitacionais – Desempenho e às exigências dos principais programas habitacionais brasileiros”.

Em termos de desempenho, tomando como referência a execução de uma casa uni familiar (43 m² de área construída), a produtividade estimada com este sistema construtivo é de 2,41 homem-hora/m², estimando o prazo de execução de treze dias aproximadamente. O sistema é de fácil montagem, já que os painéis podem ser montados facilmente por quatro pessoas em apenas um dia de trabalho, planejando que as etapas de concretagem possam iniciar no dia seguinte. O concreto inserido para o preenchimento do PVC possui normalmente uma resistência característica igual a 20 MPa e é modificado com aditivo plastificante, que garante a alta fluidez. A aplicação dentro das paredes é feita, preferencialmente, por meio de bombas de baixa pressão (CICHINELLI, 2013). Este sistema construtivo tem um baixo consumo energético, podendo chegar a uma economia de até 75 % em relação a um sistema construtivo convencional. Também reduz em 97 % os desperdícios e entulhos por ser uma construção planejada e pré-fabricada, economizando em até um 73 % o consumo de água na obra em relação ao sistema construtivo convencional (BRASKEM, 2014; SCHMIDT, 2013).

De acordo com o Documento de Avaliação Técnica (DATec) n. 017 - Sistema construtivo Global de paredes constituídas por painéis de PVC preenchidos com concreto, o qual é um documento emitido por uma Instituição Técnica Avaliadora (ITA)¹ credenciada no Sinat, o desempenho térmico deste sistema concreto-PVC atende aos critérios mínimos para todas as zonas bioclimáticas do Brasil bem como o seu desempenho acústico é satisfatório.

O sistema construtivo concreto-PVC tem uma produtividade quase oito vezes maior que o sistema convencional em alvenaria. Na etapa de fechamento (etapa que gera maior desperdício e mais artesanal do processo de construção), o PVC tem vantagens sobre os outros sistemas por não precisar de revestimento cerâmico ou de pintura.

¹ De acordo com o Programa Brasileiro de Qualidade e Produtividade do Hábitat, a Instrução Técnica Avaliadora é uma instituição técnica autorizada a participar no Sinat com as funções principais de propor diretrizes, realizar a avaliação técnica e elaborar os DATec de novos sistemas construtivos. (Disponível em: <http://www.cbic.org.br/sites/default/files/Projeto%202%20-%20Sinat-%20CBIC.pdf>). Acesso em: julho, 2019).

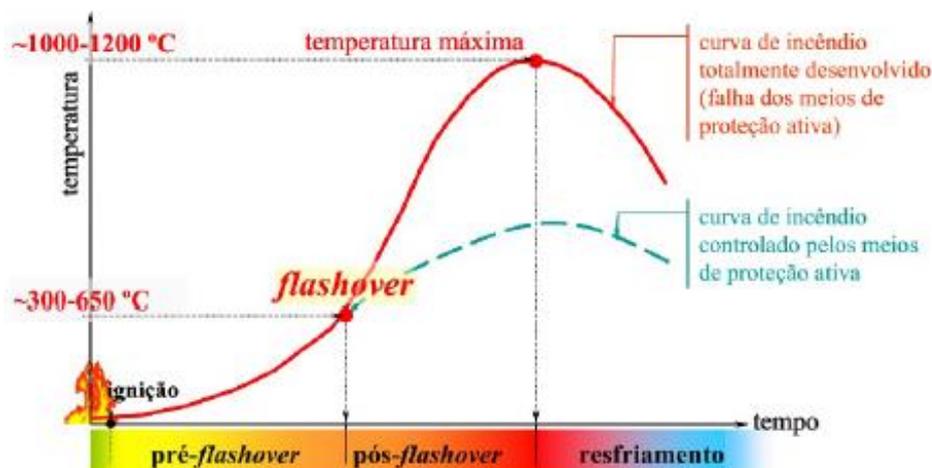
Uma desvantagem a apontar até o momento se encontra no processo de montagem, e consiste no jeito em que é colocado o concreto no seu interior. Esse trabalho de concretagem ainda é de forma artesanal e influi, diretamente, na qualidade do produto final (DOMARASCKI; FAGIANI, 2009). Espera-se que esta seja uma melhoria a considerar nos próximos anos.

2.2 ASPECTOS GERAIS DE INCÊNDIO

O incêndio se define como o “fogo fora de controle” segundo a NBR 13860 (ABNT, 1997) e seu desenvolvimento depende das características do item ignizado, do comportamento dos materiais ao redor, da distribuição destes no ambiente e da geometria e a ventilação do ambiente onde o incêndio foi iniciado. As manifestações deste fenômeno são a produção de calor, fumaça e chama (COSTA, 2008). O desenvolvimento de um incêndio pode ser entendido como uma curva com dois ramos definidos: ascendente (elevação da temperatura) e depois descendente (arrefecimento). Esta curva se divide em cinco regiões que apresentam as suas próprias características (FERNANDES, 2015). Inicialmente, tem-se a fase de ignição, que corresponde ao início do incêndio, de ocorrência localizada e apresentando um incremento gradual de temperatura. A segunda fase é a de pré-*flashover*, onde ocorre uma aceleração no aumento de temperatura. Aqui, o ambiente começa a interferir no processo. Esta fase culmina no *flashover*, que é um breve instante caracterizado por um crescimento rápido de temperatura, também conhecido como instante de inflamação generalizada (COSTA, 2008; DENOËL, 2007; SOUZA, 2010).

O comportamento desta curva segue com o pós-*flashover*, onde todo o material combustível circundante entra em combustão e há uma mudança brusca na temperatura, culminando no pico da curva do incêndio. Finalmente vem o resfriamento, onde ocorre uma gradativa redução da temperatura e perda de calor, promovida pelo fim do material combustível no ambiente (carga de incêndio) (FERNANDES, 2015). Um resumo do que foi acima mencionado é ilustrado na Figura 1.

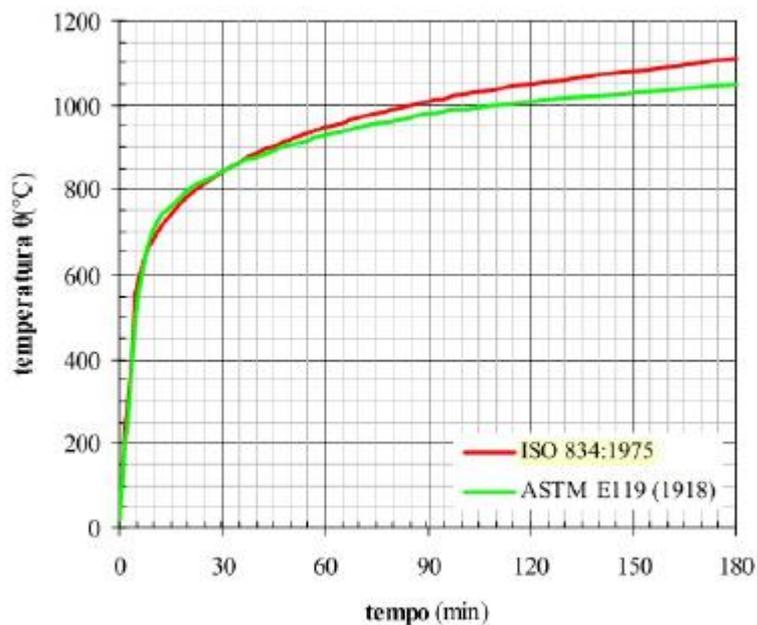
Figura 1 - Estágios de um incêndio



Fonte: Costa (2008)

O incêndio é um fenômeno singular e em muitos casos complexo de analisar, devido aos comportamentos específicos, dependendo de fatores como a taxa de aquecimento, a temperatura máxima e a duração do sinistro (FERNANDES, 2015). Com o fim de contribuir no projeto e análises experimentais e materiais e estruturas em situação de incêndio, curvas padronizadas de simulação de incêndio foram previamente desenvolvidas (COSTA, 2008). Estas curvas são em função da temperatura e do tempo, e são adotadas em diversas normativas, sendo as mais empregadas as definidas pela ISO 834-1: *Fire-resistance tests -- Elements of building construction -- Part 1: General requirements* (ISO, 1999) e a ASTM E119: *Standard Test Methods for Fire Tests of Building Construction and Materials* (ASTM, 2014). As normas nacionais, NBR 14432 (ABNT, 2001), NBR 5628 (ABNT, 2001) e NBR 10636 (ABNT, 1989), adotam uma curva padronizada igual à estabelecida pela ISO 834. Na Figura 2 são apresentadas as curvas de incêndio-padrão da ISO 834 e da ASTM E119.

Figura 2 - Curvas Padrões de incêndio



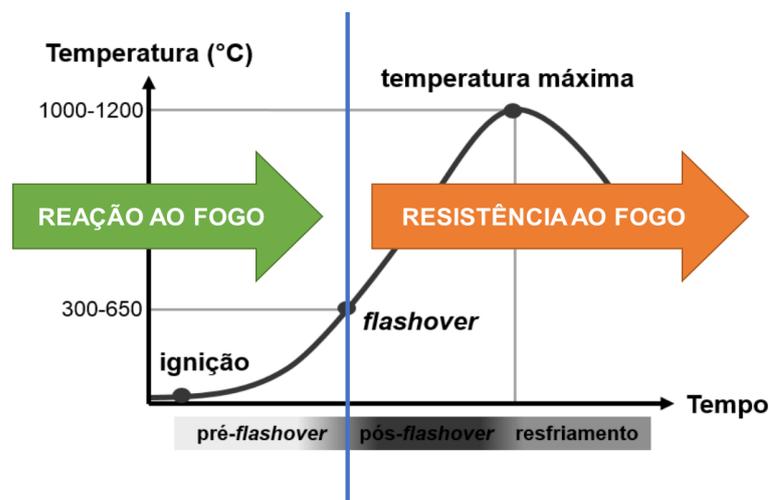
Fonte: Costa (2008)

2.3 SEGURANÇA CONTRA INCÊNDIO DE ESTRUTURAS DE CONCRETO

2.3.1 Resistência ao fogo

No contexto de segurança contra incêndio existem dois (2) instantes a estudar: a reação ao fogo e a resistência ao fogo. A resistência ao fogo corresponde à circunstância em que o *flashover* é atingido e conseqüentemente se perde o controle sobre o incêndio, mas a estrutura assegura a integridade da edificação durante o sinistro, garantindo a evacuação dos usuários ou ocupantes e dos correspondentes trabalhos de resgate (PURKISS et al., 2010; WANG et al., 2013). Em outras palavras, a resistência ao fogo é analisada no período em que sucede a inflamação generalizada (*pós-flashover*), tal como se simplifica na Figura 3.

Figura 3 - Ensaio de Desempenho de Segurança contra incêndio



Fonte: Costa (2008)

Do ponto de vista da segurança ao incêndio, as funções mais frequentes desempenhadas pelos elementos de construção são as seguintes:

- Funções de suporte;
- Funções de compartimentação;
- Funções de suporte e de compartimentação.

Os critérios fundamentais utilizados para caracterizar a resistência ao fogo são os seguintes:

- Capacidade de suporte de carga (representado por R);
- Estanqueidade às chamas e gases quentes (representado por E);
- Isolamento térmico (representado por I).

Estes critérios podem ser associados entre si da forma indicada na Tabela 1.

Tabela 1 - Critérios para caracterizar a resistência ao fogo

FUNÇÕES DO ELEMENTO	EXIGÊNCIAS		
	Estabilidade	Estanqueidade	Isolamento térmico
Suporte	R	-	-
Compartimentação	-	E	-
Suporte e Compartimentação	RE	EI	-
		REI	

Fonte: Leça (2016)

O Tempo de Resistência ao Fogo (TRF) é avaliado através do período decorrente entre o início de um processo térmico normatizado (curva de incêndio padrão) e o instante em que os elementos estruturais deixem de satisfazer a capacidade de suporte (FERNANDES, 2008). O TRF de estruturas de concreto pode ser determinado através de métodos tabulares já estabelecidos, ou seja, através da realização de ensaios em escala real segundo a *fib Bulletin No. 38* (FIB, 2007a). O objetivo do ensaio é de verificar o desempenho ao fogo de elementos estruturais quando expostos à evolução de temperatura da ISO 834 – *Fire resistance tests – Elements of building construction*. São verificadas durante o ensaio as características de isolamento térmico, estanqueidade aos gases e resistência mecânica ou estabilidade, avaliando o potencial de compartimentação destes elementos durante este intervalo. De acordo com o elemento estrutural a ensaiar, as diretrizes para a realização deste ensaio são padronizadas pelas normas apresentadas na Tabela 2.

Tabela 2 - Normativas nacionais que parametrizam o Ensaio de Resistência ao Fogo

Norma	Objeto
ABNT NBR 10636:1989	Paredes divisórias sem função estrutural - Determinação da resistência ao fogo
ABNT NBR 5628:2001	Componentes construtivos estruturais - Determinação da resistência ao fogo
ABNT NBR 14432:2001	Exigências de resistência ao fogo de elementos construtivos de edificações – Procedimento

Fonte: Elaborada pela autora

O procedimento realizado neste ensaio é ilustrado na Figura 4 e será detalhado na seguinte seção deste trabalho.

Figura 4 - Ilustração do procedimento do Ensaio de Resistência ao Fogo



Fonte: <http://unisin.br/itt/ittperformance> (2019)

2.3.2 Tempo Requerido de Resistência ao Fogo (TRRF)

O Tempo Requerido de Resistência ao Fogo (TRRF) é definido como o período mínimo exigido por norma, no qual a estrutura deve manter sua integridade durante a ocorrência de um incêndio (BOLINA, 2016). Para cada TRRF, define-se a temperatura de exposição dos elementos e o respectivo coeficiente de redução de suas resistências, realizando-se, então, a verificação da estrutura nesta condição. Para fins de segurança estrutural, compara-se o TRRF necessário com o TRF atendido (PANNONI, 2015). Em termos de projeto estrutural, os métodos tabulares e simplificados das principais normas internacionais (BS 8110-2, 1985; ACI-216R, 1989; NZS 3101, 1995; AS-3600, 2001 e EN 1992-1-2, 2002) foram concebidos com base no conceito de TRRF, assumindo um aquecimento padronizado, o chamado incêndio padrão de exposição (COSTA, 2008). Os TRRF mínimos das edificações habitacionais exigidos no Brasil são apresentados na Tabela 3.

Tabela 3 - TRRF das edificações habitacionais

Altura da edificação em relação ao nível do solo (m)							
Classe P1	Classe P2	Classe P3	Classe P4	Classe P5	Classe P6	Classe P7	Classe P7
$h \leq 6$	$6 \leq h \leq 12$	$12 \leq h \leq 23$	$23 \leq h \leq 30$	$30 \leq h \leq 80$	$80 \leq h \leq 120$	$120 \leq h \leq 150$	$150 \leq h \leq 250$
30	30	60	90	120	120	150	180

Fonte: Bolina (2016)

2.3.3 Desempenho de estruturas de concreto em situação de incêndio

O fogo é denominado como um dos principais riscos para as estruturas de concreto armado, pois pode causar deterioração nas suas propriedades e até mesmo o *Spalling* (fragmentação da superfície explosiva) do concreto (HUANG et al., 2017). A exposição a altas temperaturas pode causar alterações graves na composição química de qualquer material e, portanto, nas suas propriedades mecânicas, as quais resultam de grande importância em termos de segurança e utilidade dos edifícios (OMER, 2007). Desta forma, os elementos estruturais quando submetidos a condições extremas de temperatura, como no caso de fogo, experimentam perda de capacidade estrutural.

Uma vantagem oferecida pelo concreto armado é o aumento da resistência em relação ao concreto simples (ROCHA; DA SILVA, 2017). Isto tendo em conta que o concreto ao revestir as barras de reforço de aço, dá proteção contra as ações de intempérie, corrosão ou a presença de um incêndio. No momento de um incêndio dentro de um edifício construído com concreto armado, o concreto é capaz de proteger o aço do calor excessivo, garantindo às pessoas um tempo prudente para a evacuação (ROCHA; DA SILVA, 2017). Cabe enfatizar, que a exposição destas estruturas ao fogo pode desencadear uma série de consequências pela redução considerável de suas propriedades mecânicas como a resistência, o módulo de elasticidade e a estabilidade volumétrica (CASONATO, 2007). Estas consequências podem ir desde a simples deterioração do material, até o colapso de ditas estruturas, bem como desencadear possíveis impactos negativos ao meio ambiente e à saúde humana exposta a estes materiais após sua combustão (GONG et al., 2017).

A *fib Bulletin* No. 38 (FIB, 2007a) propõe três parâmetros a serem observados nas estruturas de concreto em situação de incêndio, que são: a deterioração mecânica, a deformação térmica e a manifestação de deslocamento ou lascamento. Assim, o desempenho das estruturas de concreto frente ao efeito de fogo é avaliado pelo grau de deslocamento da seção e pela perda de resistência mecânica do concreto e aço (COLINA, 2014). Para compreender o comportamento de estruturas de concreto em situação de incêndio, é preciso analisar as alterações físicas, químicas e mecânicas do mesmo (COLINA, 2014). Estas alterações são detalhadas na sequência.

2.3.3.1 Transformações físico-químicas

Ao ser submetido o concreto à ação de fogo, diversas reações surgem como resposta à decomposição química da pasta e dos agregados (MONTEIRO, 2014). Aos 80 °C inicia-se a decomposição de alguns compostos hidratados do concreto, tais como a etringita (DENOEL, 2007); mas é aos 100 °C que a temperatura deste material aumenta após a evaporação completa da água que estava livre nos macroporos (YANG; GARDNER, 2013), e inicia-se o processo de desidratação do C-S-H (FIB, 2007b). Em 300 °C, a redução da resistência do concreto é na ordem de 15 % - 40 % da resistência inicial e, em 500 °C alcança a ordem de 55 % a 70 % da resistência original (GEORGALI, 2005). Caso o vapor de água liberada não seja dispersado ao ambiente, devido à baixa permeabilidade da pasta, por exemplo, o concreto pode sofrer de deslocamento, dadas as pressões de vapor produzidas ao interior (MEHTA, 2014). Aos 900 °C o processo de desidratação do silicato de cálcio hidratado C-S-H e da porlandita ($\text{Ca}(\text{OH})_2$) é completo (MEHTA; MONTEIRO, 2014). A decomposição destes compostos promove a formação de microfissuras (YUN; PARK, 2013), o aumento da porosidade do concreto e conseqüentemente a variação da massa volumétrica (COLINA, 2014). A Tabela 4 apresenta um resumo das principais transformações físico-químicas do concreto quando submetido a altas temperaturas.

Tabela 4 - Principais transformações físico-químicas do concreto em altas temperaturas

Temperatura (°C)	Manifestação
20-80	Lenta perda de água livre dos macroporos (evaporação)
100	Aumento acentuado na permeabilidade da água
80-200	Perda da água dos poros mais finos, água adsorvida e da água que apresenta ligações fracas com hidratos de cimento
80-850	Perda da água quimicamente combinada do gel de cimento
150	Início do processo decomposição do silicato de cálcio hidratado (C-S-H)
300	Aumento da porosidade e microfissuras
400-600	Decomposição da porlandita ($\text{Ca}(\text{OH})_2$) em CaO e H_2O
450-500	Sequência da decomposição do C-S-H, com formação de $\alpha\text{-C}_2\text{S}$
500	A quantidade de água perdida já representa 2 % a 4 % em massa
570	Transformação dos agregados quartzo e areias da forma α para β
550-600	Aumento da perda de massa dos materiais devido ao estágio de decomposição da porlandita e do silicato de cálcio hidratado
700	Descarbonatação do agregado calcário (CaCO_3) em CaO e CO_2
720	Acentuada decomposição do CSH, com formação de $\beta\text{-C}_2\text{S}$ e $\beta\text{-CS}$
800	Recristalização das partículas de cimento não hidratadas
1150-1200	Derretimento do concreto

Fonte: Bolina (2016)

2.3.3.2 Perda da resistência mecânica

Pesquisas realizadas como a de KODUR e AGRAWAL (2017) indicam que a perda de ligação do concreto, por exemplo, é de cerca de 60 % do valor de sua temperatura ambiente, quando as temperaturas na interface das barras de reforço e concreto excedem os 500 °C, o que pode reduzir significativamente a capacidade dos elementos que compõem a estrutura sob cargas de serviço.

Tal como foi mencionado no ponto anterior, aos 300 °C a redução da resistência mecânica do concreto está compreendida entre os 15 % e 40 %, e aos 500 °C atinge entre 55 % e 70 % do seu valor em temperatura ambiente (GEORGALI, 2005). Porém, esta redução é pouco influenciada pela classe de resistência do concreto projetado (KIRCHHOF, 2010). É considerada como “temperatura crítica” a compreendida entre os 550 °C e os 600 °C ao promover a perda da capacidade estrutural do concreto nas estruturas (KHOURY, 2001).

2.3.3.3 *Desplacamento*

Também conhecido como lascamento, é definido como o fenômeno que consiste no desprendimento de camadas das superfícies expostas às altas temperaturas de elementos de concreto (KIRCHHOF, 2010). Trata-se de um fenômeno semi-destrutivo com origem da distribuição não uniforme da temperatura na seção (JANSSON, 2013) e na quantidade de água evaporável do concreto (WANG et al., 2013).

O lascamento manifesta-se com uma pequena ou grande repentina liberação de energia, promovendo uma fragmentação superficial ou um desprendimento explosivo de camadas do concreto (ZEIML; LACKNER; MANG, 2008). Na maioria dos casos, o fenômeno se restringe à região do cobrimento das armaduras (KALIFA et al., 2000). O tempo de ocorrência deste fenômeno varia segundo as condições e circunstâncias que concernem à deflagração do processo, porém, o lascamento é esperado até 30 min de exposição ao fogo (SANJAYAN; KONG, 2012), apesar de alguns autores tem reportado até 45 min (MORITA et al., 2000) e 90 min durante o ensaio (KHOURY, 2001).

Alguns estudos publicados em casos reais de incêndios têm mostrado que os elementos mais susceptíveis aos deslocamentos são os pilares e as lajes, os quais possuem maior grau de restrição à dilatação térmica (COSTA, 2008). Outros fatores contribuintes nas causas deste fenômeno são a taxa de aquecimento superficial, a água livre interna e a porosidade do concreto (LIMA, 2005), a natureza e a granulometria grossa do agregado empregado no concreto (KONG, 2012), a idade, a temperatura máxima, a forma e o tamanho da seção transversal, a presença de fissuras, a taxa de aço, o arranjo das armaduras, a presença de fibras e a intensidade do carregamento do elemento estrutural (FIB, 2007a).

As variáveis que mais contribuem para a interpretação dos resultados deste fenômeno e que melhor o explicam são: a resistência do concreto, a permeabilidade, a relação água/cimento, o tipo de agregado, a idade do concreto, a disposição, a taxa e o cobrimento nominal das armaduras, a seção transversal do elemento, o teor de umidade, a presença de fissuras e a taxa de aquecimento exposta ao elemento (BOLINA, 2016). Em resumo, alguns autores têm estabelecido que o deslocamento do concreto ocorre quando alguma das seguintes situações é apresentada:

- A taxa de aquecimento superficial é de 3 °C por minuto em média (FU; LI, 2011);
- A permeabilidade da pasta do cimento é menor que 5.10^{-11}cm^2 (KALIFA et al., 2000);
- O grau de saturação do poro é de 2 % a 3 % da massa do concreto (KHOURY, 2001).

Neste cenário, com a contribuição dos autores, foi elaborada a Tabela 5 que propõe os diagnósticos de estruturas de concreto de acordo com as prováveis causas e consequências do lascamento sofrido, segundo as manifestações anotadas durante e após a exposição das mesmas a altas temperaturas.

Tabela 5 - Classificação dos deslocamento com suas respectivas possíveis causas

Classificação do deslocamento	Tempo de ocorrência	Natureza	Ruídos	Influência	Principais fatores
Agregado	Entre 30 e 90 min	Muito violento	Estalos	Superficial	Taxa de aquecimento Expansão térmica do agregado Tamanho do agregado Difusibilidade térmica do agregado Teor de umidade Temperatura máxima
Aresta	Entre 7 e 30 min	Não violento	Nenhum	Pode ser severa	Expansão térmica do agregado Tensão de tração no concreto Armadura Taxa de aquecimento Teor de umidade
Superfície	Entre 7 e 30 min	Violento	Craqueamento	Pode ser severa	Permeabilidade Tensão de tração no concreto

Explosivo	Entre 7 e 30 min	Violento	Alto estrondo	Severa	Taxa de aquecimento Expansão térmica do agregado Tamanho do agregado Tensão de cisalhamento no concreto Idade do concreto Carregamento Perfil de aquecimento Permeabilidade Formato de seção Tamanho do agregado Teor de umidade Absorção de umidade Temperatura máxima Tensão de cisalhamento no concreto
Delaminação	Quando concreto enfraquece	Não violento	Nenhum	Pode ser severa	Carregamento Formato de seção Armadura
Pós-resfriamento	Após resfriamento, por absorção de umidade	Não violento	Nenhum	Pode ser severa	Absorção de umidade Tipo do agregado

Fonte: Adaptado de Khoury (2001)

Por outro lado, o lascamento também pode ser classificado pela intensidade e magnitude da manifestação notada na superfície do elemento estrutural (ALI et al., 2004), assim:

- menor grau: limita-se ao cobrimento, sem exposição das armaduras;
- maior grau: limita-se ao cobrimento, com exposição das armaduras;
- grau severo: grandes profundidades, com alinhamento das armaduras.

As causas principais do deslocamento podem ser suportadas por três (3) categorias de teorias (KHOURY, 2001), que são:

- Teoria da poro-pressão: estabelece que durante o aquecimento do concreto, o fluxo de calor no seu interior aumenta a temperatura da parte sólida e da água livre nos poros; e quando esta água atinge uma

temperatura relativamente alta, começa a vaporizar (BOLINA, 2016). Segundo esta teoria, o deslocamento do concreto ocorre quando esta pressão excede a resistência à tração do concreto (DWAIKAT; KODUR, 2010).

A magnitude desta poro-pressão depende do grau de saturação dos poros e das características do concreto (LIMA, 2005).

- Teoria das tensões térmicas diferenciais: Esta teoria está sustentada na mecânica da fratura (GAWIN; SCHREFLER, 2006) e é fundamentada nas distintas faixas de temperaturas produzidas no interior do elemento aquecido (KALIFA et al., 2000). Esta teoria estabelece que a baixa condutividade do concreto promove tensões diferenciais de dilatação na seção (LI, 2011), produzindo fissuras superficiais ao eixo do elemento (GEORGALI, 2005), funcionando como uma espécie de gatilho para o deslocamento.

Uma limitação desta teoria é que os deslocamentos de concretos com elevados valores de resistência não conseguem ainda serem justificados por esta teoria das tensões térmicas diferenciais (KLINGSCH, 2014), uma vez que ela não admite os processos de transformação de água no interior do elemento (KHOURY, 2001).

A *fib Bulletin* N^o. 38 (FIB, 2007a) salienta a incompatibilidade térmica entre a pasta e os agregados como um fator colaborativo que potencializa o fenômeno de deslocamento (LI; FU, 2011), segundo esta teoria, principalmente ao desencadear microfissuras internas no interior do elemento.

- Teoria combinada da poro-pressão e tensões térmicas: Ambas teorias têm sido comprovadas cientificamente como justificativas ao mecanismo do deslocamento do concreto (ZEIML; MANG, 2008), identificando-se uma sobreposição de efeitos das ambas teorias (KHOURY, 2001). É assim como explica-se que um acúmulo de pressão de vapor no elemento quando combinado com o seu estado de tensão interno, produz uma fragilização da seção que ocasiona o deslocamento (WANG et al., 2013) unicamente quando a resistência do concreto à tração é superada (PEL ADAN, 2012).

Apesar da descoberta dessas teorias, devido à aleatoriedade do conjunto de fatores que influenciam o fenômeno, além da interdependência entre estes, ainda não é possível uma compreensão absoluta da influência de todas as causas do deslocamento (JANSSON, 2013; KHOURY, 2001), não havendo assim um consenso quanto a qual teoria é a que descreve melhor esse fenômeno (SANJAYAN; KONG, 2012).

2.3.3.4 Comportamento ao fogo das armaduras

As propriedades mecânicas do aço decrescem com as temperaturas, principalmente a tensão de escoamento (KOLSTEIN, 2013), a qual a 600 °C é reduzida praticamente à metade da inicial (KUMAR et al., 2013). Isto é apresentado na Tabela 6.

Tabela 6 - Coeficiente de redução da tensão de escoamento do aço laminado a quente em diferentes temperaturas

Temperatura (°C)	100	200	300	400	500	600	700	800	900	1000	1200
Aço laminado a quente	1	1	1	1	0,78	0,47	0,23	0,11	0,06	0,04	0

Fonte: Bolina (2016)

A temperatura das armaduras é influenciada pelo seu diâmetro, resistência do concreto, tipo de agregado, condições de exposição ao fogo e o cobrimento nominal (KODUR DWAIKAT, 2013), além do nível de carga, fissuras superficiais (GAO et al., 2013) e o grau de excentricidade do carregamento atuante (RODRIGUES; PIRES, 2012).

O fato de o aço possuir um comportamento pior do que o concreto, devido a sua condutividade térmica (45 W/mk do aço e 2 W/mk do concreto) (FIB, 2008), é agravado também pela localização das barras no elemento estrutural. As armaduras normalmente estão localizadas na periferia do elemento, a zona mais afetada pelas altas temperaturas. Deste modo, as armaduras apresentam uma diminuição mais elevada da sua resistência, podendo condicionar a segurança e o projeto dos elementos estruturais sujeitos a altas temperaturas (FERNANDES, 2008). Pelo anterior, quanto maior for a proteção das barras de aço empregadas, melhor será o

desempenho ao fogo da estrutura (KODUR; YU, 2013). A ação do calor também pode proporcionar deformações térmicas excessivas (KODUR; DWAIKAT, 2010). Conseqüentemente, normas como a NBR 15200 (ABNT, 2012), a JIS A 1304 (JIS, 1994), a BS 8110-2 (BSI, 1985), a ACI 216.1 (ACI,1989) e a AS 3600 (AS, 2009) têm restringido as temperaturas das barras de aço. Estas limitações devem-se ao fato de que, na faixa dos 500 °C aos 550 °C, o aço estrutural mantém cerca do 60 % da sua resistência inicial, a qual é a temperatura máxima que o elemento pode resistir sem colapsar (PANNONI, 2015).

2.3.3.5 Transferência de calor ao concreto

A transferência de calor da atmosfera quente externa ao elemento de concreto é fundamentada pelas leis de transferência por convecção, radiação e condução (COSTA, 2008), vinculadas a ações térmicas externas ou internas. A condução de calor ao interior da seção do elemento é influenciada pelos parâmetros do concreto. Assim, os elementos de maior relação a/c têm uma tendência de distribuição de temperaturas mais linear e com maiores taxas de aquecimento (ICHIKAWA et al., 2004).

2.3.4 Dimensionamento de paredes de concreto

A norma NBR 15200 não apresenta recomendações para o projeto de paredes de concreto em situação de incêndio (DE SOUSA, 2015). Nesse sentido, a seguir é descrita a recomendação presente no Eurocode 2 (CEN, 2004).

2.3.4.1 Paredes de concreto não portantes

Quando é o caso de uma parede de concreto sem função estrutural (parede de vedação), ou seja, a parede apenas é capaz de manter a sua integridade e a sua

estanqueidade, os valores de TRF mínimos de acordo com a espessura da parede são apresentados na Tabela 7.

Tabela 7 - TRF de paredes de concreto não portantes segundo suas espessuras

TRF	Espessura mínima da parede de concreto (mm)
30	60
60	80
90	100
120	120
180	150
240	175

Fonte: CEN (2004)

2.3.4.2 Paredes de concreto portantes

Para que as paredes de concreto com função estrutural (paredes portantes) tenham uma adequada resistência ao fogo, devem respeitar os valores indicados na norma (CEN, 2004), os quais são apresentados na Tabela 8.

Tabela 8 - TRF de paredes de concreto portantes segundo suas dimensões

TRF	Dimensões mínimas (mm) (b/c1)			
	$\mu_{fi} = 0,35$		$\mu_{fi} = 0,7$	
	1 lado exposto	2 lados expostos	1 lado exposto	2 lados expostos
30	100/10	120/10	120/10	120/10
60	110/10	120/10	130/10	140/10
90	120/20	140/10	140/25	170/25
120	150/25	160/25	160/35	220/35
180	180/40	200/45	210/50	270/55
240	230/55	250/55	270/60	350/60

Fonte: CEN (2004)

A espessura mínima fornecida na Tabela 8 também pode ser utilizada para paredes de concreto simples. Quando for necessária a utilização de paredes corta fogo e estas tiverem que ser resistentes à impactos, segundo De Sousa et al. (2015)

a espessura mínima para paredes de concreto com densidade normal não pode ser menor que:

- 200 mm para paredes de concreto não armadas;
- 140 mm para paredes de concreto portantes e armadas;
- 120 mm para paredes de concreto não portantes e armadas.

3 PROGRAMA EXPERIMENTAL

A resistência ao fogo de três painéis de concreto revestidos com formas permanentes (ou SIP) com PVC foi avaliada de acordo com a curva da norma ISO 834 (ISSO, 1991). O principal objetivo deste teste realizado foi determinar a segurança e o tempo de resistência ao fogo desses painéis de concreto.

3.1 SISTEMAS

Neste experimento, três painéis com formas SIP (2 com capacidade de carga e 1 sem capacidade de carga) foram testados e comparados entre si. Os sistemas de cofragem SIP com capacidade de carga consistiram em perfis PVC modulares brancos acoplados uns aos outros através de acessórios e preenchidos com concreto auto adensável (CAA) com diferentes traços.

A dimensão máxima do agregado graúdo foi de 9,5 mm. Os perfis de PVC tinham uma espessura total de 80 mm, uma largura de 200 mm e uma espessura de parede de 1,7 mm com duas nervuras internas espaçadas a cada 65 mm, formando assim uma dimensão total da amostra de 3150 mm x 2800 mm x 80 mm. A densidade e a resistência ao impacto *Charpy* do PVC foram de aproximadamente 1450 kg/m³ e 18,5 kJ/m², respectivamente. A reação de fogo das amostras foi determinada sobre o índice de dispersão da chama que foi de 7,56 e a densidade específica máxima de fumaça de 281,13.

O CAA da primeira amostra (PVC1) apresentou uma classe de espalhamento de SF2 de 650-750 mm, uma classe de viscosidade plástica aparente de $t_{500s} \leq 2$ VF1, uma resistência à compressão de 1,45 ksi (11 MPa) e uma densidade aparente de 2300 kg/m³. Enquanto o CAA da segunda amostra (PVC2) tinha uma classe de dispersão de SF2 de 650-750 mm, uma classe de viscosidade plástica aparente de $t_{500s} \leq 2$ VF1, uma resistência à compressão de 2,9 ksi (20 MPa) e uma densidade aparente de 2300 kg/m³.

A terceira e última amostra (PVC3), sem capacidade de carga, tinha a mesma área total e compartilhava as mesmas propriedades dos materiais de PVC2, exceto a resistência ao impacto *Charpy* de PVC que foi de 14 kJ/m².

Os concretos autoadensáveis utilizados no preenchimento de todos os moldes de PVC foram modificados com um aditivo plastificante para garantir fluidez e todos os painéis levavam apenas reforço na cinta de amarração no topo de todas as paredes. Da mesma forma, todos esses concretos mantiveram o traço projetado que é apresentado na Tabela 9.

Tabela 9 - Traço dos concretos empregados

Componentes da mistura	Quantidade
Cimento	360 kg/m ³
Agregado grosso	909 kg/m ³
Agregado fino	340 kg/m ³
Água	198 lt
Aditivo	3,5 kg/m ³

Fonte: Elaborada pela autora

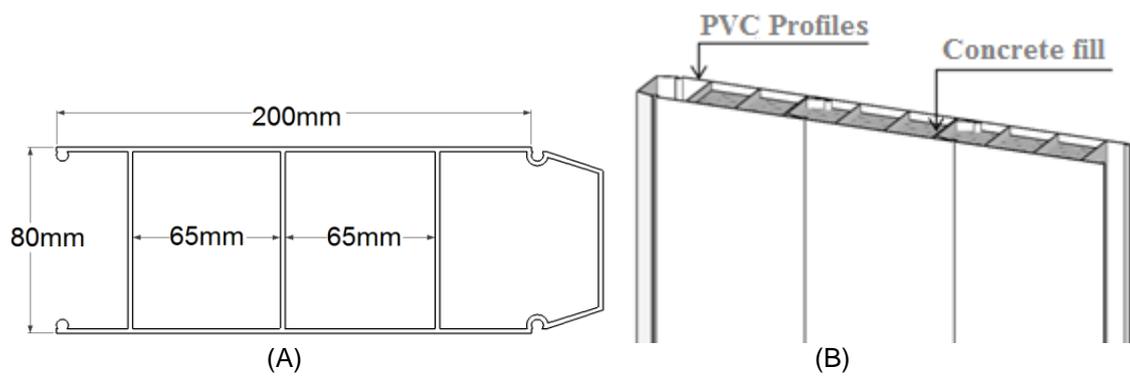
O uso de CAA nesta pesquisa deve-se à facilidade de compactar o concreto em pequenos espaços, como o que é disponível neste tipo de sistema de painéis empregados. Assim, com este tipo de concreto, foi possível evitar a aplicação de vibradores para sua compactação. De forma semelhante, concretos com baixo grau de resistência à compressão foram escolhidos levando em conta que estando dentro do sistema e sendo protegido por formas permanentes de PVC, não se necessitava de altas resistências nem para fatores de carga nem para durabilidade. Todas as amostras foram envelhecidas por vinte e oito dias e, em seguida, fixadas em uma estrutura de quadro metálico com parafusos e seladas com um selante elastomérico resistente ao fogo para posteriormente realizar os testes. A Tabela 10 resume as principais características dos materiais de todas as amostras testadas e as Figuras 5 e 6 mostram sua geometria.

Tabela 10 - Principais características dos materiais componentes dos sistemas ensaiados

Material	Propriedade	Sistema 1	Sistema 2	Sistema 3
Perfil de PVC	Dimensões (mm)	231.7x80		
	Espessura de parede (mm)	1.7		
	Espaçamento dos reforços (mm)	70	74	
	fck (MPa)	11	20	
Concreto auto adensável	Detalhes do Reforço	Apenas nas vergas e nos batentes		
	Tipo de cofragem	Permanente (SIP)		

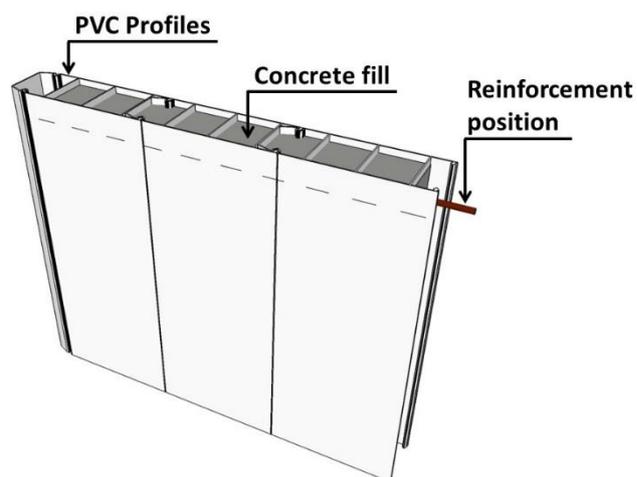
Fonte: Elaborada pela autora

Figura 5 - Ilustração da (A) geometria dos perfis de PVC e da (B) composição dos painéis



Fonte: Registrada pela autora

Figura 6 - Ilustração da seção transversal dos painéis e da posição de reforço



Fonte: Registrada pela autora

3.2 MÉTODOS

3.2.1 Produção das amostras

A produção e transporte destes sistemas pré-fabricados foram fornecidos pela empresa brasileira Bazze PVC, cliente do ITT Performance (Figura 7). A Bazze é uma fábrica com mais de 20 anos de atuação na fabricação de esquadrias em PVC e de sistema construtivo concreto-PVC (BAZZE, 2019).

Figura 7 - Projetos do sistema construtivo Concreto-PVC próprio da Bazze



Fonte: <http://www.bazze.com.br/> (2019)

3.2.2 Nomenclatura das amostras

A nomenclatura dos sistemas empregados nesta pesquisa, segundo as propriedades descritas na Tabela 10, foi estabelecida da seguinte forma na Tabela 11.

Tabela 11 - Nomenclatura dos sistemas ensaiados

Amostra	Nome da amostra
Sistema concreto-PVC com traço de concreto 1	PVC1
Sistema concreto-PVC com traço de concreto 2	PVC2
Sistema concreto-PVC com traço de concreto 3	PVC3

Fonte: Elaborada pela autora

3.2.3 Ensaio de Resistência ao fogo

O método de ensaio utilizado neste estudo foi o prescrito pela NBR 5628 e NBR 10636. O ensaio consistiu na determinação do tempo de resistência ao fogo da amostra quando exposta ao programa de aquecimento descrito pela referida norma. Durante o ensaio foram verificados três parâmetros que são: a resistência mecânica, a estanqueidade à passagem de gases quentes e fumaça, e o isolamento térmico do sistema. A amostra será classificada como corta fogo (CF), para o período de tempo que atender aqueles três requisitos.

Para todas as amostras, este ensaio foi desenvolvido sequencialmente de acordo com as seguintes fases:

3.2.3.1 Verificação de condições e preparação de equipamentos

Antes de iniciar cada um dos ensaios, foram verificados todos os parâmetros iniciais do mesmo, ou seja, as condições iniciais do programa térmico que seria adotado no ensaio, a qual tinha que ser situado entre 10 °C e 40 °C. Do mesmo modo, foi verificada a velocidade do ar com a ajuda de um anemômetro. Esta foi medida nas direções paralelas e perpendiculares à superfície externa do corpo de prova, a uma distância ao redor de 50 mm, e foi controlado para que não fosse superior a 1,3 m/s. Em paralelo, foi realizada a preparação do bastidor que seria utilizado para os testes de estanqueidade, secando assim o algodão numa estufa a 100 °C durante pelo menos 30 min, e depois fixando-o em um bastidor quadrado de 100 mm de largura e 20 mm espessura, com um peso aproximado de 3 a 4 g.

3.2.3.2 Montagem das amostras

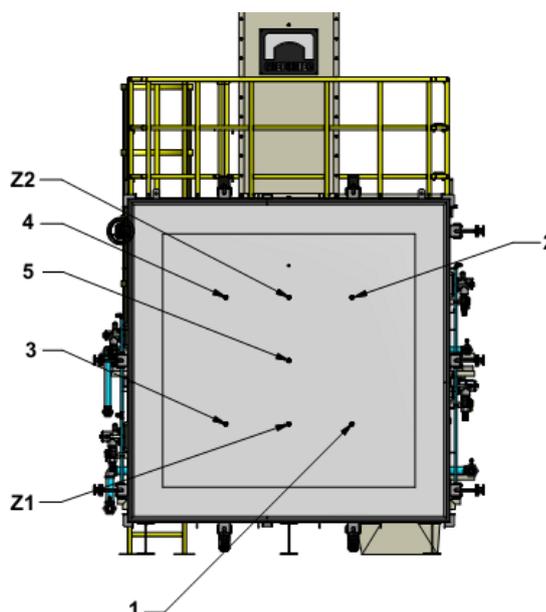
Depois que os sistemas foram recebidos no ITT Performance, as amostras foram instaladas em um pórtico móvel, próprio do forno do ensaio descrito na norma.

3.2.3.3 Localização de termopares

a) Internos ao forno

O forno vertical empregado possui sete termopares no total, dos quais cinco (1 a 5 na Figura 8) foram para controlar a temperatura na superfície interna da amostra a ensaiar. Estes termopares foram dispostos conforme as prescrições da NBR 5628, com uma área de influência de 1 m² cada, sendo do tipo K (Δ Temp. = 0° C a 1300 °C). Sua haste foi envolta por tubos cerâmicos, protegida por bainha metálica e revestida com manta de fibra cerâmica. Todos eles possuem diâmetro de 6 mm e uma sensibilidade de 41 μ V/°C, aproximadamente, e precisão de $\pm 1,1$ °C. A localização desses termopares corresponde como mínimo, ao ponto localizado aproximadamente no centro geométrico da superfície da amostra e os outros quatro ao centro de cada uma das áreas resultantes da divisão em partes iguais, com o fim que a média das temperaturas a ser calculada, seja representativa da amostra na sua totalidade. Os outros dois termopares Z1 e Z2 visam medir a temperatura média interna das metades do forno vertical (superior e inferior). A disposição destes termopares é apresentada na Figura 8.

Figura 8 - Disposição dos termopares internos – Vista frontal do forno sem amostra acoplada



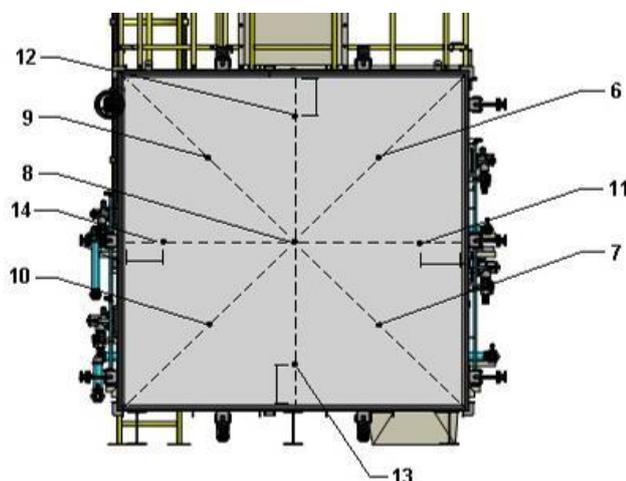
Fonte: ITT Performance (2019)

Além disso, a pressão interna do forno, a qual é sincronizada com o *damper* de exaustão, foi registrada para o seu controle, de acordo com as exigências das normas vigentes.

b) *Externos ao forno*

Após as amostras serem acopladas ao forno, foram monitoradas continuamente por cinco termopares do tipo K, com um diâmetro de 1,5 mm na superfície exposta ao fogo e outros cinco termopares do tipo T ($\Delta\text{Temp.} = 0\text{ }^{\circ}\text{C}$ a $300\text{ }^{\circ}\text{C}$), com um diâmetro de 0,7 mm na superfície não exposta ao fogo. Todos eles programados para realizar o aquecimento de acordo com os preceitos de norma. A posição e numeração dos termopares externos (face não exposta a altas temperaturas) estão apresentadas na Figura 9.

Figura 9 - Disposição dos termopares externos ao forno – Vista frontal do forno com amostra acoplada



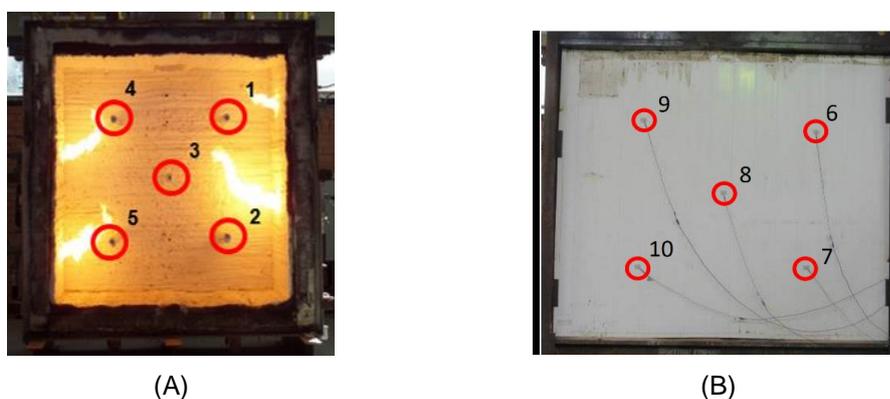
Fonte: ITT Performance (2019)

Para a fixação destes termopares na amostra foram utilizadas fita de fibra cerâmica, sendo estas coladas com cola epóxi ou fixadas com parafusos à amostra. O termopar foi encaixado nas placas de modo que a base de cobre ficasse em contato com a superfície da amostra.

Cabe frisar que a média aritmética das temperaturas obtidas pelos termopares seis a dez foi usada para conferir o critério de isolamento térmico da amostra e que as posições desses termopares (externos) coincidiram com as posições dos termopares um a cinco (internos) e obedecessem aos preceitos de locação da norma (ABNT; 1989). Enquanto os termopares onze a quatorze podem ser usados para leitura adicional, os quais para esta pesquisa específica, não foram contemplados.

Uma ilustração real das posições dos termopares utilizados nos ensaios desenvolvidos neste estudo é apresentada na Figura 10.

Figura 10 - Ilustração real dos termopares para a amostra localizados (A) no interior, e (B) no exterior do forno empregado nesta pesquisa



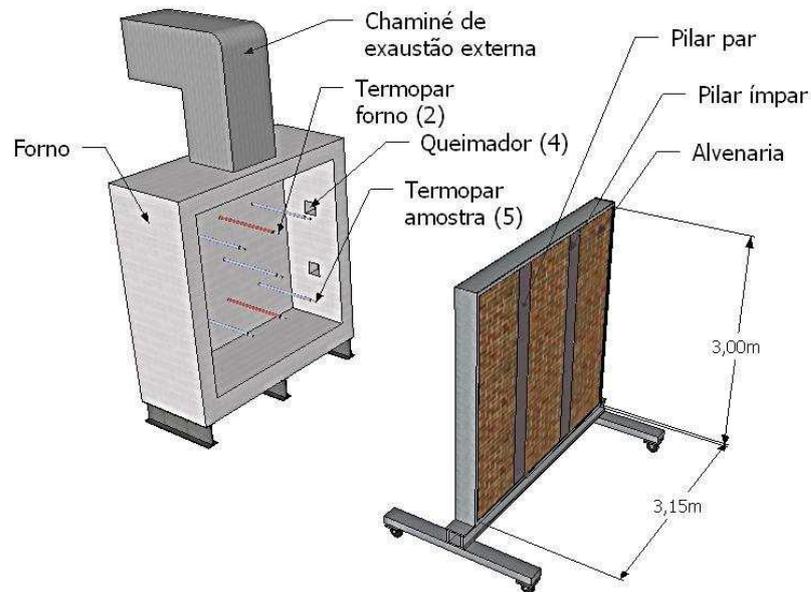
Fonte: Registrada pela autora

As temperaturas destes termopares foram registradas a cada 30 s durante os testes e com uma precisão de $\pm 1,5\%$, para isso sendo todos eles previamente conectados ao painel elétrico do forno vertical.

3.2.3.4 Acoplagem das amostras

Após a montagem do sistema no pátio e a instalação de todos os termopares, se prosseguiu com a acoplagem do sistema no forno vertical. Este procedimento foi aplicado a todas as amostras testadas neste estudo. O detalhe da acoplagem dos sistemas junto ao forno é ilustrado na Figura 11.

Figura 11 - Ilustração da acoplagem da amostra ao forno vertical

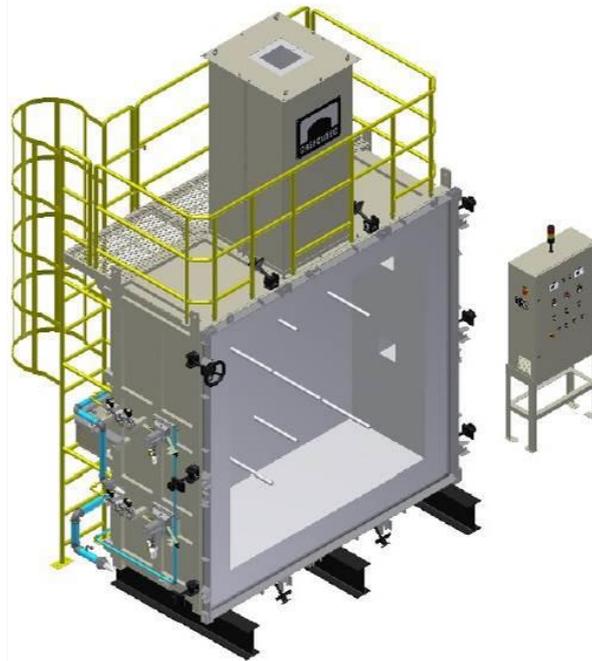


Fonte: Bolina (2016)

3.2.3.5 Simulação de incêndio

Todos os ensaios de resistência ao fogo foram realizados em um forno vertical normatizado e calibrado, equipado com um sistema de carregamento, disponível no ITT Performance. O forno consiste numa estrutura rígida, com isolamento térmico em manta de fibra cerâmica, aquecimento com queimadores a gás com controle automático dos diferenciais de pressão, chaminé para regulagem da vazão dos gases de aquecimento, controle de temperatura digital e painel elétrico de comando, conforme a norma (Figura 12).

Figura 12 - Ilustração do forno vertical empregado



Fonte: ITT Performance (2019)

O forno foi aquecido com quatro queimadores alimentados por gás liquefeito de petróleo (GLP) e controlado por pressão diferencial (Figura 13). Dois queimadores foram instalados nas paredes laterais do forno e, em seguida, calibrados para aumentar a temperatura de acordo com a curva padrão temperatura-tempo estabelecida pelas normas ISO 834 (ISSO, 1991) e EN 1991-1-2 (2002), dada pela equação 1 (EM, 1991). A potência total de aquecimento do forno foi de 65.400 kcal/h, procedimento previamente adotado em outros estudos (GIL et al., 2017; BOLINA et al., 2015; BOLINA, 2016).

$$\theta_g = 20 + 345 \text{ Log}_{10} (8 t + 1), \quad (1)$$

Onde θ_g é a temperatura do gás no compartimento de incêndio (°C) e t é o tempo (min).

Figura 13 - Ilustração dos queimadores do forno empregado



Fonte: Bolina (2015)

O forno conta com uma central de comando digital ou painel de operação (Figura 14), que é localizado ao lado do forno e com o que se faz controle, ajuste e correção automática da pressão interna e das temperaturas desenvolvidas neste tipo de ensaio, garantindo assim o cumprimento da curva ISO 834-1.

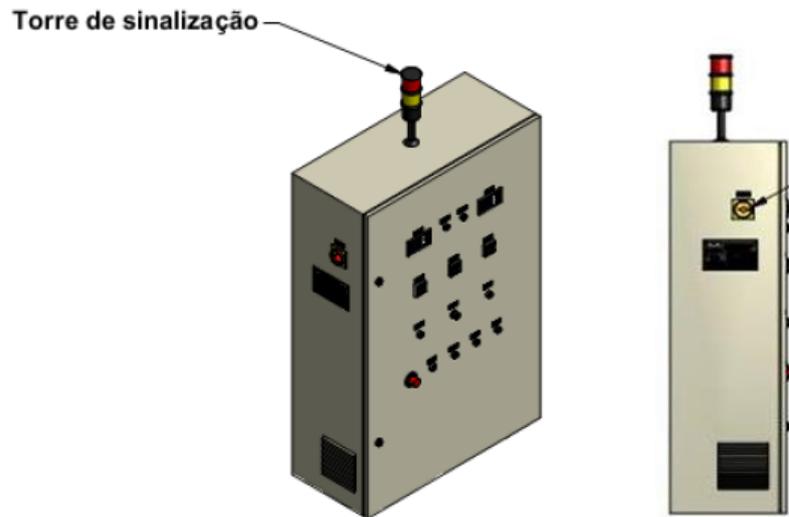
Figura 14 - Painel de operação do forno vertical empregado



Fonte: Bolina (2016)

Além da central de comando, sobre o painel elétrico está localizada uma torre de sinalização (Figura 15), com duas luzes de cores vermelho e amarelo. A cor “amarelo” indica que o equipamento está em operação normal, e a cor “vermelho” indica que ocorreu alguma falha no acionamento do sistema e pelo qual soa um alarme intermitente.

Figura 15 - Ilustração da torre de sinalização



Fonte: ITT Performance (2019)

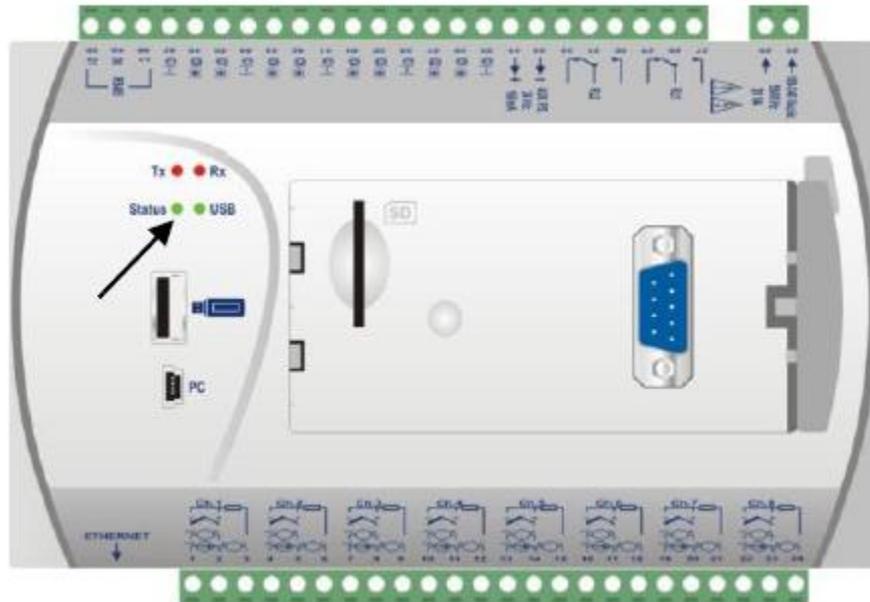
Cabe frisar que para a realização de todos os ensaios no laboratório, foi obrigatório o uso dos seguintes equipamentos de segurança para o pessoal:

- Vestimenta de proteção ao combate a incêndio;
- Máscara respiratória;
- Capacete de segurança;
- Botina de segurança;
- Jaleco com identificação do laboratório;
- Óculos de segurança;
- Protetor auricular.

3.2.3.6 Coleta de dados

Uma vez que sejam acionados os botões de coleta de dados juntos ao painel elétrico do forno vertical, o registro das temperaturas, da aplicação de carregamento e das pressões internas é realizado automaticamente, e deve se verificar se os dados estão sendo gravados corretamente pelo *FieldLogger*. O *FieldLogger* é um registrador de dados versátil e econômico que lida com variáveis analógicas, digitais e outros tipos de alta resolução e velocidade (Figura 16).

Figura 16 - Ilustração do registrador de dados (*FieldLogger*) empregado



Fonte: <https://www.novusautomation.com/site/> (2019)

A coleta dos dados pode ser feita através de dois modos. Pode se conectar um dispositivo de armazenamento móvel em cada uma das três entradas USB que tem painel elétrico do forno e iniciar o processo de *download*. A outra maneira pode ser diretamente através do *Fieldlogger*, o qual está localizado na parte interna do painel elétrico, por meio de três entradas também: um cartão SD, USB e micro USB.

A coleta e exportação dos dados de registro do *Fieldlogger* foi feita através do software *FieldLoggerConfig* (Figura 17), que permite visualizá-los e exportá-los em diversos formatos, além de outras funções tais como a configuração do registrador de dados, o diagnóstico de *status* do equipamento, entre outras.

Figura 17 - Layout do Software FieldLoggerConfig



Fonte: ITT Performance (2019)

Para a exportação dos dados, é preciso selecionar o registro que se deseja obter (das temperaturas internas, das temperaturas externas ou dos termopares com os dados do carregamento) de acordo com o caso, definir o local no *notebook* a serem armazenados os respectivos dados e finalmente gerar um arquivo de *Excel* para o seu filtro e análise.

3.2.4 Medição das deformações

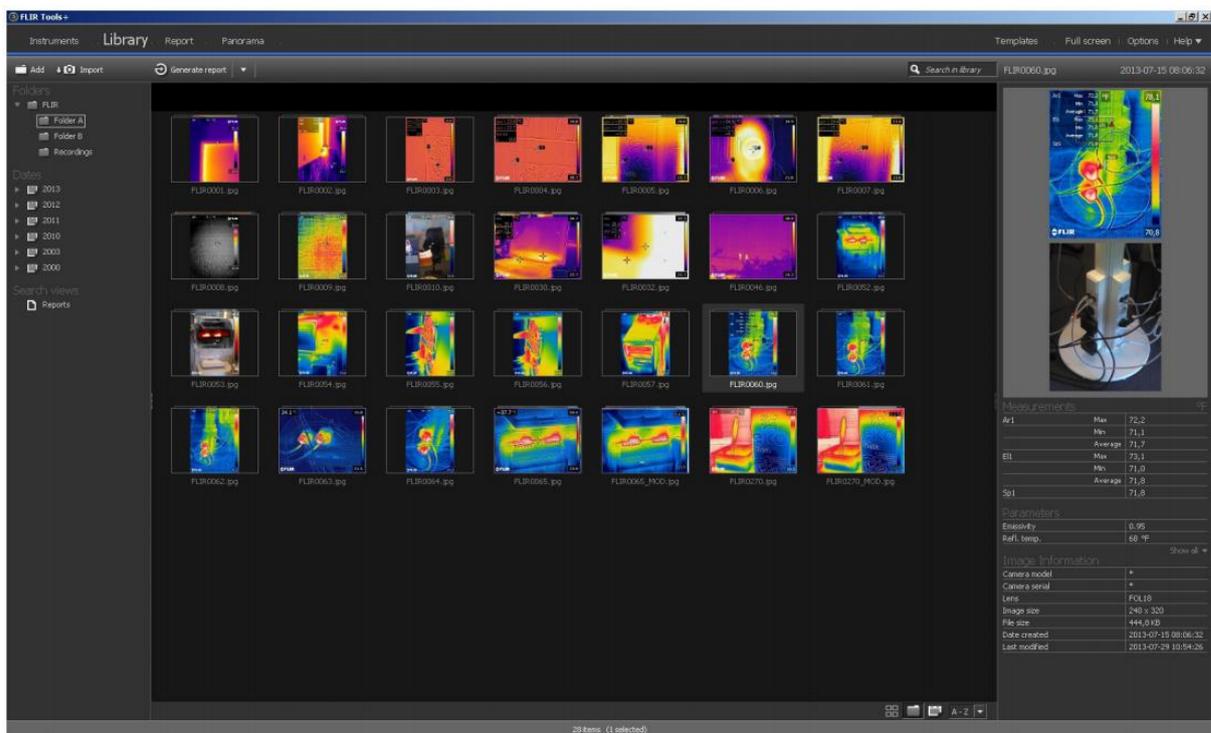
Além da instalação dos termopares, uma câmera termográfica, um cronômetro e uma trena a *laser* foram usados para monitorar e medir a deformação horizontal. A trena a *laser* foi utilizada para o cálculo do desvio de curvatura sofrida para cada uma das amostras durante o período do seu respectivo ensaio, e foi posicionada em cima do tripé, de forma a ficar a 2,00 m do chão, a uma distância de 6 m, aproximadamente, da amostra.

Todos os ensaios foram inspecionados visualmente durante todo o procedimento através do uso de uma câmera fotográfica digital, com o fim de registrar os eventos ocorridos, realizando assim anotações de qualquer tipo de mudança da amostra em relação a sua característica inicial como o aparecimento de

fissuras, o vazamento de fumaça, deformações, ruídos e os instantes em que os mesmos ocorreram.

As imagens e gravações obtidas por meio do uso de uma câmera termográfica modelo FLIR A325, fixada em cima do tripé a 1,50 m do chão e posicionada no lado externa do forno a uma distância de 5 m de cada uma das amostras ensaiadas, foram armazenadas através do programa *Flir Tools+* instalado em um *notebook* para a sua análise posterior (Figura 18).

Figura 18 - Layout do Programa *Flir Tools+* empregado



Fonte: <https://www.flir.es/products/flir-tools-plus/> (2019)

Para cada um dos ensaios realizados, as imagens termográficas foram salvas a intervalos regulares de 5 min nos primeiros 30 min do respectivo ensaio e após, em intervalos de 10 min. Isso com o fim de realizar uma visualização gradual da transmitância de calor da face interna da amostra analisada.

A Tabela 12 apresenta uma breve descrição dos equipamentos utilizados para a realização dos ensaios feitos neste estudo.

Tabela 12 - Equipamentos utilizados nos ensaios

Equipamento	Modelo	Descrição Técnica
Câmera termográfica	FLIR / A325	Capacidade Mínima: 0 °C Capacidade Máxima: 350 °C Resolução: 1 °C
Cronômetro	Extech Instrument 365535	Capacidade Mínima: 0:00':00"1 s Capacidade Máxima: 9:00':99"9 s Resolução: 1/100 s
Forno de resistência ao fogo	Grefortec GFT 03276 FG	Capacidade: 1200 °C Resolução: 0,01 °C
Trena a laser	Bosch - GLM 150 Professional	Capacidade Mínima: 0 m Capacidade Máxima: 150 m Resolução: 1 mm
Termohigrômetro	Instrutemp ITMP 600	Capacidade mínima: 10°C/20%/20dB(A)/0Lux Capacidade Máxima: 60°C/80%/130dB(A)/ 2000Lux Resolução: 0,1°C/0,1%RH/0,1dB(A)/1Lux

Fonte: Elaborada pela autora

3.2.4.1 Variáveis de resposta

As variáveis de resposta deste programa experimental foram as seguintes:

- ✓ A evolução das temperaturas médias das superfícies dos painéis: foi medida através dos termopares instalados nas superfícies externas das amostras ensaiadas, nas faces não expostas diretamente ao fogo;
- ✓ O deslocamento dos painéis: foi avaliado por topografia a através do controle feito com o uso da trena a laser que constantemente era usado durante todo o decorrer do ensaio;
- ✓ Inspeções Visuais: Iguamente todas as amostras foram inspecionadas visualmente durante todo o tempo de ensaio, com o fim de complementar as descobertas detectadas.

3.2.4.2 Variáveis de controle

Como variáveis de controle para o tipo de ensaio feito neste programa, tem-se os parâmetros do ensaio de resistência ao fogo pelos preceitos descritos pela norma:

✓ Estabilidade

Corresponde ao tempo durante o qual o corpo-de-prova, neste caso o painel, mantém-se íntegro quando submetido às condições padronizadas de aquecimento, pressão e carregamento. A estabilidade deve ser analisada de forma distinta para:

- Paredes divisórias sem função estrutural: neste caso devem manter-se íntegras, sem apresentar colapso quando submetidas ao ensaio, sendo verificada ao longo da duração do mesmo e 3 min antes do tempo preestabelecido para o término do ensaio pela aplicação do teste de choque mecânico conforme estabelece a norma NBR 10636 (ABNT, 1989). Este teste consiste em submeter à superfície não exposta ao fogo da amostra aos impactos assíncronos de três esferas de aço movimentando a esfera até seu deslocamento máximo para que ocorra movimento pendular, de forma a se obter nos impactos, uma energia correspondente a 20 J (Figura 19). Os impactos devem ser realizados em três pontos distintos da parede, alinhados horizontalmente a 1,40 m da base do corpo-de-prova. São dispensados os impactos nas paredes classificadas com tempo de ensaio abaixo de 45 min.

Figura 19 - Ilustração do teste de choque mecânico



Fonte: ITT Performance (2019)

- Paredes divisórias com função estrutural: para as paredes com função estrutural, antes do início da aplicação do programa térmico, a amostra deve ser submetida a um carregamento representativo da carga incidente nas paredes de uma edificação convencional, produzindo esforços da mesma natureza e ordem de grandeza dos observados na edificação em uso, conforme o estabelecido pela norma NBR 5628 (ABNT, 2001). A carga a ser aplicada através da unidade hidráulica deve ser configurada junto ao painel elétrico do forno. A unidade hidráulica localiza-se à direita do forno vertical e exerce a função de aplicar uma carga previamente programada à amostra através de pistões hidráulicos pressurizados por uma célula de carga.

Antes do acionamento do comando junto ao painel, os cilindros (Figura 20) devem estar posicionados conforme estabelece a norma (ABNT, 2001), para posteriormente ligar no painel elétrico o comando avanço para que seja iniciado o carregamento automático da carga programada no *Fieldlogger*.

Figura 20 - Ilustração dos cilindros hidráulicos empregados para o carregamento



Fonte: ITT Performance (2019)

Nos casos das amostras PVC1 e PVC2, uma carga de 1.6 tf/m foi aplicada ao sistema com a ajuda de cilindros hidráulicos e vigas para garantir uma distribuição uniforme na superfície de ambas as amostras. Essa carga foi aplicada para simular o peso e a carga viva que esses painéis poderiam suportar, ou seja, era a carga de projeto e, portanto, depois que o ensaio foi concluído, essa carga foi removida.

No decorrer do ensaio verificam-se flechas, deformações ou sinais de instabilidade que caracterizem a perda de resistência mecânica do sistema. O carregamento foi aplicado antes do início do programa térmico e mantido durante todo o período do ensaio, sendo reaplicado 24 h após o término do ensaio. Caso a amostra não resista ao carregamento aplicado ou não seja possível aplicá-lo, considera-se o tempo de resistência ao fogo da amostra como 80 % do tempo em que atendeu aos requisitos durante o programa térmico.

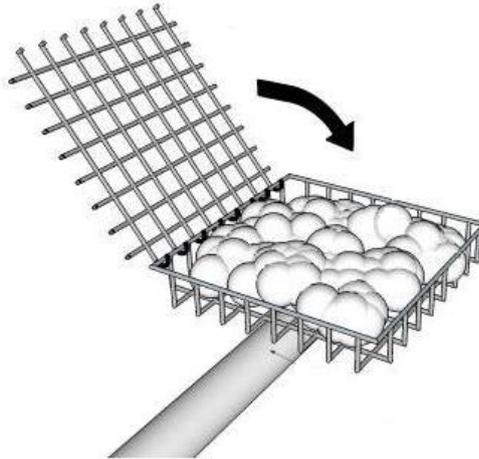
✓ Estanqueidade

A estanqueidade refere-se à capacidade de um elemento construtivo a realizar a vedação de uma abertura em parede, quando exposto ao fogo de um lado, de evitar a ocorrência ou passagem de chamas e gases quentes no lado não exposto ao fogo numa construção. Esta é verificada através de um ensaio mediante a inflamação de um chumaço de algodão dentro de um bastidor quadrado, o qual é posicionado em frente à amostra ensaiada a uma distância entre 1 a 3 cm das fissuras deflagradas na amostra, por curtos intervalos de tempo e mantido em posição entre 10 a 20 s.

O algodão utilizado para a formação do chumaço deve ser composto de fibras novas, não tingidas e artificiais, não devendo ser reutilizado, o qual deve ser seco em estufa pelo menos 30 min a temperatura de 100 °C. O chumaço deve medir 100 mm x 100 mm na superfície exposta e ter espessura de cerca

de 20 mm, pesando entre 3 g e 4 g, e ser fixado por meio de grampos de arame de aço a um bastidor quadrado de 100 mm de lado, também de arame de aço, com cerca de 1 mm de diâmetro, como é apresentado na Figura 21.

Figura 21 - Ilustração do chumaço de algodão do teste de estanqueidade

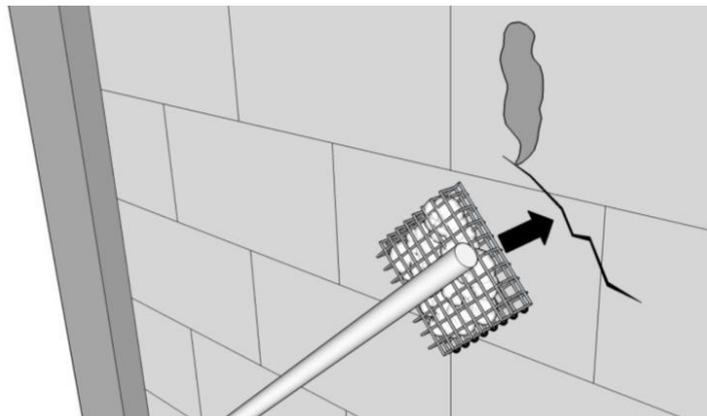


Fonte: ITT Performance (2019)

O teste de estanqueidade deve ser realizado nas seguintes condições:

- Quando ocorra aparecimento de fissuras ou aberturas na parede que permita a passagem de gases quentes ou fumaça (Figura 22);
- Em juntas de placas de gesso acartonado, placas de concreto ou outro material que apresente deterioração nas juntas durante o decorrer do ensaio;
- Em quaisquer outras condições onde presuma-se que o requisito de estanqueidade da amostra esteja comprometido.

Figura 22 - Ilustração da realização do teste de estanqueidade



Fonte: ITT Performance (2019)

✓ Isolamento térmico

O isolamento térmico é a capacidade de um elemento de separação quando exposto ao fogo em um lado, de restringir a subida de temperatura da face não exposta ao fogo, por baixo de todos os níveis especificados na norma (ISO, 1991). A verificação do isolamento térmico é realizada com os termopares que estão dispostos em ambas às faces da amostra. Para tal registro, os sensores de temperaturas estão conectados no *Fieldlogger* junto ao painel elétrico do forno vertical. Para a verificação do isolamento térmico, a norma especifica como limite que a temperatura média (média aritmética dos cinco termopares na face externa da amostra) não pode ser superior a 140 °C e ultrapassar 180 °C em nenhum dos termopares, sendo estas temperaturas acrescidas da temperatura ambiente.

De acordo com o atendimento a cada um dos anteriores critérios de resistência ao fogo, segundo a NBR 10636 (ABNT, 1989) o corpo-de-prova se enquadrará em uma ou mais das seguintes categorias:

- a) Corta-fogo, quando atender a todas as exigências, ou seja, estabilidade, estanqueidade e isolamento térmico;
- b) Pára-chamas, quando atender às exigências de estabilidade e estanqueidade.

Da mesma forma, a cada categoria ao fogo é associado um grau de resistência ao fogo, expresso pelo tempo de ensaio durante o qual os corpos-de-prova satisfazem aos critérios de resistência correspondentes à sua categoria. Os graus de resistência ao fogo, expressos em minutos, são os seguintes: 360, 240, 180, 120, 90, 60, 45, 30 e 15 (ABNT, 1989).

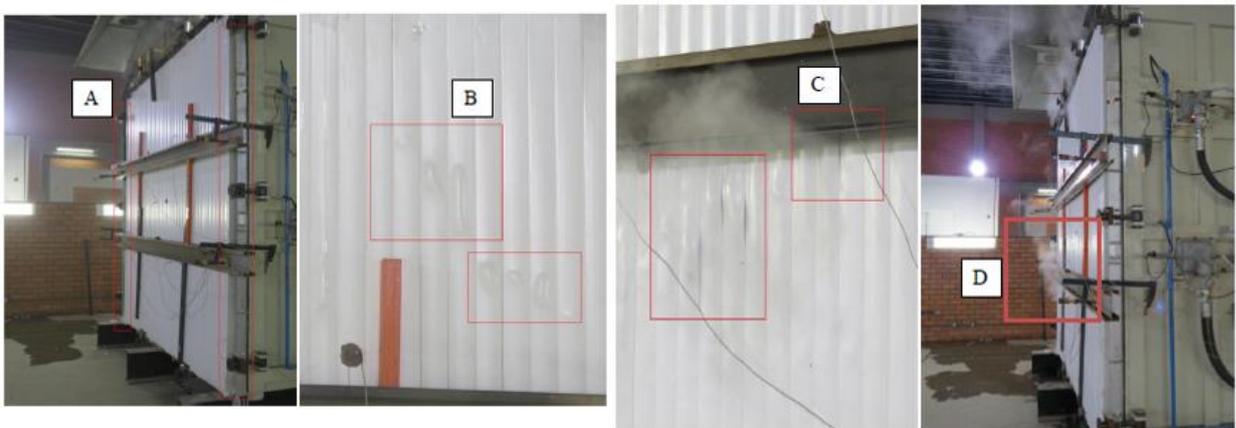
4 APRESENTAÇÃO DE RESULTADOS

O teste da amostra PVC1 durou apenas 26 min. Após os primeiros 4 min do ensaio, uma liberação de fumaça branca seguida por crepitações foi observada. Entre os 18 - 23 min, se formaram bolhas na superfície do PVC não exposta ao fogo e fumaça foi observada entre os perfis próximos ao centro da amostra. Finalmente, no minuto 26, uma abertura explosiva foi desenvolvida no concreto, o que resultou na perda de integridade do sistema.

O teste da segunda amostra, PVC2, durou um tempo total de 80 min. Após os primeiros 9 min de exposição ao fogo, a amostra começou a derreter. Entre os 11 - 13 min crepitações foram ouvidas dentro do forno. Entre os 18 - 27 min formaram-se bolhas na face externa da amostra e fumaça foi liberada no centro da amostra.

O ensaio da amostra PVC3 durou 60 min no total. Após 8 min, uma ligeira flambagem local foi notada na amostra. Aos 17 min, uma leve reação de fusão ocorreu no perfil de PVC da superfície externa da amostra, que deformou o perfil, embora não tenha atingido um estado líquido completo ainda naquele momento. Exatamente aos 30 min, gases começaram a sair pela parede. A Figura 23 fornece evidências de como esse evento se desenvolveu durante todo o ensaio.

Figura 23 - Principais eventos ocorridos no ensaio da amostra PVC3: ligeira flambagem (A), deformação do perfil de PVC (B e C) e passagem de gases através do painel (D)



Fonte: Registrada pela autora

Comparando o resultado deste ensaio com outros estudos que não envolvem o uso de PVC (GIL et al., 2017; BOLINA et al., 2015; BOLINA, 2016), pode-se

observar que este material ajuda a retardar o tempo de reação, o que pode ser traduzido na facilitação para a evacuação humana de qualquer possível sítio de incêndio. Portanto, pode-se destacar as vantagens oferecidas pelo PVC em caso de um sinistro inesperado deste tipo.

A Tabela 13 apresenta o roteiro dos eventos registrados e a evolução do ensaio para cada uma das amostras:

Tabela 13 - Resumo dos principais eventos registrados durante os ensaios realizados

PVC1	PVC2	PVC3
0 min: Início do pré-carregamento	0 min: Início do pré-carregamento	-
10 min: Fim do pré-carregamento	10 min: Fim do pré-carregamento	-
0 min: Início do programa térmico (carregamento e aquecimento)	0 min: Início do programa térmico (carregamento e aquecimento)	0 min: Início do programa térmico (carregamento e aquecimento)
1 min: Liberação de fumaça preta	1 min: Liberação de fumaça preta	8 min: Flambagem do painel
4 min: Liberação de fumaça branca e estalos	9 min: Início do derretimento do PVC	11 min: Estalos no interior do forno
8 min: Escorrimento de um líquido preto	11 min: Estalos no interior do forno	17 min: Formação de bolhas no PVC
18 min: Formação de bolhas no PVC	13 min: Estalos no interior do forno	30 min: Passagem de fumaça ao exterior na parte superior
23 min: Liberação de fumaça na área central	18 min: Formação de bolhas no PVC	31 min: Passagem de fumaça ao exterior na parte inferior
26 min: Lascamento explosivo do concreto e perda de estanqueidade	27 min: Liberação de fumaça na área central	32 min: Aumento de fumaça no topo
26 min: Fim do ensaio	29 min: Teste de estanqueidade aprovado	60 min: Fim do ensaio
-	30 min: Estalos no interior do forno	-
-	58 min: Teste de estanqueidade aprovado	-
-	68 min: Teste de estanqueidade aprovado	-
-	70 min: Teste de estanqueidade aprovado	-

-	72 min: Teste de estanqueidade	-
-	aprovado	-
-	75 min: Teste de estanqueidade	-
-	aprovado	-
-	80 min: Fim do ensaio	-

Fonte: Elaborada pela autora

É importante enfatizar o comportamento de todas as amostras em termos de ação explosiva, devido a que todas as amostras mostraram deslocamento do concreto na face exposta a altas temperaturas, bem como a formação de bolhas na superfície do PVC não exposta diretamente ao fogo. As Figuras 24 e 25 mostram o aparecimento de bolhas típicas nas amostras e o deslocamento do concreto.

Figura 24 - Aparecimento de bolhas na superfície de PVC não exposta ao fogo de cada amostra



PVC1



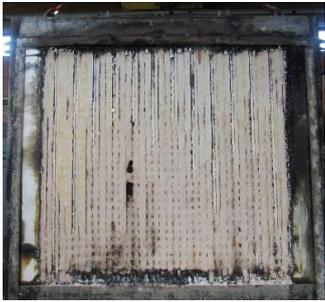
PVC2



PVC3

Fonte: Registrada pela autora

Figura 25 - Aparência inicial v.s. deslocamento do concreto na face exposta ao fogo de cada amostra

Amostra	Antes da exposição ao fogo	Após a exposição ao fogo
PVC1		
PVC2		
PVC3		

Fonte: Registrada pela autora

É importante ressaltar que, como em todos os casos, o deslocamento foi causado pelas forças mecânicas geradas dentro do elemento estrutural (paredes neste caso), devido ao estresse térmico e à rápida expansão da umidade no interior do concreto.

4.1 RESISTÊNCIA MECÂNICA

Após uma exposição de 20 min ao fogo, a amostra PVC1 sofreu um deslocamento lateral máximo de 32 mm, apresentando assim um comportamento instável. Assim, a reaplicação da carga, prevista para ser realizada 24 h após o

término do teste segundo a norma, a fim de verificar sua estabilidade estrutural, não foi realizada devido à perda de estabilidade da amostra durante o teste. Portanto, o sistema evidenciou um tempo de resistência ao fogo de 20 min de acordo com a ISO 834, considerando que apenas um 80 % do tempo do ensaio deve ser contabilizado em caso de ocorrer uma perda de estabilidade.

A amostra PVC2 manifestou um deslocamento lateral máximo de 55 mm, que foi registrado após uma exposição de 70 min ao fogo. Assim como na amostra PVC1, a reaplicação da carga foi desnecessária devido à perda de estabilidade da amostra durante o teste. Em consequência, o sistema apresentou um tempo de resistência ao fogo de 64 min de acordo com a norma.

A amostra PVC3 (sem aplicação de carga) apresentou um deslocamento lateral máximo de 31,8 mm registrado após uma exposição ao fogo por 60 min no total. O sistema atestou uma resistência estável ao fogo, mantendo sua estrutura original, exceto pela presença de algumas deformações de flambagem no painel durante todo o teste. A Tabela 14 apresenta os deslocamentos de todas as amostras durante seus respectivos ensaios.

Tabela 14 - Resumo do deslocamento apresentado pelas amostras ensaiadas

Tempo (min)	Deslocamento (mm)		
	PVC1	PVC2	PVC3
0	0	0	0
5	7	11	6
10	21	21	12
15	28	27	21
20	32	30	24
25	-	36	23
30	-	41	20
40	-	43	31
50	-	45	31
60	-	50	32
70	-	55	-
80	-	54	-

Fonte: Elaborada pela autora

4.1.1 Estanqueidade

Para a amostra PVC1, nenhum teste de estanqueidade foi realizado porque o deslocamento do concreto permitiu o vazamento direto de chamas, o que originou a perda da estanqueidade do sistema. Ao contrário da PVC1, a amostra PVC2 foi submetida a seis testes de estanqueidade. Porém, nenhum desses testes evidenciou qualquer característica da inflamação do chumaço de algodão.

A amostra PVC3 apresentou características de estanqueidade adequadas durante os primeiros 30 min do teste. A partir deste momento, fumaça começou a sair da superfície externa da amostra devido ao desenvolvimento de fissuras, através das quais algum gás foi filtrado. A Figura 26 ilustra todos os eventos relacionados à perda de estanqueidade das três amostras testadas no experimento:

Figura 26 - Aspectos da perda de integridade das amostras PVC 1-3



PVC1



PVC2



PVC3

Fonte: Registrada pela autora

4.2 ISOLAMENTO TÉRMICO

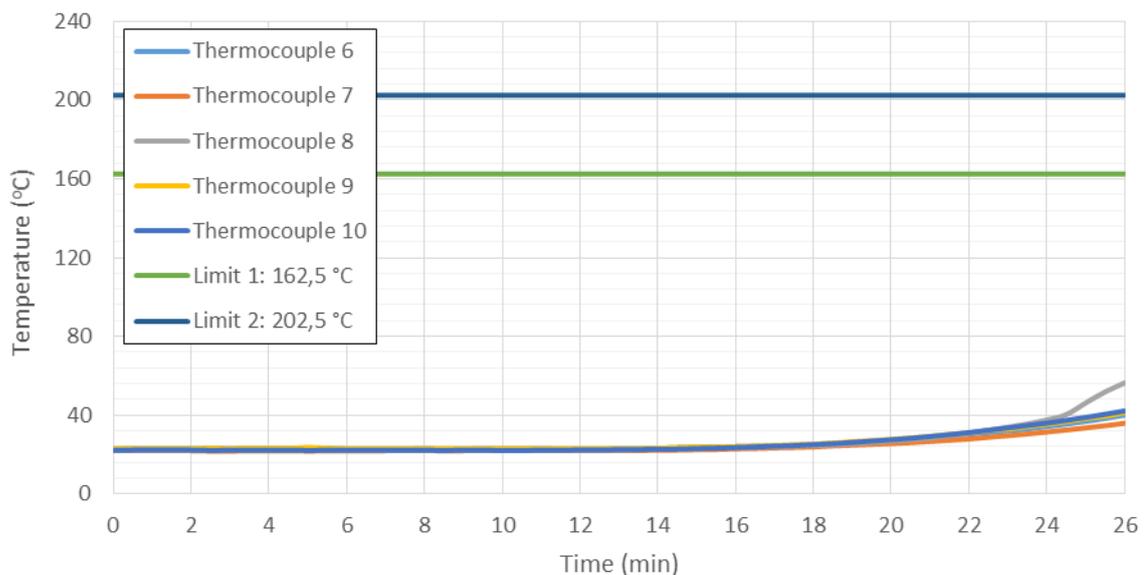
Para a amostra PVC1, a temperatura ambiente média no início do teste de incêndio foi de 22,5 °C, o limite médio de temperatura dos termopares foi de 162,5 °C e o limite de temperatura para cada termopar atingiu 202,5 °C. Nenhum dos limites de temperatura foi atingido ou excedido durante o decorrer do teste.

Com referência à amostra PVC2, a temperatura ambiente média no início do teste de incêndio foi de 23,8 °C, o limite médio de temperatura dos termopares foi de 163,8 °C e o limite de temperatura para cada termopar atingiu 203,8 °C.

Quanto à amostra PVC3, o sistema apresentou condições de isolamento térmico durante todo o curso do teste. A temperatura ambiente no início do ensaio foi de 20,8 °C. A amostra desenvolveu-se efetivamente como um isolante térmico, razão pela qual a temperatura e a temperatura média dos termopares não atingiram os critérios de medição contrafogo segundo a ISO 834 (180 °C e 140 °C, respectivamente) na face não exposta ao fogo.

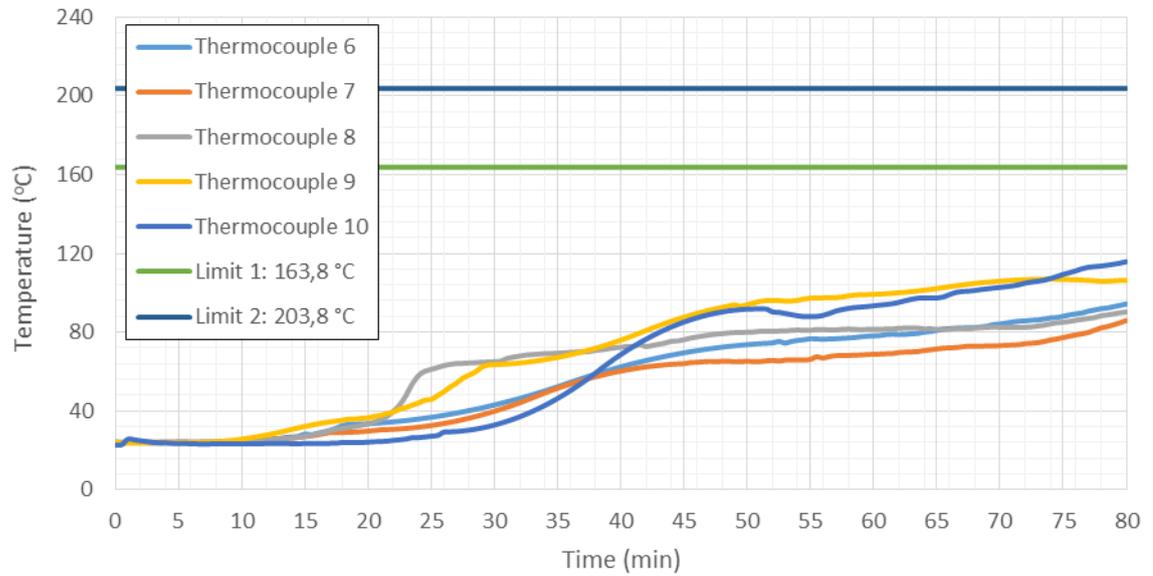
As temperaturas pontuais medidas pelos termopares na face não exposta ao fogo são apresentadas nas Figuras 27-29.

Figura 27 - Medições de temperatura registradas pelos termopares na face externa da amostra PVC1



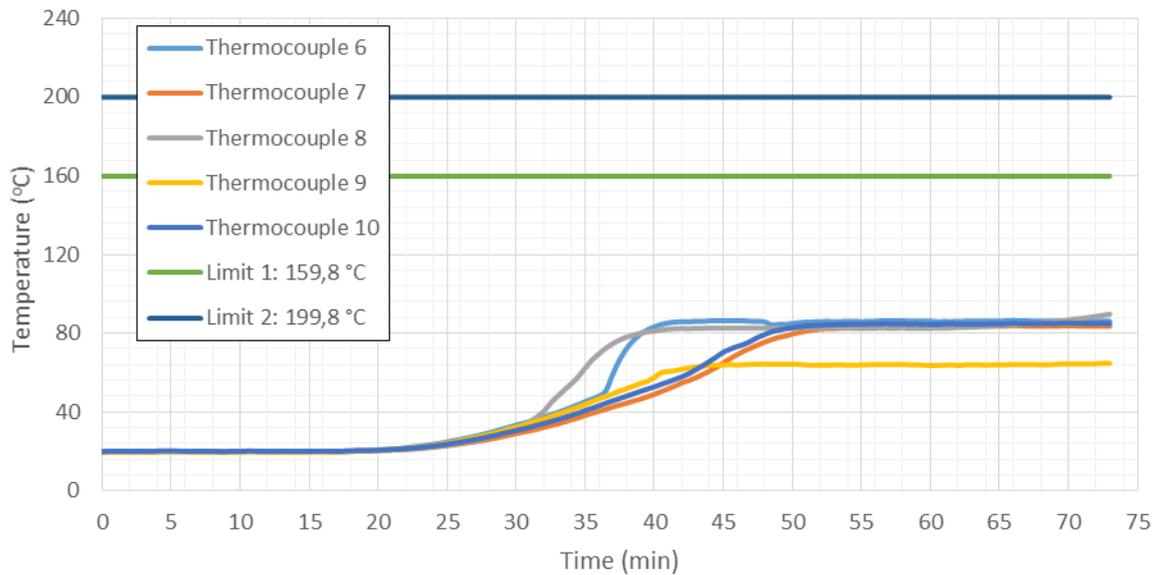
Fonte: Registrada pela autora

Figura 28 - Medições de temperatura registradas pelos termopares na face externa da amostra PVC2



Fonte: Registrada pela autora

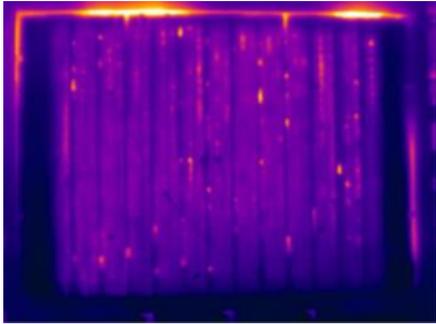
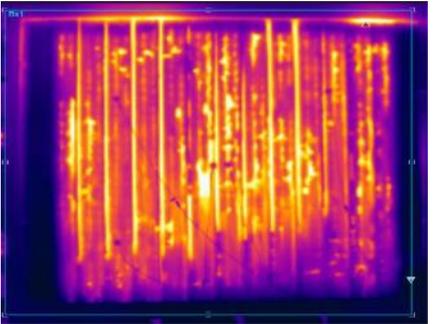
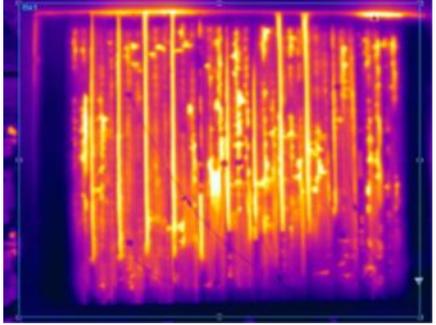
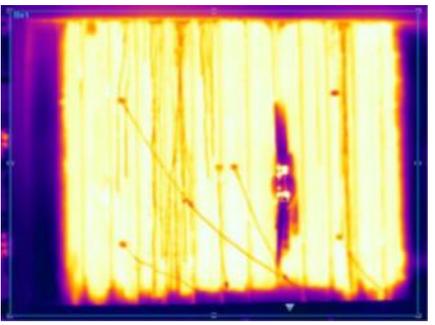
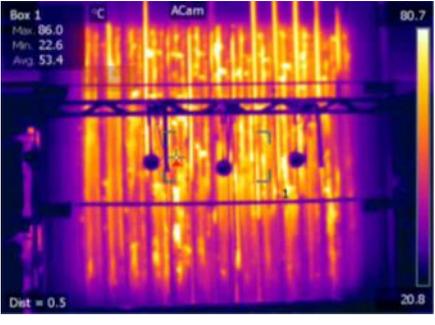
Figura 29 - Medições de temperatura registradas pelos termopares na face externa da amostra PVC3



Fonte: Registrada pela autora

Em paralelo, foram registrados os acréscimos de temperatura das três amostras durante todo o decorrer do ensaio através da câmera termográfica empregada. *Layouts* típicos destas medições são apresentadas na Tabela 15.

Tabela 15 - Registros capturados com a câmera termográfica para as três amostras

Amostra	No início do ensaio	No final do ensaio
PVC1		
	Aos 15 min	Aos 20 min
PVC2		
	Aos 20 min	Aos 80 min
PVC3	-	
		Aos 60 min

Fonte: Elaborada pela autora

4.3 ASPECTOS FINAIS

Ao terminar o teste, cada amostra foi deixada intacta até que se esfriasse por si mesma, desacoplando-a do forno vertical para inspecionar suas características finais na área localizada dentro do forno.

Tanto na PVC1 quanto na PVC2, sinais de fusão, bem como o deslocamento do concreto, foram detectados nas faces dos perfis de PVC, diretamente expostas

às altas temperaturas. Um efeito diferente foi observado nas faces não expostas a altas temperaturas: um número não quantificado de bolhas e deformações não medidas nos perfis de PVC se formaram, como é mostrado na Figura 30.

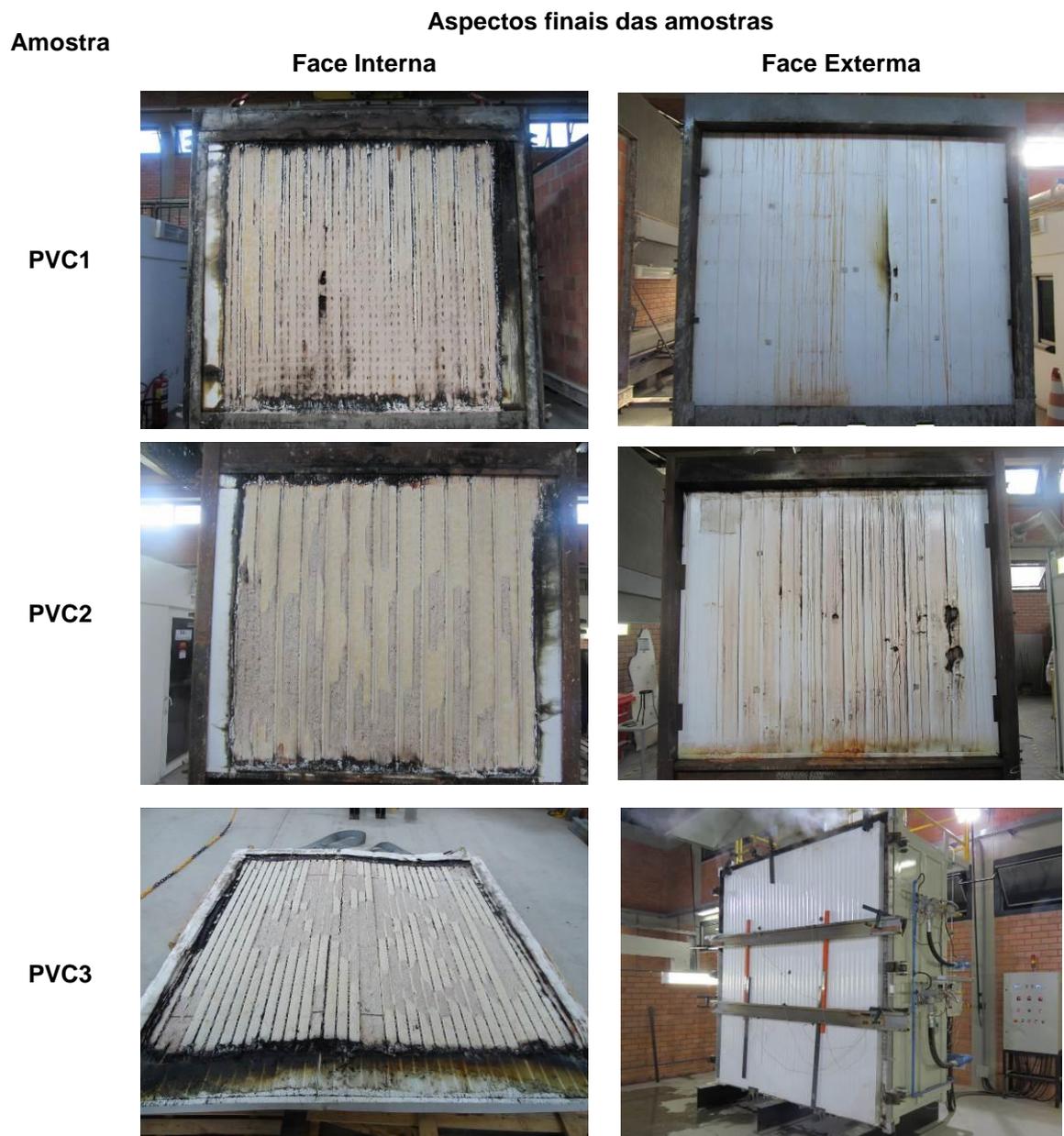
Figura 30 - Aspecto típico de fusão e deformações dos perfis de PVC testados



Fonte: Registrada pela autora

Na amostra PVC3, algumas alterações foram detectadas na face interna do painel de PVC e nas suas juntas. As Figuras 31 e 32 ilustram como cada amostra analisada terminou.

Figura 31 - Aspectos finais das amostras testadas



Fonte: Registrada pela autora

Figura 32 - Detalhes do aspecto final das superfícies dos concretos após o ensaio



Fonte: Registrada pela autora

Resumindo todo o descrito acima e de acordo com as disposições da norma NBR 10636 (ABNT, 1989), os resultados de ensaio das três amostras são apresentados na Tabela 16.

Tabela 16 - Classificação de resistência ao fogo das amostras ensaiadas

Amostra	Categoria e grau de resistência ao fogo
PVC1	CF 15
PVC2	CF 60
PVC3	CF 60

Fonte: Elaborada pela autora

4.4 DISCUSSÕES

Devido à limitada literatura e poucos dados experimentais sobre este tipo de confinamento de concreto, a presente pesquisa analisou e avaliou o desempenho de resistência ao fogo de três tipos de painéis de concreto com forma permanente de PVC (estrutural e não estrutural) e comparou seus resultados entre si.

Considerando que todos os sistemas preservaram perfis de PVC com propriedades muito semelhantes, é evidente que o fator de resistência à compressão do concreto influenciou significativamente no parâmetro de integridade das amostras. Evidenciou-se que à medida que o valor do fator de resistência à

compressão aumentou, a integridade da estrutura foi melhorada, evitando a passagem de chamas para o ambiente externo. Por consequência, o tempo de aparência de crepitações e o tempo total de resistência ao fogo das amostras foram aumentados. Deve-se destacar que esses resultados podem ser influenciados por fatores determinantes nos traços dos concretos que são utilizados como a relação água/cimento (a/c), a faixa de tamanho de partículas de agregado graúdo, o conteúdo e os tipos de ligantes e aditivos minerais. Além disso, a condição de carga também foi um fator determinante para o desempenho de resistência ao fogo dos painéis aqui analisados. O sistema que não foi carregado (PVC3) desenvolveu um comportamento melhor do que os dois carregados (PVC1 e PVC2), em seus tempos totais de teste e sua estabilidade estrutural, tal como se esperava. O primeiro permaneceu estável durante todo o teste (apesar de alguma flambagem do painel) ao contrário dos outros dois.

Outro evento muito interessante a ser destacado é que a formação de bolhas na superfície não exposta ao fogo dos perfis de PVC das amostras ocorreu no período de 15 min a 18 min, em que a faixa de temperatura foi de 20 °C - 30 °C. Percebeu-se também que o revestimento de PVC não teve efeito nos deslocamentos laterais dos painéis sofridos durante os ensaios, e que para a amostra sem carga, após 60 min de exposição ao fogo, a superfície externa manifestou uma temperatura média de aproximadamente 80 °C, enquanto que o painel convencional de concreto armado normalmente reporta uma temperatura média de aproximadamente 90 °C (BOLINA et al., 2015).

Por outro lado, comparando o PVC com a madeira, como materiais que podem ser utilizados para cofragem na construção de paredes, constatou-se que a temperatura necessária para inflamar o PVC foi de 150 °C, maior que a da madeira por exemplo, pois são necessárias temperaturas entre 300 e 400 °C para causar a ignição do PVC, com um índice de oxigênio de 50 %, enquanto a madeira tem uma temperatura de ignição de 260 °C e precisa apenas de um índice de suprimento de oxigênio do 21 %.

Paralelamente, uma vez extinta a chama, o PVC se auto extingue e, além disso, não se inflama espontaneamente. A liberação de calor do PVC é bastante inferior à de outros materiais, incluindo a madeira, e se sabe que a extensão em que o calor é liberado é determinante para a intensidade de um incêndio e sua velocidade de propagação.

Portanto, o uso de PVC (com coeficiente de condutividade térmica ligeiramente menor que o da madeira: $0,17 \text{ W/m}^2 \text{ }^\circ\text{C}$, comparado com $0,23 \text{ W/m}^2 \text{ }^\circ\text{C}$), pode contribuir para a redução dos riscos de ocorrência de incêndio e, ao mesmo tempo, reduzir a velocidade de propagação do fogo em caso de ocorrência. Além disso, tendo em conta que a sua molécula é composta por 57 % de cloro (obtido a partir de sal comum) e contém apenas 43 % de etileno (derivado do petróleo), o PVC pode ser definido como um material ecológico, uma vez que conserva os recursos naturais utilizando apenas uma parte de hidrocarbonetos. Isso, sem mencionar que o consumo de energia no seu processo de fabricação, com relação a materiais como o aço e o alumínio, é notavelmente menor, e que é um material totalmente reciclável. Pode ser incinerado, usado em aterros sanitários ou simplesmente reutilizado para a produção de plásticos.

Apesar estudos que existem no mundo inteiro quanto à toxicidade da fumaça do PVC, pesquisas como os relatos dos incêndios da fábrica em Lengerich e no aeroporto de Düsseldorf demonstram que a quantidade de dioxinas formadas a partir da combustão de PVC não é significativa para causar envenenamento às pessoas (OBLOJ-MUZAJ, 2001).

Embora seja fato que o monóxido de carbono (CO) e o ácido clorídrico (HCl) são os dois principais gases produzidos no processo de combustão do PVC, a concentração de HCl não é constante durante um incêndio, mas diminui no decorrer da combustão, especialmente na presença de materiais de construção típicos, como gesso e cimento (como é neste caso) e na presença de umidade (OBLOJ-MUZAJ, 2001).

Finalmente e com base nos resultados desta investigação experimental, pode-se inferir que o desempenho de isolamento térmico dos painéis de concreto revestidos com PVC foi ligeiramente melhor que o dos painéis de concreto armado com formas removíveis tradicionais, conforme o relatado na literatura (GIL et al., 2017). Além disso, pode-se dizer que a resistência do concreto afeta significativamente a estabilidade estrutural dos painéis (sob carga), mesmo neste tipo de painéis quando submetidos a altas temperaturas. Pode-se atribuir os baixos TRF, a ausência de reforço e o uso de carga, ao ser comparados com os resultados obtidos pela pesquisa bibliográfica (GIL et al., 2017). Em relação aos demais parâmetros de análise, alterações significativas em comparação ao sistema convencional de formas não foram observadas.

5 CONCLUSÕES

Neste estudo, foi avaliado o desempenho de resistência ao fogo de três diferentes painéis de concreto construídos com formas permanentes de PVC com dimensões 3150 mm x 2800 mm x 80 mm, de acordo com a norma ISO 834 e comparados entre si. Dos três sistemas testados, dois possuíam capacidade de carga e um não, e as seguintes conclusões podem ser destacadas:

- O painel PVC1 alcançou um TRF de 26 min, atingindo um deslocamento lateral máximo de 32 mm e desenvolvendo uma fissura explosiva no concreto, o que levou à perda de integridade do sistema, de modo que não foi possível realizar nenhum teste de integridade.
- O painel PVC2 alcançou um TRF de 64 min, atingindo um deslocamento lateral máximo de 55 mm, perdendo estabilidade durante o ensaio. Apesar disso, seis testes de integridade Ihe foram realizados, confirmando resultados positivos.
- O painel PVC3 alcançou um TRF de 60 min e atingiu um deslocamento lateral máximo de 31,8 mm. A amostra manteve as suas características de integridade nos primeiros 30 min do ensaio, mas depois apareceu fumaça na superfície externa da parede devido ao desenvolvimento de fissuras, suficientes para permitir a passagem de gases.

Diante dos resultados deste estudo prático, pode-se confirmar o bom desempenho de isolamento térmico dos painéis de concreto revestidos com PVC se comparado aos painéis de concreto armado com formas removíveis, salientando que a resistência do concreto tem efeito na estrutura dos painéis, mesmo quando expostos a elevadas temperaturas.

Por outro lado, presume-se que os atributos da forma permanente (ou SIP) de PVC podem contribuir significativamente para a conservação dos ecossistemas. A alternativa de utilizar PVC para a cofragem de painéis, em vez de madeira por exemplo, deve-se à importância de criar consciência da necessidade de conservar os recursos florestais e promover o seu uso racional, sendo este um material ecológico ou amigável com o meio ambiente.

Essa combinação de qualidades resulta na inclusão do PVC dentro do grupo de materiais orgânicos de melhor classificação técnica, sendo um material resistente, antibacteriano, moldável, higiênico e reciclável, ideal para a prevenção de incêndios, mas principalmente para transformar casas em habitações saudáveis e sustentáveis.

6 SUGESTÃO DE TRABALHOS FUTUROS

Recomenda-se analisar mais profundamente estes tipos de painéis de concreto com formas permanentes de PVC para uma melhor compreensão do seu comportamento quando submetidos a condições de incêndio, principalmente considerando a possível liberação de gases tóxicos, aspectos químicos e mineralógicos e fatores de risco ocupacionais, que continuam sendo preocupações ainda hoje e sem precedentes.

Vale a pena salientar que a equipe envolvida neste trabalho já está investigando mais sobre esse tipo de aspectos neste sistema e os resultados serão publicados assim que estiverem prontos.

Além disso, de forma a comparar estes resultados experimentais, uma análise numérico-teórico é sugerida.

REFERÊNCIAS

ABDULJABAR ABDULLA N.; Concrete filled PVC tube: A review. **Construction and Building Materials**, Vol. 156, pp. 321–329, 2017. Doi: 10.1016/j.conbuildmat.2017.08.156.

AHN Y.B., JANG J.G., LEE H.K. **Mechanical properties of lightweight concrete made with coal ashes after exposure to elevated temperatures**. *Cem. Concr. Compos.* 72, 27–38, 2016.

ALI, F, et al. Outcomes of a major research on fire resistance of concrete columns. **Fire Safety Journal**, v. 39, n. 6, p. 433-445, 2004.

AL-MALAIKA S., GOLOVOY A., WILKIE CA.; Chemistry and technology of polymer additives. **Blackwell Science**, 1999.

AMERICAN CONCRETE INSTITUTE (ACI). ACI 216 R: **Guide for determining the fire endurance of concrete elements Concrete Internacional**. Farmington Hills, 1989.

AMERICAN CONCRETE INSTITUTE (ACI); **Building code requirements for structural concrete (318-04) and commentary (318R-04)**, 2004.

AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS (ASTM). **ASTM E 119: Standard Test Methods for Fire Tests of Building Construction and Materials**. West Conshohocken, 2014.

ANDRADE, R. O. Alarming surge in Amazon fires prompts global outcry. **Nature**. 2019. Doi: 10.1038/d41586-019-02537-0

ARIOZ OMER. **Effects of elevated temperatures on properties of concrete**. *Fire Saf. J.* 42 (8), 516–522, 2007.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS (ABNT). **NBR 10636: Paredes divisórias sem função estrutural - Determinação da resistência ao fogo**. Rio de Janeiro, 1989.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS (ABNT). **NBR 13860: Glossário de Termos Relacionados Com a Segurança Contra Incêndio.** Rio de Janeiro, 1997.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS (ABNT). **NBR 14432: Exigências de resistência ao fogo de elementos constructivos de edificações – Procedimento.** Rio de Janeiro, 2001.

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

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS (ABNT). **NBR 15575: Edificacoes Habitacionais – Desempenho.** Rio de Janeiro, 2013.

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

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS (ABNT); **Paredes Divisórias sem Função Estrutural—Determinação da Resistência ao Fogo: Método de Ensaio (NBR 10636),** pp. 7, 1989.

AWHAM M., SALIH ZGM; A study of some mechanical behavior on a thermoplastic material. **Journal of Al-Nahrain University**, Vol.14 (3), pp.58-65, 2011.

BARADARAN-NASIRI A., NEMATZADEH M. **The effect of elevated temperatures on the mechanical properties of concrete with fine recycled refractory brick aggregate and aluminate cement.** *Construction and Building Materials* 147, 865–875, 2017.

BAZZE. **Sistema Construtivo Concreto-PVC.** Disponível em: <http://www.bazze.com.br/produtos/sistema-construtivo-concreto-pvc/>. Acesso em: 20 agosto 2019.

BOLINA F. **Avaliação experimental da influência dos requisitos de durabilidade na segurança contra incêndio de protótipos de pilares pré-fabricados de concreto armado**, Brasil, 2016.

BOLINA F., PRAGER G., RODRIGUES E., TUTIKIAN B. Avaliação da resistência ao fogo de paredes maciças de concreto armado. **Ambiente Construído**, Vol. 15, n. 4, pp. 291-305, <http://dx.doi.org/10.1590/s1678-86212015000400051>, 2015.

BRASKEM. **PVC na Construção e Arquitetura**. Disponível em: <http://www.braskem.com.br/site/portal_braskem/pt/produtos_e_servicos/boletins/pdf_catalogos/PVC.pdf>. Acesso em: 29 junho 2014.

BRITEZ, C. A. **Avaliação de pilares de concreto armado colorido de alta resistência, submetidos a elevadas temperaturas**. Tese de Doutorado. Escola Politécnica: Universidade de São Paulo, 2011.

BRITISH STANDARD INSTITUTION (BSI). BS 8110-2: **Structural use of concrete- Code of practice for special circumstances**. London, 1985.

BRITISH STANDARDS INSTITUTION (BSI). **BS 8110-2: Structural use of concrete – Code of practice for special circumstances**. London, 1985.

CAMPOS, J. S. **Análise de métodos construtivos inovadores na construção de habitações de interesse social em São José dos Campos**. Monografia (Graduação) - Curso de Engenharia Civil-aeronáutica, Instituto Tecnológico de Aeronáutica, São José dos Campos, 2013.

Canadian Standards Association (CSA); **Design of concrete structures**. CSA A23.3, 1994.

CASONATO C. **Ação de elevadas temperaturas em modelos de paredes de concreto e de alvenaria sob cargas de serviço**. Dissertação de M.Sc., PPGEE/UFRGS, Brasil, 2007.

CEMENT SUSTAINABILITY INITIATIVE (CSI); **Recycling Concrete**, pp. 3, 2009.

CHAHROUR A., SOUDKI K., STRAUBE J.; RBS Polymer encased concrete wall. Part I: experimental study and theoretical provisions for flexure and shear.

Construction and Building Materials, Vol. 19, No. 5, pp. 550–563. Doi: 10.1016/j.conbuildmat.2004.12.003, 2005.

CICHINELLI, GISELE. **Sistema construtivo para casas e sobrados usa painéis de PVC preenchidos com concreto**. Revista TÉCNICE, n. 199, out. 2013. Disponível em: <<http://techne.pini.com.br/engenharia-civil/199/artigo299968-1.aspx>>. Acesso em: 29 jun. 2014.

COSTA, C. N. **Dimensionamento de vigas de concreto armado em situação de incêndio**. Tese (doutorado em Engenharia Civil). Escola Politécnica, Universidade de São Paulo: São Paulo, 2008.

DE SOUSA DOUGLAS ALVES, PEREIRA SILVA GUILHERME. **Estruturas de concreto em situação de incêndio**, Brasil, 2015.

DENOEL. J.-F. **Sécurité incendie et constructions em béton**. Bruxelas: Fédération de l'industrie cimentière belge, 2007.

DER HEIJDEN, G. H. A VAN; PEL, L.; ADAN, O. C. G. Fire spallinf of concrete, as studied by NMR. **Cement and Concrete Research**. V. 42, n. 2, p. 265-271, 2012.

DOMARASCKI, C. S.; FAGIANI, L. S. **Estudo Comparativo dos Sistemas Construtivos: Steel Frame, Concreto PVC e Sistema Convencional**. Monografia (Graduação em Engenharia Civil). – Curso de Engenharia Civil, Centro Universitário da Fundação Educacional de Barretos, Barretos, 2009.

EN 1991-1-2; Eurocode 1: Actions on structures - Part 1-2: General actions - **Actions on structures exposed to fire**, 2002.

ERAMMA H., MADHUKAR N.J.; Experimental investigation on PVC encased columns. **IJRET: International Journal of Research in Engineering and Technology**, Vol. 04 Issue: 09, pp. 39-44, 2015.

EUROPEAN COMMITTEE FOR STANDARDIZATION. **EN 1992-1-2: Eurocode 2: design of concrete structures – part 1.2: general rules – structural fire design**. Brussels: CEN, 2004.

FAKHARIFAR M., CHEN G., AREZOUMANDI M., ELGAWADY M.; Hybrid jacketing for rapid repair of seismically damaged reinforced concrete columns. **Transportation research record (TRR)**, pp. 2522:70–8. <http://dx.doi.org/10.3141/2522-07>, 2015.

FARIA, R. Industrialização econômica. **Revista TÉCNICA**, n. 136, jul. 2008. Disponível em: <[http:// www.revistatechne.com.br/engenharia-civil/136/ artigo95948-2.asp](http://www.revistatechne.com.br/engenharia-civil/136/artigo95948-2.asp)>. Acesso em: 29 jun. 2014.

FÉDÉRATION INTERNATIONALE DU BÉTON (FIB). **FIB Bulletin n° 38: Fire design of concrete structures – materials, structures and modelling. State-of-art report**, Lausanne, 2007.

FÉDÉRATION INTERNATIONALE DU BÉTON (FIB). **FIB Bulletin n° 46: Fire design of concrete structures – structural behavior and assessment**. Lausanne CEB – FIP, 2007.

FÉDÉRATION INTERNATIONALE DU BÉTON (FIB). **FIB Bulletin n° 46: Fire design of concrete structures- structural behavior and assesment**. Lausanne CEB-FIB, 2008.

FÉDÉRATION INTERNATIONALE DU BÉTON (FIB). **FIB Bulletin n° 48: Fire design of concrete structures – materials, structures and modelling**. Lausanne CEB – FIP, 2007.

FERNANDES BRUNO. **Estudo da microestrutura de concretos de pilares submetidos a altas temperaturas**. Brasil, 2015.

FERNANDES, M. C. V. **Verificação de Resistencia ao fogo de estruturas de betão com base nos métodos simplificados do EC2 – Parte 1-2**. Dissertação de Mestrado. Faculdade de Engenharia, Universidade de Porto, 2008.

FU, Y.; LI, L. Study on machanism of termal spalling in concrete exposed to elevated temperatures. **Materials and Structures**, v. 44, n. 1, p. 361-376, 2011.

GAO, W. Y. et al. Finite element modeling of reinforced concrete beams exposed to fire, **Engineering Structures**, v. 52, p.488-501, 2013.

GAWIN, D.; PESAVENTO, F.; SCHREFLER, B. A. Towards prediction of the thermal spalling risk through a multi-phase porous media model of concrete. **Computer Methods in Applied Mechanics and Engineering**, v. 195, n. 41-43, p. 5707-5729, 2006.

GEFU JI, GUOQIANG LI, XIUGANG LI, SU-SENG PANG, RANDY JONES; Experimental study of FRP tube encased concrete cylinders exposed to fire. **Composite Structures** 85, 149–154, 2008.

GEORGALI, B.; TSAKIRIDIS, P. E. Microstructure of fire-damaged concrete. A case study. **Cement and Concrete Composites**, v.27, n.2, p. 255-259, 2005.

GIL A., PACHECO F., CHRIST R., BOLINA F., KHAYAT K., TUTIKIAN B.; Comparative Study of Concrete Panels' Fire Resistance. **ACI Materials Journal**, V. 114, No. 5, 755 – 762. **Doi: 10.14359/51689715**, 2017.

GONG J., DENG G., SHAN B. **Performance evaluation of RPC exposed to high temperature combining ultrasonic test: A case study**. *Construction and Building Materials*, p.194-202, 2017.

GUPTA P.; Confinement of concrete columns with unplasticized poly-vinyl chloride tubes. **International Journal of Advanced Structural Engineering**, Vol. 5, pp. 1-19. <http://dx.doi.org/10.1186/2008-6695-5-19>, 2013.

HAVEZ A., WAHAB N., AL-MAYAH A., SOUDKI K.; Behaviour of PVC encased reinforced concrete walls under eccentric axial loading. **Structures** 5, pp. 67–75. doi: 10.1016/j.istruc.2015.09.003, 2016.

HUANG, Z. The behavior of reinforced concrete slabs in fire. **Fire Safety Journal**, v. 45, p. 271-282, 2010.

ICHIKAWA , Y.; ENGLAND, G. L. Prediction of moisture migration and pore pressure build-up in concrete at high temperatures, **Nuclear Engineering and Design**, v, 228, n. 1-3, p. 245-259, 2004.

INSTITUTO TECNOLÓGICO EM DESEMPENHO E CONSTRUÇÃO CIVIL (ITT PERFORMANCE). **Itt Performance**. Disponível em: <http://unisinus.br/itt/ittperformance>. Acesso em 09 julho 2019.

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

INTERNATIONAL ORGANIZATION FOR STANDARDIZATION (ISO); Fire-Resistance Tests—**Elements of Building Construction**—Part 1: General Requirements (ISO 834-1), pp. 53, 1991.

JANSSON, R.; **Fire Spalling of Concrete: Theoretical and Experimental Studies, doctoral thesis**, Vetenskap Och Konst, Stockholm, Sweden, pp. 3, 2013.

JAPANESE STANDARD ASSOCIATION (JIS). JIS A 1304: **Method of fire resistance test for structural parts of buildings**. Tóquio, 1994

KALIFA PIERRE, MENNETEAU FRANÇOIS-DOMINIQUE. QUENARD DANIEL. **Spalling and Pore Pressure in HPC at High Temperatures**. Cement and Concrete Research, 30, 1915-1927, 2000. Doi: 10.1016/S0008-8846(00)00384-7.

KHOURY, G. A. Effect of fire on concrete and concrete structures. In: **Progress in Structural Engineering and materials**. Vol. 2 ed.[s.l.] John wiley & Sons, 429-447, 2001.

KIRCHHOF, L. D. **Estudo teórico- experimental da influência do teor de umidade no fenômeno de spalling explosivo em concretos expostos a elevadas temperaturas. Tese de doutorado**. Escola de Engenharia: UFRGS, 2010.

KLINGSCH, E. W. H. **Explosive spalling of concrete in fire**. Tese de doutorado, Eth Zurich, 2014.

KODUR, V. K. R.; DWAIKAT, M. M. S. A simplified approach for prediccting temperature in reinforced concretye members exposed to standard fire. **Fire Safety Journal**, v. 56, p. 39-51, 2013.

KODUR, V. K. R.; DWAIKAT, M. M. S. Effect of high temperature creep on the fire response of restrained steel beams. **Materials and Structures**, V.43, n. 10, p. 1327-1341, 2010.

KODUR, V. K. R.; YU, B.; DWAIKAT, M. M. S. A simplified approach for predicting temperature in reinforced concrete members exposed to standard fire. **Fire Safety Journal**, v. 56, p. 39-51, 2013.

KUMAR, V. et. al. Effect of temperature on mechanical properties of pre-damaged steel reinforcing bars. **Construction and Building Materials**, v. 46, p. 19-27, 2013.

LIMA, R. C. A. DE. **Investigação do comportamento de concretos em temperaturas elevadas**. Tese de doutorado. Escola de Engenharia, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2005.

MEHTA, P. K.; MONTEIRO, P.J. M. **Concreto: microestrutura, propriedades e materiais**. 4ª. Ed. São Paulo: 2014, 2014.

MITIDIERI, M, L, O comportamento dos materiais e componentes constructivos diante do fogo – reação ao fogo. In: SEITO, A. I. et al. (Eds.). **A segurança contra incêndio no Brasil**. 1a. ed. São Paulo: Projecto Editora, 2008.

MORITA, T. et. al. An experimental Study On Spalling OF High Strength concrete Elements Under Fire Attack, **Fire Safety Science**, v. 6, p. 855-866, 2000.

NEW ZALAND STANDARD (NZS). **NZS 3102: Concrete Structures Standard, Part 1- The design of concrete structures**. Wellington: Standard New Zeland, 1995.

OBLOJ-MUZAJ M. Fire performance of PVC. **International Polymer Science and Technology**, Vol. 28, No. 3, pp. 98, 2001.

OLIVEIRA, L. A.; FONTENELLE, J. H.; MITIDIERI FILHO, C. V. Durabilidade de fchadas: método de ensaio para verificação da resistência à ação de calor e choque térmico. **Ambiente Construído**. V. 14, n. 4, p. 53-67, 2014.

PAN, Z.; SANJAYAN. J. G.; KONG, D. L. Y. Effect of aggregate size on spalling of geopolymer and Portland cement concretes subjected to elevated temperatures. **Construction and Building Materials**, v. 36, p. 365-372, 2012.

PANNONI, F. D. Princípios de proteção de estruturas metálicas em situação de corrosão e incêndio, **Perfis Gerdau Açominas**, p. 100, 2015.

PURKISS, J. A.; LI, L. Y. **Fire safety engineering design of structures**. 3a . ed. Boca Raton: CRC Press, 2010.

QUIANG, X.; BIJLAARD, F. S. K.; KOLSTEIN, H. Elevated-temperature mechanical properties of high strength structural steel S460N: Experimental study and recommendations for fire-resistance design. **Fire Safety Journal**, v. 55, p. 15-21, 2013.

ROBERT, F.; COLINA, H.; DEBUCKI, G. A durabilidade do concreto mediante ao fogo, In: OLLIVIER, J-P; VICHOT, A, (Eds.), **Durabilidade do concreto**, 1a, ed, São Paulo: IBRACON, 2014, P. 509-558.

ROCHA P.A.S., DA SILVA K.I. **Estudo do desempenho de vigas em situação de incêndio a partir do modelo de fibras**. Revista Internacional de Métodos Numéricos para Cálculo y Diseño en Ingeniería, 65–71, 2017.

RODRIGUES, J. P. C.; SANTOS, C. C.; PIRES, T. A. C. **Fire resistance tests on concrete columns**. 15° International Conference on Experimental Mechanics. **Anais...** Porto: 2012.

ROUSAKIS T., KOURAVELOU K., KARACHALIOS T.; Effects of carbon nanotube enrichment of epoxy resins on hybrid FRP–FR confinement of concrete. **Compos Part B Eng**, Vol. 57, pp. 210–218. <http://dx.doi.org/10.1016/j.compositesb.2013.09.044>, 2014.

ROUSAKIS T., TOURTOURAS I.; RC columns of square section–passive and active confinement with composite ropes. **Compos Part B Eng**, Vol. 58, pp. 573–581. <http://dx.doi.org/10.1016/j.compositesb.2013.11.011>, 2014.

RUMPEL C. Soils linked to climate change. **Nature**, 572, 442-443, 2019.

SABBATINI, F. H.; AGOPYAN, V. **Desenvolvimento de métodos, processos e sistemas construtivos**. Boletim Técnico PCC n. 32, São Paulo: EPUSP, 1991.

SAMARAKKODY, D.I., THAMBIRATNAM, D.P., CHAN, T.H.T., MORAGASPITIYA, P.H.N. **Differential axial shortening and its effects in high rise buildings with composite concrete filled tube columns**. *Construction and Building Materials*, 143, 659-672, 2017.

SCHMIDT, L. V. **Paredes estruturais constituídas de painéis de pvc preenchidos com concreto: análise das potencialidades do sistema**. Trabalho de conclusão de curso (Engenharia Civil) - Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2013.

SCOTT B., WAHAB N.; AL-MAYAH A.; SOUDKI K.; Effect of stay-in-place PVC formwork panel geometry on flexural behavior of reinforced concrete walls. **Structures** 5, pp. 123-130, 2016.

STANDARDS ASSOCIATION OF AUSTRALIA (AS). **AS 3600: Concrete Structures**. Canberra, 2009.

TITOW WV. PVC technology. **Springer**, 1994.

TOPICAL FIRE REPORT SERIES; Fire Death Rate Trends: **An International Perspective**; Vol. 12, Issue 8, 2011.

TRIDATA CORPORATION; Global Concepts in Residential Fire Safety: Part 3 - Canada, Puerto Rico, Mexico, and Dominican Republic; **Centers for Disease Control and Prevention**, 2009.

WAHAB N., SOUDKI K.; Flexural behavior of PVC stay-in-place formed RC walls. **Construction and Building Materials**, Vol. 48, pp. 830–839. Doi: 10.1016/j.conbuildmat.2013.07.073, 2013.

WANG J., YANG Q.; Experimental study on mechanical properties of concrete confined with plastic pipe. **ACI Materials Journal**, Vol. 107, Issue 2, pp. 132-137; 2010.

WANG, Y. et al. **Performance based fire engineering of structures**. New York: CRC Press, 2013.

WATTICK J., CHEN A.; Development of a prototype fiber Reinforced Polymer – Concrete Filled wall panel. **Engineering Structures** 147, pp. 297–308, 2017.

WORLD FIRE STATISTIC CENTRE (WFSC), International Association for the study of Insurance Economics World fire statistics. **Information Bulletin of the World Fire Statistic Centre**, pp. 3, 2010.

WORLD FIRE STATISTIC CENTRE (WFSC), International Association of Fire and Rescue Services; World Fire Statistics, Center of Fire Statistics, **CTIF, No. 20, pp. 63**, 2015.

YAN Z, PANTELIDES C., REAVELEY L.; Posttensioned FRP composite shells for concrete confinement. **Composite Structures**, Vol. 11, pp. 81–90. [http://dx.doi.org/10.1061/\(ASCE\)1090-0268\(2007\)11:1\(81\)](http://dx.doi.org/10.1061/(ASCE)1090-0268(2007)11:1(81)), 2007.

YANG, H.; LIU, F.; GARDNER, L. Performance of concrete- filled RHS columns exposed to fire on 3 sides. **Engineering Structures**, v. 56, p. 1986-2004, 2013.

ZEIML, M.; LACKNER, R.; MANG, H. A. Experimental insight into spalling behavior of concrete tunnel linings under fire loading. **Acta Geotechnica**. V. 3, n. 4, p. 295-308, 2008.

APÊNDICE A – REGISTRO FOTOGRÁFICO DA AMOSTRA PVC1

Figura 33 - Perspectiva frontal do painel



Figura 34 - Ilustração da localização dos termopares externos na amostra



Figura 35 - Aspecto final do concreto após o ensaio



Figura 36 - Aparência de fissura no centro da amostra



Figura 37 - Aspecto da face exposta às elevadas temperaturas (A) antes, e (B) após o ensaio



(A)



(B)

APÊNDICE B – REGISTRO FOTOGRÁFICO DA AMOSTRA PVC2

Figura 38 - Perspectiva final do sistema após o ensaio



Figura 39 - Fissura deflagrada no centro da amostra



Figura 40 - Aspecto final da superfície da amostra exposta às elevadas temperaturas



APÊNDICE C – REGISTRO FOTOGRÁFICO DA AMOSTRA PVC3

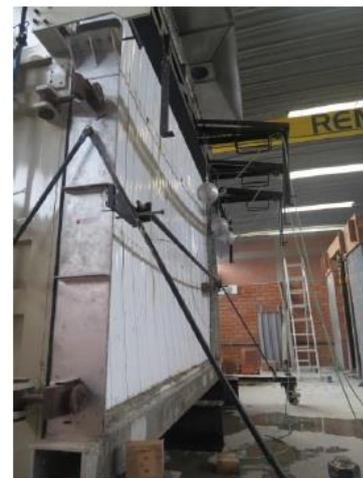
Figura 41 - Ilustração do teste de choque mecânico realizado à amostra



Figura 42 - Perfil de PVC superaquecido, visão frontal (A), visão lateral (B)



(A)



(B)

Figura 43 - Aspecto final da face exposta ao fogo da amostra



Detalhe ampliado

APÊNDICE D - REGISTRO FOTOGRÁFICO DA FABRICAÇÃO DOS SISTEMAS

Figura 44 - Perfis de PVC



Figura 45 - Processo de concretagem dos painéis

