

EFEITOS DA TEMPERATURA EM VIGAS DE CONCRETO ARMADO

Taienne Winni Paiz Ecker¹

Arthur Rosinski do Nascimento²

José Luiz Miotto³

Rafael Alves de Souza⁴

RESUMO

Os efeitos provocados pela ação da temperatura são extremamente importantes e devem ser considerados no projeto, principalmente se tratando de estruturas hiperestáticas. A variação da temperatura provoca deformações e tensões térmicas que podem gerar esforços adicionais na estrutura. Se esses esforços não forem considerados podem acarretar em problemas na estrutura, como o aparecimento de fissuras. Com um caráter didático, este artigo tem como intuito contribuir com o entendimento do efeito da variação da temperatura em vigas de concreto armado através de algumas simulações realizadas com o auxílio da ferramenta computacional Ftool. Demonstra-se que em estruturas isostáticas esses efeitos provocam apenas deformações, mas que em estruturas hiperestáticas geram também tensões térmicas devido às restrições de deformações impostas pelos apoios. Para as simulações foi considerado uma temperatura de 45°C na face superior da viga e 25°C na face inferior, tendo uma variação de 20°C ao longo da altura adotada para a viga.

Palavras-chave: Variação de temperatura. Vigas de concreto armado. Deformação térmica. Tensão térmica.

¹ Mestranda, Universidade Estadual de Maringá-UEM, Programa de Pós-graduação em Engenharia Civil-PCV, tainenewpe@gmail.com

² Mestrando, Universidade Estadual de Maringá-UEM, Programa de Pós-graduação em Engenharia Civil-PCV, arnascimento@live.com

³ Prof. Dr., Universidade Estadual de Maringá-UEM, Departamento de Engenharia Civil

⁴ Prof. Dr., Universidade Estadual de Maringá-UEM, Departamento de Engenharia Civil

1. INTRODUÇÃO

A ação térmica no concreto armado, além de reduzir as propriedades mecânicas dos materiais, gera deformações e/ou tensões térmicas que provocam esforços solicitantes adicionais.

Em estruturas isostáticas a variação de temperatura provoca deslocamentos sem provocar esforços adicionais. No entanto, isso não ocorre em estruturas estaticamente indeterminadas, pois as deformações são restrinvidas pelos apoios, gerando esforços que devem ser considerados.

Deve-se ressaltar também que esses esforços quando não são considerados podem resultar em problemas na estrutura, como por exemplo o aparecimento de fissuras.

Esse artigo apresenta uma breve revisão literária a respeito dos tipos de transferência de calor, dos problemas estruturais devido à variação de temperatura, como as fissuras, e do efeito da temperatura nas estruturas de concreto armado, especificamente as vigas. Também são realizadas simulações em vigas estaticamente determinadas e indeterminadas com variação não-uniforme de temperatura com o auxílio do programa Ftool. Com isso, espera-se contribuir com o entendimento acadêmico, mostrando que os resultados simulados correspondem com os resultados analíticos.

2. EFEITOS TÉRMICOS EM VIGAS DE CONCRETO ARMADO

O principal efeito da ação térmica no concreto armado é a redução das propriedades mecânicas dos seus materiais, como a resistência característica e o módulo de elasticidade do aço e do concreto.

2.1. Transferência de calor

Segundo Aurich (2008), a transferência de calor consiste no trânsito de energia térmica provocado por uma diferença de temperatura e pode ocorrer por três processos: condução, convecção e radiação térmica. A condução é a transferência de calor que ocorre num meio estacionário, que pode ser um sólido ou um fluido, quando existe um gradiente de temperatura. A convecção é a transferência de calor que ocorre entre uma superfície e um fluido em movimento, quando há diferença de temperatura entre eles. Já a radiação térmica ocorre quando todas as superfícies numa temperatura finita emitem energia na forma de ondas eletromagnéticas (AURICH, 2008).

A distribuição das temperaturas em um corpo qualquer é controlada apenas pelos processos de condução e convecção, não sendo possível isolar completamente um processo da influência do outro. Entretanto, para simplificar a análise térmica, é usual a separação desses processos, não implicando em erros significativos (AURICH, 2008).

Thomaz (1989) considera o sol como a fonte de calor mais comum que atua das edificações. A amplitude e a taxa de variação da temperatura de um componente exposto à radiação solar depende da atuação combinada de alguns fatores, como a intensidade da radiação solar, a absorvância da superfície à radiação solar, a condutância térmica superficial e as propriedades térmicas do material.

2.2. Mecanismo de formação de fissuras

De acordo com Thomaz (1989), os movimentos de dilatação e contração devido as variações de temperatura são restrinvidos pelos diversos vínculos que envolvem os elementos e componentes, desenvolvendo nos materiais tensões que podem provocar o aparecimento de fissuras.

As movimentações térmicas de um material estão relacionadas com as propriedades físicas do mesmo e com a intensidade da variação da temperatura, sendo que a magnitude das tensões desenvolvidas é função da intensidade da movimentação, do grau de restrição imposto pelos vínculos a esta movimentação e das propriedades elásticas do material (THOMAZ, 1989).

A movimentação térmica das vigas pode provocar fissuração aparente nas extremidades dos pilares, principalmente quando a estrutura não possui juntas de dilatação ou quando as mesmas foram mal projetadas, como pode ser observado na Figura 1 (THOMAZ, 1989).

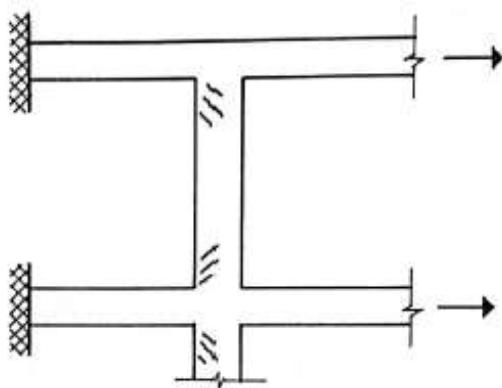


Figura 1 – Pilar fissurado devido à movimentação térmica das vigas de concreto armado

Fonte: Thomaz – 1999.

2.3. Variações na temperatura

Os elementos e componentes de uma construção estão sujeitos a variações de temperatura, diárias e sazonais, que repercutem numa variação dimensional dos materiais de construção (THOMAZ, 1989).

Azkune, Puente e Insausti (2007) definem a variação da temperatura ambiente como o fator chave para a redistribuição de carga na estrutura, principalmente durante a construção.

A ABNT NBR 6118:2014 trata as variações de temperatura como ações variáveis indiretas. Essa variações podem ser uniforme, quando são causadas globalmente pela variação da temperatura da atmosfera e pela insolação direta, e não uniformes, quando a distribuição da temperatura é significativamente diferente da uniforme.

Para efeito de análise estrutural, a ABNT NBR 6118:2014 admite o coeficiente de dilatação térmica do concreto e do aço como sendo $10^{-5}/^{\circ}\text{C}$. No caso do aço de armadura ativa, esse coeficiente só pode ser considerado para intervalos de temperatura entre -20°C e 100°C , e para o aço de armadura passiva esse intervalo fica entre -20°C e 150°C .

De maneira geral, a variação de temperatura é um tipo de solicitação externa que é caracterizada por provocar deformações iniciais. No caso de estruturas isostáticas, essas deformações provocadas por temperatura não sofrem qualquer tipo de restrição, se houver espaço para a dilatação térmica, e por isso não provocam esforços internos na estrutura. Por outro lado, uma estrutura hiperestática pode ter tensões internas devido a variação de temperatura (MARTHA, 2010).

Variações na temperatura produzem expansão ou contração de materiais estruturais, resultando em deformações térmicas e tensões térmicas. A relação entre a expansão ou contração do material e o aumento ou redução da temperatura normalmente é linear. Para a maioria dos materiais estruturais, a

deformação térmica é proporcional à diferença de temperatura, conforme Equação (1) (GERE, 2003; HIBBELER, 2004).

$$\varepsilon_t = \alpha(\Delta T) \quad (1)$$

em que: ε_t : deformação térmica;
 α : coeficiente de expansão térmica do material;
 ΔT : variação da temperatura.

A mudança no comprimento de um elemento estaticamente determinado pode ser calculada diretamente pela Equação (2), visto que o elemento está livre para se expandir ou contrair quando sofre mudança na temperatura (HIBBELER, 2004).

$$\delta_t = \alpha(\Delta T)L \quad (2)$$

em que: δ_t : variação no comprimento;
 L : comprimento inicial.

Se uma viga é suportada de tal maneira que a expansão longitudinal é livre pra ocorrer, então a variação de temperatura uniforme não irá produzir tensões na viga e também não haverá deflexões laterais nessa viga, porque não há tendência para a viga fletir (GERE, 2003). Contudo, quando o elemento é estaticamente indeterminado, esses deslocamentos térmicos podem ser restringidos pelos apoios, produzindo tensões térmicas que devem ser consideradas (HIBBELER, 2004).

O comportamento de uma viga é bastante diferente se a temperatura não é constante através de sua altura. Assume-se para essa variação de temperatura não-uniforme um comportamento linear entre o topo e a base da viga. Se a viga é livre para se expandir longitudinalmente, a variação do comprimento é dada pela Equação (3) (GERE, 2003).

$$\delta_t = \alpha \left(\frac{T_1 + T_2}{2} - T_0 \right) L \quad (3)$$

em que: T_1 : temperatura superior da viga;
 T_2 : temperatura inferior da viga;
 T_0 : é a temperatura inicial da viga.

No entanto, quando a expansão longitudinal é restrinida, mas a viga é livre para girar e defletir, aplica-se uma equação diferencial da curva de deflexão, conforme a Equação (4).

$$\frac{d^2v}{dx^2} = \frac{\alpha(T_1 - T_2)}{h} \quad (4)$$

em que: h : altura da viga

Para o caso de uma viga engastada, como exemplificada na Figura 2, Gere (2003) se utiliza das Equações (5) e (6) para determinar a deflexão e o ângulo de rotação na extremidade livre da viga devido a variação não-uniforme de temperatura.



Figura 2 – Viga engastada sob ação de variação não-uniforme de temperatura

Fonte: Gere – 2003.

$$(\delta_B)_1 = \frac{\alpha (T_2 - T_1)L^2}{2h} \quad (5)$$

$$(\theta_B)_1 = \frac{\alpha (T_2 - T_1)L}{h} \quad (6)$$

Segundo Gere (2003), quando a viga for restringida contra expansão longitudinal ou deflexão lateral, ou quando as variações de temperatura não variam linearmente do topo para a base da viga, tensões internas se desenvolvem devido a ação da temperatura, exigindo o uso de métodos mais avançados de análise.

Sussekkind (1980) se utiliza do teorema dos trabalhos virtuais e calcula as deformações em estruturas hiperestáticas devidas à variação de temperatura conforme a Equação (7).

$$\bar{P}\delta = \int_l \bar{N}at_g ds + \int_l \bar{M} \frac{\alpha \Delta t}{h} ds \quad (7)$$

em que: t_g : temperatura no centro de gravidade da viga;
 \bar{N} e \bar{M} : esforços gerados pela força unitária aplicada.

2.4. Simulação de vigas submetidas a variação não-uniforme de temperatura

Foram realizadas simulações no programa Ftool de vigas de concreto armado com diferentes tipos de apoio sob ação da variação não-uniforme de temperatura. Adotou-se para as vigas 15cm de largura, 40cm de altura e 5m de comprimento com módulo de elasticidade $E=25\text{GPa}$ e coeficiente de dilatação térmica $\alpha=10^{-5}/^\circ\text{C}$. Para o caso de vigas que formam pórticos, considerou-se os pilares com seção 15cm x 30cm e 3m de altura. Considerou-se uma temperatura de 45°C na face superior da viga e 25°C na face inferior.

2.4.1. Vigas estaticamente determinadas

Para as vigas estaticamente determinadas não ocorrem esforços internos devido à variação de temperatura, desde que haja espaço para a deformação da viga. A Figura 3 mostra o esquema estrutural das vigas analisadas com seus respectivos diagramas de deformação.

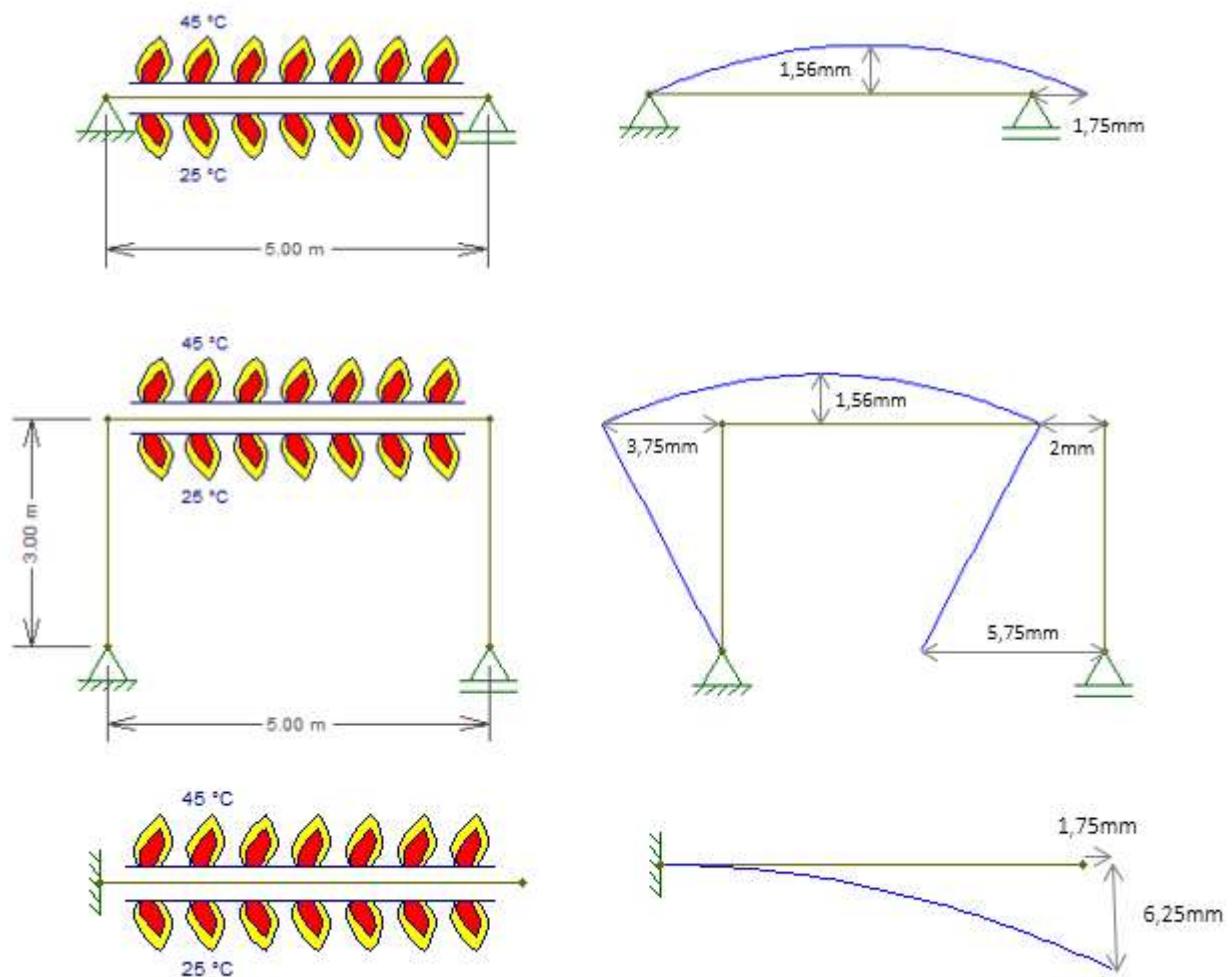


Figura 3 – Esquema estrutural e diagrama de deformações de vigas estaticamente determinadas com variação não-uniforme de temperatura

Fonte: Os Autores – 2016.

A variação no comprimento das vigas acima pode ser verificada através da aplicação da Equação (3), como pode ser observado a seguir.

$$\delta_t = 10^{-5} \left(\frac{45+25}{2} \right) 5 = 1,75 \times 10^{-3} m = 1,75 mm \quad (8)$$

A flecha pode ser verificada com base na Equação (4), como apresentado a seguir.

$$v = \frac{0,00001 (45-25)}{0,4} \cdot \frac{x^2}{2} \quad (9)$$

em $x=2,5m$ tem-se:

$$v = 0,00156 m = 1,56 mm \quad (10)$$

Utilizando a Equação (5) a deflexão da viga engastada é verificada, como mostrado a seguir.

$$(\delta_B)_1 = \frac{0,00001 (45-25) 5^2}{2,0,4} = 0,00625m = 6,25mm \quad (11)$$

2.4.2. Vigas estaticamente indeterminadas

Vigas estaticamente indeterminadas com variação de temperatura sofrem esforços internos, que podem ser determinados através da aplicação do princípio dos trabalhos virtuais, exemplificado por Martha (2010), ou pelo método de superposição citado por Gere (2003).

a) Viga biengastada

A viga biengastada sob ação da variação não-uniforme de temperatura não sofre deformações, pois os vínculos estruturais impedem a movimentação da viga e por isso desenvolve-se tensões térmicas internas. Não são observadas reações verticais, mas existem esforços normais e momento fletor atuantes na viga, como pode ser observado na Figura 4. A reação de momento fletor ocorre pois a variação de temperatura é não-uniforme.

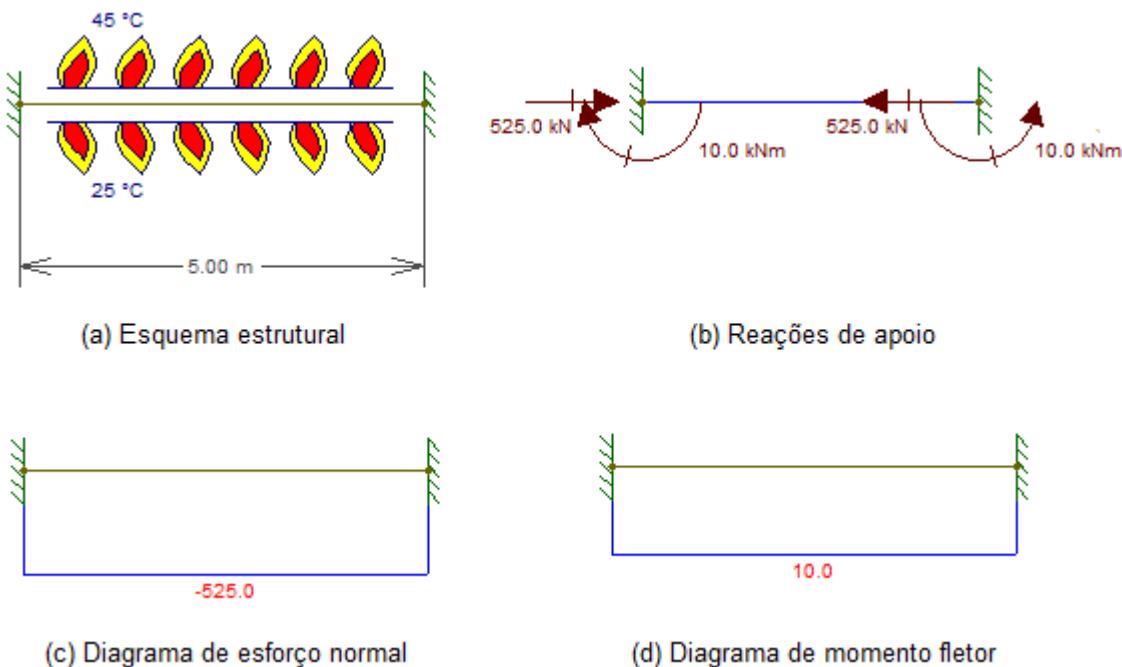


Figura 4 – Esquema estrutural e diagrama de esforços em uma viga biengastada com variação não-uniforme de temperatura

Fonte: Os Autores – 2016.

b) Viga biapoiada

A viga biapoiada hiperestática sob ação da variação não-uniforme de temperatura sofre deformações e tensões térmicas internas originadas pelos esforços normais que atuam na viga,

conforme Figura 5. Observa-se que a viga biengastada e a viga biapoiada apresentam os mesmos esforços normais.

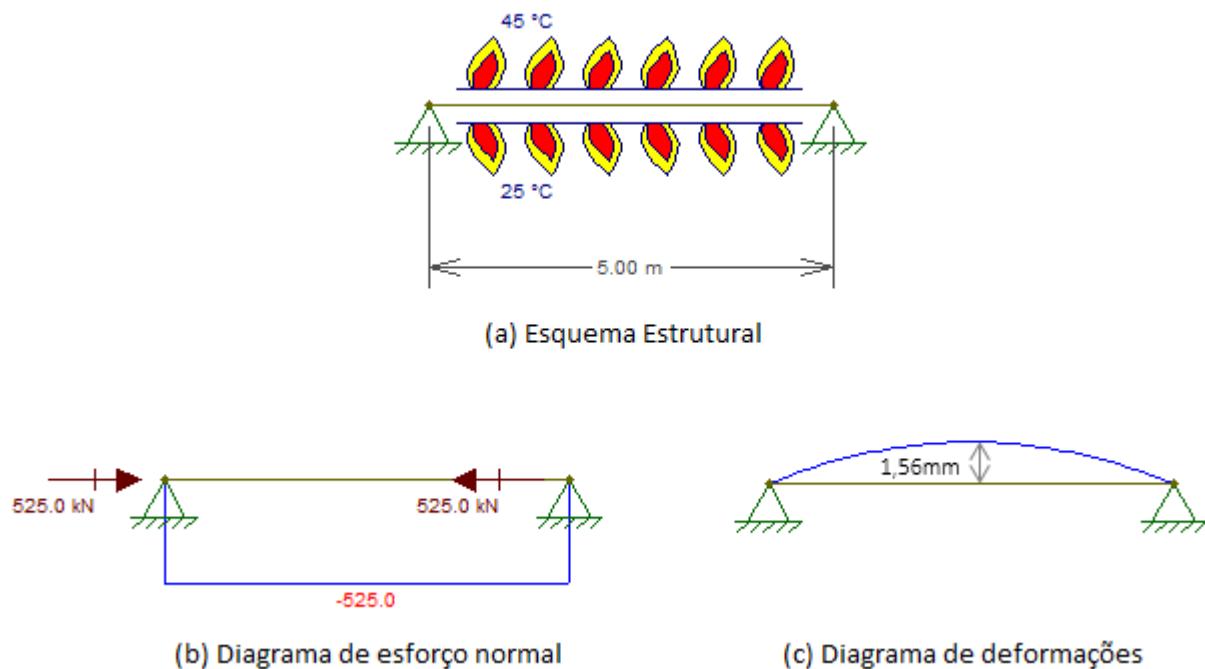


Figura 5 – Esquema estrutural, diagrama de esforço normal e deformações em uma viga biapoiada hiperestática com variação não-uniforme de temperatura

Fonte: Os Autores – 2016.

c) Viga contínua

A viga contínua simulada não apresentou esforços normais, mas apresentou esforços cortantes e momento fletor, além de uma deformação longitudinal e deflexões ao longo de seu comprimento, como pode ser observado nas Figura 6.

Pode-se notar que a deformação longitudinal ocorreu pois o apoio da extremidade, por ser um apoio móvel, impede apenas a movimentação na direção normal ao plano de apoio, deixando a viga livre pra se deformar longitudinalmente. Essa deformação foi proporcional a deformação longitudinal das vigas estaticamente determinadas.

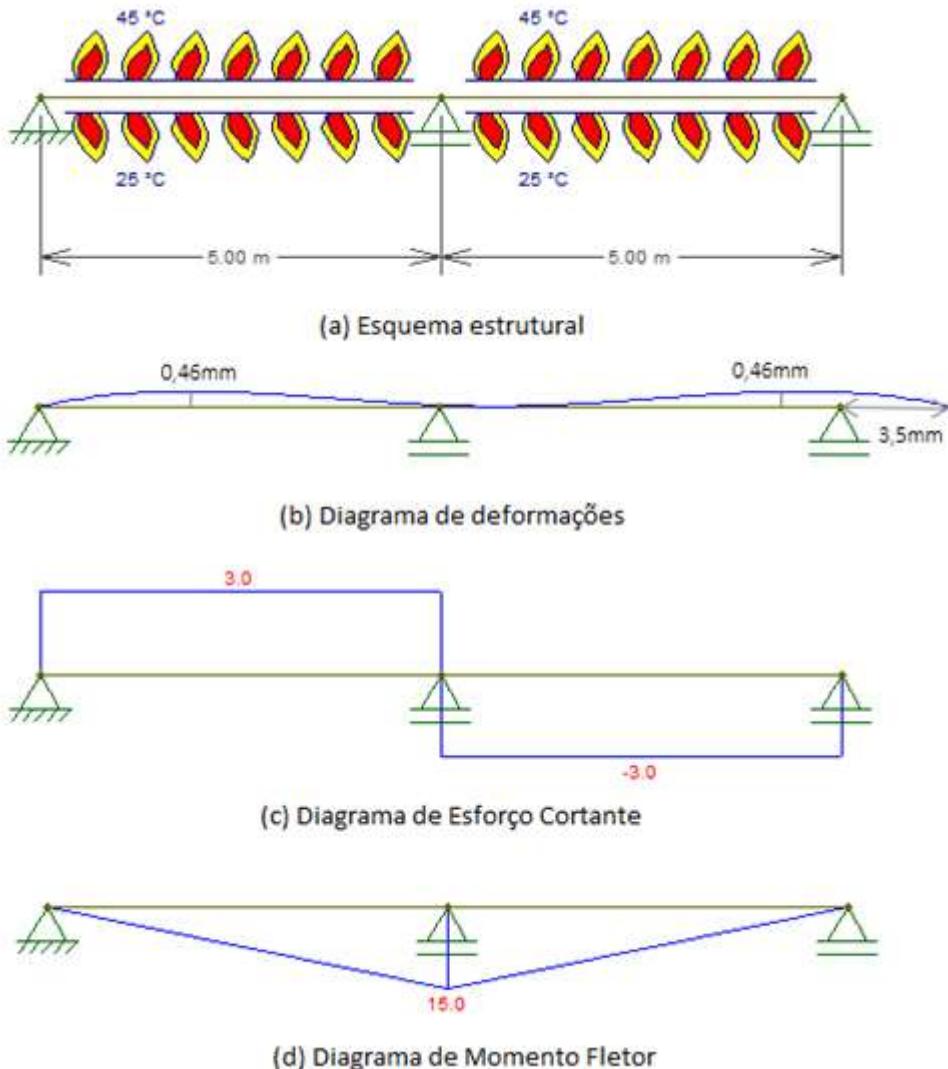


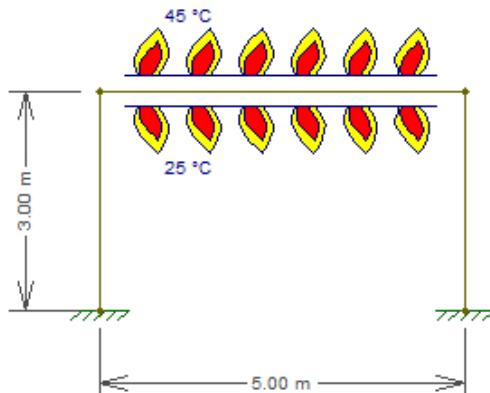
Figura 6 – Esquema estrutural, diagramas de esforços e deformações em uma viga contínua com variação não-uniforme de temperatura

Fonte: Os Autores – 2016.

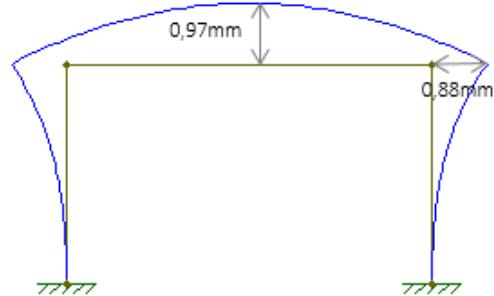
d) Pórtico biengastado

Em vigas que formam pórticos e possuem apoios engastados, o efeito da variação da temperatura são deformações e tensões térmicas originadas pelos esforços normais e de momento fletor que atuam na viga, como indicado na Figura 7.

A deformação longitudinal foi proporcional as das vigas estaticamente determinadas. Nota-se que o esforço normal da viga que compõe o pórtico biengastado é baixo em comparação com o das outras vigas estaticamente indeterminadas simuladas, isso porque a rigidez a flexão do pilar é baixa. Se fosse maior, os deslocamentos seriam mais restringidos, aumentando-se os esforços internos.



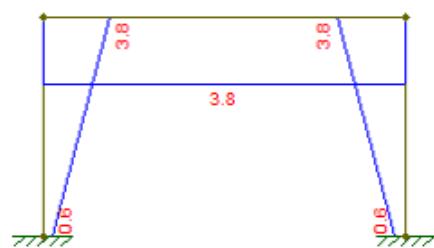
(a) Esquema estrutural



(b) Diagrama de deformações



(c) Diagrama de esforço normal



(d) Diagrama de momento fletor

Figura 7 – Esquema estrutural, diagramas de esforços e deformações em um pórtico biengastado com variação não-uniforme de temperatura

Fonte: Os Autores – 2016.

3. CONCLUSÃO

É de suma importância considerar os efeitos térmicos nas estruturas, principalmente quando estas forem estaticamente indeterminadas, para evitar possíveis fissuras ou outros problemas que podem surgir.

Com as simulações realizadas no Ftool, foi possível verificar o que afirmam diversos autores. Nas vigas isostáticas sob a variação não-uniforme de temperatura, nota-se que ocorrem deformações longitudinais e deflexões sem implicar em esforços internos. Já o mesmo não ocorre para as vigas estaticamente indeterminadas, pois os apoios restringem as deformações e com isso tensões térmicas ocorrem.

Observou-se que das vigas simuladas, a única que não sofreu deformação foi a viga biengastada, mas a mesma apresentou elevados valores de momento fletor e esforço normal. Também notou-se que as vigas que estavam livre para se deformar longitudinalmente, apresentaram a mesma variação de comprimento, que foi de 1,75mm para 5m de viga com uma variação de temperatura de 20°C.

Portanto, torna-se primordial a consideração dos efeitos de temperatura nos projetos estruturais, pois estes geram deformações e esforços adicionais que, se ignorados, podem ocasionar diversas patologias na edificação. As tensões térmicas normais provocam o aparecimento de fissuras quando a resistência a tração do concreto for ultrapassada, ou, se já existirem, suas aberturas serão aumentadas, podendo ultrapassar os limites estabelecidos por norma.

REFERÊNCIAS

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **ABNT NBR 6118**: Projeto de Estruturas de Concreto – Procedimentos. 3ed. Rio de Janeiro, 2014.

AURICH, M. **Simulação computacional do comportamento do concreto nas primeiras idades**. Tese (Doutorado em Engenharia de Estruturas) – Universidade de São Paulo, São Paulo, 2008.

AZKUNE, M. PUENTE, I. INSAUSTI, A. Effect of ambient temperature on the redistribution of loads during construction of multi-storey concrete structures. **Engineering Structures**. Science Direct. San Sebastian: Elsevier, 2007.

GERE, J.M. **Mecânica dos Materiais**. São Paulo: Pioneira Thomson Learning, 2003.

HIBBELER, R. C. **Resitência dos Materiais**. 5ed. São Paulo: Pearson Prentice Hall, 2004.

MARTHA, L. F. **Análise de Estruturas** – Conceitos e métodos básicos. Elsevier, 2010.

SUSSEKIND, J. C. **Curso de Análise Estrutural**. Vol II. 4ed. Porto Alegre: Globo, 1980.

THOMAZ, E. **Trincas em Edifícios** – Causas, prevenção e recuperação. Pini, 1989.