

UNIVERSIDADE DE SÃO PAULO  
ESCOLA POLITÉCNICA

MARCOS VINICIUS MARTINEZ SYLVERIO

**Método de avaliação do risco de lascamento em concreto projetado para  
revestimento de túneis**

São Paulo  
2022

MARCOS VINICIUS MARTINEZ SYLVERIO

**Método de avaliação do risco de lascamento em concreto projetado para  
revestimento de túneis**

**Versão Corrigida**

Dissertação apresentada à Escola  
Politécnica da Universidade de São Paulo  
para obtenção do título de Mestre em  
Ciências

Área de concentração: Engenharia de  
Construção Civil e Urbana

Orientador: Prof. Dr. Antonio Domingues  
de Figueiredo

São Paulo  
2022

Autorizo a reprodução e divulgação total ou parcial deste trabalho, por qualquer meio convencional ou eletrônico, para fins de estudo e pesquisa, desde que citada a fonte.

Este exemplar foi revisado e corrigido em relação à versão original, sob responsabilidade única do autor e com a anuência de seu orientador.

São Paulo, \_\_\_\_\_ de \_\_\_\_\_ de \_\_\_\_\_

Assinatura do autor: \_\_\_\_\_

Assinatura do orientador: \_\_\_\_\_

#### Catálogo-na-publicação

Sylverio, Marcos Vinicius Martinez

Método de avaliação do risco de lascamento em concreto projetado para revestimento de túneis / M. V. M. Sylverio -- versão corr. -- São Paulo, 2022.

101 p.

Dissertação (Mestrado) - Escola Politécnica da Universidade de São Paulo. Departamento de Engenharia de Construção Civil.

1.Concreto projetado 2.Método de ensaio 3.Revestimento de túnel  
4.Incêndio 5.Lascamento I.Universidade de São Paulo. Escola Politécnica.  
Departamento de Engenharia de Construção Civil II.t.

SYLVERIO, M. V. M. **Método de avaliação do risco de lascamento em concreto projetado para revestimento de túneis**. 2022. 101 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) – Escola Politécnica, Universidade de São Paulo, São Paulo, 2022.

Aprovado em: 17/10/2022

Banca Examinadora

Prof. Dr. Antonio Domingues de Figueiredo  
Instituição: Universidade de São Paulo - USP  
Julgamento: Aprovado

Prof. Dr. Tarcísio Barreto Celestino  
Instituição: Universidade de São Paulo - USP  
Julgamento: Aprovado

Prof. Dr. Armando Lopes Moreno Junior  
Instituição: Universidade Estadual de Campinas - UNICAMP  
Julgamento: Aprovado

## DEDICATÓRIA

A Deus e à minha mãe

## **AGRADECIMENTOS**

Primeiramente a Deus pela vida, saúde, oportunidades, auxílio e guia em tudo.

À minha mãe que me instruiu e me apoiou em tudo que era bom em toda a minha vida, me conduzindo no caminho certo.

Ao Prof. Antonio por mais essa oportunidade de pesquisa, provendo orientações, discussões e ideias imprescindíveis não só para este trabalho, mas que também levarei para toda a minha carreira de pesquisador. Seu companheirismo, apoio, paciência e descontração em muitos momentos foram vitais durante esse processo.

Ao Berto por ter me acolhido ainda como estagiário e desde então, já mais de 5 anos, ter me orientado nessa área tão importante que é a segurança contra incêndio, sempre me dando novas oportunidades. Em todo esse tempo foi também um amigo no qual o apoio e a compreensão nunca faltaram.

A todos os pesquisadores e técnicos do Laboratório de Segurança ao Fogo e a Explosões - LSFEx que trabalham dia a dia em prol da segurança contra incêndio, sempre ajudando e compartilhando suas experiências. Em especial, ao Carlos, Írio, André, Mosart e Rodrigo que participaram ativamente, com muito empenho, nos ensaios deste trabalho e de outros de túneis.

Ao Instituto de Pesquisas Tecnológicas - IPT e à Fundação de Apoio ao IPT – FIPT pela minha ocupação profissional e por apoiar o desenvolvimento profissional dos seus pesquisadores.

Ao Fiber e Fire Team que em diversas aulas e reuniões compartilharam conhecimentos que contribuíram para o meu crescimento como pesquisador. Em especial, ao Ramoel pelas contribuições e auxílio neste e outros trabalhos e na pesquisa de forma geral.

À Álya Construtora e ao Pedro Paulo por terem recebido o Fire Team nas obras da Tamoios e terem se aberto a essa parceria que possibilitou a realização deste trabalho. Também ao Gustavo por ter me ajudado diversas vezes com o fornecimento de dados de caracterização do concreto.

Aos professores da Banca Examinadora pela avaliação e valiosos apontamentos que contribuíram para este trabalho.

## EPÍGRAFE

*“Que livro grande, capitão, poderia ser escrito com tudo o que se sabe!  
E que livro muito maior ainda poderia ser escrito com tudo o que não se sabe!”*

(tradução livre)

Júlio Verne, *The mysterious island* (1876)

## RESUMO

As consequências de um incêndio para um túnel podem ser muito graves para a segurança dos usuários e mesmo para a estabilidade da estrutura. As altas temperaturas originadas nesse evento podem resultar no lascamento do concreto, fenômeno crítico para a estrutura dos túneis. O lascamento depende de uma série de fatores e, por isso, é de difícil previsão. Uma das formas de se mitigar os riscos desse fenômeno passa pela determinação do teor mínimo de microfibras poliméricas a serem adicionadas ao concreto. Nesse contexto, esta dissertação tem por objetivo analisar a aplicabilidade de uma metodologia de ensaio para verificação da susceptibilidade do concreto projetado destinado a revestimentos de túneis ao lascamento e para a otimização do teor de microfibras necessário para o controle desse comportamento. Ensaio de exposição ao fogo foram realizados em placas de concreto projetado considerando diferentes teores de microfibras de polipropileno e distintos níveis de saturação do material. A distribuição de temperaturas no interior das placas foi monitorada durante os ensaios e a ocorrência de lascamento foi avaliada por meio de novos parâmetros de caracterização. Os resultados demonstram que a condição de saturação intensificou a ocorrência de lascamento, o que significa que a realização de ensaios nesta condição pode ser considerada como a favor da segurança por tratar-se de um cenário crítico para o fenômeno avaliado. Como esperado, os danos por lascamento e, conseqüentemente, o aumento de temperaturas nas camadas mais interiores do material foram tanto mais severos quanto menor eram os teores de microfibras de polipropileno, sendo possível identificar o teor de fibras que minimizou a ocorrência dos lascamentos. A partir destes resultados, este trabalho recomenda a caracterização do lascamento por meio da espessura lascada e da distribuição interna de temperaturas nos corpos de prova, propõe um critério não subjetivo para constatação do lascamento explosivo e recomenda uma configuração simplificada do procedimento metodológico com o objetivo de padronizar a avaliação do lascamento em revestimentos de túneis executados em concreto projetado. De forma complementar, os resultados permitiram demonstrar que o concreto projetado é menos condutivo que o concreto convencional, o que deve ser considerado em diretrizes normativas.

Palavras-chave: Concreto projetado. Método de ensaio. Revestimento de túnel. Incêndio. Lascamento. Microfibras poliméricas.

## **ABSTRACT**

The consequences of a fire for a tunnel can be very serious for the safety of users and even for the stability of the structure. The high temperatures caused by this event can result in spalling of the concrete, a critical phenomenon for the structure of tunnels. Spalling depends on a series of factors and, therefore, is difficult to predict. One of the ways to mitigate the risks of this phenomenon is to determine the minimum content of polymeric microfibers present in the concrete. In this context, this dissertation aims to analyze the applicability of a test methodology to verify the susceptibility of sprayed concrete for tunnel linings to spalling and for the optimization of the microfiber content required to control this behavior. Fire exposure tests were carried out on sprayed concrete slabs considering different polypropylene microfiber contents and different levels of water saturation in the material. The temperature distribution inside the slabs was monitored during the tests and the occurrence of spalling was evaluated with new characterization parameters. The results demonstrate that the saturated condition intensified the occurrence of spalling, which means that the performance of tests in this condition can be considered as in favor of safety because it is a critical scenario for the evaluated phenomenon. As expected, the damage by spalling and, consequently, the increase in temperature in the innermost layers of the material was more severe the lower the levels of polypropylene microfibers, making it possible to identify the fiber content that minimized the occurrence of spalling. Based on these results, this work recommends the characterization of spalling through the spalled thickness and the internal temperature distribution on the specimens, proposes a non-subjective criterion for determining explosive spalling occurrence and recommends a simplified configuration of the methodological procedure in order to standardize the evaluation of spalling in sprayed concrete tunnel linings. Complementarily, the results showed that sprayed concrete is less conductive than conventional concrete, which must be considered in normative guidelines.

Keywords: Sprayed concrete, Test method, Tunnel lining, Fire, Spalling, Explosive spalling, Polymeric microfibers.

## LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

<b>Sigla</b>	<b>Descrição</b>
ABNT	Associação Brasileira de Normas Técnicas
AFAC	<i>Australasian Fire Authorities Council</i>
CMOD	<i>Crack mouth opening displacement</i> ou abertura de fissura no entalhe central do corpo de prova
EFNARC	<i>European Federation of National Associations Representing Producers and Applicators of Specialist Building Products for Concrete</i>
ETNFIT	<i>European Thematic Network on Fire in Tunnels</i>
Curva HC	<i>Curva de incêndio Hydrocarbon Eurocode 1</i> ou de hidrocarbonetos
IPT	Instituto de Pesquisas Tecnológicas do Estado de São Paulo
LSFEx	Laboratório de Segurança ao Fogo e a Explosões
NATM	<i>New Austrian Tunnelling Method</i>
PIARC	<i>Permanent International Association of Road Congresses</i>
PP	Polipropileno

## LISTA DE SÍMBOLOS E UNIDADES

Símbolo	Descrição
$AT_5$	Aumento de temperatura nos últimos 5 min
a	Coefficiente angular da regressão
b	Coefficiente linear da regressão
$^{\circ}C$	Graus Celsius
$^{\circ}C/min$	Graus Celsius por minuto
cm	Centímetro
$cm^2$	Centímetro quadrado
$cm^3$	Centímetro cúbico
D	Diâmetro
$f(\theta)$	Resistência do concreto para uma dada temperatura
$f(20^{\circ}C)$	Resistência do concreto à $20^{\circ}C$
H	Altura
kg	Quilograma
$kg/m^3$	Quilograma por metro cúbico
km	Quilômetro
L	Largura
ln	Logaritmo natural
$m^3$	Metro cúbico
$m^3/h$	Metros cúbicos por hora
min	Minuto

<b>Símbolo</b>	<b>Descrição</b>
mm	Milímetro
MPa	Mega Pascal
MW	Megawatt
T	Temperatura
t	Tempo de ensaio
tons	Tonelada
TxN	Taxa interna de elevação de temperatura na condição não saturada
TxS	Taxa interna de elevação de temperatura na condição saturada
%	Porcentagem

## LISTA DE FIGURAS

Figura 2.1 – Formação de microfissuras no concreto de ultra-alto desempenho, pela ação das microfibras poliméricas, em diferentes temperaturas. a) 27°C; b) 105°C; c) 150°C; d) 170°C. ....	33
Figura 2.2 – Exemplo da região aquecida no corpo de prova sem proteção próxima às bordas (esq.) e com proteção próxima às bordas (dir.). ....	40
Figura 3.1 – Interior do túnel principal da duplicação da Rodovia dos Tamoios, em construção em 20/11/2019. ....	42
Figura 3.2 – Fibras utilizadas no concreto projetado – a) Macrofibras poliméricas; b) Microfibras poliméricas. ....	45
Figura 3.3 – Robô de projeção utilizado na moldagem dos corpos de prova. ....	48
Figura 3.4 – Moldagem dos corpos de prova – a) Fôrmas metálicas; b) Projeção do concreto nas fôrmas por meio do robô. ....	48
Figura 3.5 – Corpos de prova após a moldagem – a) Visão geral das placas; b) Detalhe da face rugosa de uma das placas. ....	49
Figura 3.6 – Pontos de tomada de temperatura nas placas – Vista da face não exposta ao fogo. ....	49
Figura 3.7 – Condicionamento dos corpos de prova saturados. ....	50
Figura 3.8 – Corpos de prova após inserção dos termopares – a) Todas as placas; b) Detalhe da superfície. ....	51
Figura 3.9 – Parede para a realização dos ensaios – a) Vista da face não exposta; b) Vista da face futuramente exposta ao fogo, com duas placas posicionadas. ....	51
Figura 3.10 – Corpos de prova prontos para serem submetidos ao ensaio de exposição ao fogo - a) Vista da face não exposta ao fogo; b) Vista da face exposta ao fogo. ....	52
Figura 3.11 – Forno vertical do IPT para ensaios de exposição ao fogo. ....	53
Figura 3.12 – Posicionamento aproximado das placas e dos termopares do forno ..	54
Figura 3.13 – Realização dos ensaios de exposição ao fogo – a) Visão geral; b) Detalhe de uma das placas durante ensaio; c) Interior do forno durante o ensaio. ....	55
Figura 3.14 – a) Módulos com canais para conexão dos termopares; b) Leitura das medidas dos termopares durante o ensaio. ....	56
Figura 3.15 – Conferência da área da face exposta ao fogo após a aplicação do	

comando “Scale” .....	60
Figura 3.16 – Exemplo do uso do AutoCAD® para calcular a área lascada da PN-0.6 .....	60
Figura 4.1 – Face exposta ao fogo da PN-0.6 - a) Antes do ensaio; b) Após o ensaio. ....	65
Figura 4.2 – Face exposta ao fogo da PN-0.8 - a) Antes do ensaio; b) Após o ensaio. ....	66
Figura 4.3 – Face exposta ao fogo da PN-1.2 - a) Antes do ensaio; b) Após o ensaio. ....	67
Figura 4.4 – Termopares expostos após lascamento explosivo, destacados pelos círculos amarelos. ....	68
Figura 4.5 – Face exposta ao fogo da PS-0.6 - a) Antes do ensaio; b) Após o ensaio; c) Vista lateral; d) Detalhe do dano mais profundo.....	69
Figura 4.6 – Registro visual do interior do forno durante lascamento explosivo na PS-0.6. ....	69
Figura 4.7 – Fragmentos da PS-0.6 coletados após o ensaio – a) Fragmentos montados na posição original em que estavam na placa; b) Fragmento 1; c) Fragmento 2; d) Fragmento 3.....	70
Figura 4.8 – Face exposta ao fogo da PS-0.8 - a) Antes do ensaio; b) Após o ensaio. ....	71
Figura 4.9 – Fragmento pertencente à PS-0.8, coletado após o ensaio. ....	72
Figura 4.10 – Face exposta ao fogo da PS-1.2 - a) Antes do ensaio; b) Após o ensaio.....	73

## LISTA DE GRÁFICOS

Gráfico 2.1 – Propriedades mecânicas do concreto em função da temperatura .....	29
Gráfico 2.2 – Curvas de elevação de temperatura mais indicadas para ensaios de revestimentos de túneis .....	38
Gráfico 3.1 – Relação tempo-temperatura para a curva HC .....	54
Gráfico 4.1 – Elevação de temperaturas na PN-0.6 .....	65
Gráfico 4.2 – Elevação de temperaturas na PN-0.8 .....	66
Gráfico 4.3 – Elevação de temperaturas na PN-1.2 .....	67
Gráfico 4.4 – Elevação de temperaturas na PS-0.6 .....	68
Gráfico 4.5 – Elevação de temperaturas na PS-0.8 .....	71
Gráfico 4.6 – Elevação de temperaturas na PS-1.2 .....	73
Gráfico 5.1 – Desvio da área sob a curva de temperatura simulada em cada placa em relação à área da Curva HC .....	75
Gráfico 5.2 – Temperaturas medidas no forno em relação à variação permitida de $\pm 100$ °C da Curva HC .....	75
Gráfico 5.3 – Perfis de temperatura – a) PN em $t=20$ min e $t=40$ min; b) PS em $t=24$ min .....	77
Gráfico 5.4 – Elevação média de temperatura em cada profundidade para ambas as condições de saturação .....	78
Gráfico 5.5 – Elevação média de temperatura em cada profundidade da PS-0.6, que sofreu lascamento explosivo .....	78
Gráfico 5.6 – Taxas internas de elevação de temperatura no concreto projetado para diferentes condições de umidade .....	80
Gráfico 5.7 – Porcentagem da área exposta ao fogo que sofreu lascamento em cada placa .....	81
Gráfico 5.8 – Aumento da temperatura média nos últimos 5 minutos ( $AT_5$ ) ao longo dos ensaios para profundidades de: a) 2,5 cm; b) 4,0 cm; c) 7,5 cm .....	83
Gráfico 5.9 – Comparação das taxas internas de elevação de temperatura no concreto projetado e concreto convencional .....	86
Gráfico 5.10 – Comparação das taxas internas de elevação de temperatura no concreto projetado (experimental) e simulações computacionais para diferentes valores de $K_0$ : a) Condição não saturada; b) Condição saturada .....	87
Gráfico 5.11 – Comparação entre condutividades térmicas obtidas dos dados	

experimentais, simulação e limite inferior sugerido no Eurocode.....88

## LISTA DE TABELAS

Tabela 2.1 – Taxas de pico de liberação de calor durante um incêndio para diferentes veículos .....	28
Tabela 3.1 – Composição do concreto projetado utilizado no estudo .....	44
Tabela 3.2 – Propriedades da macro e microfibras utilizadas no concreto projetado .	45
Tabela 3.3 – Nomenclatura adotada para cada placa .....	45
Tabela 3.4 – Resistência à compressão do concreto projetado utilizado .....	46
Tabela 3.5 – Absorção de água, índice de vazios e massa específica do concreto projetado utilizado .....	47
Tabela 3.6 – Variações permitidas na simulação da Curva HC .....	56
Tabela 3.7 – Utilização dos termopares na criação dos intervalos de confiança .....	57
Tabela 4.1 – Caracterização do lascamento ocorrido na PN-0.6 .....	65
Tabela 4.2 – Caracterização do lascamento ocorrido na PS-0.6 .....	69
Tabela 4.3 – Dimensões dos fragmentos coletados da PS-0.6.....	70
Tabela 4.4 – Caracterização do lascamento ocorrido na PS-0.8 .....	71
Tabela 4.5 – Dimensões do fragmento coletado da PS-0.8 .....	72
Tabela 5.1 – Resumo da análise estatística das curvas de temperatura .....	76
Tabela 5.2 – Temperaturas médias finais e coeficientes de correlação de Pearson para cada profundidade .....	76
Tabela 5.3 – Resumo das faixas de profundidade lascada para cada placa .....	81

## SUMÁRIO

<b>1</b>	<b>Introdução .....</b>	<b>20</b>
1.1	Objetivo .....	25
1.2	Estrutura do trabalho.....	26
<b>2</b>	<b>Revisão bibliográfica .....</b>	<b>28</b>
2.1	Impacto do incêndio nos revestimentos de túneis.....	28
2.2	Lascamento .....	30
2.3	Fatores intervenientes no lascamento .....	34
2.3.1	Fatores relacionados ao material .....	35
2.3.2	Fatores relacionados às condições de ensaio .....	37
<b>3</b>	<b>Desenvolvimento do plano experimental .....</b>	<b>41</b>
3.1	Túneis utilizados como base para o desenvolvimento do estudo .....	41
3.2	Método de ensaio de referência utilizado.....	42
3.3	Especificidades deste estudo.....	43
3.4	Materiais e variáveis utilizadas .....	44
3.5	Caracterização do concreto projetado utilizado .....	46
3.5.1	Resistência à compressão .....	46
3.5.2	Absorção de água, índice de vazios e massa específica.....	46
3.6	Moldagem e preparação dos corpos de prova.....	47
3.7	Preparação para os ensaios .....	51
3.8	Ensaio de exposição ao fogo .....	52
3.8.1	Aquisição dos dados .....	55
3.9	Análise dos resultados .....	56
3.9.1	Verificação das tolerâncias dos ensaios .....	56
3.9.2	Análise estatística das curvas de temperatura.....	57
3.9.3	Análise da influência do teor de microfibras no desenvolvimento das temperaturas internas .....	58
3.9.4	Taxas internas de elevação de temperatura no concreto projetado .....	58
3.9.5	Caracterização do lascamento.....	59
3.9.6	Comparação do comportamento térmico do concreto projetado e concreto convencional .....	62
3.9.7	Condutividade térmica do concreto projetado.....	63
<b>4</b>	<b>Resultados.....</b>	<b>65</b>

4.1	Condição não saturada .....	65
4.2	condição saturada.....	67
<b>5</b>	<b>Análise dos resultados.....</b>	<b>74</b>
5.1	Verificação das tolerâncias dos ensaios .....	74
5.2	Análise estatística das curvas de temperatura.....	75
5.3	Influência do teor de microfibras poliméricas no desenvolvimento das temperaturas internas .....	76
5.4	Curvas médias de temperatura.....	77
5.5	Comparação entre a condição saturada e não saturada .....	79
5.6	Análise de parâmetros para caracterização do lascamento.....	80
5.7	Critério para constatação do lascamento explosivo a partir das temperaturas internas do concreto.....	81
5.8	Comparação entre concreto projetado e concreto convencional .....	84
5.9	Condutividade térmica do concreto projetado.....	86
<b>6</b>	<b>Conclusões.....</b>	<b>89</b>
6.1	Tópicos que necessitam de aprofundamento no futuro .....	90
	<b>Referências.....</b>	<b>92</b>

## 1 INTRODUÇÃO

A demanda de transporte de pessoas e de cargas aumenta mundialmente e é um desafio para os países em desenvolvimento como o Brasil. A utilização planejada e consciente do espaço subterrâneo é vital para combater essa demanda crescente e, por isso, há grande interesse nos túneis para a infraestrutura global (ITACUS, 2011a, 2011b; TENDER; COUTO; BRAGANÇA, 2017), uma vez que a construção subterrânea cresce acima do restante da construção civil (CELESTINO, 2018).

Existem inúmeras vantagens associadas ao uso do subsolo para obras de infraestrutura, dentre elas: a redução da saturação da superfície em muitas cidades; melhor proteção contra intempéries no ambiente enterrado garantindo melhor segurança para sistemas vitais para as cidades; maior facilidade de expansão dos sistemas subterrâneos em vários níveis em relação ao mesmo na superfície com o mínimo de interferência no ambiente urbano, menor impacto visual, sonoro e na qualidade do ar para a população durante a construção e operação em relação às obras de superfície; melhor eficiência dos túneis de um modo geral frente às construções em superfície (FISCHER et al., 1978; ITA WORKING GROUP 13, 2004; ITACUS, 2011a, 2011b; TENDER; COUTO; BRAGANÇA, 2017; REIS; ASSIS, 2017; NUNES; FRANCO; ASSIS, 2017; CELESTINO, 2018; ROSER, 2019).

No ambiente não urbano, as obras subterrâneas também trazem vantagens: são menos agressivas ao meio ambiente, pois a maior parte do ecossistema da superfície é preservado; conectam mais facilmente e de forma mais curta regiões separadas por uma topografia acidentada, o que pode levar a uma redução expressiva dos custos operacionais e, portanto, dos custos associados ao ciclo de vida da obra, além da redução do risco de ocorrência de acidentes e fatalidades no trajeto (CELESTINO, 2016, 2018; REIS; ASSIS, 2017; TENDER; COUTO; BRAGANÇA, 2017).

Dentro do contexto da segurança e economia, é importante garantir um nível adequado de confiabilidade ao revestimento de um túnel, tanto para os usuários que trafegarão por ele, quanto para pessoas e estruturas possivelmente existentes nas regiões circunvizinhas. A estabilidade do maciço no entorno do túnel é um ponto crucial, principalmente em solos de menor competência mecânica (THE BRITISH TUNNELLING SOCIETY AND THE INSTITUTION OF CIVIL ENGINEERS, 2004). O colapso de um túnel pode resultar em mortes e grandes prejuízos financeiros e para

a reputação dos envolvidos (CHAPMAN, 2017). Portanto, é fundamental que os revestimentos de túneis sejam corretamente dimensionados, considerando situações críticas que podem ocorrer durante a vida útil dessas estruturas, como a ocorrência de um incêndio (QIAO et al., 2019a).

Ao longo da história é possível destacar a ocorrência de diversos incêndios em túneis em várias regiões do mundo. Incêndios em túneis são relativamente raros em comparação com outros tipos de edificações, porém, são muito mais severos que os demais (FELICETTI, 2013). Em geral, os incêndios mais severos para o revestimento ocorrem em túneis rodoviários com envolvimento de veículos com cargas de alto poder calorífico (AFAC - TUNNEL FIRE SAFETY ISSUES COMMITTEE, 2001; BEARD; CARVEL, 2012; PÉREZ, 2016; PERMANENT INTERNATIONAL ASSOCIATION OF ROAD CONGRESSES - PIARC, 2016), porém deve-se destacar que incêndios em túneis metroviários podem ser críticos para a perda de vidas humanas devido à maior densidade de passageiros nos metrô (ITA COSUF, 2014).

Existem diversas técnicas disponíveis para a construção de túneis, porém, o *New Austrian Tunnelling Method* (NATM) vem sendo, historicamente, uma das mais utilizadas devido à sua flexibilidade e potencial de redução de consumo de material na execução do revestimento. Mais recentemente, essa desmaterialização das obras tem sido associada à redução da pegada de carbono (ITA WORKING GROUP 12; ITATECH, 2020), que são estratégias importantes para obter maior sustentabilidade dos túneis executados com essa técnica. As principais características desse método envolvem o aproveitamento da resistência do próprio maciço para a estabilidade do túnel, algo que deve ser verificado por monitoramento constante das deformações do maciço e instalação do revestimento no momento adequado, o qual é executado em concreto projetado (GALLER et al., 2009; HEMPHILL, 2010; CHAPMAN, 2017). Revestimentos executados em concreto projetado são, em geral, compostos de duas camadas: revestimento primário, que tem responsabilidade estrutural junto ao maciço, principalmente durante a obra e revestimento secundário que, além de contribuir para a estabilidade estrutural, tem funções relacionadas à vida útil da estrutura e de proteção contra a ação do incêndio (KIM et al., 2016; CHAPMAN, 2017; ZHANG et al., 2018). Em situação de incêndio, perdas e deterioração no revestimento secundário são, normalmente, aceitas desde que ocorram de forma controlada e que não comprometam a estabilidade do conjunto, algo alcançado a

partir da mitigação do lascamento. Obviamente o grau em que esses danos são aceitos deve ser objeto de estudos específicos na fase de projeto, de forma que as perdas não resultem em uma condição insegura para a estabilidade do túnel, tal como demonstrado por Serafini, De La Fuente & Figueiredo (2021) para o caso dos túneis executados com anéis segmentados. Por outro lado, o revestimento primário, devido à sua função estrutural de garantia da estabilidade primária do sistema, deve permanecer preservado.

Em alguns incêndios em túneis, verificou-se que o revestimento secundário foi totalmente destruído e o revestimento primário foi afetado de forma considerável, o que levou a situações em que o túnel esteve muito próximo de colapsar (THE BRITISH TUNNELLING SOCIETY AND THE INSTITUTION OF CIVIL ENGINEERS, 2004). Mesmo quando não ocorre colapso, os custos associados à reconstrução e parada de funcionamento do túnel geram um considerável prejuízo econômico e social (PÉREZ, 2016). Embora o desenvolvimento de novas tecnologias e técnicas para prevenção de acidentes nos túneis possa contribuir para a redução no número de incêndios, não há como eliminar esse tipo de sinistro que se origina de colisões e, principalmente, de defeitos mecânicos e elétricos nos veículos (AFAC, 2001; EUROPEAN THEMATIC NETWORK FIRE IN TUNNELS - ETNFIT, 2005).

Incêndios em estruturas de concreto são problemáticos em razão dos efeitos deletérios causados pelo aumento da temperatura no concreto e no reforço existente. De forma resumida, o aumento de temperatura causa a redução das propriedades mecânicas do concreto e do sistema de reforço e altera os esforços solicitantes (SERAFINI et al., 2019; MEMON et al., 2019; AGRA; SERAFINI; FIGUEIREDO, 2021). A eventual ocorrência de lascamento causa a perda de seção resistente do revestimento, agravamento da distribuição de temperaturas na seção e perda de capacidade resistente do conjunto (FELICETTI, 2013; ZHANG et al., 2017; MAIER; ZEIML; LACKNER, 2020; MALUK et al., 2020; SERAFINI; DE LA FUENTE; FIGUEIREDO, 2021). No caso do lascamento explosivo, esses efeitos ocorrem de forma abrupta, por isso esse fenômeno é considerado crítico (SYLVERIO, 2018).

A estratégia de prevenção ao lascamento mais comum e de mais simples aplicação é o uso de microfibras de polipropileno na mistura do concreto. Diversos autores ratificam o efeito positivo da adição dessas fibras na mitigação do lascamento no concreto (HERTZ; SØRENSEN, 2005; FU; LI, 2011; CHUNG; LEE; KIM, 2013; STUVA WORKING GROUP “REPAIR OF ROAD TUNNELS”, 2015;

CZOBOLY et al., 2017; GAWIN; PESAVENTO; CASTELLS, 2018; QIAO et al., 2019a; LO MONTE; FELICETTI; ROSSINO, 2019; MAIER; ZEIML; LACKNER, 2020; BANERJI; KODUR; SOLHMIRZAEI, 2020; RÍOS et al., 2020; ZHANG et al., 2021a; CABALLERO-JORNA; ROIG-FLORES; SERNA, 2021). Embora as microfibras de polipropileno sejam as mais comuns, outros tipos de fibras poliméricas como, por exemplo, nylon e celulose também podem ser usadas (HEO et al., 2011; ZHANG; TAN, 2020). Destaca-se que a adição dessas microfibras poliméricas pode ocorrer em diversos teores, pois depende de variáveis ligadas às fibras e às propriedades físicas e mecânicas do concreto que devem ser examinadas de forma mais substancial. No entanto, o Eurocode (2004) preconiza a adição do teor mínimo de  $2 \text{ kg/m}^3$  de microfibras poliméricas ao concreto para prevenção do lascamento quando não há estudos experimentais, o que é praticado na construção de túneis atualmente (ITA WORKING GROUP 12; ITATECH, 2020). Esse valor foi estimado com base em estudos laboratoriais e considerado relativamente efetivo para a maior parte dos concretos. Entretanto, ele pode estar superestimado para uma série de situações. Devido à influência dessas variáveis, fica claro que o teor de microfibras poliméricas deve ser ajustado por meio da verificação do comportamento de cada solução frente ao fogo. De fato, alguns autores verificaram que teores de microfibras poliméricas menores que  $2 \text{ kg/m}^3$  também podem ser efetivos (CZOBOLY et al., 2017; BANERJI; KODUR; SOLHMIRZAEI, 2020; RÍOS et al., 2020; DU et al., 2020). Teores muito elevados podem reduzir a trabalhabilidade da mistura, afetando as condições de operação durante a execução do revestimento e, até mesmo, acentuar as reduções nas propriedades mecânicas pós-incêndio do concreto, pela formação de microfissuras e vazios na matriz cimentícia devido às altas temperaturas (ZHANG; DASARI; TAN, 2018; SZELĄG, 2019).

É consenso que a avaliação da susceptibilidade do concreto projetado ao lascamento deve ser feita através de ensaios de corpos de prova representativos do concreto efetivamente utilizado na obra e alguns autores recomendam que sejam feitos estudos em elementos de grandes dimensões (YAN; ZHU; JU, 2013; LO MONTE; FELICETTI; ROSSINO, 2019). Porém, os ensaios em elementos de grandes dimensões ou na escala real do túnel são mais custosos (ITA COSUF, 2014) e complexos devido à movimentação dos corpos de prova, à necessidade de equipamentos de ensaio de grandes dimensões ou mesmo a mobilização do próprio túnel. Além disso, ensaios em corpos de prova de grandes dimensões também não

são capazes de reproduzir perfeitamente as condições do revestimento real do túnel. Dessa forma, a geração de uma base de dados confiável para a parametrização do problema fica totalmente comprometida (ITA COSUF, 2014). Devido ao fato de que o ensaio de múltiplos teores só pode ser feito com múltiplos corpos de prova, aliado à limitação de testar somente uma solução de grandes dimensões por ensaio, pode-se verificar que a determinação do teor ótimo de microfibras poliméricas a ser empregado se torna onerosa do ponto de vista financeiro. Por outro lado, o uso de corpos de prova de menores dimensões permite reduzir os custos desse tipo de análise devido à possibilidade e emprego de múltiplos corpos de prova por ensaio como também gerar base de dados relevante para a parametrização do problema (ITA COSUF, 2014). Portanto, estudos de otimização do teor de microfibras poliméricas com corpos de prova de menores dimensões, como previsto neste trabalho, podem ser uma alternativa interessante do ponto de vista econômico, de viabilidade técnica e como referencial para gerar base de dados confiável (KRZEMIENÍ; HAGER, 2015).

Nos últimos anos, diversos pesquisadores têm desenvolvido modelos numéricos capazes de prever o desenvolvimento do incêndio em um túnel e seus efeitos no revestimento (DI CARLO; MEDA; RINALDI, 2018; QIAO et al., 2019b; BERNARDI et al., 2020; SERAFINI; DE LA FUENTE; FIGUEIREDO, 2021). Embora avanços tenham sido realizados, avaliações sobre a suscetibilidade do concreto ao lascamento ainda são imprescindíveis para a validação desses modelos. Alguns estudos focados em modelos para previsão do lascamento também têm sido desenvolvidos (ZHANG et al., 2017; LIU et al., 2018), entretanto trata-se de uma aproximação distante daquela que pode ser aplicada em condições reais devido à enorme variação de condições para essa obras. Assim, a obtenção de uma metodologia simples que permita gerar base de dados relevante é fator importante para a parametrização das futuras modelagens. Ou seja, procedimentos de ensaio que permitam a verificação de múltiplos teores de microfibras de forma econômica, como o estudado neste trabalho, podem ser extremamente úteis tanto para a validação experimental da solução a ser empregada, quanto para fornecer dados para esse tipo de modelo.

Atualmente, documentos normativos ou práticas recomendadas internacionais (EUROPEAN COMMITTEE FOR STANDARDIZATION, 2004; ITA COSUF, 2014; ITA WORKING GROUP 12; ITATECH, 2020) ainda não apresentam diretrizes

objetivas para a avaliação do lascamento em concretos para revestimentos de túneis, o que torna mais difícil a parametrização do problema. No Brasil tem se visto recentemente um crescimento na preocupação com o incêndio, algo que é extremamente positivo e que se deve à realização da sua gravidade e possíveis consequências para os túneis, bem como a novas exigências das autoridades legais e publicação de documentos nacionais que contemplam essa análise, como é o caso da Prática Recomendada publicada pelo Comitê Brasileiro de Túneis (FIGUEIREDO et al., 2020), destinada ao concreto projetado. Porém, essa análise somente tem sido feita com objetivo de assegurar a adequação do concreto que já se encontra aplicado à obra. Há ainda relutância em relação à otimização dos teores de microfibras, pois muitas vezes os ensaios são contratados pelos próprios produtores das fibras e as construtoras, por desconhecimento ou com o objetivo de “reduzir custos de ensaio”, não se interessam pela otimização. No entanto, a realização dessa análise deve ser vista como um investimento cujo retorno virá com a utilização de grandes volumes de um material otimizado e redução de custo global em conjunto com a manutenção da segurança. Uma das formas de contribuir para a área passa pela implantação de métodos de ensaio simples, acessíveis e que ao mesmo tempo geram resultados imprescindíveis para garantir maior confiabilidade na segurança dos túneis e reduzir custos e esforços para a sua execução, uso e manutenção.

## 1.1 OBJETIVO

Frente ao exposto, o presente trabalho procura estudar uma das referências para avaliação de revestimentos de túneis em situação de incêndio, publicada pela *European Federation of National Associations Representing Producers and Applicators of Specialist Building Products for Concrete - EFNARC (2006): “Specification and guidelines for testing of passive fire protection for concrete tunnels linings”*. Assim, este estudo tem por objetivo analisar a aplicabilidade dessa metodologia de ensaio para a homologação de concreto projetado para revestimentos de túneis expostos ao fogo. Nesse contexto, os objetivos específicos a serem alcançados neste trabalho são:

- a) Avaliar os fatores intervenientes na avaliação do lascamento em concretos projetados destinados aos revestimentos de túneis;
- b) Analisar as condições de aplicação da metodologia de homologação do

concreto projetado para a verificação do teor ótimo de microfibras de polipropileno;

- c) Verificar a viabilidade de utilização do ensaio para parametrização do comportamento do material em altas temperaturas incluindo a verificação da distribuição de temperaturas no interior do concreto projetado;
- d) Inter-relacionar o fenômeno do lascamento e suas características com a dinâmica de evolução de temperatura nas placas;
- e) Verificar a possibilidade de otimização do método de ensaio tendo em vista os resultados obtidos e a revisão bibliográfica.

## **1.2 ESTRUTURA DO TRABALHO**

Esta dissertação está organizada em seis capítulos que tratam dos seguintes temas:

### **a) Capítulo 1 - Introdução**

Este capítulo introduz o tema tratado no trabalho, apresentando a sua importância. Dentro desse contexto, também são apresentados os objetivos e motivações para execução deste trabalho e a sua estruturação.

### **b) Capítulo 2 - Revisão bibliográfica**

Este capítulo apresenta a revisão bibliográfica feita para subsidiar o entendimento do trabalho. Primeiramente é apresentada uma discussão sobre os efeitos principais do fogo sobre o concreto e reforço, priorizando o lascamento e seus mecanismos de ocorrência. O capítulo é finalizado com uma revisão sobre os fatores intervenientes no lascamento sob o ponto de vista do método de ensaio.

### **c) Capítulo 3 - Desenvolvimento do plano experimental**

Neste capítulo são apresentadas as etapas que fizeram parte do desenvolvimento do plano experimental desta dissertação, desde o planejamento até à análise dos resultados.

### **d) Capítulo 4 - Resultados**

Neste capítulo são detalhados os resultados obtidos através do plano experimental apresentado no Capítulo 3.

### **e) Capítulo 5 - Análise dos resultados**

Neste capítulo os resultados são analisados tendo em vista possíveis

contribuições para otimização do método, caracterização do lascamento e definição de um critério não subjetivo para constatação do lascamento explosivo. Também é feita uma comparação entre comportamento térmico do concreto projetado e concreto convencional.

**f) Capítulo 6 - Conclusões**

Neste capítulo são apresentadas as conclusões que foram obtidas neste estudo e sugestões para trabalhos futuros.

## 2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

### 2.1 IMPACTO DO INCÊNDIO NOS REVESTIMENTOS DE TÚNEIS

O calor liberado durante um incêndio eleva as temperaturas observadas no revestimento de concreto do túnel, o que causa a redução das propriedades mecânicas do material e pode induzir a ocorrência de lascamento. A intensidade do aumento de temperatura está associada ao tipo e quantidade de material que deu origem e alimenta o incêndio (PIARC, 2016) e às condições de enclausuramento dos túneis, que restringem a dissipação de calor, tornando o evento mais preocupante do que seria em um local aberto (BEARD; CARVEL, 2012).

Em túneis rodoviários, a alimentação do incêndio ocorrerá pelos veículos que trafegam na via e suas respectivas cargas. A Tabela 2.1 apresenta as taxas de pico de liberação de calor em função do tipo de veículo envolvido no incêndio. É possível notar que os caminhões, especialmente aqueles com cargas de alto poder calorífico, são aqueles que mais contribuem para a gravidade do incêndio. Incêndios em túneis com esses veículos podem apresentar temperaturas superiores a 1300 °C (ETNFIT, 2005; PIARC, 2016).

Tabela 2.1 – Taxas de pico de liberação de calor durante um incêndio para diferentes veículos

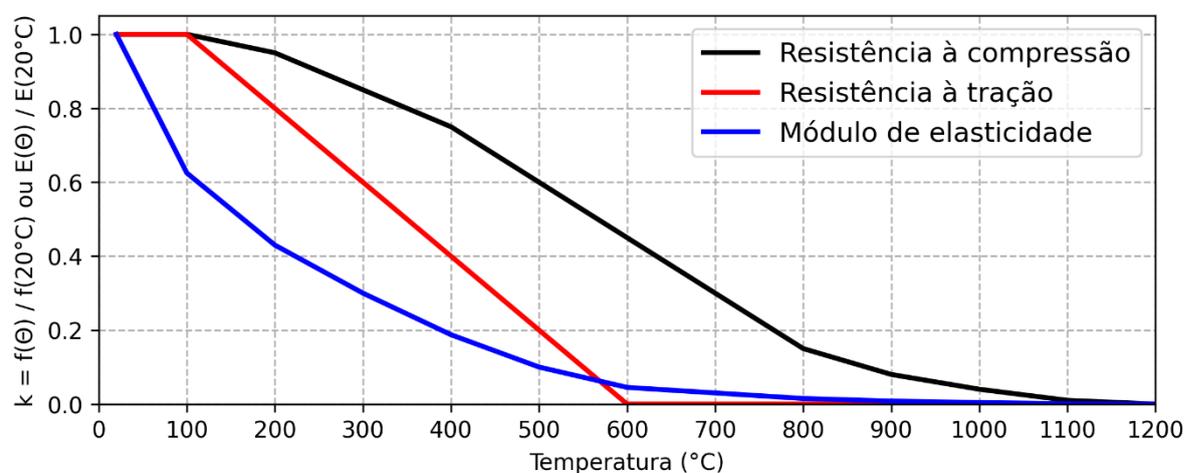
<b>Tipo de veículo</b>	<b>Taxa de pico de liberação de calor (MW)</b>
Carro comum	5 a 10
Van de transporte de passageiros	15
Ônibus de passageiros	20
Caminhão de carga até 25 tons	30 a 50
Caminhão de carga até 50 tons	70 a 150
Caminhão tanque de combustível	200 a 300

Fonte: Adaptado de PIARC (2016)

A deterioração das propriedades mecânicas do concreto pelo aumento de temperatura é resultado da degradação da sua microestrutura (SERAFINI; RAMBO; FIGUEIREDO, 2018). Com o aumento da temperatura, uma série de processos físicos e químicos se iniciam, produzindo alterações perceptíveis no comportamento macro do material (ZEIML et al., 2008; SERAFINI, 2021). Dentre os processos mais importantes, pode-se citar a evaporação da água existente no concreto, tanto livre e adsorvida quanto combinada (FELDMAN; RAMACHANDRAN, 1971), o que provoca a decomposição térmica dos produtos de hidratação da pasta de cimento (SERAFINI, 2021). Um outro aspecto importante é a incompatibilidade de dilatação térmica entre os agregados e pasta de cimento (CRUZ; GILLEN, 1980), o que

resulta em um processo de fissuração interna (SERAFINI, 2021). No caso de concretos com agregados silicosos e graníticos, o processo de fissuração é intensificado devido à transformação cristalina do quartzo da fase  $\alpha$  para a fase  $\beta$ , e sua consequente expansão, a 573 °C. No caso de agregados calcários, estes sofrem decomposição acima de 600 °C (MA et al., 2015). No caso de agregados basálticos, sua maior densidade pode resultar em uma maior deterioração térmica (LIMA, 2005), porém sua transformação cristalina, com formação de cristais multifacetados, ocorre somente aos 700°C (SOLLERO, 2019; XING et al., 2022). Com a degradação da microestrutura, o aumento da temperatura gera reduções progressivas e não reversíveis nas propriedades mecânicas do concreto. As curvas típicas utilizadas em projeto para a parametrização da redução da resistência à tração, compressão e de módulo de elasticidade do concreto em função da temperatura são apresentadas no Gráfico 2.1. A redução da resistência à tração e do módulo de elasticidade é intensa para temperaturas bem inferiores às verificadas em um incêndio.

Gráfico 2.1 – Propriedades mecânicas do concreto em função da temperatura



Fonte: Adaptado de Eurocode 2 (2004)

A utilização de reforço com fibras de aço aumenta a complexidade do comportamento do material em altas temperaturas uma vez que se deve acrescentar as alterações no comportamento pós-fissuração. Em geral, concretos reforçados com fibras de aço perdem progressivamente suas propriedades mecânicas, de forma irreversível, até 750 °C, temperatura em que a capacidade resistente pós-fissuração do material se torna praticamente nula, independentemente do teor de fibra adotado (AGRA; SERAFINI; FIGUEIREDO, 2021; SERAFINI et al., 2021). Maiores teores de fibras de aço geram menores reduções na resistência à tração e compressão do material, porém não influenciam na perda de módulo de elasticidade

e resistência pós-fissuração do material (AGRA; SERAFINI; FIGUEIREDO, 2021).

Também é possível reforçar o concreto com macrofibras poliméricas. Essas fibras têm se tornado uma alternativa mais frequente para as fibras de aço na execução de revestimentos de túneis em concreto projetado (YIN et al., 2015; CABALLERO-JORNA; ROIG-FLORES; SERNA, 2021). Porém, concretos reforçados com macrofibras poliméricas podem apresentar perdas bem mais intensas na capacidade resistente residual do que aqueles reforçados com fibras de aço, pois as macrofibras poliméricas se fundem completamente a aproximadamente 160 °C (CLEMENT, 2010; CABALLERO-JORNA; ROIG-FLORES; SERNA, 2021). O estudo experimental de Serafini et al.(2019) mostra que há perda completa da capacidade resistente residual até uma profundidade de até 12 cm quando são utilizadas macrofibras poliméricas em concretos submetidos à curva de hidrocarbonetos (Curva HC) por 120 minutos. Isso mostra que revestimentos feitos em concreto reforçado com macrofibras poliméricas devem ser analisados com maior cuidado. Felizmente, o concreto apresenta baixa condutividade térmica (SERAFINI et al., 2019), o que proporciona uma proteção às camadas internas, na ausência de lascamentos profundos.

## **2.2 LASCAMENTO**

O lascamento resulta na perda de camadas do concreto na forma de lascas e deslocamentos em função da deterioração causada pelo fogo (KHOURY, 2000; NINCE, 2006; LIU; TAN; YAO, 2018; MALUK et al., 2020). As principais consequências disso são a redução na seção resistente e a exposição de camadas internas à ação do fogo, intensificando os efeitos de redução da capacidade portante da estrutura em direta proporção à profundidade lascada (SIDERIS; MANITA; CHANIOTAKIS, 2009; HAGER, 2013; STUVA WORKING GROUP “REPAIR OF ROAD TUNNELS”, 2015; CHUNG; LEE; CHOI, 2016; CHO et al., 2017; ZHANG et al., 2017; LO MONTE; FELICETTI; ROSSINO, 2019; MALUK et al., 2020; LI; ZHANG, 2021).

Embora algumas classificações para o lascamento tenham sido propostas (KHOURY, 2000; SULLIVAN, 2004; NINCE, 2006), de forma geral, a literatura divide o fenômeno em: progressivo (ou superficial) e explosivo. Essa divisão está basicamente associada à forma de perda das camadas de concreto não havendo, porém, na literatura distinções claras entre os mecanismos de ocorrência e fatores

intervenientes em cada tipo de lascamento. No lascamento progressivo a perda de camadas de concreto ocorre de forma gradual, resultando em uma perda progressiva da capacidade portante da estrutura (KHOURY, 2000; COSTA; FIGUEIREDO; SILVA, 2002; NINCE, 2006; LIU; TAN; YAO, 2018; MALUK et al., 2020). No lascamento explosivo, a perda de camadas ocorre de forma violenta, súbita, gerando deslocamentos de grandes dimensões e com grande liberação de energia (NINCE, 2006; FU; LI, 2011; CHUNG; LEE; CHOI, 2016; LO MONTE; FELICETTI, 2017; GAWIN; PESAVENTO; CASTELLS, 2018). Nesse caso, a perda da capacidade portante ocorre de forma abrupta e com maior intensidade. Devido a esses aspectos, o lascamento explosivo é geralmente considerado o mais sério (SYLVERIO, 2018), porém o lascamento progressivo também pode resultar em danos finais potencialmente significativos (KHOURY, 2000; COSTA; FIGUEIREDO; SILVA, 2002; NINCE, 2006; MALUK et al., 2020).

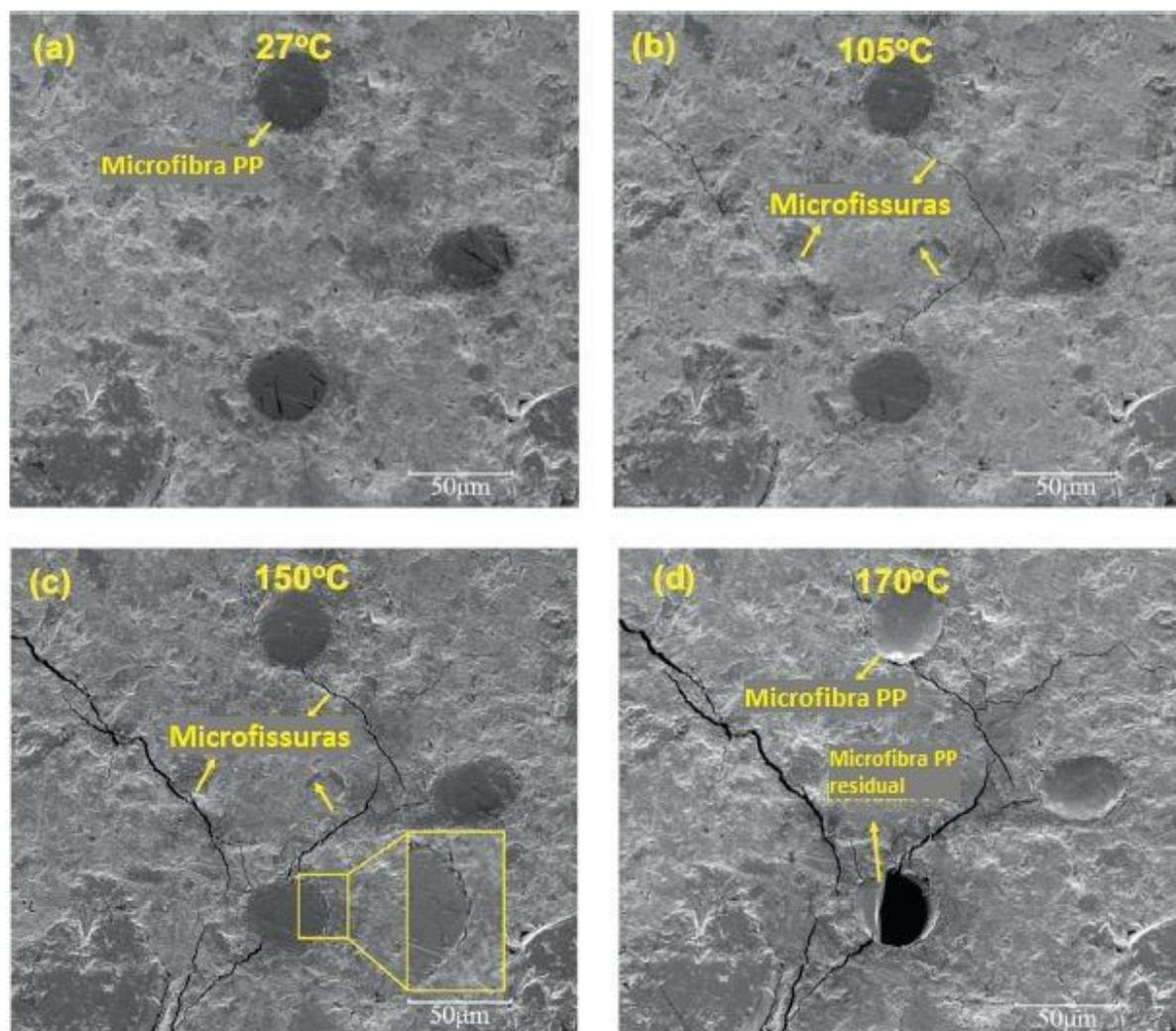
Três mecanismos preponderantes já estão bem estabelecidos na literatura na ocorrência do lascamento: sobrepressão nos poros, gradientes térmicos ao longo do material e fissuração da matriz cimentícia (NINCE, 2006; ZEIML; LACKNER; MANG, 2008; FU; LI, 2011; HAGER, 2013; CHUNG; LEE; CHOI, 2016; LIU; TAN; YAO, 2018; MAIER; ZEIML; LACKNER, 2020).

No mecanismo relativo à sobrepressão dos poros, as altas temperaturas causam a evaporação da água existente no concreto e movimentação dela nos poros, buscando ser liberada para o ambiente externo. Parte desse vapor se desloca para fora através da superfície e parte se desloca para as regiões internas e mais frias do concreto onde é condensado, formando uma seção impermeável que impede a passagem de novos gases. A evaporação contínua de água aumenta progressivamente a pressão nessa região impermeável até que a capacidade resistente do material seja superada, quando ocorre o lascamento (NINCE, 2006; FU; LI, 2011; LIU; TAN; YAO, 2018; MAIER; ZEIML; LACKNER, 2020). É nesse mecanismo que as microfibras poliméricas atuam. Historicamente, tem se acreditado que essas fibras fundem a aproximadamente 160 °C, deixando em seu lugar canais que auxiliam na dissipação dos vapores, mitigando o surgimento de pressões no concreto (SIDERIS; MANITA; CHANIOTAKIS, 2009; CLEMENT, 2010). Recentemente foi proposto por Zhang; Dasari & Tan (2018) um mecanismo complementar de ação das microfibras poliméricas. Segundo os autores, o aumento da temperatura dilata intensamente as microfibras enquanto causa uma leve

retração da matriz cimentícia. Destaca-se que essa retração da matriz está associada à sua desidratação e ocorre apesar da sua dilatação causada pelo aumento de temperatura (LIMA, 2005; ALVES, 2018). Essa diferença de comportamento causa a formação de microfissuras (Figura 2.1) no concreto que auxiliam na dissipação dos vapores. Os autores demonstraram que ocorre um aumento na permeabilidade do concreto a esses gases antes da evaporação das microfibras e que esse aumento é significativamente maior que aquele observado após a evaporação delas.

É importante destacar que esse estudo foi realizado com concretos de ultra-alta resistência (resistência à compressão de 150 MPa), que possuem microestrutura menos porosa que concretos de resistência convencional. Em concretos mais porosos, a formação de microfissuras pelo aumento da temperatura e presença de microfibras poliméricas é menor (SZELAĞ, 2019), o que pode fazer com que esse mecanismo ocorra com menor intensidade. Além disso, a formação de microfissuras também pode fragilizar o material e resultar na perda de propriedades mecânicas pós-incêndio (FU; LI, 2011; SZELAĞ, 2019), portanto, a adição de microfibras deve ocorrer de forma otimizada.

Figura 2.1 – Formação de microfissuras no concreto de ultra-alto desempenho, pela ação das microfibras poliméricas, em diferentes temperaturas. a) 27°C; b) 105°C; c) 150°C; d) 170°C.



Fonte: Adaptado de Zhang, Dasari & Tan (2018)

Ainda com relação às pressões nos poros, segundo Fu & Li (2011) e Choe et al. (2019), quanto mais densa for a matriz cimentícia, menos profunda será a região impermeável. Isso pode indicar que embora concretos mais densos sejam mais suscetíveis ao lascamento (SIDERIS; MANITA; CHANIOTAKIS, 2009; BANERJI; KODUR; SOLHMIRZAEI, 2020), concretos de resistência comum podem sofrer lascamentos equitativamente sérios, pois a região impermeável nesses concretos se formará mais profundamente. Isso é confirmado por Maier, Zeiml e Lackner (2020) que verificaram que concretos mais permeáveis geram lascas de maiores dimensões que aqueles mais densos.

O incêndio induz a geração de gradientes térmicos em um revestimento devido ao rápido aquecimento na superfície externa e à baixa condutividade térmica do concreto (FU; LI, 2011; LIU; TAN; YAO, 2018; SERAFINI et al., 2019). O

desenvolvimento de altos gradientes térmicos no concreto aumenta a probabilidade de ocorrência de lascamento explosivo (FELICETTI, 2013). Na região próxima à fonte de calor nascem esforços de compressão, pois o material tende a se expandir, mas é restringido pelas seções internas mais frias, onde nascem esforços de tração. De forma a manter o equilíbrio mecânico, na região oposta à superfície aquecida também nascem esforços de compressão (FU; LI, 2011; LIU; TAN; YAO, 2018; CARPIO, 2019; LI; ZHANG, 2021). Essas tensões vão contribuir para a ocorrência do lascamento (HERTZ, 2003).

O terceiro mecanismo decorre da já comentada incompatibilidade entre a pasta de cimento e os agregados silicosos devido à transformação cristalina do quartzo, e sua conseqüente expansão, a 573 °C provocando uma incompatibilidade de deformações na matriz similar à descrita para ação das microfibras poliméricas, porém em menor intensidade (LI et al., 2019).

Os mecanismos descritos não trabalham independentemente e a ocorrência do lascamento resulta de uma interação entre eles, tornando o processo muito complexo para a modelagem e parametrização. Por outro lado, todos os mecanismos estão associados à existência de gradientes térmicos no concreto o que permite a avaliação por meio de um ensaio de exposição ao fogo pela medição das temperaturas internas no material. Dessa forma, a distribuição interna de temperaturas no interior do concreto é um fator básico a ser analisado na metodologia.

### **2.3 FATORES INTERVENIENTES NO LASCAMENTO**

Para que se possa estudar adequadamente esse fenômeno e aprimorar a metodologia de ensaio, é necessário conhecer as variáveis intervenientes no lascamento. Assim, foi feita uma extensa revisão da literatura em busca dos fatores intervenientes nesse fenômeno. Alguns fatores influenciam o comportamento de elementos estruturais convencionais, como é o caso do tipo de exposição em termos de direções de exposição, o que não ocorre em túneis onde a exposição será sempre unidirecional e, portanto, não serão aqui discutidos. Os fatores intervenientes são discutidos na sequência e foram divididos entre aqueles ligados ao material e aqueles ligados às condições do ensaio.

### 2.3.1 Fatores relacionados ao material

Conforme já discutido no Capítulo 1, as microfibras poliméricas são consideradas o principal fator na análise no que se refere ao seu teor crítico para a prevenção do lascamento. Porém, as características e propriedades das microfibras também afetam o comportamento. Uma característica importante das fibras é seu fator de forma, resultado da divisão do seu comprimento pelo seu diâmetro. Microfibras com alto fator de forma tendem a ser mais eficientes por gerarem mais facilmente canais e microfissuras interconectadas na matriz cimentícia (HEO et al., 2012). A importância das propriedades térmicas das microfibras está associada à formação de microfissuras (ZHANG; TAN, 2020) e a seu ponto de fusão que, como aponta Heo et al. (2012), deve ser o mais baixo possível para aumento da eficiência da proteção.

Concretos reforçados com fibras têm sido muito empregados na construção civil (DE LA FUENTE et al., 2011), principalmente em revestimentos de túneis (MALUK et al., 2020). Existem diferentes tipos de fibras, com propriedades e características específicas. Fibras de aço são as mais comuns na construção civil, porém, não têm um papel preponderante na prevenção do lascamento. O aumento da capacidade resistente do material, em geral, somente atrasa a ocorrência do lascamento (SIDERIS; MANITA; CHANIOTAKIS, 2009; LO MONTE; FELICETTI; ROSSINO, 2019). Da mesma forma ocorre com as macrofibras poliméricas, que também não são eficientes na dissipação de vapores por apresentarem um fator de forma significativamente inferior às microfibras, o que reduz a quantidade de fibras por volume e, portanto, a frequência de geração de canais interconectados. Por outro lado, a utilização de fibras no concreto projetado altera a sua reologia e, por consequência, afetam o processo de projeção que pode alterar a condição de compactação do material (FIGUEIREDO, 1997). Assim, alterações no tipo de fibra ou no seu teor demandam que o compósito seja avaliado novamente no estudo experimental.

Diferentes agregados podem apresentar diferentes condutividades e coeficientes de dilatação térmica, o que interfere na formação de gradientes térmicos e fissuração da matriz cimentícia (NINCE, 2006). O tamanho dos agregados também influencia na ocorrência do lascamento. Maiores agregados geram maiores aumentos na permeabilidade do concreto em altas temperaturas, porém, em uma proporção muito inferior ao aumento gerado pelas fibras poliméricas em altas

temperaturas (LI; TAN; YANG, 2018; LI et al., 2019). De qualquer forma, esse aumento da permeabilidade pode contribuir para a mitigação do lascamento, conforme observado no estudo de Mohd Ali; Sanjayan & Guerrieri (2018).

A relação água/cimento influencia na densidade do concreto e é considerada um dos fatores influentes no lascamento (FU; LI, 2011; MAIER; ZEIML; LACKNER, 2020). Concretos mais densos são normalmente mais suscetíveis ao lascamento pois têm maior dificuldade de dissipar umidade existente em seu interior. Porém, esse comportamento depende de diversos mecanismos complexos. O aumento da temperatura aumenta progressivamente a permeabilidade do concreto (NOUMOWE; SIDDIQUE; DEBICKI, 2009; LI; TAN; YANG, 2018) e esse aumento da permeabilidade é proporcionalmente maior em concretos mais densos (NOUMOWE; SIDDIQUE; DEBICKI, 2009), ou seja, concretos mais densos ganham mais permeabilidade com o aumento da temperatura do que concretos menos densos. Quando microfibras poliméricas estão presentes a complexidade aumenta, pois essas fibras geram grandes aumentos na permeabilidade do concreto (ZHANG; DASARI; TAN, 2018; LI; TAN; YANG, 2018, 2019). Destaca-se também que concretos mais densos serão suscetíveis à formação de gradientes térmicos menores (BAMONTE; GAMBAROVA; NAFARIEH, 2016; LI et al., 2016), o que, em algumas situações, pode mitigar o risco de lascamento (HERTZ, 2003). De qualquer forma, alterações de traço devem obrigar a uma nova avaliação experimental para verificação da ocorrência do lascamento.

A condição de saturação do concreto está entre as principais variáveis intervenientes no lascamento (HERTZ, 2003; FU; LI, 2011; MAIER; ZEIML; LACKNER, 2020). A saturação do concreto aumenta a probabilidade de ocorrência do lascamento (HAGER, 2013; LIU et al., 2018; LIU; TAN; YAO, 2018) e favorece a sua antecipação (MAIER; ZEIML; LACKNER, 2020). Esses efeitos ocorrem, porque o aumento da umidade aumenta a quantidade de água que é evaporada, aumentando as pressões internas. Portanto, corpos de prova saturados apresentarão maior probabilidade de sofrer lascamentos, que poderão ocorrer de forma mais rápida, em comparação a corpos de prova não saturados. É importante destacar que os revestimentos de túneis podem estar úmidos devido ao ambiente e condições do maciço (ZHANG et al., 2017). Ainda assim, muitos ensaios são realizados com corpos de prova com baixo teor de umidade, o que não representa a situação crítica à qual o revestimento pode estar exposto durante o incêndio. Além

disso, a condição de saturação completa até a constância de massa é mais facilmente determinável do que qualquer outra condição de umidade do material. Assim, para o estabelecimento de uma melhor condição de reprodutibilidade e repetitividade, seria interessante fixar a condição saturada para uniformização dos resultados. Esse ponto, portanto, ainda pode ser considerado de importância fundamental para a unificação dos métodos de ensaio (KRZEMIENÍ; HAGER, 2015).

Pelas razões expostas até aqui é razoável concluir que é muito difícil produzir modelos que permitam prever o comportamento do concreto projetado quanto ao lascamento induzido pela alta temperatura gerada em um incêndio. Na falta dessa opção de previsão confiável de comportamento, a avaliação experimental do risco de lascamento pode ser apontada como a alternativa viável que permite homologar soluções para o revestimento da estrutura do túnel. No entanto, a mesma deve ser realizada de modo a evitar variáveis intervenientes indesejadas e para cada situação que é objeto de análise. Alterações de traço e constituintes do concreto devem implicar na realização de novos experimentos.

### **2.3.2 Fatores relacionados às condições de ensaio**

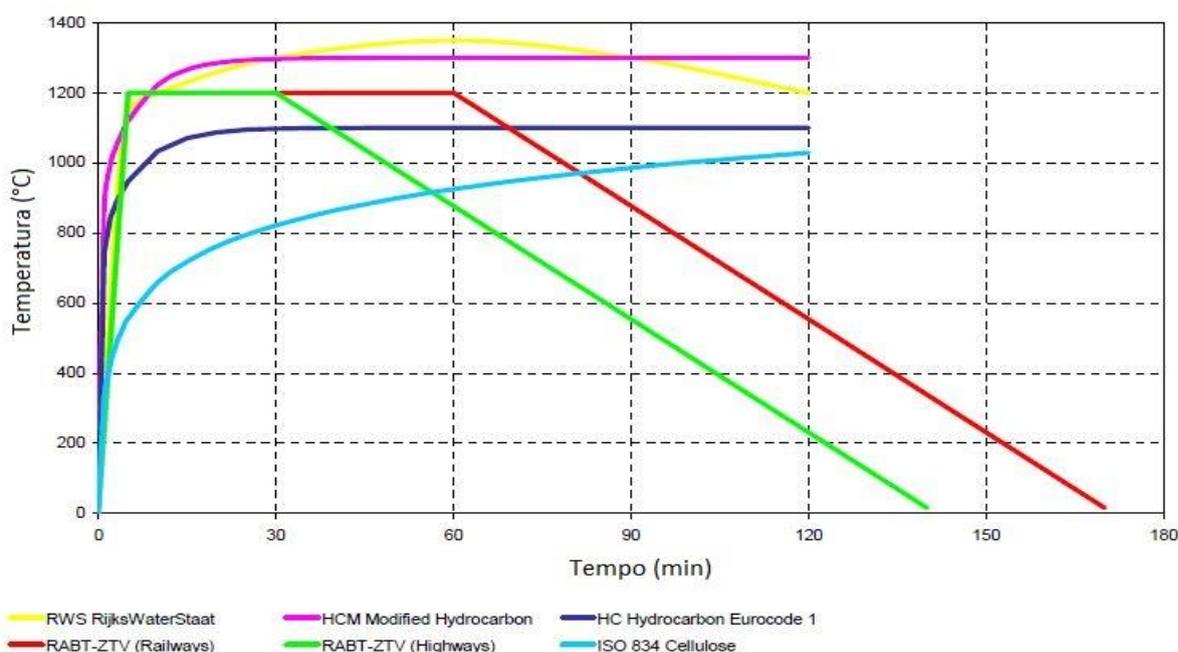
Existe uma grande gama de ensaios para avaliação da suscetibilidade do concreto ao lascamento. As variabilidades existentes entre os diferentes métodos são muitas e podem estar associadas à exposição ao fogo, curvas de temperatura adotadas e aplicação ou não de carregamento ou contenção das deformações dos corpos de prova (SOUZA, 2010; KRZEMIENÍ; HAGER, 2015). Essa diversidade de ensaios em conjunto com as variabilidades intrínsecas dos materiais pode gerar resultados difíceis de comparar ou mesmo incomparáveis.

Devido à variabilidade existente entre diferentes elementos construtivos, é importante focar em metodologias aplicadas especificamente aos revestimentos de túneis. Sylverio (2018) estudou as duas principais metodologias desse tipo e recomendou a aplicação da metodologia da EFNARC (2006) - ver Seção 3.2 - para a avaliação da suscetibilidade do concreto de revestimentos de túneis ao lascamento, devido à sua maior objetividade e facilidade de aplicação no Brasil. Ainda assim, o método pode resultar em variabilidades importantes quando se considera que os projetos de túneis apresentam hipóteses amplamente distintas para a questão do incêndio (ITA COSUF, 2014). Adicionalmente, a aplicação do método da EFNARC (2006) pode gerar resultados inconclusivos devido à ausência de

parâmetros confiáveis na análise do lascamento e, conseqüentemente, do comportamento do material. Assim, é necessária uma padronização dos métodos de ensaio e das ferramentas de avaliação dos resultados para verificação da suscetibilidade do concreto ao lascamento (SOUZA, 2010; KRZEMIENÍ; HAGER, 2015). Essa padronização também poderá favorecer a criação de uma base de dados que promova a harmonização dos projetos de túneis em situação de incêndio (ITA COSUF, 2014). A seguir é discutida a influência dos parâmetros relacionados às condições de ensaio tendo em vista o concreto projetado destinado a revestimentos de túneis.

Segundo Khoury (2000), o lascamento ocorre entre 20 a 30 minutos do início do aquecimento e é fortemente influenciado pela taxa de aquecimento, que é bem elevada durante incêndios em túneis. Embora existam discordâncias entre autores para o tempo máximo de ocorrência do lascamento, há concordância sobre a influência significativa da taxa de aquecimento na sua ocorrência (HERTZ, 2003; NINCE, 2006; LIU et al., 2018; CHOE et al., 2019). Altas taxas de elevação de temperatura gerarão maiores gradientes térmicos no concreto, favorecendo a ocorrência do lascamento (FU; LI, 2011). Isso é representado nos ensaios pela utilização de diferentes curvas de elevação de temperatura. As curvas mais indicadas para a análise de revestimentos de túneis estão apresentadas no Gráfico 2.2.

Gráfico 2.2 – Curvas de elevação de temperatura mais indicadas para ensaios de revestimentos de túneis



Fonte: Adaptado de EFNARC (2006)

Algumas curvas apresentam taxas de elevação de temperatura maiores que outras, o que pode influenciar nos resultados dos ensaios. A curva padrão de temperatura (*ISO 834 Cellulose* no Gráfico 2.2) é, atualmente, a base para a maioria dos ensaios de resistência ao fogo realizados em elementos construtivos de edificações (ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS - ABNT, 2021a). Porém, apresenta uma taxa de elevação de temperatura significativamente inferior à das demais curvas recomendadas que possuem taxas de elevação de temperatura similares nos primeiros minutos, sendo que a principal diferença ocorre na temperatura máxima atingida por essas curvas.

A curva HC (*Hydrocarbon Eurocode 1* no Gráfico 2.2) representa incêndios alimentados por hidrocarbonetos e é recomendada atualmente para os ensaios de concreto para revestimentos de túneis frente à capacitação tecnológica existente no Brasil (SYLVERIO, 2018). Porém, o uso da Curva HC deve ser ainda discutido após a realização de estudos mais aprofundados que levem em conta os efeitos das diferentes curvas de temperatura na formação de gradientes térmicos, evaporação de água e migração de vapor no concreto.

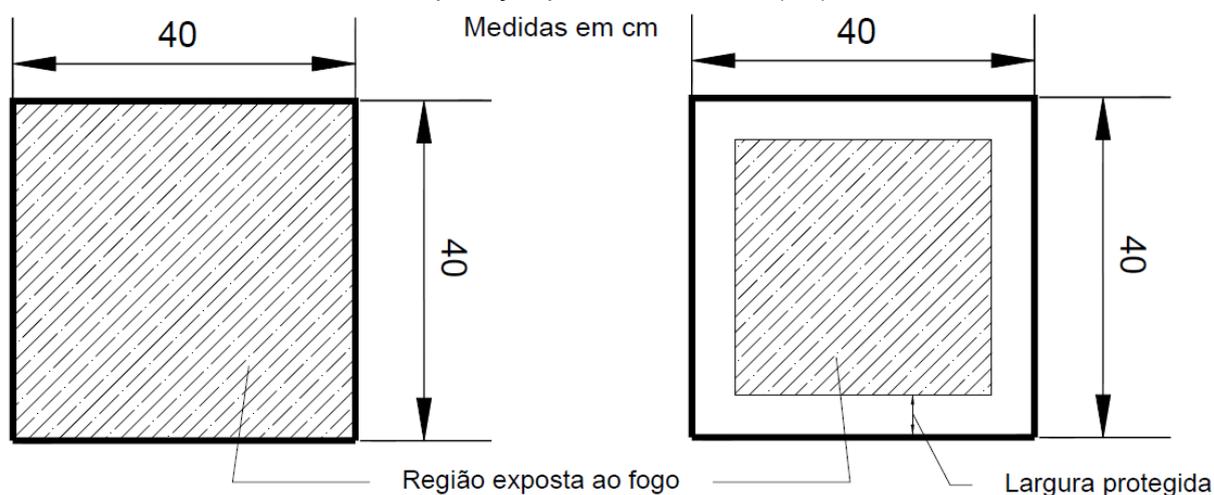
Há consenso sobre a influência de carregamentos de compressão na ocorrência do lascamento (LIU et al., 2018). Por exemplo, em vigas aquecidas nota-se que o lascamento ocorre preferencialmente na porção lateral superior, sujeita a esforços de compressão (BANERJI; KODUR; SOLHMIRZAEI, 2020). Porém, nos túneis, sobretudo no revestimento secundário, a carga atuante é comumente baixa frente a outras aplicações (KIM; EISENSTEIN, 2006; BONINI; LANCELLOTTA; BARLA, 2013; HUI-JUN; YU, 2014; WANG et al., 2020), com intensidades em que somente tensões confinantes são relevantes para a ocorrência do lascamento (MIAH et al., 2016). Além disso, os níveis de tensão em revestimentos de túneis são difíceis de prever devido a variabilidades e incertezas associadas ao solo, à redistribuição de cargas que ocorre no revestimento (KIM; EISENSTEIN, 2006) e às variações nos esforços oriundos da dilatação e retração por mudanças na temperatura (CRUZ; GILLEN, 1980). Portanto, é impossível especificar um nível de carregamento geral para padronização do método de ensaio. Unindo-se essa conclusão ao fato de que a aplicação de carregamento é um grande complicador do procedimento de ensaio, fica claro que o método de ensaio não deve englobar a aplicação de carregamento, o que está alinhado com a proposta da EFNARC (2006).

Outro ponto que merece consideração é a proteção das regiões próximas às

bordas na face exposta ao fogo dos corpos de prova, de forma que somente a região central dessa face fique sujeita ao aquecimento, conforme exemplificado na Figura 2.2. A exposição ao fogo gera uma concentração de tensões nos cantos, devido à dilatação térmica do material (LO MONTE et al., 2019), que pode induzir lascamentos isolados nessas regiões, porém há diferentes conclusões na literatura sobre a significância desses lascamentos (NINCE, 2006; LO MONTE; GAMBAROVA, 2015; QIN et al., 2021). A EFNARC (2006) recomenda a proteção de uma largura de 150 mm das bordas da face exposta ao fogo em ensaios de grandes dimensões, algo que é simples de executar no laboratório. Porém, nos ensaios de corpos de prova de médias dimensões essa proteção não é requerida. Nesses ensaios corre-se o risco de proteger uma porção muito pequena da face exposta e não se eliminar o lascamento de canto ou proteger uma porção muito grande e prejudicar a exposição ao fogo do corpo de prova. Com base nesses aspectos, esse tópico deverá ser abordado futuramente em outro estudo, baseado em novos ensaios ou simulações computacionais englobando diferentes larguras de proteções na face exposta ao fogo e seus efeitos na geração de tensões nos cantos.

Por fim, o principal requisito para a implantação de uma metodologia padronizada é que ela possa ser facilmente implantada na maioria dos laboratórios. Conforme discutido em trabalho anterior (SYLVERIO, 2018), a metodologia proposta pela EFNARC (2006) atende a essa premissa, portanto, pode ser considerada adequada para analisar o risco de lascamento em concreto projetado para revestimentos de túneis.

Figura 2.2 – Exemplo da região aquecida no corpo de prova sem proteção próxima às bordas (esq.) e com proteção próxima às bordas (dir.).



Fonte: Próprio autor

### **3 DESENVOLVIMENTO DO PLANO EXPERIMENTAL**

#### **3.1 TÚNEIS UTILIZADOS COMO BASE PARA O DESENVOLVIMENTO DO ESTUDO**

A Rodovia dos Tamoios, de acesso ao Litoral Norte do Estado de São Paulo, tem grande importância para o transporte rodoviário intranacional e para a exportação marítima. Por essa razão, investimentos bilionários têm sido realizados em sua duplicação, para aumentar sua capacidade (ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE TECNOLOGIA PARA CONSTRUÇÃO E MINERAÇÃO (SOBRATEMA), 2016; ÁLYA CONSTRUTORA S.A., 2022).

Essa duplicação envolve a construção de cerca de 22 km de novas vias. Devido à sua localização em meio à Mata Atlântica, um dos maiores desafios da obra foi reduzir a intervenção na flora que ocorreria caso fossem construídas vias na superfície. Nesse sentido, a execução da maior parte das novas vias em túneis (quatro túneis compondo 12,8 km em extensão) foi primordial (ÁLYA CONSTRUTORA S.A., 2022). Variações no maciço rochoso, regiões de escavação com baixa cobertura e, particularmente para o túnel de maior extensão, alta declividade e grande extensão também contribuíram para a complexidade das obras. O túnel de maior extensão tem seção transversal de aproximadamente 15 m de largura e 9,5 m de altura e tornou-se o maior túnel do Brasil, com 5,5 km de comprimento (ANJOS, 2021; ÁLYA CONSTRUTORA S.A., 2022). Seu interior durante a construção está apresentado na Figura 3.1.

Os túneis foram construídos por NATM (ANJOS, 2021) e possuem revestimento composto por dupla camada de concreto projetado com diferentes espessuras. O reforço do revestimento secundário dos túneis era composto unicamente por fibras poliméricas (ÁLYA CONSTRUTORA S.A., 2022) e essa camada possuía responsabilidade estrutural no sistema já na sua concepção. Este trabalho foi desenvolvido tomando como base o concreto do revestimento secundário dos túneis.

Figura 3.1 – Interior do túnel principal da duplicação da Rodovia dos Tamoios, em construção em 20/11/2019



Fonte: Próprio autor

### 3.2 MÉTODO DE ENSAIO DE REFERÊNCIA UTILIZADO

O objetivo central do método de ensaio é verificar o teor ótimo de microfibras poliméricas para prevenção do lascamento. O principal aspecto para a garantia da segurança do revestimento é a composição de um material não suscetível ao lascamento em termos do teor de microfibras (SYLVERIO, 2018), algo que pode ser analisado por meio do método de ensaio publicado pela organização internacional EFNARC (2006): “*Specification and guidelines for testing of passive fire protection for concrete tunnels linings*”.

Para verificações com concreto projetado e que objetivam uma obra específica, o método preconiza a utilização de corpos de prova semelhantes ao revestimento do túnel original em termos de composição e técnica de aplicação. Além disso, o método prevê a verificação da distribuição interna de temperaturas no concreto e ocorrência e caracterização do lascamento.

No método recomendado pela EFNARC (2006) são propostas duas situações de análise. A primeira situação envolve ensaio com corpos de prova de médias dimensões e é destinada à avaliação exploratória de possíveis soluções para revestimentos de túneis, incluindo a variação do teor de microfibras. A segunda situação de análise envolve ensaio com corpos de prova de grandes dimensões e é destinada à avaliação de uma solução para um projeto específico de túnel.

Segundo a EFNARC (2006), as duas situações de análise podem ser complementares, ou seja, pode-se primeiro estudar possíveis soluções com corpos de prova de médias dimensões e verificar a solução que teve melhor comportamento nos primeiros ensaios a partir de ensaios com corpos de prova de grandes dimensões. Dessa recomendação, presume-se que o ensaio de grandes dimensões é mais rigoroso que o de médias dimensões, porém a EFNARC (2006) não indica ações a serem tomadas para garantir que uma solução seja aprovada com maior probabilidade no ensaio com corpos de prova de grandes dimensões e também não fornece um fluxograma do que fazer caso esse ensaio não seja bem sucedido.

Frente a esses pontos, aos objetivos propostos e à possibilidade de se criar uma base de dados com um método padronizado, este trabalho trata unicamente da primeira situação de análise, concernente aos ensaios exploratórios feitos com placas de concreto de médias dimensões.

### **3.3 ESPECIFICIDADES DESTE ESTUDO**

É recomendado, no método de ensaio EFNARC (2006), que os corpos de prova contenham ambas as camadas de concreto do revestimento original. Porém, devido à baixa condutividade térmica do concreto e às espessuras dos revestimentos (SERAFINI et al., 2019), a temperatura na segunda camada não deve se alterar significativamente (o que posteriormente foi comprovado neste estudo pela medição das temperaturas na face não exposta ao fogo, apresentada no Capítulo 4). Assim, a composição de uma segunda camada para o corpo de prova somente aumentaria a complexidade do procedimento e da análise dos resultados, indo contra a padronização do método e criação de uma base de dados. Por essa razão decidiu-se fabricar os corpos de prova somente com a camada referente ao revestimento secundário do túnel estudado. Dessa forma, garantindo-se uma integridade mínima para o revestimento secundário e integral para o primário ter-se-ia uma condição ideal de segurança para a obra.

Tendo em vista a utilização de somente uma camada de concreto, a temperatura interna foi medida considerando a categoria de concreto com proteção integral, conforme nomenclatura definida pela EFNARC (2006). Como será apresentado na Seção 5, a análise das temperaturas internas é interessante para avaliar de maneira indireta, mas objetiva, a severidade do lascamento. Além disso, a análise das temperaturas internas permite parametrizar o comportamento do

concreto projetado em altas temperaturas e é útil para a validação de modelos computacionais que simulam o comportamento térmico do concreto projetado.

No método, são previstas duas situações de condicionamento: em umidade relativa de  $50 \pm 10 \%$  e acima de  $90 \%$ , ambas em temperatura de  $20 \pm 2 \text{ }^\circ\text{C}$ . A utilização de câmara de condicionamento é onerosa financeiramente. Condicionar os corpos de prova submersos em água e expostos ao ar permite representar de forma aproximada as condições descritas na EFNARC (2006) e, para a condição saturada, garante uma uniformização do condicionamento, o que favorece a reprodutibilidade do método. Por essas razões, optou-se por condicionar os corpos de prova submersos em água (condição saturada) e secos ao ar (condição não saturada). Os detalhes do plano experimental são apresentados a seguir.

### 3.4 MATERIAIS E VARIÁVEIS UTILIZADAS

A composição do concreto projetado já havia sido pré-definida por meio de análises desenvolvidas pelos responsáveis pela obra de maneira a garantir o atendimento de requisitos específicos para aplicação do material no revestimento secundário do túnel.

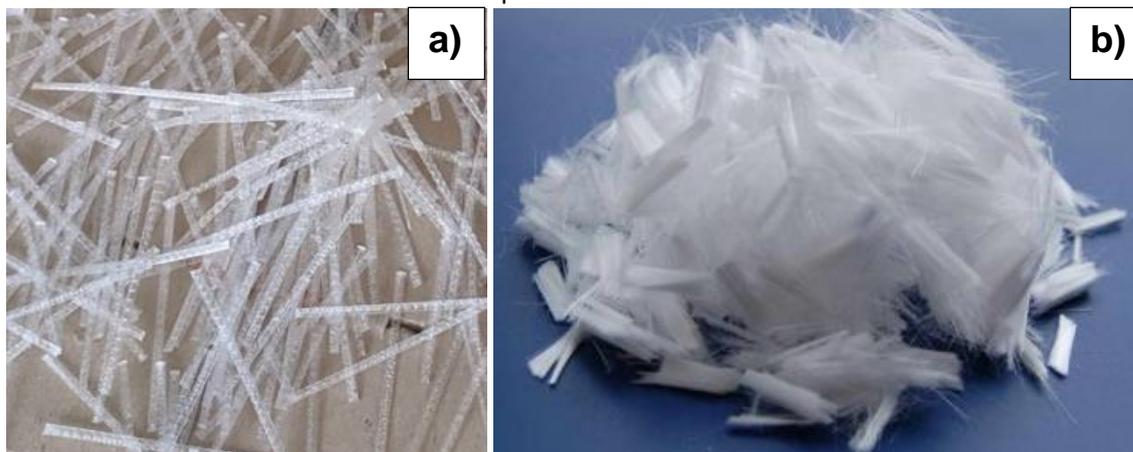
Neste estudo, o objetivo foi, unicamente, avaliar o efeito de diferentes teores de microfibras poliméricas na prevenção do lascamento. Foram definidos três teores de microfibras poliméricas para avaliação:  $0,6 \text{ kg/m}^3$ ,  $0,8 \text{ kg/m}^3$  e  $1,2 \text{ kg/m}^3$ . Ou seja, todos os teores ficaram abaixo do teor padrão de  $2 \text{ kg/m}^3$ , recomendado pelo Eurocode (2004) quando não há homologação dos resultados. Dessa forma, justifica-se a utilização dos teores mais baixos com a expectativa de obter uma otimização da proteção passiva do material. A composição do concreto projetado utilizado está apresentada na Tabela 3.1. As fibras utilizadas estão apresentadas na Figura 3.2 e suas propriedades na Tabela 3.2.

Tabela 3.1 – Composição do concreto projetado utilizado no estudo

<b>Material</b>	<b>Proporção (kg/m<sup>3</sup>)</b>
Cimento CP V AR RS HOLCIM	449
Brita 0 (silicosa)	491
Pó de pedra (silicoso)	1196
Água	207
Aditivo superplastificante Viscocrete 6090HW - SIKA	5,837
Macrofibra de polipropileno SIKAFIBER FORCE PP	6
Microfibra de polipropileno SIKAFIBER 12	variável

Fonte: QUEIROZ GALVAO S.A. (2019)

Figura 3.2 – Fibras utilizadas no concreto projetado – a) Macrofibras poliméricas; b) Microfibras poliméricas.



Fonte: Próprio autor e TOPLIVO AD (c2018)

Tabela 3.2 – Propriedades da macro e microfibras utilizadas no concreto projetado

<b>Característica ou propriedade</b>	<b>Macrofibra de polipropileno</b>	<b>Microfibra de polipropileno</b>
Comprimento (mm)	48	12
Seção transversal (mm)	1,37 x 0,34	0,03
Fator de forma (mm/mm)	34	400
Densidade (kg/m <sup>3</sup> )	920	910
Ponto de fusão (°C)	170	165
Resistência à tração (MPa)	550	Não fornecido

Fonte: SIKA BRASIL (c2013, c2013b)

Devido ao estabelecimento de duas condições de saturação, foram moldadas duas placas para cada teor de microfibras poliméricas, totalizando seis placas para os ensaios de exposição ao fogo. Para facilitar as discussões, foi definida uma nomenclatura para cada placa, com base no seu tipo de condicionamento e teor de microfibras. Isso está apresentado na Tabela 3.3.

Tabela 3.3 – Nomenclatura adotada para cada placa

<b>Teor de microfibras</b>	<b>Tipo de condicionamento</b>	<b>Nomenclatura</b>
0,6 kg/m <sup>3</sup>	Não saturada	PN-0.6
	Saturada	PS-0.6
0,8 kg/m <sup>3</sup>	Não saturada	PN-0.8
	Saturada	PS-0.8
1,2 kg/m <sup>3</sup>	Não saturada	PN-1.2
	Saturada	PS-1.2

Fonte: Próprio autor

### 3.5 CARACTERIZAÇÃO DO CONCRETO PROJETADO UTILIZADO

#### 3.5.1 Resistência à compressão

A resistência à compressão foi determinada a partir de testemunhos extraídos de placas semelhantes às aquelas que seriam expostas ao fogo (ver Seção 3.6), conforme diretrizes do método de ensaio (EFNARC, 2006). O procedimento seguiu as diretrizes apresentadas na ABNT NBR 5739 (2018), a resistência à compressão foi determinada para idades de 7 dias e 28 dias e os resultados estão apresentados na Tabela 3.4.

Tabela 3.4 – Resistência à compressão do concreto projetado utilizado

Corpos de prova	Resistência à compressão (MPa)	
	7 dias	28 dias
PN/PS-0.6	38,1	48,5
PN/PS-0.8	25,4	36,0
PN/PS-1.2	25,3	31,7

Fonte: QUEIROZ GALVAO S.A. (2019)

A adição desses diferentes teores de microfibras poliméricas não produziria, de forma isolada, alterações significativas na resistência à compressão (NOUMOWE; SIDDIQUE; DEBICKI, 2009). Essas variações podem ser explicadas pelas dificuldades existentes no controle da uniformidade do material que é afetado pelo próprio jateamento e, conseqüentemente, do grande número de condições que influenciam nos estudos sobre o concreto projetado (FIGUEIREDO, 1992).

A maior resistência à compressão nas placas com teor de microfibras poliméricas de 0,6 kg/m<sup>3</sup> pode indicar diferenças na densidade e permeabilidade do material que favoreceriam a ocorrência do lascamento para esse teor (FU; LI, 2011; MAIER; ZEIML; LACKNER, 2020). Porém, conforme discutido na Seção 2.3.1, a relação entre a densidade e a suscetibilidade ao lascamento não é tão direta, dependendo de diversos mecanismos, o que pode tornar essa variação nas resistências à compressão menos relevante para o estudo. De qualquer forma, o maior valor de resistência à compressão obtido para o teor de microfibras de 0,6 kg/m<sup>3</sup> representa uma condição a favor da segurança para este estudo.

#### 3.5.2 Absorção de água, índice de vazios e massa específica

É importante destacar que essas caracterizações não estão previstas no método de ensaio (EFNARC, 2006), por isso não foram feitas a partir de placas semelhantes aos corpos de prova que seriam utilizados nos ensaios de exposição

ao fogo. Essa caracterização foi feita tendo em vista a própria obra, por isso foram usados testemunhos extraídos da parede lateral do túnel, a uma idade de 98 dias, com base nos procedimentos apresentados na ABNT NBR 9778 (2005). Os resultados dessa caracterização estão apresentados na Tabela 3.5.

Tabela 3.5 – Absorção de água, índice de vazios e massa específica do concreto projetado utilizado

<b>Propriedade</b>	<b>Resultado</b>
Absorção de água	8,5 %
Índice de vazios	17,9 %
Massa específica da amostra seca	2100 kg/m <sup>3</sup>
Massa específica da amostra saturada	2280 kg/m <sup>3</sup>
Massa específica real	2560 kg/m <sup>3</sup>

Fonte: QUEIROZ GALVAO S.A. (2019)

### **3.6 MOLDAGEM E PREPARAÇÃO DOS CORPOS DE PROVA**

A mistura do concreto foi realizada em usina existente no próprio canteiro de obras da duplicação da Rodovia dos Tamoios. Foram utilizados os mesmos materiais, em mesmas proporções, mesmos equipamentos e procedimento de mistura que regularmente são aplicados na obra, de forma a tornar a condição de produção das placas a mais próxima possível da condição prevista para a execução do revestimento do túnel. Após a mistura, o concreto seguiu em caminhão betoneira para o interior de um dos túneis, de forma alimentar o equipamento de projeção. Para a moldagem das placas foi utilizado o equipamento de projeção via úmida TSR 30.14, fabricado pela empresa Schwing Stetter. Esse equipamento é capaz de projetar 33 m<sup>3</sup>/h de concreto, a uma pressão máxima de 59 bares (SCHWING STETTER, c2008) e está apresentado na Figura 3.3. Destaca-se que um concreto de mesma composição apresentará propriedades diferentes caso seja moldado ao invés de projetado (BANTHIA; TROTTIER; BEAUPRÉ, 1994). Por essa razão, estudos sobre concreto projetado devem ser desenvolvidos com placas ou com testemunhos extraídos de placas produzidas efetivamente pelo processo de projeção, algo que foi feito neste trabalho.

O concreto foi projetado diretamente em fôrmas de aço, posicionadas contra um anteparo rígido formando um ângulo entre 70° e 80° com a horizontal, conforme recomendado na ABNT NBR 13070 (2021b), com as dimensões adequadas para se obter corpos de prova de 40 cm x 40 cm x 25 cm, conforme apresentado na Figura 3.4. As placas recém moldadas são apresentadas na Figura 3.5. Os corpos de prova só foram retirados dos moldes 24 h após a projeção e, na sequência, foram serrados

para se obter precisamente as dimensões previstas de 40 cm x 40 cm x 25 cm. Todas as placas passaram pelo processo de cura úmida, submersas em água, durante 28 dias.

Figura 3.3 – Robô de projeção utilizado na moldagem dos corpos de prova.



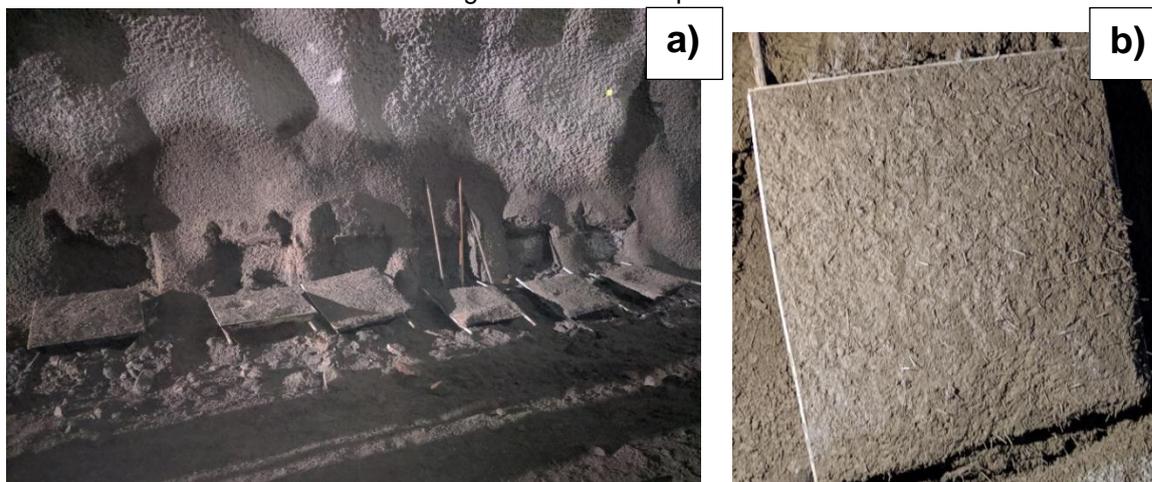
Fonte: Próprio autor

Figura 3.4 – Moldagem dos corpos de prova – a) Fôrmas metálicas; b) Projeção do concreto nas fôrmas por meio do robô.



Fonte: Próprio autor

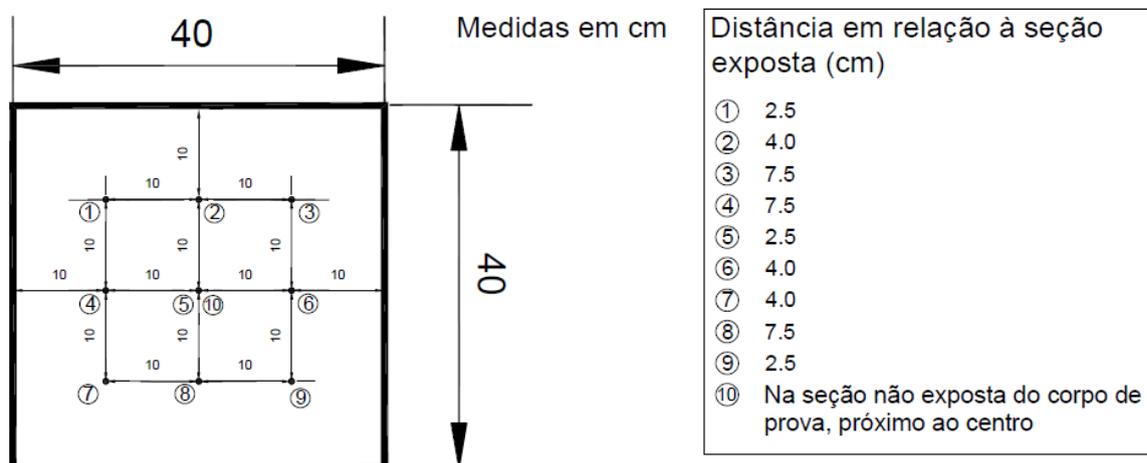
Figura 3.5 – Corpos de prova após a moldagem – a) Visão geral das placas; b) Detalhe da face rugosa de uma das placas



Fonte: Próprio autor

A metodologia de ensaio especifica a tomada de temperatura a três profundidades distintas em relação à face exposta ao fogo: 2,5 cm, 4,0 cm e 7,5 cm. Portanto, nove furos foram executados na face oposta à face rugosa, com as profundidades necessárias para atingir essas distâncias. Os pontos de medição de temperatura são apresentados na Figura 3.6. Após isso, foi colocada uma chapa de aço na face não exposta de cada placa para facilitar sua movimentação e fixação ao suporte do equipamento de ensaio.

Figura 3.6 – Pontos de tomada de temperatura nas placas – Vista da face não exposta ao fogo



Fonte: Próprio autor

Na apresentação dos resultados da elevação das temperaturas internas (ver Capítulo 4) os gráficos foram construídos de forma que as cores das curvas representam a distância do ponto de medição à face exposta ao fogo e o tracejado representa a posição do ponto em relação à essa face, ou seja, “Superior” refere-se à porção de cima da placa, correspondente aos pontos 1, 2 e 3 de medição. “Central” refere-se à porção do meio da placa, pontos 4, 5, 6 e 10. “Inferior” refere-se

à porção de baixo da placa, pontos 7, 8 e 9 de medição.

Após esses serviços, iniciou-se o processo de condicionamento em que as placas foram mantidas em ambiente fechado, protegidas de intempéries e em duas condições diferentes: as placas saturadas ficaram totalmente submersas em água por um período de três meses (ver Figura 3.7). As placas não saturadas ficaram expostas ao ar livre pelo mesmo período. A temperatura nesse ambiente fechado não foi controlada.

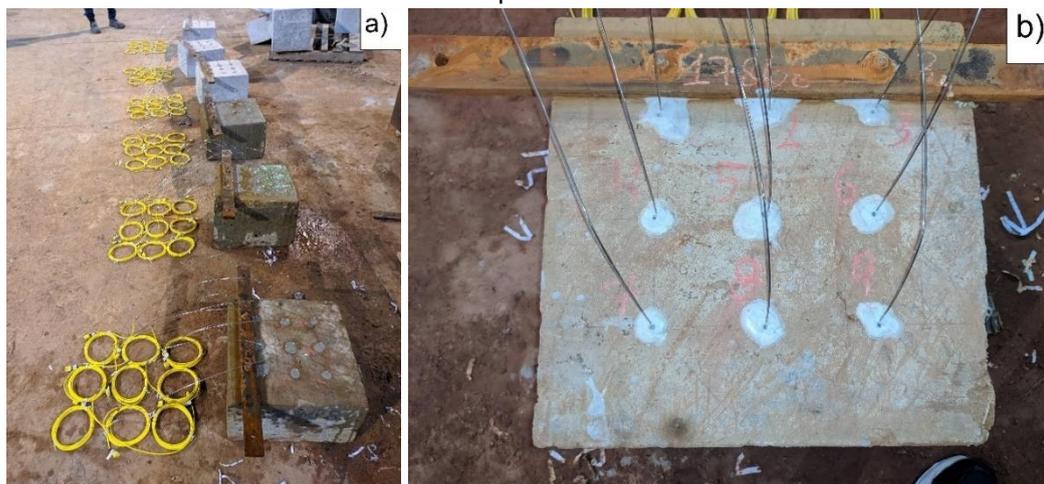
Figura 3.7 – Condicionamento dos corpos de prova saturados.



Fonte: Próprio autor

Durante o período do condicionamento, realizou-se a inserção dos termopares nos furos existentes nas placas. A tomada de temperatura foi feita por meio de termopares tipo K da marca Contemp, protegidos com aço inoxidável, isolamento PVCxPVC, diâmetro de 1,5 mm e temperatura máxima de operação de 1150 °C. Os furos executados anteriormente foram preenchidos por uma nata de cimento, que foi vibrada até que o ar existente saísse, o que era verificado pelo aparecimento de bolhas na superfície. Na sequência, um termopar era inserido na nata de cimento até tocar o fundo do furo. Após a cura da nata de cimento, as placas saturadas foram novamente submersas. As placas, já com os termopares inseridos, estão apresentadas na Figura 3.8.

Figura 3.8 – Corpos de prova após inserção dos termopares – a) Todas as placas; b) Detalhe da superfície.



Fonte: Próprio autor

As placas referentes ao teor de microfibras poliméricas de  $0,8 \text{ kg/m}^3$  necessitaram ter sua face exposta cortada para garantir a correta profundidade dos termopares, pois durante a produção houve uma dificuldade no controle da espessura, o que gerou um excesso de aproximadamente 2 cm.

### 3.7 PREPARAÇÃO PARA OS ENSAIOS

Foram realizados dois ensaios de exposição ao fogo, o primeiro com as três placas não saturadas e o segundo com as três placas saturadas. Primeiramente, foi montada uma parede de blocos estruturais com três aberturas para a inserção de uma placa por abertura, conforme apresentado na Figura 3.9.

Figura 3.9 – Parede para a realização dos ensaios – a) Vista da face não exposta; b) Vista da face futuramente exposta ao fogo, com duas placas posicionadas.



Fonte: Próprio autor

Após a fixação das placas na parede por meio das alças metálicas, o vão entre as bordas da placa e a parede, bem como toda a face exposta da parede

foram preenchidos e revestidos com manta cerâmica de forma a isolar termicamente o forno e proteger a parede contra danos pelo calor. Somente as faces rugosas das placas permaneceram expostas, conforme pode ser observado na Figura 3.10. A face exposta de cada placa foi fotografada antes e depois de cada ensaio.

Após o primeiro ensaio, as placas ensaiadas foram removidas e as placas saturadas foram colocadas em cada abertura repetindo o mesmo procedimento descrito anteriormente. O processo de retirada das placas do condicionamento e início do ensaio foi feito em no máximo quatro horas.

Figura 3.10 – Corpos de prova prontos para serem submetidos ao ensaio de exposição ao fogo - a) Vista da face não exposta ao fogo; b) Vista da face exposta ao fogo.



Fonte: Próprio autor

### 3.8 ENSAIOS DE EXPOSIÇÃO AO FOGO

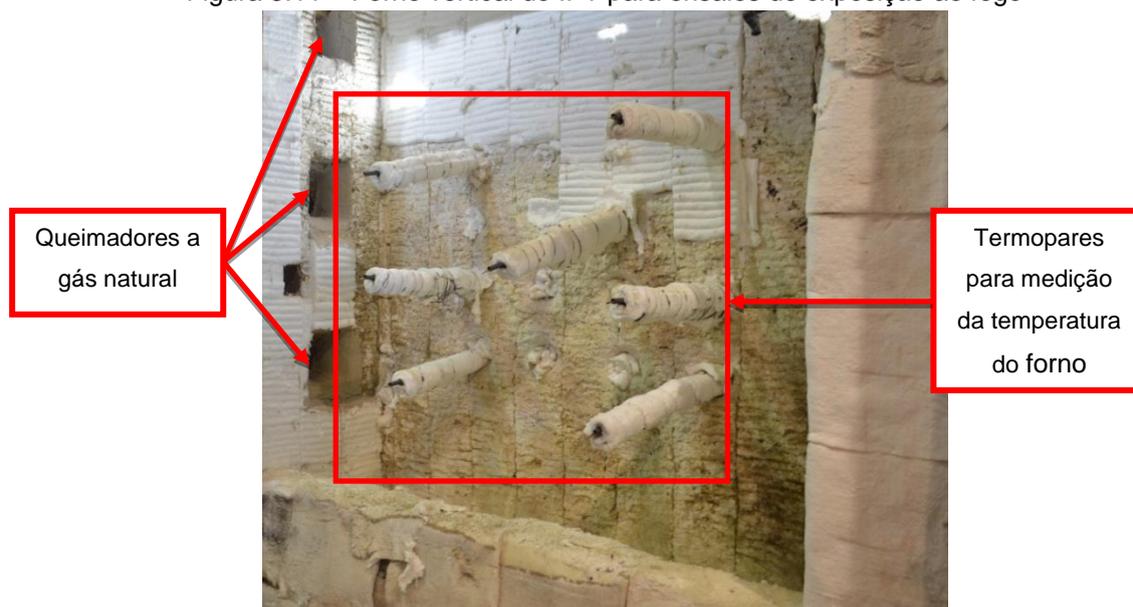
Os ensaios de exposição ao fogo foram realizados no forno vertical do Laboratório de Segurança ao fogo e a Explosões (LSFEx) do Instituto de Pesquisas Tecnológicas do Estado de São Paulo (IPT). Esse forno possui dimensões internas de 2.850 mm de altura, 2.850 mm de largura e 950 mm de profundidade e possui revestimento refratário. O sistema de aquecimento utiliza seis queimadores a gás natural, localizados nas suas paredes laterais.

O método da EFNARC (2006) referencia a EN 1363-1 (2012) que apresenta, dentre outras recomendações gerais, diretrizes para o posicionamento dos termopares do forno. Destaca-se que recentemente foi publicada a norma ABNT NBR 16965 (2021), que se baseia fortemente nessa norma europeia e fornece diretrizes iguais para o posicionamento dos termopares do forno. Ambas as normas referenciam métodos de ensaio específicos para cada tipo de elemento a ser ensaiado (por exemplo, pilares, paredes estruturais ou não, lajes). Em geral, esses métodos especificam uma quantidade mínima e um adicional de um termopar a cada

1,5 m<sup>2</sup> de área exposta ao fogo, por se tratar de elementos com dimensões superiores a 2,5 m. As placas de médias dimensões previstas na EFNARC (2006) apresentam face exposta ao fogo com área de 0,16 m<sup>2</sup>, bem inferior à dos outros elementos. Assim, a colocação de um termopar em frente à face exposta ao fogo de cada placa e sua substituição caso apresente problema durante o ensaio deveria ser suficiente para garantir a correta exposição do corpo de prova à curva pretendida.

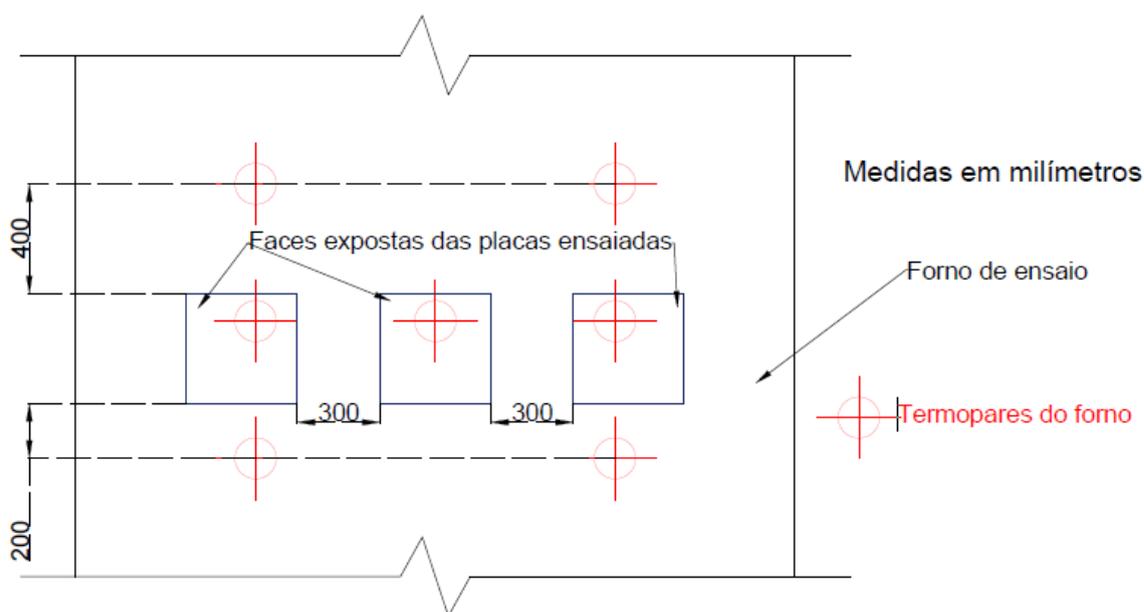
Frente ao exposto, optou-se por, em cada ensaio, posicionar um termopar frontalmente à face exposta de cada uma das três placas ensaiadas, distando no máximo 10 cm dela. Outros quatro termopares foram posicionados dois acima e dois abaixo das placas somente para garantir uma correta homogeneização da temperatura em toda redondeza das faces expostas ao fogo. O forno está apresentado na Figura 3.11. O posicionamento relativo dos termopares do forno e das placas está esquematizado na Figura 3.12.

Figura 3.11 – Forno vertical do IPT para ensaios de exposição ao fogo



Fonte: Próprio autor

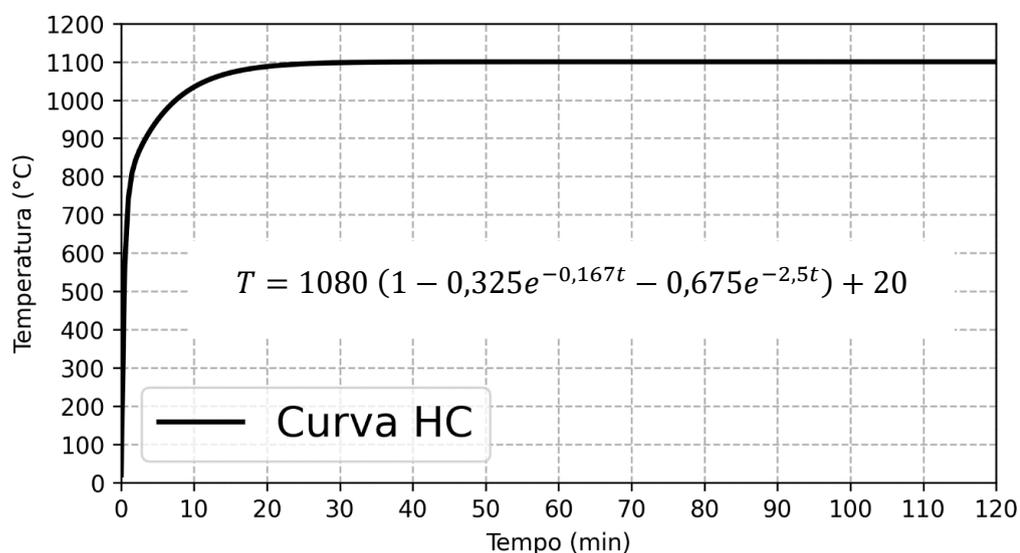
Figura 3.12 – Posicionamento aproximado das placas e dos termopares do forno



Fonte: Próprio autor

Os ensaios nas duas condições de umidificação das placas foram realizados com a Curva HC e tiveram duração de 120 min. A relação tempo-temperatura dessa curva está apresentada no Gráfico 3.1.

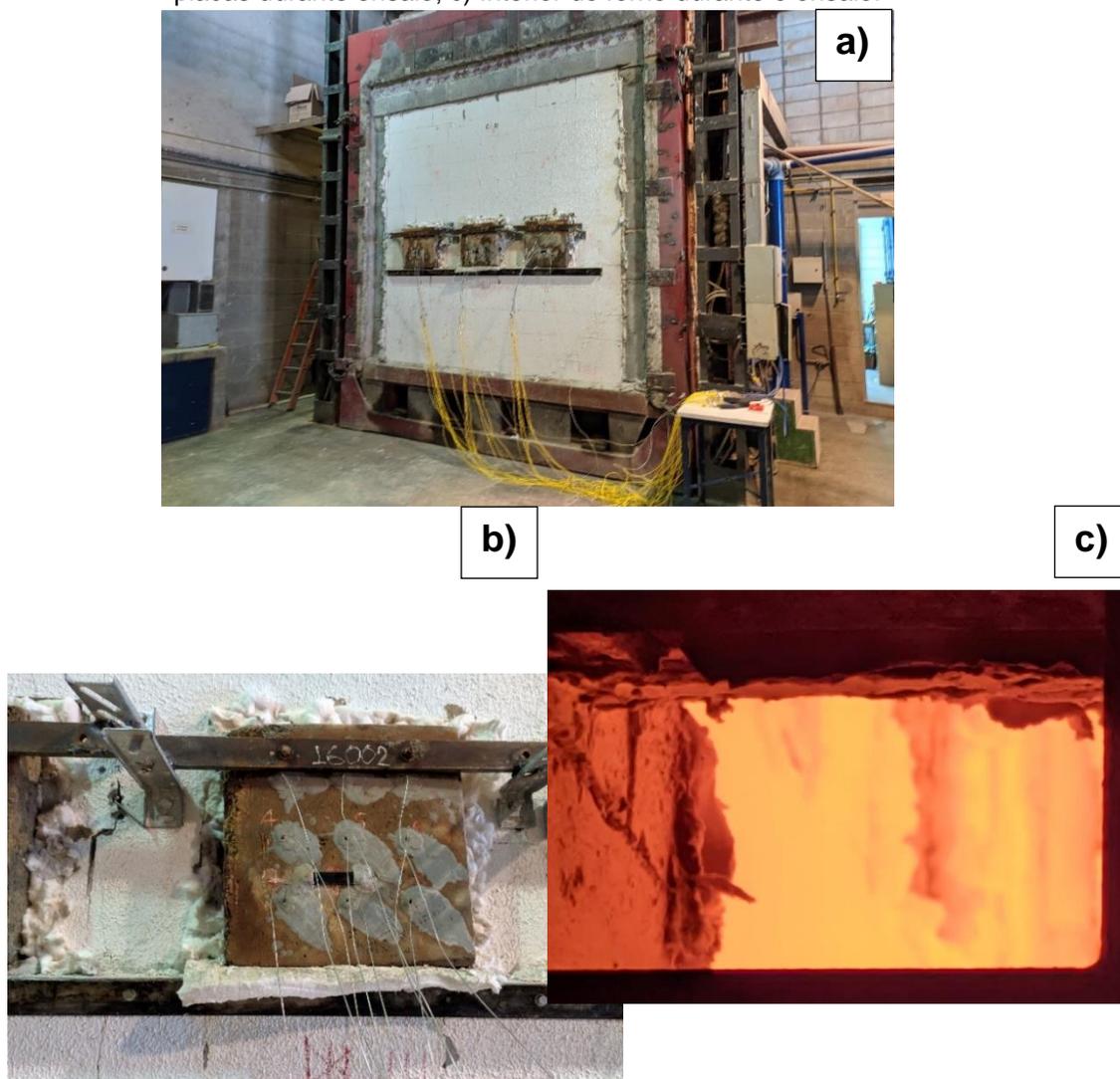
Gráfico 3.1 – Relação tempo-temperatura para a curva HC



Fonte: EFNARC (2006) e EN 1363-2 (1999)

Durante a realização dos ensaios (ver Figura 3.13) a equipe técnica do laboratório permaneceu atenta à incidência de qualquer evento que pudesse indicar a ocorrência de lascamento.

Figura 3.13 – Realização dos ensaios de exposição ao fogo – a) Visão geral; b) Detalhe de uma das placas durante ensaio; c) Interior do forno durante o ensaio.

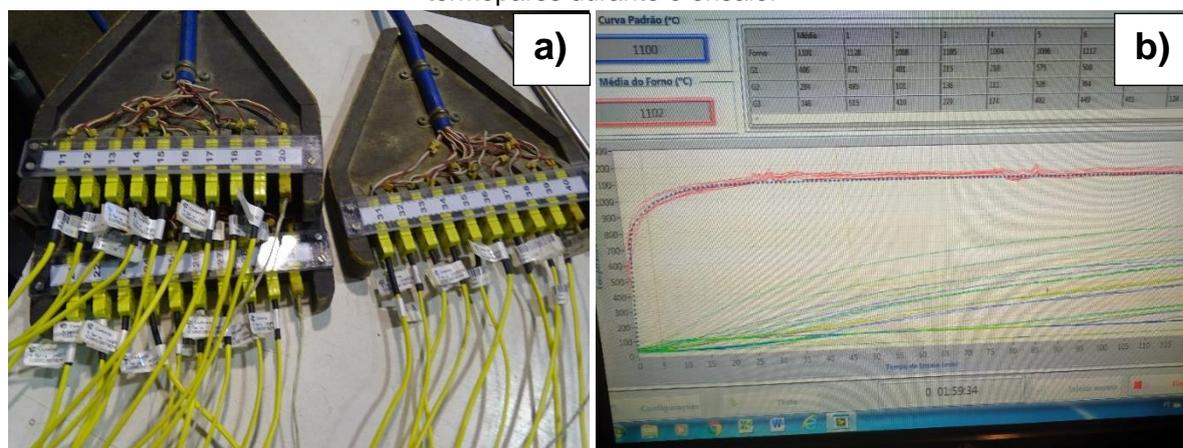


Fonte: Próprio autor

### 3.8.1 Aquisição dos dados

O sistema de aquisição dos dados de temperatura era composto por módulos com diversos canais onde cada termopar era conectado. As temperaturas foram registradas a cada trinta segundos e as medições podiam ser acompanhadas durante o ensaio. Esse sistema está apresentado na Figura 3.14.

Figura 3.14 – a) Módulos com canais para conexão dos termopares; b) Leitura das medidas dos termopares durante o ensaio.



Fonte: Próprio autor

### 3.9 ANÁLISE DOS RESULTADOS

#### 3.9.1 Verificação das tolerâncias dos ensaios

Na Seção 5.1 é apresentada a análise do controle de temperatura do forno durante os ensaios e sua verificação frente às exigências do método de ensaio. O método da EFNARC (2006) referencia a EN 1363-2 (1999) que delimita as variações permitidas na simulação da Curva HC. Essa norma prevê que a área sob a curva média de temperatura simulada para cada corpo de prova apresente uma diferença percentual em relação à área sob a Curva HC dentro das limitações apresentadas na Tabela 3.6 e que após 10 minutos de ensaio a temperatura medida em cada termopar do forno não difira da temperatura especificada para a Curva HC em mais de 100 °C. A área sob a curva simulada em cada placa foi determinada a partir do termopar localizado em frente à respectiva placa e o cálculo se deu pelo somatório das áreas parciais em intervalos de trinta segundos, iniciando em  $t=0$ . A apresentação dos resultados na Seção 5.1 segue o formato recomendado no Anexo B do método de ensaio (EFNARC, 2006).

Tabela 3.6 – Variações permitidas na simulação da Curva HC

Intervalo de tempo (min)	Variação permitida (%)
$5 < t \leq 10$	15
$10 < t \leq 30$	$15 - 0,5 \times (t - 10)$
$30 < t \leq 60$	$5 - 0,083 \times (t - 30)$
$t > 60$	2,5

Fonte: EN 1363-2 (1999)

### 3.9.2 Análise estatística das curvas de temperatura

Medições de temperatura equivocadas podem ocorrer por erros no posicionamento do termopar, existência de defeito próximo ao termopar, pela secagem inadequada da nata de cimento que preenche um furo para inserção de termopar ou por outras causas desconhecidas. É importante que medições equivocadas sejam descartadas de forma a não prejudicar as análises subsequentes.

Foi feita uma análise estatística, primeiramente desconsiderando os termopares localizados em pontos que sofreram lascamento, o que pôde ser constatado pela comparação entre as fotos da face exposta ao fogo de cada placa antes e após o ensaio (termopares próximos a danos existentes antes do ensaio não foram desconsiderados) ou que apresentaram problemas técnicos no ensaio. Os demais termopares foram divididos por profundidade e condição de saturação e, para cada situação, foi construído um intervalo de confiança com as curvas de temperatura e nível de confiança de 99 %. Curvas que não se enquadrassem no respectivo intervalo de confiança foram consideradas equivocadas e foram descartadas. Um resumo sobre a utilização ou não de cada termopar das placas está apresentado na Tabela 3.7. As curvas que se enquadraram nos intervalos de confiança foram utilizadas para a determinação das curvas médias de elevação de temperatura para cada teor de microfibras, condição de saturação e profundidade de medição, que foram utilizadas para a análise da influência do teor de microfibras no desenvolvimento das temperaturas (ver Seção 3.9.3) e das taxas internas de elevação (ver Seção 3.9.4). As temperaturas dos termopares na face não exposta ao fogo não se alteraram substancialmente durante os ensaios e, portanto, não foram incluídas nessa análise.

Tabela 3.7 – Utilização dos termopares na criação dos intervalos de confiança

Corpo de prova	Termopares utilizados			Termopares desconsiderados	
	2,5 cm	4,0 cm	7,5 cm	Região lascada	Problemas técnicos
PN-0.6	1, 5	2, 6, 7	3, 4, 8	9	-
PN-0.8	1, 5	2, 6, 7	3, 4, 8	-	9
PN-1.2	5, 9	2, 6, 7	3, 4, 8	-	1
PS-0.6	-	-	-	Todos	-
PS-0.8	1, 9	7	3, 4, 8	5	2, 6
PS-1.2	1, 5, 9	2, 6	3, 4, 8	-	7

Fonte: Próprio autor

### 3.9.3 Análise da influência do teor de microfibras no desenvolvimento das temperaturas internas

Além da verificação da influência de diferentes teores de microfibras no desenvolvimento das temperaturas, essa análise também tem o objetivo de verificar a influência dos diferentes teores na geração de gradientes térmicos, pois maiores gradientes térmicos aumentam a chance de ocorrência do lascamento explosivo (FELICETTI, 2013).

Primeiramente, foi calculado o coeficiente de correlação de Pearson entre o teor de microfibra de cada placa e as temperaturas finais nas curvas médias da respectiva placa, para cada profundidade de medição da temperatura. Na sequência foram comparados os perfis de temperatura ao longo da espessura das placas em momentos distintos dos ensaios: para a condição não saturada foram escolhidos  $t=20$  min por representar o início do intervalo de tempo mais propício à ocorrência do lascamento (KHOURY, 2000) e  $t=40$  min por ser o tempo máximo em que ocorreu lascamento explosivo neste estudo; para a condição saturada foi escolhido  $t=24$  min pelo fato de a PS-0.6 ter sofrido lascamento explosivo logo após esse tempo.

### 3.9.4 Taxas internas de elevação de temperatura no concreto projetado

A elevação da temperatura no interior das placas ocorre em função da distância à fonte de calor e é interessante definir um parâmetro que represente o ganho de temperatura no tempo em diferentes profundidades (SERAFINI et al., 2019). Isso é definido como a taxa interna de elevação de temperatura, que foi calculada a partir de uma regressão linear das curvas médias de elevação de temperatura por tempo para cada condição de saturação e profundidade, calculadas conforme Seção 3.9.2. As médias foram calculadas independentemente do teor de microfibras, pois, não houve correlação entre esse teor e o desenvolvimento de temperaturas no concreto, conforme apresentado na Seção 5.3. Os coeficientes angulares (em °C/min) obtidos na regressão linear foram determinados para cada condição de ensaio (saturada ou não saturada) e utilizados em uma regressão logarítmica para conhecer as taxas ao longo de todas as profundidades. A regressão logarítmica segue o padrão apresentado na Equação (1).

$$Tx = a \ln(x) + b$$

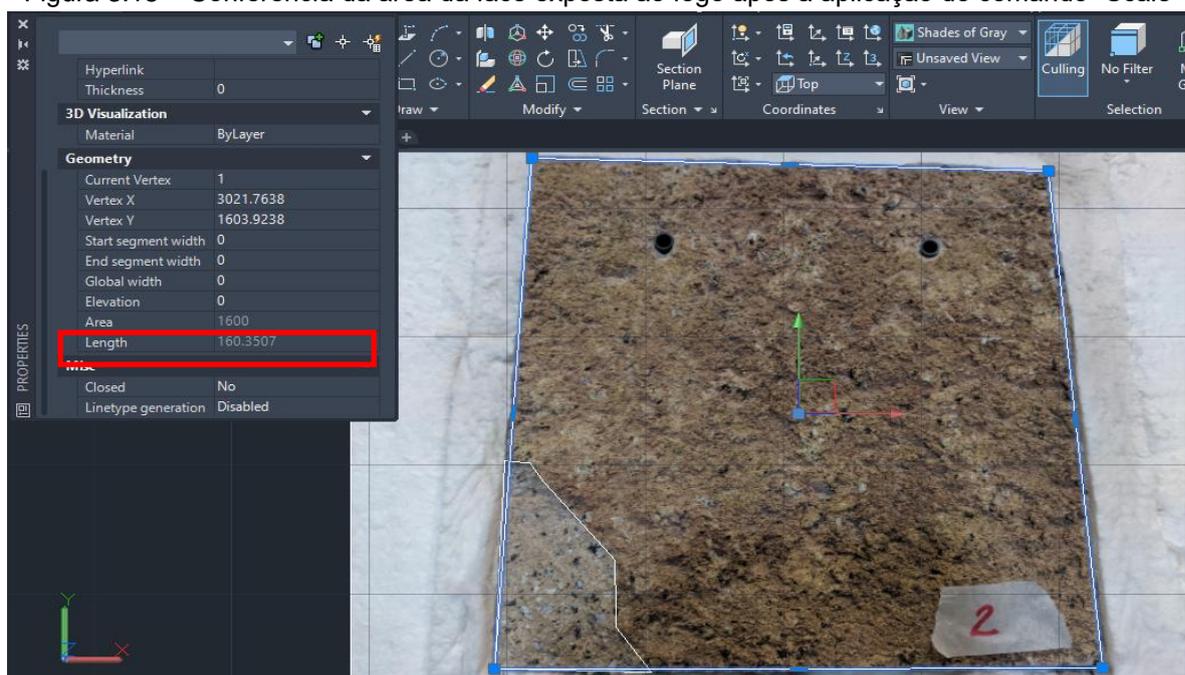
Equação (1)

### 3.9.5 Caracterização do lascamento

A verificação da ocorrência de lascamento é o cerne da metodologia. A determinação da ocorrência e a sua mensuração são aspectos importantes que deverão subsidiar os projetistas na verificação da segurança do revestimento do túnel. Em um primeiro momento, foi definido que o lascamento explosivo era um fenômeno que, durante o ensaio de exposição ao fogo, causa um estouro forte, que pode ser ouvido pelos técnicos do laboratório de ensaio e que causa perdas de, no mínimo, 10 % do volume original da peça de concreto (SYLVERIO, 2018). Dessa forma, procurou-se estabelecer novos critérios para essa determinação. Duas alternativas iniciais envolviam a consideração da área ou da profundidade atingida pelo lascamento (SYLVERIO; FIGUEIREDO; BERTO, 2020). Isto ocorreu pelo fato de o método de ensaio não fornecer um procedimento de caracterização do lascamento, portanto, essa caracterização foi feita com base nos trabalhos de Heo, Han e Kim (2015) e Nince (2006) que se valeram de medições manuais e cálculos a partir das fotos dos corpos de prova lascados. Outra estratégia para caracterização estabelecida neste trabalho foi a utilização das curvas de temperatura interna de cada placa para compor um critério de avaliação.

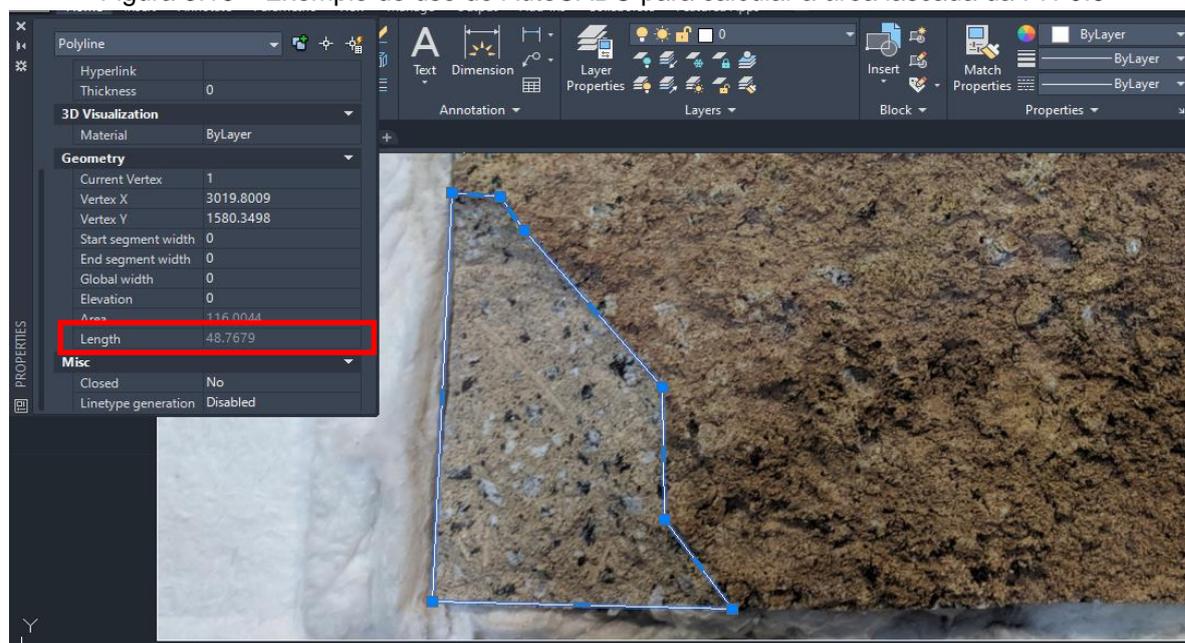
A área lascada na superfície exposta foi calculada por meio do software AutoCAD® 2020 da empresa Autodesk, Inc.. Primeiramente a foto de cada placa que sofreu algum tipo de lascamento foi importada para o software. Essa foto foi colocada em escala por meio do comando “*Scale*” de forma que a área da face exposta na figura fosse igual à área real conhecida, 1600 cm<sup>2</sup>, conforme apresentado na Figura 3.15. Após isso, a região lascada foi contornada por meio do comando “*Polyline*”. Com esse contorno selecionado é possível determinar a sua área por meio do comando “*Properties*”. A Figura 3.16 exemplifica a obtenção desses resultados no AutoCAD.

Figura 3.15 – Conferência da área da face exposta ao fogo após a aplicação do comando “Scale”



Fonte: Próprio autor

Figura 3.16 – Exemplo do uso do AutoCAD® para calcular a área lascada da PN-0.6



Fonte: Próprio autor

No entanto, a correlação entre a área lascada dos corpos de prova e os possíveis danos em um revestimento de túnel não é direta. Atualmente, modelos numéricos (DI CARLO; MEDA; RINALDI, 2018; BERNARDI et al., 2020; SERAFINI; DE LA FUENTE; FIGUEIREDO, 2021) representam o estado da arte para a avaliação da capacidade resistente pós-incêndio de revestimentos de túneis. A simulação das temperaturas no revestimento durante o incêndio é um pré-requisito para todos esses modelos, pois essas temperaturas influenciam na perda de

capacidade resistente ao longo da espessura do revestimento (SERAFINI et al., 2019; MEMON et al., 2019). Portanto, o comportamento térmico dos corpos de prova durante o ensaio pode representar qualitativamente o comportamento térmico do revestimento do túnel durante um incêndio e, por isso, a distribuição interna de temperaturas dos corpos de prova pode ser um dado mais útil para a aplicação real.

A profundidade lascada é um parâmetro que pode apresentar melhor correlação com a distribuição interna de temperaturas e deve ser considerado mais adequado para a caracterização do lascamento. Além disso, esse parâmetro pode ser empregado diretamente para simular a ocorrência de lascamento em modelos numéricos (SERAFINI; DE LA FUENTE; FIGUEIREDO, 2021). A profundidade do lascamento foi determinada a partir de uma trena certificada comparando a profundidade máxima de regiões lascadas em relação a regiões que não sofreram lascamento. A espessura de fragmentos eventualmente recuperados após o ensaio também foi medida. A partir dessas medições, foi definida uma faixa de profundidade lascada para cada placa usando os valores mínimo e máximo obtidos.

Também é interessante se aproveitar dos registros de temperatura dos termopares para a criação de um critério não subjetivo para constatação do lascamento explosivo no concreto, tendo como base um intervalo de tempo em que é verificado o aumento da temperatura que ocorre pela exposição das camadas internas do concreto. A adoção desse critério contribui para a unificação da análise dos resultados e, portanto, padronização da metodologia. Os seguintes critérios foram adotados para a aplicação dessa abordagem:

- a) Uso das curvas de temperatura média em cada profundidade, descartando medições equivocadas, conforme Seção 3.9.2, mas incluindo nessas médias os pontos em regiões que sofreram lascamento, de forma a representar o comportamento global de cada placa;
- b) O aumento de temperatura ocorre de forma súbita no lascamento explosivo e, portanto, deve-se definir um intervalo curto de tempo para a sua medição. A utilização de um intervalo foi considerada mais recomendável porque o uso de taxas instantâneas poderia resultar em variabilidades excessivas e, conseqüentemente, erros na constatação do lascamento;
- c) O aumento mínimo de temperatura deve estar associado a uma taxa de elevação média significativamente superior à verificada no material na

ausência de lascamento (Seção 5.5);

- d) O aumento mínimo de temperatura deve corresponder, para o intervalo de 5 minutos, a uma taxa de aquecimento inferior à da curva de incêndio nos primeiros 30 minutos do ensaio, pois este é o tempo em que a maioria das curvas utilizadas para verificações em túneis se estabilizam (EFNARC, 2006) e a maioria dos lascamentos explosivos ocorre (KHOURY, 2000).

O critério de avaliação baseado nas temperaturas internas das placas foi aplicado em cada placa a partir das curvas médias de temperatura para cada profundidade medida. A determinação do aumento de temperatura nos últimos cinco minutos ( $AT_5$ ) foi feita pela subtração da temperatura das curvas no tempo “t” pela temperatura no tempo “t - 5 min”, conforme apresentado na Equação (2).

$$\begin{aligned} AT_5(t) &= T(t) - T(0) && \text{para} && 0 < t < 5 \text{ min} \\ AT_5(t) &= T(t) - T(t - 5) && \text{para} && t \geq 5 \text{ min} \end{aligned} \quad \text{Equação (2)}$$

Para esta dissertação foi estabelecido inicialmente que a avaliação do  $AT_5$  seria considerada indicativa de lascamento explosivo quando superasse 120 °C na curva de temperatura média de, no mínimo, uma das profundidades (2,5 cm, 4,0 cm ou 7,5 cm). A profundidade até a qual o  $AT_5$  superasse 120 °C indicaria a profundidade mínima afetada pelo lascamento explosivo. Quando um corpo de prova apresentar danos na face exposta ao fogo, mas o  $AT_5$  permanecer inferior a 120 °C em todas as profundidades, será considerada ocorrência de lascamento superficial ou progressivo. No entanto, isto deve ser melhor avaliado no futuro quando uma base de dados for suficientemente robusta para a parametrização do critério.

### **3.9.6 Comparação do comportamento térmico do concreto projetado e concreto convencional**

Isso foi feito comparando as taxas de elevação interna de temperatura no concreto projetado deste estudo com as taxas de elevação obtidas por Serafini et al. (2019), que estudou um concreto convencional, destinado ao revestimento de um túnel construído com tuneladora e anéis pré-moldados.

A comparação com esse trabalho é interessante pois esses autores utilizaram o mesmo forno e curva de temperatura (Curva HC) para o ensaio. Além disso, a metodologia utilizada e condicionamento apresentaram semelhanças que permitiram uma comparação em que a variação mais significativa foi do tipo de concreto estudado: projetado ou convencional.

### 3.9.7 Condutividade térmica do concreto projetado

A condutividade térmica é um parâmetro essencial para a execução de simulações. Devido às diferenças entre o comportamento térmico do concreto projetado e concreto convencional (ver Seção 5.8), era interessante determinar esse parâmetro para o concreto projetado.

A condutividade térmica do concreto projetado foi avaliada através de dois métodos distintos. No primeiro método, foram realizadas simulações utilizando o modelo térmico implementado por Serafini, De La Fuente & Figueiredo (2021). Seguindo nomenclatura utilizada por esses autores, nas simulações foram adotados  $\alpha_c = 25 \text{ W/m}^2\text{K}$  e  $\varepsilon = 0,7$ , conforme recomendações respectivamente de Hurley et al. (2016) e do Eurocode (2004).

Os valores de calor específico ( $\text{J/kg}^\circ\text{C}$ ), condutividade térmica ( $\text{W/m}^\circ\text{C}$ ) e densidade ( $\text{kg/m}^3$ ) do concreto projetado utilizados nas simulações estão apresentados, respectivamente, nas Equações (3) a (5) e foram obtidos a partir do Eurocode (2004). A densidade a  $20^\circ\text{C}$  ( $\rho_{20^\circ\text{C}}$ ) foi considerada como  $2100 \text{ kg/m}^3$ , conforme caracterizado na Seção 3.5.2. O calor específico associado à evaporação da água a  $100^\circ\text{C}$  ( $C_{ev}$ ), foi adotado como  $1470 \text{ J/kg}^\circ\text{C}$  para a condição não saturada e  $2020 \text{ J/kg}^\circ\text{C}$  para a condição saturada, seguindo recomendações do Eurocode (2004). Para comparação com os dados experimentais, foram adotados diferentes valores iniciais para a condutividade térmica ( $K_0$ ).

$$C(T) = \begin{cases} 900, & 20^\circ\text{C} \leq T \leq 100^\circ\text{C} \\ C_{ev}, & 100^\circ\text{C} < T \leq 115^\circ\text{C} \\ 1000 + \left(\frac{1000 - C_{ev}}{85}\right) \times (T - 200), & 115^\circ\text{C} < T \leq 200^\circ\text{C} \\ 1000 + (T - 200)/2, & 200^\circ\text{C} < T \leq 400^\circ\text{C} \\ 1100, & 400^\circ\text{C} < T \leq 1200^\circ\text{C} \end{cases} \quad \text{Equação (3)}$$

$$K_{inferior}(T) = K_0 - 0.136 \left(\frac{T}{100}\right) + 0.0057 \left(\frac{T}{100}\right)^2, \quad 20^\circ\text{C} \leq T \leq 1200^\circ\text{C} \quad \text{Equação (4)}$$

$$\rho(T) = \begin{cases} \rho_{20^\circ\text{C}}, & 20^\circ\text{C} \leq T \leq 115^\circ\text{C} \\ \rho_{20^\circ\text{C}}(1 - 0.02(T - 115)/85), & 115^\circ\text{C} < T \leq 200^\circ\text{C} \\ \rho_{20^\circ\text{C}}(0.98 - 0.03(T - 200)/200), & 200^\circ\text{C} < T \leq 400^\circ\text{C} \\ \rho_{20^\circ\text{C}}(0.95 - 0.07(T - 400)/800), & 400^\circ\text{C} < T \leq 1200^\circ\text{C} \end{cases} \quad \text{Equação (5)}$$

Não foi considerada a ocorrência de lascamento no modelo térmico porque a comparação com os dados experimentais foi realizada utilizando apenas as curvas obtidas de regiões que não sofreram lascamento. A partir das curvas de elevação de

temperatura obtidas na simulação, foram determinadas as taxas internas de elevação de temperatura (ver Seção 3.9.4) para cada  $K_0$ , as quais foram comparadas com as taxas obtidas dos dados experimentais.

No segundo método, foi determinada a difusividade térmica do concreto projetado a partir das curvas experimentais e, posteriormente, a sua condutividade térmica para cada condição de umidade com base no procedimento proposto por Zhang et al. (2021b). As difusividades térmicas ( $\xi$ ) foram determinadas a partir da Equação (6), onde  $\Delta t$  é o intervalo de 30 segundos entre cada medição dos termopares;  $T_{x,t}$  é a temperatura para cada profundidade de medição  $X$  (2,5 cm, 4,0 cm ou 7,5 cm) no tempo  $t$ .

$$\xi(t) = \frac{T_{40,t} - T_{40,t-\Delta t}}{\frac{2\Delta t}{0,05} \left( \frac{T_{25,t} - T_{40,t}}{0,015} - \frac{T_{40,t} - T_{75,t}}{0,035} \right)} \quad \text{Equação (6)}$$

A condutividade térmica ( $K$ ) para cada condição de saturação foi determinada a partir da Equação (7), onde  $\xi$  é a difusividade térmica calculada anteriormente e  $\rho$  e  $C$  são, respectivamente, a densidade e o calor específico, obtidos com os mesmos valores adotados nas simulações descritas anteriormente. Essas condutividades térmicas são representadas somente entre 150 °C e 400 °C devido a imprecisões causadas pela evaporação da água, aumento rápido da temperatura no começo do ensaio e limitações nas temperaturas alcançadas nos corpos de prova nos ensaios.

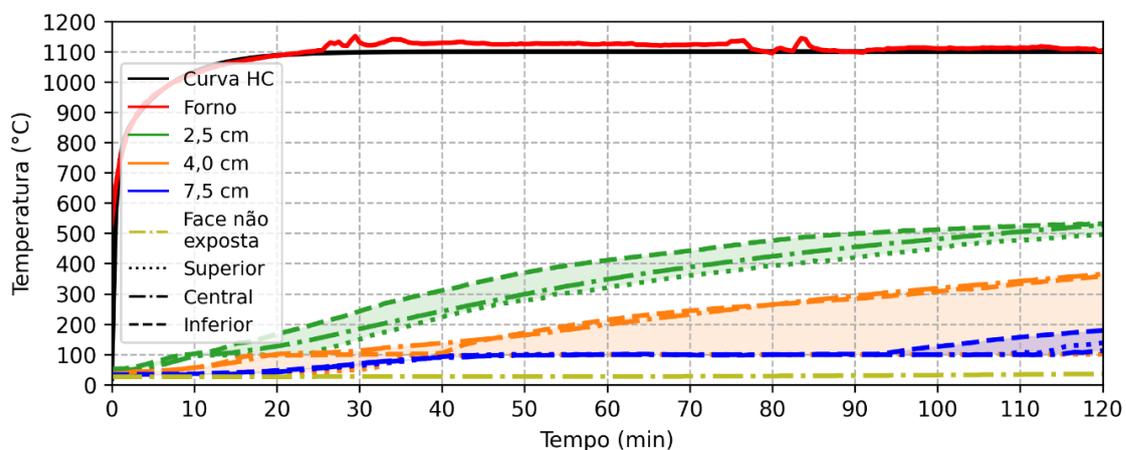
$$K(T) = \rho(T) \times C(T) \times \xi(T) \quad \text{Equação (7)}$$

## 4 RESULTADOS

### 4.1 CONDIÇÃO NÃO SATURADA

O Gráfico 4.1 apresenta a elevação de temperaturas na PN-0.6. Após o ensaio constatou-se que houve lascamento no canto inferior esquerdo da face exposta ao fogo, conforme apresentado na Figura 4.1. A caracterização desse lascamento está apresentada na Tabela 4.1.

Gráfico 4.1 – Elevação de temperaturas na PN-0.6



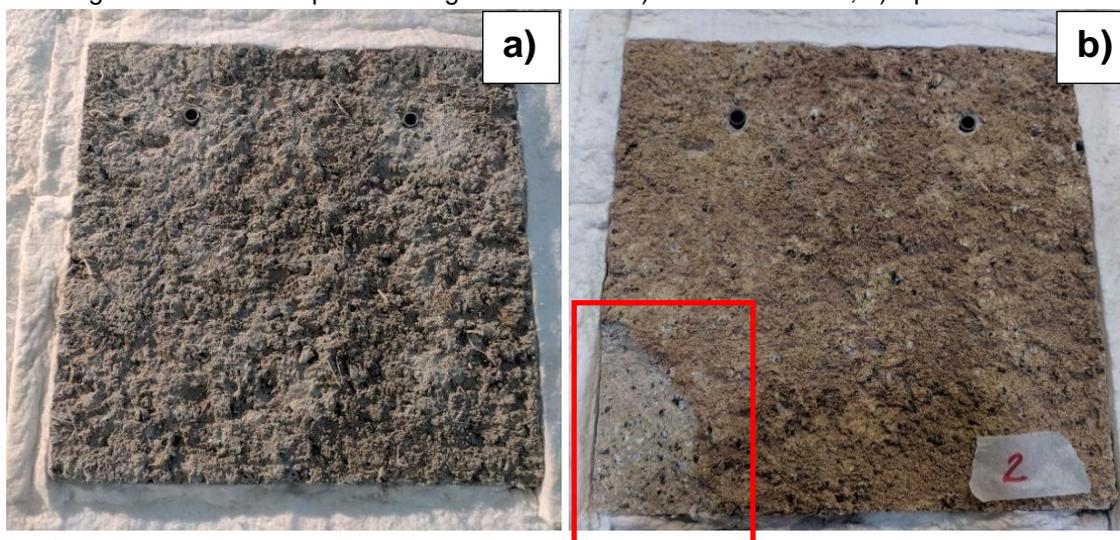
Fonte: Próprio autor

Tabela 4.1 – Caracterização do lascamento ocorrido na PN-0.6

Parâmetro do lascamento	Valor	% do total
Área lascada	116 cm <sup>2</sup>	7,3 %
Profundidade lascada	1,0 a 1,5 cm	4 a 6 %

Fonte: Próprio autor

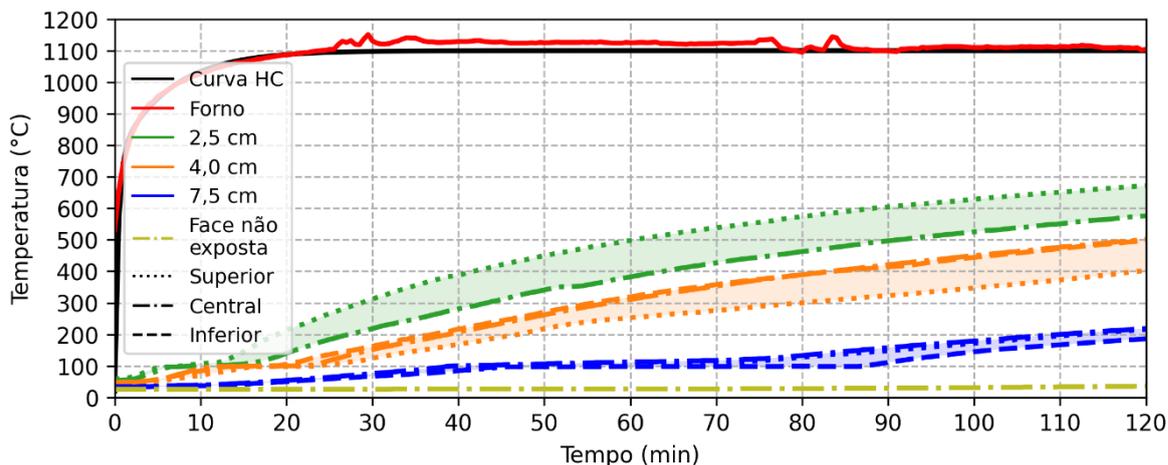
Figura 4.1 – Face exposta ao fogo da PN-0.6 - a) Antes do ensaio; b) Após o ensaio.



Fonte: Próprio autor

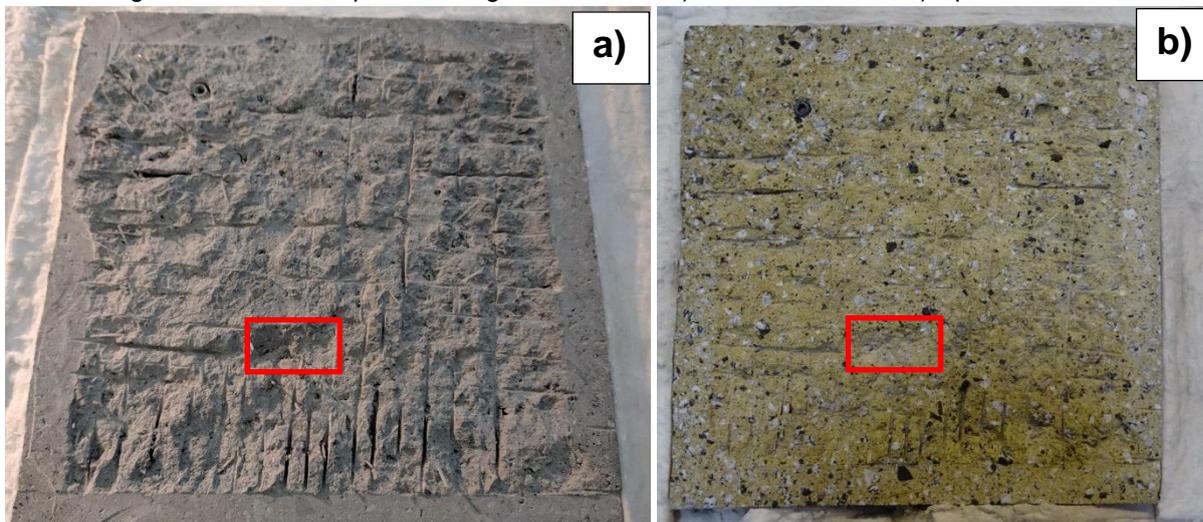
O Gráfico 4.2 apresenta a elevação de temperaturas na PN-0.8. Nesta placa não foi verificada a ocorrência de lascamento, conforme apresentado na Figura 4.2. Destaca-se que o defeito próximo ao centro da placa, realçado pelo retângulo vermelho, já era pré-existente.

Gráfico 4.2 – Elevação de temperaturas na PN-0.8



Fonte: Próprio autor

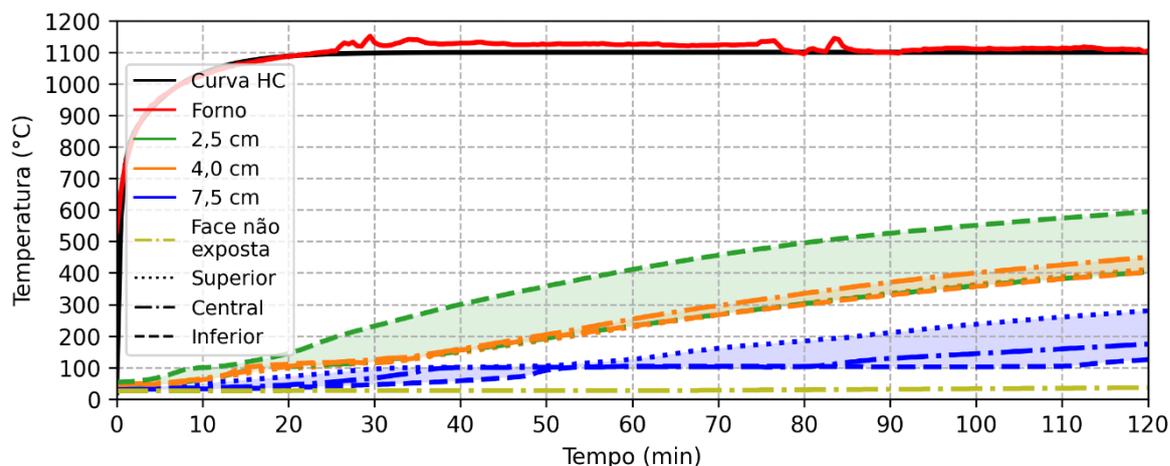
Figura 4.2 – Face exposta ao fogo da PN-0.8 - a) Antes do ensaio; b) Após o ensaio.



Fonte: Próprio autor

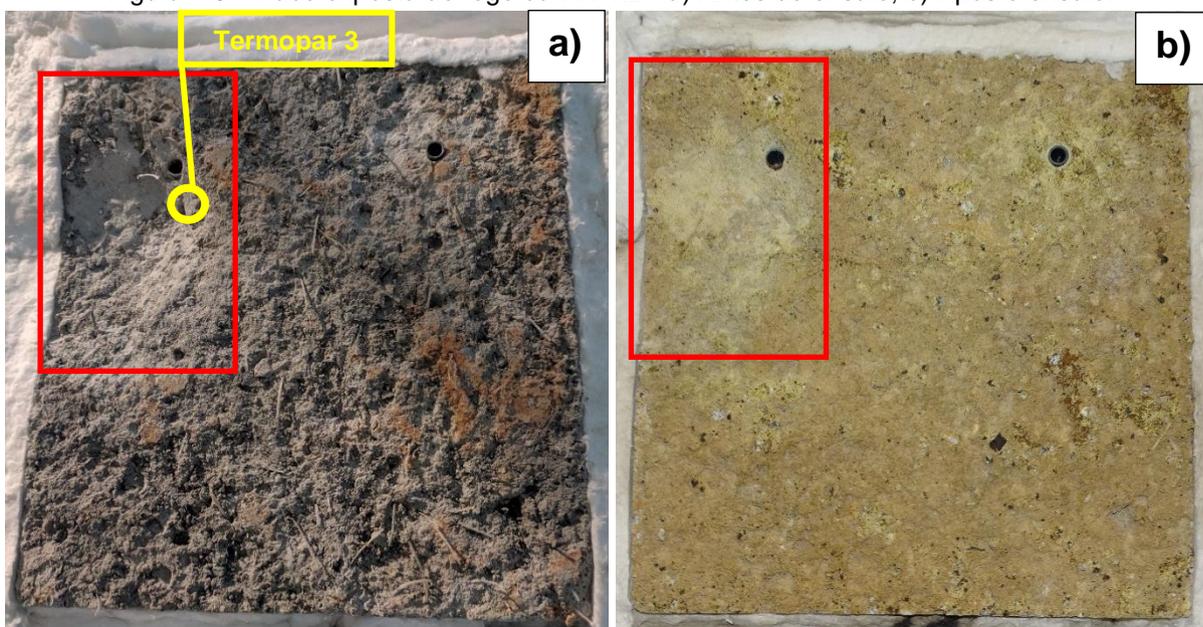
O Gráfico 4.3 apresenta a elevação de temperaturas na PN-1.2. O termopar 1 (canto superior direito da face exposta ao fogo em profundidade de 2,5 cm) apresentou problema no início do ensaio e por isso foi descartado. Nesta placa não foi verificada a ocorrência de lascamento. Destaca-se que o defeito na porção superior esquerda da placa, realçado pelo retângulo vermelho, já era pré-existente ao ensaio, conforme apresentado na Figura 4.3.

Gráfico 4.3 – Elevação de temperaturas na PN-1.2.



Fonte: Próprio autor

Figura 4.3 – Face exposta ao fogo da PN-1.2 - a) Antes do ensaio; b) Após o ensaio.



Fonte: Próprio autor

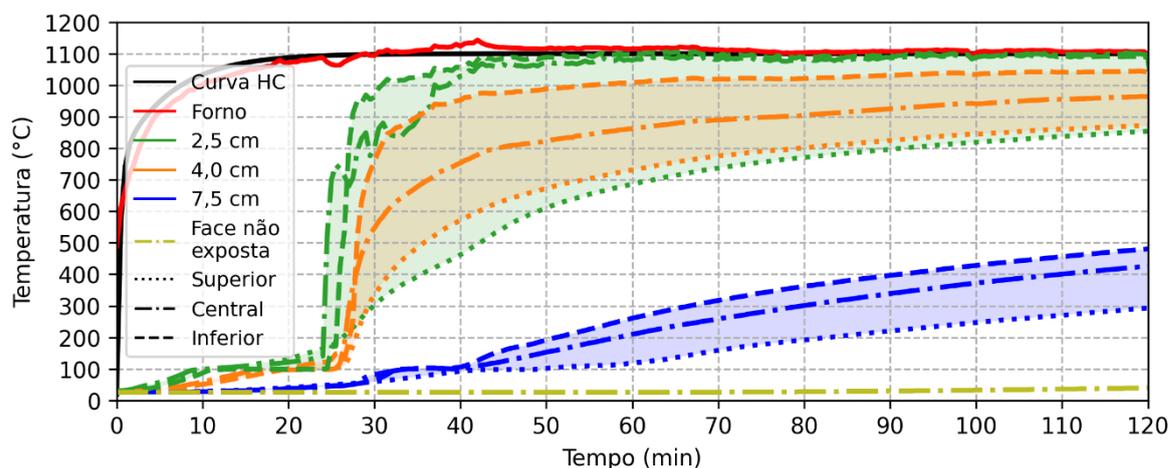
## 4.2 CONDIÇÃO SATURADA

Durante o ensaio com as placas saturadas, observou-se a ocorrência de dois estouros: o primeiro, verificado aos 24 minutos de exposição ao fogo e com grande intensidade; o segundo, verificado após 39 minutos, com uma intensidade menor que o primeiro. Pela análise dos corpos de prova e curvas de temperatura ficou evidente que esses estouros estavam associados à ocorrência de lascamentos explosivos na PS-0.6.

O Gráfico 4.4 apresenta a elevação de temperaturas na PS-0.6. Parte dos termopares nas profundidades de 2,5 cm e 4,0 cm foram totalmente expostos devido

ao lascamento explosivo, como indicado na Figura 4.4. O restante dos termopares teve seu cobertura significativamente reduzido. O lascamento explosivo foi confirmado pelo aumento súbito na temperatura medida por esses termopares aos 24 minutos de ensaio, mesmo tempo em que se verificou o primeiro estouro.

Gráfico 4.4 – Elevação de temperaturas na PS-0.6



Fonte: Próprio autor

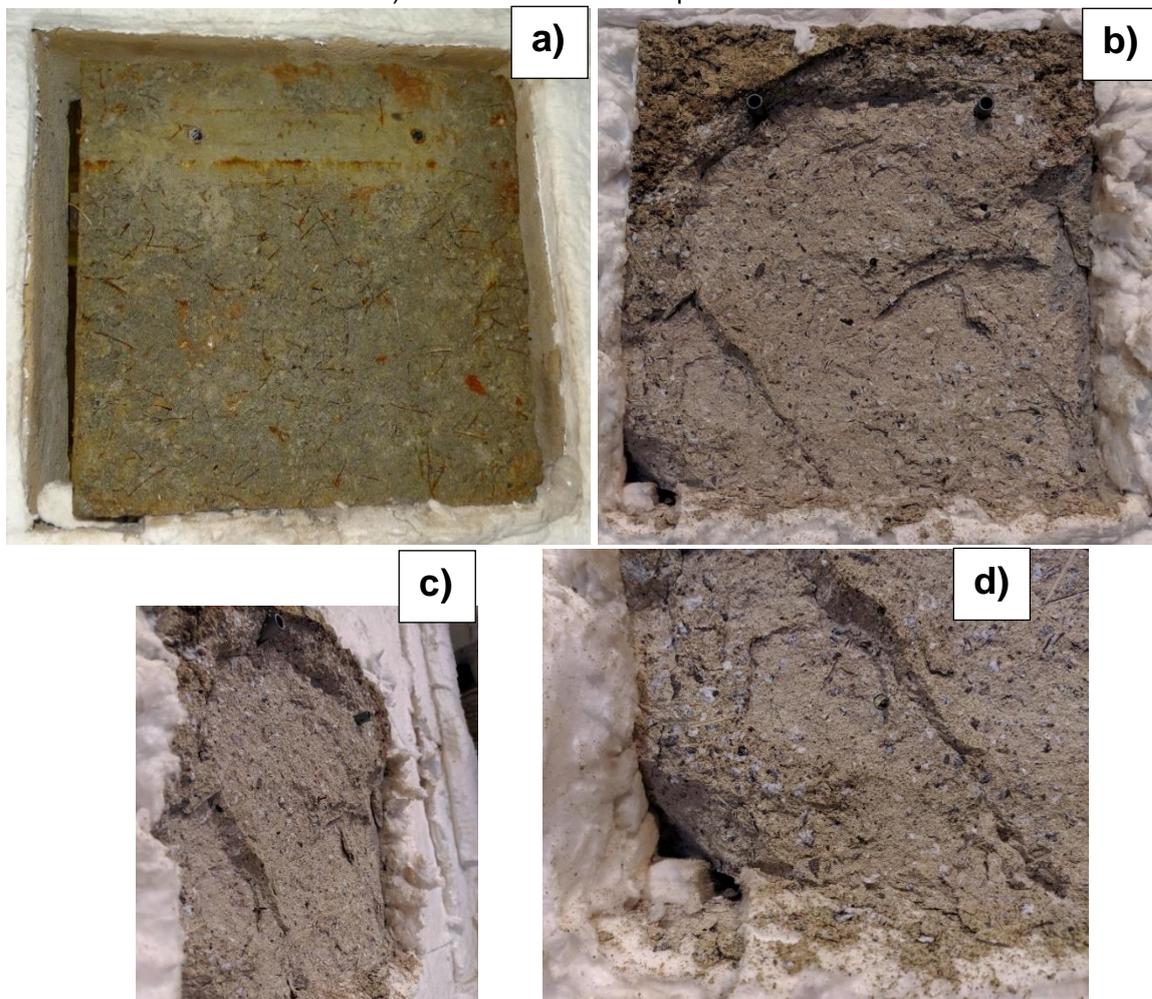
Figura 4.4 – Termopares expostos após lascamento explosivo, destacados pelos círculos amarelos.



Fonte: Próprio autor

O lascamento explosivo que já havia sido constatado pela súbita elevação das temperaturas internas pôde ser confirmado pela análise da face exposta ao fogo antes e depois do ensaio. A PS-0.6 sofreu danos na maior parte da sua face exposta, conforme apresentado na Figura 4.5. A caracterização do lascamento está apresentada na Tabela 4.2. Na Figura 4.6 são apresentados registros visuais da ocorrência do lascamento explosivo na PS-0.6.

Figura 4.5 – Face exposta ao fogo da PS-0.6 - a) Antes do ensaio; b) Após o ensaio; c) Vista lateral; d) Detalhe do dano mais profundo.



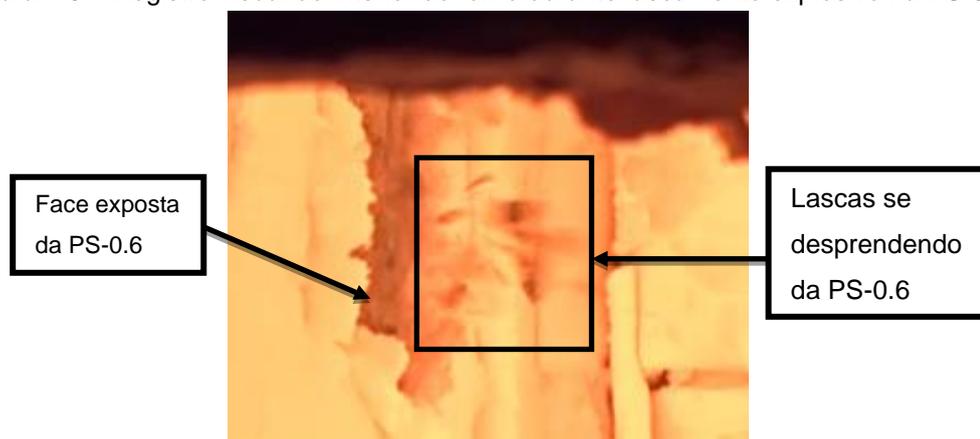
Fonte: Próprio autor

Tabela 4.2 – Caracterização do lascamento ocorrido na PS-0.6

Parâmetro do lascamento	Valor	% do total
Área lascada	1407 cm <sup>2</sup>	87,9 %
Profundidade lascada	3,5 a 8,0 cm	14 a 32 %

Fonte: Próprio autor

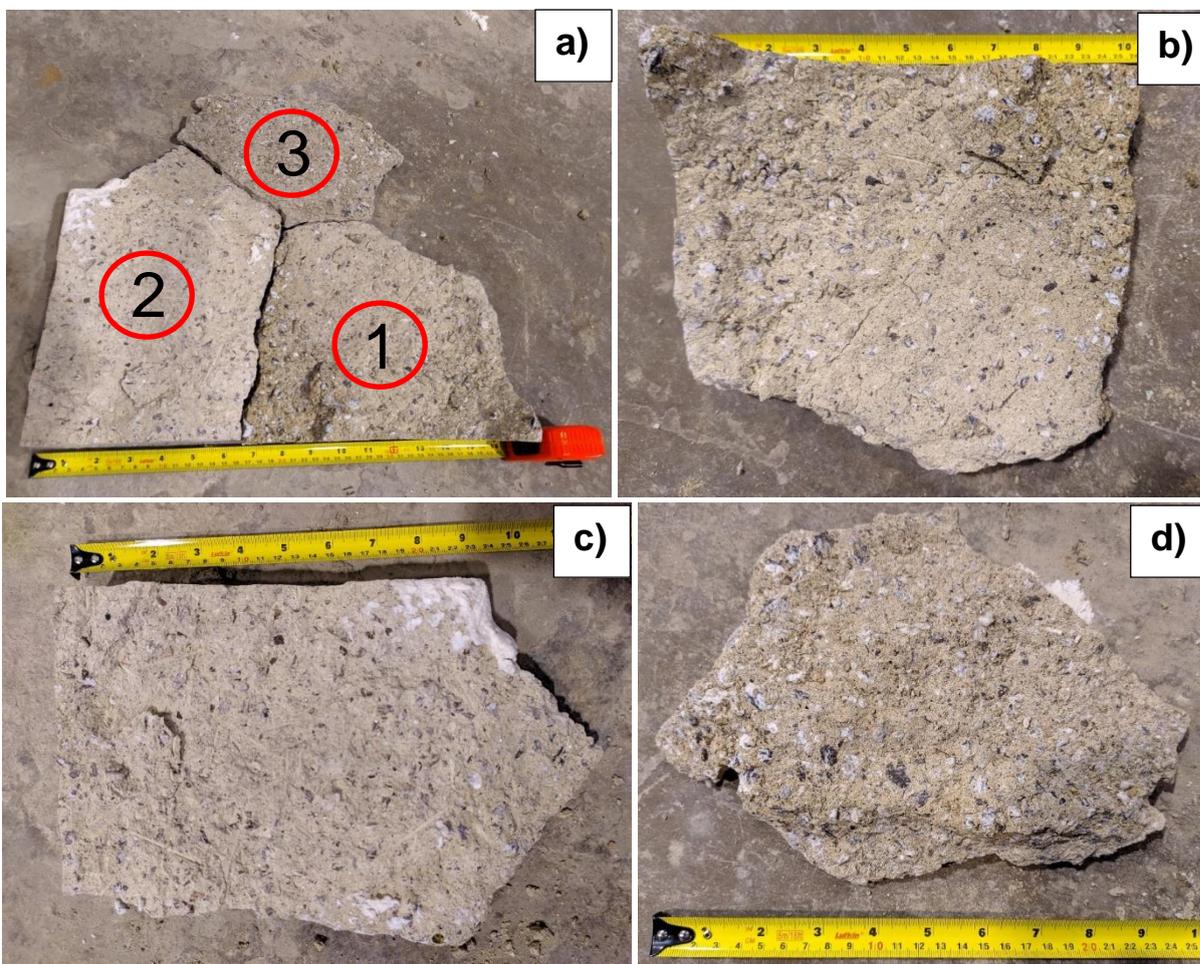
Figura 4.6 – Registro visual do interior do forno durante lascamento explosivo na PS-0.6.



Fonte: EQUIPE DO LSFEX (2020)

Além desses registros, foram coletados fragmentos que haviam se desprendido do corpo de prova, conforme apresentado na Figura 4.7. Esses fragmentos foram medidos e suas dimensões estão apresentadas na Tabela 4.3.

Figura 4.7 – Fragmentos da PS-0.6 coletados após o ensaio – a) Fragmentos montados na posição original em que estavam na placa; b) Fragmento 1; c) Fragmento 2; d) Fragmento 3.



Fonte: Próprio autor

Tabela 4.3 – Dimensões dos fragmentos coletados da PS-0.6

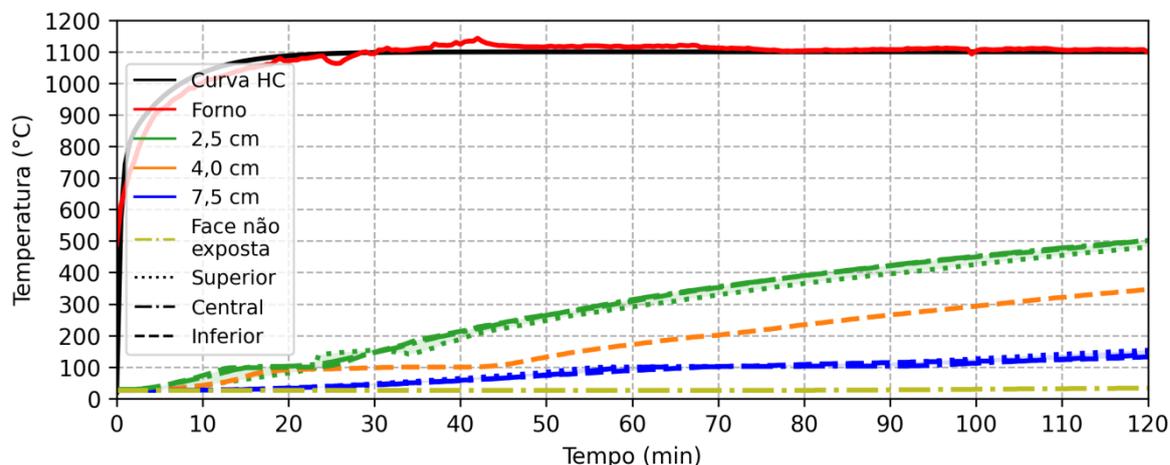
Fragmento (numerados de acordo com a Figura 4.7)	Dimensões máximas		
	Largura (cm)	Altura (cm)	Espessura (cm)
1	26	23	8
2	30	20	4,5
3	25	17	3,5

Fonte: Próprio autor

O Gráfico 4.5 apresenta a elevação de temperaturas na PS-0.8. Os termopares 2 (porção superior central da face exposta ao fogo em profundidade de 4,0 cm) e 6 (porção central esquerda da face exposta ao fogo em profundidade de 4,0 cm) apresentaram problemas antes do ensaio e foram descartados. A PS-0.8 sofreu um dano por lascamento superficial em sua porção central, conforme

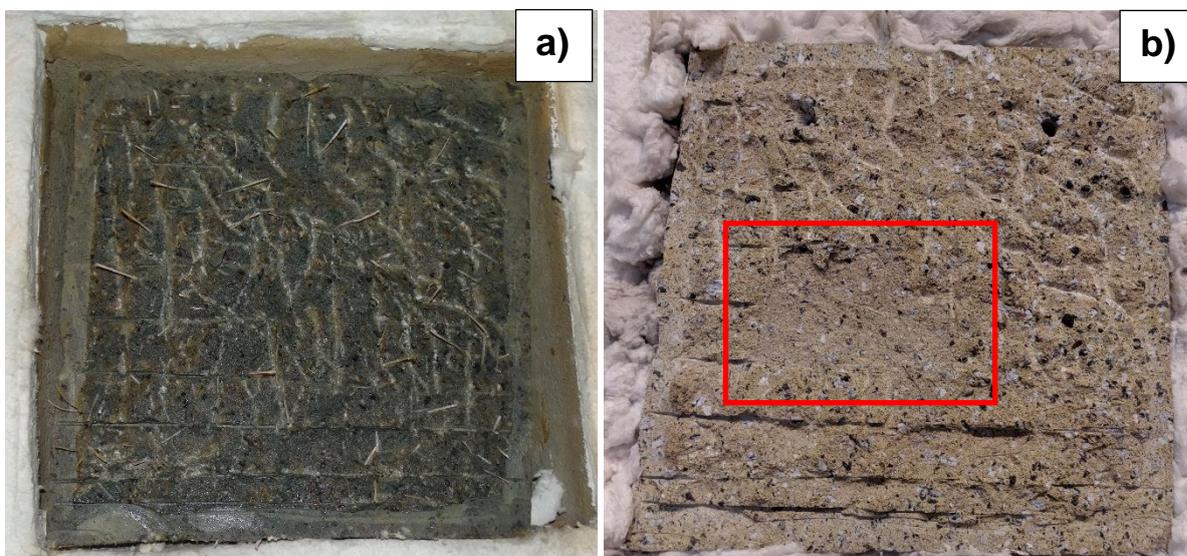
apresentado na Figura 4.8. A caracterização do lascamento está apresentada na Tabela 4.4. Após o ensaio foi coletado um fragmento pertencente a essa placa, o qual está apresentado na Figura 4.9, com suas dimensões indicadas na Tabela 4.5.

Gráfico 4.5 – Elevação de temperaturas na PS-0.8



Fonte: Próprio autor

Figura 4.8 – Face exposta ao fogo da PS-0.8 - a) Antes do ensaio; b) Após o ensaio.



Fonte: Próprio autor

Tabela 4.4 – Caracterização do lascamento ocorrido na PS-0.8

Parâmetro do lascamento	Valor	% do total
Área lascada	131 cm <sup>2</sup>	8,2 %
Profundidade lascada	0,5 a 1,0 cm	2 a 4 %

Fonte: Próprio autor

Tabela 4.5 – Dimensões do fragmento coletado da PS-0.8

Fragmento (único coletado para essa placa)	Dimensões máximas		
	Largura (cm)	Altura (cm)	Espessura (cm)
1	9	8	1

Fonte: Próprio autor

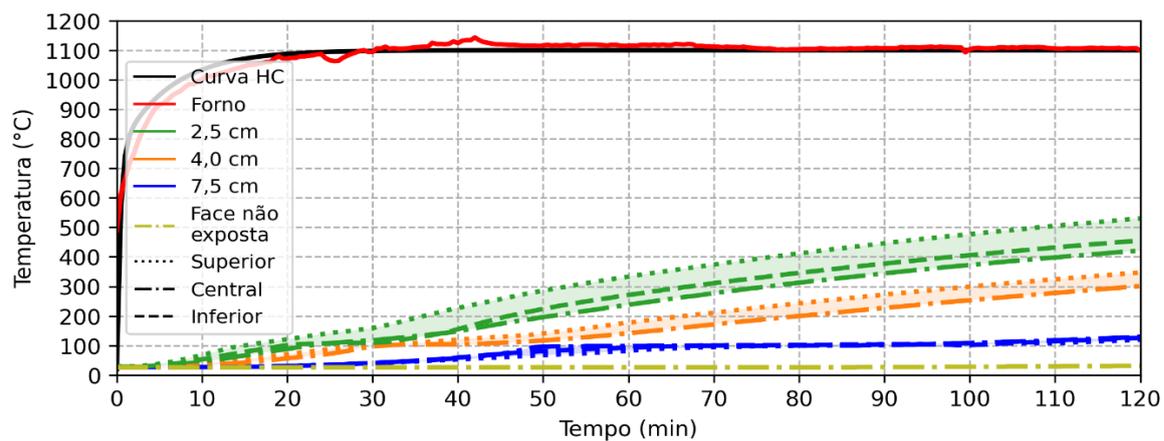
Figura 4.9 – Fragmento pertencente à PS-0.8, coletado após o ensaio.



Fonte: Próprio autor

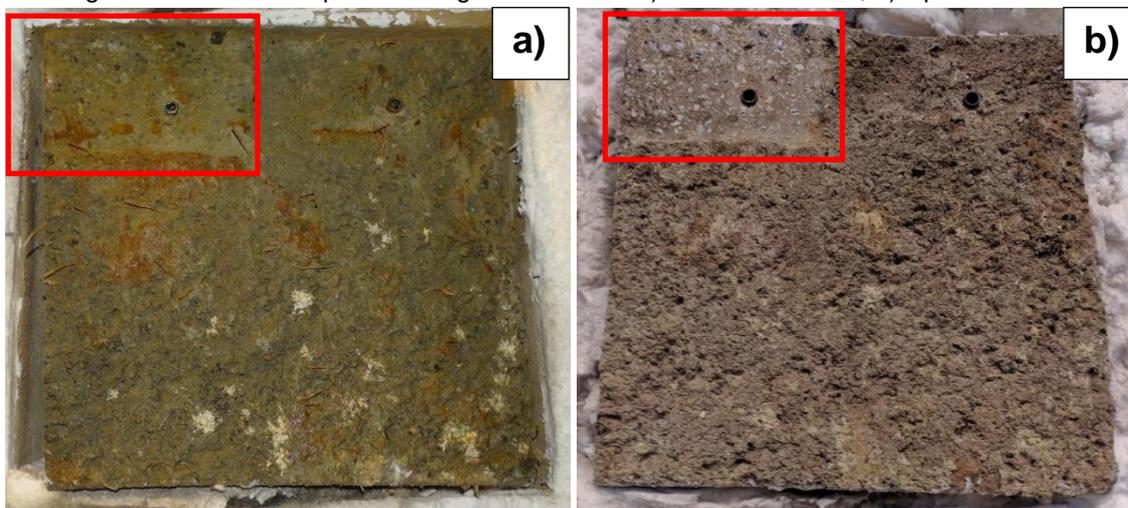
O Gráfico 4.6 apresenta a elevação de temperaturas na PS-1.2. O termopar 7 (canto inferior direito da face exposta ao fogo em profundidade de 4,0 cm) apresentou problemas antes do ensaio e foi descartado. Esta placa não sofreu lascamento, conforme apresentado na Figura 4.10. Destaca-se que o defeito no canto superior esquerdo, realçado pelo retângulo vermelho, já era pré-existente.

Gráfico 4.6 – Elevação de temperaturas na PS-1.2



Fonte: Próprio autor

Figura 4.10 – Face exposta ao fogo da PS-1.2 - a) Antes do ensaio; b) Após o ensaio.



Fonte: Próprio autor

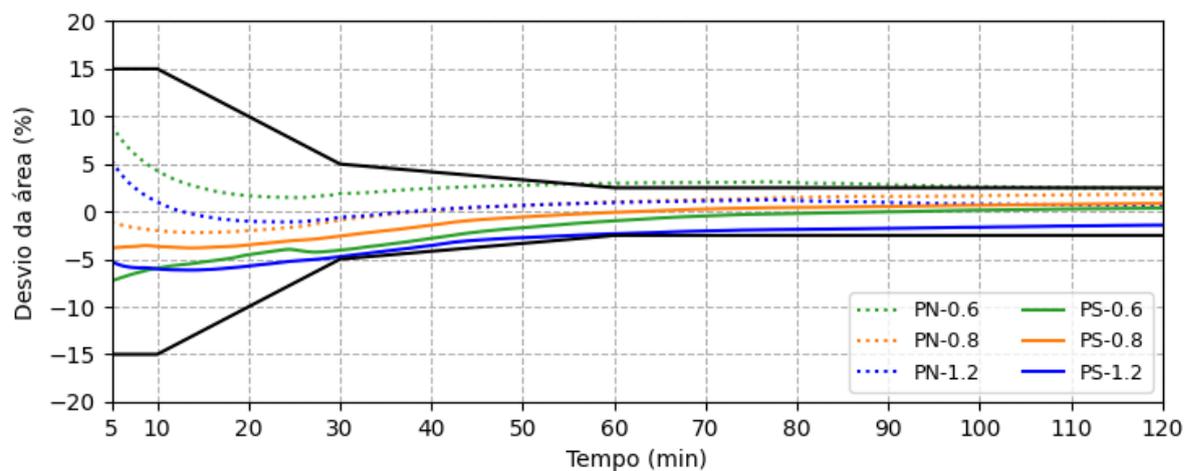
## **5 ANÁLISE DOS RESULTADOS**

A seguir são apresentadas a verificação das tolerâncias dos ensaios, a análise estatística das curvas, composição das curvas médias e taxas de elevação de temperatura para as duas condições de saturação e as curvas médias de elevação que caracterizaram a ocorrência de lascamento explosivo. É feita uma comparação entre a condição saturada e não saturada e definida a condição crítica para o ensaio. A caracterização do lascamento é analisada tendo em vista sua representatividade para a situação real e, a partir disso, é definido um critério para constatação da ocorrência do lascamento explosivo. Ao final, é feita uma comparação entre o comportamento térmico do concreto projetado e concreto convencional.

### **5.1 VERIFICAÇÃO DAS TOLERÂNCIAS DOS ENSAIOS**

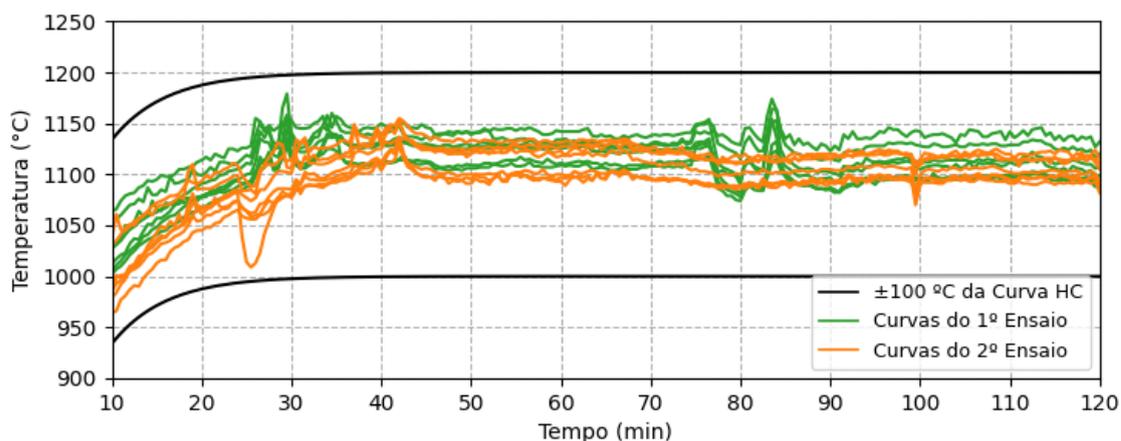
O Gráfico 5.1 apresenta a diferença percentual da área sob a curva de temperatura simulada em cada placa em relação à área da Curva HC, bem como as limitações definidas para esse desvio segundo a norma EN 1363-2 (1999). Somente a curva simulada na PN-0.6 ficou fora das limitações, apresentando um desvio positivo um pouco superior ao previsto na EN 1363-2 (1999) após 55 minutos de ensaio. Destaca-se que esse desvio positivo está a favor da segurança e que as normas reguladoras de diretrizes de ensaios de resistência ao fogo, ABNT NBR 16965 (2021) e EN 1363-1 (2012), permitem o aceite dos resultados nessas condições. O Gráfico 5.2 apresenta as curvas de temperatura de cada termopar do forno em ambos os ensaios e a tolerância definida pelo limite de variação de temperatura de  $\pm 100$  °C permitido em relação à curva HC. Neste caso, todos os valores permaneceram dentro das limitações. Frente ao exposto, os resultados de ambos os ensaios podem ser considerados válidos para o estudo.

Gráfico 5.1 – Desvio da área sob a curva de temperatura simulada em cada placa em relação à área da Curva HC



Fonte: Próprio autor

Gráfico 5.2 – Temperaturas medidas no forno em relação à variação permitida de  $\pm 100$  °C da Curva HC



Fonte: Próprio autor

## 5.2 ANÁLISE ESTATÍSTICA DAS CURVAS DE TEMPERATURA

Os resultados da análise estatística das curvas de temperatura, a partir da verificação com os intervalos de confiança, estão resumidos na Tabela 5.1. Os números apresentados se referem à numeração dada a cada termopar, conforme Figura 3.6.

Tabela 5.1 – Resumo da análise estatística das curvas de temperatura

Corpo de prova	Termopares dentro do intervalo de confiança (utilizados)			Termopares fora do intervalo de confiança (desconsiderados)		
	2,5 cm	4,0 cm	7,5 cm	2,5 cm	4,0 cm	7,5 cm
PN-0.6	1, 5	6	3, 8	-	2, 7	4
PN-0.8	5	2	3, 8	1	6, 7	4
PN-1.2	9	2, 6, 7	4	5		3, 8
PS-0.6	-	-	-	-	-	-
PS-0.8	1, 9	7	4	-	-	3, 8
PS-1.2	1, 5, 9	2, 6	8	-	-	3, 4

Fonte: Próprio autor

### 5.3 INFLUÊNCIA DO TEOR DE MICROFIBRAS POLIMÉRICAS NO DESENVOLVIMENTO DAS TEMPERATURAS INTERNAS

Segundo Zhang et al. (2021b), maiores teores de fibras poliméricas geram menores condutividades térmicas no concreto e, portanto, menores temperaturas nas curvas de elevação e maiores gradientes térmicos no material. Como somente o teor de microfibras variou neste estudo e essa variação ocorreu em porcentagens ínfimas em relação ao volume de concreto (variação máxima de 0,04 % em volume), não era esperada uma correlação significativa entre o teor de microfibras e as temperaturas finais nas placas. Isso foi comprovado pela obtenção de coeficientes de correlação de Pearson mais próximos de zero para as três profundidades em que a temperatura foi registrada, conforme apresentado na Tabela 5.2.

Tabela 5.2 – Temperaturas médias finais e coeficientes de correlação de Pearson para cada profundidade

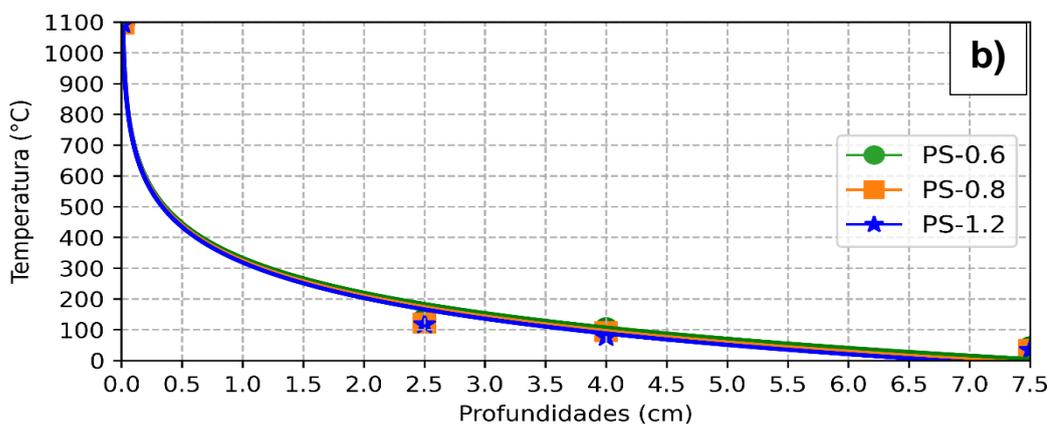
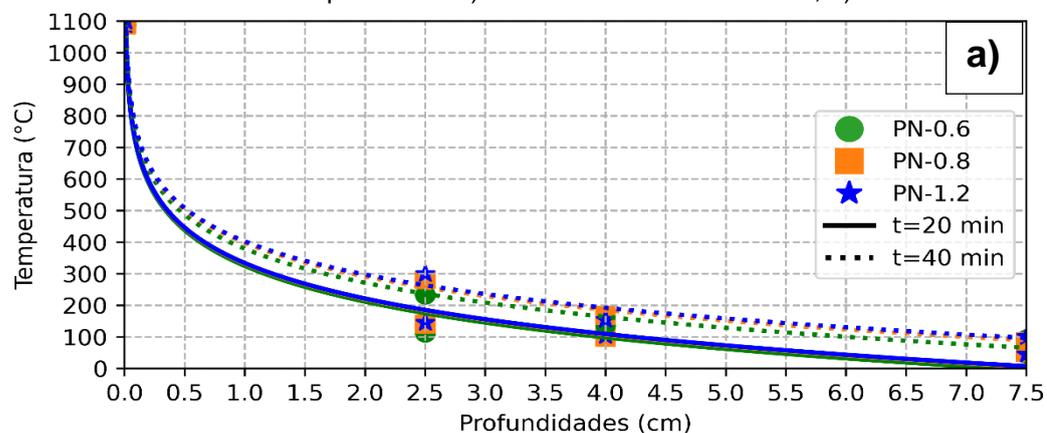
Corpo de prova	Teor de microfibras (kg/m <sup>3</sup> )	Temperatura finais nas curvas médias (°C)		
		2,5 cm	4,0 cm	7,5 cm
PN-0.6	0,6	511	365	158
PN-0.8	0,8	576	403	201
PN-1.2	1,2	594	421	174
PS-0.6	0,6	-	-	-
PS-0.8	0,8	491	346	139
PS-1.2	1,2	469	324	126
<b>Coefficiente de correlação de Pearson</b>		<b>0,10</b>	<b>0,04</b>	<b>-0,24</b>

Fonte: Próprio autor

Adicionalmente, foram comparados os perfis de temperatura ao longo da seção de concreto das placas não saturadas em t=20 min e t=40 min, quando se observam os lascamentos (KHOURY, 2000) e das placas saturadas em t=24 min, logo antes da ocorrência do lascamento explosivo na PS-0.6. Todos os perfis se mostraram muito semelhantes em todos os tempos verificados, conforme

apresentado no Gráfico 5.3. Isso mostra que variações no teor de microfibras poliméricas só interferem significativamente no desenvolvimento das temperaturas e formação de gradientes térmicos através da prevenção ao lascamento.

Gráfico 5.3 – Perfis de temperatura – a) PN em t=20 min e t=40 min; b) PS em t=24 min

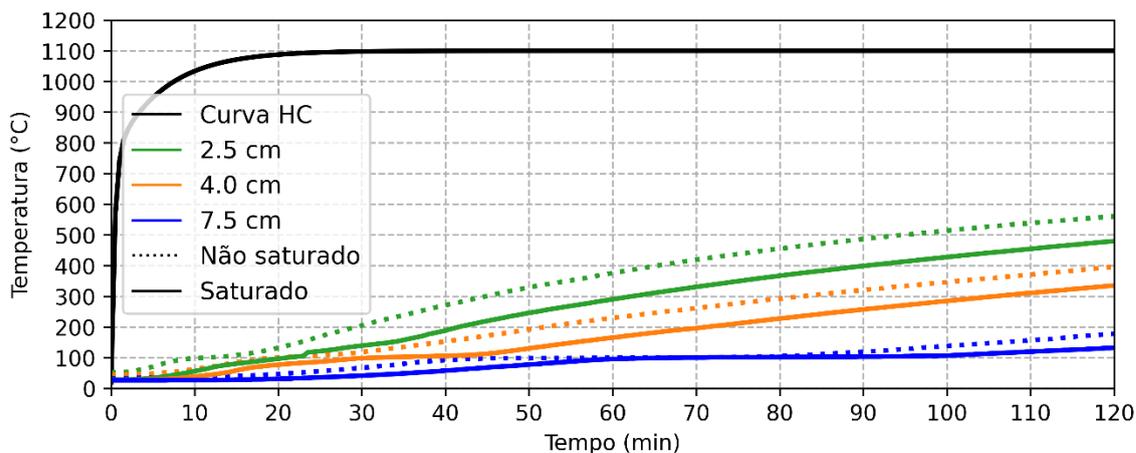


Fonte: Próprio autor

#### 5.4 CURVAS MÉDIAS DE TEMPERATURA

As curvas médias de elevação de temperatura estão apresentadas no Gráfico 5.4. As temperaturas na face não exposta ao fogo das placas quase não se alteraram durante os ensaios e, portanto, não são apresentadas.

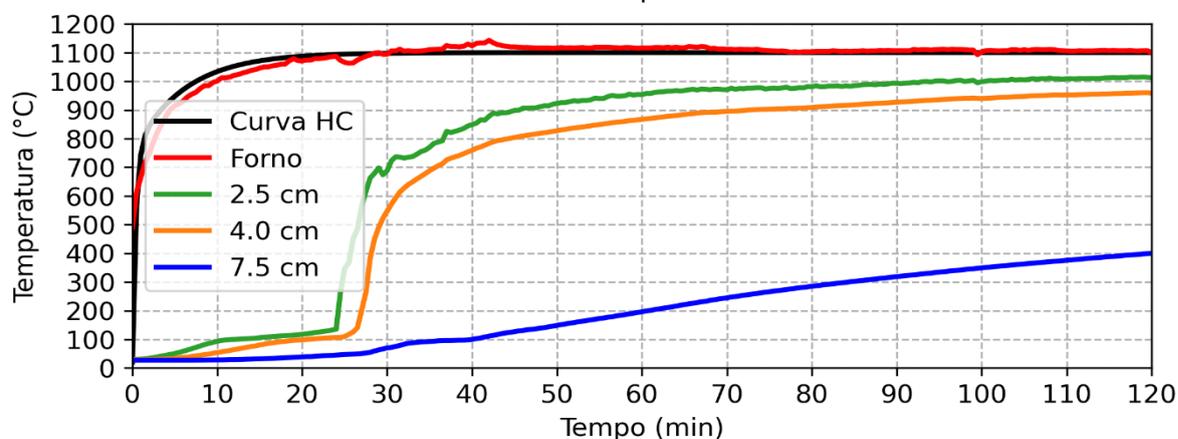
Gráfico 5.4 – Elevação média de temperatura em cada profundidade para ambas as condições de saturação



Fonte: Próprio autor

No Gráfico 4.9 estão apresentadas as curvas médias de elevação de temperatura para a PS-0.6, a qual sofreu lascamento explosivo. As curvas médias das outras placas apresentaram incrementos de temperatura progressivos, porém, a PS-0.6 apresentou súbita elevação de temperatura nas profundidades de 2,5 cm e 4 cm após o primeiro estouro. A curva relativa à profundidade de 7,5 cm também apresentou um aumento na temperatura logo após o primeiro estouro. Após o segundo estouro, a inclinação dessa curva se altera novamente, indicando nova perda de cobertura na seção. Na PS-0.6, na profundidade de 7,5 cm, alcançou-se temperaturas máximas de 500 °C, aproximadamente 300 °C acima do verificado nas demais placas para a mesma profundidade.

Gráfico 5.5 – Elevação média de temperatura em cada profundidade da PS-0.6, que sofreu lascamento explosivo



Fonte: Próprio autor

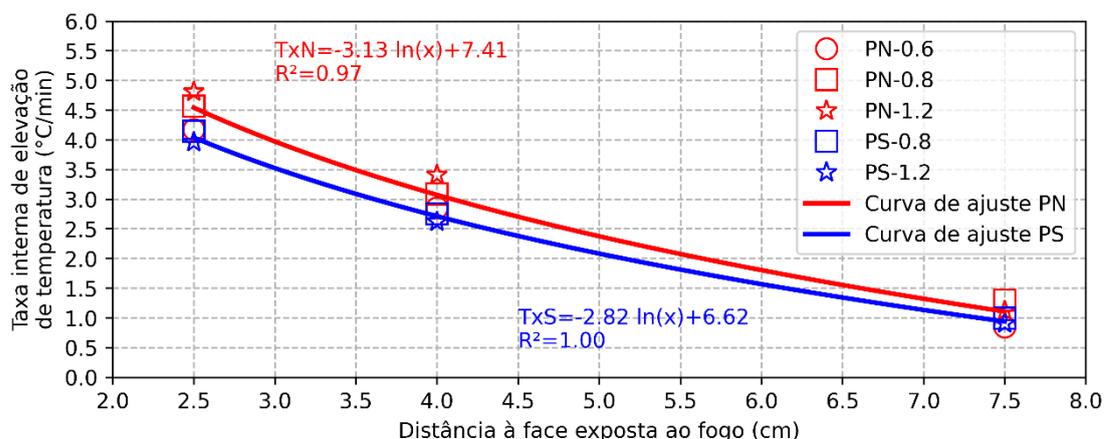
## 5.5 COMPARAÇÃO ENTRE A CONDIÇÃO SATURADA E NÃO SATURADA

Devido ao seu alto calor específico, a água ajuda a retardar o aumento das temperaturas internas no concreto, o que é mais intensamente verificado nos corpos de prova saturados. Além disso, a maior quantidade de água resulta na formação de patamares de evaporação aos 100 °C, o que retarda ainda mais a elevação das temperaturas (LAI; WANG; XIE, 2014). Esses aspectos contribuem para que as placas não saturadas apresentem temperaturas maiores que as placas saturadas, como demonstrado anteriormente no Gráfico 5.4.

Foram determinadas as taxas de elevação interna de temperatura (ver 3.9.4), que estão apresentadas no Gráfico 5.6. As equações das curvas de ajuste também são apresentadas, sendo TxN e TxS relacionadas, respectivamente, à condição não saturada e saturada.

A condição saturada apresenta menores taxas internas de elevação de temperatura que a condição não saturada. Essas menores taxas indicam que o calor é transferido mais lentamente para o interior do material na condição saturada, o que está de acordo com a literatura (LAI; WANG; XIE, 2014). Uma vez que a temperatura na face exposta ao fogo é a mesma para qualquer condição, menores taxas de elevação de temperatura induzirão maiores gradientes térmicos na condição saturada. Maiores gradientes térmicos se traduzem em maiores tensões geradas no material por incompatibilidade das deformações (HERTZ, 2003; CARPIO, 2019). Maiores tensões aumentam a probabilidade de ocorrência de lascamento (FELICETTI, 2013). Portanto, pode-se concluir que a condição saturada é crítica para o surgimento de tensões que favorecem a ocorrência de lascamento no concreto projetado.

Gráfico 5.6 – Taxas internas de elevação de temperatura no concreto projetado para diferentes condições de umidade



Fonte: Próprio autor

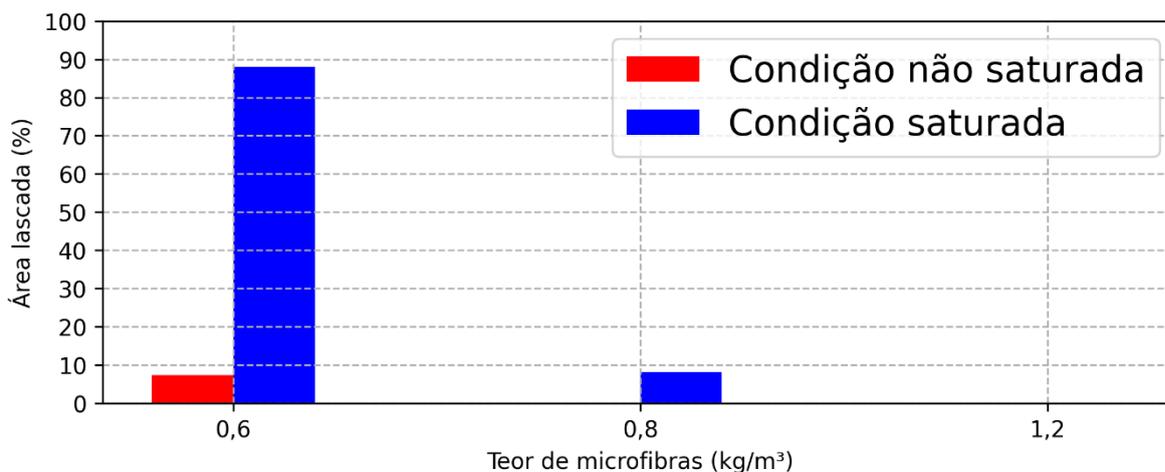
A condição saturada também representa a condição crítica para o surgimento de pressões nos poros (LIU et al., 2018; MAIER; ZEIML; LACKNER, 2020) devido à maior quantidade de água que é evaporada durante a elevação de temperatura.

Uma vez que a condição saturada é crítica tanto para o surgimento de pressões nos poros quanto para a formação de gradientes térmicos no material e o revestimento dos túneis podem estar sujeitos a essa situação (ZHANG et al., 2017), é mais apropriado se ensaiar somente essa condição. Isso pode contribuir para a simplificação dos procedimentos, com consequente redução dos custos associados aos ensaios e garantir maior reprodutibilidade do método devido à uniformização do condicionamento.

## 5.6 ANÁLISE DE PARÂMETROS PARA CARACTERIZAÇÃO DO LASCAMENTO

O Gráfico 5.7 apresenta a porcentagem de área exposta ao fogo que foi danificada por lascamento em cada placa. A condição saturada produziu maiores danos na face exposta ao fogo do que a condição não saturada, mesmo para teores iguais de microfibra PP. Além disso, o teor de 0,6 kg/m<sup>3</sup> apresentou o lascamento mais expressivo na condição saturada e numa escala bem reduzida para a condição não saturada, comparável ao teor de 0,8 kg/m<sup>3</sup> para a condição saturada comprovadamente crítica. No entanto, fica claro que o lascamento ocorrido com um teor de 0,8 kg/m<sup>3</sup> foi bem menor do que para o teor de 0,6 kg/m<sup>3</sup>. Nenhum dano foi observado para o teor de microfibras PP de 1,2 kg/m<sup>3</sup> em ambas as condições de saturação, demonstrando claramente que o método de ensaio conseguiu diferenciar o efeito do teor de fibra para este critério.

Gráfico 5.7 – Porcentagem da área exposta ao fogo que sofreu lascamento em cada placa



Fonte: Próprio autor

Neste trabalho foram determinadas as faixas de profundidade lascada (ver Seção 3.9.5) para todas as placas, as quais estão resumidas na Tabela 5.3. Constata-se claramente que as placas com o consumo de 0,6 kg/m<sup>3</sup> de microfibra PP apresentaram os danos mais significativos. O consumo de 0,8 kg/m<sup>3</sup> de microfibra PP apresentou um nível de dano bem inferior e apenas na condição saturada. O nível de significância desse dano é de difícil avaliação sem a confrontação com uma adequada verificação das condições de projeto (SERAFINI; DE LA FUENTE; FIGUEIREDO, 2021). Assim, foi feita a análise complementar do resultado do ensaio em termos de lascamento explosivo a partir da variação de temperatura dentro de cada placa ensaiada, incluindo a avaliação da profundidade de lascamento, conforme discutido no próximo item.

Tabela 5.3 – Resumo das faixas de profundidade lascada para cada placa

Corpo de prova	Faixa de profundidade lascada (cm)
PN-0.6	1,0 a 1,5
PS-0.6	3,5 a 8,0
PN-0.8	0
PS-0.8	0,5 a 1,0
PN-1.2	0
PS-1.2	0

Fonte: Próprio autor

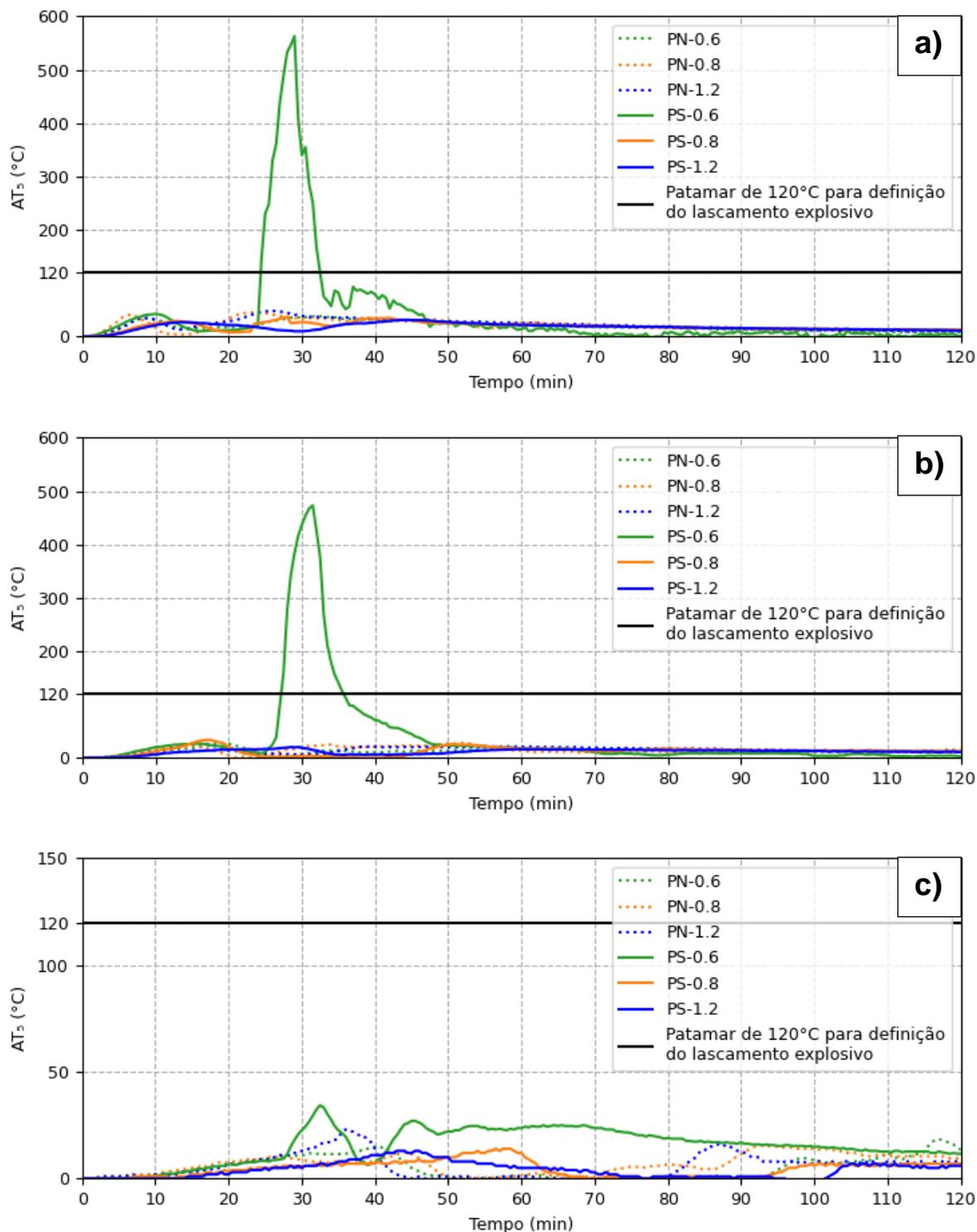
## 5.7 CRITÉRIO PARA CONSTATAÇÃO DO LASCAMENTO EXPLOSIVO A PARTIR DAS TEMPERATURAS INTERNAS DO CONCRETO

A profundidade média lascada em corpos de prova que sofreram lascamentos

explosivos também pode ser estimada a partir das curvas de temperatura. Para a PS-0.6, esse procedimento pode fornecer uma estimativa melhor do que as medições a mão. Sabe-se que a profundidade média lascada nessa placa foi de, no mínimo, 4,0 cm, pois a maioria dos termopares nas profundidades de 2,5 cm e 4,0 cm foi exposta ao fogo durante o ensaio. Após 39 minutos de ensaio, quando ocorreu o segundo estouro, a inclinação da curva de temperatura na profundidade de 7,5 cm estabilizou. A nova inclinação pode ser associada às taxas internas de elevação de temperatura do concreto projetado, na condição saturada, para determinar o novo cobrimento desses termopares. Essa inclinação foi calculada entre 40 e 120 minutos do ensaio e corresponde a uma taxa interna de elevação de 3,75 °C/min. Inserindo esse valor em TxS (Gráfico 5.6), resulta em  $x = 2,75$  cm que, subtraído da profundidade original do termopar, representa uma profundidade média lascada de aproximadamente 4,7 cm. Esse valor está em acordo com as medições anteriores, o que demonstra que pode vir a ser uma alternativa interessante para ser incorporada na metodologia.

Conforme já discutido, as curvas de temperatura no interior da PS-0.6 foram significativamente distintas das placas que não sofreram lascamento. Isso pode ser facilmente visualizado pela plotagem de gráficos do  $AT_5$  com o tempo e com o auxílio de uma linha horizontal representando o patamar de 120 °C no mesmo gráfico. Essa visualização está apresentada no Gráfico 5.8 para as profundidades de 2,5 cm, 4,0 cm e 7,5 cm. A constatação do lascamento explosivo é feita se a curva  $AT_5$  ultrapassar o patamar de 120 °C em qualquer ponto ao longo do ensaio, conforme premissa inicial.

Gráfico 5.8 – Aumento da temperatura média nos últimos 5 minutos ( $AT_5$ ) ao longo dos ensaios para profundidades de: a) 2,5 cm; b) 4,0 cm; c) 7,5 cm.



Fonte: Próprio autor

Para a PS-0.6, o  $AT_5$  ultrapassou o patamar de constatação para as profundidades de 2,5 cm e 4,0 cm. O  $AT_5$  não ultrapassou o limite de 120°C para a profundidade de 7,5 cm. Assim, pode-se concluir que a PS-0.6 sofreu lascamento explosivo e este atingiu uma profundidade de, no mínimo, 4,0 cm, o que também

está de acordo com o cálculo anterior. Nas demais placas não foram observados lascamentos explosivos, pois o  $AT_5$  se manteve abaixo do patamar de constatação em todas elas. Porém, como a PN-0.6 e PS-0.8 sofreram danos, pode ser considerado que elas sofreram lascamento superficial. Pode-se concluir que o uso de teores de microfibras PP acima de  $1,2 \text{ kg/m}^3$  nesta condição, como os  $2 \text{ kg/m}^3$  normalmente recomendados pelo Eurocode (2004), é negativo por não alterar a condição de segurança do material em relação ao lascamento segundo os resultados obtidos e impactar negativamente nos custos e na aplicabilidade do material.

Problemas nos termopares localizados internamente às placas podem causar aumentos repentinos nas temperaturas registradas que ultrapassariam os limites determinados aqui para constatação do lascamento explosivo. Esses aumentos normalmente ocorrem alcançando valores inexplicáveis (por exemplo, muito acima da temperatura medida no próprio forno). Em outras situações pode ser registrada uma medida alta de temperatura, seguida de uma série de medidas significativamente inferiores e mais razoáveis tendo em vista o comportamento esperado do material. Nessa situação, ou o  $AT_5$  se manteria normal ou se entenderia que houve um problema na medição da temperatura. De qualquer forma esses problemas são usualmente verificados em poucos termopares caso o funcionamento de cada termopar seja checado antes da sua inserção no concreto e essa inserção e o transporte dos corpos de prova ocorram com o devido cuidado. Além de tudo, é possível que o critério definido não abranja completamente a diversidade de condições possíveis nesse tipo de ensaio. Por essa razão é interessante utilizar mais de um critério de medida utilizados de forma combinada, como é o caso aqui da medida da profundidade de lascamento em conjunto com a avaliação do  $AT_5$  para cada corpo de prova. Essa combinação de critérios também pode ser útil para avaliar corpos de prova sujeitos a lascamento progressivo profundo, quando o  $AT_5$  não seria ultrapassado, mas em que a condição de segurança para o revestimento ainda seria possivelmente grave.

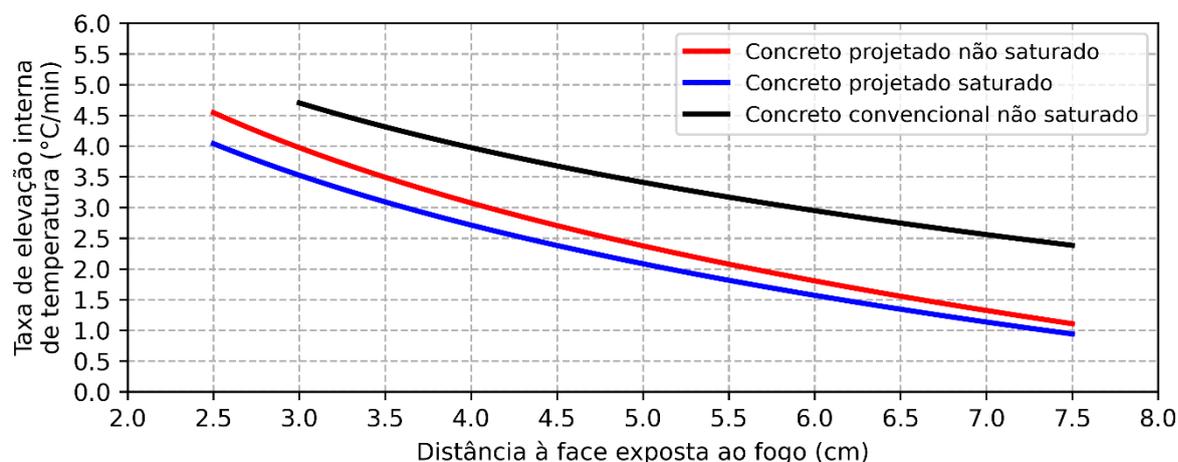
## **5.8 COMPARAÇÃO ENTRE CONCRETO PROJETADO E CONCRETO CONVENCIONAL**

A comparação entre os resultados experimentais do comportamento térmico do concreto projetado e convencional está apresentada no Gráfico 5.9. São

comparados os resultados obtidos neste estudo (Gráfico 5.6) com os obtidos anteriormente por Serafini et al. (2019) nas mesmas condições de ensaio. É possível notar diferenças significativas entre o comportamento térmico desses concretos sendo o concreto convencional bem mais condutivo do que o concreto projetado esteja ele na condição saturada ou não. Isto implica no fato que os gradientes térmicos gerados num revestimento de concreto projetado sejam maiores do que no revestimento de concreto convencional. Nas proximidades da face exposta ao fogo, até 4 cm de profundidade, o concreto projetado apresentou taxas de elevação de temperatura 12 % a 23 % menores que o concreto convencional, na condição não saturada, enquanto nas regiões mais distantes da seção exposta ao fogo as taxas apresentaram reduções ainda maiores, chegando até 54 % para a condição não saturada e 61 % na condição saturada.

Essas diferenças também corroboram o estudo feito por Bamonte, Gambarova & Nafarieh (2016) em relação às diferenças do comportamento térmico entre esses concretos. Em seus estudos, esses autores verificaram que o concreto projetado apresenta uma difusividade térmica significativamente inferior à do concreto convencional até 600 °C. Esses autores citam como provável causa dessas diferenças a maior porosidade do concreto projetado, devido ao fato de este possuir maior teor de partículas finas (LI et al., 2016) ou maior teor de argamassa (FIGUEIREDO, 1997). Endossa esse raciocínio o fato de que o concreto convencional referenciado possuía uma densidade de 2430 kg/m<sup>3</sup> (SERAFINI et al., 2019) contra uma densidade de 2100 kg/m<sup>3</sup> do concreto projetado estudado. A condutividade térmica de um concreto sempre apresentará uma relação exponencial direta com sua densidade (LI et al., 2016), portanto, as menores taxas internas de elevação de temperatura no concreto projetado são justificadas.

Gráfico 5.9 – Comparação das taxas internas de elevação de temperatura no concreto projetado e concreto convencional



Fonte: Próprio autor e Serafini et al. (2019)

Com relação especificamente à suscetibilidade ao lascamento, é possível concluir que os maiores gradientes térmicos gerados no concreto projetado dão origem a maiores tensões (CARPIO, 2019), que podem contribuir para a ocorrência do lascamento (HERTZ, 2003). Por outro lado, a maior porosidade do concreto projetado (BAMONTE; GAMBAROVA; NAFARIEH, 2016) facilita a dissipação de vapores, o que pode reduzir o consumo de microfibra PP para mitigar o lascamento.

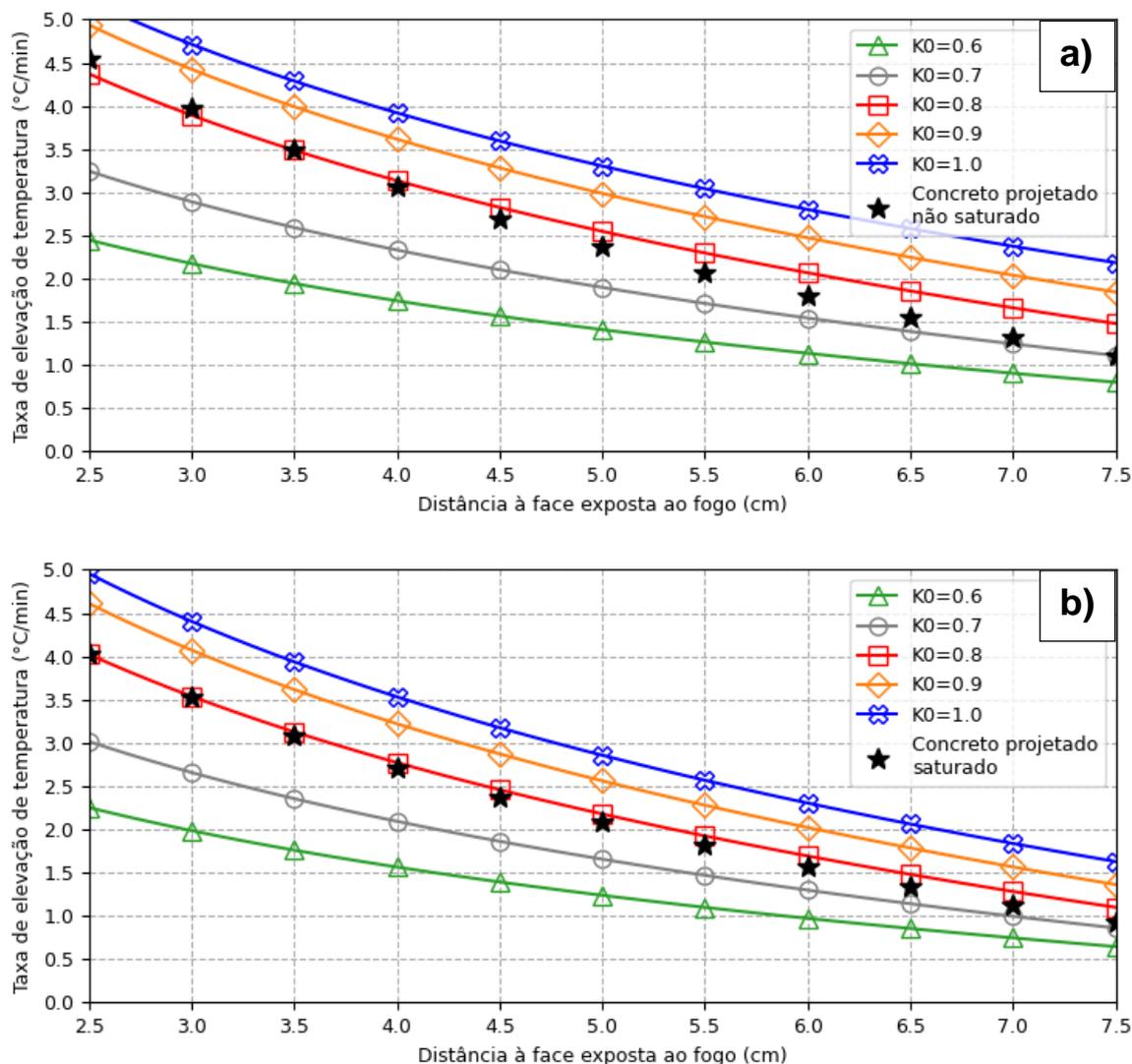
## 5.9 CONDUTIVIDADE TÉRMICA DO CONCRETO PROJETADO

O Eurocode (2004) sugere curvas padrão para condutividade térmica, densidade e calor específico em função da temperatura que podem ser inseridas em simulações computacionais do comportamento térmico do concreto convencional. Porém, é adequado que as diferenças entre o comportamento térmico do concreto convencional e concreto projetado sejam consideradas nesses parâmetros. O Gráfico 5.10 apresenta comparações entre simulações computacionais com diferentes valores iniciais de condutividade térmica ( $K_0$ ). Destaca-se que todos os valores simulados são inferiores ao limite inferior ( $K_0=1,36$ ) recomendado pelo Eurocode (2004) associado ao concreto convencional.

Os resultados experimentais ficaram próximos das curvas relativas a  $K_0 = 0,8$  em uma profundidade de até 5 cm para a condição não saturada e até 6 cm para a condição saturada. Para profundidades maiores, a condução da temperatura ocorreu em menor medida, se aproximando mais de  $K_0 = 0,6$ . A utilização do perfil de condutividade térmica relativo ao limite inferior do Eurocode (2004), mas com um  $K_0 = 0,8$  pode ser considerada uma aproximação razoável para parametrizar o

concreto projetado neste momento.

Gráfico 5.10 – Comparação das taxas internas de elevação de temperatura no concreto projetado (experimental) e simulações computacionais para diferentes valores de  $K_0$ : a) Condição não saturada; b) Condição saturada.

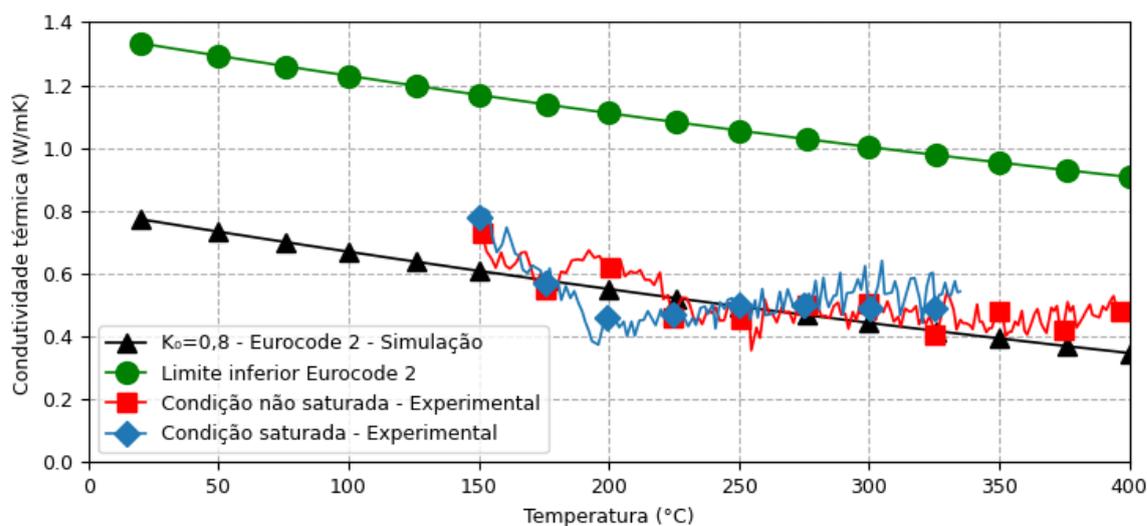


Fonte: Próprio autor

Adicionalmente, foram geradas curvas de condutividade térmica a partir dos dados experimentais com base no procedimento proposto por Zhang et al. (2021b) para cada condição de saturação – ver Seção 3.9.7. Essas curvas estão apresentadas no Gráfico 5.11 em conjunto com o perfil de condutividade térmica relativo a  $K_0 = 0,8$ , definido anteriormente como uma aproximação razoável para esse material. Ambas as determinações da condutividade térmica do concreto projetado ficaram próximas e bem abaixo dos valores recomendados no Eurocode (2004). Com isto fica confirmado que os valores de condutividade térmica recomendados no Eurocode (2004) para o concreto convencional não são adequados para simulação do comportamento térmico do concreto projetado. Dada

a importância desse material para a construção de túneis (ITA WORKING GROUP 12; ITATECH, 2020; MALUK et al., 2020), é essencial que as diretrizes normativas apresentem parâmetros específicos para o concreto projetado. Futuramente, novos estudos sobre as propriedades térmicas do concreto projetado poderão fornecer parâmetros mais precisos considerando inclusive variações no traço e nas condições de projeção do concreto.

Gráfico 5.11 – Comparação entre condutividades térmicas obtidas dos dados experimentais, simulação e limite inferior sugerido no Eurocode.



Fonte: Próprio autor

## 6 CONCLUSÕES

Este trabalho avaliou a aplicabilidade de uma metodologia de homologação do concreto projetado de revestimentos de túneis tendo em vista a ocorrência de lascamento em situação de incêndio. Essa metodologia foi estudada avaliando-se dois fatores intervenientes no lascamento, quais sejam a condição de saturação dos corpos de prova e o teor de microfibras PP. A metodologia proposta se mostrou adequada e foi possível evidenciar a suscetibilidade do concreto projetado ao lascamento. Também foi possível verificar a influência da variação do teor de microfibras poliméricas no fenômeno do lascamento, o que permite a utilização da metodologia para a otimização desse teor. No entanto, foi possível detectar alguns aspectos que podem ser melhorados nessa metodologia por meio de ajustes nos procedimentos de ensaio e técnicas de análise dos resultados que contribuem para uma maior confiabilidade na sua realização, quais sejam:

- a) Verificar a existência de defeitos de moldagem de modo a ajustar a profundidade dos furos realizados para a instalação de termopares e garantir que estes estejam posicionados o mais próximo possível dos valores estabelecidos para as três profundidades previstas para tal.
- b) Criar intervalos de confiança das curvas de temperatura em cada profundidade medida por termopares a partir das medições em pontos que não sofreram danos por lascamento durante o ensaio. Dentre essas medições, aquelas que não se enquadrarem nos intervalos de confiança devem ser consideradas equivocadas e serem descartadas.
- c) Priorizar a determinação da intensidade do lascamento pela sua profundidade, medindo-se fisicamente e confrontando os resultados pela sua estimativa feita a partir das alterações das taxas de elevação interna de temperatura nas placas nas três profundidades consideradas. A ocorrência do lascamento explosivo pode ser avaliada pelas curvas  $AT_5$ , conforme apresentado neste trabalho.
- d) Um método alternativo à medição física da profundidade lascada é pesar os corpos de prova antes do condicionamento e após o ensaio, o que fornece a perda de massa (e volume) de cada corpo de prova. A divisão do volume pela área lascada, calculada como neste trabalho, resultaria na profundidade média lascada de cada corpo de prova.

- e) Somente o ensaio em condição saturada já é suficiente para determinar o teor ótimo de microfibras poliméricas, pois essa condição é crítica para a ocorrência de lascamento e representa uma situação possível de ocorrer na maioria dos túneis. A condição saturada também garante maior uniformidade no condicionamento e, portanto, maior reprodutibilidade da metodologia de ensaio.

Outros aspectos da metodologia foram identificados após as análises como pontos importantes, porém não puderam ser analisados somente com os dados gerados neste trabalho. Esses pontos são apresentados na Seção 6.1 como tópicos importantes a serem estudados no futuro.

Como conclusão complementar é possível afirmar que, pelos resultados obtidos, o concreto projetado possui comportamento térmico diferente do concreto convencional com taxas de elevação de temperatura interna significativamente menores, o que favorece a formação de maiores tensões no revestimento, em relação ao concreto convencional. Por outro lado, a maior porosidade do concreto projetado pode favorecer a redução do teor de microfibras necessário para a dissipação de vapores, mitigando o lascamento em situação de incêndio, o que reforça a necessidade de realização de ensaios para cada situação específica para a validação da solução a ser adotada no revestimento do túnel. Concordantemente, foram obtidos valores de condutividade térmica para o concreto projetado bem inferiores ao limite mínimo recomendado pelo Eurocode (2004). Isso revela a necessidade de se apresentar parâmetros de simulação específicos para o concreto projetado. Neste momento, a utilização do perfil de condutividade térmica relativo ao limite inferior do Eurocode (2004), mas com um  $K_0 = 0,8$  pode ser considerada uma aproximação razoável para o concreto projetado.

A utilização de um ensaio, como o estudado nesta dissertação, como um padrão internacional irá possibilitar a formação de um banco de dados que é essencial para a parametrização futura dos projetos de túneis e subsídio fundamental para futuras modelagens que sejam capazes de representar bem o comportamento complexo de incêndio em túneis.

## **6.1 TÓPICOS QUE NECESSITAM DE APROFUNDAMENTO NO FUTURO**

A partir da pesquisa feita nesta dissertação, é possível indicar algumas sugestões para estudos futuros na aplicação da metodologia:

- a) Análise da influência de diferentes curvas de temperatura nos resultados de ensaios de verificação de concretos destinados ao revestimento de túneis;
- b) Análise da influência de diferentes larguras de proteção nas bordas da face exposta ao fogo em corpos de prova de médias dimensões, tendo em vista a geração de tensões nos cantos e consequente risco de lascamento de canto;
- c) Determinação da quantidade apropriada de corpos de prova a serem ensaiados por composição do material, de forma a dar maior segurança estatística aos resultados. Junto a isso, análise da recomendação de colocação de termopares em todos os corpos de prova com o objetivo de reduzir o número de termopares utilizados;
- d) Verificação da viabilidade do uso de critérios de imagem para análise do lascamento nos corpos de prova;
- e) Definição de um procedimento padrão de análise dos resultados dos ensaios como ferramenta para o projeto de túneis.

Outros pontos gerais também podem ser indicados como sugestão para estudos futuros:

- a) Obtenção das propriedades térmicas do concreto projetado, considerando variações no traço e na projeção para uso em modelos computacionais;
- b) Criação de um modelo computacional para simulação da resistência residual de um revestimento de túnel feito em concreto projetado, considerando a ocorrência de lascamento;
- c) Desenvolvimento de um modelo termo-hidro-mecânico para previsão do lascamento no concreto de revestimentos de túneis.

## REFERÊNCIAS

AFAC - TUNNEL FIRE SAFETY ISSUES COMMITTEE. **Fire Safety Guidelines for Road Tunnels**. , 10 set. 2001.

AGRA, R. R.; SERAFINI, R.; FIGUEIREDO, A. D. DE. Effect of high temperature on the mechanical properties of concrete reinforced with different fiber contents. **Construction and Building Materials**, v. 301, p. 124–138, set. 2021.

ALVES, G. P. **Investigação micro e macroestrutural de argamassas submetidas a elevadas temperaturas**. Dissertação de mestrado—Paraná: Universidade Estadual de Londrina, 2018.

ÁLYA CONSTRUTORA S.A. **Nova Serra da Tamoios - Uma obra de desafios e conquistas**. 1ª ed. São Paulo, Brasil: Ipsis, 2022.

ANJOS, P. P. M. S. **Construção do maior túnel rodoviário do Brasil - Rodovia dos Tamoios, Caraguatatuba/SP**. ANAIS DO 5º CBT. Anais... Em: 5º CONGRESSO BRASILEIRO DE TÚNEIS E ESTRUTURAS SUBTERRÂNEAS (5º CBT). São Paulo, Brasil: dez. 2021.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS - ABNT. **ABNT NBR 9778 - Argamassa e concreto endurecidos — Determinação da absorção de água, índice de vazios e massa específica**. , 2005.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS - ABNT. **ABNT NBR 5739 - Concreto — Ensaio de compressão de corpos de prova cilíndricos**. , 2018.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS - ABNT. **ABNT NBR 16965 - Ensaio de resistência ao fogo de elementos construtivos — Diretrizes gerais**. , 2021a.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS - ABNT. **ABNT NBR 13070 - Moldagem de placas para ensaio de argamassa e concreto projetados**. , 2021b.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE TECNOLOGIA PARA CONSTRUÇÃO E MINERAÇÃO (SOBRATEMA). Na rota da Tamoios. **Grandes construções - Construção, infraestrutura, concessões e sustentabilidade**, n. 69, p. 18–29, maio 2016.

BAMONTE, P.; GAMBAROVA, P. G.; NAFARIEH, A. High-temperature behavior of structural and non-structural shotcretes. **Cement and Concrete Composites**, v. 73, p. 42–53, out. 2016.

BANERJI, S.; KODUR, V.; SOLHMIRZAEI, R. Experimental behavior of ultra high performance fiber reinforced concrete beams under fire conditions. **Engineering Structures**, v. 208, p. 110316, 2020.

BANTHIA, N.; TROTTIER, J.; BEAUPRÉ, D. Steel Fiber Reinforced Wet Mix Shotcrete: Comparisons with Cast Concrete. **Journal of Materials in Civil Engineering**, v. 6, n. 3, p. 430–437, ago. 1994.

BEARD, A.; CARVEL, R. (EDS.). **The handbook of tunnel fire safety**. 2nd. ed. London: ICE, 2012.

BERNARDI, P. et al. Simulation methodology for the assessment of the structural safety of concrete tunnel linings based on CFD fire – FE thermo-mechanical analysis: a case study. **Engineering Structures**, v. 225, p. 111193, dez. 2020.

BONINI, M.; LANCELLOTTA, G.; BARLA, G. State of Stress in Tunnel Lining in Squeezing Rock Conditions. **Rock Mechanics and Rock Engineering**, v. 46, n. 2, p. 405–411, mar. 2013.

CABALLERO-JORNA, M.; ROIG-FLORES, M.; SERNA, P. An Experimental Study of the Influence of Moderate Temperatures on the Behavior of Macrosynthetic Fiber Reinforced Concrete. Em: **Fibre Reinforced Concrete: Improvements and Innovations**. RILEM Bookseries. Cham: Springer International Publishing, 2021. v. 30p. 322–332.

CARPIO, J. M. **Numerical model for the thermo-hygro-mechanical analysis of concrete elements from early ages**. Dissertação de mestrado—Barcelona, Espanha: Universidade Politécnica da Catalunha, 25 jan. 2019.

CELESTINO, T. B. **Trecho Boiçucanga-Maresias é solução errada de engenharia**. **tuneis.com.br**, 30 mar. 2016. Disponível em: <<https://www.tuneis.com.br/trecho-boicucanga-maresias-e-solucao-errada-de-engenharia/>>. Acesso em: 10 mar. 2022

CELESTINO, T. B. **Entrevista durante o Cobramseg 2018**. , 30 ago. 2018. Disponível em: <<https://youtu.be/OUf8j7uQSLM?t=32>>. Acesso em: 20 jan. 2022

CHAPMAN, D. N. **Introduction to tunnel construction**. 2nd. ed. New York: Routledge, 2017.

CHO, H.-C. et al. Fire Damage Assessment of Reinforced Concrete Structures Using Fuzzy Theory. **Applied Sciences**, v. 7, n. 5, p. 518, 16 maio 2017.

CHOE, G. et al. Effect of moisture migration and water vapor pressure build-up with the heating rate on concrete spalling type. **Cement and Concrete Research**, v. 116, p. 1–10, fev. 2019.

CHUNG, C. H.; LEE, J.; CHOI, S. H. Temperature distribution within polypropylene fiber-mixed reinforced concrete slabs exposed to an ISO 834 standard fire. **KSCE Journal of Civil Engineering**, v. 20, n. 5, p. 1878–1886, 1 jul. 2016.

CHUNG, C. H.; LEE, J.; KIM, H. J. Evaluation of fire performance of polypropylene fiber RC slabs. **KSCE Journal of Civil Engineering**, v. 17, n. 5, p. 1040–1050, 1 jul. 2013.

CLEMENT, F. **Fire protection options for concrete tunnel linings**. Proceedings from the Fourth International Symposium on Tunnel Safety and Security. **Anais...** Em: FOURTH INTERNATIONAL SYMPOSIUM ON TUNNEL SAFETY AND SECURITY. Frankfurt, Alemanha: 17 mar. 2010.

COSTA, C.; FIGUEIREDO, A. D. D.; SILVA, V. **O fenômeno do lascamento (“spalling”) nas estruturas de concreto armado submetidas a incêndio – uma revisão crítica.** . Em: INSTITUTO BRASILEIRO DO CONCRETO - 44º CONGRESSO BRASILEIRO. ago. 2002.

CRUZ, C. R.; GILLEN, M. Thermal expansion of Portland cement paste, mortar and concrete at high temperatures. **Fire and Materials**, v. 4, n. 2, p. 66–70, jun. 1980.

CZOBOLY, O. et al. Fibers and fiber cocktails to improve fire resistance of concrete. **Journal of Thermal Analysis and Calorimetry**, v. 128, n. 3, p. 1453–1461, jun. 2017.

DE LA FUENTE, A. et al. Innovations on components and testing for precast panels to be used in reinforced earth retaining walls. **Construction and Building Materials**, v. 25, n. 5, p. 2198–2205, maio 2011.

DI CARLO, F.; MEDA, A.; RINALDI, Z. Evaluation of the bearing capacity of fiber reinforced concrete sections under fire exposure. **Materials and Structures**, v. 51, n. 6, p. 154, dez. 2018.

DU, Y. et al. Experimental study on the spalling behaviour of ultra-high strength concrete in fire. **Construction and Building Materials**, v. 258, p. 120334, out. 2020.

ETNFIT - EUROPEAN THEMATIC NETWORK ON FIRE IN TUNNELS. **Technical report part 1: Design fire scenarios.** , 2005.

EUROPEAN COMMITTEE FOR STANDARDIZATION. **EN 1363-2, Fire resistance tests - Part 2: Alternative and additional procedures.** , 1999.

EUROPEAN COMMITTEE FOR STANDARDIZATION. **EN 1992-1-2, Eurocode 2: Design of concrete structures - Part 1-2: General rules - Structural fire design.** , 2004.

EUROPEAN COMMITTEE FOR STANDARDIZATION. **EN 1363-1, Fire resistance tests - Part 1: General requirements.** , 2012.

EUROPEAN FEDERATION OF NATIONAL ASSOCIATIONS REPRESENTING PRODUCERS AND APPLICATORS OF SPECIALIST BUILDING PRODUCTS FOR CONCRETE - EFNARC. **Specification and guidelines for testing of passive fire protection for concrete tunnels linings.** , mar. 2006. Disponível em: <[www.efnarc.org](http://www.efnarc.org)>. Acesso em: 14 nov. 2020

FELDMAN, R. F.; RAMACHANDRAN, V. S. Differentiation of interlayer and adsorbed water in hydrated portland cement by thermal analysis. **Cement and Concrete Research**, v. 1, n. 6, p. 607–620, nov. 1971.

FELICETTI, R. Assessment Methods of Fire Damages in Concrete Tunnel Linings. **Fire Technology**, v. 49, n. 2, p. 509–529, abr. 2013.

FIGUEIREDO, A. D. **Concreto projetado: fatores intervenientes no controle da qualidade do processo.** Mestrado em Engenharia de Construção Civil e Urbana— São Paulo: Universidade de São Paulo, 1992.

FIGUEIREDO, A. D. DE. **Parâmetros de controle e dosagem do concreto projetado com fibras de aço**. Doutorado em Engenharia de Construção Civil e Urbana—São Paulo: Universidade de São Paulo, 13 mar. 1997.

FIGUEIREDO, A. D. DE et al. **Prática recomendada concreto projetado reforçado com fibras**. 1ª ed. São Paulo: ABMS - Associação Brasileira de Mecânica dos Solos e Engenharia Geotécnica, 2020.

FISCHER, H. C. et al. To go underground - Right or wrong? **Advances in Tunneling Technology and Subsurface Use**, v. 1, p. 18–43, 1978.

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

GALLER, R. et al. The New Guideline NATM – The Austrian Practice of Conventional Tunnelling. **BHM Berg- und Hüttenmännische Monatshefte**, v. 154, n. 10, p. 441–449, out. 2009.

GAWIN, D.; PESAVENTO, F.; CASTELLS, A. G. On reliable predicting risk and nature of thermal spalling in heated concrete. **Archives of Civil and Mechanical Engineering**, v. 18, n. 4, p. 1219–1227, set. 2018.

HAGER, I. Behaviour of cement concrete at high temperature. **Bulletin of the Polish Academy of Sciences: Technical Sciences**, v. 61, n. 1, p. 145–154, 1 mar. 2013.

HEMPHILL, G. B. **Practical Tunnel Construction**. New Jersey: John Wiley & Sons, 2010.

HEO, Y.-S. et al. Critical parameters of nylon and other fibres for spalling protection of high strength concrete in fire. **Materials and Structures**, v. 44, n. 3, p. 599–610, 1 abr. 2011.

HEO, Y.-S. et al. Limited effect of diameter of fibres on spalling protection of concrete in fire. **Materials and Structures**, v. 45, n. 3, p. 325–335, 1 mar. 2012.

HEO, Y.-S.; HAN, C.-G.; KIM, K.-M. Combined fiber technique for spalling protection of concrete column, slab and beam in fire. **Materials and Structures**, v. 48, n. 10, p. 3377–3390, out. 2015.

HERTZ, K. D. Limits of spalling of fire-exposed concrete. **Fire Safety Journal**, v. 38, n. 2, p. 103–116, mar. 2003.

HERTZ, K. D.; SØRENSEN, L. S. Test method for spalling of fire exposed concrete. **Fire Safety Journal**, v. 40, n. 5, p. 466–476, jul. 2005.

HUI-JUN, L.; YU, S. Stress and Deformation Analysis of Lining in Tunneling Process. **Electronic Journal of Geotechnical Engineering**, v. 19, 2014.

HURLEY, M. J. et al. (EDS.). **SFPE Handbook of Fire Protection Engineering**. New York, NY: Springer New York, 2016.

ITA COSUF. **An engineering methodology for performance-based fire safety**

**design of underground rail Systems**. 24. ed. France: Longrine, 2014.

ITA WORKING GROUP 12; ITATECH. **Permanent Sprayed Concrete Linings**. 24. ed. France: Longrine, 2020.

ITA WORKING GROUP 13. Underground or aboveground? Making the choice for urban mass transit systems. **Tunnelling and Underground Space Technology**, v. 19, n. 1, p. 3–28, jan. 2004.

ITACUS. **Planning the use of underground space**. , 2011a. Disponível em: <<https://about.ita-aites.org/wg-committees/itacus/downloads?start=0>>. Acesso em: 9 mar. 2022

ITACUS. **Sustainable Urban Underground Development**. , 2011b. Disponível em: <<https://about.ita-aites.org/wg-committees/itacus/downloads?start=0>>. Acesso em: 9 mar. 2022

KHOURY, G. A. Effect of fire on concrete and concrete structures. **Progress in Structural Engineering and Materials**, v. 2, n. 4, p. 429–447, out. 2000.

KIM, H. J.; EISENSTEIN, Z. Prediction of tunnel lining loads using correction factors. **Engineering Geology**, v. 85, n. 3–4, p. 302–312, jun. 2006.

KIM, J. et al. Structural performance of final lining according to the rock load shape. **KSCE Journal of Civil Engineering**, v. 20, n. 4, p. 1329–1335, maio 2016.

KRZEMIENÍ, K.; HAGER, I. Assessment of Concrete Susceptibility to Fire Spalling: A Report on the State-of-the-art in Testing Procedures. **Procedia Engineering**, v. 108, p. 285–292, 2015.

LAI, H.; WANG, S.; XIE, Y. Experimental research on temperature field and structure performance under different lining water contents in road tunnel fire. **Tunnelling and Underground Space Technology**, v. 43, p. 327–335, jul. 2014.

LI, S. et al. An investigation into the thermal conductivity of hydrating sprayed concrete. **Construction and Building Materials**, v. 124, p. 363–372, out. 2016.

LI, Y. et al. Effect of aggregate size and inclusion of polypropylene and steel fibers on explosive spalling and pore pressure in ultra-high-performance concrete (UHPC) at elevated temperature. **Cement and Concrete Composites**, v. 99, p. 62–71, maio 2019.

LI, Y.; TAN, K. H.; YANG, E.-H. Influence of aggregate size and inclusion of polypropylene and steel fibers on the hot permeability of ultra-high performance concrete (UHPC) at elevated temperature. **Construction and Building Materials**, v. 169, p. 629–637, abr. 2018.

LI, Y.; TAN, K. H.; YANG, E.-H. Synergistic effects of hybrid polypropylene and steel fibers on explosive spalling prevention of ultra-high performance concrete at elevated temperature. **Cement and Concrete Composites**, v. 96, p. 174–181, fev. 2019.

LI, Y.; ZHANG, D. Effect of lateral restraint and inclusion of polypropylene and steel

fibers on spalling behavior, pore pressure, and thermal stress in ultra-high-performance concrete (UHPC) at elevated temperature. **Construction and Building Materials**, v. 271, p. 121879, fev. 2021.

LIMA, R. C. A. DE. **Investigação do comportamento de concretos em temperaturas elevadas**. Tese de Doutorado—Rio Grande do Sul, Brasil: Universidade Federal do Rio Grande do Sul, 2005.

LIU, C. et al. A Fractal-Interpolation Model for Diagnosing Spalling Risk in Concrete at Elevated Temperatures. **KSCE Journal of Civil Engineering**, v. 22, n. 12, p. 5154–5163, dez. 2018.

LIU, J.-C.; TAN, K. H.; YAO, Y. A new perspective on nature of fire-induced spalling in concrete. **Construction and Building Materials**, v. 184, p. 581–590, 2018.

LO MONTE, F. et al. Assessment of concrete sensitivity to fire spalling: A multi-scale experimental approach. **Construction and Building Materials**, v. 212, p. 476–485, jul. 2019.

LO MONTE, F.; FELICETTI, R. Heated slabs under biaxial compressive loading: a test set-up for the assessment of concrete sensitivity to spalling. **Materials and Structures**, v. 50, n. 4, p. 192, 15 jun. 2017.

LO MONTE, F.; FELICETTI, R.; ROSSINO, C. Fire spalling sensitivity of high-performance concrete in heated slabs under biaxial compressive loading. **Materials and Structures**, v. 52, n. 1, p. 14, fev. 2019.

LO MONTE, F.; GAMBAROVA, P. G. Corner spalling and tension stiffening in heat-damaged R/C members: a preliminary investigation. **Materials and Structures**, v. 48, n. 11, p. 3657–3673, nov. 2015.

MA, Q. et al. Mechanical properties of concrete at high temperature—A review. **Construction and Building Materials**, v. 93, p. 371–383, set. 2015.

MAIER, M.; ZEIML, M.; LACKNER, R. On the effect of pore-space properties and water saturation on explosive spalling of fire-loaded concrete. **Construction and Building Materials**, v. 231, p. 117150, jan. 2020.

MALUK, C. et al. Experimental study on the fire behaviour of fibre reinforced concrete used in tunnel applications. **Fire Safety Journal**, ago. 2020.

MEMON, S. A. et al. Durability of sustainable concrete subjected to elevated temperature – A review. **Construction and Building Materials**, v. 199, p. 435–455, fev. 2019.

MIAH, M. J. et al. Fire Spalling Behaviour of Concrete: Role of Mechanical Loading (Uniaxial and Biaxial) and Cement Type. **Key Engineering Materials**, v. 711, p. 549–555, set. 2016.

MOHD ALI, A. Z.; SANJAYAN, J.; GUERRIERI, M. Specimens size, aggregate size, and aggregate type effect on spalling of concrete in fire. **Fire and Materials**, v. 42, n. 1, p. 59–68, jan. 2018.

NINCE, A. A. **Lascamento do concreto exposto a altas temperaturas**. Tese de Doutorado—São Paulo: Universidade de São Paulo, 2006.

NOUMOWE, A.; SIDDIQUE, R.; DEBICKI, G. Permeability of high-performance concrete subjected to elevated temperature (600 °C). **Construction and Building Materials**, v. 23, n. 5, p. 1855–1861, 1 maio 2009.

NUNES, L.; FRANCO, V.; ASSIS, A. P. **Resistência da estrutura de túneis rodoviários aos danos causados por incêndios**. ANAIS DO 4º CBT. **Anais...** Em: 4º CONGRESSO BRASILEIRO DE TÚNEIS E ESTRUTURAS SUBTERRÂNEAS (4º CBT). abr. 2017.

PÉREZ, A. H. **Diseño prestacional de túneles en situación de incendio. Modelos FDS. Aplicación a un túnel de metro**. Dissertação de mestrado—Espanha: Universitat Politècnica de València, 7 nov. 2016.

PERMANENT INTERNATIONAL ASSOCIATION OF ROAD CONGRESSES - PIARC - TECHNICAL COMMITTEE 3.3 ROAD TUNNELS OPERATIONS - WORLD ROAD ASSOCIATION. **Design fire characteristics for road tunnels**. France: World Road Association (PIARC), 2016.

QIAO, R. et al. Damage evolution and safety assessment of tunnel lining subjected to long-duration fire. **Tunnelling and Underground Space Technology**, v. 83, p. 354–363, jan. 2019a.

QIAO, R. et al. Theoretical Investigation into the Thermo-Mechanical Behaviours of Tunnel Lining During RABT Fire Development. **Arabian Journal for Science and Engineering**, v. 44, n. 5, p. 4807–4818, maio 2019b.

QIN, H. et al. Experimental research on the spalling behaviour of ultra-high performance concrete under fire conditions. **Construction and Building Materials**, v. 303, p. 124464, out. 2021.

QUEIROZ GALVAO S.A. **Relatórios de ensaios de caracterização de concreto projetado**. , 18 dez. 2019.

REIS, A. P. C.; ASSIS, A. P. Túneis e outras obras geotécnicas - Uso do espaço subterrâneo como fator de sustentabilidade social, econômica e ambiental. **Construção Magazine**, n. 81, p. 10–17, set. 2017.

RÍOS, J. D. et al. Effect of polypropylene fibers on the fracture behavior of heated ultra-high performance concrete. **International Journal of Fracture**, v. 223, n. 1, p. 173–187, 1 maio 2020.

ROSER, M. Future Population Growth. **Our World in Data**, nov. 2019.

SCHWING STETTER. **SCHWING Shotcret Pumps TSR 30.14 / TSM 30.14 / TSM 20.8 / 300 RE**, c2008. Disponível em: <<https://www.schwingstetterindia.com/products/shotcrete-pump/tsm-3014>>. Acesso em: 19 jan. 2022

SERAFINI, R. et al. Influence of fire on temperature gradient and physical-

mechanical properties of macro-synthetic fiber reinforced concrete for tunnel linings. **Construction and Building Materials**, v. 214, p. 254–268, jul. 2019.

SERAFINI, R. **The effect of fire on pre-cast steel fiber reinforced concrete for tunnel linings: from microstructure to structural simulation**. Tese de Doutorado—São Paulo: Universidade de São Paulo, 2021.

SERAFINI, R. et al. Double Edge Wedge Splitting Test to Characterize the Design Postcracking Parameters of Fiber-Reinforced Concrete Subjected to High Temperatures. **Journal of Materials in Civil Engineering**, v. 33, n. 5, p. 04021069, maio 2021.

SERAFINI, R.; DE LA FUENTE, A.; FIGUEIREDO, A. D. Assessment of the post-fire residual bearing capacity of FRC and hybrid RC-FRC tunnel sections considering thermal spalling. **Materials and Structures**, v. 54, n. 6, p. 219, dez. 2021.

SERAFINI, R.; RAMBO, D. A. S.; FIGUEIREDO, A. D. D. Concreto reforçado com fibras em situação de incêndio. **Concreto & Construções**, v. 39, n. 89, p. 44–47, jan. 2018.

SIDERIS, K. K.; MANITA, P.; CHANIOTAKIS, E. Performance of thermally damaged fibre reinforced concretes. **Construction and Building Materials**, v. 23, n. 3, p. 1232–1239, mar. 2009.

SIKA BRASIL. **SikaFiber®Force PP-48 / RAD-48s**. , c2013. Disponível em: <<https://bra.sika.com/pt/construcao/tecnologia-do-concreto/premoldados/produtos-auxiliares/macrofibra-de-polipropileno/sikafiber-force-pp-48rad-48s.html>>. Acesso em: 5 jul. 2021a

SIKA BRASIL. **SikaFiber®-12 Micro PP**. , c2013. Disponível em: <<https://bra.sika.com/pt/construcao/tecnologia-do-concreto/premoldados/produtos-auxiliares/macrofibra-de-polipropileno/sikafiber-12-micropp.html>>. Acesso em: 5 jul. 2021b

SOLLERO, M. **Propriedades mecânicas residuais do concreto em situação de incêndio**. Dissertação de mestrado—Campinas, São Paulo, Brasil: Unicamp, 30 ago. 2019.

SOUZA, A. A. A. **Procedimento de ensaio para verificação em laboratório da tendência ao lascamento do concreto em situação de incêndio**. Tese de Doutorado—Campinas: Universidade Estadual de Campinas, 1 set. 2010.

STUVA WORKING GROUP “REPAIR OF ROAD TUNNELS” (ED.). **Status Report 2015**. Berlin: Ernst & Sohn, 2015.

SULLIVAN, P. J. E. A probabilistic method of testing for the assessment of deterioration and explosive spalling of high strength concrete beams in flexure at high temperature. **Cement and Concrete Composites**, v. 26, n. 2, p. 155–162, fev. 2004.

SYLVERIO, M. V. M. **Metodologia de homologação do concreto com fibras para túneis para o risco de incêndio**. Trabalho de Conclusão de Curso—São Paulo: Universidade de São Paulo, 2018.

SYLVERIO, M. V. M.; FIGUEIREDO, A. D. DE; BERTO, A. F. Avaliação da resistência ao fogo do concreto para revestimento de túneis. **Concreto & Construções**, v. 47, n. 97, p. 82–87, jan. 2020.

SZELAĞ, M. Evaluation of cracking patterns of cement paste containing polypropylene fibers. **Composite Structures**, v. 220, p. 402–411, jul. 2019.

TENDER, M. L.; COUTO, J. P.; BRAGANÇA, L. The role of underground construction for the mobility, quality of life and economic and social sustainability of urban regions. **REM - International Engineering Journal**, v. 70, n. 3, p. 265–271, set. 2017.

THE BRITISH TUNNELLING SOCIETY AND THE INSTITUTION OF CIVIL ENGINEERS. **Tunnel lining design guide**. London: Thomas Telford Publishing, 2004.

TOPLIVO AD. **Polypropylene fibre SikaFiber PPM-12 | Price | Features**. Disponível em: <<https://toplivo.bg/en/products/Construction-materials/Construction-chemicals/Concrete-chemistry/Polypropylene-fibre-SikaFiber-PPM-12>>. Acesso em: 6 out. 2021.

VERNE, J. **The mysterious island: The secret of the island**. [s.l.: s.n.].

**Vídeo da ocorrência de lascamento explosivo durante ensaio de placas saturadas no LSFEx**. São Paulo, 19 mar. 2020.

WANG, Y. et al. Mechanical properties and analytic solutions of prestressed linings with un-bonded annular anchors under internal water loading. **Tunnelling and Underground Space Technology**, v. 97, p. 103244, mar. 2020.

XING, D. et al. Morphologies and mechanical properties of basalt fibre processed at elevated temperature. **Journal of Non-Crystalline Solids**, v. 582, p. 121439, 15 abr. 2022.

YAN, Z.; ZHU, H.; JU, J. W. Behavior of reinforced concrete and steel fiber reinforced concrete shield TBM tunnel linings exposed to high temperatures. **Construction and Building Materials**, v. 38, p. 610–618, jan. 2013.

YIN, S. et al. Use of macro plastic fibres in concrete: A review. **Construction and Building Materials**, v. 93, p. 180–188, set. 2015.

ZEIML, M. et al. Thermo-hydro-chemical couplings considered in safety assessment of shallow tunnels subjected to fire load. **Fire Safety Journal**, v. 43, n. 2, p. 83–95, fev. 2008.

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, dez. 2008.

ZHANG, D. et al. Effect of spatial distribution of polymer fibers on preventing spalling of UHPC at high temperatures. **Cement and Concrete Research**, v. 140, p. 106281, fev. 2021a.

ZHANG, D.; DASARI, A.; TAN, K. H. On the mechanism of prevention of explosive spalling in ultra-high performance concrete with polymer fibers. **Cement and Concrete Research**, v. 113, p. 169–177, nov. 2018.

ZHANG, D.; TAN, K. H. Effect of various polymer fibers on spalling mitigation of ultra-high performance concrete at high temperature. **Cement and Concrete Composites**, v. 114, p. 103815, nov. 2020.

ZHANG, N. et al. Mechanical Analysis of Secondary Lining of High-Speed Railway Tunnel. **KSCE Journal of Civil Engineering**, v. 22, n. 7, p. 2384–2389, jul. 2018.

ZHANG, T. et al. Characterizing the thermal properties of hybrid polypropylene-steel fiber reinforced concrete under heat exposure: Insights into fiber geometry and orientation distribution. **Composite Structures**, 2021b.

ZHANG, Y. et al. Fast assessing spalling risk of tunnel linings under RABT fire: From a coupled thermo-hydro-chemo-mechanical model towards an estimation method. **Engineering Structures**, v. 142, p. 1–19, jul. 2017.