

FISSURAS EM PAREDES DE ALVENARIA ESTRUTURAL SOB LAJES DE COBERTURA DE EDIFÍCIOS

Márcio Roberto Silva Corrêa¹ & Marcio Antonio Ramalho²

Resumo

Uma das patologias mais comuns em paredes de alvenaria é o estado de fissuração que ocorre logo abaixo da laje de cobertura. A ocorrência está relacionada, de forma preponderante, com a dilatação da laje por efeitos térmicos. Este trabalho trata exatamente desse tema levando em conta as diferentes características do fenômeno. Tipos de fissuras são apresentados, inclusive com discussão sobre as suas causas e modelos teóricos simples para avaliar as tensões de cisalhamento nas paredes devidas às ações térmicas. Por fim, são discutidas algumas possíveis soluções para o problema, no que se refere a providências de natureza estrutural e de isolamento térmico da laje de cobertura.

Palavras-chave: Alvenaria. Fissuração. Efeitos térmicos.

WALL CRACKING UNDER BUILDING ROOFS

Abstract

One of the most common masonry wall pathologies is cracking just under the roof slab. This effect is caused mainly by temperature variations in the slab dimensions. This paper discusses the subject, taking into account different influences of the phenomenon. Cracking patterns are presented, including a discussion on their particular causes, as well as simple theoretical models to evaluate the magnitude of shear stress on walls owing to thermal causes. Finally, some solutions are discussed, considering the structural aspects on the effects and thermal insulation of the slab.

Keywords: Masonry. Cracking. Thermal effects.

1. INTRODUÇÃO

É muito comum o aparecimento de fissuras junto à laje de cobertura em edifícios de alvenaria estrutural. Mesmo que essas fissuras não comprometam a segurança da edificação, os prejuízos advindos da sua existência são de difícil reparação, tanto em relação a infiltrações como simplesmente na questão estética. Quanto à utilização da edificação, essas ocorrências são consideradas inaceitáveis e podem chegar a inviabilizar esse sistema construtivo, que é bastante atrativo no aspecto econômico.

2. CARACTERIZAÇÃO DO PROBLEMA

O processo de fissuração que ocorre nas paredes estruturais que servem de apoio para a laje de cobertura de uma edificação depende basicamente dos seguintes fatores: diferença entre parâmetros

¹ Professor do Departamento de Engenharia de Estruturas - EESC-USP, mcorrea@sc.usp.br

² Professor do Departamento de Engenharia de Estruturas - EESC-USP, ramalho@sc.usp.br

físicos como módulo de elasticidade e coeficiente de dilatação térmica dos materiais que compõem a laje e as paredes; diferentes solicitações por ações térmicas a que estão em geral submetidas a laje e as paredes e a vinculação que as paredes impõem à movimentação da laje.

Dos três fatores apresentados, o primeiro não pode ser evitado e estará presente em todas as edificações. Já o segundo e o terceiro, os de ação preponderante, podem ter pelo menos parcialmente sua atuação minimizada. Essa intervenção é imprescindível para que o fenômeno da fissuração seja controlado e isso pode ser conseguido principalmente através de dois tipos de providências: redução da desigualdade entre as ações térmicas atuantes na laje e nas paredes e redução da vinculação horizontal entre as paredes e a laje através da definição de um plano de escorregamento conveniente.

Deve-se observar a necessidade de garantir a ligação vertical desses elementos estruturais, para que as ações verticais atuantes na laje possam ser transmitidas às paredes que lhe servem de apoio. Entretanto, a movimentação da laje provocada por variação de temperatura induz ao aparecimento de forças horizontais nas paredes devidas à vinculação horizontal entre esses elementos. Podem aparecer fissuras nas paredes se essa solicitação atingir valores elevados. Ideal seria que a ligação desses elementos estruturais não possibilitasse nenhuma interação horizontal, ou seja, que uma interface perfeitamente lisa permitisse o deslocamento horizontal relativo entre os elementos. Evidentemente essa ligação ideal diz respeito apenas à laje de cobertura e em regiões sem atuação de ações sísmicas.

Conforme mencionado, o problema do aparecimento das fissuras está relacionado à deficiência de resistência ao cisalhamento que pode ocorrer nas alvenarias posicionadas logo abaixo dos pavimentos de cobertura. Esse fato pode ser entendido analisando-se o fenômeno com base no critério de Coulomb, muito adequado ao comportamento da alvenaria, conforme [1], [2], [3]. Esse é o critério adotado pelas atuais normas brasileiras de alvenaria estrutural [4], [5]. Segundo o critério de Coulomb, a resistência ao cisalhamento está associada a uma aderência inicial e ao atrito mobilizado por pré-compressão. Nas paredes abaixo da cobertura tem-se a pior conjugação desses fatores com relação ao fenômeno em estudo: elas estão sujeitas às menores compressões enquanto a laje está sujeita à maior variação da temperatura.

3. AÇÃO TÉRMICA

A radiação solar absorvida pela edificação é transformada em calor que irá alterar a temperatura dos componentes da fachada e da cobertura. Essa variação da temperatura produzirá variações dimensionais que são resultantes da dilatação e contração que todo material apresenta nessas condições. A magnitude dessa movimentação vai depender das características físicas dos materiais, do gradiente de temperatura e da frequência com que ocorre esta variação. Dessa forma, as movimentações dos vários elementos componentes da fachada e da cobertura serão diferentes.

A cobertura é a superfície de um edifício que mais está exposta à radiação solar. Desta forma as variações térmicas nos elementos que a compõem são mais expressivas. A ação da radiação solar sobre a telha irá transmitir-se para os outros componentes da cobertura, inclusive para a laje. A ação da temperatura sobre a laje tem dois efeitos básicos: provoca variações dimensionais em seu plano, comportamento de membrana, e curvaturas da sua superfície, comportamento de placa. Os efeitos correspondentes ao comportamento de membrana são preponderantes em relação aos de placa, conforme descrito em [6].

4. TIPOS DE FISSURAS

As fissuras causadas pela movimentação da laje por dilatação térmica têm algumas características que podem ser destacadas. Em primeiro lugar as paredes que têm maior tendência de fissurar são aquelas que se encontram localizadas nas posições mais afastadas das regiões centrais do pavimento. Isto se deve ao fato de que quando a laje se dilata ou se contrai os deslocamentos serão maiores nas bordas,

ver Figura 1(a). Nas regiões centrais dos pavimentos esses deslocamentos serão quase nulos, reduzindo-se significativamente a tendência ao cisalhamento das paredes que se encontram nessa região.

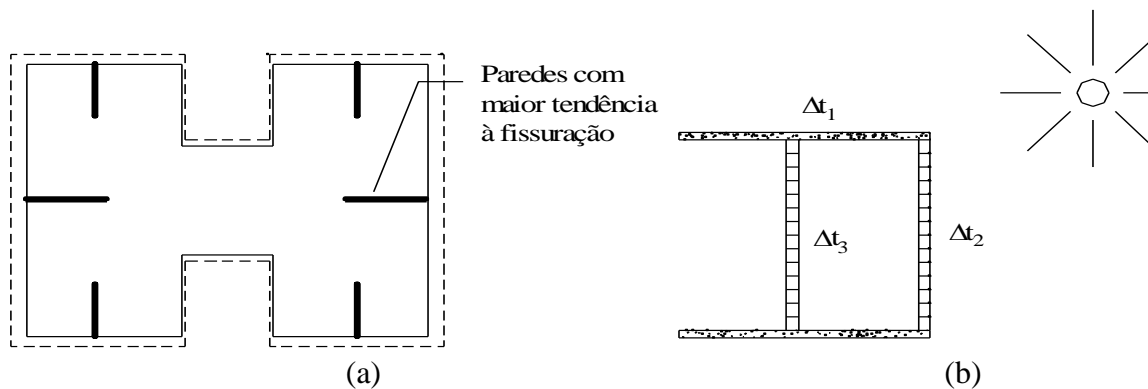


Figura 1 – Deslocamentos das lajes e paredes com maior tendência à fissuração.

Outro fato importante é que existe uma maior tendência de fissuração das paredes que chegam de topo na fachada, conforme também se destaca na Figura 1(a). Essas paredes sofrem variações de temperatura muito diferentes das que ocorrem na laje. Já as paredes de fachada estão submetidas a variações de temperaturas semelhantes às da laje de cobertura, Figura 1(b).

Um terceiro ponto a se destacar refere-se às configurações geométricas das fissuras. Como o bloco é mais resistente que as juntas de argamassa, a tendência é de fissuração da argamassa. Isso leva a dois tipos básicos de fissuras. O primeiro é constituído por fissuras horizontais, acompanhando uma junta de assentamento predominantemente localizada próxima à laje. O segundo tipo é constituído por fissuras que acompanham juntas verticais e horizontais alternadas, produzindo uma configuração inclinada. Essas configurações básicas estão ilustradas na Figura 2.

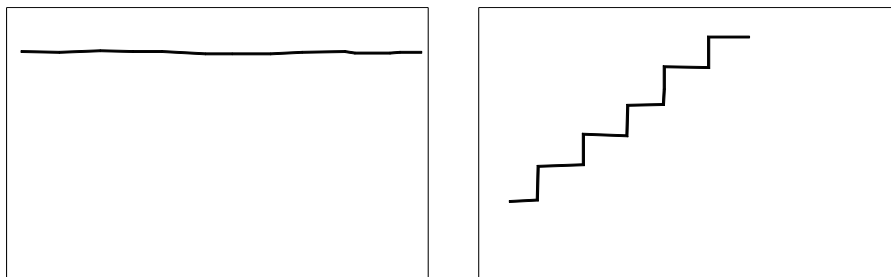


Figura 2 – Tipos básicos de fissuras.

Cabe observar que não há como prever com exatidão o local em que essas fissuras poderão aparecer, bem como a sua exata caracterização como um dos dois tipos básicos mencionados. Isto se deve à variabilidade das propriedades dos materiais componentes da alvenaria. É muito comum, por exemplo, observarem-se fissuras onde se pode notar a combinação dos tipos básicos citados ou a bifurcação da linha de fissuração.

5. MODELAGEM MATEMÁTICA DO FENÔMENO

Devido à grande complexidade do problema, não é simples produzir um modelo que possa incorporar de maneira confiável todas as variáveis envolvidas no fenômeno. Há problemas de modelagem da laje, sua ligação com a alvenaria e comportamento da alvenaria em si. Cabe ressaltar que tanto no contato

dos elementos estruturais, como na caracterização da alvenaria há não-linearidades envolvidas, anisotropias e dificuldades de estimativa da abertura das fissuras.

Diante dessas dificuldades e tendo-se em vista o reduzido conhecimento do fenômeno é razoável adotarem-se modelos simplificados, em especial com viabilidade de aplicação em projetos. Neste trabalho esses modelos têm como hipóteses básicas: comportamento elástico-linear dos materiais; ligação entre laje e paredes sem possibilidade de deslizamento relativo entre esses elementos e aplicabilidade do critério de Coulomb.

Um primeiro modelo pode ser adotado, supondo-se que as deformações sofridas pela laje, sob efeito da variação de temperatura, não são afetadas pelas restrições impostas pelas paredes. Evidente que tal consideração é bastante simplista mas é segura já que a não inclusão das restrições das paredes induz a valores superestimados dos deslocamentos dos pontos de ligação entre laje e parede. Como se poderá notar no exemplo a seguir, tal fato favorece o aumento dos valores estimados de esforços em cada uma das paredes. Assim, se o contato entre a laje e a parede se dá em um determinado comprimento cujo ponto médio dista L do eixo do pavimento que não se movimenta, por exemplo o eixo de simetria, pode-se estimar o deslocamento médio do topo da parede por:

$$\delta = \alpha L \Delta T \quad (1)$$

onde α é o coeficiente de dilatação térmica do concreto armado
 ΔT é a variação de temperatura da superfície média da laje

Admitindo-se que a ligação entre a parede e a laje de cobertura é uma articulação pode-se estimar o valor da força cortante atuante no topo da parede mediante a utilização da expressão da flecha na extremidade livre de uma viga em balanço, vide Figura 3. Importante ressaltar que para esse cálculo é imprescindível computar a parcela devida ao momento fletor e à força cortante. Assim:

$$\delta = \frac{VH^3}{3EI} + \frac{cVH}{AG} \quad (2)$$

onde

V : é a força cortante atuante na parede

H : é a altura da parede

E,G : são o módulo de Young e o módulo de elasticidade transversal da parede

A, I : são a área e o momento de inércia da seção transversal da parede.

c : é o coeficiente de deformação por cisalhamento (1,2 para seções retangulares)

Opcionalmente pode-se adotar um modelo mais rígido que é a consideração de um engaste móvel na ligação da parede com a laje. Nesse caso a equação 2 torna-se :

$$\delta = \frac{VH^3}{12EI} + \frac{cVH}{AG} \quad (3)$$

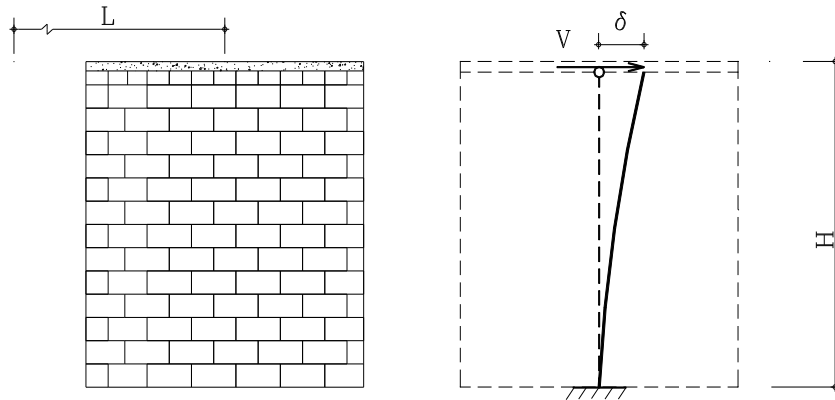


Figura 3 – Modelo simplificado para estimativa do cisalhamento.

Obtida a força cortante, determina-se a tensão de cisalhamento média que é então utilizada para as verificações usuais, de acordo com o critério adotado.

Uma deficiência desse modelo é o fato da estimativa da força em cada parede ser feita como se as demais não existissem. Outro ponto delicado consiste na determinação do comprimento L. Se o pavimento possui um eixo de simetria, a determinação de L é óbvia e simples para uma parede perpendicular a esse eixo. Entretanto, se o pavimento não é simétrico, a determinação de L torna-se muito difícil.

Para esses casos pode-se adotar um modelo mais completo, que consiste em se discretizar a laje por elementos finitos planos, membrana ou casca, e as paredes por elementos finitos de barra, com a inclusão da deformação por cisalhamento. Este modelo possibilita, inclusive, a consideração de diferentes variações de temperatura ao longo da laje. Quando se utilizar um elemento de membrana, podem ser consideradas duas situações para a ligação das paredes e da laje: uma primeira em que as barras que representam as paredes são consideradas articuladas na sua extremidade superior e uma segunda em que a extremidade superior estará engastada. Na realidade, sabe-se que a referida ligação apresentará uma rigidez intermediária. Quando a discretização da laje for feita por elementos finitos de casca evita-se a necessidade de se optar por um ou outro esquema de ligação. Nesse caso a rigidez da laje para solicitações fora do seu plano estará automaticamente considerada.

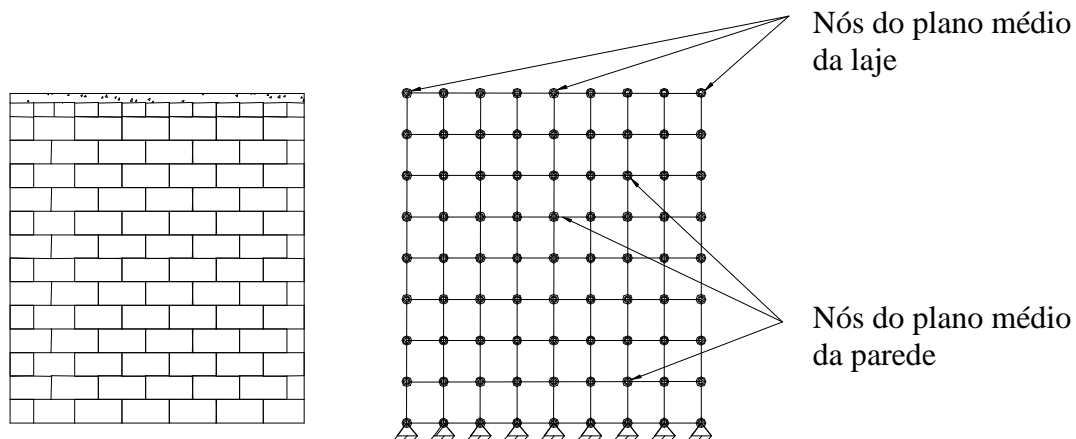


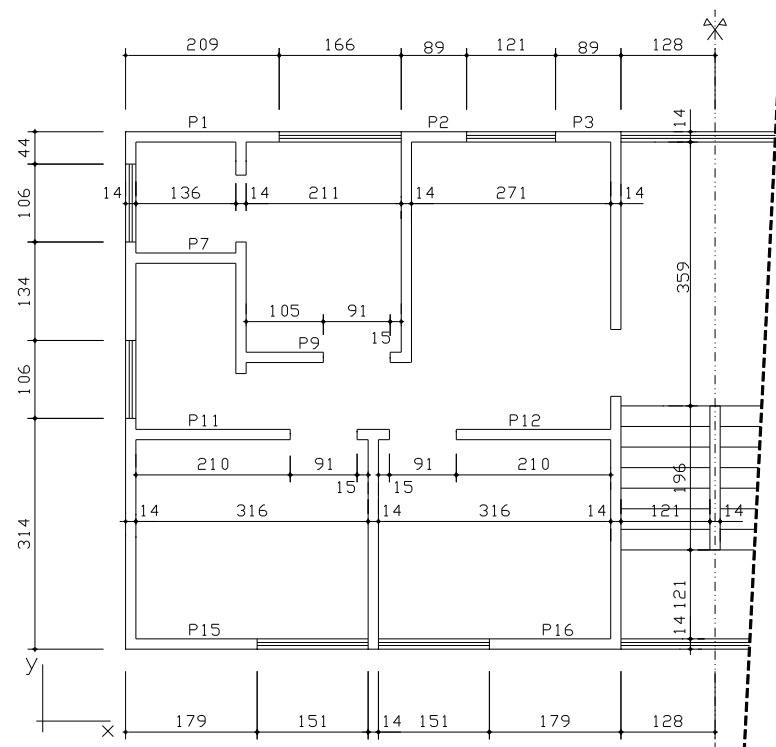
Figura 4 – Modelo em Elementos Finitos.

Um aprimoramento ainda maior para o modelo do conjunto consiste em discretizar também as paredes em elementos finitos planos, por exemplo de membrana, para evitarem-se as simplificações usuais da

ligação pontual entre laje e parede. Dentro das hipóteses básicas fixadas no início deste item esse é o modelo mais elaborado que poderia ser considerado (ver Figura 4).

6. EXEMPLO DE APLICAÇÃO

O pavimento cuja planta está mostrada na Figura 5 foi analisado quanto ao aparecimento de tensões de cisalhamento nas paredes junto à laje de cobertura para uma variação uniforme de temperatura na superfície média de sua laje maciça de concreto armado de 9 cm de espessura.



Dados complementares

Laje:

$$h = 0,09 \text{ m}$$

$$\alpha_c = 10^{-5} \text{ } ^\circ\text{C}^{-1}$$

$$E_c = 2,0 \times 10^6 \text{ kN/m}^2$$

$$v_c = 0,20$$

Paredes:

$$f_p = 3,6 \text{ MPa (prisma)}$$

$$E_{alv} = 3,6 \times 10^6 \text{ kN/m}^2$$

$$G_{alv} = 1,44 \times 10^6 \text{ kN/m}^2$$

$$H = 2,80 \text{ m}$$

Figura 5 – Exemplo de aplicação (dimensões em cm).

Foi considerada a maior variação de temperatura para um dia típico de verão, com a possibilidade de ocorrência de mudanças bruscas de temperatura na cidade de São Paulo (Brasil). Adotando-se telha de fibrocimento ao natural, a superfície média da laje de cobertura chega a apresentar um aumento de temperatura de 20° C, variação esta que pode ser ultrapassada em muitas cidades de países tropicais. Neste exemplo procurou-se analisar apenas as ocorrências nas paredes que se estendem na direção do eixo X indicado na Figura 5. Foram desprezadas as abas, considerando-se as seções transversais retangulares. A análise foi feita utilizando-se os modelos descritos na Tabela 1.

Tabela 1 – Identificação dos modelos utilizados

Modelo	Laje	Parede
1a	Não discretizada	Barra articulada no topo
1b	Não discretizada	Barra engastada no topo
2a	Elementos de membrana	Barra articulada no topo
2b	Elementos de membrana	Barra engastada no topo
2c	Elementos de casca	Barra
3	Elementos de casca	Elementos de membrana

A Tabela 2 apresenta os deslocamentos horizontais dos topos das paredes. Pode-se observar que os modelos 1a e 1b superestimam os deslocamentos enquanto os demais modelos produzem resultados muito próximos entre si. Admitindo-se que os resultados mais precisos são os do modelo 3, pode-se

notar que qualquer um dos modelos do tipo 2 produzem resultados adequados, apesar das diferenças significativas entre eles quanto à rigidez das barras que representam as paredes. O modelo 2b, a despeito de ser bem mais rígido que o modelo 2a, fornece deslocamentos apenas um pouco inferiores.

Tabela 2 – Deslocamentos Horizontais dos Pontos Médios dos Topos das Paredes (mm)

Parede	Modelo 1	Modelo 2a	Modelo 2b	Modelo 2c	Modelo3
1	1,388	1,016	1,013	1,016	1,016
2	0,758	0,616	0,614	0,616	0,616
3	0,352	0,323	0,322	0,323	0,323
7	1,440	1,312	1,310	1,312	1,312
9	1,178	1,137	1,136	1,137	1,136
11	1,373	0,909	0,907	0,908	0,907
12	0,487	0,382	0,380	0,380	0,380
15	1,418	1,037	1,034	1,035	1,036
16	0,442	0,323	0,322	0,321	0,323

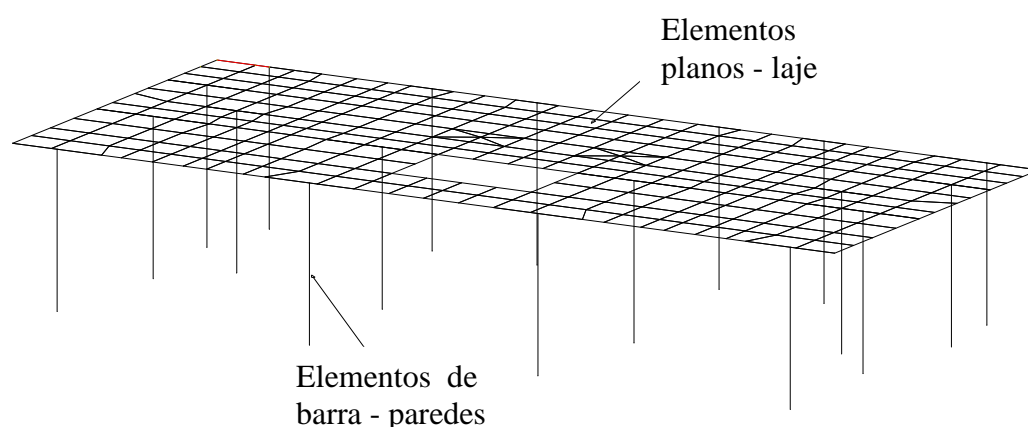


Figura 6 – Perspectiva dos modelos do tipo 2.

A observação dos resultados de forças cortantes apresentados na Tabela 3 permite notar que a influência da vinculação do topo da parede influencia significativamente os valores das forças cortantes estimadas nas paredes. Isto se percebe confrontando-se os resultados dos modelos 1a e 1b ou 2a e 2b. Na visão dos autores, apesar de muito simplistas os modelos 1a e 1b podem ser utilizados em cálculos rápidos durante o desenvolvimento de projetos para fornecer a ordem de grandeza das forças cortantes que solicitam as paredes. Em especial o modelo 1b, que combina deslocamentos e rigidez superestimados. Outro ponto a destacar é a excelente correlação de valores entre os modelos 2c e 3. Por exemplo, dentre as paredes mais solicitadas P1, P7, P11 e P15 a maior diferença percentual é de 13%. Cabe ressaltar que os projetistas que costumam utilizar elementos finitos em geral adotam um modelo semelhante ao 2c para a análise do comportamento do pavimento submetido às ações verticais. Esse modelo é suficiente para a determinação das forças cortantes nas paredes, com a vantagem de incorporar a rigidez de flexão da laje.

Tabela 3 – Forças Cortantes nas Paredes (kN)

Parede	Modelo1a	Modelo1b	Modelo2a	Modelo2b	Modelo2c	Modelo3
1	47,23	102,55	34,58	74,84	47,44	50,32
2	2,25	7,63	1,83	6,19	7,19	9,82

3	1,05	3,54	0,96	3,24	3,27	4,18
7	22,96	59,96	20,91	54,55	41,82	48,11
9	8,48	25,67	8,18	24,76	21,00	26,97
11	55,52	114,96	36,75	75,92	59,15	62,01
12	19,69	40,78	15,42	31,82	32,27	34,75
15	32,28	77,70	23,62	56,68	36,07	40,71
16	10,06	24,22	7,35	17,62	14,73	17,26

Com relação à intensidade das tensões de cisalhamento, pode-se desenvolver a análise com base na norma brasileira NBR15961-1:2011 [4]. Essa norma estabelece o valor característico da resistência ao cisalhamento em juntas horizontais como sendo igual a $0,15 + 0,5 \sigma \leq 1,4$ MPa, para argamassas de resistência média à compressão entre 3,5 e 7,0 MPa, em que σ é a tensão normal de pré-compressão na junta. Adotando-se $g_f=1,4$ e $g_m=2,0$, como indicado em [4], obtém-se $\tau \leq 0,05$ MPa. Observe-se que foi desprezado o efeito da pré-compressão por ser muito pequena logo abaixo da laje de cobertura. Assim, analisando-se os resultados da Tabela 4, correspondentes ao modelo 3, pode-se notar que apenas na parede 3 o critério de resistência estaria sendo atendido. A tensão de cisalhamento na parede P7, a mais solicitada, superaria em 358% o valor de referência do critério. Tomando-se as paredes listadas na tabela 4, a superação média seria de 180%. Pode-se perceber que para os vãos normalmente praticados e soluções usualmente adotadas para os telhados, é de suma importância que se adicionem providências no sentido de minimizar os efeitos da ação térmica.

Tabela 4 – Tensões de Cisalhamento nas Paredes – Modelo3 (MPa)

Parede	τ	Parede	τ	Parede	τ
1	0,18	7	0,23	12	0,11
2	0,09	9	0,17	15	0,17
3	0,04	11	0,20	16	0,07

7. SOLUÇÕES

Minimização das Causas

Basicamente, três providências podem ser adotadas para a minimização da irradiação de ondas longas de calor que atingem com maior intensidade a laje da cobertura. Duas dessas ações pressupõem a existência de um telhado de proteção à laje. Primeiramente a redução da absorção do calor pelo telhado pela utilização de cores claras e tipos adequados de telhas. Em segundo lugar a existência de uma ventilação adequada entre as telhas e a laje, o que pode ser feito com venezianas em platibandas ou mesmo ventilação pelas próprias telhas. A terceira providência pode ser adotada se houver ou não um telhado sobre a laje e trata-se do seu isolamento térmico. Podem ser utilizados vários materiais isolantes, dentre eles o concreto celular moldado “in loco”, o poliestireno extrudado e o poliestireno expandido. É evidente que as mencionadas providências podem ser utilizadas simultaneamente, de forma a garantir uma maior eficiência na solução do problema.

Minimização dos Efeitos

São providências de natureza estrutural. Dentre as que possuem viabilidade prática, uma relativamente simples de ser produzida é a disposição de juntas de dilatação na laje de cobertura. A laje é subdividida, reduzindo-se o valor do comprimento L e o valor da tensão de cisalhamento atuante. O projetista pode lançar mão desse procedimento durante a execução do projeto, como ação preventiva, ou como uma solução quando ocorre a patologia. A previsão da posição dessas juntas

deve ser feita de maneira cuidadosa, observando-se a passagem de eletrodutos e a preferência por localização sobre paredes. Pode-se, por exemplo, produzir a separação das lajes correspondentes aos apartamentos de um pavimento, bem como isolar a região correspondente a escadas e elevadores.

Outra providência, bastante usual, consiste na utilização de aparelhos de apoio de borracha extrudada entre a laje e a parede, que buscam permitir o livre deslocamento relativo entre os elementos estruturais. Esses aparelhos devem ser utilizados em pequenas placas descontínuas, com o preenchimento do espaço entre elas com material inerte.

Entretanto, a providência mais simples e mais econômica consiste na utilização de papel betumado ou tiras de material melanímico na superfície em que a laje se apoia sobre a parede. Na realidade o que tais materiais fazem é reduzir significativamente o coeficiente de atrito entre a laje e a parede, produzindo um plano de deslizamento preferencial. A fissura que se formaria em alguma junta de argamassa entre blocos passa a se localizar na superfície de ligação entre laje e parede. Essa interface é uma aresta natural da construção, ficando assim a fissura praticamente imperceptível.

Outras soluções que envolvam a necessidade de armação das paredes são menos adequadas devido a dois fatores: a necessidade de se estimarem as armaduras e a inclusão de procedimentos adicionais na etapa construtiva. O grauteamento de blocos e a disposição de armaduras, em especial na vertical, constituem tarefas que reduzem em muito a produtividade, além de exigirem maior consumo de materiais.

8. CONCLUSÕES

Pelo que foi apresentado, pode-se perceber a grande importância de se tomarem as providências necessárias para se evitar a formação de fissuras nas alvenarias que se localizam logo abaixo das lajes de cobertura em edifícios de alvenaria estrutural. Esse fato, apesar de não representar um risco para a segurança da estrutura, é inadmissível do ponto de vista da utilização do edifício. Essas fissuras são causadas pela ação da temperatura sobre os diversos elementos estruturais. Eles apresentam diferentes deslocamentos e estando ligados uns aos outros acabam por produzir tensões de cisalhamento que induzem o seu aparecimento.

É possível representar o fenômeno de maneira relativamente simples admitindo-se comportamento linear dos materiais. No caso de simetrias dos pavimentos, modelos analíticos expeditos podem ser utilizados para estimarem-se os valores das tensões de cisalhamento nas paredes.

O exemplo apresentado mostra que em situações bastante usuais podem aparecer tensões de cisalhamento que superam os valores limites estabelecidos em normas específicas de alvenaria estrutural.

Intervir no processo através de uma redução das ações térmicas diferenciais e conseqüentemente reduzir os deslocamentos relativos entre os componentes é uma das alternativas de solução do problema. Outras, também viáveis, consistem na redução das dimensões dos elementos ou na criação de superfícies de escorregamento adequadas. Menos recomendável é o reforço das alvenarias devido às dificuldades de execução desses procedimentos.

9. REFERÊNCIAS

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR 15961-1. Alvenaria estrutural – Blocos de concreto. Parte 1: Projeto. Rio de Janeiro, Brasil, 2011

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR 15812-1. Alvenaria estrutural – Blocos cerâmicos. Parte 1: Projeto. Rio de Janeiro, Brasil, 2010

BASSO, A.; CORRÊA, M. R. S. Ação da temperatura sobre a laje de cobertura de edifícios. In: ENCONTRO NACIONAL DE CONFORTO NO AMBIENTE CONSTRUÍDO, 2., ANTAC, ABERGO, SOBRAC, Mar./Abr., 1993. Florianópolis. p.163-170.

HENDRY, A. W. **Structural Brickwork**, London, MacMillan Press, 1981.

HENDRY, A. W.; SINHA, B. P.; DAVIES, S. R. **An introduction to load bearing brickwork design**. New York, Halsted Press, 1981.

ROMAN, H.; SINHA, B. P. Shear Strength of Concrete Block Masonry. In: INTERNATIONAL SEMINAR ON STRUCTURAL MASONRY FOR DEVELOPING COUNTRIES, 5., University of Santa Catarina-BR and University of Edinburgh-UK, Aug 1994, Florianópolis, Brazil, p. 251-259.