

MARCOS VINICIUS MARTINEZ SYLVERIO

**METODOLOGIA DE HOMOLOGAÇÃO DO CONCRETO COM
FIBRAS PARA TÚNEIS PARA O RISCO DE INCÊNDIO**

Trabalho de Formatura do Curso de
Engenharia Civil apresentado à Escola
Politécnica da Universidade de São
Paulo

São Paulo
2018

MARCOS VINICIUS MARTINEZ SYLVERIO

**METODOLOGIA DE HOMOLOGAÇÃO DO CONCRETO COM
FIBRAS PARA TÚNEIS PARA O RISCO DE INCÊNDIO**

Trabalho de Formatura do Curso de
Engenharia Civil apresentado à Escola
Politécnica da Universidade de São
Paulo

Orientador: Prof. Dr. Antonio
Domingues de Figueiredo

São Paulo
2018

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.

CATALOGAÇÃO NA PUBLICAÇÃO

Sylverio, Marcos Vinicius Martinez

Metodologia de Homologação do Concreto com Fibras para Túneis para o Risco de Incêndio / M. V. M. Sylverio -- São Paulo, 2018.

43 p.

Trabalho de Formatura - Escola Politécnica da Universidade de São Paulo. Departamento de Engenharia de Estruturas e Geotécnica.

1.Concreto 2.Fibras 3.Homologação 4.Incêndio 5.Revestimento de Túneis I.Universidade de São Paulo. Escola Politécnica. Departamento de Engenharia de Estruturas e Geotécnica II.t.

AGRADECIMENTOS

Agradeço primeiramente a Deus por tudo que Ele tem feito por mim.

Agradeço aos meus pais pelo amor e tudo que me ensinaram, sobretudo minha mãe, por esses últimos anos.

Agradeço ao Professor Antonio Figueiredo e ao Fire Team, por terem me recebido tão bem e terem me dado essa oportunidade de trabalhar nesse tema tão importante.

Agradeço ao Berto por ter me apresentado ao mundo da segurança contra incêndio e por toda ajuda e orientação.

RESUMO

O concreto reforçado com fibras é um material que está sendo cada vez mais usado na engenharia. As suas vantagens permitem que ele seja usado na construção de túneis, obras que atualmente estão em falta no Brasil. Um requisito básico para sua aplicação é que ele seja seguro em diversas situações, dentre elas, durante um incêndio. Nessas circunstâncias, o compósito se deteriora de diversas maneiras. Um dos fenômenos de degradação possível do concreto na situação de incêndio é o lascamento, o qual se mostra crítico como ameaça à segurança de túneis. Este trabalho apresenta pontos importantes em sua revisão bibliográfica, como os efeitos do fogo no concreto e seus reforços, análises do potencial calorífico dos incêndios em túneis, medidas de proteção disponíveis e alguns estudos de caso. Em conjunto foi feito um levantamento da capacitação laboratorial brasileira através de uma pesquisa direta com os laboratórios conhecidos. Isso foi feito com o objetivo de se criar uma base sólida que permitiu propor uma metodologia de homologação do concreto com fibras – e que também pode ser aplicado ao concreto armado convencional – para o risco de incêndio em túneis, a fim de suprir uma demanda importante do mercado, que não adquiriu ainda domínio técnico suficiente sobre o comportamento das soluções com fibras em situação de incêndio. Com este trabalho, espera-se que seja mais fácil aplicar as fibras nas obras de túneis, de forma econômica, prática e sobretudo segura.

Palavras-chave: Concreto. Fibras. Túneis. Incêndio. Capacitação Tecnológica. Homologação.

ABSTRACT

Fiber reinforced concrete is a material that is being used more and more in engineering. Its advantages allow it to be used in the construction of tunnels, which are currently in great demand in Brazil. A basic requirement for it to be applied is that it stays secure in several situations, amongst them, during a fire. In these circumstances, the composite deteriorates in many ways. One of the possible phenomena due to fire in concrete is explosive spalling, which is in fact critical to tunnel safety. This work presents important topics obtained in the literature review, as the effects of fire in concrete and its reinforcements, analysis of the calorific potential of fires in tunnels, fire protection available and case studies. Together with this review, a survey of Brazilian laboratory capacitation was carried out through a direct quiz sent to known laboratories. This was done with the intent of creating a solid base that allowed the author to present a homologation methodology of fiber reinforced concrete – that can also be applied to conventional reinforced concrete – for the fire risk in tunnels, intending to end an important demand in engineering, which has not acquired yet a sufficient technical domain over fiber solutions behavior during a fire. With this work, it's expected that it will become easier to use fiber solutions in tunnels, in an economical and practical way and, above all, in a safe manner.

Keywords: Concrete. Fibers. Tunnels. Fire. Technological Capacity. Homologation.

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	1
1.1	Concreto com fibras	2
1.2	Comportamento frente ao fogo	2
2	Objetivos	4
2.1	Objetivo Geral	4
2.2	Objetivos Específicos	4
3	Justificativa.....	5
4	Revisão Bibliográfica.....	6
4.1	O Concreto reforçado com fibras de aço (CRFA)	6
4.2	Efeitos do fogo no CRFA (Serafini, Rambo & Figueiredo, 2018)	7
4.2.1	Temperaturas extremas no CRFA	9
4.3	<i>Spalling</i> ou lascamento	10
4.4	Especificidades dos incêndios em túneis	13
4.5	Principais condicionantes dos incêndios em túneis (Australasian Fire Authorities Council, 2001).....	14
4.5.1	Causas principais de ignição	14
4.5.2	Fatores que podem interferir na intensidade do fogo – dimensão e temperatura atingida	14
4.6	Medidas de proteção a serem adotadas	15
4.7	Cenário nacional na área da proteção contra incêndio em túneis.....	17
4.8	Histórico de incêndios em túneis.....	18
4.8.1	Mont Blanc (Wallis, 2001; Australasian Fire Authorities Council, 2001; Peter, 1999; BBC News, 2002)	18
4.8.2	Tauern (Australasian Fire Authorities Council, 2001)	19
4.8.3	São Gotardo (Jorio, 2011)	19
4.8.4	Eurotúnel (The Channel Tunnel Safety Authority, 1997; Rayner, Millward & Simpson, 2008).....	20
5	Proposta de sistematização da normativa internacional	21
5.1	Curvas de temperatura.....	21
5.1.1	ISO 834 e ASTM E119	21
5.1.2	HC	22
5.1.3	RWS	22
5.2	EFNARC	23
5.3	Efectis	25
5.4	Análise dos métodos para unificação.....	26
6	Possibilidade de aplicação da metodologia de ensaio no país	28
6.1	Instituto de Pesquisas Tecnológicas do Estado de São Paulo (IPT).....	28
6.2	Unicamp	28
6.3	Universidade de São Paulo – Campus São Carlos	28
6.4	Universidade dos Sinos – Rio Grande do Sul	29
6.5	Análise da capacitação técnica	29
7	Proposta final	30
7.1	Definições e tolerância ao lascamento explosivo	32
7.2	Curva de temperatura	33
7.3	Extração de testemunhos e análise da resistência residual	33
8	comentários finais	35
9	REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	36
	ANEXO I – RESPOSTAS DOS LABORATÓRIOS PARA O QUESTIONÁRIO.....	39

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 – Redução percentual das resistências de concreto e aços devido ao aumento de temperatura (apud Costa, Figueiredo & Silva, 2002)	8
Figura 2 - Redução percentual do módulo de elasticidade de concreto (para vários autores) e aços devido ao aumento de temperatura (apud Costa, Figueiredo & Silva, 2002)	9
Figura 3 - Armadura de viga exposta devido ao <i>spalling</i> (fonte: https://www.alphastructural.com/project-gallery/spalling-concrete/ , acessado em 03/12/2018)	12
Figura 4 - Danos devido ao <i>spalling</i> no revestimento de concreto no incêndio de 2008 no Eurotúnel (fonte: https://www.tunneltalk.com/TunnelTech-May12-Concrete-fire-spalling.php , acessado dia 03/12/2018)	12
Figura 5: Situação interna do Túnel Mont Blanc pós ocorrência do incêndio – destaque para a ocorrência de <i>spalling</i> de forma profunda (Fonte: https://www.tunneltalk.com/Fire-safety-Jun01-Mont-Blanc-highway-fire-reconstruction.php , acessado em 03/12/2018).....	19
Figura 6 - Foto tirada durante incêndio no túnel São Gotardo (fonte: https://www.swissinfo.ch/ger/gesellschaft/gotthard-strassentunnel-ist-sicherer-geworden/31380918 , acessado em 03/12/2018)	20
Figura 7 - Gráfico das curvas de temperatura usadas em ensaios	22
Figura 8 - Mapa de extração de corpos de prova para ensaio (EFNARC, 2006) - versão traduzida.....	24
Figura 9 - Fluxograma de verificação do revestimento de túneis de concreto sujeitos a incêndio	31
Figura 10 - Perfil de temperaturas numa seção de concreto - (Anderberg apud Khoury, 2000 – versão traduzida).....	34

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Intensidade do fogo para diversas situações (Fonte: PIARC, apresentação em Brussels, 1987 – versão traduzida)	15
Tabela 2 - Súmula dos ensaios de revestimento de túneis	26
Tabela 3 - Capacitação tecnológica no país.....	30
Tabela 4 - Definições de tipos de lascamento (Khoury e Majorana, 2001; Nince, 2006)	32

1 INTRODUÇÃO

O concreto é hoje o segundo material mais consumido no mundo e o primeiro na construção civil (Mehta & Monteiro, 2006; Pinheiro, 2007). Isso ocorre principalmente devido ao seu bom desempenho quando submetido ao esforço de compressão, versatilidade em formas e bom comportamento diante de algumas ações externas, especialmente da água, quando comparado com outros materiais como, por exemplo, o aço (Mehta & Monteiro, 2006). Outros pontos que favorecem o uso do concreto são a grande disponibilidade de matéria prima e o baixo custo frente a outros materiais estruturais (Mehta & Monteiro, 2006; Pedroso, 2009).

A principal desvantagem do concreto é sua fragilidade e baixa capacidade de deformação quando submetido a esforços de tração (Figueiredo, 2011). Dessa característica surge a conhecida associação do concreto com o aço, o qual possui boa ductilidade e resistência à tração, compensando essas deficiências do material original (Pinheiro, 2007). Assim, a armação do concreto gera um compósito mais otimizado no qual as vantagens de um material complementam as desvantagens do outro. Uma alternativa à armação convencional de vergalhões é a utilização de fibras para o reforço do concreto (Figueiredo, 2011). Qualquer que seja o tipo de reforço, os elementos estruturais de concreto executados com esses materiais devem atender às exigências de comportamento mecânico associadas à sua função estrutural.

A história mostra que as construções civis estão sujeitas à ocorrência de um incêndio. Isso pode ser exemplificado pelos sinistros sucedidos nos edifícios Andraus (1972), Joelma (1974) e mais recentemente no Wilton Paes de Almeida (2018). Segundo Berto (1991), “a segurança contra incêndio é um objetivo que deve ser perseguido” e considerado em todas as etapas de construção e uso de uma edificação. Tudo isso, aliado ao fato já apresentado de que o concreto é o material mais presente na construção civil, denota uma clara necessidade de que sejam criados meios eficazes de proteger e avaliar esse compósito quanto à sua segurança em altas temperaturas. É importante também destacar que os incêndios podem variar em intensidade e tamanho, dependendo das atividades desenvolvidas num ambiente, nível de proteção que uma edificação possui e uma série de outros fatores, os quais serão apresentados ao longo do texto.

Dentre obras importantes e complexas na construção civil, encontram-se os túneis. São obras que consomem uma grande quantidade de recursos e cujo material de revestimento é prioritariamente o concreto (Tiberti, 2014; Palermo & Helene, 1997). Além disso, são obras que estão, sem dúvida, sujeitas à ocorrência de incêndios, conforme exemplos expostos no item 4.8 e, como será visto no item 4.5.2, de forma até mais severa que em outros tipos de obras. Possuem, ainda, uma série de outros fatores que aumentam o risco da situação como um todo – item 4.4. Isso revela a importância de se garantir um nível adequado de segurança em túneis quanto a esse tipo de risco.

1.1 Concreto com fibras

No Brasil e em vários lugares do mundo, a solução do concreto com fibras vem crescendo em suas aplicações, incluindo-se aí o caso do revestimento de túneis (Figueiredo, 2011). No entanto, ainda é grande a preocupação de avaliação da segurança do revestimento de túneis feito com esse material na situação de incêndio. Apesar dessa preocupação, no Brasil são ainda raros os casos em que se realizam estudos prévios de avaliação do material para a sua aplicação neste tipo de obra (Serafini, Rambo & Figueiredo, 2018). Por essa razão, pretende-se aqui realizar um levantamento da informação existente sobre o tema de modo a sistematizá-la e, dessa forma, possibilitar a proposta de uma metodologia de homologação que englobe esta tecnologia e outras soluções de concreto armado já mais consolidadas, considerando-se ainda a capacitação tecnológica do país.

1.2 Comportamento frente ao fogo

O concreto apresenta uma estrutura complexa (Mehta & Monteiro, 2006; Lima et al., 2004). É formado por substâncias de características, formas e comportamentos distintos. Devido a isso, é difícil prever o seu comportamento de uma forma mais precisa, ainda mais quando na presença do fogo. Nessa situação, mais variáveis, como temperatura, tempo e área de exposição ao fogo, são adicionadas a um problema já complicado.

O aumento da temperatura sempre causará danos ao concreto, reduzindo suas propriedades mecânicas (Serafini, Rambo & Figueiredo, 2018). Dentre os efeitos decorrentes do aumento de temperatura no concreto estão o lascamento e a redução das propriedades mecânicas (Khoury, 2000). A previsão da redução da resistência mecânica devido ao aumento de temperatura ocorre de forma gradual (Serafini, Rambo & Figueiredo, 2018) e é mais precisa quando comparada ao lascamento, que pode ocorrer inclusive de forma abrupta – chamado lascamento explosivo – e “ainda é pouco compreendido e sua incidência é considerada imprevisível em face da variabilidade de fatores que intervêm em sua ocorrência” (Han et al., 2005; Sullivan, 2004; Khoury & Majorana, 2001; Kalifa, Menneteau, & Quenard, 2000; Chan, Peng, & Anson, 1999; Anderberg, Spalling phenomena of HPC and OC., 1997; apud Nince, 2006).

O lascamento explosivo é capaz de causar grandes cavidades no concreto (Purkiss apud Nince, 2002), podendo até mesmo inutilizar completamente o material, pois afeta a sua integridade. Uma peça que sofra esse efeito poderá se fragmentar em diversas partes que não possuem mais nenhuma resistência útil ao esforço solicitante. Além disso, caso a desintegração não seja total, o lascamento explosivo ainda é capaz de diminuir a condição de segurança, pois expõe as camadas mais internas da peça estrutural diretamente aos efeitos do fogo. Isso não ocorreria caso a peça se mantivesse íntegra – o concreto apresenta boa resistência ao fogo (Mehta & Monteiro, 2006; Khoury, 2000) e, portanto, o calor demoraria a ser transferido da superfície até o reforço e componentes mais internos, garantindo uma resistência residual ao material. Em resumo, a condição de segurança com o elemento íntegro é muito maior do que após a ocorrência do lascamento explosivo.

Assim, fica claro que o ponto inicial de qualquer análise de uma estrutura de concreto – como o revestimento de túneis, por exemplo - submetida a altas temperaturas deve passar primeiramente pela homologação do material em si, com a verificação da manutenção de uma integridade mínima do concreto conforme se aumenta a temperatura. Somente após essa confirmação, deve ser feita uma verificação da resistência residual por meio de ensaios pré-definidos, com testemunhos extraídos de corpos de prova que já foram submetidos ao aumento de temperatura. Cabe destacar que essa análise da resistência residual das peças também é um procedimento difícil e trabalhoso. Os corpos de prova deverão ser extraídos das placas – o que por si só requer cuidados, procedimentos e equipamentos específicos, ainda mais cuidadosos do que os orientados pela NBR7680 – e ensaiados em condições incertas, que apresentam alta variabilidade devido, por exemplo, ao fato de as placas apresentarem gradientes de temperatura ao longo dos seus volumes, como demonstrado por Khoury (2000). Ainda assim, a verificação da resistência residual deve ser feita e confrontada com os requisitos de cada sistema estrutural.

Portanto, com esse cenário em vista, serão buscadas informações necessárias para a fundamentação de uma proposta de metodologia de análise de susceptibilidade do concreto com fibras sujeito a altas temperaturas a partir da tecnologia disponível internacionalmente e da capacitação laboratorial brasileira.

2 OBJETIVOS

2.1 Objetivo Geral

O principal objetivo deste trabalho é propor uma metodologia de homologação do concreto destinado ao revestimento de túneis quanto à segurança contra incêndio baseada na bibliografia disponível sobre o tema e na capacitação tecnológica brasileira.

2.2 Objetivos Específicos

Os objetivos específicos deste trabalho são os seguintes:

- a) Apresentar os efeitos decorrentes do aumento de temperatura em estruturas de concreto;
- b) Realizar um levantamento e análise da normativa e diretrizes internacionais existentes na área;
- c) Levantar a capacitação tecnológica brasileira no setor;
- d) Propor uma metodologia de ensaios exequíveis para a avaliação do concreto destinado ao revestimento de túneis.

3 JUSTIFICATIVA

O Índice de Performance Logística, divulgado anualmente pelo Banco Mundial, leva em conta diversos aspectos da eficiência dos países no transporte e comércio. O Brasil, em 2018, ficou na 56º posição desse ranking (Banco Mundial, 2018). Comparado ao PIB do mesmo ano, o Brasil se encontra na 9º posição dentre o resto do mundo (Fundo Monetário Internacional, 2018). Isso mostra a discrepância e deficiência na infraestrutura logística no país em comparação ao seu potencial.

Os túneis são obras de infraestrutura importantes para um país. “Construir infraestrutura em subterrâneo é muito mais efetivo, amigável ao meio ambiente” e apresenta inúmeras outras vantagens em relação às obras em superfície (Celestino, 2018). Segundo o mesmo Tarcisio Celestino, Presidente da Associação Internacional de Túneis, o mercado internacional de túneis se encontra superaquecido, com crescimento acima de outros setores da construção civil, enquanto o Brasil não acompanha essa tendência. Porém, essa área deve se desenvolver para que um país cresça e para que as necessidades da sociedade sejam atendidas sem deficiências.

Para que haja um desenvolvimento seguro dessa área, é necessário levar em conta a segurança estrutural dos túneis sob a condição de incêndio que, como já dito, é uma situação possível de ocorrer. Assim, deve haver uma forma objetiva de se avaliar a segurança estrutural de um sistema composto de concreto reforçado – seja com armadura ou fibras - na situação de incêndio, a qual é o foco deste trabalho.

Mais especificamente sobre o CRFA, deve-se destacar que, como já dito, é um material cujo uso tem crescido e a tendência é que ele se torne cada vez mais importante na engenharia civil, sobretudo em obras de infraestrutura como as de túneis, onde os grandes volumes de concreto poderão permitir um ganho financeiro mais representativo do seu potencial. Porém, as normas e recomendações de projeto relativas ao CRFA são ainda muito escassas, principalmente quando buscam conceituar o desempenho desse material em situação de incêndio (Dehn & Herrmann, 2017). A isso se deve o escopo de se criar uma metodologia de homologação englobando o CRFA, mas também outras formas de concreto reforçado.

4 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

Para se atingir os objetivos propostos, necessita-se reunir os conhecimentos – práticas, diretrizes e normativas – existentes para a avaliação de estruturas de concreto, especialmente na área de túneis que representa, atualmente, um dos usos mais significativos em quantidade para esse material. O Brasil não tem, historicamente, uma atuação relevante nesse setor e isso se traduz na documentação disponível. Por esse motivo, documentos estrangeiros são de suma importância. Países europeus, asiáticos e da Oceania representam grande parte da infraestrutura de túneis mundialmente. O clima as vezes rigoroso e a topografia muito irregular contribuem para essa realidade. Devido a isso, boa parte da bibliografia se refere a documentos vindos da Holanda, Austrália, Japão, Alemanha, França que são países experientes na arte de fazer túneis e pioneiros em muitas tecnologias.

Na outra parte da bibliografia, que trata mais especificamente do concreto reforçado com fibras em si, pôde-se reunir material a partir de pesquisas que estão em curso no exterior, mas também no próprio país.

4.1 O Concreto reforçado com fibras de aço (CRFA)

Como já mencionado, a adição de fibras na matriz de concreto permite que se unam as características positivas de cada material – fibras de aço e concreto – formando um material mais otimizado sob certos aspectos e que ainda é feito, em geral, com menos etapas de fabricação, o que pode reduzir o tempo dispendido em obra (Figueiredo, 2011). É necessário, porém, se discutir as propriedades que tornam o CRFA interessante para certas aplicações da engenharia e alguns dos problemas relacionados ao seu comportamento.

O concreto possui um comportamento frágil muito evidente, sobretudo quando rompido sob esforços de tração (Figueiredo, 2011). Essa característica é muito prejudicial às estruturas, pois se deseja que seja possível perceber que uma estrutura está entrando em processo de ruína, para que haja possibilidade de se realizar reparos. Nesse sentido, a colocação das fibras de aço reduz a fragilidade do concreto, pois as fibras se comportam como pontes de transferência de tensões em partes fissuradas (Figueiredo, 2011), fazendo com que estas ainda contribuam, de certa forma, com forças resistentes. Isso faz com que a velocidade de formação de fissuras caia em comparação ao concreto puro, caracterizando o CRFA como um material de comportamento “pseudo-dúctil ou não frágil” (Figueiredo, 2011).

Outros modos de se tensionar o concreto – compressão, cisalhamento e flexão - também são afetados pela presença das fibras na matriz. Alguns estudos demonstram que, na compressão, as fibras passam a influenciar o comportamento do material, em maior medida, após o pico de solicitação, ou seja, durante a fase não elástica de deformação (Johnston, 1974 apud Chanh, 2001; Padmarajaiah & Ramaswamy, 2002 apud Behbahani & Nematollahi, 2011).

Os esforços solicitantes de flexão também terão respostas diferentes para um concreto com e sem fibras, sendo que as fibras melhoram o desempenho do material

nessa situação (Williamson, The Effect of Steel Fibers on Compressive Strength of Concrete, 1974 apud Behbahani & Nematollahi, 2011), tendo ainda maior impacto na deformação na ruptura, a qual será bem maior para CRFA (Krenchel, 1974 apud Mehta & Monteiro, 2006). Porém, para que o efeito seja maior, as fibras devem ser alinhadas à direção da solicitação. Caso elas sejam distribuídas de forma mais aleatória e difusa, o efeito não é tão representativo (Behbahani & Nematollahi, 2011). Cabe destacar que, em muitos casos, esse tipo de solicitação aparece de forma mais concentrada, com a resultante de tração ocorrendo num ponto mais bem definido da seção. Nesses casos, a solução de armação é mais recomendada.

Diferentemente ocorre em esforços de cisalhamento. Esses normalmente são combatidos através da colocação de armaduras transversais cobrindo toda uma seção – chamados “estribos” - o que representa a necessidade de se realizar mais trabalhos na obra. A dispersão das fibras de forma aleatória em toda a matriz tem a capacidade de resistir a esse tipo de esforço, podendo substituir completamente as armaduras transversais convencionais (Noghabai, 2000; Williamson, 1978 apud Behbahani & Nematollahi, 2011). Isso justifica o fato de, em alguns casos, ser usada uma solução mista – ou híbrida - ou seja, um elemento estrutural composto ao mesmo tempo de armaduras convencionais e de fibras dispersas na matriz, pois essas peças resistentes podem trabalhar de forma complementar nesse aspecto (de la Fuente et al., 2012).

Devido às características mencionadas, um maior ganho de eficiência resistiva do CRFA pode ser obtido em sistemas contínuos – como pavimentos industriais e galerias tubulares de grandes comprimentos - sujeitos a esforços variáveis – devido principalmente a mudanças de temperatura ao longo do dia. Daí surge o porquê desse material já estar tão presente nas aplicações desses sistemas estruturais (Figueiredo, 2011).

Por fim, em geral, as fibras aumentam a capacidade de absorção de energia do material, ou seja, dão maior tenacidade (Figueiredo, 2011). Isso também pode ajudar na diminuição do comportamento frágil do concreto solitário sob outros aspectos, contribuindo para o aumento da segurança estrutural.

4.2 Efeitos do fogo no CRFA (Serafini, Rambo & Figueiredo, 2018)

A elevação da temperatura afeta a microestrutura tanto do concreto quanto do aço e, portanto, é capaz de provocar alterações no comportamento do CRFA. A análise dos efeitos do fogo pode ser compreendida melhor isolando os materiais do compósito.

Na matriz de concreto, o aumento de temperatura gera liberação de água combinada com alguns produtos de hidratação do cimento Portland – que ocorre em temperaturas de 100 °C a aproximadamente 800 °C - causando a sua decomposição. A pasta de cimento perde progressivamente a capacidade mecânica sofrendo, dentre outros efeitos: fissuração, desintegração e redução de resistência mecânica.

O agregado usado também condiciona o comportamento mecânico a altas temperaturas. Normalmente um dos problemas está relacionado à expansão térmica da brita que causa microfissuras na matriz de concreto. A intensidade do dano está sujeita à temperatura alcançada e ao tipo de agregado que está incorporado à estrutura do material. Segundo Serafini, Rambo e Figueiredo “a maioria dos

agregados não silicosos, como o calcário, é estável até os 600 °C~650 °C” (2018). Existem também agregados especiais que possuem coeficientes de dilatação térmica muito próximos daqueles encontrados na pasta de cimento, fazendo com que a expansão ocorra de forma conjunta, causando menos microfissuras e, portanto, fazendo com que a resistência não caia tanto. Argilas expandidas e vermiculitas são bons exemplos de agregados especiais. Por outro lado, agregados silicosos, como o quartzito tem seu volume aumentado em torno dos 575 °C – devido à ocorrência da transformação cristalina do quartzo - valor é considerado baixo para a maior parte dos incêndios, especialmente aqueles que ocorrem em túneis.

As fibras de aço estão sujeitas à deterioração quando as temperaturas ultrapassam os 500 °C. Esse valor está associado à recristalização do aço das fibras, a qual faz o material perder seu encruamento original, provocando alterações nas suas propriedades resistivas. A interface entre as fibras e a matriz de concreto também apresentará comportamento diferenciado após a elevação da temperatura. Nessa situação a energia de arrancamento das fibras muda – o que é verificado por meio do ensaio de *pullout* – e isso certamente contribui em grande maneira para a alteração do comportamento do material.

De forma global, o aumento da temperatura no CRFA prejudica: a resistência à compressão, resistência à tração, módulo de elasticidade e a capacidade de o material absorver energia. Em geral, ocorre uma queda maior das propriedades quanto maior for a temperatura atingida, como pode ser visto na Figura 1, que representa a queda percentual de resistência dos materiais devido ao aumento de temperatura.

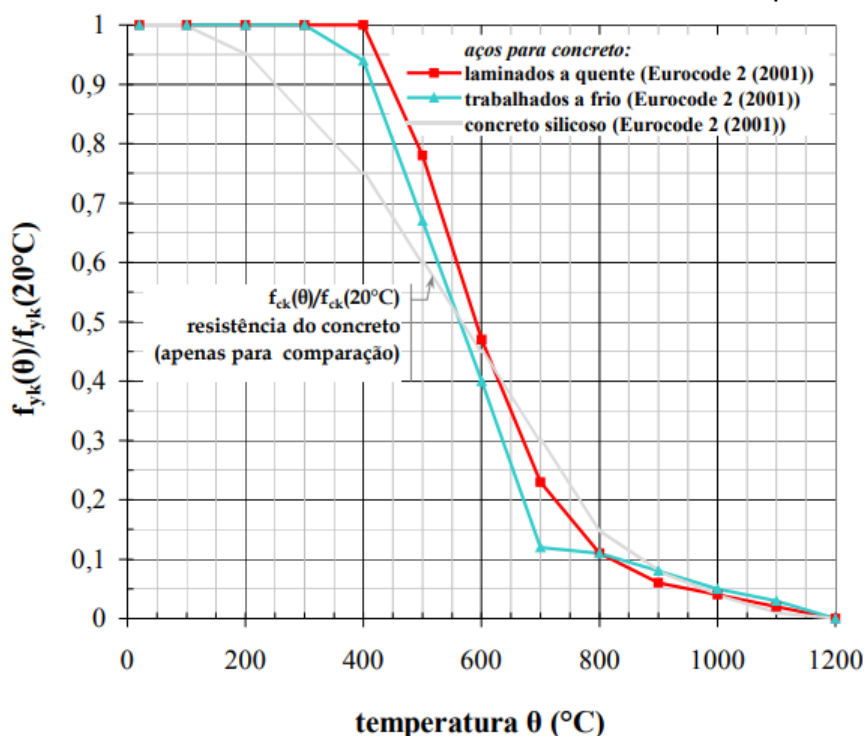


Figura 1 – Redução percentual das resistências de concreto e aços devido ao aumento de temperatura (apud Costa, Figueiredo & Silva, 2002)

A redução percentual do módulo de elasticidade desses materiais ocorre de forma semelhante, como pode ser observado na Figura 2.

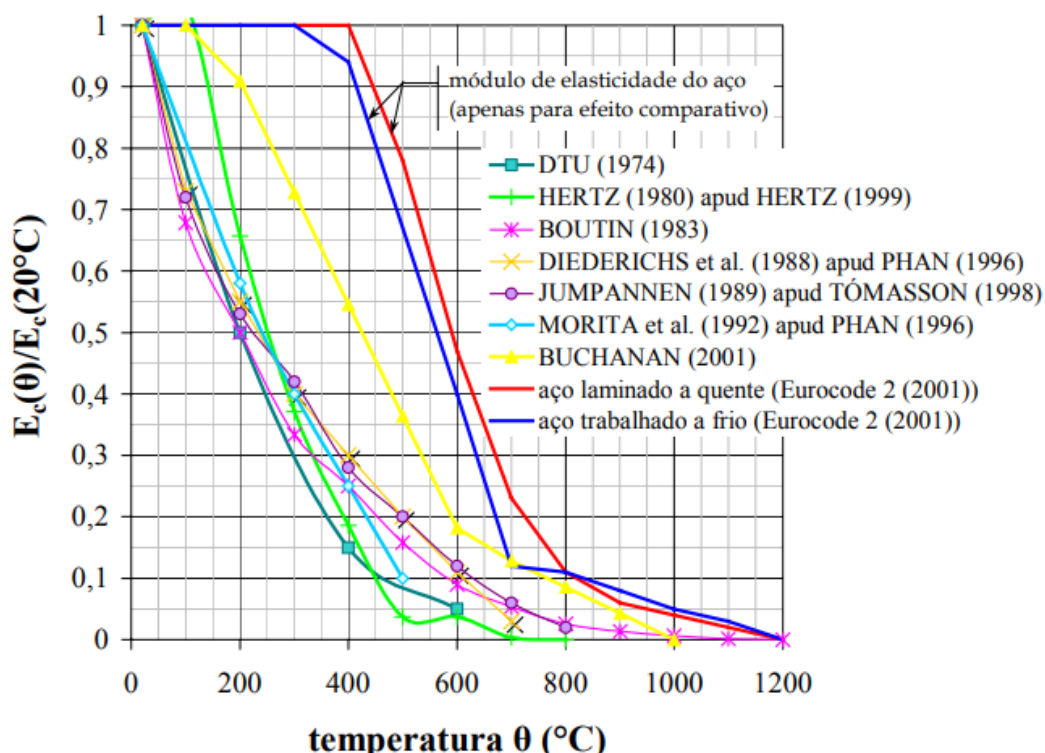


Figura 2 - Redução percentual do módulo de elasticidade de concreto (para vários autores) e aços devido ao aumento de temperatura (apud Costa, Figueiredo & Silva, 2002)

Uma característica muito importante do CRFA é o seu comportamento pós-fissuração. É um atributo que apresenta especificidades e que separa o CRFA de outras soluções. Essa resposta, na situação do incêndio depende de três fatores: tempo de exposição, temperatura atingida no ambiente e o tipo de fibra sendo utilizado. As fibras de aço, embora apresentem menores perdas dessa resposta quando comparadas às fibras feitas de outros materiais, ainda sofrem queda de desempenho, durante um incêndio, quando a matriz se encontra fissurada, pois as fibras terão seu módulo de elasticidade diminuído.

Com vista nesses efeitos, o aumento da temperatura, por si só, já gera disfunções suficientes no CRFA a ponto de poder causar o colapso de uma estrutura. Devido a isso, alguns ensaios levam em conta somente o incremento de temperatura durante uma análise, como será visto adiante.

4.2.1 Temperaturas extremas no CRFA

Considera-se esse caso quando as temperaturas ultrapassam os 1200 °C. Essa classificação diferenciada poderá ser um fator importante na proposição da homologação, pois poderá influenciar na curva de temperatura a ser adotada nos fornos.

Poucos estudos apresentam os efeitos de temperaturas dessa grandeza em concretos comuns – ou seja, destinados à resistir a temperaturas menos intensas. Normalmente esse tipo de avaliação é feito em maior grau em concretos refratários, os quais são pensados exatamente com esse objetivo. Ainda assim, algumas conclusões podem ser tiradas de alguns documentos.

Nos 1200 °C, o CRFA já se encontra muito deteriorado, pois todos os efeitos descritos anteriormente, já estão muito intensificados. Em geral, entre os 1200 °C e 1300 °C, alguns componentes do concreto começam a entrar em processo de fundição (Pimienta et al., 2017). Isso varia um pouco com base em alguns fatores como a composição do concreto e o tipo de agregado – agregados basálticos são os mais suscetíveis a temperatura, entrando em fusão a 1060 °C, enquanto agregados de quartzito só sofrem esse fenômeno acima dos 1700 °C (Naus, 2005). Acima de 1300 °C, o concreto já se encontra na forma fundida (Hager, 2013) e, portanto, a matriz cimentícia não terá mais nenhuma capacidade de se manter como um material coeso e integrado ao aço das fibras.

Os valores mencionados aqui, que representam a deterioração completa do concreto, são superiores àqueles encontrados na maior parte das curvas de temperatura – a exceção é a curva RWS, citada em 5.1.3 – mas são passíveis de ocorrerem como será demonstrado no item 4.5.2.

4.3 *Spalling* ou lascamento

É um evento que decorre do aumento de temperatura no concreto. Existem, na literatura, três formas de se explicar o funcionamento do lascamento. É importante destacar que, de forma direta ou indireta, o lascamento estará associado à existência de gradientes de temperatura no material, os quais foram demonstrados por Anderberg (apud Khoury, 2000).

A primeira forma de se explicar a ocorrência de lascamento envolve o aumento de pressões de vapor nos poros do concreto. Segundo Shorter e Harmathy, durante um incêndio, ocorre migração de vapor e ar para o interior do material, onde ocorre a condensação, devido às camadas mais internas do concreto estarem mais frias. O produto condensado começa, portanto, a trabalhar como uma barreira à passagem de novos gases. Esses gases começam a se acumular próximos às paredes, onde buscam serem liberados ao ambiente. Caso haja muita saturação nessa região e a permeabilidade do concreto for tal que restrinja a saída rápida desses vapores, a pressão nos poros das camadas mais externas aumentará, culminando na liberação de lascas (apud Nince, 2006). Um importante instrumento de prevenção desse mecanismo de lascamento é a colocação de microfibras de polipropileno (PP) na matriz de concreto. Essas fibras, após entrarem em fusão a aproximadamente 160 °C, deixam canais abertos que se tornam caminhos livres para movimentação de vapores no interior da matriz, fazendo com que as tensões possam ser dissipadas mais facilmente (Clement, 2010; Khoury, 2000).

Outro mecanismo de geração do *spalling* está associado ao surgimento de tensões de origem térmica na matriz – que ocorrem devido à existência de gradientes de temperatura no material - as quais podem causar a desintegração das camadas superficiais (Purkiss, 1996 apud Costa, Figueiredo & Silva, 2002). Um terceiro mecanismo de ação sugere a existência concomitante dos dois mecanismos anteriores (Khoury & Majorana, 2001 apud Nince, 2006).

O lascamento é um tipo de dano cuja previsão é imprecisa devido à natureza complexa do material (Khoury, 2000). Segundo Nince (2006), as variáveis que podem interferir na suscetibilidade do concreto ao lascamento podem ser divididas entre variáveis internas e externas. Dentre as variáveis internas mais importantes pode-se

citar a resistência e o grau de saturação do concreto com a água. Dentre as variáveis externas, as mais importantes são as ligadas à curva de aquecimento: temperatura máxima atingida e taxa de aquecimento. Segundo Khoury e Majorana (2001), nos primeiros trinta minutos do incêndio – quando a temperatura ambiente estará num valor entre 1100 °C a 1300 °C – ver Figura 7 - o *spalling* ocorrerá ou não dependendo da taxa de aquecimento e após isso dependerá da temperatura máxima atingida (apud Nince, 2006).

Existem alguns tipos de lascamento que são definidos na literatura. Os mais relevantes são aqueles capazes de causar maiores danos ao concreto. Dentre eles pode-se citar o lascamento superficial e o explosivo. O primeiro ocorre de forma progressiva onde camadas de concreto gradualmente se destacam do restante da estrutura. Isso faz com que, aos poucos, partes cada vez mais internas do material sejam expostas à ação do incêndio e, portanto, passam a ficar mais vulneráveis ao aumento de temperatura (Purkiss apud Costa, Figueiredo, & Silva, 2002). Os efeitos causados nos agregados e aço, descritos em 4.2, passam a ocorrer de forma mais rápida e intensa, diminuindo mais profusamente o desempenho do material. A descamação de um revestimento de concreto causada pelo *spalling* também se traduz numa perda de seção útil da estrutura, o que obviamente contribui para a diminuição da capacidade portante do sistema.

O lascamento explosivo ocorre de forma muito mais violenta e frágil, “formando grandes cavidades nos primeiros trinta minutos” do incêndio (Purkiss apud Nince, 2006). Esses mesmos trinta minutos são também relatados por Khoury; Majorana (2001, apud NINCE, 2006) como o período propício à ocorrência do lascamento explosivo, portanto, denotando que a ocorrência desse tipo de lascamento está mais ligada à razão de aquecimento do incêndio. Ainda mais, os autores relatam que os danos causados à estrutura são correntemente mais sérios que para outros tipos de *spalling*. A própria Nince (2006) chega a conclusões um pouco diferentes e afirma que a maior incidência desse tipo de lascamento foi entre 30 e 40 minutos. Porém, deve-se destacar que essa diferença nos tempos não mudará significativamente a temperatura em que o lascamento estará ocorrendo – o intervalo, anteriormente citado, de 1100 °C a 1300 °C praticamente se mantêm.

O lascamento explosivo pode, portanto, causar grandes danos ao sistema chegando ao ponto de inutilizá-lo totalmente. Nessa situação, não há mais resistência e a estrutura já colapsou. Em vista disso, um ensaio de avaliação do *spalling*, no qual o lascamento explosivo foi observado deve levar a rejeição total da peça ensaiada, uma vez que os danos não podem ser previstos com exatidão e dificilmente não terão grande impacto na estrutura.

Em geral, os concretos de alta resistência são os mais suscetíveis ao lascamento explosivo, pois possuem uma matriz menos porosa e por isso apresentam maior restrição na liberação dos vapores, o que contribui para o aumento das tensões no material podendo acarretar num comportamento mais explosivo. Nessas condições o *spalling* pode ocorrer inclusive entre temperaturas de 250 °C a 400 °C (Kalifa, Menneteau, & Quenard, 2000), que são consideradas muito baixas e ocorrerem logo nos primeiros minutos de um incêndio abastecido por hidrocarbonetos, sejam em local confinado ou não. Nas Figuras 1 e 2 se encontram ilustrados exemplos dos efeitos causados pelo *spalling*.



Figura 3 - Armadura de viga exposta devido ao *spalling* (fonte: <https://www.alphastructural.com/project-gallery/spalling-concrete/>, acessado em 03/12/2018)



Figura 4 - Danos devido ao *spalling* no revestimento de concreto no incêndio de 2008 no Eurotúnel (fonte: <https://www.tunneltalk.com/TunnelTech-May12-Concrete-fire-spalling.php>, acessado dia 03/12/2018)

4.4 Especificidades dos incêndios em túneis

As consequências de incêndios em túneis costumam ser mais devastadoras do que um incêndio em qualquer outro tipo de elemento de via (Tansey, 2014), tanto na questão da vida humana quanto no quesito financeiro.

Uma característica quase que específica de incêndios em túneis é que os usuários – motoristas e eventualmente até pedestres – possuem pouquíssimas opções de rotas de fuga disponíveis a eles (Australasian Fire Authorities Council, 2001). A fuga só poderá ocorrer num dos sentidos do túnel – pois o outro estará bloqueado pelo fogo – e talvez por alguma porta existente na lateral construída para esse fim. Essa última possibilidade, mesmo que bem sinalizada não é totalmente eficiente. Essas saídas especiais só estão presentes em intervalos de distância pré-definidos que podem não coincidir com a posição do fogo. Além disso, a experiência mostra que em geral as pessoas preferem fugir de um perigo por caminhos que conhecem (SFPE - Human Behavior in Fire Task Group, 2017). Assim, o trajeto mais óbvio durante um sinistro passa por uma das aberturas principais da via.

A conclusão apresentada no parágrafo anterior gera outro agravante. A cobertura de um túnel restringe assustadoramente a capacidade de dissipação da fumaça e gases tóxicos. Após o início do incêndio, pouco tempo é necessário para que toda a galeria seja tomada pela fumaça, o que causa diversos problemas às pessoas, como: queda da visibilidade, irritação, dificuldades respiratórias, intoxicação e asfixia. Esses efeitos aumentam a chance de ocorrência de injúrias graves e até morte (SFPE - Human Behavior in Fire Task Group, 2017)

Outro risco à vida associado ao incêndio é referente aos efeitos causados na estrutura de revestimento e suporte do túnel. Qualquer ocorrência de lascamento ou colapso de parte das aduelas devido à queda de resistência do CRFA pode ser fatal para um grande número de pessoas. A existência de uma cobertura também cria um local fechado que restringe a dissipação de calor. Isso certamente contribui para a criação de um ambiente mais severo, inclusive, que apresenta temperaturas maiores que a de um incêndio em local aberto (Tansey, 2014). Isso contribuirá para a ocorrência de maiores degradações no material de revestimento do túnel, potencializando acidentes e outros problemas.

Além dos problemas relacionados à segurança dos ocupantes, devem ser considerados riscos de origem financeira que decorrem do episódio do incêndio. Esses se dividem em duas partes: os custos de reparação do túnel e os custos associados à interrupção da operação deste. O primeiro gasto é mais tangível e fácil de calcular, pois se refere à recuperação do túnel após o sinistro. O segundo valor é devido à interrupção do acesso proporcionado por um túnel, em muitos casos, aumenta significativamente as distâncias a serem percorridas por todos na região e algumas vezes pode até inviabilizar o deslocamento entre localidades, atingindo também o transporte de cargas. Foi observado em alguns casos que os custos de inoperância podem ultrapassar facilmente os de reparo (Carvel; Rail Accident Investigation Branch, UK apud Lee et al., 2017; Peter, 1999).

Durante um incêndio em túnel, a carga total solicitante permanece constante, pois o solo acima não se modifica. Num incêndio num edifício, por exemplo, a carga solicitante permanente continua praticamente a mesma, enquanto a carga solicitante

variável é reduzida, pois a carga de multidão diminui devido à evacuação estar em curso. Portanto, a carga total também diminuirá, o que mostra mais um ponto crítico de uma obra em túnel.

Possivelmente, o problema mais sério é a movimentação geotécnica. O colapso de um túnel pode causar movimentações que afetarão estruturas diversas na superfície, como exemplificado nos estudos apresentados de uma organização que faz o controle geotécnico no governo de Hong Kong (Mainland East Division, 2015). Por exemplo, um túnel que corta uma área densamente povoada e que não se encontra a grande profundidade pode gerar sérias consequências às estruturas da superfície no caso de um colapso. Todo o solo acima do túnel se movimentará podendo ocasionar acidentes de ordem inimaginável.

Em resumo, túneis são obras complexas e que envolvem diversas especialidades. É equivocado pensar que não há preocupações importantes, além da movimentação geotécnica, na manutenção de um túnel. Como foi demonstrado o fogo é um agente extremamente perigoso e que deve ser impedido e quando já deflagrado, deve ser controlado a fim de se garantir a segurança dos usuários e da estrutura em si.

4.5 Principais condicionantes dos incêndios em túneis (Australasian Fire Authorities Council, 2001)

4.5.1 Causas principais de ignição

A deflagração de um incêndio não se relaciona diretamente com a intensidade que este alcançará. Como será visto a seguir, a grande maioria dos fatores condicionantes da deflagração não estão ligados à intensidade.

A estatística mostra que quase a totalidade dos incêndios ocorrem devido aos veículos e, ao contrário do que diz o senso comum, não acontecem majoritariamente em batidas. Os principais causadores da ignição do incêndio são problemas elétricos nos carros e de superaquecimento de freios.

Esses problemas podem ser associados às seguintes características dos túneis: comprimento, intensidade de tráfego, tipos de veículos que passam pelo túnel, velocidade de cruzeiro e inclinação do túnel – essa última está intrinsecamente ligada ao possível superaquecimento de freios.

4.5.2 Fatores que podem interferir na intensidade do fogo – dimensão e temperatura atingida

Historicamente, conflagrações de grande porte em túneis não são muito comuns. Em boa parte dos casos o fogo é controlado, seja por uma equipe de combate, seja por sistemas automáticos. Porém, quando isso não ocorre as consequências, normalmente, são catastróficas. É importante poder prever a gravidade que um incêndio pode atingir, pois esse será um parâmetro base para elaboração da proposta de homologação.

A simulação é um dos meios disponíveis quando se deseja tirar conclusões sobre um evento – neste caso, a verificação dos condicionantes da intensidade de um incêndio em túneis. Aqui, novos testes comprobatórios podem ser dispensados, uma vez que

muitos já foram feitos simulando diversas situações diferentes. Esses testes foram feitos por organizações competentes localizadas em países de atuação relevante na área de túneis – semelhante ao discutido no início do item 4 sobre a disponibilidade da normativa. Os objetivos principais eram verificar a diferença entre incêndio em espaço aberto e local fechado e analisar a taxa de liberação de calor e temperatura atingida nas paredes de um túnel para incêndios causados por diversos tipos de veículos.

Foi confirmado que incêndios em locais fechados, como túneis, são mais graves pois a dissipação do calor é muito restrita. Isso contribui para que um incêndio atinja temperaturas muito maiores. Outro dado importante é que o tipo de veículo – carro, ônibus, caminhão, etc. - influencia em grande maneira na severidade do fogo devido ao tamanho e também ao tipo de combustível que ele comporta. Nesse sentido, caminhões grandes de carga inflamável causam grande risco a um túnel. Obviamente a quantidade de veículos envolvidos também interfere nas dimensões do fogo.

A PIARC – organização com vasta experiência na organização de vias rodoviárias pelo mundo todo – após a realização de diversos experimentos na Europa e EUA, criou, em 1987, uma tabela que relaciona a intensidade do fogo para vários veículos, na qual pode ser verificada a influência que os fatores discutidos no parágrafo anterior têm sobre o incêndio. Essa tabela está reproduzida na Tabela 1.

Tabela 1 - Intensidade do fogo para diversas situações (Fonte: PIARC, apresentação em Brussels, 1987 – versão traduzida)

Veículo ignitor	Taxa de liberação de calor (MW)	Temperatura observada nas paredes do túnel (°C)
1 carro pequeno	2,5	400
1 carro grande	5	500
2 a 3 carros	8	-
1 van	15	-
1 ônibus	20	800
1 caminhão de carga	20 a 30	1000
1 caminhão de carga pesada ou perigosa	100 a 120	1200 a 1400

É importante mencionar que muitas características de túneis e materiais combustíveis podem influenciar na temperatura atingida num incêndio. Mesmo testes feitos de forma controlada e reprodutiva podem resultar em leves alterações, por isso é impossível elucidar todos os parâmetros envolvidos. Assim, se limitou a mencionar aquelas que possuem o maior potencial interventor.

4.6 Medidas de proteção a serem adotadas

Assim como em edifícios, túneis devem possuir medidas de proteção contra incêndio. Essas precauções possuem dois objetivos: diminuir a chance de ocorrência de incêndio e, se deflagrado, reduzir as consequências deste. Embora as medidas não sejam exatamente as mesmas para os dois tipos de estrutura – por exemplo, um túnel

não pode possuir compartimentação na área principal de fluxo, como um prédio bem projetado deve ter – algumas semelhanças ainda podem ser notadas. Nos túneis, o sistema global de proteção contra incêndio também pode ser dividido em proteção ativa e passiva.

As medidas ativas de proteção contra incêndio em túneis são as que mais se assemelham à de outras estruturas mais comuns. Dentre os sistemas pode-se mencionar: detecção e alarme, iluminação de emergência, sistemas hidráulicos como hidrantes e chuveiros automáticos e sistemas de ventilação e dissipação de fumaça. Devido à sua natureza, esses sistemas ajudam no objetivo de reduzir as consequências de um incêndio já deflagrado.

A proteção passiva possui ambos objetivos, tanto reduzir a ocorrência de um incêndio quanto minimizá-lo após a ignição. Dentre as medidas passivas de proteção contra incêndio existem também duas classificações de ações que podem ser tomadas: ações que envolvem o projeto e a administração do túnel - que inicialmente não parecem estar relacionadas com a ocorrência e severidade do fogo - e a aplicação de sistemas de proteção.

O primeiro tipo de ações envolve inicialmente um projeto bem feito. A não existência curvas fechadas, presença de acostamentos distribuídos ao longo do túnel, alinhamento vertical e horizontal favoráveis, todos contribuem, na fase de projeto, para uma maior segurança da via. Na parte administrativa, boa sinalização, redução da velocidade, proibição de ultrapassagem e, especialmente, com o objetivo de reduzir a severidade de possíveis incêndios, limitação do transporte de produtos perigosos e inflamáveis são medidas usadas correntemente em túneis do mundo todo de forma a se reduzir os riscos – ver item 4.5.2. No Japão, por exemplo, o transporte de cargas perigosas é restringido em túneis submersos ou com comprimento superior a 5 km (Mashimo, 2002).

Dentro dos sistemas de proteção passiva, as próprias fibras incorporadas ao concreto podem ser citadas. As microfibras de PP são incorporadas ao concreto como forma de se combater o lascamento. Como já dito no item 4.3, após sua fusão a 160 °C, as microfibras de PP deixam caminhos livres que servem para que os vapores originados do incêndio possam se movimentar mais livremente pela matriz até serem dissipados (Clement, 2010; Khoury, 2000). As fibras de aço são adicionadas com o objetivo de se melhorar o comportamento à tração e diminuir a fragilidade do concreto, permitindo que este apresente certa resistência mesmo após a fissuração da matriz (Figueiredo, 2011).

Outro tipo de proteção passiva contra incêndio comum nesse sistema é a colocação de barreiras superficiais na estrutura. Essas são normalmente aplicadas ou afixadas ao concreto e apresentam alta resistência ao fogo, por certo período de tempo pré-determinado. As barreiras podem ser desde tintas especiais, para casos mais leves, até placas ou mantas com alguns centímetros de espessura em casos mais extremos, como aqueles a que os túneis estão sujeitos. Segundo Khoury (2000), embora outros métodos de prevenção do *spalling* existam, somente o uso de fibras de PP e de barreiras são realmente efetivos e aplicáveis sem grandes dificuldades.

Os ensaios apresentados nessa dissertação pedem que esse tipo de proteção também seja incorporado aos corpos de prova durante os testes. Na verdade, como será visto mais adiante, a resistência desse tipo de proteção é um dos principais critérios avaliados pelos ensaios propostos e tem grande responsabilidade na aceitação ou não de um elemento estrutural.

4.7 Cenário nacional na área da proteção contra incêndio em túneis

A proteção contra incêndio no Brasil é ditada de forma obrigatória por meio da norma regulamentadora nº 23 e pelas instruções técnicas dos bombeiros. Essas instruções são compulsórias no sentido de que, sem o seguimento das diretrizes desses documentos, uma estrutura não pode receber o Auto de Vistoria do Corpo de Bombeiros – AVCB – e, portanto, estará irregular. A instrução técnica que trata especificamente da segurança dos túneis é a nº 35, porém, para um entendimento completo desse assunto, faz-se necessário consultar também a IT 08, pois essa é citada na IT 35, como a diretriz guia para as soluções estruturais sujeitas a um incêndio. A seguir será feita uma breve análise desses informes.

A NR 23 – Proteção contra incêndios – trata da segurança contra incêndio de forma bem abrangente e didática. São abordados os temas: saídas de emergência, treinamento de pessoal brigadista, classes de fogo, métodos de extinção e procedimentos a serem adotados numa emergência. São cobertos aspectos importantes da área, inclusive com a presença de assuntos mais básicos como as classes de fogo, mas sem um grande aprofundamento.

A IT 35 – Túnel rodoviário - prescreve algumas recomendações quanto ao projeto e exigências de segurança para esse tipo de obra. O texto trata, de forma mais específica, das medidas de proteção que devem ser incorporadas ao projeto dos túneis. Essas são consideradas em função do comprimento e da existência ou não de galerias separadas nos túneis. Em geral, as medidas mais comuns cobertas por essa instrução técnica são recomendadas para túneis com comprimento maior que 200 m e são aquelas já citadas no item 4.6, com relação à proteção ativa e passiva - exceto onde, nesse item, se sugere o uso das fibras no concreto. Outras medidas de segurança citadas nessa IT são: a exigência de um sistema de drenagem em todos os túneis; colocação de painel informativo da situação atual para túneis acima de 200 m, avisando inclusive a ocorrência de acidentes; sistema de comunicação com pontos locados a cada 60 m para túneis com mais de 500 m de comprimento; sistema de circuito interno de TV (CCTV) para túneis acima de 1000 m.

A IT 08 - Resistência ao fogo dos elementos de construção - prevê a aceitação de elementos estruturais por meio de ensaios de resistência ao fogo conforme a NBR 5628. Dentre as principais características dessa norma, estão as exigências dimensionais e de curva de temperatura a ser simulada. Esse documento exige que em ensaios em laje, a amostra tenha um tamanho mínimo de 2,5 m x 4,0 m, que são dimensões bem maiores que as recomendadas internacionalmente, como será visto mais adiante no item 5. Por outro lado, a curva de temperatura exigida por essa norma é a ISO 834, que é bem menos severa que as curvas HC e RWS, como está descrito no item 5.1.1.

Há também, no cenário nacional, outras normas da ABNT que tratam da segurança contra incêndio em túneis e no concreto em geral. A norma que mais se associa ao

problema sendo estudado é a NBR 15661 – Proteção contra incêndios em túneis – que está em processo de consulta nacional em 08/2018, sendo que o documento em consulta é o único encontrado em que há preocupação com o lascamento do revestimento de concreto, mas não se prevê meios de se analisar a suscetibilidade desse material a esse efeito, somente é citado o uso de fibras de PP – sem dosagem definida também – como importante proteção. Esse documento usa a metodologia de TRRF – Tempo requerido de resistência ao fogo – para dimensionar o revestimento. Essa metodologia está associada à curva ISO 834 e os tempos requeridos são definidos em normas – gerais ou específicas para uma dada estrutura; no caso dos túneis, a NBR 15661 define que o TRRF para revestimentos de concreto é de 120 minutos. O TRRF é função do risco e consequências de um incêndio em uma dada estrutura. O tempo de resistência ao fogo (TRF), que será calculado com base na queda de resistência mecânica dos materiais decorrente do aumento de temperatura, deve ser comparado com o TRRF especificado. Para que uma estrutura seja aceita, deve-se ter $TRF \geq TRRF$ (Costa, 2008). Vale destacar que a NBR 15661 só exige o cálculo do TRRF para túneis de comprimento maior que 500 m.

Pode-se observar que o assunto da segurança estrutural de revestimentos de túneis é pouco abordado no país, ainda mais de forma compulsória. Mais especificamente, a questão do *spalling* em si é pouco mencionada o que reforça mais ainda a necessidade de se analisar documentos em âmbito internacional que contenham essa prática.

4.8 Histórico de incêndios em túneis

Os túneis citados a seguir sofreram incêndios de grandes proporções. Muitas vezes, somente após um acontecimento dessa gravidade, que a legislação e práticas são mudadas em pró de uma maior segurança.

4.8.1 Mont Blanc (Wallis, 2001; Australasian Fire Authorities Council, 2001; Peter, 1999; BBC News, 2002)

Mont Blanc é um longo túnel internacional que conecta França e Itália, passando por baixo da cadeia montanhosa dos Alpes. Em março de 1999, um caminhão de carga carregando margarina e farinha pegou fogo dentro do túnel. Devido à origem do carregamento, o fogo rapidamente se disseminou para outros veículos. Estimativas citam temperaturas de 1000 °C a 1300 °C.

A fumaça gerada ficou confinada dentro do túnel e os sistemas de ventilação funcionaram de forma que aquela impedia a fuga dos ocupantes, que a recorreram a alguns refúgios dispostos ao longo do túnel. Esses por sua vez eram projetados para resistir somente a algumas horas a ação do fogo. O incêndio perdurou por 53 horas e vários dias foram necessários para que fosse seguro iniciar as operações de resgate pelo túnel. No total, 39 pessoas morreram. No âmbito econômico as perdas também foram graves. Além do custo de reparação, o túnel ficou parado por mais de 2 anos criando um gargalo na malha viária da região.

Alguns problemas foram observados e considerados determinantes para a gravidade atingida pelo incêndio, como pode ser observado pela ilustração apresentada na Figura 3. Um fator foi a falta de coordenação entre as equipes de resgate de ambos os países. Outro mais determinante foi o funcionamento incorreto de alguns dos sistemas de proteção contra incêndio. O sistema de ventilação trabalhou contra a segurança uma vez que acabou impedindo a fuga dos usuários e os refúgios se mostraram não resistentes o suficiente.

Os danos sobre o revestimento se estenderam por um comprimento de 1200 m dentro do túnel, sendo que boa parte sofreu lascamento severo com danos inclusive no reforço.



Figura 5: Situação interna do Túnel Mont Blanc pós ocorrência do incêndio – destaque para a ocorrência de *spalling* de forma profunda (Fonte: <https://www.tunneltalk.com/Fire-safety-Jun01-Mont-Blanc-highway-fire-reconstruction.php>, acessado em 03/12/2018)

4.8.2 Tauern (Australasian Fire Authorities Council, 2001)

O túnel Tauern está localizado em Salzburg na Áustria e é outro túnel de grande comprimento. Em maio de 1999, somente dois meses após o desastre em Mont Blanc, aconteceu um incêndio nesse túnel. O túnel estava parcialmente fechado para obras e um caminhão desgovernado em alta velocidade atingiu os veículos parados no canteiro. Esse evento deu origem a um engavetamento do qual originou-se o incêndio. Algumas pessoas morreram devido à batida em si, outras devido ao incêndio que se originou depois. No total, o episódio resultou em 12 mortos e 49 pessoas feridas. Dentre as perdas materiais, 40 veículos foram destruídos e o túnel permaneceu fechado por 3 meses.

4.8.3 São Gotardo (Jorio, 2011)

É um túnel suíço que atravessa os alpes, sendo uma das passagens mais movimentadas em toda a Europa, conforme o ilustrado na Figura 4. Em outubro de

2001, uma colisão entre dois caminhões – um deles transportando combustível Diesel - deu origem a um grande incêndio no túnel. Estima-se que as temperaturas chegaram a 1200 °C. A fumaça foi a principal responsável pelos 11 óbitos e diversos feridos.

Algumas foram medidas adotadas para se reduzir o número de acidentes e a probabilidade de ocorrência de incêndio no túnel. Foi reduzido o número de caminhões permitidos por hora, a sinalização especialmente a de indicação dos refúgios foi melhorada e o sistema de ventilação foi completamente revisado.



Figura 6 - Foto tirada durante incêndio no túnel São Gotardo (fonte: <https://www.swissinfo.ch/ger/gesellschaft/gotthard-strassentunnel-ist-sicherer-geworden/31380918>, acessado em 03/12/2018)

4.8.4 Eurotúnel (The Channel Tunnel Safety Authority, 1997; Rayner, Millward & Simpson, 2008)

É um túnel que atravessa o Canal da Mancha ligando França e Grã-Bretanha. É um túnel extremamente longo no qual os veículos rodoviários não trafegam por si, mas são transportados por trens assim como os passageiros. Foi inaugurado em maio de 1994 e, desde então, tem sofrido alguns incidentes. Já ocorreram cinco incêndios no túnel e sendo três destes de menor gravidade.

Em novembro de 1996, ocorreu o que é considerado o pior incêndio neste túnel. O incidente se deu principalmente devido a adoção de um protocolo inadequado. O fogo foi avistado quando o caminhão adentrava o túnel no lado francês, porém as instruções eram para que o trem seguisse viagem e o as medidas cabíveis fossem tomadas somente na Inglaterra. Esse equívoco fez com que o fogo se desenvolvesse parando a locomotiva no meio do caminho. Como resultado, algumas pessoas no trem inalaram fumaça e precisaram ser socorridas por outro trem vindo da galeria ao lado. Felizmente não houve casualidades fatais. O túnel foi parcialmente reaberto em dezembro do mesmo ano, mas somente voltou a funcionar plenamente em maio de 1997, após reparos. Com a reabertura, o protocolo de emergência foi mudado. Princípios de incêndio passaram a exigir ações imediatas, como a evacuação dos passageiros e combate ao fogo.

Em setembro de 2008 um incêndio foi reportado no lado francês do túnel e se originou mais uma vez num caminhão de carga pesada. O incêndio perdurou por 16 horas e alcançou temperaturas de até 1000 °C. Bombeiros dos dois países foram necessários para combater o incêndio. Embora o fogo tenha tomado alguns veículos, novamente não houve nenhuma vítima e ninguém ficou gravemente ferido. O túnel foi reaberto totalmente poucos dias depois.

5 PROPOSTA DE SISTEMATIZAÇÃO DA NORMATIVA INTERNACIONAL

Na revisão bibliográfica foi verificada a existência de alguns documentos que apresentavam exigências quanto ao projeto de túneis. O conteúdo dos textos é bem diversificado. Alguns documentos se limitam a apresentar experimentos já feitos, desastres já ocorridos e mostrar as conclusões tiradas desses eventos. Outras propostas vão mais longe e mencionam o fenômeno de *spalling* e queda de resistência estrutural das aduelas, mas não prescrevem ensaios a serem executados, tomam um caminho de se implantar medidas que ajudem a evitar um grande aumento de temperatura no concreto durante o incêndio. Assim, procuram evitar, teoricamente, alguns fenômenos de degradação.

Algumas poucas recomendações sobre ensaios foram encontradas durante a revisão. Qualquer uma destas especificações de ensaio pode ser substituída pelas condições que estarão presentes na obra, porém o objetivo deste trabalho é justamente congrega ensaios padronizados que reduzam a necessidade de se testar as condições específicas de cada obra. A seguir são listadas as curvas de temperatura e detalhados os pontos principais de cada proposta encontrada: EFNARC e Efectis. Após isso, é feita uma análise comparativa com as conclusões que podem ser obtidas.

5.1 Curvas de temperatura

Em ensaios envolvendo verificação de efeitos relacionados ao fogo é necessário simular as condições encontradas durante um incêndio. Isso é feito tipicamente num forno capaz de aquecer seu ambiente numa razão e limite pré-determinado. Essas características sempre variam com base em alguns parâmetros como a natureza do combustível e quantidade de oxigênio disponível para combustão. Por isso, existem diversas curvas de temperatura que podem ser usadas como guia para o aquecimento do forno durante um ensaio. Os testes descritos em 5.2 e 5.3 são feitos com os corpos de prova sendo aquecidos na razão de temperatura de uma das curvas citadas a seguir. As mais relevantes na área podem ser retiradas dos próprios manuais de ensaios ou normas e são apresentadas abaixo.

5.1.1 ISO 834 e ASTM E119

São curvas que simulam as condições de um incêndio em materiais de origem celulósica. Essas curvas possuem valores bem semelhantes e, devido à natureza desse tipo de material, são menos severas que as apresentadas na sequência e não representam as condições reais de um incêndio mais provável de acontecer em um túnel.

5.1.2 HC

A curva de hidrocarboneto (HC) busca simular as condições de crescimento de um incêndio com queima de combustíveis orgânicos em áreas mais abertas em que o calor pode se dissipar mais facilmente. É a curva mais usada em fornos diversos atualmente devido a se adequar à boa parcela dos incêndios que comumente ocorrem e por não apresentar altíssimas exigências de alcance de temperatura por parte dos fornos. Essa curva é caracterizada por atingir a temperatura de 1100 °C nos primeiros trinta minutos de ensaio e se estabilizar nesse valor até o final do teste.

5.1.3 RWS

A curva RWS, assim como a curva HC, busca simular um incêndio alimentado por combustíveis de origem petroquímica, porém, aqui considera-se que a área em que o incêndio ocorre é muito mais fechada, de forma que a dissipação do calor gerado é muito restrita. Isso está intrinsecamente ligado às condições de incêndio observadas em túneis. Essa diferença aumenta a severidade do fogo em geral, inclusive elevando a temperatura atingida no sinistro. Nessa curva a temperatura de pico de 1350 °C é atingida com uma hora de ensaio. Após isso, a temperatura baixa levemente caracterizando a redução de combustível disponível para a queima que acontece em qualquer incêndio. Na Figura 7 se encontram apresentadas as curvas HC, ISO 834 e ASTM E119 em uma comparação gráfica com a curva RWS.

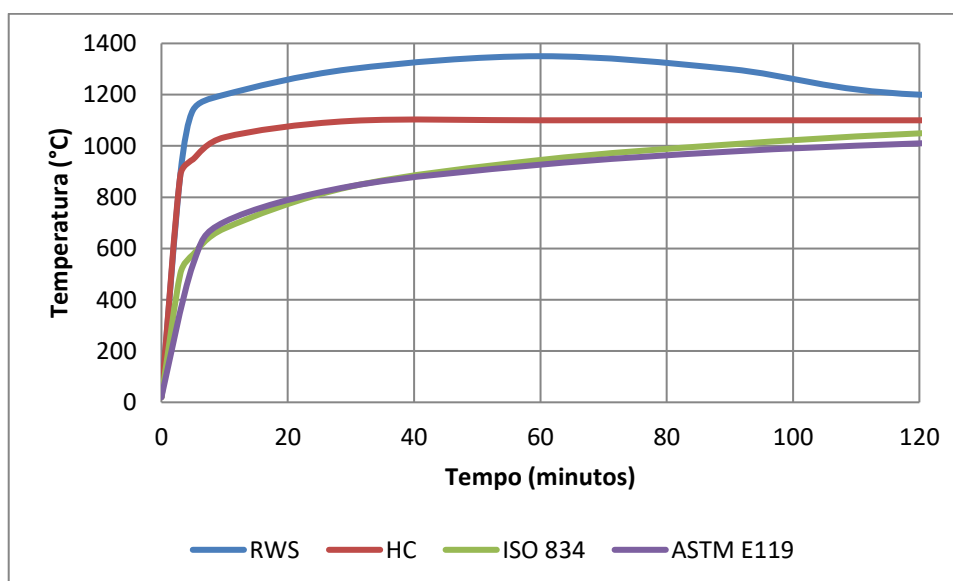


Figura 7 - Gráfico das curvas de temperatura usadas em ensaios

É importante destacar que a curva HC apresenta uma razão de aquecimento, nos primeiros minutos, semelhante à da curva RWS – o que pode ser visto no gráfico. Isso permite que a avaliação do lascamento explosivo – o efeito mais crítico – seja qualificada com qualquer uma das duas curvas, pois este tende a ocorrer em temperaturas baixas com alta suscetibilidade ao gradiente térmico (Nince, 2006) – ver item 4.3.

5.2 EFNARC

O documento completo descrevendo o procedimento de ensaio pode ser encontrado no site da EFNARC: <http://www.efnarc.org/> e mais diretamente no seguinte link:

<http://www.efnarc.org/pdf/Testing%20fire%20protection%20systems%20for%20tunnels.pdf>

A EFNARC é uma organização criada em 1989 e trabalha atualmente focada na aplicação de concretos especiais. É composta por especialistas da Europa, Ásia e Oceania. Em 2006 apresentou o documento “Especificações e diretrizes para verificação de proteção passiva contra o fogo em revestimento de túneis em concreto”. (Título original: “*Specification and Guidelines for Testing of Passive Fire Protection for Concrete Tunnels Linings*”)

Esse documento prevê a realização de um ensaio em laje padronizada (“Slab Test”) com dimensões mínimas de 1,8 m x 1,8 m, em que a porção central de 1,5 m x 1,5 m recebe a ação do calor vindo do fogo. Durante o teste o corpo de prova não é carregado, ou seja, a avaliação ocorre somente com o aumento de temperatura. Procurando simular o material que será usado na obra, toda proteção passiva que será aplicada ou inserida na matriz de concreto naquela situação deve estar presente também na laje de ensaio. Essa será testada por meio do aumento de temperatura no forno, que também deve ser capaz de produzir chama. O crescimento pode ocorrer baseado em qualquer uma das curvas de incêndio descritas em 5.1 – RWS, HC, ISO 834, ASTM E119 - ou outra curva mais específica prevista no próprio documento da EFNARC.

A EFNARC exige que sejam testadas duas lajes, em condições diferentes de umidade. Isso é devido a alguns fenômenos – como o lascamento – estarem intrinsecamente atrelados à umidade da peça. Todo o procedimento de fabricação das peças é controlado pelas diretrizes do EFNARC. Os termopares – dispositivos que fazem a medição da temperatura num ponto – devem ser quantificados e distribuídos na peça em função da proteção que se está sendo utilizada, o que também é descrito pelo documento.

Com esse ensaio procura-se avaliar o gradiente térmico que ocorre ao longo do volume de cada laje, os danos causados à estrutura e a integridade da superfície. Além do resultado final, a EFNARC exige que se documente qualquer acontecimento importante durante o ensaio. A ocorrência de fissuras, lascamento, desprendimento de partículas e qualquer outro tipo de deterioração deve ser anotada com a descrição do ocorrido, posição na matriz, tempo de ensaio e qualquer outro detalhe relevante.

Imediatamente antes do início do ensaio térmico, quatro testemunhos – cilíndricos de 50 mm de diâmetro e 75 mm de altura – devem ser extraídos de cada laje para que seja testada a resistência à compressão do concreto antes da deterioração. Após a execução do ensaio em forno, dois testemunhos devem ser extraídos da laje testada – pela face não exposta ao fogo - e submetidos a ensaio de compressão para verificação da resistência final. Esses valores devem ser comparados com a resistência dos testemunhos que não sofreram aquecimento.

A posição de extração dos testemunhos nas lajes deve respeitar um mapa fornecido pela própria EFNARC que se encontra representado na Figura 6.

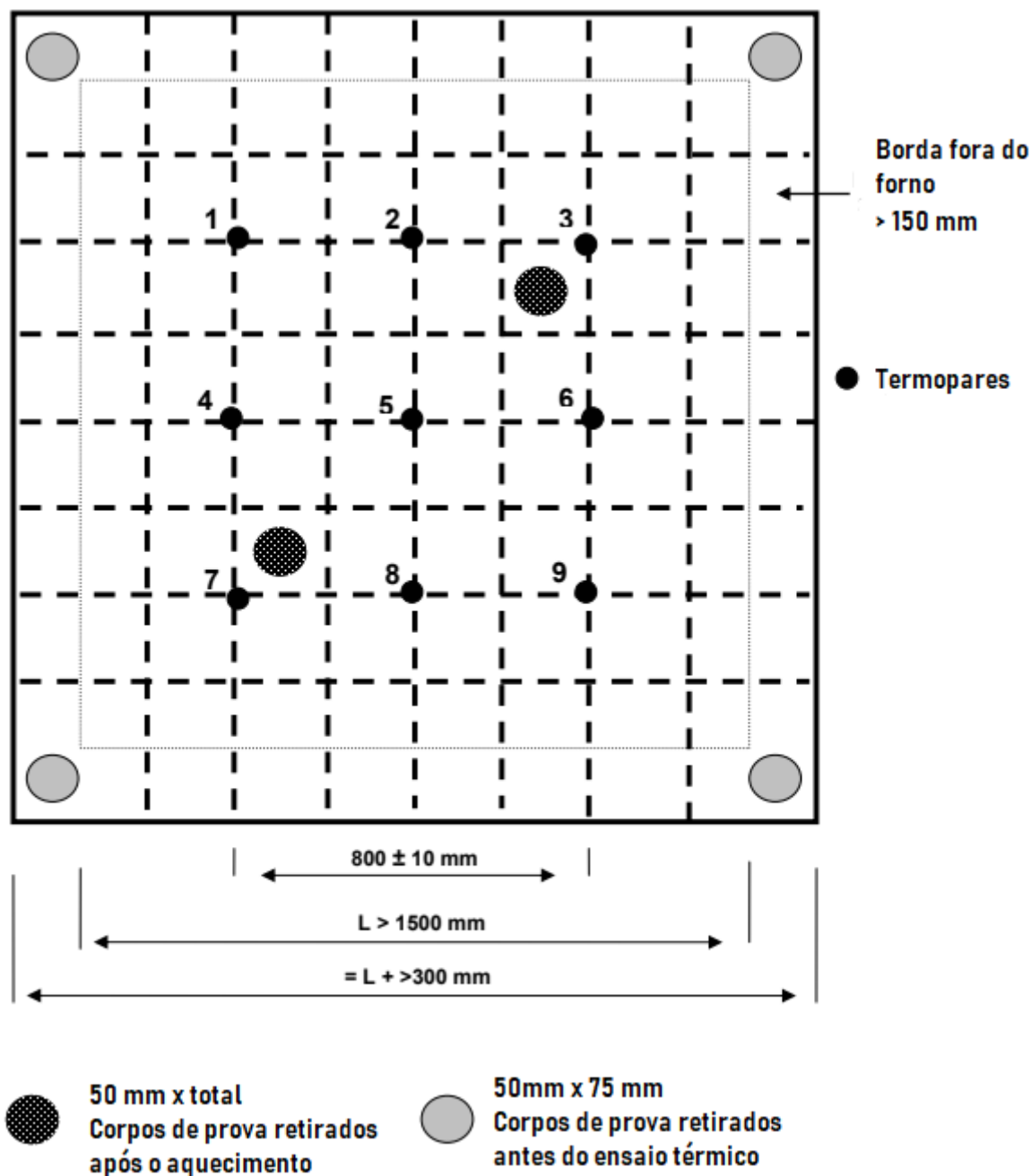


Figura 8 - Mapa de extração de corpos de prova para ensaio (EFNARC, 2006) - versão traduzida

Deve-se destacar que esse procedimento de extração de testemunhos é um processo complicado. O documento da EFNARC mostra o mapa de extração, os locais, as dimensões e a amostragem e cita que os corpos de prova devem ser inspecionados após a extração, porém não detalha o processo. Esse procedimento deve, portanto, ser complementado com as diretrizes da NBR 7680-1 (Concreto — Extração, preparo, ensaio e análise de testemunhos de estruturas de concreto Parte 1: Resistência à compressão axial). Mais informações serão apresentadas no item 7.3, após a apresentação da proposta final.

Obs.: O documento da EFNARC permite também a realização de um ensaio com uma laje de menor dimensão, porém, só com caráter experimental e que, portanto, não pode ser usado para se comprovar a segurança do sistema real.

5.3 Efectis

O documento completo descrevendo o procedimento de ensaio pode ser encontrado no site da Efectis: <https://effectis.com/en/> e mais diretamente no seguinte link: <https://effectis.com/en/the-group/publications/>, no ícone “RWS test procedure fire protection for tunnels”.

Efectis é um grupo com sede em alguns países europeus, principalmente na França e Holanda. Possui 65 anos de experiência na área de incêndio, atuando em diversas atividades, como modelagem, certificação, ensino e inspeção, com foco nesta especialidade. Em setembro de 2008 foi lançado o “Procedimentos de ensaio para revestimento de concreto em túneis”. (Título original: *“Fire testing procedure for concrete tunnel linings”*)

Esse documento prevê a realização de dois ensaios, o primeiro focado na ocorrência de lascamento e o segundo na avaliação da proteção passiva o qual é verificada se observando o gradiente térmico ao longo da peça. Esse, assumidamente, interferirá na resistência mecânica da peça. Para ambos, a composição e as condições de endurecimento do concreto devem ser iguais à da situação real e a proteção passiva que estará presente na obra também deve ser aplicada aos corpos de cada ensaio. Para ambos os ensaios a seguir, o forno deve ser capaz de produzir chama e seguir uma das curvas descritas em 5.1 - RWS, HC, ISO 834, ASTM E119 - ou outra curva mais específica prevista no próprio documento da Efectis, a fim de simular as condições reais de ação de um incêndio sobre a superfície das paredes do túnel.

Recomenda-se que o ensaio de lascamento seja o mais próximo possível da realidade devido à complexidade do fenômeno. Porém, o tamanho mínimo das peças estará sujeito à forma com que o concreto será trabalhado. Para aduelas pré-moldadas se recomenda realizar o ensaio com a peça de tamanho original. Para a situação em que o concreto fresco será aplicado na obra, ensaios com uma peça de espessura recomendada em projeto devem ser executados – no ensaio, um valor de 40 cm é suficiente para obras em que a espessura exceda esse número. Com base nisso, a largura e comprimento da peça devem ter um valor mínimo igual de 6 a 8 vezes a espessura laje. Esse ensaio deve ser realizado ao menos em dois corpos de prova para que se ateste estatisticamente a segurança do sistema. Os espécimes também devem ser carregados durante o ensaio. A força de compressão prevista em projeto deve ser aplicada de forma concomitante com o aumento da temperatura. Isso pode ser feito por meio de um carregamento distribuído de mesma intensidade da maior força solicitante ou através de protensão. Após o ensaio, deve-se verificar a condição de cada peça, reportando a ocorrência ou não de lascamento. Em caso positivo deve-se detalhar as características dos danos.

O segundo ensaio deve ser feito numa laje de 15 cm de espessura com dimensão mínima de 1,45 m x 1,45 m, onde no mínimo uma área de 1,15 m x 1,15 m é insuflada com fogo. A laje deve estar posicionada na horizontal durante o ensaio, a fim de

simular a condição mais crítica de uma aduela no túnel. Essa parte da proposta não está atrelada a um túnel específico. Os resultados desse segundo ensaio podem ser utilizados para validar o projeto de qualquer outro túnel, desde que os efeitos do primeiro ensaio também sejam contemplados.

Para se avaliar completamente a proteção passiva, ainda se recomenda que sejam executados ensaios para verificar outros tipos de ações aos quais os túneis estão sujeitos como ataques químicos e a ocorrência de ondas de pressão no ambiente.

5.4 Análise dos métodos para unificação

Os documentos apresentados da EFNARC e Efectis mostram preocupação com os efeitos mais relevantes da ação do fogo sobre túneis. A integridade da proteção passiva e a ocorrência de lascamento são os parâmetros mais contemplados. Na Tabela 2 se encontram resumidas as informações mais relevantes sobre os ensaios.

Tabela 2 - Súmula dos ensaios de revestimento de túneis

Critérios	EFNARC	Efectis	
		Ensaio 1	Ensaio 2
Padronização e uso universal de resultados	Sim	Não	Sim
Foco do ensaio	Resistência à compressão, resistência ao fogo da proteção passiva, <i>spalling</i> , fissuração, alterações na superfície	<i>Spalling</i>	Resistência ao fogo da proteção passiva
Tamanho das amostras	1,8 m x 1,8 m	Tamanho real	1,45 m x 1,45 m
Espessura da amostra	20 cm a 25 cm	Limitado em 40 cm	15 cm
Quantidade	2 peças (com saturações diferentes)	2 peças (idênticas)	1 peça
Orientação da laje no ensaio	Vertical ou horizontal	Vertical ou horizontal	Horizontal
Curva de temperatura	Preferencialmente RWS	Preferencialmente RWS	Preferencialmente RWS

Os documentos da EFNARC e da Efectis prescrevem métodos parecidos. A EFNARC prediz um ensaio focado na resistência à compressão e da proteção passiva, porém recomenda a observância de outros fenômenos de degradação. O grupo Efectis dá maior destaque ao efeito do *spalling*, inclusive coibindo a realização de um teste em escala, porém, permitindo que no Ensaio 2, os resultados possam ser reusados para uma mesma proteção passiva, assim como ocorre na EFNARC – ou seja, caso uma proteção passiva seja aprovada, qualquer outro túnel que use a mesma proteção não precisará refazer os ensaios, pois aquela proteção já foi considerada apta à garantir a segurança do revestimento.

Quanto ao tamanho das amostras, os valores apresentados são resultados de estudos de cada uma dessas organizações a fim de combater efeitos de borda nos ensaios. Portanto, um valor base respeitando os mínimos de cada documento é autorizado, permitindo, nesse quesito, a união das ideias. Ambos os órgãos reconhecem a necessidade de se repetir os ensaios com o objetivo de aumentar a confiança

estatística dos resultados diante das situações mais críticas como o *spalling* e simular condições de saturação diferentes no material. Nessa circunstância específica a orientação das placas de concreto também não foi considerada relevante pelas duas associações.

O ponto de maior dissidência entre os documentos é certamente a avaliação da ocorrência de lascamento. O ponto de vista de cada documento cria um debate se a complexidade desse fenômeno permite o ensaio em escala ou não. Um ponto importante também é que somente no procedimento proposto pela EFNARC está prevista a avaliação da resistência residual do material que, embora difícil de qualificar, é muito interessante para fim de validar corretamente um projeto.

Outro ponto a ser destacado que pode gerar dúvidas é sobre qual curva de temperatura deve ser usada nos ensaios. Ambos documentos exigem que os fornos sejam capazes de chegar a temperatura de 1350 °C, a fim de simular a curva RWS – é a curva mais usada mundialmente em simulações relacionadas a incêndios em túneis - porém, permitem a utilização de outras curvas mostradas em 5.1, as quais possuem picos de temperatura e velocidades de incremento bem distintas – por exemplo, a curva HC possui o mesmo incremento de temperatura que a curva RWS, porém alcança somente os 1100 °C; as curvas ISO 834 e ASTM E119 possuem gradientes de aumento de temperatura ainda menores, quando comparadas às curvas RWS e HC, e somente passam dos 1000 °C após duas horas de ensaio. Isso pode influenciar em grande maneira os resultados e deve certamente ser analisado de forma mais aprofundada.

6 POSSIBILIDADE DE APLICAÇÃO DA METODOLOGIA DE ENSAIO NO PAÍS

Aqui serão avaliados alguns dos laboratórios mais capacitados do país na realização de ensaios de resistência ao fogo. Os locais foram elencados a partir de discussões com especialistas que possuem boa rede de contatos na área. As informações logo abaixo estão resumidas e foram conseguidas através do envio de um mesmo questionário para cada laboratório. As perguntas feitas juntamente às respostas completas informadas pelos próprios laboratórios se encontram no Anexo I.

6.1 Instituto de Pesquisas Tecnológicas do Estado de São Paulo (IPT)

O IPT possui o Laboratório de Segurança ao Fogo e a Explosões - LSFEx – que, desde 1979, atua na área da segurança contra incêndio no país. Dentre as atividades desenvolvidas nesse laboratório estão presentes os ensaios de resistência ao fogo, os quais são de interesse desse trabalho.

O IPT possui fornos vertical e horizontal, ambos com capacidade de produzir chama e aplicar carga. O forno horizontal é menos potente e se encontra em processo de substituição por um maior e com mais capacidade calorífica.

O forno vertical é capaz de ensaiar peças de até 2,8 m x 2,8 m, atendendo às exigências dos documentos internacionais apresentados. Esse forno também é capaz de simular a curva HC, sendo, portanto, adequado à verificação da maioria dos efeitos.

6.2 Unicamp

A Universidade de Campinas possui, dentro da Faculdade de Engenharia Civil, Arquitetura e Urbanismo, o Laboratório de Estruturas e Materiais de Construção Civil. Esse laboratório possui diversos fornos que realizam ensaios cuja natureza é de interesse desse trabalho.

Foi informado que existem quatro fornos para ensaios de resistência ao fogo e todos são elétricos, ou seja, não produzem chama, porém todos podem também aplicar carregamento. Além disso, todos os fornos só conseguem simular a curva ISO 834.

Dois desses fornos apresentam dimensões maiores, chegando a até 4 m de comprimento, porém em ambos, a largura é reduzida, sendo mais propício ao ensaio de barras – vigas e pilares. Outro forno é mais usado para simulação de cargas vindas de uma prensa. Possivelmente, o forno de maior destaque é um capaz de simular amostras de dimensões máximas de 40 cm. Esse forno é usado especificamente para análise da tendência do lascamento explosivo.

6.3 Universidade de São Paulo – Campus São Carlos

A Escola de Engenharia de São Carlos possui um forno no seu Laboratório de Estruturas localizado no Departamento de Engenharia de Estruturas da escola.

O forno é horizontal, com capacidade de ensaiar peças com dimensões de até 4m x 3 m, possuindo também uma profundidade de 1,5 m. Assim como os anteriores, esse forno também é capaz de produzir chama e a aplicação de carga nas peças durante

os ensaios também é possível. De acordo com o que foi informado pelo laboratório, esse forno pode simular qualquer curva desejada.

6.4 Universidade dos Sinos – Rio Grande do Sul

A Unisinos, localizada no Rio Grande do Sul, possui dentre outros institutos tecnológicos, um focado no desempenho das construções civis – Itt Performance. Dentre as atividades desenvolvidas nesse instituto estão aquelas relacionadas à avaliação da segurança contra incêndio, também contemplando ensaios de resistência ao fogo.

Estão presentes, no instituto, dois fornos, um horizontal e outro vertical. Em ambos pode ocorrer a aplicação de carga e a produção de chama. O forno vertical tem menor capacidade calorífica, podendo simular apenas as curvas ISO 834 e ASTM E119.

O forno principal do laboratório é o horizontal. Esse forno pode ensaiar amostras de até 3,9 m x 3,9 m e é capaz de simular, inclusive, a curva RWS, podendo logicamente também realizar ensaios com as outras curvas, que são menos severas.

6.5 Análise da capacitação técnica

A maioria dos laboratórios mencionados possuem fornos que atendem às exigências dimensionais da EFNARC e Efectis. Pelo menos um dos fornos de cada lugar pode até ensaiar corpos de prova com o dobro das dimensões daquelas solicitadas pelos dois documentos. Isso será importante principalmente para a análise do *spalling*, pois parte dos efeitos de borda serão eliminados dos resultados, gerando maior representatividade para ensaios de revestimentos contínuos ou de peças muito grandes em obras. Quase todos os laboratórios também possuem fornos capazes de produzir chama como obriga ambos os métodos de ensaio.

Quanto à curva de incêndio a ser usada, a maioria dos laboratórios também se mostraram bem capacitados, podendo simular ao menos a curva HC, o que permite a avaliação do *spalling* e da maioria dos outros efeitos. Os laboratórios da Unisinos e da USP São Carlos disseram ser capazes de simular a curva RWS, o que permite uma análise mais severa da resistência residual, já que a verificação da integridade por meio da não ocorrência de lascamento explosivo pode ser feita já com a curva HC. Com base nessas informações, foi criada a Tabela 3 contendo os dados sobre os fornos em cada laboratório.

Para seleção dos laboratórios aptos, foram definidas algumas exigências relacionadas às características de cada um dos fornos. Uma vez que as dimensões eram respeitadas pelos fornos principais dos laboratórios, a definição da viabilidade resultou da capacidade dos fornos produzirem chama – como exigido pelos documentos da EFNARC e Efectis – e simularem ao menos a curva HC de temperatura. Como pode ser visto na tabela 3, IPT, Unisinos e USP São Carlos possuem fornos que atendem essas exigências.

Tabela 3 - Capacitação tecnológica no país

Laboratórios	Orientação das amostras no forno	Dimensões	Produz chama?	Curva mais extrema que pode ser simulada	Viabilidade de uso
IPT (SP)	Horizontal	Não informadas	Sim	ISO 834	-
	Vertical	2,8 m x 2,8 m	Sim	HC	OK
Unicamp	Vertical	4 m x 0,4 m	Não	ISO 834	-
	Horizontal	2,5 m x 0,4 m	Não	ISO 834	-
	Qualquer	0,4 m x 0,4 m	Não	ISO 834	-
	Qualquer	Não informadas	Não	ISO 834	-
Unisinos (RS)	Horizontal	3,9 m x 3,9 m	Sim	RWS	OK
	Vertical	Não informadas	Sim	ISO 834	-
USP São Carlos	Horizontal	4 m x 3 m	Sim	RWS	OK

7 PROPOSTA FINAL

Foi demonstrado ao longo do texto que todos os efeitos analisados da alta temperatura sobre o concreto e seus reforços são capazes de interferir nas propriedades desses materiais e, portanto, interferir negativamente na segurança estrutural. Porém, levando-se em conta os danos de cada efeito, a complexidade, a extensão de temperatura no qual esses danos ocorrem e os casos estudados de incêndios anteriores em túneis, nota-se claramente que a proposta deve focar na verificação do lascamento explosivo.

O lascamento explosivo é certamente o efeito mais crítico e o que é capaz de, mesmo a temperaturas relativamente baixas, causar maiores problemas à estrutura podendo inutilizá-la totalmente. Ainda pode também afetar a resistência, causar perda de seção útil de concreto em menor escala, retirando a camada de superfície, a qual também serve de proteção aos componentes internos do material. Considerando ainda a natureza imprevisível, fica ainda mais claro que o lascamento explosivo realmente deve ser o objeto maior de preocupação para esse tipo de problema. Com essa conclusão em mente, foi elaborado o esquema de ensaio mostrado a seguir.

O fluxograma da Figura 9 leva em conta o que já foi dito sobre a importância do lascamento explosivo na avaliação e de se comparar a resistência residual com a solicitante de projeto. Esse esquema de ensaio servirá de base para a escolha do documento e dos demais procedimentos necessários.

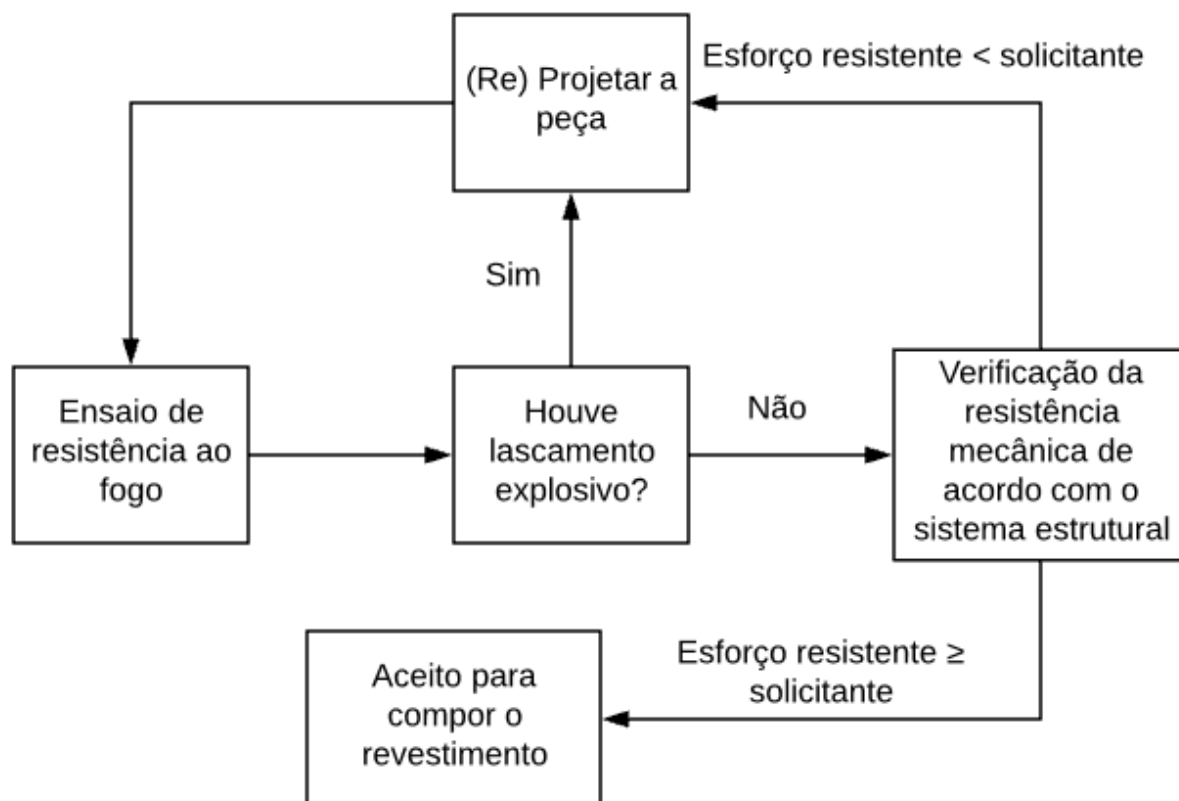


Figura 9 - Fluxograma de verificação do revestimento de túneis de concreto sujeitos a incêndio

Com vista nisso, respeitando o fluxograma da Figura 9, ambos os documentos – EFNARC e Efectis – representam ótimas diretrizes para verificação da segurança estrutural do revestimento de túneis. Como já dito o guia da Efectis prioriza a verificação do *spalling* procurando dedicar um ensaio só para isso. O documento da EFNARC recomenda a verificação desse efeito e da resistência residual num mesmo corpo de prova, o que não prejudica a avaliação do lascamento de forma alguma. Ainda é bom destacar que a metodologia da EFNARC prevê a execução de ensaios em duas lajes com diferentes condições de umidade, o que pode conduzir a resultados mais próximos de situações reais.

Foi também mostrado no item 6.5 que existe a possibilidade de se aplicar no país as metodologias apresentadas nesses documentos. Três laboratórios informaram ter fornos capazes de realizar os ensaios necessários com as dimensões e curvas de temperatura mais adequadas, além de atenderem ao quesito da produção de chama. Outro ponto importante é a exigência de ensaio em forno horizontal para o teste da proteção passiva no documento da Efectis. Isso limitaria o número de laboratórios que podem ser usados.

O documento da EFNARC prevê a realização de ensaios de compressão simples ao final do aquecimento a fim de verificar a resistência residual do material, o que vai ao encontro do proposto na Figura 9, enquanto o documento da Efectis engloba essa verificação de forma indireta verificando a integridade da proteção passiva, mas em um ensaio de uma nova laje. A análise dos danos somente na proteção passiva não permite que se tenha uma boa quantificação dos resultados e pode até gerar soluções excessivamente conservadoras e caras. A análise da resistência residual de forma direta é, portanto, imprescindível para que um sistema possa ser avaliado de forma

completa, pois permite que os resultados sejam mais bem definidos – embora essa análise ainda seja de certa forma imprecisa, como será discutido no item 7.3.

A metodologia da EFNARC se mostrou mais adequada ao uso no país e, portanto, ela será recomendada por este autor para a homologação do concreto de revestimento de túneis para a situação de incêndio. Os ensaios propostos vão ao encontro do que já foi discutido no início deste trabalho e os detalhes do texto da EFNARC apresentam um caminho mais simples e econômico, e ainda seguro, para avaliação do material.

O resumo da metodologia de ensaio da EFNARC e o caminho para o texto original pode ser encontrado no item 5.2 deste trabalho.

7.1 Definições e tolerância ao lascamento explosivo

Como definido na Figura 9, a ocorrência de lascamento explosivo anula totalmente um sistema estrutural, fazendo com que este necessite ser repensado e reavaliado para a ocorrência de lascamento explosivo. Deve-se, portanto, definir precisamente o que caracteriza e indica a ocorrência de lascamento explosivo. Isso é feito com base na Tabela 4, feita originalmente por Khoury e Majorana (2001) e expandida por Nince (2006).

Tabela 4 - Definições de tipos de lascamento (Khoury e Majorana, 2001; Nince, 2006)

Tipo de lascamento	Tempo (min)	Som	Intensidade	Espessura max. (mm/min)	% Vol Lascado	Dano
Superficial grau 1	1-25	pipoca		0,36	até 1%	baixo
Superficial grau 2	1-25	pipoca		0,60	1- 10%	médio
Explosivo	20 - 55	estouro		2,83	>10%	alto
Pós-resfriamento	> 30	sem		2,00	> 1%	médio/alto

	Muito baixo - só com ouvido na parede do forno
	Baixo - sentado na escada junto ao forno
	Alto - ouvia-se a 2 metros de distância
	Forte e alto - ouvia-se da entrada do laboratório

Segundo Nince, a Tabela 4 foi expandida com ensaios feitos com a curva HC – a isso se deve a diferença no tempo de ocorrência do lascamento explosivo, diante dos ensaios de Khoury e Majorana, 2001. O som e intensidade, características do *spalling* citadas na Tabela 4 se referem ao barulho que o despreendimento de material causa no ambiente de ensaio. Outra coluna importante é a que indica a porcentagem de volume lascado. O volume lascado deve ser comparado ao volume original do material para se obter essa razão.

Com base na Tabela 4, pode-se definir de forma prática para ser aplicada à proposta que o lascamento explosivo é um fenômeno que, quando da sua ocorrência, é ouvido pelo técnico responsável por supervisionar o ensaio um estouro alto e forte e que ocasiona perdas de volume maiores que 10% do original. Nas situações em que esses parâmetros forem observados, a laje ensaiada deverá ser prontamente rejeitada.

Quando o volume lascado não atingir 10% do volume original ou o som produzido no lascamento não for forte e alto, como definido por Nince na Tabela 4, o lascamento não será considerado explosivo e, portanto, o material ensaiado será aceito para prosseguir na análise da resistência residual.

7.2 Curva de temperatura

Outro ponto levantado no item 5.4 foi sobre a curva de temperatura a ser usada. Dos estudos analisados no item 4.5.2, é possível concluir que a temperatura de pico da curva RWS é justificável, pois foi mostrado que, em algumas situações, esse valor é passível de ser atingido em incêndios em túneis e apresenta efeitos muito singulares no CRFA – item 4.2.1. Ainda assim, simular a curva RWS não deve ser prioridade na análise, pois o efeito mais crítico ocorre a temperaturas bem menores que 1350 °C. Como foi mostrado no item 4.3, o lascamento explosivo é o efeito mais crítico para a segurança de uma estrutura de concreto e também pode ocorrer logo nos primeiros minutos de um incêndio (Khoury & Majorana, 2001). Nesse período, esse efeito também está mais relacionado ao gradiente de temperatura a que o material é sujeito – item 4.3 - variável que não apresenta grandes mudanças quando as curvas HC e RWS são comparadas – vide Figura 7.

Assim, quando for possível devem-se ensaiar as peças com a curva RWS. Nas outras situações, somente a curva HC é capaz de conduzir a resultados satisfatórios, principalmente no que diz respeito à questão do lascamento explosivo.

7.3 Extração de testemunhos e análise da resistência residual

A análise da resistência residual é parte integrante do documento escolhido na proposta – EFNARC. Essa avaliação envolve, em ordem cronológica, a extração de testemunhos das lajes ensaiadas e posteriormente a execução de ensaios de compressão simples. Como dito no item 5.2, a extração deve seguir a NBR 7680.

Em linhas gerais, as exigências na norma se relacionam com o uso de equipamento especial – “extrator provido de cálice e coroa diamantada” - também tratando do número, dimensões e amostragem para ensaios de compressão simples. Com base nesses fatores, a NBR 7680 também prevê a correção da resistência ensaiada com base em quatro coeficientes. É importante destacar que, durante a análise dessa norma, foram verificadas algumas inconsistências entre os requisitos dela e do documento da EFNARC. Isso ocorre devido à finalidade distinta dos documentos. Por exemplo, a EFNARC prevê que o diâmetro dos corpos de prova retirados após o ensaio em forno seja de 50 mm e que tenham altura igual à espessura da placa da qual foram extraídos – ou seja, sem cortes; a face exposta ao fogo e a face oposta devem estar no corpo de prova. A NBR 7680 requisita que os corpos de prova tenham relação altura/diâmetro de no máximo 2, o que faria com que a altura máxima deles fosse de 100 mm. Portanto, restariam duas opções: somente ensaiar lajes com espessura máxima de 100 mm – o que é quase inviável, pois o revestimento de um túnel dificilmente não ultrapassará esse valor – ou cortar os corpos de prova, o que, como já foi dito, não é permitido pela EFNARC. As diretrizes da EFNARC sobre as dimensões de testemunhos podem gerar outro agravante. Corpos de prova com alturas de, por exemplo, 200 a 300 mm – que são espessuras comuns de revestimentos de túneis – e diâmetros de 50 mm são muito esbeltos – duas a três vezes mais esbeltos do que o recomendado pela NBR 7680 – o que gera outras

complicações no ensaio de compressão, uma vez que o fenômeno da flambagem passa a ter maior significância do que se a relação altura/diâmetro ≤ 2 fosse respeitada. Esses tipos de inconsistências podem também gerar problemas no cálculo da resistência final já corrigida pelos fatores K_i , uma vez que esses dependem de variáveis como altura/diâmetro.

Recomenda-se, então, que caso alguma inconsistência seja encontrada no processo de preparo para extração dos corpos de prova, a NBR 7680 seja usada de forma integral.

Ainda assim, esse processo não será inteiramente preciso. Uma questão muito importante a ser levada em conta é o gradiente de temperatura presente nos corpos de prova e não há nenhum fator de correção para esse efeito na NBR 7680. Esse gradiente pode ser visto a seguir nos gráficos da Figura 8 criados por Anderberg (2000).

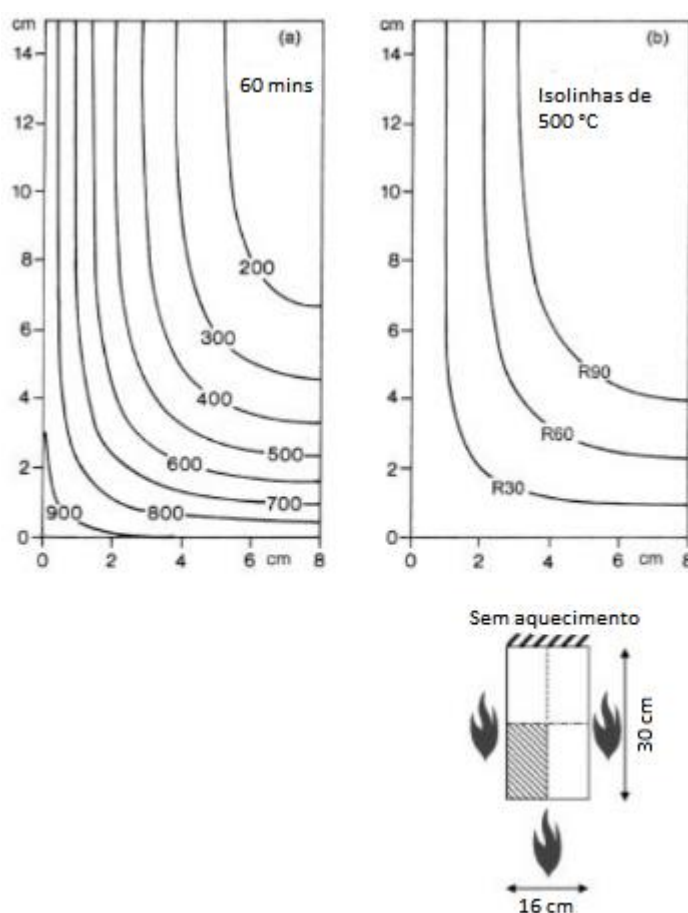


Figura 10 - Perfil de temperaturas numa seção de concreto - (Anderberg apud Khoury, 2000 – versão traduzida)

Da mesma forma que esse gradiente foi visto em planta, ele também ocorrerá em profundidade, ou seja, haverá um gradiente de temperatura ao longo de todo o volume de uma laje ensaiada. Assim, o que ocorre na prática é que uma mesma laje – e consequentemente um mesmo corpo de prova – apresentará diferentes estágios de degradação, com suas propriedades mecânicas também variando ao longo do corpo. Tudo isso contribui para que a previsão da resistência residual do material seja difícil

e, por enquanto, imprecisa. Na verdade, esse é um campo que ainda carece de estudos e está além do escopo deste trabalho. Ainda assim, realizar todo o procedimento descrito neste item em busca de uma projeção da resistência residual é de suma importância.

8 COMENTÁRIOS FINAIS

Foi discutido ao longo do texto que existem grandes lacunas de informações e diretrizes disponíveis no país contemplando o comportamento do concreto com fibras em situação de incêndio. O tema é bastante complexo, porém os estudos se encontram em pleno desenvolvimento. Esse trabalho buscou exatamente preencher uma das lacunas existentes no assunto que concernia à inexistência de um guia de aplicação do CRFA – e que pode ser aplicado ao concreto armado também - de forma segura e eficiente para as obras de túneis, que representam boa parte das aplicações do concreto com fibras atualmente.

Os objetivos propostos inicialmente compreendiam um caminho bem claro para que a meta final fosse atingida. A análise dos efeitos do fogo sobre concreto com fibras juntamente ao restante da revisão bibliográfica permitiu mostrar a relevância e dificuldade que está associada ao problema proposto, além de conduzir à tomada de decisão sobre o efeito mais crítico que ocorre no material pela ação do fogo.

A análise dos documentos internacionais que continham as diretrizes de ensaios de lajes de concreto guiou a proposta de metodologia apresentada nesse texto e que foi adaptada para as condições brasileiras devido à análise feita da capacitação. Ao final, os objetivos propostos foram atingidos e como pôde ser visto, contribuíram ao resultado alcançado.

Por fim, esse trabalho pode ajudar a criar caminhos mais eficientes para a aplicação do concreto com fibras – e o concreto armado, inclusive - em túneis e mostra que essa área da infraestrutura pode se desenvolver com segurança.

9 REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- ABNT. (Dezembro de 2001). NBR 5628 - Componentes construtivos estruturais - Determinação da resistência ao fogo.
- ABNT. (2015). NBR 7680 - Concreto - Extração, preparo, ensaio e análise de testemunhos de estruturas de concreto- Parte 1: Resistência à compressão axial.
- ABNT. (Agosto de 2018). NBR 15661 - Proteção contra incêndio em túneis rodoviários e urbanos.
- Alpha Structural, Inc. (s.d.). *Alpha Structural gallery*. Fonte: Site da Alpha Structural, Inc.: <https://www.alphastructural.com/project-gallery/spalling-concrete/>
- Anderberg, Y. (1997). Spalling phenomena of HPC and OC. 69-74. Gaithersburg, Maryland, USA.
- Anderberg, Y. (2000). Temperature Profiles. *Annez A CEN/TC92/SC2/PTI-2 Doc 58*. Suécia.
- Australasian Fire Authorities Council. (2001, Setembro 10). Fire Safety Guidelines for Road Tunnels.
- Banco Mundial. (2018). *International LPI*. Fonte: The World Bank: <https://lpi.worldbank.org/international/global?sort=asc&order=LPI%20Rank#datatable>
- BBC News. (9 de Março de 2002). *Mont Blanc tunnel reopens*. Fonte: Site da BBC News: <http://news.bbc.co.uk/2/hi/europe/1863245.stm>
- Behbahani, H., & Nematollahi, B. (2011). Steel Fiber Reinforced Concrete: A Review. *International Conference on Structural Engineering, Construction & Management*, (pp. 7-8). Kandy.
- Berto, A. F. (1991). Medidas de proteção contra incêndio: Aspectos fundamentais a serem considerados no projeto arquitetônico dos edifícios. São Paulo, São Paulo, Brasil.
- Bombeiros, C. d. (2011). INSTRUÇÃO TÉCNICA Nº 08/2011 - Resistência ao fogo dos elementos de construção.
- Bombeiros, C. d. (2011). INSTRUÇÃO TÉCNICA Nº 35/2011 - Túnel Rodoviário.
- Carvel, R. (Março de 2010). Fire Dynamics during the Channel Tunnel Fires. *Fourth International Symposium on Tunnel Safety and Security*. Alemanha.
- Celestino, T. B. (30 de Agosto de 2018). Entrevista durante o Cobramseg 2018. Presidente a Associação Internacional de Túneis.
- Chan, S. Y., Peng, G. F., & Anson, M. (Maio/Junho de 1999). Fire behavior of high-performance concrete made with silica fume at various moisture contents. 405-409. Detroit, Michigan.
- Chanh, N. V. (2001). Fiber Reinforced cements and concretes. *Advances in concrete technology - Gordon and Breach Science publishes, III*.
- Clement, F. (2010). Fire protection options for concrete tunnel linings. *Fourth International Symposium on Tunnel Safety and Security*, (p. 231). Frankfurt.
- Costa, C. N. (2008). Dimensionamento de elementos de concreto armado em situação de incêndio. São Paulo, São Paulo, Brasil.
- Costa, C. N., Figueiredo, A. D., & Silva, V. P. (2002). Aspectos Tecnológicos dos Materiais de Concreto em Altas Temperaturas.
- Costa, C. N., Figueiredo, A. D., & Silva, V. P. (2002). *O fenômeno do lascamento ("spalling") nas estruturas de concreto armado submetidas a incêndio - uma revisão crítica*. Belo Horizonte.

- de la Fuente, A., Figueiredo, A. D., Aguado, A., Molins, C., & Chama Neto, P. J. (2012). Steel fibre reinforced concrete pipes. Part 2: Numerical model to simulate the crushing test. *Revista IBRACON de Estruturas e Materiais*, 12-25.
- Dehn, F., & Herrmann, A. (2017). Concreto reforçado com fibra de aço (SFRC) em situação de incêndio - requisitos normativos, pré-normativos e códigos-modelo. *Concreto & Construções*, 108-112.
- Efectis. (Setembro de 2008). Fire testing procedure for concrete tunnel linings.
- EFNARC. (Março de 2006). Specification and Guidelines for Testing of Passive Fire Protection for Concrete Tunnel Linings.
- Figueiredo, A. D. (2011). Concreto Reforçado com Fibras. 247. São Paulo, Brasil.
- Fundo Monetário Internacional. (Outubro de 2018). *IMF Data Mapper*. Fonte: Site do IMF: https://www.imf.org/external/datamapper/NGDPD@WEO/WEO_WORLD
- Hager, I. (2013). Behaviour of cement concrete at high temperature.
- Han, C.-G. (2005). Performance of spalling resistance of high performance concrete with polypropylene fiber contents and lateral confinement.
- Johnston, C. D. (1974). Steel fiber reinforced mortar and concrete, A Review of mechanical properties. *Fiber reinforced concrete ACI - SP 44*. Detroit.
- Jorio, V. L. (20 de Outubro de 2011). Fonte: Site da Swissinfo.ch: <http://www.swissinfo.ch/ger/gesellschaft/gotthard-strassentunnel-ist-sicherer-geworden/31380918>
- Kalifa, P., Menneteau, F. D., & Quenard, D. (Dezembro de 2000). Spalling and pore pressure in HPC at high temperatures. 1915-1927. Elmsford.
- Khoury, G. A. (2000). Effect of fire on concrete and concrete structures. *Progress in Structural Engineering and Materials*, pp. 429-447.
- Khoury, G. A., & Majorana, C. E. (2001). Modelling of concrete spalling in fire.
- Krenchel, H. (1974). Fiber Reinforced Concrete.
- Lee, Y. S., & et al. (2017). General risks for tunneling projects: an overview. *AIP Conference Proceedings*, (p. 4).
- Lima, R. C., Kirchhof, L. D., Casonato, C. A., & Silva Filho, L. C. (18,19 de Novembro de 2004). Efeito de altas temperaturas no concreto. Porto Alegre, Rio Grande do Sul, Brasil.
- Mainland East Division. (Abril de 2015). Catalogue of Notable Tunnel Failures - Case Histories.
- Mashimo, H. (Abril de 2002). State of the Road Tunnel Safety Technology in Japan.
- Mehta, K., & Monteiro, P. (2006). *CONCRETO: Microestrutura, Propriedades e Materiais*.
- Naus, D. J. (Novembro de 2005). The Effect of elevated Temperature on Concrete Materials and Structures - A Literature Review.
- Nince, A. A. (2006). Lascamento do concreto exposto a altas temperaturas. São Paulo, São Paulo, Brasil.
- Noghabai, K. (2000). Beams of Fibrous Concrete in Shear and Bending: Experiment and Model. *Journal of Structural Engineering*, pp. 243-251.
- Padmarajaiah, S., & Ramaswamy, A. (2002). A finite element assessment of flexural strength of prestressed concrete beams with fiber reinforcement. *Cement and Concrete Composites*.
- Palermo, G., & Helene, P. (1997). Concreto projetado como revestimento de túneis. São Paulo, São Paulo, Brasil.
- Pedroso, F. L. (2009). Concreto: as origens e a evolução do material construtivo mais usado pelo homem. *Revista Ibracon Concreto & Construções*, 81.
- Peter, F. (1999). *The causes, effects & control of real tunnel fires*.

- Pimienta, P., Alonso, M. C., McNamee, R. J., & Mindeguia, J.-C. (2017). Behaviour of high-performance concrete at high temperatures: some highlights. *RILEM Technical Letters*.
- Pinheiro, L. M. (Maio de 2007). Fundamentos do concreto e projeto de edifícios. São Carlos, São Paulo, Brasil.
- Purkiss, J. A. (1996). *Fire Safety Engineering: Design of Structures*.
- Rail Accident Investigation Branch, Department for Transport. (2007). Fire on HGV shuttle in the Channel Tunnel. UK.
- Rayner, G., Millward, D., & Simpson, A. (11 de Setembro de 2008). *Channel Tunnel closed after freight train fire*. Fonte: Site do Telegraph UK: <https://www.telegraph.co.uk/travel/travelnews/2800485/Channel-Tunnel-closed-after-freight-train-fire.html>
- Serafini, R., Rambo, D. A., & Figueiredo, A. D. (2018). Concreto reforçado com fibras em situação de incêndio. *Concreto & Construções*, 58-61.
- SFPE - Human Behavior in Fire Task Group. (2017). *Guide to Human Behavior in Fire, 2nd Edition*.
- Sullivan, P. J. (2004). A probabilistic method of testing for the assessment of deterioration and explosive spalling of high strength concrete beams in flexure at high temperature. 155-162. Elmsford.
- Tansey, M. (6 de Junho de 2014). *Tunnel fires: why they are vulnerable to disaster, the consequences and possible solutions*. Fonte: Site da hemmingfire.com: http://www.hemmingfire.com/news/fullstory.php/aid/2122/Tunnel_fires:_why_they_are_vulnerable_to_disaster,_the_consequences_and_possible_solutions_.html
- The Channel Tunnel Safety Authority. (1997). Inquiry into the fire on Heavy Goods Vehicle shuttle 7539 on 18 November 1996.
- Tiberti, G. (Junho de 2014). Concrete Tunnel Segments with Combined Traditional and Fiber Reinforcement: Optimization of the Structural Behavior and Design Aspects. Brescia, Itália.
- Trabalho, M. d. (2011). NR 23 - Proteção contra incêndios.
- TunnelTalk. (Maio de 2012). *Fire-spalling of self-compacting concrete*. Fonte: Site da TunnelTalk: <https://www.tunneltalk.com/TunnelTech-May12-Concrete-fire-spalling.php>
- Wallis, S. (Junho de 2001). *Fire damage rebuild of Mont Blanc road link*. Fonte: TunnelTalk: <https://www.tunneltalk.com/Fire-safety-Jun01-Mont-Blanc-highway-fire-reconstruction.php>
- Williamson, G. R. (1974). The Effect of Steel Fibers on Compressive Strength of Concrete. 195-207. Detroit, Michigan, USA.
- Williamson, G. R. (1978). Steel Fibers as Reinforcement in Reinforced Concrete. *US Army Science Conference*, (pp. 363-377).

ANEXO I – RESPOSTAS DOS LABORATÓRIOS PARA O QUESTIONÁRIO

IPT – Respondido por Anderson Nobre

Questionário sobre fornos de ensaio de resistência ao fogo de concreto

1 Identificação do laboratório que realiza esse ensaio. Localização (estado, cidade)

Laboratório de Segurança ao Fogo e a Explosões (LSFEx) - IPT

Av. Professor Almeida Prado, 532, São Paulo/SP – Brasil

2 Quantidade de fornos disponíveis e dimensões dos corpos de prova?

No Laboratório de Segurança ao Fogo e a Explosões existem dois fornos para a realização de ensaios de resistência ao fogo, um vertical e um horizontal.

As dimensões dos corpos de prova para ensaios em paredes sem função estrutural no forno vertical é de, aproximadamente, 2.600 mm de largura, 2.600 mm de altura e de espessura de utilização. Para paredes com função estrutural é de, aproximadamente, 2.800 mm de largura, 2.800 mm de altura e de espessura de utilização.

3 Orientação de cada forno (vertical ou horizontal)?

Um forno vertical e um forno horizontal.

4 Produzem chama?

Forno Vertical

O sistema de aquecimento utiliza cinco queimadores a gás natural, dispostos nas duas paredes laterais, distando 500 mm da parede que contém o corpo de prova e posicionados de maneira que não haja encontro frontal entre eles.

Forno Horizontal

O sistema de aquecimento consiste de três queimadores alimentados por gás natural localizados nas paredes laterais do forno.

5 Curvas padrão de elevação de temperatura que os fornos são capazes de aplicar no ensaio?

Curva de incêndio de materiais celulósicos, conforme norma ISO 834-1:1999 e ASTM E119.

Curva de incêndio de hidrocarboneto, descrita no Eurocode, aplicada somente no forno vertical.

6 Há a possibilidade de se aplicar carregamento simultâneo nos corpos de prova durante o ensaio de resistência ao fogo?

Sim, somente no forno vertical. O carregamento do corpo de prova é realizado através de pistões hidráulicos, visando reproduzir as solicitações de serviço.

Unicamp – Respondido por Armando Moreno

Questionário sobre fornos de ensaio de resistência ao fogo de concreto

1 Identificação do laboratório que realiza esse ensaio. Localização (estado, cidade)

Laboratório de Estruturas e Materiais de Construção Civil da Faculdade de Engenharia Civil, Arquitetura e Urbanismo da UNICAMP. Cidade de Campinas, estado de São Paulo.

2 Quantidade de fornos disponíveis e dimensões dos corpos de prova

3 Orientação de cada forno (vertical ou horizontal)?

4 Produzem chama?

5 Curvas padrão de elevação de temperatura que os fornos são capazes de aplicar no ensaio?

6 Há a possibilidade de se aplicar carregamento simultâneo nos corpos de prova durante o ensaio de resistência ao fogo?

Responderei as questões de 2 a 6:

Temos 4 fornos. Todos elétricos. Todos conseguem elevar a temperatura com o tempo segundo a ISO834.

Um deles é vertical, específico para avaliação de pilares. Consegue avaliar pilares de até 4 metros e 40cm de maior dimensão transversal. Conseguimos aplicar até 3000 kN no pilar. Um outro é horizontal, específico para avaliação de vigas. Consegue avaliar vigas de até 2,5 metros e seção transversal de no máximo 40 cm como maior dimensão. Conseguimos aplicar até 500 kN de carregamento. O outro é um pequeno forno que usamos para caracterização dos materiais sob elevadas temperaturas. Conseguimos aplicar pequena carga, de no máximo 100 kN e dimensões das amostras de no máximo 40x40x40. Usamos este forno para avaliação da tendência ao lascamento explosivo do concreto. O último deles é um forno que pode ser acoplado à prensa de 2000 KN que temos aqui no Laboratório. É pequeno. Conseguimos avaliar corpos de prova

de concreto, barras de aço, blocos de alvenaria, com carga e sob temperatura.

Universidade de São Paulo – Campus São Carlos (SP) – respondido por Jorge Munaiar Neto

Questionário sobre fornos de ensaio de resistência ao fogo de concreto

1 Identificação do laboratório que realiza esse ensaio. Localização (estado, cidade)

Laboratório de estruturas localizado no departamento de engenharia de estruturas da EESC/USP em São Carlos, estado de São Paulo

2 Quantidade de fornos disponíveis e dimensões dos corpos de prova?

Possuímos um forno a gás natural, com dimensões internas de 4m x 3m x 1,5m, como limitante para o tamanho dos corpos de prova

3 Orientação de cada forno (vertical ou horizontal)?

Forno horizontal

4 Produzem chama?

Sim, por meio de oito queimadores do tipo on-off, dois em cada face lateral do forno

5 Curvas padrão de elevação de temperatura que os fornos são capazes de aplicar no ensaio?

De acordo com o fabricante, o forno consegue simular qualquer curva desejada, inclusive a curva de incêndio-padrão

6 Há a possibilidade de se aplicar carregamento simultâneo nos corpos de prova durante o ensaio de resistência ao fogo?

Sim, mas apenas uma força única por meio de atuador e no centro do forno. Já fizemos ensaios em vigas e sistemas de piso considerando esse carregamento

Universidade dos Sinos – Rio Grande do Sul – Respondido por Bernardo Tutikian

Questionário sobre fornos de ensaio de resistência ao fogo de concreto

1 Identificação do laboratório que realiza esse ensaio. Localização (estado, cidade)

O forno precisa seguir a curva de túneis, mais exigente do que a de edificações. Creio que apenas o nosso forno tenha condições, mas não posso afirmar. Mas o nosso tem condições. Forno horizontal, dentro do itt Performance, Unisinos, Rio Grande do Sul.

2 Quantidade de fornos disponíveis e dimensões dos corpos de prova?

Creio que apenas 1 forno. A dimensão da amostra é de 3,9m

3 Orientação de cada forno (vertical ou horizontal)?

Horizontal. No vertical não representa a realidade.

4 Produzem chama?

Sim, são 8 queimadores.

5 Curvas padrão de elevação de temperatura que os fornos são capazes de aplicar no ensaio?

Praticamente todas. A da ISO 834, ASTM E 119, a curva de hidrocarboneto (curva H), entre outras.

O nosso forno vertical só atende as da ISO 834, ASTM E 119.

6 Há a possibilidade de se aplicar carregamento simultâneo nos corpos de prova durante o ensaio de resistência ao fogo?

Sim, deve ser aplicado, senão não tem representatividade.