

UNIVERSIDADE FEDERAL DE ALAGOAS
CAMPUS SERTÃO
ENGENHARIA CIVIL

Raul Lima Ferreira

ESTILHAÇAMENTO DO CONCRETO EM SITUAÇÃO DE INCÊNDIO: O ESTADO
DA ARTE

Delmiro Gouveia - Alagoas
Abril - 2024

Raul Lima Ferreira

ESTILHAÇAMENTO DO CONCRETO EM SITUAÇÃO DE INCÊNDIO: O ESTADO
DA ARTE

Trabalho de conclusão de curso apresentado
como requisito parcial para a obtenção do
título de bacharel em Engenharia Civil pela
Universidade Federal de Alagoas

Orientador: Prof. Dr. Alverlando Silva Ri-
cardo

Delmiro Gouveia - Alagoas

Abril - 2024

Catálogo na fonte
Universidade Federal de Alagoas
Biblioteca Central
Divisão de Tratamento Técnico

Bibliotecária Responsável: Renata Oliveira de Souza CRB-4 2209

F383e Ferreira, Raul Lima

Estilhaçamento do concreto em situação de incêndio: o estado da arte / Raul Lima Ferreira. – 2024.

51 f. : il.

Orientador: Alverlando Silva Ricardo

Monografia (Engenharia Civil) – Universidade Federal de Alagoas. Curso de Engenharia Civil. Delmiro Gouveia, 2024.

1. Engenharia civil. 2. Edificações. 3. Estilhaçamento. 4. Concreto. 5. Exposição térmica. 6. Incêndio. I. Ricardo, Alverlando Silva. II. Título.

CDU: 624.012.4

Folha de Aprovação

RAUL LIMA FERREIRA

ESTILHAÇAMENTO DO CONCRETO EM SITUAÇÃO DE INCÊNDIO: O ESTADO DA ARTE

Trabalho de Conclusão de Curso submetido à banca examinadora do curso de Engenharia Civil da Universidade Federal de Alagoas e aprovada em 23 de abril de 2024.

Documento assinado digitalmente
 **ALVERLANDO SILVA RICARDO**
Data: 23/05/2024 14:54:05-0300
Verifique em <https://validar.iti.gov.br>

Orientador – Prof. Dr. Alverlando Silva Ricardo (UFAL)

Banca examinadora:

Documento assinado digitalmente
 **LUCIANO BARBOSA DOS SANTOS**
Data: 27/05/2024 06:48:23-0300
Verifique em <https://validar.iti.gov.br>

Examinador(a) Interno(a) – Prof. Dr. Luciano Barbosa dos Santos (UFAL)

Documento assinado digitalmente
 **ALEXANDRE NASCIMENTO DE LIMA**
Data: 23/05/2024 16:22:03-0300
Verifique em <https://validar.iti.gov.br>

Examinador(a) Interno(a) – Prof. MSc, Alexandre Nascimento de Lima (UFAL)

Aos meus pais, e todos aqueles que de forma direta ou indireta ajudaram-me nessa caminhada.

AGRADECIMENTOS

Encontrar uma palavra para descrever a gratidão que sinto por todos aqueles que contribuíram para que pudesse chegar nesse momento, é um tanto difícil, senão, impossível.

Mas na ausência de palavra melhor, meu muito OBRIGADO.

Agradeço a Deus por sempre está comigo nessa longa jornada que é a vida.

Agradeço a meus pais, Benildo e Girleide, pelo apoio incondicional.

Agradeço a meu irmão, Raí, pelo apoio.

Agradeço a Tia Lena, Tia Josiclea, Tia Tereza, Tia Geniclêa, Soraia, Wellington, enfim, todos da minha família que incentivaram-me desde o início...

Agradeço a Giclênio, com quem fiz amizade na graduação em Física e chegamos aos pós-doc juntos, pela convivência e pelas boas conversas que tivemos ao longo de todo esse tempo.

Agradeço à Rafaella, a namorada, pelos ótimos conselhos, carinho e paciência.

Agradeço ao Ari pelas boas conversas, risadas, e principalmente por ter me ajudado a conseguir o estágio, sem o qual não poderia estar concluindo este curso.

Agradeço ao Everton pelos momentos descontração e boas risadas.

Agradeço à Maria das Graças pelas boas conversas e convivência.

Agradeço ao Walison, por todos esses anos de amizade e apoio nessa empreita peguei.

Agradeço ao professor Alverlando pela orientação.

Agradeço a todos os professores que contribuíram para minha formação.

Agradeço à Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior (CAPES) pelo apoio.

E um agradecimento especial a todas as políticas públicas que me permitiram ingressar e permanecer no meio acadêmico.

"A mente que se abre a uma nova ideia jamais
voltará ao seu tamanho original"

Albert Einstein

RESUMO

Os concretos modernos estão cada vez mais propensos a um fenômeno de falha conhecido como estilhaçamento do concreto, induzido pelo calor. Esse fenômeno se caracteriza pela perda súbita de material durante exposições térmicas intensas, como aquelas ocorridas durante incêndios. Geralmente, esse tipo de falha é violento e pode resultar em perda significativa da seção transversal da estrutura, exposição direta do reforço interno de aço e, em casos extremos, colapso estrutural. O presente estudo é dedicado a análise desse fenômeno, explorando os conhecimentos disponíveis na literatura. Em um primeiro momento, o objetivo é compreender o estilhaçamento, sua dinâmica e as principais teorias que o abordam. Em seguida, explora-se trabalhos publicados recentemente, para buscar entender as direções nas quais as pesquisas estão avançando e identificar possíveis soluções para mitigar esse problema..

Palavras-chave: Estilhaçamento, Concreto. Incêndio. Calor.

ABSTRACT

Modern concretes are increasingly prone to a failure phenomenon known as concrete spalling, induced by heat. This phenomenon is characterized by the sudden loss of material during intense thermal exposures, such as those occurring during fires. Typically, this type of failure is violent and can result in significant loss of the structure's cross-sectional area, direct exposure of internal steel reinforcement, and, in extreme cases, structural collapse. The present study is dedicated to the analysis of this phenomenon, exploring the knowledge available in the literature. Initially, the goal is to understand spalling, its dynamics, and the main theories that address it. Subsequently, recently published works are explored to understand the directions in which research is advancing and to identify possible solutions to mitigate this problem.

Keywords: Spalling. Concrete. Fire. Heat.

Lista de Figuras

1	Esquema de ocorrência de funcionamento de estilhaçamento do concreto b)Incêndio no telhado de uma garagem. A fonte de calor era um carro em chamas.	14
2	Estilhaçamento nos revestimentos dos túneis após o incêndio (a) no Eurotunnel e (b) no túnel rodoviário de New Qidaoliang	15
3	Efeitos de estilhaçamento no teto do túnel Mont Blanc, induzidos por um incêndio que ocorreu em 1999.	17
4	Rocha fragmentada devido à exposição ao calor.	19
5	Vigas protendidas utilizadas como alvos para distribuição de água no ambiente de incêndio, como consequência, houve desprendimento de parte das almas das vigas.	20
6	Água vazando no lado não exposto a fonte de calor durante um teste de fogo em amostras de concreto com 8 cm de espessura.	24
7	Temperatura <i>versus</i> tempo.	25
8	Configuração de obstrução de umidade.	29
9	Camada de obstrução de umidade formada em uma peça de concreto utilizada em ensaios de incêndio.	30
10	Descrição esquemática do estilhaçamento termo-hídrico em uma parede de concreto aquecida por uma face.	31
11	Geometria dos nanotubos de carbono. Os nanotubos que possuem um diâmetro entre 7 e 15 nanômetros, e um comprimento de até 10 micrômetros	39
12	Probabilidade de estilhaçamento.	40
13	Formas dos nanotubos de carbono sendo observadas nas fissuras da estrutura do cimento com nanotubos de carbono. (a) Pontes. (b) CNT removido da matriz de concreto. (c) Curvado. Isto se deve à tensão residual formada nos CNTs na matriz durante o processo de rompimento. (d) e (e) morfologia composta.	40
14	Fotogrametria de amostras de concreto com substituições parciais de agredados após exposição ao fogo.	43
15	Observação do estilhaçamento sofrido pelas amostras UHPC-OPC e UHPC-CAC.	45
16	Resistência à compressão residual de UHPC-OPC e UHPC-CAC. . . .	45

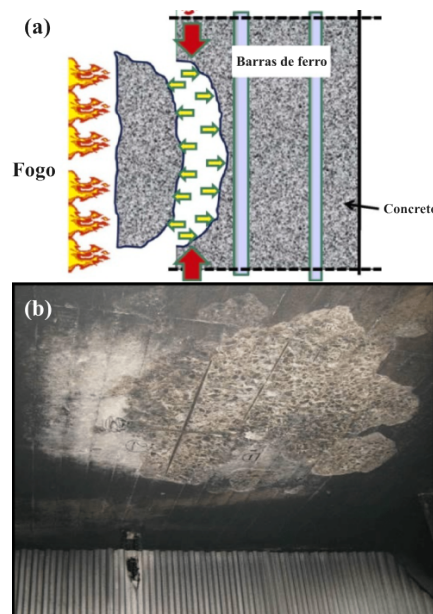
SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	14
2	FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA	19
2.1	Contexto histórico.....	19
2.2	Teorias sobre os mecanismos presentes na dinâmica do fenômeno de estilhaçamento	27
2.2.1	Teoria de Obstrução de Umidade	29
2.2.2	Teoria da pressão dos poros totalmente saturada	30
2.2.3	Teoria BLEVE	31
2.2.4	Fluxo friccional da teoria do fluxo de vapor	32
2.2.5	Teoria do estresse térmico	32
2.3	Medidas mitigadoras de estilhaçamento do concreto: Adição de fibra de polipropileno (PP)	33
2.4	Abordagens para modelar o estilhaçamento	33
2.5	Legislação vigente no Brasil	35
3	ALICERCES PARA O FUTURO: PERSPECTIVAS ATUAIS	38
3.1	Artigo 1: Mecanismos de estilhaçamento de concreto de nanotubos de carbono em temperatura elevada	38
3.2	Artigo 2: Comportamento de estilhaçamento de concreto feito com agregados de concreto reciclado.....	41
3.3	Artigo 3: O papel do cimento de aluminato de cálcio no desenvolvi- mento de um concreto eficiente de altíssimo desempenho e resistente ao lascamento explosivo sob altas temperaturas	44
4	CONCLUSÃO	47
	REFERÊNCIAS	49

1 INTRODUÇÃO

A capacidade de uma estrutura ou elemento de suportar cargas e/ou manter a compartimentação durante um incêndio é conhecida como resistência ao fogo (1). Devido à densidade relativamente alta e à baixa condutividade térmica do concreto, a condução de calor em estruturas feitas desse material ocorre de forma lenta (2). No entanto, se um elemento de concreto, otimizado para uma determinada resistência ao fogo com a suposição de que toda a seção transversal permanecerá intacta durante a exposição ao fogo, perder parte de sua seção transversal durante essa exposição, a resistência ao fogo pode ser consideravelmente reduzida (1). O fenômeno de estilhaçamento do concreto devido ao fogo é reconhecido desde os primeiros dias do concreto armado. No entanto, a sua gravidade, inicialmente considerada aleatória, tornou-se mais pronunciada com a introdução do concreto de alta resistência e do concreto auto-adensável.

Figura 1 – Esquema de ocorrência de funcionamento de estilhaçamento do concreto
b) Incêndio no telhado de uma garagem. A fonte de calor era um carro em chamas.



Fonte: Adaptado de Amran, 2022 (3). Foto de Robert Jansson (2).

O estilhaçamento do concreto induzido pelo calor é um fenômeno em que a superfície de um elemento de concreto se rompe quando submetida a um gradiente térmico profundo e acentuado, como é o caso durante um incêndio (1). Na figura 1 tem-se um esquema simplificado da ocorrência de estilhaçamento, e na figura 1 (b) uma foto do teto de uma garagem após a combustão de um veículo, é possível perceber a ausência da camada de concreto que recobria a malha de ferro. O estudo e a compreensão do fenômeno de estilhaçamento do concreto, especialmente em situações de incêndio, são fundamentais para a segurança das estruturas e das pessoas que as utilizam. Ao longo das décadas, pesquisadores e engenheiros têm investigado esse fenômeno, analisando suas causas, mecanismos e potenciais consequências. Na literatura há diversos registros documentando casos de estilhaçamento em diferentes contextos (4, 5, 6), desde edifícios residenciais até infraestruturas críticas como túneis e pontes, como no exemplo mostrado na figura 2 (7). Na figura 2 (a) observa-se o estilhaçamento do teto do Eurotunnel após um incêndio ocorrido em 1996, a espessura da camada de concreto foi bastante reduzida. Na figura 2 (b), tem-se os danos causados pelo fogo no túnel rodoviário de Qidaoliang, em 2011, onde foi observado uma perda de 354 mm na espessura (7).

Figura 2 – Estilhaçamento nos revestimentos dos túneis após o incêndio (a) no Eurotunnel e (b) no túnel rodoviário de New Qidaoliang



Fonte: Adaptado de Wasantha et. al., 2021 (7).

Concretos de alta resistência e os de alto desempenho, desenvolvidos a partir de variantes dos concretos convencionais, ganharam crescente popularidade devido às suas

qualidades superiores em durabilidade, resistência e outras características essenciais para a engenharia (3). No entanto, há uma percepção generalizada de que essas formulações modificadas são mais susceptíveis a falhas induzidas pelo fogo quando comparadas aos concretos de resistência normal (8, 9). Esta susceptibilidade é atribuída à microestrutura mais densa e aos baixos níveis de permeabilidade desses concretos, que tendem a reter as pressões dos poros acumuladas durante exposição a altas temperaturas, resultando em consequências adversas para suas propriedades físicas e mecânicas (10, 11). Embora o concreto seja considerado um material incombustível, suas propriedades físico-químicas e mecânicas sofrem deterioração quando exposto a altas temperaturas (3), e dado o atual nível de desenvolvimento da engenharia civil, são cruciais as pesquisas sobre resistência ao estilhaçamento de concretos de alta resistência em diferentes condições e cenários de incêndio (3).

A gravidade dos danos causados pelo estilhaçamento do concreto pode ser enorme, não apenas em termos econômicos, mas também em relação à segurança pública e ao funcionamento contínuo das instalações afetadas (12, 13). Por exemplo, o fechamento do Eurotunnel, em 2008, devido a um incêndio resultou em perdas diárias significativas no comércio, ilustrando os impactos econômicos diretos desse fenômeno (1). Na figura 3 tem-se uma foto do túnel Mont Blanc, onde é possível perceber no teto os impactos do estilhaçamento do concreto induzido por um incêndio que ocorreu em 1999.

Diante desses desafios, os regulamentos e padrões para materiais de construção, especialmente aqueles utilizados em estruturas críticas, como túneis, têm sido continuamente atualizados e aprimorados (15, 16, 17). Testes rigorosos são conduzidos para avaliar o desempenho do concreto em condições de incêndio extremas, visando garantir que as estruturas sejam capazes de resistir ao estilhaçamento e outros efeitos adversos do fogo (15, 16).

Apesar do reconhecimento dos impactos relacionados ao estilhaçamento do concreto, atualmente não existe um método padronizado e sistemático para prever ou testar a resistência a esse fenômeno de uma determinada mistura de concreto (1). Isso representa uma problemática para a indústria de construção de grandes estruturas, especialmente na construção de túneis (1, 15). Uma variedade de métodos de teste de estilhaçamento,

Figura 3 – Efeitos de estilhaçamento no teto do túnel Mont Blanc, induzidos por um incêndio que ocorreu em 1999.



Fonte: Paris Match, 2019. (14)

que muitas vezes não são comparáveis entre si, é atualmente empregada na comunidade acadêmica. Como resultado, há uma dificuldade em comparar os resultados obtidos em diferentes laboratórios e por diferentes pesquisadores, além de ser complicado desenvolver diretrizes para a formulação de misturas destinadas à aplicação na indústria (3).

Diante do exposto, o presente trabalho propõe-se a revisar o que é conhecido na literatura sobre o fenômeno de estilhaçamento do concreto. No próximo capítulo, inicialmente, será realizada uma revisão da evolução histórica dos conhecimentos acumulados sobre estilhaçamento do concreto. Em seguida, será discutido as principais teorias que tentam descrever a dinâmica desse fenômeno, bem como as medidas mitigadoras propostas ao longo dos anos de estudo sobre o assunto. E então, será apresentado algumas das legislações vigentes no Brasil a respeito das orientações para projeto de estruturas de concreto para resistir à exposição ao fogo.

No capítulo subsequente, serão apresentados alguns trabalhos encontrados na literatura cujos resultados podem indicar o norte para finalmente obter-se uma estrutura de concreto que seja verdadeiramente à prova de fogo. E por fim, seguiremos para o

capítulo de conclusão, que sintetizará os conhecimentos adquiridos ao longo da construção deste texto.

2 FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

2.1 Contexto histórico

Durante a Idade da Pedra, algumas ferramentas eram produzidas estilhaçando mecanicamente um bloco de rocha, e desse modo, os pedaços pequenos poderiam ser usados como “facas” e os com área maior como superfícies de apoio para corte (2). Os primeiros casos de fragmentação induzida pelo calor pelo homem ocorreram provavelmente em fogueiras localizadas sobre ou perto de rochas. O material rochoso exposto ao calor pode, em alguns casos, lascar violentamente por descamação contínua camada após camada (ver figura 4).

Figura 4 – Rocha fragmentada devido à exposição ao calor.



Fonte: Jordan J., 2021 (18)

Provavelmente a primeira menção ao estilhaçamento de concreto durante incêndio foi feita na publicação de Barret (1854) (2). Ele descreve uma discussão em que o Sr. Tite afirma que se a sílex¹ fosse usada como agregado no concreto, ela "racharia e cederia

¹ Sílex - é uma rocha sedimentar silicatada, constituída de quartzo criptocristalino, muito dura e com elevada densidade e fratura conchoidal

sob a ação do fogo". O agregado de sílex puro mostrou-se instável sob a influência do aquecimento. Estudos posteriores concluíram que o rápido resfriamento de elementos de construção de concreto aquecido poderia precipitar estilhaçamento. Segundo Ingle (1866), alguns dos numerosos casos de destruição por fogo de edifícios de concreto, que deveriam ser resistentes ao fogo, provavelmente se devem à aplicação de água durante o combate ao incêndio (2). Certamente é um cenário raro, mas há pelo menos um exemplo documentado disso. Durante um incêndio, descrito pela Associação Tarifária Sueca (1959) (2), vigas protendidas foram utilizadas como alvos para distribuição de água no ambiente de incêndio, como consequência, uma grande parte das almas das vigas se desprende, como pode ser visto na Figura 5. Em contraste com esta experiência, Kordina (1965) resumiu durante um workshop em Braunschweig, sobre o tema da resistência ao fogo do concreto protendido, que o teste de vapor da mangueira não pareceu resultar em um estilhaçamento perigoso.

Figura 5 – Vigas protendidas utilizadas como alvos para distribuição de água no ambiente de incêndio, como consequência, houve desprendimento de parte das almas das vigas.



Fonte: Jansson, 2013 (2)

O concreto armado como conhecido atualmente foi realizado pela primeira vez em 1877 como parte de uma tentativa de construção à prova de fogo (Hyatt, 1877). Thaddeus Hyatt realizou pesquisas para melhorar os pisos de vigas de ferro, que antes eram classificados como “à prova de fogo” devido à sua incombustibilidade. Entretanto,

falhas estruturais em caso de incêndio levaram à conclusão de que, embora estas vigas de ferro não ardessem em chamas, não eram “à prova de fogo”. Este era um problema bem conhecido e Hyatt relata que se tornou uma regra permanente entre os bombeiros ter cuidado com estruturas “à prova de fogo”, considerando-as mais imprevisíveis em caso de incêndio do que a construção em madeira (1).

Hyatt, importante pesquisador da área em sua época, reconheceu que para que um piso composto por vigas de ferro seja “à prova de fogo”, o ferro deve ser protegido do calor. Ele propôs envolver as vigas de ferro em uma camada de concreto para garantir isolamento térmico. Em sua pesquisa, demonstrou que o concreto feito a partir do “New Portland Cement”, um cimento que ele inventou, era capaz de resistir à exposição ao fogo e permanecer intacto após a reidratação no resfriamento. Ele também mediu a expansão térmica do concreto e do ferro forjado e demonstrou que eles eram semelhantes o suficiente para serem considerados iguais, o que implicaria que não surgiriam problemas durante o aquecimento (1).

Através de extensos testes de temperatura ambiente deste novo método de construção, Hyatt descobriu que o concreto poderia agir estruturalmente com o ferro. Como resultado foi proposto um sistema estrutural eficiente de tiras de ferro embutidas em lajes de concreto. Depois de desenvolver o sistema, a Hyatt realizou testes para demonstrar sua resistência ao fogo. Nestes testes, as amostras foram expostas a calor intenso e, em seguida, à água. As lajes de concreto demonstraram resistir tanto ao teste do fogo quanto ao resfriamento rápido. Hyatt estava ciente das implicações de sua descoberta revolucionária e do grande potencial de uso deste sistema estrutural econômico. Não foi observada nenhuma fragmentação nestes testes e com base nos resultados da sua investigação este novo sistema de construção pareceu fornecer uma verdadeira solução “à prova de fogo” (1).

O estilhaçamento do concreto ao fogo está intrinsecamente relacionado à sua resistência às altas temperaturas, bem como à capacidade de manter uma carga estrutural ou preservar compartimentações em situações de incêndio. Nesse sentido, o desenvolvimento de métodos eficazes para avaliar essa resistência torna-se imprescindível.

Os primeiros esforços para padronizar a avaliação da resistência ao fogo remontam ao início do século XX. O Congresso Internacional de Prevenção de Incêndios em Londres,

em 1903, adotou a primeira norma formalizada sobre o tema, conforme documentado nos "Livros Vermelhos" (tradução literal) do comitê de prevenção de incêndios n.º 80, datado de 1904. O princípio do ensaio consistiu na avaliação da construção em três categorias distintas: proteção total, proteção parcial e proteção temporária, cada uma subdividida em subcategorias A e B. Cada categoria foi associada a diferentes durações de exposição ao fogo e temperaturas mínimas no forno. Além disso, foram estabelecidos protocolos específicos de carregamento para diferentes tipos de corpos de prova. Após todas as exposições ao fogo, um teste de jato de mangueira foi conduzido para avaliar a integridade estrutural após a exposição ao calor (1). É importante ressaltar que essa não foi a origem dos testes de resistência ao fogo, pois experimentos nesse sentido foram conduzidos anteriormente, incluindo os realizados por Lord Visconde Mahone em 1778, além de diversos testes de fornos realizados no final do século XIX (1).

A iniciativa de estabelecer uma norma internacional representou um marco crucial, pois visava unificar e formalizar a metodologia de teste, proporcionando uma base sólida para a avaliação da resistência ao fogo em estruturas de concreto e outros materiais (2, 1). Essa padronização não apenas melhorou a eficácia dos testes, mas também promoveu avanços significativos na engenharia de segurança contra incêndios, contribuindo para a proteção de vidas e propriedades em todo o mundo (19).

Desde a sua publicação, os princípios para os testes padronizados de resistência ao fogo têm sido ocasionalmente questionados, variando em sua relevância. Apesar disso, a abordagem que se baseia predominantemente em uma curva de temperatura versus tempo de exposição ao fogo deveria, teoricamente, simplificar a tarefa de compreender os detalhes do fenômeno de estilhaçamento do concreto sob altas temperaturas, uma vez que o critério térmico para os testes de resistência ao fogo deveria ser uniforme na maioria dos casos. No entanto, essa suposição é apenas parcialmente verdadeira, devido à imprecisão nos métodos de medição de temperatura utilizados em fornos mais antigos destinados a testes de resistência ao fogo (1). Essa imprecisão resultava em exposições térmicas variadas dependendo das diferentes configurações dos fornos, incluindo variações nas geometrias, materiais do forno e tipos de combustível, o que influenciava as combinações de aquecimento por convecção e radiação aplicadas aos corpos de prova. Além disso, os termopares de

tamanho reduzido utilizados para medir a temperatura nos fornos de resistência ao fogo não conseguiam capturar as mesmas nuances nas condições térmicas de contorno que os objetos de teste em escala maior conseguiam registrar (2, 1).

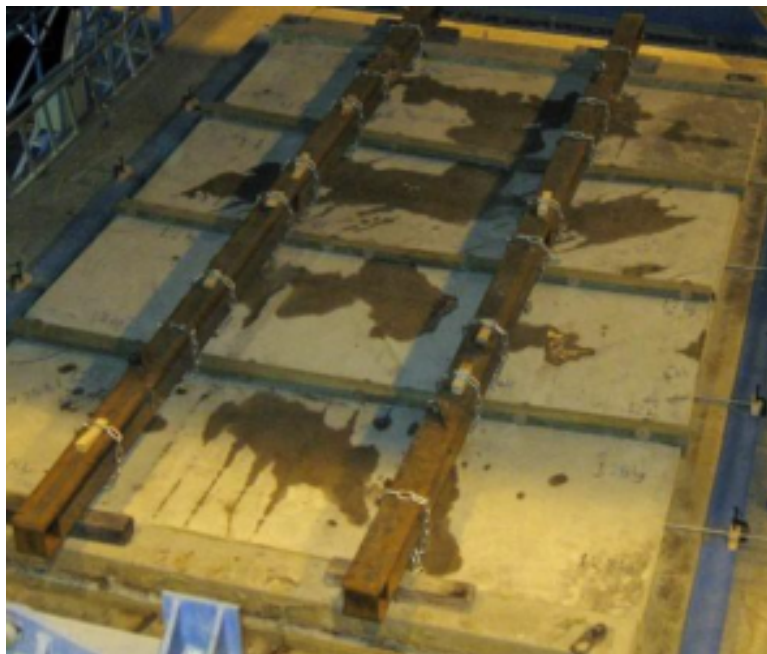
Considerável empenho foi dedicado à calibração precisa dos fornos de teste e à busca por soluções para esse desafio durante a década de 1970. No entanto, os erros só foram significativamente reduzidos com a adoção do uso de termômetros de placa, uma inovação introduzida por Wickström em 1986. Essa técnica foi posteriormente incorporada às normas europeias e Organização Internacional para Padronização (International Organization for Standardization, ISO) de resistência ao fogo, representando um avanço crucial na melhoria da precisão dos testes nesse campo (1).

Em 1905, Woolson documentou pela primeira vez o fenômeno do fluxo de água líquida no lado frio de uma amostra de concreto durante testes de incêndio em lajes de piso (1). Esse fenômeno é amplamente observado em testes de incêndio de concreto (ver figura 6). Em apenas 40 minutos de exposição unilateral ao fogo em uma laje de concreto com 30 cm de espessura, é possível perceber a presença de água na superfície fria da amostra. Isso provavelmente está associado à existência de um sistema contínuo de fissuras ao longo da seção transversal da amostra durante a exposição ao fogo. Essas fissuras podem ser uma combinação de fissuras pré-existentes antes do teste de fogo e novas fissuras formadas durante a exposição ao calor (1).

Modelar o fluxo de água na área fria de uma amostra de concreto exposta ao fogo, considerando um sistema de fissuras contínuas, representa um dos principais desafios a serem superados para o sucesso de um modelo termo-hidro-mecânico detalhado do estilhaçamento pelo fogo (1, 2). Na verdade, essa é uma condição essencial caso esse modelo seja empregado para prever o fenômeno de estilhaçamento no concreto causada pelo fogo.

Durante diversas séries de teste de fogo, entre os anos de 1911 e 1918, conduzidos por Gary em construções de concreto, diferentes fenômenos de estilhaçamento de concreto foram observados. Mayer-Ottens (1972) classificou os fenômenos identificados por Gary da seguinte maneira (2):

Figura 6 – Água vazando no lado não exposto a fonte de calor durante um teste de fogo em amostras de concreto com 8 cm de espessura.



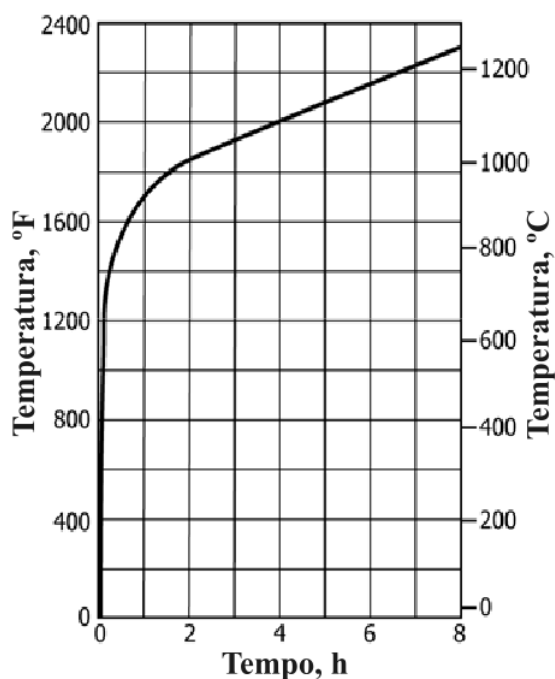
Fonte: Rickard, 2020 (1)

- Estilhaçamento em forma de cratera de grãos de agregados individuais: o estilhaçamento foi atribuído às características mineralógicas dos agregados, especialmente para feldspatos intemperizados.
- Estilhaçamento explosivo em forma de concha nas superfícies dos elementos estruturais em níveis da ordem de 10 cm^2 até vários metros quadrados, especialmente em paredes e pilares carregados por compressão, onde o reforço ficou parcialmente exposto. O estilhaçamento foi explicado pelas tensões de vapor de água no concreto relativamente úmido.
- Estilhaçamento explosivo nos cantos das vigas, colunas e degraus - onde o reforço dos cantos ficou parcialmente exposto. Esta fragmentação foi explicada por tensões de vapor de água e de temperatura devido ao rápido aquecimento bilateral.
- Estilhaçamento explosivo nas paredes, onde grandes seções de parede de até 1 m^2 foram totalmente explodidas e a integridade foi perdida, mas a capacidade de suporte

foi preservada. Pedacos de parede foram jogados a mais de 12 metros do ponto de realização do experimento.

No contexto do estudo do estilhaçamento do concreto, o desenvolvimento de uma curva padrão de exposição do concreto ao fogo torna-se necessária, uma vez que os resultados dos experimentos realizados em laboratórios diferentes só podem ser comparados se houver um padrão a ser seguido. Essa curva foi definida por um comitê nos Estados Unidos (EUA) em 1918. A Associação Nacional de Proteção contra Incêndios (National Fire Protection Association, NFPA) dos EUA desempenhou um papel fundamental no desenvolvimento dos padrões de testes de resistência ao fogo (NFPA, 1917, 1918). Esse esforço envolveu diversas organizações que já estavam conduzindo testes de resistência ao fogo na época. O resultado desse trabalho foi a produção de orientações e uma curva de incêndio para nortear os testes de resistência ao fogo. A Figura 7 apresenta a curva de temperatura versus tempo, reproduzida da Sociedade Americana de Testes e Materiais (American Society for Testing and Materials, ASTM). As orientações e a curva de incêndio foram apresentadas

Figura 7 – Temperatura *versus* tempo.



Fonte: Adaptada de ASTM E119 (20)

nas reuniões anuais de 1917 e 1918 da associação nacional de proteção contra incêndio e, posteriormente, adotadas pela ASTM C19, que mais tarde se tornou ASTM E119 (ASTM International, 2018).

Mediante a existência de uma curva padrão e resultados de ensaios com concreto com foco em observar o estilhaçamento, em 1934, Preston e White definem estilhaços como uma peça em forma de floco, caracterizada por sua finura em uma direção específica, normalmente perpendicular à sua face original. Eles também propõem um mecanismo para o estilhaçamento com base na observação da delaminação durante o aquecimento da argila (1).

Uma teoria clássica sobre o efeito da umidade foi desenvolvida por Shorter e Harmathy, em 1961, denominada Teoria de Obstrução de Umidade (the Moisture Clog Theory). Em 2000, a teoria de explosão de vapor em expansão de líquido fervente (BLEVE) foi formulada, sugerindo, segundo Ichikawa, ser um componente relevante no processo de estilhaçamento do concreto de alta resistência. Quando a pressão é liberada de um poro contendo água líquida em alta temperatura, a conversão em vapor ocorre de forma extremamente rápida, uma vez que toda a energia acumulada durante o aquecimento acima de 100 °C é liberada instantaneamente em um processo de ebulição súbita, classificado como uma explosão. Além disso, Petrov-Denisov et al. (1972) propuseram uma teoria que aborda a rápida expansão da água superaquecida. Segundo essa teoria, as paredes entre os poros fechados contendo água superaquecida e os poros abertos com menor pressão podem ser destruídas devido à diferença de pressão. Conforme destacado por Hertz (2003), esse fenômeno pode resultar em uma quebra progressiva da microestrutura.

Nesta seção foi comentado o contexto histórico e avanço de algumas das principais ideias relacionadas ao estilhaçamento do concreto em situação de incêndio. Devido às limitações experimentais de cada época, os acidentes com incêndio ajudaram a comprovar ou refutar algumas das teorias elaboradas ao longo dos anos. Como exemplo, pode-se citar o incêndio ocorrido, em 1994, na construção do túnel da Great Belt Tunnel, ponte que liga as ilhas dinamarquesas Zelândia e Funen. De acordo com o estado da arte da época, previa-se que o estilhaçamento ficasse confinado ao recobrimento do concreto, com cerca de 40 mm de espessura, e ocorresse durante os primeiros 20 minutos de exposição ao fogo. No

entanto, essa estimativa da severidade do estilhaçamento não se concretizou no incidente real. No segmento mais afetado pelo incêndio, apenas um terço da seção transversal de 400 mm de espessura permanecia, enquanto o restante havia se desintegrado, contrastando com as previsões da época. Na próxima seção será realizada uma revisão das principais teorias e mecanismos envolvidos no fenômeno de estilhaçamento do concreto, bem como as medidas mitigadoras que foram adotadas ao longo dos anos.

2.2 Teorias sobre os mecanismos presentes na dinâmica do fenômeno de estilhaçamento

Durante os primeiros anos de pesquisa sobre o estilhaçamento, uma série de teorias surgiram para explicar seu mecanismo. Os primeiros pesquisadores que se depararam com o estilhaçamento pareciam concentrar-se nas propriedades dos agregados utilizados. Teorias associadas ao teor de umidade do concreto e à pressão dos poros resultante no aquecimento também começaram a surgir, como mencionado na seção anterior.

Um resumo dos tipos de estilhaçamento que ocorrem no concreto foi descrito por Meyer-Ottens (21) como estilhaçamento agregado, estilhaçamento superficial, estilhaçamento de canto e estilhaçamento explosivo. O período de tempo para a ocorrência desses tipos de lascamento após o início da exposição ao fogo foi categorizado com base na curva de incêndio padrão, onde a temperatura do forno aumentou de 20 °C para 842 °C nos primeiros 30 minutos e continuou a uma ascensão lenta de temperatura.

Hasenjager (22) desconsiderando os principais parâmetros que levam ao estilhaçamento como o estresse térmico e a pressão da água, em seu estudo, reduziu os fatores-chave a:

- Taxa de aquecimento rápida
- Resistência à tração sendo excedida
- Mudanças volumétricas rápidas em agregados

Uma ampla gama de fatores podem exercer influência na fragmentação do concreto induzida pelo calor, e é provável que, com o avanço no desenvolvimento de misturas de

concreto para atender aos requisitos ambientais ou estruturais, novos elementos sejam acrescentados a essa lista. Alguns dos parâmetros atualmente reconhecidos como significativos e que geralmente têm influência aceita na ocorrência de estilhaçamento incluem (2):

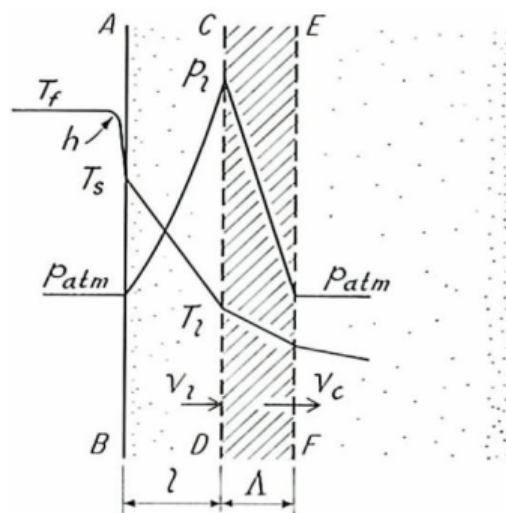
- Exposição térmica – O aumento da severidade da exposição térmica leva ao aumento da propensão ao estilhaçamento (23).
- Teor de umidade – Quanto maior o teor de umidade, maior a propensão à fragmentação (24, 25, 26).
- Resistência à compressão – Concretos de maior resistência são mais susceptíveis a estilhaçamento (27, 28).
- Permeabilidade – Quanto menor a permeabilidade, maior a propensão à estilhaçamento (29).
- Porosidade – Aumento da porosidade resulta em uma diminuição de estilhaçamento (30, 31, 32)
- Geometria da amostra – A geometria influencia a fragmentação (33, 34).
- Idade do concreto – A idade influencia as propriedades do concreto e tem sido considerado um parâmetro de influência para estilhaçamento (35, 36).
- Tipo agregado (37, 38)
- Misturar aditivos alteram as propriedades do concreto (39)
- Condições de carregamento – A compressão aumenta a propensão ao estilhaçamento (2, 39, 40)

A seguir será explanada as principais teorias desenvolvidas sobre as causas de estilhaçamento do concreto.

2.2.1 Teoria de Obstrução de Umidade

Segundo essa teoria, quando uma amostra de concreto é aquecida, a água presente é gradualmente removida, formando uma fina camada próxima à superfície. O gradiente de pressão resultante empurra essa umidade não só para fora da amostra, mas também em direção às partes internas, que estão mais frias. À medida que o vapor encontra essas regiões mais frias, condensa-se, continuando esse processo através da seção transversal do material até que uma região completamente saturada, de considerável espessura, seja formada. Essa região é conhecida como "obstrução de umidade". Uma vez estabelecida a obstrução por umidade, o movimento adicional do vapor em direção às áreas mais frias é restringido, como ilustrado na Figura 8, onde é possível identificar um ponto onde a P é mais alta. O ponto crucial é que a pressão mais alta ocorrerá no limite da obstrução por umidade e, se essa pressão exceder a resistência à tração do concreto, a peça se romperá. Conforme Shorter e Harmathy (1961), não é apenas a expansão da água que contribui para a liberação explosiva de energia ou fragmentação, uma vez que a camada mais seca próxima à superfície já está sob alta tensão devido à expansão térmica. A presença de umidade desencadeia dois efeitos que podem influenciar o comportamento de estilhaçamento: um

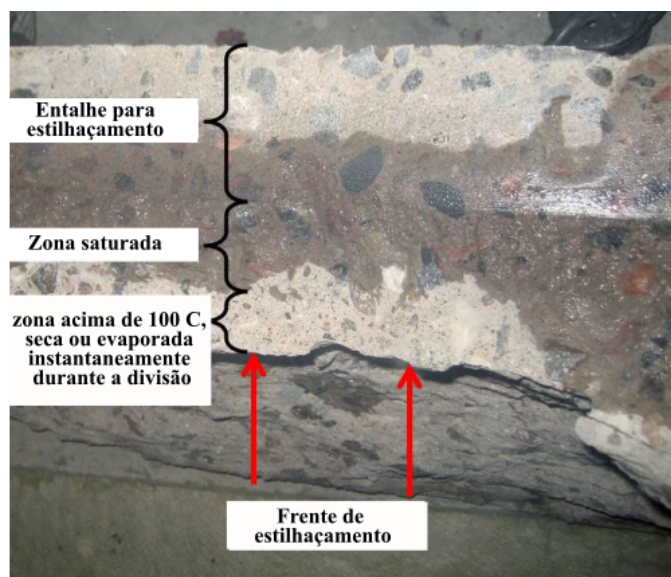
Figura 8 – Configuração de obstrução de umidade.



Fonte: Harmathy, 1965 (24)

gradiente acentuado de temperatura e uma pressão de vapor significativa (2). Na figura 9 é possível observar a camada de obstrução de umidade em uma peça de concreto utilizada em ensaios de incêndio.

Figura 9 – Camada de obstrução de umidade formada em uma peça de concreto utilizada em ensaios de incêndio.

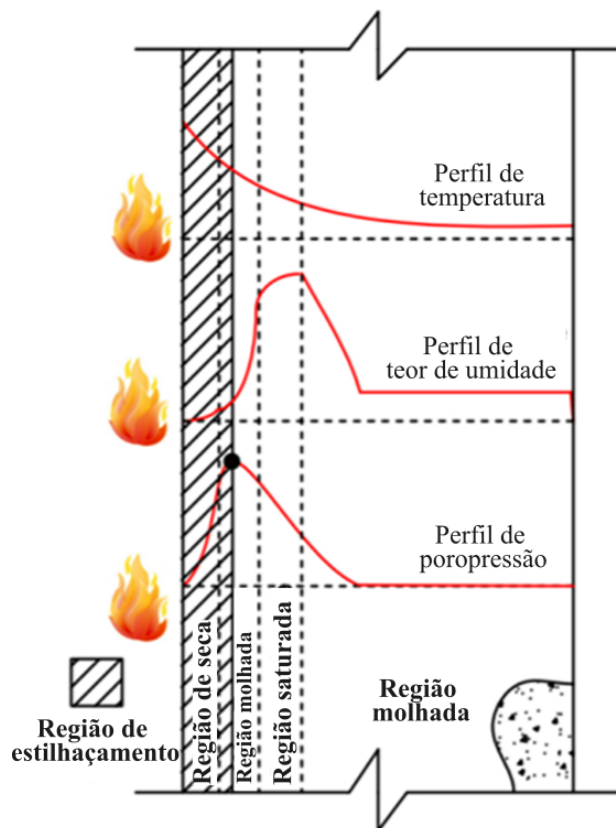


Fonte: Adaptado de Robert Jansson, (2)

2.2.2 Teoria da pressão dos poros totalmente saturada

Embora Bazant e Cusatis tenham considerado a poropressão como um fator secundário de estilhaçamento (22), ela é relatada como o principal fator que causa o lascamento do concreto (41). O estilhaçamento por pressão de poro, também conhecido como estilhaçamento termo-hídrico, está associado ao comportamento do concreto durante os processos termo-higroscópicos. A Figura 10 mostra uma descrição esquemática do lascamento termo-hídrico em uma amostra de concreto exposta ao fogo em um dos lados. A teoria da pressão dos poros saturados afirma que quando a temperatura dentro do concreto aumenta, se o sistema de poros fechados estiver parcialmente preenchido com água no início, esta água se expandirá e forçará o ar para dentro dos sólidos (41). Isso, por sua vez, criará uma pressão hidráulica e, em regiões com níveis mais elevados de umidade,

Figura 10 – Descrição esquemática do estilhaçamento termo-hídrico em uma parede de concreto aquecida por uma face.



Fonte: Adaptado de Kannangara, 2022 (41)

a resistência e as propriedades de fratura irão variar, causando quebra e eventualmente levando ao estilhaçamento. Em temperaturas elevadas, microfissuras se formam no interior e no exterior do concreto devido ao aumento da poropressão, e isso influenciará o tipo e o nível de estilhaçamento (41).

2.2.3 Teoria BLEVE

Ichikawa introduziu (42), como mencionado anteriormente, a Teoria da Explosão de Vapor por Expansão de Líquido em Ebulição (BLEVE), na qual esse fenômeno é considerado um dos fatores que contribuem para o estilhaçamento em concretos de alta resistência. Segundo essa teoria, a água líquida, quando aquecida a mais de 100°C e sob pressão, se converte rapidamente em vapor, resultando em uma liberação instantânea de

energia acumulada. Esse processo leva à fragmentação do material, sendo identificado como a teoria da explosão de vapor por expansão de líquido em ebulição.

2.2.4 Fluxo friccional da teoria do fluxo de vapor

Essa teoria assume que, no concreto, quando submetido ao calor do fogo, ocorrem gradientes de pressão interna que direcionam parte da umidade para as regiões mais frias do material, enquanto o restante é expelido através da superfície aquecida. A umidade transportada para a superfície exposta ao fogo resulta em forças de fricção ao longo do caminho do fluxo, gerando tensões de tração na superfície já enfraquecida pela exposição ao calor. Esse fenômeno provoca a quebra das superfícies expostas ao fogo, sendo identificado como o fluxo friccional na teoria do fluxo de vapor, considerado como outra causa de lascamento (41).

2.2.5 Teoria do estresse térmico

Embora o fenômeno do estilhaçamento induzido pelo calor ainda careça de compreensão completa, é evidente que surge como consequência de tensões ou pressões geradas no concreto durante o aquecimento. O concreto possui uma estrutura intrinsecamente complexa, composta por diversas partículas de agregado e pasta de cimento, juntamente com a presença de umidade livre nos poros e umidade quimicamente ligada dentro da argamassa de cimento.

O concreto, como a maioria dos sólidos, expande quando aquecido e contrai quando resfriado. Durante um incêndio, o concreto é aquecido rapidamente, resultando em um acentuado gradiente térmico. Enquanto a temperatura da superfície aumenta significativamente, o lado não aquecido de um elemento ou o concreto interno de uma amostra aquecida em todos os lados pode permanecer relativamente frio. Esse gradiente térmico gera uma restrição à expansão da superfície quente pelo concreto mais frio dentro da amostra, criando uma tensão de compressão na superfície e tensões de tração no concreto frio devido à tração exercida pelo concreto mais quente. Adicionalmente, os diversos tipos, tamanhos e formatos de agregados têm provavelmente diferentes coeficientes de expansão

térmica, e essas disparidades podem iniciar tensões similares em uma escala macro. O desempenho de diferentes tipos de agregados em temperaturas elevadas tem sido objeto de estudo por pesquisadores ao longo dos anos.

2.3 Medidas mitigadoras de estilhaçamento do concreto: Adição de fibra de polipropileno (PP)

Desde o início da década de 1980, quando os primeiros estudos foram publicados sobre os efeitos da incorporação de polímeros, inúmeras pesquisas foram conduzidas para investigar os impactos da adição de fibras de polipropileno (PP) em diversas formulações de concreto. Esses estudos têm consistentemente apontado para a eficácia das fibras de PP como um meio de aprimorar o desempenho do concreto em várias aplicações (43). Hoje, é bem conhecido que a adição de fibras de PP é uma das formas mais eficazes de reduzir o estilhaçamento em concreto submetido a temperaturas elevadas (43, 44, 45).

Apesar da ampla utilização, o mecanismo exato pelo qual as fibras de polipropileno reduzem o lascamento no concreto ainda não é completamente compreendido. Alguns pesquisadores sugerem que as fibras de PP ajudam a aliviar a pressão de vapor de água, aumentando a permeabilidade do concreto quando exposto ao calor (44). No entanto, outros autores contestam essa teoria (45), defendendo que as fibras de PP melhoram o comportamento de fragmentação do concreto de duas maneiras distintas: primeiro, reduzindo a umidade na zona crítica, o que pode prejudicar as propriedades mecânicas do concreto; e segundo, deslocando a umidade para longe da zona crítica, promovendo uma maior taxa de secagem que libera as tensões térmicas dentro da estrutura.

2.4 Abordagens para modelar o estilhaçamento

Apesar do fenômeno de estilhaçamento ser reconhecido a mais de um século, persiste a lacuna na compreensão do que exatamente o provoca. Um critério de falha, embora necessário, é frequentemente arbitrário e pode ser estabelecido para desenvolver um modelo preditivo de estilhaçamento. No entanto, a definição desse critério de falha geralmente introduz um viés, influenciado pela teoria que for mais conveniente para os pesquisadores.

Por exemplo, o modelo poderia basear a falha no desenvolvimento da pressão dos poros, no estresse térmico ou em outro parâmetro específico, como a temperatura. A arbitrariedade na escolha dos parâmetros produz resultados que por vezes não refletem o que se observa nos experimentos.

Uma alternativa seria desenvolver um modelo para se ajustar a um conjunto de dados disponíveis. No entanto, essa abordagem enfrenta problemas devido à evidente escassez de dados comparáveis de experimentos de estilhaçamento (1). Essa escassez decorre da diversidade de abordagens experimentais, e que em algumas situações resultam em dados aparentemente conflitantes.

Apesar da falta do completo entendimento do fenômeno de estilhaçamento, pesquisadores têm se empenhado no desenvolvimento de modelos para prever esse processo. Na literatura, é possível encontrar códigos acoplados termo-higro-químico-mecânicos, variando em complexidade, que buscam estimar o tempo e a profundidade do estilhaçamento (46, 47). Esses modelos simulam o estado de tensão no concreto aquecido, levando em conta os processos termo-higrométrico e termomecânicos relevantes que ocorrem durante o aquecimento. No entanto, mesmo os modelos mais avançados não conseguem prever com precisão o fenômeno de estilhaçamento para uma mistura de concreto específica em uma aplicação determinada, seja ela sujeita a incêndios de concepção padrão ou a incêndios específicos de projeto (1).

O desenvolvimento de modelos que sirvam como complemento à pesquisa é crucial. Modelos validados têm a capacidade de orientar os testes experimentais, o que resulta na realização de um número menor de experimentos e, em última análise, possibilita o projeto sem a necessidade de demonstração de desempenho por meio de testes extensivos. No entanto, até o momento, o estado atual do conhecimento sobre estilhaçamento não permitiu a produção de um modelo validado. Portanto, atualmente não há nenhum modelo capaz de prever o estilhaçamento do concreto com confiança.

2.5 Legislação vigente no Brasil

No Brasil, a legislação referente à segurança de edificações contra incêndios visa, assim como outras normas internacionais, proteger vidas, propriedades e o meio ambiente. Essa legislação é ampla e abrange diversos aspectos, desde normas técnicas específicas até regulamentos de prevenção e combate a incêndios em diferentes tipos de edificações.

Dentre as Normas Brasileiras Regulatórias (NBR) vigentes relacionadas à segurança de edificações em situação de incêndio, será dada atenção nesse texto a NBR 14432/2001 e NBR 15200/2012.

A NBR 14432/2001 estabelece as condições que os elementos estruturais e de compartimentação devem atender para evitar o colapso estrutural em situações de incêndio. Entre seus objetivos a norma orienta que para os elementos de separação, os critérios estabelecidos de vedação e isolamento devem garantir um período suficiente para: permitir a evacuação segura dos ocupantes do edifício; assegurar a segurança das operações de combate ao incêndio; e minimizar os danos às edificações adjacentes e à infraestrutura pública. A NBR 14432/2001 usa como referências normativas as seguintes normas:

- NBR 5628:2022 - Componentes construtivos estruturais determinação da resistência ao fogo - Método de ensaio;
- NBR 9077:2001 - Saídas de emergência em edifícios - Procedimento;
- NBR 10636-1:2022 - Paredes e divisórias sem função estrutural - Determinação da resistência ao fogo - Método de ensaio;
- NBR 10897:2020 - Proteção contra incêndio por chuveiro automático - Procedimento;
- NBR 16981:2020 - Proteção contra incêndio por sistema de chuveiros automáticos para áreas de armazenamento em geral - Procedimento;
- NBR 14323:2013 - Dimensionamento de estruturas de aço de edifícios em situação de incêndio - Procedimento;

A NBR 14432/2001 orienta a aplicação de materiais de proteção capazes de garantir a resistência ao fogo durante um determinado intervalo de tempo, nomeado como tempos requeridos de resistência ao fogo. Em seu Anexo A, a norma traz uma tabela classificando as edificações de acordo com a sua ocupação e indica os tempos mínimos que os materiais devem resistir em situação de incêndio. Neste anexo, também é possível encontrar os limites de aplicação da norma, como por exemplo, edificações com área total menor que 750 m² estão isentas da norma.

A NBR 15200/2012 define as diretrizes para o projeto de estruturas de concreto durante um incêndio e os métodos para comprovar sua conformidade, de acordo com os padrões de resistência ao fogo estabelecidos na norma ABNT NBR 14432. Entre as referências normativas indicadas pelas NBR 15200/2012 pode-se encontrar:

- ABNT NBR 5628:2022 - Componentes construtivos estruturais - Determinação da resistência ao fogo;
- ABNT NBR 6118:2023 - Projeto de estruturas de concreto - Procedimento;
- ABNT NBR 7480:2007 - Aço destinado a armaduras para estruturas de concreto armado - Especificação;
- ABNT NBR 8681:2003 - Ações e segurança nas estruturas - Procedimento;
- ABNT NBR 8953:2015 - Concreto para fins estruturais - Classificação pela massa específica, por grupos de resistência e consistência;
- ABNT NBR 9062:2017 - Projeto e execução de estruturas de concreto pré-moldado;
- ABNT NBR 14432:2001 - Exigências de resistência ao fogo de elementos construtivos de edificações;
- Eurocode 2: Design of concrete structures Part 1-2: General rules - Structural fire design.

A NBR 15200/2012 indica alguns métodos de verificação da estrutura em situação de incêndio, como o método tabular. Essa norma aplica-se a estruturas de concreto

identificados por massa específica seca maior que 2000 kg/m^3 , não excedendo 2800 kg/m^3 , do grupo I de resistência (C20 a C50). E também orienta que nos casos não previstos pela mesma, ou com pouca informação, o responsável técnico do projeto pode optar pela utilização de normas ou procedimentos internacionais, desde que aplicáveis e aceitos pela comunidade técnicocientífica.

Ambas as normas, NBR 14432/2001 e NBR 15200/2012, não tratam o estilhaçamento do concreto explicitamente, embora as verificações indicadas por esta última visem garantir o funcionamento da estrutura em situações hostis de incêndio. Entretanto, como orientado pela NBR 15200/2012, pode-se recorrer a normas internacionais, e nesse contexto o Eurocode fornece informações com elevada relevância. Os Eurocodes são um conjunto de normas europeias criadas pelo Comitê Europeu de Normalização (TC 250) com o objetivo de padronizar critérios e regulamentos para o cálculo e dimensionamento de estruturas. No tocante ao estilhaçamento do concreto o Eurocode 2 - part 1-2 (48) instrui que a ocorrência de estilhaçamento explosivo no concreto é improvável quando o teor de umidade estiver abaixo de $k\%$ em peso. O valor recomendado para k é até 3 (48). No entanto, acima desse valor, é necessário realizar uma avaliação mais precisa considerando o teor de umidade, o tipo de agregado, a permeabilidade do concreto e a taxa de aquecimento.

Portanto, a legislação vigente reflete a importância de obter informações precisas sobre o fenômeno de estilhaçamento do concreto. Isso evidencia a necessidade contínua de pesquisa e desenvolvimento na área, visando aprimorar a compreensão dos fatores que contribuem para o estilhaçamento do concreto. É fundamental que as regulamentações em vigor incentivem a investigação científica e tecnológica, buscando soluções que garantam a segurança das estruturas e das pessoas em situações de incêndio. A obtenção de dados mais detalhados e precisos sobre o comportamento do concreto em diferentes condições de umidade, tipo de agregado e taxa de aquecimento é essencial para aprimorar as práticas de projeto e construção, bem como para a atualização das normas e regulamentos existentes. Isso contribuirá para a mitigação dos riscos associados ao estilhaçamento do concreto e para o desenvolvimento de estruturas mais seguras e resistentes ao fogo.

3 ALICERCES PARA O FUTURO: PERSPECTIVAS ATUAIS

A pesquisa sobre estilhaçamento do concreto envolve uma abordagem multidisciplinar, que combina aspectos da engenharia estrutural, ciência dos materiais, termodinâmica, mecânica de fluidos, entre outras áreas. Os pesquisadores buscam entender os mecanismos físicos e químicos que levam ao estilhaçamento, bem como desenvolver modelos matemáticos e computacionais para prever e mitigar esse fenômeno.

Ao longo do tempo, houveram avanços significativos na compreensão dos processos envolvidos no estilhaçamento do concreto. Isso inclui estudos detalhados sobre os efeitos do aquecimento no concreto, a evolução da temperatura e da umidade dentro do material, a liberação de vapor de água e gases, a formação e crescimento de fissuras, e a consequente fragmentação da superfície.

No entanto, apesar dos progressos realizados, ainda há desafios a enfrentar na pesquisa sobre estilhaçamento do concreto. Isso inclui a necessidade de desenvolver modelos teóricos mais precisos e confiáveis, considerando a complexidade dos processos envolvidos e a variabilidade dos materiais e das condições ambientais.

Neste capítulo serão explorados alguns avanços promovidos pelas pesquisas relacionadas ao estilhaçamento do concreto. Os resultados obtidos nos laboratórios de pesquisa podem indicar o caminho que nos permitirá vislumbrar um futuro onde as estruturas de concreto serão de fato, à prova de fogo.

3.1 Artigo 1: Mecanismos de estilhaçamento de concreto de nanotubos de carbono em temperatura elevada

Título original: Spalling mechanism of carbon nanotube concrete at elevated temperature - 2022

O artigo aborda o comportamento do concreto com nanotubos de carbono (CNTC)

Figura 11 – Geometria dos nanotubos de carbono. Os nanotubos que possuem um diâmetro entre 7 e 15 nanômetros, e um comprimento de até 10 micrometros

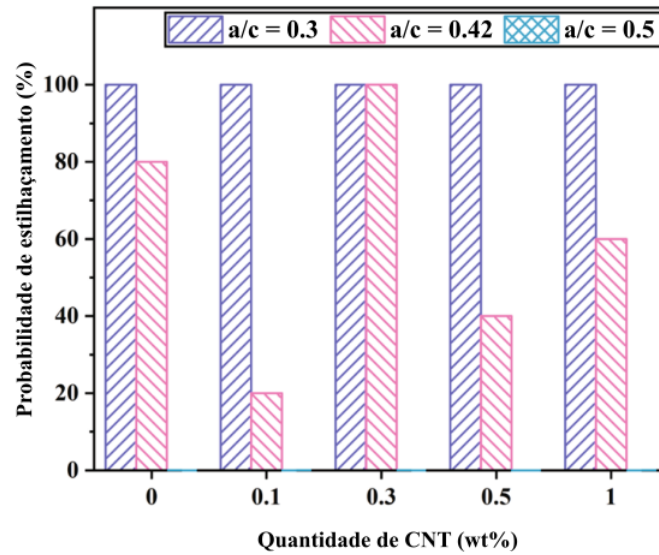


Fonte: Lu e Yao, 2022 (49)

em condições de altas temperaturas, com foco na prevenção do estilhaçamento do concreto sob exposição ao fogo. Na figura 11 é possível ver uma ilustração, feita pelos autores do trabalho, dos nanotubos que possuem um diâmetro entre 7 e 15 nanômetros e um comprimento de até 10 micrometros. A pesquisa experimental investiga a influência de diferentes proporções água/cimento e teores de nanotubos de carbono (CNTs) na resistência à estilhaçamento do concreto, analisando como esses fatores afetam as propriedades mecânicas e de resistência do material. Os resultados indicam que amostras de concreto com menor proporção água/cimento tendem a apresentar maior sensibilidade à estilhaçamento em altas temperaturas, onde uma proporção de 0,42 e 0,1% em peso de nanotubos de carbono demonstrou a melhor capacidade de inibir o fenômeno, com uma probabilidade de ocorrência de 20%. A figura 12, que pode ser considerada um dos principais resultados obtido pelos autores, mostra a probabilidade de ocorrência de estilhaçamento em função da concentração de nanotubos em diferentes proporções de água/cimento (a/c).

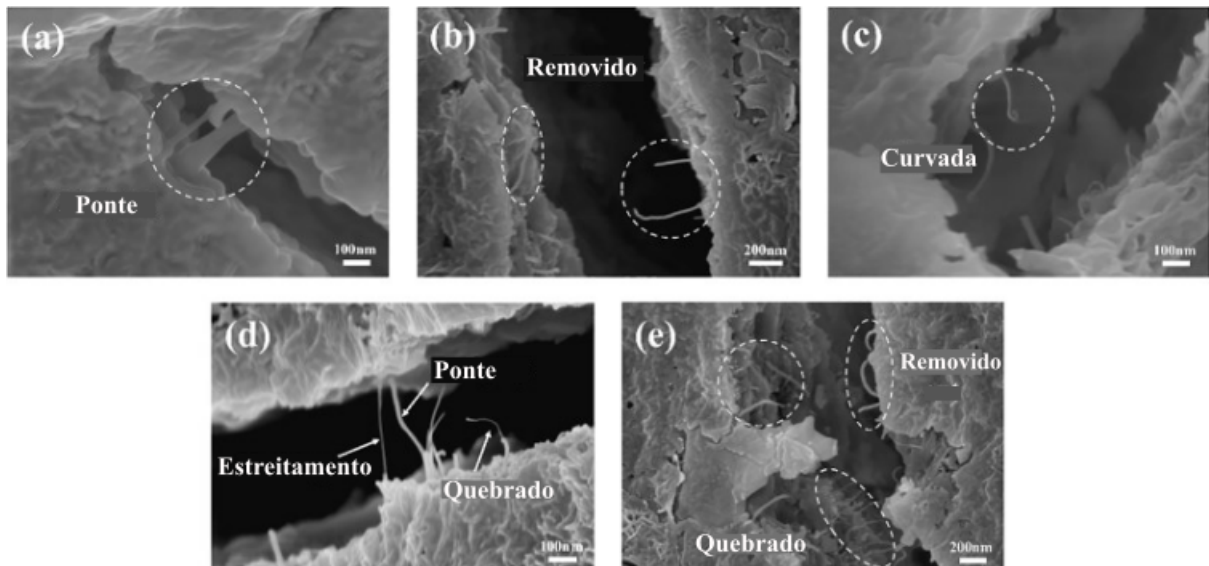
Além disso, o estudo explora os mecanismos pelos quais os nanotubos de carbono atuam na matriz de concreto para prevenir o estilhaçamento, destacando a resistência à tração dos CNTs e a adesão entre os nanotubos e a matriz como fatores-chave na inibição da propagação de trincas. O efeito de ponte dos CNTs, é indicado como inibidor de propagação de fissuras, na figura 13 é possível observar a morfologia dessas pontes. De acordo com os autores, nas pontes (figura 13(a)) os CNTs não são danificados e estão embutidos na

Figura 12 – Probabilidade de estilhaçamento.



Fonte: Adaptado de Lu e Yao, 2022 (49)

Figura 13 – Formas dos nanotubos de carbono sendo observadas nas fissuras da estrutura do cimento com nanotubos de carbono. (a) Pontes. (b) CNT removido da matriz de concreto. (c) Curvado. Isto se deve à tensão residual formada nos CNTs na matriz durante o processo de rompimento. (d) e (e) morfologia composta.



Fonte: Adaptado de Lu e Yao, 2022 (49)

matriz de concreto em ambos os lados da fissura, mantendo assim o desempenho normal de trabalho dos CNTs, enquanto que na figura 13(b) a resistência de ligação entre os CNTs e a matriz de concreto é menor que a resistência à tração dos CNTs, de modo que uma extremidade dos CNTs fica embutida na matriz de concreto e a outra extremidade é removida. Na figura 13(d) é observado uma terceira configuração, onde o ancoramento nas extremidades do nanotubo é forte e observa-se um estreitamento da região central, que pode evoluir para o rompimento da nanoestrutura. O aumento de porosidade na matriz de concreto também é indicado como um agente colaborador para a resistência ao fogo do material. Testes de compressão uniaxial em amostras de CNTC com diferentes teores de CNTs após 140 dias de cura são realizados para investigar o efeito do envelhecimento dos nanotubos na resistência do concreto, e mostraram que concentrações relativamente altas de nanotubos podem tornar o concreto mais frágil que quando comparado com a mistura tradicional.

A análise microscópica mostrada no trabalho revela a morfologia dos CNTs na matriz de concreto, evidenciando diferentes formas e interações entre os CNTs e a matriz (figura 13). Através de diagramas esquemáticos e análises detalhadas, os autores fornecem informações valiosas para aprimorar a resistência ao fogo de estruturas de concreto, com potencial impacto na indústria da construção civil e no desenvolvimento de materiais mais seguros e duráveis. Os resultados e descobertas apresentados representam mais um passo no avanço do conhecimento sobre a aplicação de nanotubos de carbono na melhoria da resistência térmica do concreto em situações de incêndio.

3.2 Artigo 2: Comportamento de estilhaçamento de concreto feito com agregados de concreto reciclado

Título original: Spalling behaviour of concrete made with recycled concrete aggregates - 2022

O estudo abordado neste trabalho investiga o comportamento de estilhaçamento do concreto feito com agregados de concreto reciclado, sob condições de incêndio. O uso de agregados reciclados na produção de concreto é uma prática cada vez mais comum devido

aos benefícios ambientais e econômicos associados à reciclagem de resíduos de construção e demolição. No entanto, a substituição de agregados naturais por agregados reciclados pode influenciar as propriedades e o desempenho do concreto, especialmente em situações de incêndio. E este é o cerne deste artigo.

Sendo o estilhaçamento do concreto um fenômeno preocupante que ocorre em altas temperaturas, este estudo se concentra em avaliar como o uso de agregados reciclados afeta a sensibilidade do concreto ao estilhaçamento nessas condições. Os pesquisadores realizaram testes experimentais para analisar o comportamento do concreto feito com diferentes taxas de substituição de agregados reciclados sob altas temperaturas. O concreto reciclado foi utilizado como agregado graúdo em duas concentrações, 4/10 e 10/20, e na tabela 1 tem-se sua composição.

Tabela 1 – Rc: grãos de concreto; Ru: pedras naturais; Rb: elementos cerâmicos; Ra: grãos betuminosos; Rg: vidro; X: outros materiais (madeira, plástico, aço, papel, etc.).

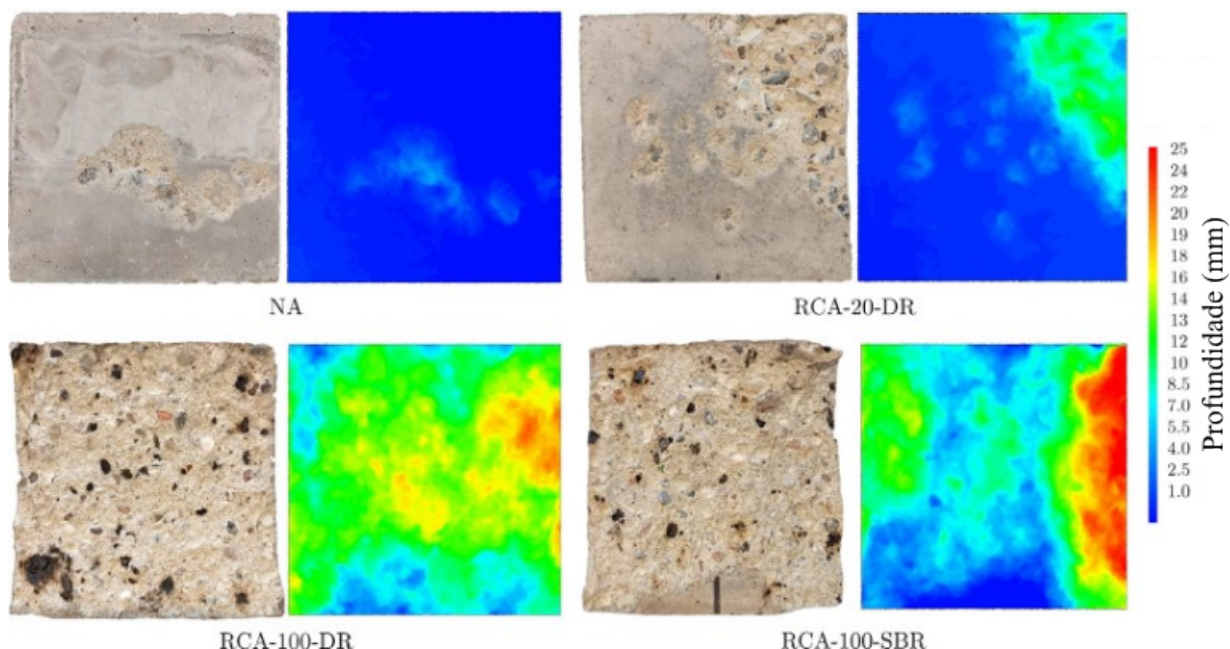
Fração do agregado	Constituintes RCA					
	% de massa dos constituintes					
	Rc	Ru	Rb	Ra	Rg	X
RCA 4/10	73,31	23,97	0,53	2,14	-	0,05
RCA 10/20	76,77	18,59	0,5	3,87	0,07	0,19

Fonte: Reproduzido de Fernandes, 2022 (50)

Os resultados obtidos indicam que a substituição parcial de agregados naturais por agregados reciclados pode aumentar a susceptibilidade do concreto ao estilhaçamento em situações de incêndio, como pode ser verificado por análise visual e fotogrametria na figura 14. A porosidade e a saturação de água no concreto desempenham um papel crucial na ocorrência de estilhaçamento. Além disso, a carga mecânica aplicada ao concreto e o tipo de cimento utilizado também influenciam significativamente o comportamento de estilhaçamento do concreto feito com agregados reciclados.

Os pesquisadores concluem que é essencial considerar cuidadosamente a composição do concreto, a taxa de substituição de agregados reciclados e as condições de exposição ao fogo ao projetar estruturas de concreto com agregados reciclados (50). Estratégias

Figura 14 – Fotogrametria de amostras de concreto com substituições parciais de agregados após exposição ao fogo.



Fonte: Adaptado de Fernandes, 2022 (50)

de mistura e formulação adequadas podem ser adotadas para melhorar a resistência ao estilhaçamento do concreto feito com agregados reciclados e garantir a segurança e durabilidade das estruturas em situações de incêndio.

Em síntese, o estudo destaca a importância de uma abordagem cuidadosa e detalhada ao usar agregados reciclados na produção de concreto, especialmente em relação à resistência ao estilhaçamento em condições de incêndio. Esses resultados contribuem na compreensão do comportamento do concreto com agregados reciclados e fornecem informações para a prática de engenharia civil sustentável e segura.

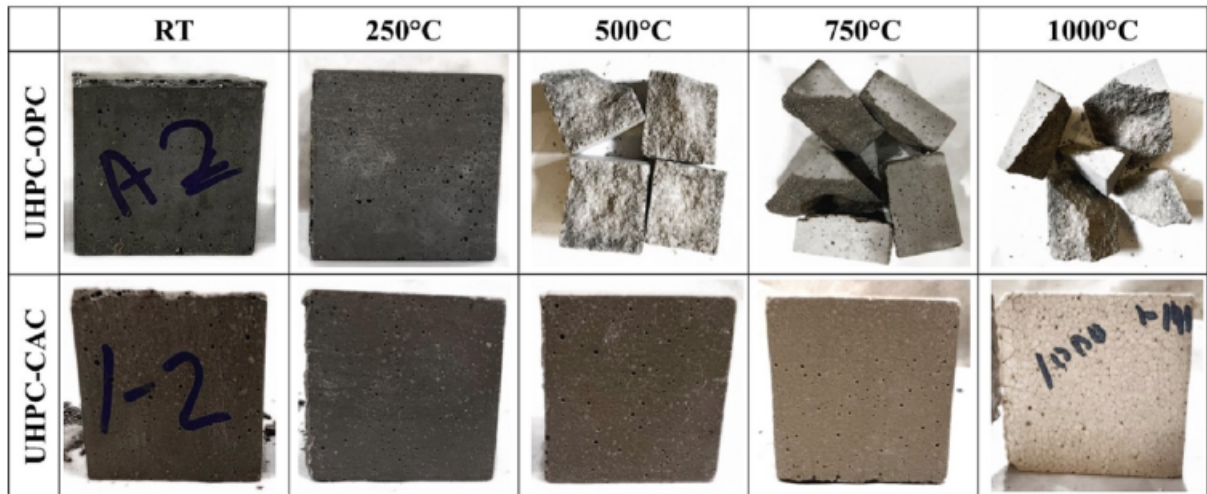
3.3 Artigo 3: O papel do cimento de aluminato de cálcio no desenvolvimento de um concreto eficiente de altíssimo desempenho e resistente ao lascamento explosivo sob altas temperaturas

Título original: The role of calcium aluminate cement in developing an efficient ultra-high performance concrete resistant to explosive spalling under high temperatures, 2023

O estudo investigou o impacto do cimento de aluminato de cálcio (CAC) na formulação de concreto de ultra-alto desempenho (UHPC) com o objetivo de aprimorar sua resistência ao estilhaçamento explosivo em condições de altas temperaturas. Os resultados obtidos revelaram que o concreto de ultra-alto desempenho baseado em cimento de aluminato de cálcio (UHPC-CAC) demonstrou uma notável resistência residual à compressão de 99,4 MPa a 500 °C, 71,4 MPa a 750 °C e 31,67 MPa a 1000 °C, enquanto o concreto de ultra-alto desempenho baseado em cimento portland (UHPC-OPC) não teve sua resistência medida em 500 °C, 750 °C e 1000 °C devido ao estilhaçamento explosivo (ver figura 15). Na figura 15 é possível observar o estado das amostras após os ensaios de exposição a temperaturas elevadas. Nota-se que mesmo na faixa de temperatura mais alta usada no experimento, a amostra de UHPC-CAC manteve sua integridade física sem danos graves, contrastando com a amostra de UHPC-OPC, onde com valor intermediário de temperatura (500 °C) o fenômeno de estilhaçamento comprometeu totalmente a forma do corpo de prova. Corroborando com as constatações da figura 15, na figura 16 é possível observar a resistência à compressão residual. Mesmo no cenário menos favorável, a amostra UHPC-CAC apresenta uma resistência à compressão em torno de 30 MPa.

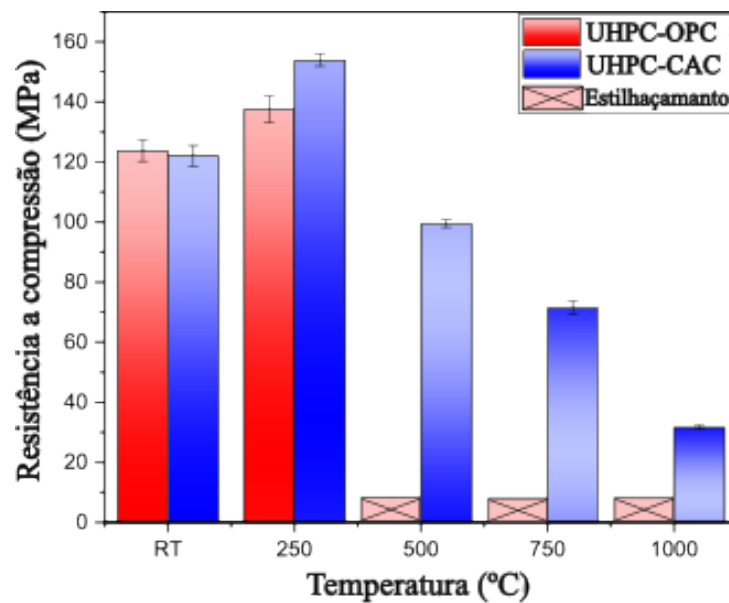
A melhoria significativa nas propriedades térmicas-mecânicas e na resistência ao estilhaçamento do UHPC-CAC foi atribuída a três mecanismos potenciais identificados no estudo. Em primeiro lugar, observou-se que o CAC apresenta uma menor pressão de água devido à sua menor quantidade de água fisicamente ligada em comparação com o OPC, o que contribui para a estabilidade do material em altas temperaturas. Em segundo lugar,

Figura 15 – Observação do estilhaçamento sofrido pelas amostras UHPC-OPC e UHPC-CAC.



Fonte: Khan e colaboradores, 2023 (51)

Figura 16 – Resistência à compressão residual de UHPC-OPC e UHPC-CAC.



Fonte: Adaptado de Khan e colaboradores, 2023 (51)

verificou-se que o CAC possui uma menor decomposição do principal produto de hidratação (CASH) em condições térmicas elevadas, o que resulta em uma maior durabilidade do concreto. Por fim, a presença de poros adicionais no UHPC-CAC foi identificada como um

fator que pode liberar a pressão da água no concreto, prevenindo assim a fragmentação em ambientes de alta temperatura.

Os autores do estudo recomendam investigações futuras para avaliar o desempenho do UHPC-CAC em idades mais avançadas, tanto com quanto sem exposição a altas temperaturas, a fim de compreender melhor seu comportamento a longo prazo. Além disso, sugerem a incorporação de fibras resistentes a altas temperaturas, como fibras de carbono, basalto ou aço, para melhorar ainda mais o desempenho mecânico do UHPC-CAC em condições extremas.

Em resumo, o estudo ressalta a importância de explorar a resistência ao estilhaçamento explosivo em concretos de alto desempenho e destaca a eficácia do CAC como substituto do OPC para mitigar esse fenômeno em condições de altas temperaturas. E recomenda estratégias de reforço, a fim de otimizar suas propriedades mecânicas e garantir sua durabilidade em aplicações práticas.

No presente capítulo foram apresentados trabalhos que usam diferentes abordagens de modificação do concreto afim de obter o mesmo objetivo: resistência ao estilhaçamento. No primeiro trabalho os autores adicionaram nanotubos de carbono, de maneira semelhante ao que é feito com as fibras de polipropileno. No segundo artigo, entendendo os impactos da indústria da construção civil no meio ambiente, os pesquisadores sugerem o uso de agregados de concreto reciclado, e chamam a atenção para as melhorias que devem ser implementadas para uma prática segura desse tipo de substituição. E por fim, no último estudo foi proposto a troca do cimento portland por cimento de aluminato de cálcio na formulação do concreto, que como pode ser verificado, mostrou-se bastante promissor. Portanto, os trabalhos apresentam diferentes metodologias com potencial significativo para resolver o problema do estilhaçamento do concreto em situação de incêndio.

4 CONCLUSÃO

Neste trabalho, foram abordados os principais aspectos associados ao fenômeno de estilhaçamento do concreto quando exposto a altas temperaturas. No capítulo 2, realizou-se uma revisão tanto do contexto histórico, para compreender os primórdios da identificação do problema, quanto das teorias que visam explicar a mecânica por trás do efeito observado.

Em relação aos modelos teóricos, embora apresentem diferenças, há alguns pontos nos quais convergem, como a influência da umidade no interior do elemento estrutural, a porosidade e o estresse térmico sofrido. A falta de padronização nos ensaios de teste ao fogo dificulta a identificação dos fatores-chave para ocorrência do estilhaçamento, ou se advém do sinergismo entre os diversos agentes. Na atual conjuntura, há informações sobre o fenômeno, porém não suficientes para resolver o "quebra-cabeça" e eliminar a possibilidade de estilhaçamento. Encontrar uma solução para esse efeito é de suma importância para construções de túneis, devido à complexidade da elaboração de uma obra desse tipo e aos impactos que um incêndio em seu interior pode causar.

No capítulo 2, também foi discutido que a adição de fibra de polipropileno é reconhecida como uma forma de mitigar os efeitos do estilhaçamento no concreto. Ao revisar algumas das normas vigentes no país, percebe-se a falta de informações claras e explícitas sobre o tema.

No capítulo 3, foram apresentados alguns trabalhos disponíveis na literatura. Apesar de utilizarem abordagens diferentes, esses trabalhos compartilham a preocupação com o estilhaçamento sofrido pelo concreto. Assim como no uso de fibra de polipropileno, os autores dos estudos apresentados indicam que a substituição e/ou adição dos constituintes da mistura do concreto podem trazer melhorias significativas na resistência das estruturas feitas desse material. E com base nesses estudos é possível pensar em novas configurações de melhoria, como a combinação de nanotubos de carbono com cimento de aluminato de cálcio, que dado o que foi observado no presente trabalho, tem grande potencial produzir bons resultados.

Portanto, é fundamental investir em pesquisa e desenvolvimento contínuos para garantir a segurança e a durabilidade das estruturas de concreto em condições adversas, como incêndios. E dessa forma, além de proteger propriedades, também se preservam vidas.

REFERÊNCIAS

- 1 RICKARD, I. J. C. **Explosive spalling of concrete in fire: novel experiments under controlled thermal and mechanical conditions**. Tese (Doutorado) — University of Edinburgh, 2020. Citado 9 vezes nas páginas 14, 15, 16, 21, 22, 23, 24, 26 e 34.
- 2 JANSSON, R. Fire spalling of concrete: Theoretical and experimental studies. **Cement and Concrete Composites**, v. 26, 2013. ISSN 09589465. Citado 7 vezes nas páginas 14, 19, 20, 22, 23, 28 e 30.
- 3 AMRAN, M.; HUANG, S. S.; ONAIZI, A. M.; MURALI, G.; ABDELGADER, H. S. **Fire spalling behavior of high-strength concrete: A critical review**. 2022. Citado 3 vezes nas páginas 14, 16 e 17.
- 4 LIMA, R. Cattelan Antochaves de; KIRCHHOF, L.; CASONATO, A.; FILHO, L. C. S. Efeito de altas temperaturas no concreto. In: . [S.l.: s.n.], 2004. Citado na página 15.
- 5 ANÁLISE da influência do teor de umidade no fenômeno de spalling explosivo em amostras de concreto expostas a altas temperaturas. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE CONCRETO. [S.l.: s.n.]. v. 53. Citado na página 15.
- 6 HERTZ, K. D. Limits of spalling of fire-exposed concrete. **Fire safety journal**, Elsevier, v. 38, n. 2, p. 103–116, 2003. Citado na página 15.
- 7 WASANTHA, P. L.; GUERRIERI, M.; XU, T. **Effects of tunnel fires on the mechanical behaviour of rocks in the vicinity – A review**. 2021. Citado na página 15.
- 8 SANJAYAN, G.; STOCKS, L. J. Spalling of high-strength silica fume concrete in fire. **ACI Materials Journal**, v. 90, 1993. ISSN 0889325X. Citado na página 16.
- 9 LI, M.; QIAN, C. X.; SUN, W. Mechanical properties of high-strength concrete after fire. **Cement and Concrete Research**, v. 34, 2004. ISSN 00088846. Citado na página 16.
- 10 AMRAN, M.; MURALI, G.; KHALID, N. H. A.; FEDIUK, R.; OZBAKKALOGLU, T.; LEE, Y. H.; HARUNA, S.; LEE, Y. Y. Slag uses in making an ecofriendly and sustainable concrete: A review. **Construction and Building Materials**, v. 272, 2021. ISSN 09500618. Citado na página 16.
- 11 ARULARASI, V.; THAMILSELVI, P.; AVUDAIAPPAN, S.; FLORES, E. I.; AMRAN, M.; FEDIUK, R.; VATIN, N.; KARELINA, M. Rheological behavior and strength characteristics of cement paste and mortar with fly ash and ggbs admixtures. **Sustainability (Switzerland)**, v. 13, 2021. ISSN 20711050. Citado na página 16.

- 12 EKSTRÖM, J.; REMPLING, R.; PLOS, M. Spalling in concrete subjected to shock wave blast. **Engineering Structures**, Elsevier, v. 122, p. 72–82, 2016. Citado na página 16.
- 13 HERTZ, K. D. Limits of spalling of fire-exposed concrete. **Fire safety journal**, Elsevier, v. 38, n. 2, p. 103–116, 2003. Citado na página 16.
- 14 PARISMATCH. **Nos arquivos do jogo - 20 anos atrás, o inferno sob o Mont-Blanc**. 2019. Disponível em: <<https://www.parismatch.com/Actu/Societe/Tunnel-Mont-Blanc-Incendie-1999-1614534>>, acessado em: 28/02/2024. Citado na página 17.
- 15 KHOURY, G. Concrete spalling assessment methodologies and polypropylene fibre toxicity analysis in tunnel fires. **Structural Concrete**, Thomas Telford Ltd, v. 9, n. 1, p. 11–18, 2008. Citado na página 16.
- 16 LEE, W. M.; FRAGOMENI, S.; MONCKTON, H.; GUERRIERI, M. A review of test methods, issues and challenges of large-scale fire testing of concrete tunnel linings. **Construction and Building Materials**, Elsevier, v. 392, p. 131901, 2023. Citado na página 16.
- 17 BREUNESE, A.; BOTH, C.; WOLSINK, G. Fire testing procedure for concrete tunnel linings. **Efectis-R0695**, p. 25, 2008. Citado na página 16.
- 18 J, J. **Excavate Rocks Like the Ancients – With Fire**. 2021. Disponível em: <<https://www.outdoorhub.com/how-to/2021/11/24/excavate-rocks-like-ancients-fire/>>, acessado em: 28/01/2024. Citado na página 19.
- 19 WANG, G.; BARBER, D.; JOHNSON, P.; HUI, M.-C. Fire safety provisions for aged concrete building structures. **Procedia Engineering**, Elsevier, v. 62, p. 629–638, 2013. Citado na página 22.
- 20 E119, A. Standard test methods for fire tests of building construction and materials, astm international, west conshohocken, pa. **Astm E119-22**, 2020. Citado na página 25.
- 21 JANSSON, R. Fire spalling of concrete - a historical overview. In: . [S.l.: s.n.], 2013. v. 6. ISSN 2261236X. Citado na página 27.
- 22 BAŽANT, Z.; CUSATIS, G. Concrete creep at high temperature and its interaction with fracture: recent progress. 2005. Creep, shrinkage and durability of concrete and concrete structures ; Conference date: 01-09-2005. Citado 2 vezes nas páginas 27 e 30.
- 23 JANSSON, R.; BOSTRÖM, L. Factors influencing fire spalling of self compacting concrete. **Materials and Structures/Materiaux et Constructions**, v. 46, 2013. ISSN 13595997. Citado na página 28.
- 24 HARMATHY, T. Z. Effect of moisture on the fire endurance of building elements. In: . [S.l.: s.n.], 1965. STP 385. ISSN 00660558. Citado 2 vezes nas páginas 28 e 29.

- 25 KO, J.; RYU, D.; NOGUCHI, T. The spalling mechanism of high-strength concrete under fire. **Magazine of Concrete Research**, v. 63, 2011. ISSN 00249831. Citado na página 28.
- 26 TOROPOVS, N.; MONTE, F. L.; WYRZYKOWSKI, M.; WEBER, B.; SAHMENKO, G.; VONTOBEL, P.; FELICETTI, R.; LURA, P. Real-time measurements of temperature, pressure and moisture profiles in high-performance concrete exposed to high temperatures during neutron radiography imaging. **Cement and Concrete Research**, v. 68, 2015. ISSN 00088846. Citado na página 28.
- 27 PHAN, L. **Fire Performance of High-Strength Concrete: A Report of the State-of-the-Art**. 1996. Citado na página 28.
- 28 ANDERBERG, Y. Spalling phenomena of hpc and oc. In: . [S.l.: s.n.], 1997. Citado na página 28.
- 29 BOSNJAK, J. Explosive spalling and permeability of high performance concrete under fire: numerical and experimental investigations. 2014. Citado na página 28.
- 30 MATESOVÁ, D.; KERŠNER, Z. Effect of porosity and fracture toughness on explosive spalling of concrete. In: _____. [S.l.: s.n.], 2007. Citado na página 28.
- 31 ROSSINO, C.; MONTE, F. L.; CANGIANO, S.; FELICETTI, R.; GAMBAROVA, P. G. Concrete spalling sensitivity versus microstructure: Preliminary results on the effect of polypropylene fibers. In: . [S.l.: s.n.], 2013. v. 6. ISSN 2261236X. Citado na página 28.
- 32 YERMAK, N.; PLIYA, P.; BEAUCOUR, A. L.; SIMON, A.; NOUMOWÉ, A. Influence of steel and/or polypropylene fibres on the behaviour of concrete at high temperature: Spalling, transfer and mechanical properties. **Construction and Building Materials**, v. 132, 2017. ISSN 09500618. Citado na página 28.
- 33 GUERRIERI, M.; FRAGOMENI, S. Mechanisms of spalling of concrete panels of different geometry in hydrocarbon fire. **Journal of Materials in Civil Engineering**, v. 28, 2016. ISSN 0899-1561. Citado na página 28.
- 34 LUCIO-MARTIN, T.; PUENTES, J.; ALONSO, M. C. Effect of geometry in concrete spalling risk subjected to high temperatures for thermal inertia studies. University of Sheffield, 2019. Citado na página 28.
- 35 BOSTRÖM, L.; JANSSON, R. The age effect on fire spalling of concrete. **Concrete**, 2011. Citado na página 28.
- 36 LENGLET, C. Evolution of spalling with time and age. In: RILEM PUBLICATIONS SARL. **2nd international RILEM Workshop on concrete spalling due to fire exposure**. [S.l.], 2011. p. 19–24. Citado na página 28.
- 37 ROBERT, F.; COLINA, H. The influence of aggregates on the mechanical characteristics of concrete exposed to fire. **Magazine of Concrete Research**, v. 61, 2009. ISSN 00249831. Citado na página 28.

- 38 XING, Z.; BEAUCOUR, A. L.; HEBERT, R.; NOUMOWE, A.; LEDESERT, B. Influence of the nature of aggregates on the behaviour of concrete subjected to elevated temperature. **Cement and Concrete Research**, v. 41, 2011. ISSN 00088846. Citado na página 28.
- 39 RAHIM, A.; SHARMA, U. K.; MURUGESAN, K.; ARORA, P. Effect of load on thermal spalling of reinforced concrete containing various mineral admixtures. In: . [S.l.: s.n.], 2013. v. 6. ISSN 2261236X. Citado na página 28.
- 40 MIAH, M. J.; MONTE, F. L.; PIMIENTA, P.; FELICETTI, R. Effect of biaxial mechanical loading and cement type on the fire spalling behavior of concrete. In: . [S.l.: s.n.], 2016. Citado na página 28.
- 41 KANNANGARA, T.; JOSEPH, P.; FRAGOMENI, S.; GUERRIERI, M. Existing theories of concrete spalling and test methods relating to moisture migration patterns upon exposure to elevated temperatures – a review. **Case Studies in Construction Materials**, v. 16, 2022. ISSN 22145095. Citado 3 vezes nas páginas 30, 31 e 32.
- 42 ICHIKAWA, Y. Prediction of pore pressures, heat and moisture transfer leading to spalling of concrete during fire. 2000. Disponível em: <<https://api.semanticscholar.org/CorpusID:138461745>>. Citado na página 31.
- 43 MOHAMMED, H.; AHMED, H.; KURDA, R.; ALYOUSEF, R.; DEIFALLA, A. F. **Heat-Induced Spalling of Concrete: A Review of the Influencing Factors and Their Importance to the Phenomenon**. 2022. Citado na página 33.
- 44 BOŠNJAK, J.; OŽBOLT, J.; HAHN, R. Permeability measurement on high strength concrete without and with polypropylene fibers at elevated temperatures using a new test setup. **Cement and Concrete Research**, v. 53, 2013. ISSN 00088846. Citado na página 33.
- 45 JANSSON, R.; BOSTRÖM, L. The influence of pressure in the pore system on fire spalling of concrete. **Fire Technology**, v. 46, 2010. ISSN 00152684. Citado na página 33.
- 46 YARMOHAMMADIAN, R. Fast transient analysis of spalling phenomenon using neutron radiography. Italy, 2019. Citado na página 34.
- 47 ZHANG, H. L.; DAVIE, C. T. A numerical investigation of the influence of pore pressures and thermally induced stresses for spalling of concrete exposed to elevated temperatures. **Fire Safety Journal**, v. 59, 2013. ISSN 03797112. Citado na página 34.
- 48 EUROPÉEN, C. Eurocode 2: Design of concrete structures—part 1-1: General rules and rules for buildings. **London: British Standard Institution**, 2004. Citado na página 37.
- 49 LU, H.; YAO, Y. Spalling mechanism of carbon nanotube concrete at elevated temperature. **Construction and Building Materials**, Elsevier, v. 314, p. 125594, 2022. Citado 2 vezes nas páginas 39 e 40.

- 50 FERNANDES, B.; CARRÉ, H.; MINDEGUIA, J.-C.; PERLOT, C.; BORDERIE, C. L. Spalling behaviour of concrete made with recycled concrete aggregates. **Construction and Building Materials**, Elsevier, v. 344, p. 128124, 2022. Citado 2 vezes nas páginas 42 e 43.
- 51 KHAN, M.; LAO, J.; AHMAD, M. R.; KAI, M.-F.; DAI, J.-G. The role of calcium aluminate cement in developing an efficient ultra-high performance concrete resistant to explosive spalling under high temperatures. **Construction and Building Materials**, Elsevier, v. 384, p. 131469, 2023. Citado na página 45.