



# Especialização em Engenharia de Segurança Contra Incêndios

www.ufrgs.br/esci  
(2020)

## DESEMPENHO ESTRUTURAL DE LAJES LISAS PROTENDIDAS EM SITUAÇÃO DE INCÊNDIO: ESTADO DO CONHECIMENTO

*Structural performance of prestressed concrete flat slabs under fire exposure:  
state of knowledge*

**Autora:** Eng. Civil Gabriela Dalfollo Brackmann (gabrielabrackmann@hotmail.com)

**Orientadora:** Prof. Dra. Ângela Gaio Graeff (angela.graeff@ufrgs.br)

### RESUMO

As normas atuais de projeto de estruturas de concreto em situação de incêndio têm caráter prescritivo e, para lajes lisas protendidas, especificam apenas cobrimentos e espessuras mínimas, o que pode levar a uma previsão não realista da resistência ao fogo, devido a não consideração de diversos fatores que influenciam o desempenho estrutural em incêndio. Assim, o objetivo deste trabalho é apresentar os avanços ocorridos nos últimos 15 anos na compreensão dos fatores que influenciam o desempenho estrutural de lajes lisas protendidas em situação de incêndio. Para isso, os resultados experimentais de 51 ensaios de resistência ao fogo foram analisados, juntamente com 3 casos de incêndios reais ocorridos em edifícios com lajes lisas protendidas e 12 trabalhos desenvolvidos com modelagem computacional. As conclusões deste trabalho apontam que o *spalling* é influenciado pelo grau de protensão e distribuição de tensões na laje; a deflexão da laje é influenciada pelas condições de apoio, cobertura, nível de carregamento, comprimento da armadura negativa e sequência de aquecimento, enquanto a perda de força de protensão dos cabos é influenciada pelo cobertura, nível de carregamento, força de protensão inicial, comprimento relativo aquecido e tipo de protensão (pós-tração aderente ou não-aderente).

**Palavras-chave:** desempenho estrutural; lajes lisas; lajes protendidas; situação de incêndio.

### ABSTRACT

The current design rules for concrete structures under fire exposure are prescriptive and, for prestressed concrete flat slabs, only specify minimum concrete cover and slab thickness, which can lead to an unreliable prediction of fire resistance, due to the non-consideration of several factors that influence the structural fire performance. Thus, the aim of this paper is to present the advances occurred in the last 15 years about the understanding of the factors that influence the structural fire performance of prestressed concrete flat slabs. For that, the experimental results of 51 fire tests were analyzed, together with 3 cases of real fires occurred in buildings with prestressed concrete flat slabs and 12 research papers developed with computational modeling. The conclusions of this paper indicate that spalling is influenced by the degree of prestressing and stress distribution in the slab; the slab deflection is influenced by the support conditions, concrete cover thickness, load level, length of the negative reinforcement and heating sequence, while the prestress loss is influenced by concrete cover thickness, load level, effective prestress, heated length ratio and type of post-tensioning system (bonded or unbonded).

**Keywords:** structural performance; flat slabs; prestressed slabs; fire exposure.



# Especialização em Engenharia de Segurança Contra Incêndios

www.ufrgs.br/esci  
(2020)

## 1 INTRODUÇÃO

Edificações com lajes lisas protendidas são cada vez mais utilizadas devido aos diversos benefícios que o sistema apresenta, dentre eles a rapidez construtiva, a economia em fôrmas, a redução no número de pilares, o aumento dos vãos livres e a possibilidade de redução na altura total do pavimento devido a maior esbeltez da laje. Outro benefício muitas vezes atribuído ao sistema é a "inerente resistência ao fogo", assumida com base em ensaios de resistência ao fogo antigos, realizados antes de 1970, e em elementos estruturais isolados, cujas características construtivas não são mais representativas das técnicas utilizadas pela indústria da construção civil atualmente (Gales, Bisby e Gillie, 2011a).

As normas atuais de projeto de estruturas de concreto em situação de incêndio, como a ABNT NBR 15200 (2012), ACI 216.1 (2007) e EN 1992-1-2 (2004), têm caráter prescritivo e consideram apenas a espessura do cobrimento, o tipo de agregado e a espessura da laje na avaliação da resistência ao fogo das lajes lisas protendidas. As normativas ainda não apresentam uma rotina de cálculo para a verificação da segurança estrutural em situação de incêndio e as prescrições atuais sequer diferenciam a protensão aderente da não-aderente, ou a pré-tração da pós-tração. Além disso, fatores importantes não são levados em consideração na avaliação da resistência ao fogo, como o nível de carregamento, o grau de protensão, a continuidade dos cabos, as condições de restrição à dilatação térmica, a ação de membrana das lajes, a contribuição da armadura passiva, as tensões de pré-compressão, a ocorrência de *spalling*<sup>1</sup>, o aquecimento localizado e a interação da laje com os pilares. Assim, as previsões fornecidas pelas normas podem não representar uma avaliação realista da resistência ao fogo dessas lajes.

O objetivo desse trabalho é apresentar os avanços ocorridos na compreensão dos fatores que influenciam o desempenho estrutural de lajes lisas protendidas em situação de incêndio. Para isso, serão apresentados e discutidos os resultados experimentais de 51 ensaios de resistência ao fogo realizados nos últimos 15 anos, 3 casos de incêndios reais ocorridos em edifícios com lajes lisas protendidas e 12 trabalhos desenvolvidos com modelagem computacional, caracterizando, assim, o atual estado do conhecimento.

---

<sup>1</sup> Nota: neste trabalho, o termo *spalling* se refere a todos os tipos de deslocamentos do concreto, e não somente ao explosivo. Quando o mesmo for explosivo, haverá uma observação específica para isso.



## 2 INCÊNDIOS REAIS EM EDIFÍCIOS COM LAJES LISAS PROTENDIDAS

De forma geral, existem poucos relatos na literatura de incêndios reais ocorridos em edifícios com lajes lisas protendidas. Uma revisão mais completa é apresentada em Gales, Bisby e Gillie (2011a) e em Gales, Hartin e Bisby (2016), sendo os principais eventos listados em ordem cronológica no Quadro 1. Neste trabalho, apenas os estudos de caso mais relevantes serão abordados.

Quadro 1 – Estudos de caso de incêndios reais em edifícios com lajes lisas protendidas.

Local do incêndio	Publicação	Spalling (S/N)	Ruptura de cabos (S/N)	Colapso (S/N)
Los Angeles, EUA (1965)	Troxell (1965)	Sim	Não	Não
Bangkok, Tailândia (1987)	Lukkunaprasit (1990)	Sim	Sim	Sim
Santa Ana, EUA (1988)	Barth e Aalami (1992)	Sim	Sim	Sim
Portland, EUA (1999)	Sarkkinen (2006)	Sim	Sim	Não
Key Biscayne, EUA (2000)	Post e Korman (2000)	-	Sim	Sim
Tel Aviv, Israel (2000)	Stern (2009)	-	Sim	Não

(fonte: adaptado de Gales, Hartin e Bisby, 2016)

O estudo de caso mais antigo encontrado na literatura é o de Troxell (1965), onde é descrito o incêndio que atingiu um prédio de 2 pavimentos em Los Angeles, Estados Unidos, em 1965. As lajes eram lisas protendidas, com cordoalhas não-aderentes e cabos posicionados nas duas direções. O incêndio durou 1h30min e ficou restrito a dois compartimentos do edifício. As lajes de piso e de cobertura sofreram *spalling*, que expôs os cabos de protensão da laje de cobertura. A temperatura máxima do incêndio foi estimada em 1.070°C, entretanto, não houve ruptura de cabos de protensão e a estrutura não colapsou. Após o incêndio, Troxell (1965) ensaiou cinco cabos que foram expostos ao fogo e comparou com um cabo de referência, que não havia sido exposto ao incêndio, e os resultados não apresentaram diferenças significativas na relaxação do aço, indicando que a integridade dos cabos não foi afetada pelo incêndio. A explicação para isso, segundo Troxell (1965), é que o *spalling* severo da laje de cobertura ocorreu devido ao choque térmico com a água durante o processo de combate ao fogo, de forma que os cabos de protensão não foram expostos diretamente ao incêndio.

Um edifício de 18 pavimentos localizado em Bangkok, Tailândia, colapsou parcialmente em 1987 após suportar mais de 5 horas de incêndio (Lukkunaprasit, 1990). Os



# Especialização em Engenharia de Segurança Contra Incêndios

www.ufrgs.br/esci  
(2020)

pavimentos possuíam 4.000 m<sup>2</sup> de lajes lisas protendidas com cordoalhas engraxadas (protensão não-aderente), cabos distribuídos nas duas direções, contínuos ao longo do vão da laje, e armadura passiva mínima de acordo com as exigências normativas locais da época. Além disso, cada pavimento possuía um trecho final com 4,0 metros em balanço. O incêndio se iniciou no 3° e se alastrou até o 5° pavimento, havendo a ocorrência de *spalling* generalizado nas lajes, que expôs os cabos diretamente ao fogo. De acordo com Lukkunaprasit (1990), após o rompimento de alguns cabos, o balanço do 4° pavimento colapsou, provocando o colapso de dois pilares de suporte e resultando no colapso progressivo de vários compartimentos internos. Foi estimado que 10 a 20% dos cabos romperam durante o incêndio, mas apenas os compartimentos na área afetada pelo fogo colapsaram, enquanto os compartimentos próximos se mantiveram íntegros. Lukkunaprasit (1990) acredita que isso só foi possível graças a ação de membrana das lajes e com a ancoragem dos cabos nas extremidades dos compartimentos colapsados por torções nas linhas dos pilares. Grandes deslocamentos verticais nas lajes teriam permitido que uma menor força de protensão suportasse o peso das lajes e as cargas impostas pela ação de membrana.

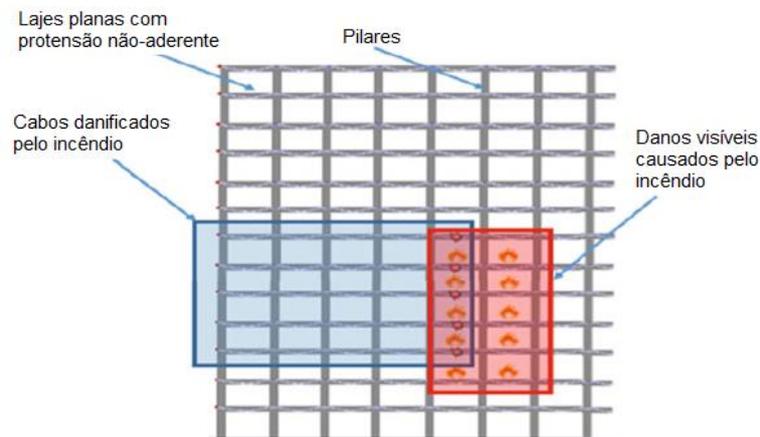
Em 2000, um incêndio de grandes proporções ocorreu em Key Biscayne, nos Estados Unidos, durante a construção de um edifício com lajes lisas protendidas com cordoalhas do tipo não-aderentes (Post e Korman, 2000). A obra já havia avançado até o 12° pavimento, quando um incêndio se iniciou no 2° pavimento, próximo a uma parede de concreto responsável pela estabilidade global do edifício. O fogo se alastrou para o compartimento ao lado, onde encontrou uma abertura na laje deixada para realizar a protensão de alguns cabos internos no pavimento. O incêndio se propagou verticalmente por essa abertura, causando danos visíveis em dois compartimentos até o 7° pavimento, como ilustrado na Figura 1. Os engenheiros responsáveis pela avaliação estrutural do edifício após o incêndio concluíram que o fogo provocou a perda de tensão nos cabos que estavam ancorados na abertura por onde o incêndio se propagou. Assim, a perda de tensão desencadeou o colapso progressivo das lajes, de forma que metade das lajes entre o 3° e 7° pavimento perderam sua integridade estrutural (Post e Korman, 2000). Devido ao alto risco de colapso progressivo do restante da estrutura, todo o edifício foi demolido.



# Especialização em Engenharia de Segurança Contra Incêndios

www.ufrgs.br/esci  
(2020)

Figura 1: Corte esquemático do incêndio ocorrido em Key Biscayne.



(fonte: adaptado de Gales, Hartin e Bisby, 2016)

## 3 ENSAIOS DE RESISTÊNCIA AO FOGO EM LAJES LISAS PROTENDIDAS

Neste trabalho serão abordados apenas os ensaios de resistência ao fogo mais recentes que constam na literatura, realizados em lajes lisas protendidas. Em Gales, Bisby e Gillie (2011a) é apresentada uma revisão dos ensaios realizados desde 1958, entretanto, os autores alertam que as condições em que esses ensaios ocorreram não são mais consideradas representativas dos materiais e técnicas de construção empregadas atualmente e, portanto, não contribuem na caracterização do atual estado do conhecimento.

Os ensaios mais recentes executados em lajes lisas protendidas concentram-se em grupos de pesquisas localizados na China e no Reino Unido. Devido a limitações dimensionais dos fornos disponíveis, inicialmente foi dada preferência por ensaiar faixas de lajes unidirecionais, com pós-tração aderente ou não-aderente, simplesmente apoiadas ou contínuas sobre 2 ou 3 vãos. Com o avanço das pesquisas, foram realizados ensaios em modelos em pequena escala de lajes lisas protendidas apoiadas sobre pilares, de forma a considerar a restrição imposta pelos pilares no comportamento da laje. Os dados de todos os ensaios, incluindo características dos elementos ensaiados e resultados obtidos, foram organizados e encontram-se no Apêndice A deste trabalho.

### 3.1 Zheng e Hou (2008)

Zheng e Hou (2008) ensaiaram 10 lajes protendidas unidirecionais simplesmente apoiadas, sendo 9 lajes com pós-tração não-aderente e uma laje com pré-tração aderente. Com



# Especialização em Engenharia de Segurança Contra Incêndios

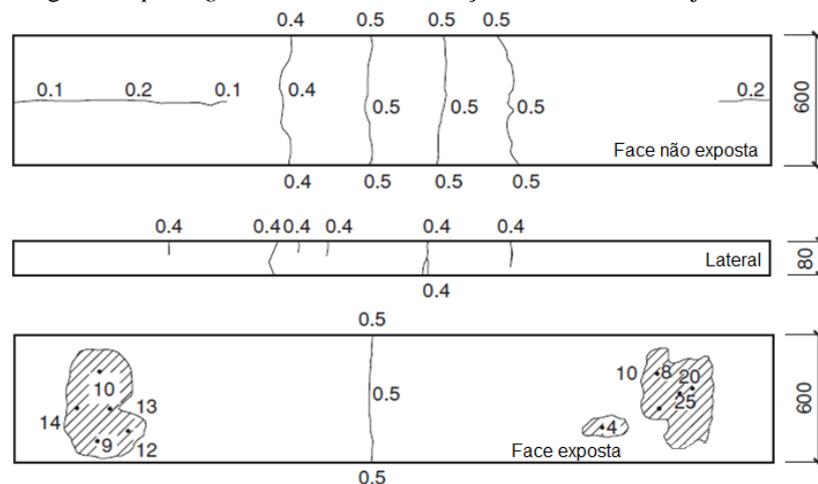
www.ufrgs.br/esci  
(2020)

base nos resultados, os autores propuseram equações para determinar a tensão nos fios de aço de protensão e o deslocamento no meio do vão para lajes protendidas simplesmente apoiadas em situação de incêndio.

Os ensaios ocorreram no forno de testes do Tianjin Fire Resistance Institute, em Tianjin, China. As lajes possuíam 0,60 m de largura, vão efetivo de 3,30 m entre apoios e foram submetidas a curva-padrão de aquecimento da ISO 834 (1999). A protensão foi feita com fios de aço de 5 mm de diâmetro, em traçado parabólico, e armadura passiva foi disposta na face inferior. A dilatação térmica das lajes era livre e o critério definido para o fim dos ensaios foi a flecha limite no meio do vão de 165 mm, equivalente a  $L/20$ . Maiores informações sobre as lajes ensaiadas por Zheng e Hou (2008) estão disponíveis no Apêndice A deste trabalho.

Durante os ensaios, todas as lajes apresentaram fissuração na face exposta ao fogo, na face não-exposta e nas laterais, como pode ser observado na Figura 2. Em apenas 2 lajes foram observadas fissuras longitudinais, acima da posição dos fios de protensão. O *spalling* do concreto ocorreu em 6 das 10 lajes, com diferentes níveis de gravidade, sendo que em duas dessas lajes o *spalling* se manifestou sob a forma explosiva. De forma geral, o *spalling* ocorreu próximo aos apoios, provavelmente devido a maiores tensões de compressão. Não houve a ruptura de fios de protensão.

Figura 2: *Spalling* do concreto e distribuição das fissuras na laje UPSS-2.



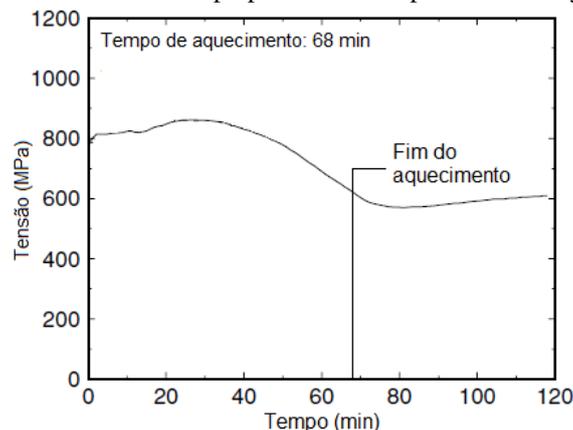
Áreas hachuradas significam *spalling* e o número é a profundidade do *spalling* (mm).

(fonte: adaptado de Zheng e Hou, 2008)



O perfil das curvas tensão x tempo obtidas nos ensaios, relativas à tensão nos fios de protensão, foi semelhante em todas as lajes. Na Figura 3 é apresentada a curva tensão x tempo para a laje UPSS-2, onde é possível notar um aumento de tensão nos fios de protensão no início do aquecimento, causado pelo deslocamento vertical e dilatação térmica da laje. Após um certo período de exposição ao fogo, a deterioração do módulo de elasticidade e a relaxação térmica do aço promoveram a redução da tensão nos fios, que continuou reduzindo até o fim do aquecimento. No período de resfriamento, observa-se um ganho de tensão nos fios devido à recuperação do módulo de elasticidade do aço e pela retração térmica da peça.

Figura 3: Curva tensão x tempo para os fios de protensão da laje UPSS-2.



(fonte: adaptado de Zheng e Hou, 2008)

### 3.2 Bailey e Ellobody (2009a,b)

Bailey e Ellobody (2009a,b) conduziram uma série de ensaios de resistência ao fogo em lajes protendidas simplesmente apoiadas, com o objetivo de investigar o efeito de diferentes tipos de agregados graúdos no concreto e a influência da restrição longitudinal a dilatação térmica no desempenho estrutural das lajes em situação de incêndio. Em Bailey e Ellobody (2009a) são apresentados os resultados de 8 ensaios em lajes com pós-tração aderente, e em Bailey e Ellobody (2009b) os resultados de 4 ensaios em lajes com pós-tração não-aderente.

Os ensaios foram conduzidos na University of Manchester, no Reino Unido. A curva de aquecimento adotada foi a ISO 834 (1999) e o critério para definir o fim do ensaio baseou-se na proximidade da temperatura dos cabos de 400°C. As lajes ensaiadas possuíam 1,6 m de largura, 160 mm de espessura e um vão efetivo entre apoios de 4,0 m. Em cada laje foram



# Especialização em Engenharia de Segurança Contra Incêndios

www.ufrgs.br/esci  
(2020)

posicionados 3 cabos monocordoalha de 15,7 mm, em traçado parabólico, e nas ancoragens foi disposta armadura de fretagem, sendo essa a única armadura passiva utilizada. Mais informações sobre as lajes ensaiadas por Bailey e Ellobody (2009a,b) encontram-se no Apêndice A.

Nos ensaios das 8 lajes com pós-tração aderente descritos em Bailey e Ellobody (2009a), variou-se o agregado graúdo utilizado no concreto entre calcário e seixo rolado, e também as condições de contorno das lajes, entre dilatação térmica longitudinal restrita ou livre. Além disso, as bainhas dos cabos variaram entre bainhas plásticas, com diâmetro interno de 23 mm, e bainhas metálicas em aço galvanizado, com diâmetro interno de 40 mm. Após a conclusão da operação de protensão dos cabos, foi realizada a injeção da calda de cimento nas bainhas, com traço de 2,5:1 (cimento Portland comum, água).

Durante os ensaios das lajes com pós-tração aderente de Bailey e Ellobody (2009a), nas lajes com bainhas plásticas foi observado vapor e fumaça azul, provenientes do derretimento do plástico. Todas as lajes apresentaram fissuras longitudinais na face superior, acima da posição dos cabos, devido ao desenvolvimento de tensões térmicas, que poderiam ser evitadas com o uso de armadura passiva negativa posicionada transversalmente ao traçado dos cabos de protensão. Em 5 das 8 lajes houve a ocorrência de *spalling* leve, sem expor os cabos, e fissuras transversais foram observadas em 4 lajes. Não houve ruptura dos cabos de protensão.

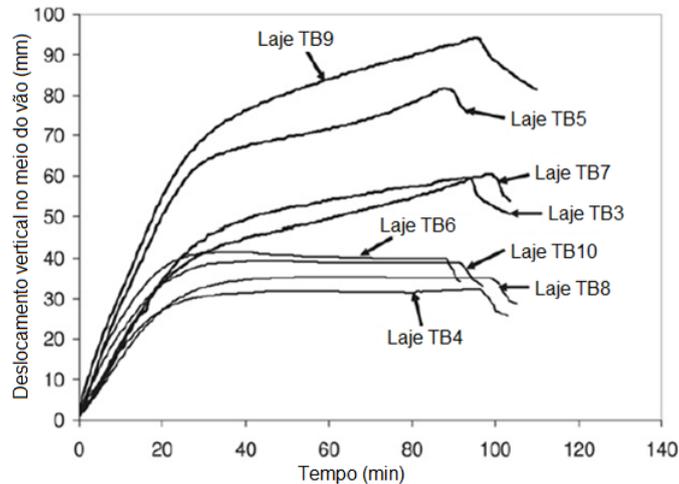
A partir dos resultados, Bailey e Ellobody (2009a) concluíram que o tipo de agregado graúdo utilizado no concreto influencia diretamente no desempenho estrutural das lajes protendidas em situação de incêndio. As lajes com calcário apresentaram deslocamentos verticais inferiores às lajes com seixo rolado (Figura 4), devido a menor expansão térmica do agregado. A definição das condições de contorno também foi fundamental no desempenho das lajes, pois a restrição longitudinal à dilatação térmica resultou em deslocamentos verticais menores quando comparadas às lajes com dilatação livre. Além disso, geralmente as lajes com bainhas metálicas apresentaram deslocamentos verticais maiores (Figura 5), apesar da temperatura ser maior nos cabos de protensão com bainhas plásticas, devido ao derretimento do plástico a aproximadamente 230°C.



# Especialização em Engenharia de Segurança Contra Incêndios

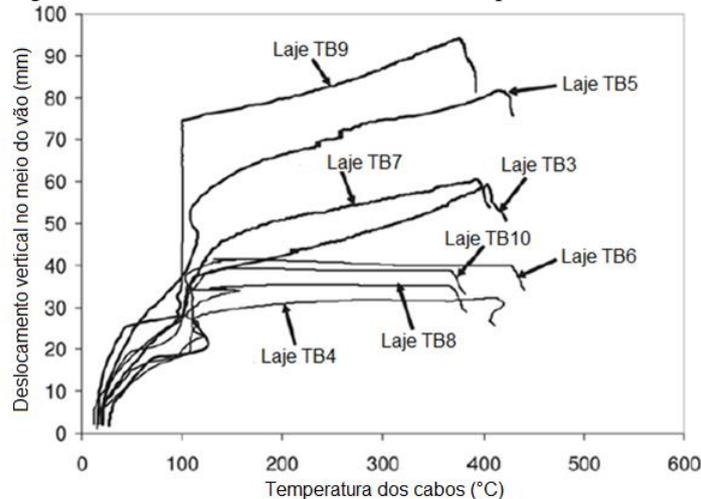
www.ufrgs.br/esci  
(2020)

Figura 4: Curvas deslocamento vertical x tempo.



(fonte: adaptado de Bailey e Ellobody, 2009a)

Figura 5: Curvas deslocamento vertical x temperatura dos cabos.



(fonte: adaptado de Bailey e Ellobody, 2009a)

Nos ensaios apresentados em Bailey e Ellobody (2009b), com 4 lajes com pós-tração não-aderente, também houve variação das condições de restrição longitudinal à dilatação térmica das lajes e do tipo de agregado graúdo empregado no concreto. Nesse caso, as cordoalhas engraxadas eram revestidas por um tubo fino de polipropileno. Todas as lajes apresentaram fissuras longitudinais acima da posição dos cabos de protensão e um leve *spalling* foi observado em uma laje, sem expor os cabos. Apenas uma laje foi ensaiada até a ruína, na qual os três cabos de protensão romperam e ocorreu uma grande fissura transversal no meio do vão, causando o colapso total da laje.

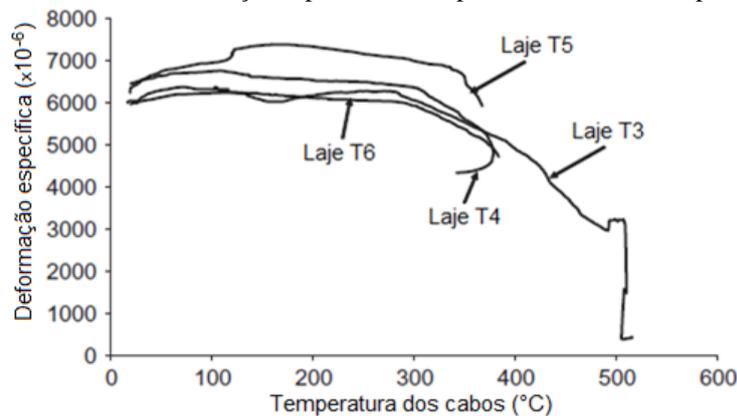


# Especialização em Engenharia de Segurança Contra Incêndios

www.ufrgs.br/esci  
(2020)

De modo geral, os resultados obtidos por Bailey e Ellobody (2009b) confirmam as conclusões de Bailey e Ellobody (2009a): as lajes com agregado graúdo a base de calcário e com restrição longitudinal à dilatação térmica apresentaram deslocamentos verticais menores que as lajes com agregados graúdos de seixo rolado e com dilatação térmica livre. Além disso, todas as lajes apresentaram um aumento da deformação específica nos cabos no início do aquecimento, como pode ser visto na Figura 6. O comportamento das lajes T3, T4 e T6 foi semelhante, com um aumento da deformação específica entre 4 a 7% no início do aquecimento. Por outro lado, o comportamento da laje T5 se destacou das demais, com os cabos de protensão apresentando um aumento de deformação específica de até 18%. Bailey e Ellobody (2009b) atribuíram esse fenômeno ao platô de temperatura ocorrido em 116°C, no qual os deslocamentos verticais continuaram aumentando a uma temperatura constante. A causa desse platô seria a migração de água dos agregados graúdos (seixo rolado) para o concreto e, apesar da laje T6 possuir o mesmo tipo de agregado, esse efeito foi minimizado devido à restrição longitudinal a que essa laje estava sujeita.

Figura 6: Curvas deformação específica x temperatura dos cabos de protensão.



(fonte: adaptado de Bailey e Ellobody, 2009b)

### 3.3 Zheng *et al.* (2010) e Hou, Zheng e Kodur (2013)

Zheng *et al.* (2010) estudaram a influência da resistência do concreto, do teor de umidade e dos níveis de tensão na zona de pré-compressão na ocorrência e gravidade do *spalling* em lajes lisas protendidas. Os autores reuniram os dados dos ensaios apresentados em Zheng e Hou (2008) com os dados de mais 14 novos ensaios de resistência ao fogo,



# Especialização em Engenharia de Segurança Contra Incêndios

www.ufrgs.br/esci  
(2020)

compostos por 5 lajes simplesmente apoiadas e 9 lajes contínuas sob dois vãos, com pós-tração não-aderente e submetidas a curva-padrão de aquecimento da ISO 834 (1999).

As lajes simplesmente apoiadas possuíam 0,60 m de largura e vão efetivo de 3,30 m entre apoios, enquanto as lajes contínuas possuíam dois vãos efetivos de 2,55 m, que foram expostos ao fogo simultaneamente. A protensão das lajes foi feita com fios de aço de 5 mm de diâmetro em traçado parabólico, com armadura passiva posicionada na face inferior e dilatação térmica livre. Mais detalhes das lajes ensaiadas por Zheng *et al.* (2010) estão disponíveis no Apêndice A deste trabalho.

Nos ensaios apresentados em Zheng e Hou (2008), 6 das 10 lajes sofreram *spalling*. Nos novos ensaios de Zheng *et al.* (2010), ocorreu *spalling* em 2 das 5 lajes simplesmente apoiadas, e em apenas uma delas houve ruptura dos fios de protensão, contribuindo para o colapso da laje. Nas lajes contínuas, foi observado *spalling* em 3 das 9 lajes, sendo que em 2 dessas houve ruptura dos fios de protensão, mas apenas uma colapsou durante o ensaio. Destaca-se que das 14 lajes ensaiadas por Zheng *et al.* (2010), apenas 2 atingiram o colapso durante o ensaio, devido à severidade do *spalling* ocorrido que expôs os fios de protensão. Para as demais lajes, o aquecimento foi interrompido antes de qualquer indício de colapso.

Após a análise dos dados obtidos experimentalmente, Zheng *et al.* (2010) concluíram que a tensão nominal e a resistência do concreto (medida indireta da permeabilidade) têm influência significativa na extensão da área afetada pelo *spalling*, enquanto o teor de umidade tem um efeito menor. As regiões com tensões de tração mais elevadas apresentam fissuras que aumentam a permeabilidade do concreto, diminuindo a poro-pressão e reduzindo a severidade e o risco de ocorrência de *spalling*. Logo, o *spalling* do concreto se manifesta mais facilmente ou mais severamente quando a face exposta ao incêndio apresenta elevadas tensões de compressão ou baixas tensões de tração, e quando a resistência e o teor de umidade no concreto à temperatura ambiente são maiores.

Os ensaios de resistência ao fogo realizados nas 9 lajes contínuas com protensão não-aderente, publicados pela primeira vez em Zheng *et al.* (2010), foram novamente publicados em Hou, Zheng e Kodur (2013), que utilizaram os dados dos experimentos para estudar o efeito do nível de carregamento, da espessura do cobrimento, da força de protensão efetiva e do grau de protensão no comportamento das lajes em situação de incêndio.



# Especialização em Engenharia de Segurança Contra Incêndios

www.ufrgs.br/esci  
(2020)

Segundo Hou, Zheng e Kodur (2013), os resultados dos ensaios mostraram que a espessura do cobrimento e o nível de carregamento têm influência significativa na deflexão das lajes. Nas lajes com menor cobrimento, as deflexões aumentaram a uma taxa maior do que nas demais lajes, resultado do aumento mais rápido na temperatura dos fios de protensão, provocando a degradação das propriedades mecânicas do aço. Nas lajes com maiores níveis de carregamento, o aumento das deflexões pode ser atribuído ao escoamento precoce da armadura de aço, aumentando as deformações mecânicas e por fluência do aço.

Além disso, Hou, Zheng e Kodur (2013) observaram uma relação entre a deflexão das lajes e o aumento inicial de tensão nos fios de protensão. Lajes com maiores deflexões na fase inicial apresentaram um aumento de tensões nos fios de protensão maior. Esse aumento de tensão nos fios ocorre até o momento em que a perda de tensão devido a degradação das propriedades mecânicas do aço supera o ganho de tensão devido a deflexão e a dilatação térmica da laje. Nesse ponto, a perda de tensão nos fios ocorre de forma contínua até o fim do aquecimento. Os autores também observaram que as lajes com maior força de protensão no início do aquecimento sofreram uma redução maior de tensão nos fios de protensão, principalmente devido à fluência e à relaxação térmica do aço.

O *spalling* do concreto ocorreu em 3 das 9 lajes ensaiadas, com extensão variável. Notavelmente, o *spalling* ocorreu nas lajes com maior grau de protensão, sendo a extensão da área afetada pelo *spalling* proporcional ao grau de protensão da laje. Isso pode ser explicado pelo fato de que níveis mais elevados de tensão no concreto, induzidos pelo maior grau de protensão, aceleram a progressão do *spalling*, que pode ser um fator decisivo na resistência ao fogo da laje. Entretanto, Hou, Zheng e Kodur (2013) concluíram que o grau de protensão tem um efeito menor na resistência ao fogo das lajes, quando comparado ao efeito da espessura do cobrimento.

### **3.4 Aimin, Yuli e Litang (2013)**

Em Aimin, Yuli e Litang (2013) são apresentados os resultados de 4 ensaios de resistência ao fogo realizados em lajes com pós-tração não-aderente, unidirecionais e contínuas de 3 vãos. Os ensaios tinham como objetivo estudar o efeito do comprimento da armadura negativa nos apoios e a influência da sequência de aquecimento dos vãos no



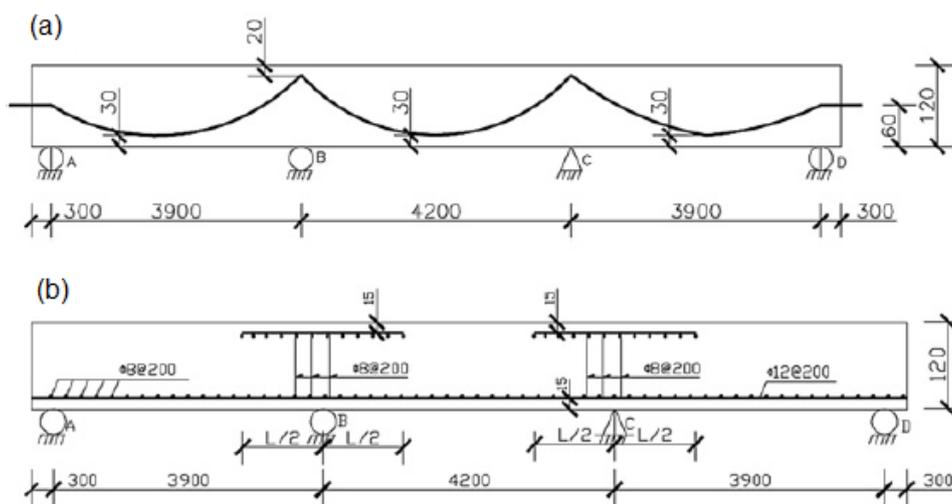
# Especialização em Engenharia de Segurança Contra Incêndios

www.ufrgs.br/esci  
(2020)

desempenho das lajes protendidas em situação de incêndio. Para isso, variou-se o comprimento da armadura negativa nos apoios em 2,2 m e 3,9 m, e a sequência de aquecimento, iniciando pelo vão central ou pelo vão de extremidade.

As lajes foram submetidas a curva de aquecimento ISO 834 (1999), possuíam 1,5 m de largura, 120 mm de espessura e um comprimento total de 12,6 m, com o vão central medindo 4,2 m e os vãos das extremidades 3,9 m cada (Figura 7). Cada laje possuía um cabo monocordoalha de 15,24 mm, posicionado em perfil parabólico, com dilatação térmica livre, exceto no apoio C, onde havia restrição ao deslocamento horizontal. Mais detalhes sobre as lajes ensaiadas por Aimin, Yuli e Litang (2013) encontram-se no Apêndice A deste trabalho.

Figura 7: Layout: (a) elevação do cabo de protensão e (b) disposição das armaduras passivas.



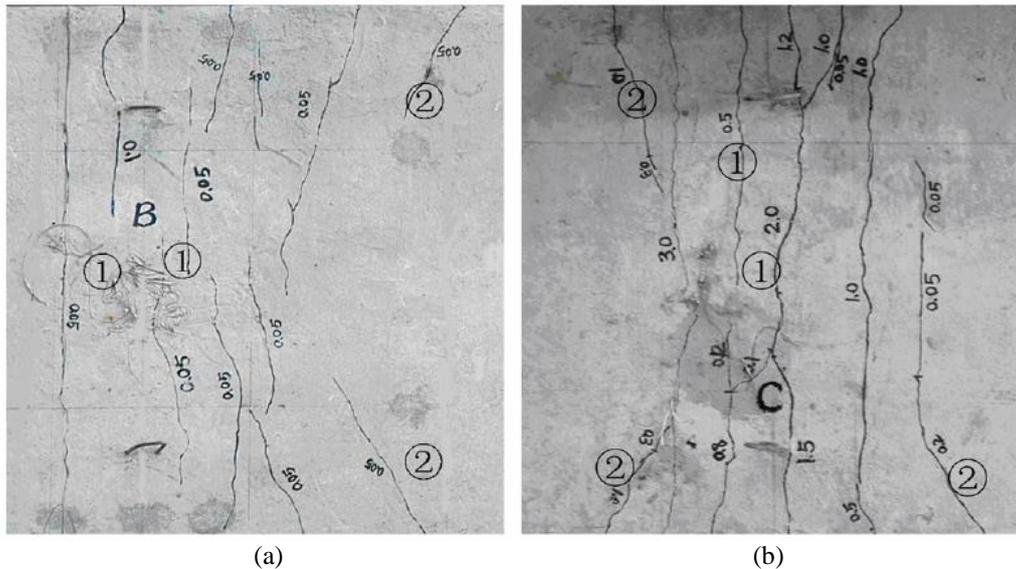
(fonte: adaptado de Aimin, Yuli e Litang, 2013)

As primeiras fissuras transversais na face superior dos apoios foram observadas com poucos minutos de ensaio. Com o aumento da temperatura, essas fissuras aumentaram e multiplicaram-se, em um padrão quase paralelo, até caracterizar o que os autores definiram como fissuras do tipo 1 (Figura 8). Além delas, outro padrão de fissuras foi observado nos apoios, com uma angulação de 45°-60°, e foram denominadas fissuras do tipo 2 (Figura 8). Segundo os autores, o surgimento das fissuras do tipo 1 e 2 é consequência da ação térmica. O aquecimento de um dos vãos provocou a redução da rigidez e o arqueamento da laje, aumentando o momento negativo nos apoios. Entretanto, a redução de rigidez do apoio foi menos significativa, causando uma redistribuição de momentos que também contribuiu para o



aumento do momento negativo nos apoios e para o surgimento de uma rótula plástica, caracterizada pela presença das fissuras do tipo 1 e 2.

Figura 8: Fissuras tipo 1 e 2 nos apoios: (a) apoio B e (b) apoio C.



(fonte: Aimin, Yuli e Litang, 2013)

O modo de falha de todas as lajes foi semelhante, com a falha ocorrendo devido à ruptura do concreto e dos cabos de protensão. A ruptura do concreto ocorreu sempre após o final do comprimento das armaduras negativas, indicando que o comprimento da armadura existente na zona de momento negativo influencia diretamente na posição da seção de ruptura. Segundo os autores, essa ruptura é caracterizada pela formação de uma rótula destrutiva, representada pela fissura do tipo 3 (Figura 9a), a qual proporciona o alívio de tensões longitudinais na laje de concreto e sugere uma ruptura por tração. Outro tipo de fissura observada foram as do tipo 4 (Figura 9b), localizadas na face superior das lajes, acima da posição dos cabos de protensão, provocadas por tensões térmicas de tração perpendiculares à trajetória dos cabos.



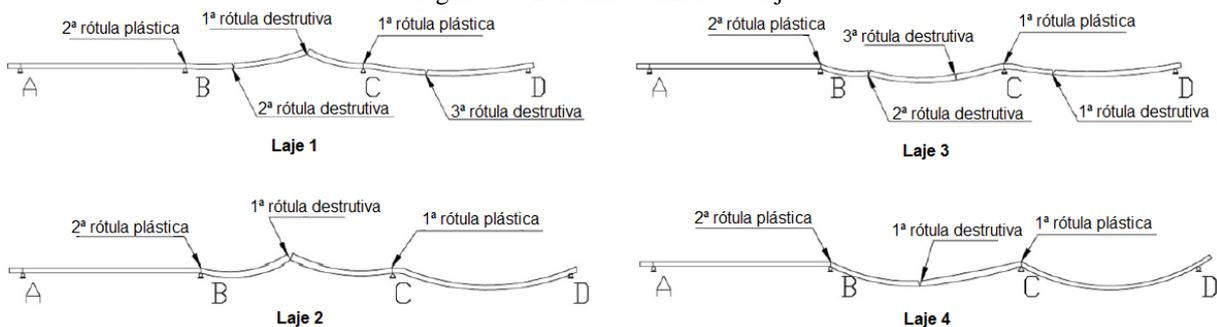
Figura 9: Fissuras típicas: (a) tipo 3 e (b) tipo 4.



(fonte: Aimin, Yuli e Litang, 2013)

As lajes 1 e 2 foram ensaiadas com o aquecimento iniciando pelo vão central, seguido por um dos vãos de extremidade, diferindo entre si apenas no comprimento da armadura negativa que era maior na laje 2. Enquanto isso, as lajes 3 e 4 começaram o aquecimento por um dos vãos de extremidade, sendo a armadura negativa mais longa na laje 4. Analisando o comportamento das lajes durante os ensaios, é possível afirmar que a sequência de aquecimento dos vãos tem forte influência na configuração da deformada final das lajes (Figura 10) e na ordem de surgimento das rótulas, enquanto o comprimento da armadura negativa influencia o deslocamento vertical e a posição, quantidade e ordem de surgimento das rótulas destrutivas.

Figura 10: Deformada final das lajes.



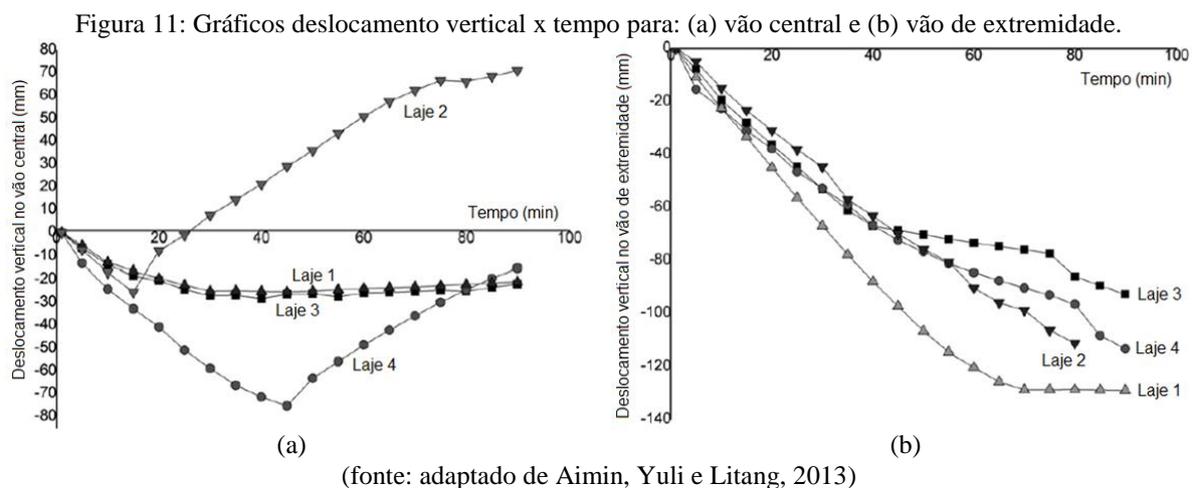
(fonte: adaptado de Aimin, Yuli e Litang, 2013)



# Especialização em Engenharia de Segurança Contra Incêndios

www.ufrgs.br/esci  
(2020)

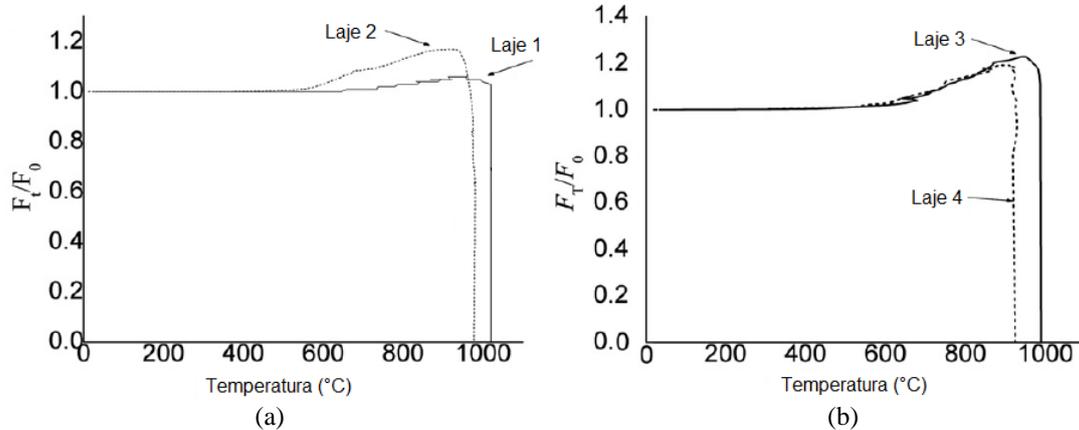
Na Figura 11a é apresentada a curva do deslocamento vertical em função do tempo para o vão central de todas as lajes ensaiadas, onde é possível visualizar um comportamento semelhante para as lajes 1 e 3, mas tendências divergentes para as lajes 2 e 4. A diferença no tempo para a mudança de sentido da deflexão é devido à sequência de aquecimento diferente entre as lajes, a qual modifica o tempo de surgimento das rótulas plásticas e da rótula destrutiva, responsável pela deflexão para cima. As curvas de deslocamento vertical em função do tempo para o vão de extremidade, apresentadas na Figura 11b, revelam a mesma tendência para todas as lajes, sendo que o deslocamento vertical ( $\delta$ ) foi maior nos casos onde o aquecimento teve início no vão central ( $\delta_1 > \delta_3$  e  $\delta_2 > \delta_4$ ). Além disso, o deslocamento vertical das lajes no vão de extremidade também parece estar relacionada à redução da força de protensão.



A Figura 12 mostra a relação entre a temperatura no forno e a força de protensão nos cabos para cada laje, onde  $F_T/F_0$  denota a variação da força de protensão na temperatura  $T$  em relação à força na temperatura ambiente ( $F_0$ ). O incremento na força de protensão na fase inicial de aquecimento devido à dilatação térmica das lajes foi de 10-20% e a queda repentina no gráfico simboliza a ruptura do cabo de protensão. O cabo da laje 3 foi capaz de absorver um aumento de tensões muito superior quando comparado à laje 1, o que ajuda a entender por que os deslocamentos verticais no vão de extremidade da laje 3 foram menores que da laje 1 (Figura 11b). No caso das lajes 2 e 4, esse fenômeno não é tão evidente pois o aumento de tensão nos cabos foi semelhante, bem como o deslocamento vertical no vão de extremidade.



Figura 12: Gráfico da força nos cabos x temperatura no forno para: (a) lajes 1 e 2 e (b) lajes 3 e 4.



(fonte: adaptado de Aimin, Yuli e Litang, 2013)

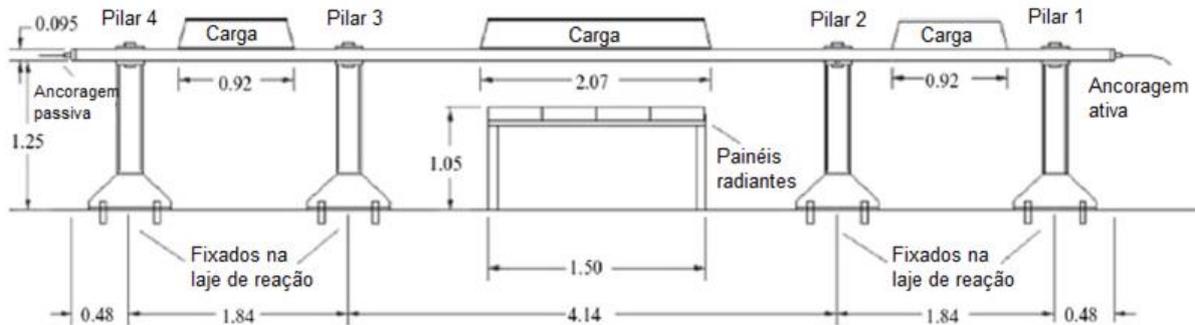
### 3.5 Gales, Hartin e Bisby (2016)

Em Gales, Hartin e Bisby (2016) foram apresentados os resultados de 3 ensaios de resistência ao fogo realizados em lajes protendidas, unidirecionais e contínuas de 3 vãos (lajes A, B e C). A fim de estudar a influência de um aquecimento localizado na resposta estrutural das lajes e investigar possíveis diferenças entre os tipos de protensão, variou-se o comprimento relativo de aquecimento dos cabos e o tipo de protensão entre aderente e não-aderente.

As lajes foram pré-fabricadas na horizontal e, após um período de cura de 6 meses, foram içadas e conectadas, através de ligações rígidas, a 4 pilares metálicos, projetados para representar a rigidez de restrição axial e à flexão que estaria presente em um edifício real. A operação de protensão dos cabos foi executada após a instalação dos pilares, permitindo a investigação de possíveis mecanismos de restrição durante o aquecimento. A configuração espacial dos experimentos é ilustrada na Figura 13 e mais informações estão disponíveis no Apêndice A deste trabalho.



Figura 13: Configuração experimental e dimensões das lajes.



(fonte: adaptado de Gales, Hartin e Bisby, 2016)

Como pode ser visto na Figura 13, apenas o vão central das lajes foi submetido ao aquecimento, simulando a exposição ao fogo de 17% do comprimento total dos cabos de protensão para as lajes A e B, e 10% para a laje C. O sistema de aquecimento utilizado nos ensaios não foi capaz de simular um aquecimento tão severo quanto o previsto pelas curvas-padrão conhecidas, e os autores não informaram qual a taxa de aquecimento adotada. Além disso, nenhuma das lajes foi ensaiada até o colapso, sendo o aquecimento interrompido quando a temperatura no cabo de protensão atingisse 350°C, para as lajes A e B, considerada a temperatura crítica pelo Eurocode 2 (EN 1992-1-2, 2004), e 427°C para a laje C, considerada a temperatura crítica pela norma americana (IBC, 2018).

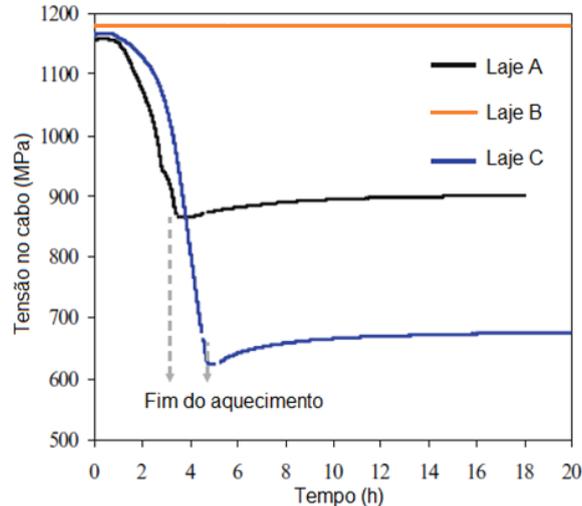
Na protensão não-aderente, a relação entre a tensão e a temperatura no cabo de aço é decisiva na ocorrência de ruptura precoce do cabo por tração. Assim, é necessário compreender todos os fenômenos relacionados à perda de tensão nos cabos em situação de incêndio, de forma a prever e evitar a ruptura precoce. Nos ensaios de Gales, Hartin e Bisby (2016), o cabo da laje B, com protensão aderente, não sofreu perda de tensão devido ao aquecimento localizado (Figura 14). Enquanto isso, nas lajes A e C, com protensão não-aderente, os cabos apresentaram uma perda de tensão considerável durante o aquecimento, resultado de uma combinação de ações térmicas e mecânicas, que incluem a dilatação térmica do aço e do concreto, o arqueamento térmico da laje, a fluência e as reduções no módulo de elasticidade do aço de protensão em altas temperaturas.



# Especialização em Engenharia de Segurança Contra Incêndios

www.ufrgs.br/esci  
(2020)

Figura 14: Tensão no cabo de protensão em função do tempo, para todas as lajes.



(fonte: adaptado de Gales, Hartin e Bisby, 2016)

Após o fim do aquecimento, observa-se uma leve recuperação de tensão nos cabos das lajes A e C, indicando uma importante parcela de perdas permanentes em razão da relaxação térmica do aço. Comparando-se as perdas de tensão ocorridas entre os cabos das lajes, conclui-se que, para proporções de comprimento aquecido menores, ocorrerá maior perda permanente de tensão devido à relaxação térmica do aço, e menor parcela recuperável de tensão após o resfriamento, devido a fluência térmica transitória do aço.

É importante destacar que os ensaios conduzidos por Gales, Hartin e Bisby (2016) foram os primeiros experimentos a tentar reproduzir a restrição axial e à flexão exercida pelos pilares na laje, cenário representativo das condições de contorno presentes em um edifício real com lajes lisas protendidas. Ao decorrer dos ensaios, foram medidas as forças de restrição atuantes em cada pilar, sendo constatado um aumento da força de restrição durante toda a fase de aquecimento das lajes (Figura 15c). As forças de restrição são geradas em função das condições de contorno nos apoios e na rigidez da estrutura, e colaboram para um melhor desempenho estrutural das lajes lisas protendidas em situação de incêndio. Entretanto, Gales, Hartin e Bisby (2016) alertam que altas forças de restrição podem aumentar a formação de fissuras no perímetro da laje e a carga de cisalhamento nos pilares, de forma que a capacidade resistente ao cisalhamento dos pilares e sua capacidade de resistir a forças laterais e axiais são indispensáveis para prevenir mecanismos de colapso progressivo.



# Especialização em Engenharia de Segurança Contra Incêndios

www.ufrgs.br/esci  
(2020)

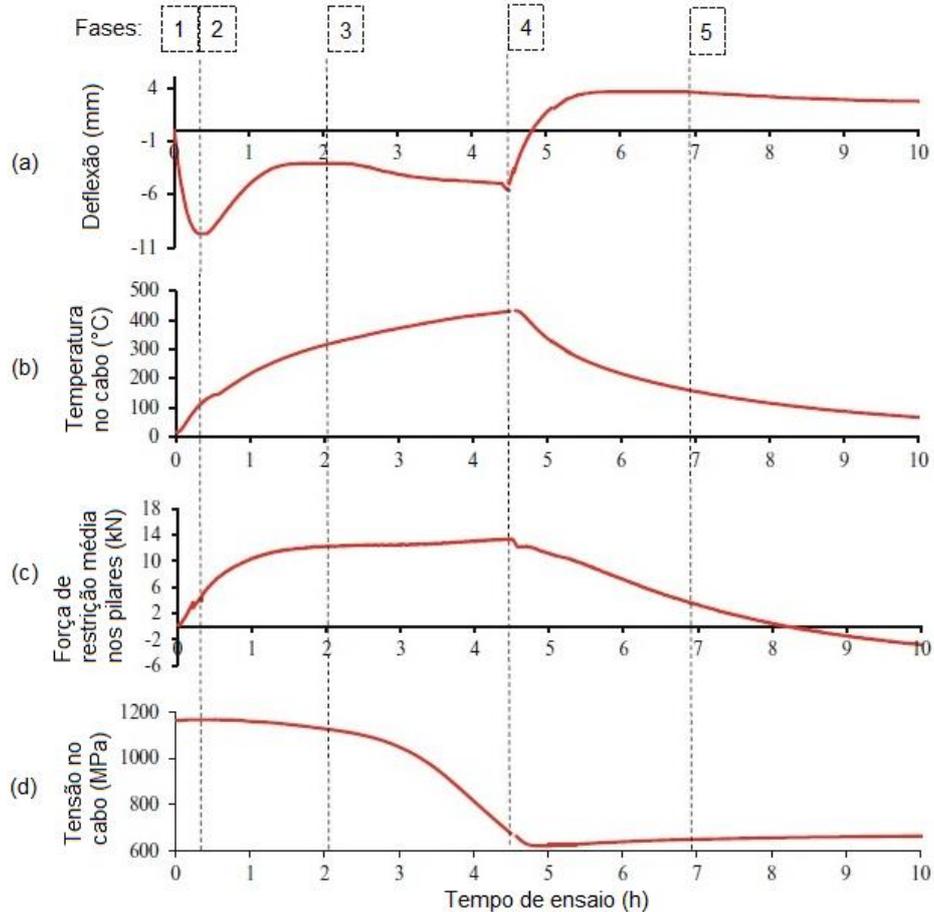
Durante os ensaios, as respostas à deflexão das lajes foram semelhantes, porém Gales, Hartin e Bisby (2016) identificaram 5 fases com tendências de deflexão distintas, marcadas pela inversão do sentido de deflexão das lajes. Como pode ser observado na Figura 15a, a fase 1 apresenta uma rápida deflexão para baixo devido ao arqueamento térmico da laje, provocado pelo aumento do gradiente térmico e a consequente dilatação térmica diferencial ao longo da espessura da laje. Além disso, na fase 1 há um pequeno aumento de tensão no cabo de protensão (Figura 15d), resultado do arqueamento e dilatação térmica da laje.

A fase 2 é marcada pela deflexão para cima devido à curvatura da laje, resultado da combinação da perda de rigidez do concreto na face aquecida com as altas tensões ainda presentes no cabo de protensão (Figura 15d), criando a tendência de um movimento ascendente. Segundo os autores, a curvatura também pode ter sido influenciada pela ocorrência de deformação térmica induzida pelo carregamento (em inglês, LITS – Load Induced Thermal Strain).

A curvatura da laje cessa quando a temperatura no cabo de protensão atinge aproximadamente 300°C (Figura 15b), iniciando a fase 3. Nessa fase, há uma pequena deflexão para baixo, resultado de uma considerável perda de tensão no cabo de protensão (Figura 15d) devido à fluência e à relaxação térmica do aço. O aquecimento foi interrompido quando o cabo de protensão atingiu a temperatura crítica, definida como 350°C para as lajes A e B, e 427°C para a laje C. As fases 4 e 5 representam o processo de resfriamento das lajes, onde nota-se o arqueamento da laje (Figura 15a), a redução na força de restrição dos pilares (Figura 15c) e a recuperação de uma pequena parcela de tensão dos cabos de protensão (Figura 15d). Não houve ruptura de cabos de protensão e, apesar do alto teor de umidade em todas as lajes (3,8 a 4,0%), apenas uma forma leve de *spalling* foi observada na laje B.



Figura 15: Comportamento da laje C durante o ensaio (semelhante às lajes A e B).



(fonte: adaptado de Gales, Hartin e Bisby, 2016)

### 3.6 Wei *et al.* (2016a) e Zhang *et al.* (2018)

Os resultados experimentais publicados por Wei *et al.* (2016a) e Zhang *et al.* (2018) fazem parte de uma mesma série de ensaios conduzidos na China, com modelos em pequena escala de lajes lisas protendidas bidirecionais, com concreto de alta resistência e apoiadas sobre 4 pilares (Figura 16). Apenas a região central das lajes foi exposta à curva-padrão de aquecimento da ISO 834 (1999), enquanto o contorno da laje e os pilares foram protegidos com fibra de lã cerâmica. A fim de investigar a influência do layout dos cabos de protensão no desempenho estrutural das lajes em situação de incêndio, o traçado dos cabos variou entre distribuído-distribuído (ou seja, distribuído nas duas direções), e distribuído-concentrado (distribuído em uma direção e concentrado na outra).



# Especialização em Engenharia de Segurança Contra Incêndios

www.ufrgs.br/esci  
(2020)

Figura 16: Visão geral de um exemplar de teste.



(fonte: Wei *et al.*, 2016a)

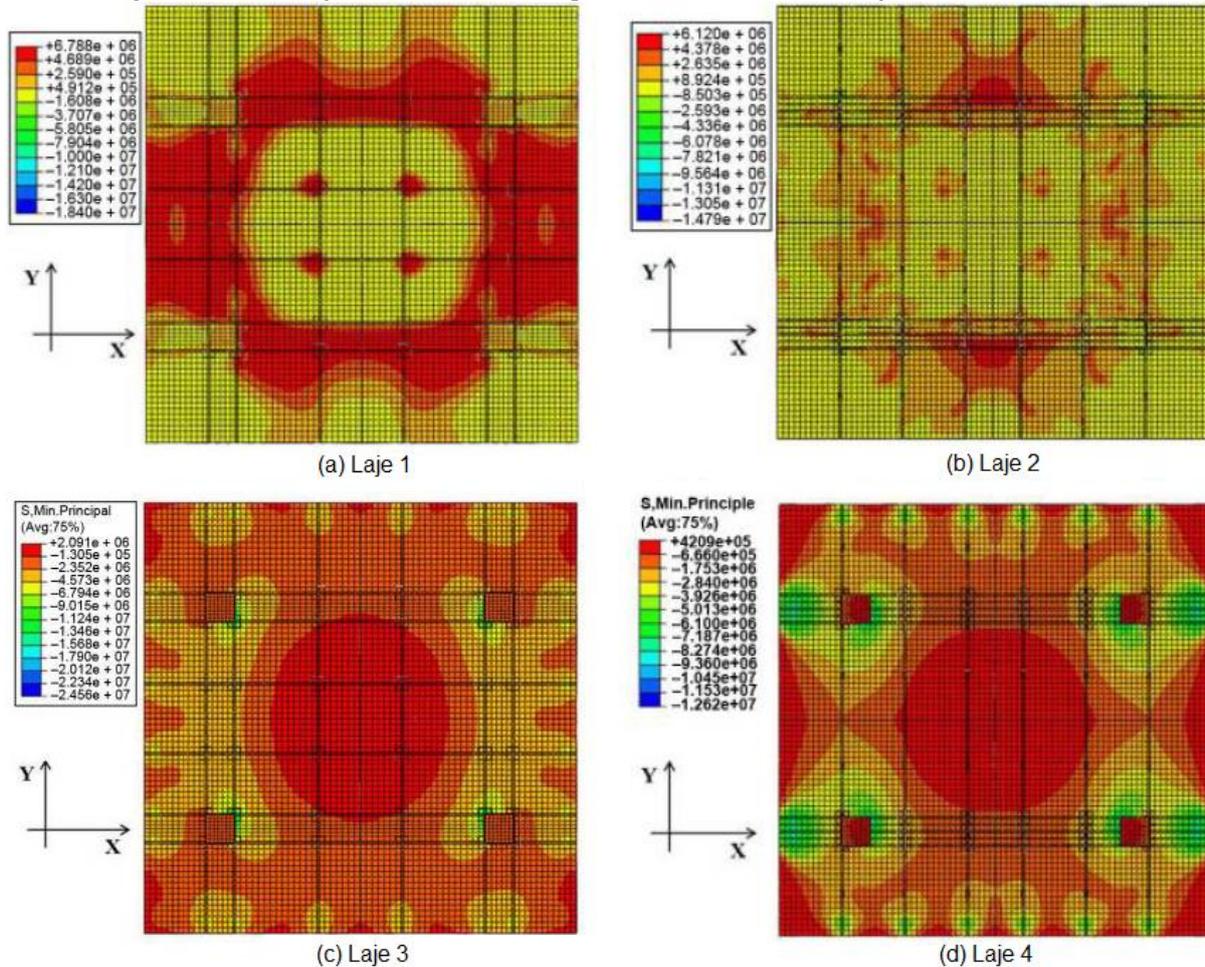
Wei *et al.* (2016a) ensaiaram 4 lajes com pós-tração não-aderente, cujas informações encontram-se no Apêndice A deste trabalho. A Figura 17 mostra a distribuição de tensões nas lajes no início do ensaio, obtida pelos autores a partir de modelagem numérica. As lajes 1 e 2 não sofreram *spalling* ou fissuração na face inferior, pois nessa região o concreto apresentava tensões de tração (em amarelo) ou baixa compressão (em vermelho), devido a restrição à dilatação térmica imposta pelo contorno não-aquecido da laje. A distribuição de tensões na laje 2 se diferencia da laje 1 devido a mudança no layout dos cabos, que provoca a concentração de tensões no eixo X. Apesar disso, o padrão de fissuração nas duas lajes foi semelhante, indicando que o layout dos cabos pouco influencia na fissuração, mas tem grande impacto na distribuição de tensões na laje.

As lajes 3 e 4 sofreram *spalling* severo, provocando o colapso prematuro dessas lajes. Na Figura 17 é possível visualizar que as lajes 3 e 4, quando comparadas às lajes 1 e 2, apresentavam tensões de compressão mais elevadas no painel central no início do ensaio, além de maior teor de umidade e maior resistência à compressão do concreto, fatores que influenciam a ocorrência do *spalling*. Na laje 3 houve a ruptura de um cabo de protensão e a área afetada pelo *spalling* correspondeu a mais da metade da área da laje. Na laje 4 houve a ocorrência de *spalling* explosivo, provocando um furo na laje, e toda a área exposta da laje foi afetada pelo *spalling*, sendo que as regiões com *spalling* mais severo coincidiram com as regiões com maiores tensões de compressão. Comparativamente, a laje 3 sofreu um *spalling*



menos severo do que a laje 4, pois as tensões de compressão eram menores, apesar do teor de umidade do concreto ser maior.

Figura 17: Distribuição das tensões de compressão na face inferior da laje no início do ensaio.



(fonte: adaptado de Wei *et al.*, 2016a)

As lajes 1 e 3 possuíam o mesmo layout de cabos (distribuído-distribuído), assim como as lajes 2 e 4 (distribuído-concentrado). Enquanto as lajes 1 e 2 não sofreram *spalling*, as lajes 3 e 4 apresentaram *spalling* severo, indicando que, para lajes com pós-tração não-aderente, o tipo de traçado dos cabos pouco influencia a ocorrência de *spalling*. Por outro lado, a magnitude das tensões de compressão na face inferior da laje tem influência direta na ocorrência e severidade do *spalling* experimentado pela laje em situação de incêndio.

O Quadro 2 reúne as principais informações sobre os experimentos realizados por Zhang *et al.* (2018). Segundo os autores, o deslocamento vertical das lajes, no início dos



# Especialização em Engenharia de Segurança Contra Incêndios

www.ufrgs.br/esci  
(2020)

ensaios, foi governado pelo aquecimento térmico, pela degradação das propriedades mecânicas dos materiais e pela relaxação térmica do aço. Após certo período, o *spalling* do concreto contribuiu para a curvatura das lajes, devido à perda de peso-próprio e redução de rigidez. Os deslocamentos verticais devido à curvatura foram maiores na laje 3, em virtude da menor rigidez das lajes com protensão não-aderente, quando comparadas às lajes com protensão aderente. Assim, segundo Zhang *et al.* (2018) pode-se concluir que lajes com protensão aderente possuem maior rigidez residual após a ocorrência de *spalling*.

Quadro 2 – Resumo dos ensaios realizados por Zhang *et al.* (2018).

Laje	Layout dos cabos	Pós-tração	Grau de protensão	Teor de umidade (%)	<i>Spalling</i>	Tempo de ensaio (min)
1	Distribuído-distribuído	Aderente	0,37	2,49	Grave	40
2	Distribuído-distribuído	Aderente	0,50	2,10	Grave	34
3	Distribuído-distribuído	Não-aderente	0,50	1,32	Moderado	90
4	Distribuído-concentrado	Aderente	0,50	2,02	Leve	120+

(fonte: elaborado pela autora)

O comportamento das lajes 1, 2 e 3 foi semelhante, com grande ocorrência de *spalling*, que reduziu a resistência ao fogo das lajes. Enquanto isso, a laje 4 apresentou *spalling* superficial, restrito ao cobrimento da armadura passiva, e sobreviveu a 120 minutos de ensaio sob carregamento constante. Após 120 minutos, manteve-se o forno a uma temperatura constante de 1.030 °C e aumentou-se a carga na laje, a qual apresentou boa ductilidade e suportou mais 30 minutos de ensaio graças a ação de membrana de tração.

Os resultados dos ensaios de Zhang *et al.* (2018) sugerem que, em lajes com pós-tração aderente, o tipo de layout dos cabos de protensão pode ter influência na ocorrência de *spalling* nas lajes. Segundo os autores, no layout distribuído-distribuído, o maior número de cabos cruzando a região aquecida da laje aumenta a probabilidade das tensões de compressão excederem a resistência à compressão do concreto (reduzida pela exposição as altas temperaturas), causando o *spalling* e comprometendo a integridade estrutural da laje. Segundo o ACI 318 (2019), em temperatura ambiente o traçado dos cabos de protensão não afeta o momento resistente e a resistência ao cisalhamento da laje. Entretanto, segundo Zhang *et al.*



# Especialização em Engenharia de Segurança Contra Incêndios

www.ufrgs.br/esci  
(2020)

(2018), em situação de incêndio, o traçado dos cabos altera a distribuição de tensões e pode causar o colapso prematuro da laje.

## 4 MODELAGEM COMPUTACIONAL

A partir dos resultados experimentais apresentados em Bailey e Ellobody (2009a,b), os autores publicaram uma série de artigos sobre modelagem computacional: Ellobody e Bailey (2008), Ellobody e Bailey (2009), Bailey e Ellobody (2009c) e Ellobody e Bailey (2011). Utilizando o método dos elementos finitos, os pesquisadores desenvolveram modelos termo-mecânicos tridimensionais para investigar o comportamento estrutural de lajes lisas protendidas em situação de incêndio, validados com os dados experimentais obtidos com faixas de lajes protendidas unidirecionais, simplesmente apoiadas e com restrição parcial à dilatação térmica. Por este motivo, os modelos apresentados em Bailey e Ellobody (2009c) e Ellobody e Bailey (2011), de lajes lisas com protensão bidirecional e apoiadas sobre pilares, não podem ser considerados confiáveis, pois não foram validados com dados de ensaios representativos das condições de contorno do modelo, ou com dados de incêndios reais ocorridos em edifícios com lajes lisas protendidas.

Em lajes com protensão não-aderente, um fator determinante no seu desempenho estrutural em situação de incêndio é a resposta à fluência transiente e à relaxação térmica do aço utilizado na protensão, pois influenciam diretamente na redução da força de protensão durante o incêndio, na força de protensão residual e podem ser decisivos para determinação dos modos de ruptura da laje. Por isso, diversas pesquisas focam no desenvolvimento de modelos computacionais capazes de prever a fluência transiente e a relaxação térmica de cordoalhas de aço quando expostas a altas temperaturas, como Gales *et al.* (2009), Gales, Bisby e Gillie (2011c) e Wei e Au (2015). Para calibrar e validar os modelos, são necessários ensaios experimentais, como os realizados por Gales, Bisby e Gillie (2011b), Gales, Bisby e Stratford (2012) e Wei *et al.* (2016b).

Nos modelos mecânicos, além da fluência transiente do aço, também é importante considerar a fluência do concreto, que acelera durante a exposição a altas temperaturas e interfere diretamente nos deslocamentos verticais. Para viabilizar a consideração correta da parcela de deformação devido à fluência térmica do concreto nos modelos mecânicos, alguns



trabalhos se dedicam a descrever modelos numéricos para tanto, como os de Wei *et al.* (2017) e Kodur, Alogla e Venkatachari (2020).

## 5 RESULTADOS

Os ensaios de resistência ao fogo, acima apresentados, contribuem para o entendimento de diversos fatores que influenciam o desempenho estrutural das lajes lisas protendidas em situação de incêndio, bem como os fenômenos que colaboram na resistência ao fogo e alguns mecanismos de ruptura. Muitos desses fatores ainda não são considerados pelas normas atuais na previsão da resistência ao fogo do elemento, mas têm impacto direto no desempenho estrutural, comprovado pelos resultados dos ensaios. Esses fatores são:

- Tipo de agregado: influencia o deslocamento vertical e a dilatação térmica da laje. Lajes com calcário como agregado graúdo apresentaram deslocamentos verticais menores do que as lajes com seixo rolado.
- Condições de apoio: influenciam o deslocamento vertical. Lajes com restrição à dilatação térmica apresentaram deslocamentos verticais menores, devido à manifestação do efeito de arqueamento (membrana compressiva).
- Distribuição de tensões: o *spalling* se manifesta mais facilmente ou mais severamente quando a face aquecida apresenta elevadas tensões de compressão ou baixas tensões de tração. Assim, conclui-se que lajes em concreto protendido são mais suscetíveis a ocorrência de *spalling* do que lajes em concreto armado, devido à limitação de tensões de tração na face inferior.
- Cobrimento: influencia a taxa de aquecimento. Cobrimentos menores proporcionam um aumento de temperatura mais rápido na seção transversal da laje, acelerando a degradação das propriedades mecânicas e a fluência térmica do aço e do concreto, que aumentam o deslocamento vertical das lajes e provocam maior perda de força de protensão.
- Nível de carregamento: lajes com maiores níveis de carregamento apresentam escoamento precoce da armadura, aumentando a deflexão da laje e a fluência térmica do aço, provocando maiores perdas de força de protensão.
- Força de protensão: lajes com maiores forças de protensão no início do aquecimento sofreram maiores perdas permanentes de tensão nos cabos, devido à fluência térmica do



# Especialização em Engenharia de Segurança Contra Incêndios

www.ufrgs.br/esci  
(2020)

aço que ocorre sob tensão e em temperaturas elevadas, provocando deformações plásticas que causam a relaxação térmica permanente do aço.

- Grau de protensão: influencia o risco de *spalling*. Lajes com maior grau de protensão são mais suscetíveis à ocorrência de *spalling*. Além disso, a extensão da área afetada pelo *spalling* é proporcional ao grau de protensão da laje.
- Armadura negativa: o comprimento da armadura negativa nos apoios influencia o deslocamento vertical das lajes e a posição da seção de ruptura. Comprimentos maiores proporcionam uma melhor redistribuição dos esforços, retardando o colapso da laje. Além disso, em diversos ensaios foi possível observar que a ruptura da laje ocorreu na próxima seção após o fim do comprimento da armadura negativa.
- Sequência de aquecimento: influencia a deformada final das lajes, que é um indício importante em uma perícia pós-incêndio para compreender a dinâmica do fogo.
- Comprimento aquecido: cabos com menores comprimentos relativos aquecidos apresentam maiores perdas permanentes de tensão devido à relaxação térmica do aço. Isso significa que cabos de protensão muito longos, se expostos a um incêndio localizado, sofrerão grandes perdas de tensão, o que pode significar o colapso do pavimento. Assim, recomenda-se limitar o comprimento dos cabos, de forma a reduzir as perdas de protensão em situação de incêndio, o que pode ser feito com a execução de nichos intermediários de protensão ao longo do comprimento da laje.
- Rigidez dos apoios: apoios mais rígidos geram maiores forças de restrição, que colaboram para um melhor desempenho estrutural das lajes lisas protendidas em situação de incêndio. Por outro lado, altas forças de restrição podem aumentar a carga de cisalhamento nos pilares e provocar o colapso do pavimento.
- Tipo de protensão: lajes com protensão não-aderente apresentam significativas perdas de tensão devido à fluência e relaxação térmica do aço. Lajes com protensão aderente não sofrem perdas de tensão e apresentam maior rigidez residual em caso de ocorrência de *spalling*.
- Layout dos cabos de protensão: influencia a distribuição de tensões na laje.



# Especialização em Engenharia de Segurança Contra Incêndios

www.ufrgs.br/esci  
(2020)

Entre os fenômenos que colaboram na resistência ao fogo das lajes lisas protendidas, destaca-se:

- Curvatura térmica: o *spalling* do concreto e a perda de rigidez da seção podem, em alguns casos, contribuir para a curvatura térmica da laje (deflexão para cima), reduzindo o deslocamento vertical, ou até mesmo resultando em um deslocamento final para cima. Isso significa que a avaliação da estabilidade estrutural de um pavimento sinistrado por incêndio, no caso das lajes lisas protendidas, não pode se basear na deflexão vertical da laje como um indicativo de integridade estrutural do sistema. Nesse caso, deve-se avaliar a integridade dos cabos de protensão, a força de protensão residual e os danos causados pelo incêndio no concreto.
- Arqueamento térmico: o efeito da membrana compressiva ocorre apenas em lajes com algum grau de restrição ao movimento horizontal e, em situação de incêndio, ajuda a reduzir os deslocamentos verticais da laje.
- Membrana de tração: as altas temperaturas induzem a ação de membrana de tração nas lajes, que consiste em um mecanismo de transferência de carga que se manifesta em lajes com grandes deslocamentos verticais e permite um aumento na capacidade resistente das lajes em situação de incêndio.

Nos ensaios, a ocorrência de *spalling* do concreto, fissuração longitudinal acima dos cabos de protensão e fissuração transversal tiveram uma incidência de 49%, 55% e 53%, respectivamente. Através das fissuras pode ocorrer o aquecimento localizado dos cabos de protensão, induzindo a ruptura precoce dos cabos. Para combater a fissuração longitudinal, recomenda-se a utilização de armadura negativa distribuída perpendicular ao traçado dos cabos. A ruptura de fios ou cabos de protensão foi observada em apenas 18% dos ensaios, sendo que 67% das rupturas ocorreram em lajes contínuas. Este resultado indica que a ruptura de cabos de protensão, em situação de incêndio, é mais provável de ocorrer em lajes contínuas, o que ajuda a compreender a baixa incidência registrada, uma vez que apenas 32% das lajes ensaiadas eram contínuas.

Em todos os casos de incêndios reais apresentados, as lajes sofreram algum nível de *spalling*, de onde se conclui que esse é um fenômeno muito provável de ocorrer em lajes lisas protendidas. Logo, basear a verificação de estruturas em concreto protendido em situação de



# Especialização em Engenharia de Segurança Contra Incêndios

www.ufrgs.br/esci  
(2020)

incêndio apenas na recomendação de cobrimentos maiores para os cabos de protensão não parece ser uma medida suficiente para garantir o desempenho adequado da estrutura, uma vez que não é considerada a possibilidade da perda do revestimento devido ao *spalling*. Além disso, em 83% dos casos apresentados, o incêndio provocou perda de tensão e/ou ruptura dos cabos de protensão, resultando em um colapso parcial ou progressivo da edificação. Assim, a perda de tensão ou a ruptura dos cabos de protensão também pode ser considerado um fenômeno de ocorrência provável em lajes lisas protendidas expostas a altas temperaturas.

Comparando-se os dados relativos à incidência de *spalling* e ruptura de cabos de protensão dos ensaios em fornos com os incêndios reais, é possível observar certa discrepância. Essa diferença se deve às limitações que os ensaios padronizados realizados em fornos possuem, à medida que não conseguem simular, de forma realista, diversos fenômenos e comportamentos observados em incêndios reais, que podem ser responsáveis pela ruptura precoce dos cabos de protensão e colapso progressivo da edificação. Por exemplo, nos ensaios em fornos, a face inferior da laje é uniformemente aquecida, enquanto que em incêndios reais é muito mais provável a ocorrência de aquecimento não-uniforme, causado por incêndios localizados, restritos a alguns compartimentos, ou incêndios que se movem ao longo do pavimento (em inglês, chamados de "travelling fires"), os quais aumentam o risco de ruptura precoce dos cabos devido ao aquecimento localizado.

Com relação às pesquisas via modelagem computacional, os modelos termo-mecânicos desenvolvidos até o momento possuem grandes limitações devido à dificuldade em considerar a ocorrência de fenômenos como *spalling* e a falha por punção da laje. Além disso, alguns modelos não podem ser considerados confiáveis, pois não foram validados com dados de ensaios compatíveis e representativos das condições de contorno do modelo, ou com dados de incêndios reais ocorridos em edifícios com lajes lisas protendidas.

## 6 CONCLUSÕES E PESQUISAS NECESSÁRIAS

Neste trabalho foram analisados os resultados experimentais de 51 ensaios de resistência ao fogo realizados em lajes lisas protendidas nos últimos 15 anos, 3 casos de incêndios reais ocorridos em edifícios com lajes lisas protendidas e 12 pesquisas desenvolvidas com modelagem computacional. Assim, buscou-se compreender os fatores que



# Especialização em Engenharia de Segurança Contra Incêndios

www.ufrgs.br/esci  
(2020)

influenciam o desempenho estrutural das lajes lisas protendidas em situação de incêndio e caracterizar o atual estado do conhecimento. A seguir, serão apresentadas as conclusões que podem ser feitas a partir dos resultados dos ensaios de resistência ao fogo, dos casos de incêndio reais e das pesquisas via modelagem computacional, além de sugestões de trabalhos futuros a serem desenvolvidos.

As conclusões a respeito dos ensaios de resistência ao fogo apresentados podem ser resumidas da seguinte forma:

- Nenhum ensaio realista foi executado até o momento, em lajes lisas, contínuas sobre múltiplos vãos, com protensão bidirecional e considerando a restrição axial e rotacional presente em edifícios reais.
- De forma geral, as lajes ensaiadas possuíam esbelteza muito reduzida e comprimentos de cabos muito curtos, características não representativas da realidade encontrada em edifícios com lajes lisas protendidas, nos quais a esbelteza da laje encontra-se entre 40 e 45, e o comprimento dos cabos depende do comprimento em planta do pavimento.
- A ocorrência de *spalling* em lajes lisas protendidas é influenciada pelo grau de protensão e pela distribuição de tensões na laje, além da resistência à compressão e teor de umidade do concreto. A utilização de armadura passiva na face inferior da laje não impede o *spalling* do concreto, mas é eficaz para limitar os danos causados.
- As deflexões das lajes em situação de incêndio são influenciadas pelo tipo de agregado, as condições de apoio, cobrimento, nível de carregamento, comprimento da armadura negativa e pela sequência de aquecimento.
- A perda da força de protensão dos cabos relaciona-se com o cobrimento da laje, o nível de carregamento, a força de protensão inicial, o comprimento relativo aquecido e o tipo de protensão.

De forma geral, as lajes com protensão aderente apresentaram um melhor desempenho estrutural em situação de incêndio, devido a maior rigidez que a injeção da calda de cimento nas bainhas proporciona. Os cabos de protensão também apresentam maior proteção térmica, reduzindo o risco de exposição direta ao fogo e a ruptura por aquecimento localizado. Em caso de ruptura, a aderência permite que a perda de tensão seja localizada, não afetando as demais regiões da laje. Além disso, os cabos não sofrem as consequências da fluência e



# Especialização em Engenharia de Segurança Contra Incêndios

www.ufrgs.br/esci  
(2020)

relaxação térmica, que causam perdas de tensão permanentes nas lajes com protensão não-aderente.

Os casos de incêndios reais apresentados permitiram avaliar vários aspectos importantes relacionados ao desempenho estrutural de lajes lisas protendidas em situação de incêndio, como as consequências de um aquecimento localizado, a ruptura dos cabos de protensão, a perda de tensão nas lajes, a ocorrência de *spalling* no concreto e mecanismos que provocaram o colapso progressivo da edificação. Entretanto, os modelos computacionais desenvolvidos até o momento falham em representar de forma realista fenômenos e comportamentos observados nos incêndios reais, e alguns modelos foram validados utilizando dados inadequados de experimentos realizados com condições de contorno não compatíveis com o modelo.

Como sugestões de trabalhos futuros a serem desenvolvidos para contribuir com a compreensão dos fatores que influenciam o desempenho estrutural de lajes lisas protendidas em situação de incêndio, tem-se:

- Estudos sobre o comportamento global de edifícios com lajes lisas protendidas em situação de incêndio, pois nesse caso, as lajes contribuem para a estabilidade global do edifício;
- Pesquisas para compreender se o layout dos cabos de protensão tem influência direta no desempenho estrutural em incêndio. Os dados disponíveis até o momento permitem concluir apenas que o layout influencia a distribuição de tensões na laje;
- Investigações para determinar se os cabos de protensão contribuem para a resistência ao funcionamento da laje em situação de incêndio;
- Modelos termo-mecânicos representativos da realidade e validados com ensaios com condições de contorno compatíveis.



# Especialização em Engenharia de Segurança Contra Incêndios

www.ufrgs.br/esci  
(2020)

## REFERÊNCIAS

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

ACI 216.1-07. **Code Requirements for Determining Fire Resistance of Concrete and Masonry Construction Assemblies**. ACI Standard, American Concrete Institute, 2007.

ACI 318-19. **Building Code Requirements for Structural Concrete**. ACI Standard, American Concrete Institute, 2019.

AIMIN, Y. YULI, D. LITANG, G. **Behavior of unbonded prestressed continuous concrete slabs with the middle and edge span subjected to fire in sequence**. Fire Safety Journal, v. 56, p. 20-29, 2013.

BAILEY, C.G. ELLOBODY, E. **Fire tests on bonded post-tensioned concrete slabs**. Engineering Structures, v. 31, p. 686-696, 2009a.

BAILEY, C.G. ELLOBODY, E. **Fire tests on unbonded post-tensioned one-way concrete slabs**. Magazine of Concrete Research, v. 61, n. 1, p. 67-76, 2009b.

BAILEY, C.G. ELLOBODY, E. **Whole-building behaviour of bonded post-tensioned concrete floor plates exposed to fire**. Engineering Structures, v. 31, p. 1800-1810, 2009c.

BARTH, F. AALAMI, B. **Controlled demolition of an unbonded post-tensioned concrete slab**. PTI special report, Post-Tensioning Institute, Phoenix, 34 pp., 1992.

ELLOBODY, E. BAILEY, C.G. **Modelling of bonded post-tensioned concrete slabs in fire**. Proceedings of the Institution of Civil Engineers – Structures & Buildings, v. 161, n. 6, p. 311-323, 2008.

ELLOBODY, E. BAILEY, C.G. **Modelling of unbonded post-tensioned concrete slabs under fire conditions**. Fire Safety Journal, v. 44, p. 159-167, 2009.

ELLOBODY, E. BAILEY, C.G. **Structural performance of a post-tensioned concrete floor during horizontally travelling fires**. Engineering Structures, v. 33, p. 1908-1917, 2011.

EN 1992-1-2. **Eurocode 2: Design of concrete structures – Part 1-2: General rules – Structural fire design**. Brussels: European Committee for Standardization, 2004.

GALES, J. BISBY, L. GILLIE, M. **Unbonded post tensioned concrete in fire: a review of data from furnace tests and real fires**. Fire Safety Journal, v. 46, p. 151-163, 2011a.



# Especialização em Engenharia de Segurança Contra Incêndios

www.ufrgs.br/esci  
(2020)

GALES, J. BISBY, L. GILLIE, M. **Unbonded post tensioned concrete slabs in fire – Part I – Experimental response of unbonded tendons under transient localized heating.** Journal of Structural Fire Engineering, v. 2, n. 3, p. 139-153, 2011b.

GALES, J. BISBY, L. GILLIE, M. **Unbonded post tensioned concrete slabs in fire – Part II – Modelling tendon response and the consequences of localized heating.** Journal of Structural Fire Engineering, v. 2, n. 3, p. 155-171, 2011c.

GALES, J. BISBY, L. MACDOUGALL, C. MACLEAN, K. **Transient high-temperature stress relaxation of prestressing tendons in unbonded construction.** Fire Safety Journal, v. 44, p. 570-579, 2009.

GALES, J. BISBY, L. STRATFORD, T. **New parameters to describe high-temperature deformation of prestressing steel determined using digital image correlation.** Structural Engineering International, v. 22, n. 4, p. 476-486, 2012.

GALES, J. HARTIN, K. BISBY, L. **Structural fire performance of contemporary post-tensioned concrete construction.** Springer Briefs in Fire, 91 pp., 2016.

HOU, X. ZHENG, W. KODUR, V. **Response of unbonded prestressed concrete continuous slabs under fire exposure.** Engineering Structures, v. 56, p. 2139-2148, 2013.

IBC. **2018 International Building Code.** International Code Council, 2018.

ISO 834-1-1999. **Fire-resistance tests – Elements of building construction – Part I: General requirement.** International Organization for Standardization (ISO), 1999.

KODUR, V. ALOGLA, S.M. VENKATACHARI, S. **Guidance for treatment of high-temperature creep in fire resistance analysis of concrete structures.** Fire Technology, in press, 2020.

LUKKUNAPRASIT, P. **Unbonded post-tensioned concrete flat plates under 5-hours of fire.** In 11th FIP congress in Hamburg, Germany, p. 61-64, 1990.

POST, N. KORMAN, R. **Implosion spares foundations.** Engineering News Record, p. 12-13, 2000.

SARKKINEN, D. **Fire damaged post-tensioned slabs.** Structure Magazine, p. 32-34, 2006.

STERN, I. **Restoration of long span plate post-tensioned with unbonded tendons – after fire.** Lecture given at the 2002 fib Congress, Osaka, Japan.

TROXELL, G.E. **Prestressed lift slabs withstand fire.** ASCE Civil Engineer, p. 64-66, 1965.



# Especialização em Engenharia de Segurança Contra Incêndios

www.ufrgs.br/esci  
(2020)

WEI, Y. AU, F.T.K. **Numerical modelling of prestressing steel tendons under fire and post-fire conditions.** Advances in Structural Engineering, v. 18, n. 10, p. 1703-1722, 2015.

WEI, Y. AU, F.T.K. LI, J. TSANG, N.C.M. **Experimental and numerical investigation of post-tensioned concrete flat slabs in fire.** Journal of Structural Fire Engineering, v. 7, n. 1, p. 2-18, 2016a.

WEI, Y. AU, F.T.K. LI, J. TSANG, N.C.M. **Effects of transient creep strain on post-tensioned concrete slabs in fire.** Magazine of Concrete Research, v. 69, n. 7, p. 337-346, 2017.

WEI, Y. ZHANG, L. AU, F.T.K. LI, J. TSANG, N.C.M. **Thermal creep and relaxation of prestressing steel.** Construction and Building Materials, v. 128, p. 118-127, 2016b.

ZHANG, L. WEI, Y. AU, F.T.K. LI, J. **Experimental study of two-way post-tensioned flat slabs in fire.** Journal of Structural Fire Engineering, v. 9, n. 3, p. 237-251, 2018.

ZHENG, W. HOU, X. **Experiment and analysis on the mechanical behaviour of PC simply-supported slabs subjected to fire.** Advances in Structural Engineering, v. 11, n. 1, 2008.

ZHENG, W.Z. HOU, X.M. SHI, D.S. XU, M.X. **Experimental study on concrete spalling in prestressed slabs subjected to fire.** Fire Safety Journal, v. 45, p. 283-297, 2010.



Apêndice A: Tabela resumo dos ensaios de resistência ao fogo em lajes lisas protendidas.

N°	Publicação	Características gerais		Características do elemento ensaiado										Dados do ensaio			Resultados / Observações								
		Descrição	Tipo de protensão	Nome	Vão (m)	Largura (m)	Espessura (mm)	Cobrimento (mm)	Restrição longitudinal?	Restrição rotacional?	Nível de carregamento <sup>1</sup>	Grau de protensão <sup>2</sup>	Armadura ativa	Armadura passiva?	Traço do concreto	Tipo de agregado	fcj (MPa)	Teor de umidade	Curva de aquecimento	Fissuração longitudinal?	Fissuração transversal?	Spalling?	Ruptura de fios/cabos?	Critério/Fim do ensaio	
1	Zheng e Hou (2008)	Lajes unidirecionais simplesmente apoiadas	Pós-tração não-aderente	UPSS-1	3,30	0,60	80	15	N	N	0,35	0,41	3f φ5	Sim, variável	1:1,41:2,74:0,42 (cimento, areia, agregado graúdo, água)	Calcário	56,9	3,98%	ISO 834	-	S	N	N	Flecha limite L/20	
2				UPSS-2							0,45	0,54	3f φ5				48,2	3,50%		S		S			
3				UPSS-3							0,52	0,70	5f φ5				56,9	3,98%		N		S			
4				UPSS-4			0,54	0,42			3f φ5	52,1	2,36%				-	N							
5				UPSS-5			0,34	0,56			3f φ5	52,0	3,29%				-	S							
6				UPSS-6			0,44	0,68			5f φ5	52,1	2,36%				-	N							
7				UPSS-7			0,43	0,42			2f φ5	52,0	3,29%				-	N							
8				UPSS-8			0,52	0,56			4f φ5	47,3	3,49%				-	S							
9				UPSS-9			0,36	0,72			5f φ5	22,8	1,83%				-	N							
10				Pré-tração aderente	PSS-1	90	25	0,35	0,55	3f φ5	41,3	2,67%	-	S											
11	Bailey e Ellobody (2009a)	Lajes unidirecionais simplesmente apoiadas	Pós-tração aderente	TB3	4,00	1,60	160	34	N	N	0,60	-	3c φ15,7	Não	-	Calcário	36,6	1,19%	ISO 834	S	N	N	N	400°C nos cabos	
12				TB4													40,9	1,93%			S	N			
13				TB7													40,4	2,43%			N	N			
14				TB8													42,3	1,84%			S	S			
15				TB5													35,5	1,07%			N	S			
16				TB6													38,6	2,50%			S	S			
17				TB9													36,9	2,27%			N	S			
18				TB10													39,3	2,18%			S	S			
19	Bailey e Ellobody (2009b)	Lajes unidirecionais simplesmente apoiadas	Pós-tração não-aderente	T3	4,0	1,6	160	34	N	N	0,65	-	3c φ15,7	Não	-	Calcário	48,0	2,54%	ISO 834	S	S	N	S	Colapso	
20				T4													41,0	2,15%			N	S	N		
21				T5													40,0	2,34%			N	N	N		
22				T6													39,7	1,70%			S	N	N		
23	Zheng et al. (2010)	Lajes unidirecionais simplesmente apoiadas	Pós-tração não-aderente	UPSA-1	3,30	0,60	95	15	N	N	Apenas o peso próprio	-	-	-	-	-	40,9	2,77%	ISO 834	-	-	N	N	-	
24				UPSA-2													40,9	2,77%			-	S	S	Colapso	
25				UPSA-3													47,3	3,49%			-	N	N	-	
26				UPSA-4													22,8	1,83%			-	N	N	-	
27				UPSA-5													48,2	3,50%			-	S	S	N	-
28		Repete as lajes contínuas em Hou, Zheng e Kodur (2013)	Lajes unidirecionais contínuas (2 vãos)	Pós-tração não-aderente	UPCS-1	2x 2,55	0,60	70	15	N	N	-	-	-	-	-	-	56,9	3,98%	ISO 834	-	-	N	N	-
29					UPCS-2													56,9	3,98%			-	N	N	-
30					UPCS-3													48,2	3,50%			-	S	S	-
31					UPCS-4													40,1	2,77%			-	N	N	-
32					UPCS-5													52,1	2,36%			-	N	N	-
33	UPCS-6	48,2	3,50%	-	S	S	Colapso																		
34	UPCS-7	52,1	2,36%	-	N	N	-																		
35	UPCS-8	52	3,29%	-	N	N	-																		
36	UPCS-9	52	3,29%	-	S	S	N	-																	
37	Aimin, Yuli e Litang (2013)	Lajes unidirecionais contínuas (3 vãos)	Pós-tração não-aderente	1	3,9 + 4,2 + 3,9	1,50	120	22	N	N	-	-	1c φ15,24	Sim	1:1,55:2,33:0,38:0,012 (cimento, areia, agregado graúdo, água, aditivo redutor de água)	Seixo rolado	48,6	-	ISO 834	S	S	S	N	N	100 minutos
38				2													58	-			S	S	Colapso		
39				3													51,6	-			N	N	100 minutos		
40				4													55,8	-			N	N			
41	Gales, Hartin e Bisby (2016)	Lajes unidirecionais contínuas (3 vãos)	Não-aderente	A	1,84 +	0,48	95	35	S	S	-	-	1c φ12,5	Sim	-	Seixo rolado	50	4,00%	Não padronizado	N	S	N	N	350°C nos cabos	
42			Aderente	B	4,14 +													3,90%		S		S			
43			Não-aderente	C	1,84													3,80%		N		N		427° nos cabos	
44	Wei et al. (2016)	Modelo em pequena escala, laje apoiada em 4 pilares	Pós-tração não-aderente	1	Lajes bidirecionais com 3,1 x 3,1 m	95	21,5	S	S	-	-	-	-	-	-	-	76,6	2,27%	ISO 834	S	-	N	N	350°C nos cabos	
45				2													75,6	2,36%			N	N	120 min		
46				3													79,5	2,62%			S	S	Colapso		
47				4													81,4	2,52%			S	N	Colapso		
48	Zhang et al. (2018)	Modelo em pequena escala, laje apoiada em 4 pilares	Aderente	1	Lajes bidirecionais com 3,1 x 3,1 m	95	10	S	S	-	-	-	-	-	-	-	53,9	2,49%	ISO 834	S	-	S	N	Colapso	
49			Aderente	2													53,0	2,10%							
50			Não-aderente	3													57,8	1,32%							
51			Aderente	4													53,2	2,02%							

Observações:

<sup>(1)</sup> Nível de carregamento: é definido como a relação entre o carregamento aplicado e a capacidade da laje, em temperatura ambiente.

<sup>(2)</sup> Grau de protensão: relação entre a seção transversal da armadura de protensão existente e a seção total (ativa + passiva), cada uma multiplicada pela respectiva resistência à tração:  $k_p = \frac{A_p \cdot f_{pyk}}{A_p \cdot f_{pyk} + A_s \cdot f_{syk}}$

<sup>(3)</sup> EGAF = escória granulada de alto forno