

Análise de lajes: Análise de lajes pelo método das charneiras plásticas

Aplica-se às versões: EBv5, EBv5Gold, EBv6, EBv6Gold, EBv7, EBv7Gold, PMv7, PMv7G, PMv8, PMv8G

Assunto

Este artigo aborda a análise de lajes pelo Método das Charneiras Plásticas (ou Método da Ruptura), indicando suas premissas gerais sem abordar a formulação algébrica. Procedimentos simplificados com base nesse método são razoavelmente bem conhecidos e soluções para lajes retangulares são facilmente encontradas na bibliografia sobre Projeto Estrutural.

Embora seja possível obter economia apreciável com esse procedimento, diversos cuidados devem ser tomados em sua aplicação. Procura-se apontar aqui o motivo pelo qual a arbitragem de uma configuração de ruína qualquer para uma laje fornece resultados contrários à segurança, bem como limitações na aplicação desse método em pavimentos usuais de edifícios.

Artigo

A análise elástica de uma estrutura é importante para estudar o seu comportamento sob a ação das cargas de serviço. Entretanto, se o carregamento aumentar em direção à carga última, as seções mais solicitadas da estrutura se plastificam e formam rótulas plásticas que transformam a estrutura em um mecanismo (situação limite que pode conduzir a estrutura ao colapso sob o menor acréscimo de carga).

Conforme abordado no artigo "[Dimensionamento elástico e plástico de lajes](#)" existem três condições a serem satisfeitas na análise plástica de uma laje:

- Equilíbrio;
- Plastificação (em nenhuma seção ocorre momento superior ao momento de plastificação);
- Mecanismo (a plastificação torna a estrutura hipostática).

Devido à grande dificuldade de se lidar com todas as condições simultaneamente, existem duas abordagens distintas:

- Método estático (ou do limite inferior): pesquisa soluções em equilíbrio na qual seja respeitada a condição de plastificação. Como não forma necessariamente um mecanismo, a carga última obtida é igual ou inferior à real (a favor da segurança);
- Método cinemático (ou do limite superior): pesquisa mecanismos possíveis, normalmente em equilíbrio. Como a condição de plastificação não é garantida, pois podem haver momentos superiores ao de plastificação em certos pontos das laje fora das charneiras, a carga última obtida é igual ou superior à real (contrária à segurança).

O Método das Charneiras Plásticas ou Método das Linhas de Ruptura, para lajes de concreto

Análise de lajes: Análise de lajes pelo método das charneiras plásticas

armado, foi inicialmente desenvolvido por INGERSLEV (1923) e contou com uma extensa contribuição de outros autores como JOHANSEN (1943) e "LANGENDONCK (1970)". A carga última da laje é obtida estudando-se vários mecanismos possíveis de colapso compatíveis com as condições de contorno. Os momentos nas linhas de plastificação são os últimos plásticos, resistidos pela seção de concreto armado. Com estas hipóteses básicas, a carga última é determinada usando-se o princípio dos trabalhos virtuais ou as equações de equilíbrio. A carga última assim determinada é uma carga maior ou igual à correta.

O fato de não se ter nenhuma garantia de que o mecanismo de colapso adotado é o correto torna necessária a verificação de todos os mecanismos de colapso possíveis, para garantir que a capacidade de suporte de carga da laje não foi superestimada. Entretanto, em vários casos usuais, a pesquisa da configuração de ruína já foi estudada, sendo conhecida com boa precisão.

Admite-se que as seções transversais da laje tenham comportamento plástico, ou seja, que, a partir de determinada rotação o momento resistente passa a ser o de plastificação, que permanece constante. Conforme "LORIGGIO (1998)", as lajes dimensionadas no Domínio 2 e uma grande parte das lajes dimensionadas no Domínio 3 possuem um patamar de plastificação bem definido. O texto conclusivo do Projeto de Revisão da NBR 6118 limita a posição da linha neutra a 0,30 da altura útil quando for utilizado um método plástico de análise, garantindo a ductilidade das seções transversais.

Determinação da carga última

O primeiro passo em qualquer solução com charneiras plásticas é postular o padrão de linhas de ruptura usando algumas regras:

- Em um mecanismo de colapso formado por segmentos planos, as linhas de plastificação deverão ser linhas retas, formando eixos de rotação para o movimento destes segmentos;
- Os apoios da laje atuarão como eixos de rotação. Se um lado é engastado, uma linha de plastificação pode se formar neste apoio. Um eixo de rotação passará por uma coluna de apoio;
- Por compatibilidade de deformação, uma linha de plastificação deverá passar pela intersecção do eixo de rotação de segmentos adjacentes da laje;

Análise de lajes: Análise de lajes pelo método das charneiras plásticas

Figura 1 - Traçado de linhas de ruptura

- Os padrões geralmente contém dimensões desconhecidas, as quais localizam as linhas de ruptura e poderá existir mais de uma família de linhas de ruptura para uma laje em particular;
- O projetista deve assegurar-se de que todos os padrões de linha de ruptura tenham sido considerados, já que o padrão correto é aquele que resultará na menor carga última. Se o padrão crítico não for considerado, a carga última estará contra a segurança;
- A carga última poderá ser obtida a partir de um padrão de linhas de ruptura usando o princípio dos trabalhos virtuais ou as equações de equilíbrio. A formulação do processo pode ser facilmente encontrada na bibliografia como, por exemplo, em LANGENDONCK (1970).

Vantagens na aplicação

A Teoria das Charneiras Plásticas visa obter a configuração de ruína da laje, na qual se tem a estrutura hipostática através da sucessiva plastificação das seções transversais. Nos casos os quais isso pode ser obtido, tem-se o máximo aproveitamento dos materiais e da estrutura, resultando em economia no resultado final.

No estudo de configurações de ruína para lajes retangulares de edifícios, LORIGGIO (1998) propõe um processo iterativo de rápida convergência para a compensação entre os momentos positivos em cada laje e os negativos nos bordos. Em um exemplo numérico utilizando um painel de seis lajes, verificou-se uma redução nos momentos de dimensionamento da ordem de 30% quando comparados a uma solução elástica. Segundo o autor, o valor da redução depende das condições de apoio da laje. Nas lajes sem qualquer armadura negativa, esta redução é bem menor ou até inexistente.

Dificuldades na determinação da configuração de ruína

Análise de lajes: Análise de lajes pelo método das charneiras plásticas

No caso de lajes retangulares de edifícios com carga uniformemente distribuída, as configurações de ruína são conhecidas e, normalmente, o processo de dimensionamento não apresenta qualquer inconveniente, embora alguns autores apresentem configurações simplificadas que fornecem resultados contra a segurança, mas dentro de certos limites.

No caso geral, a pesquisa da configuração de ruína de uma laje passa pela definição de todas as configurações de colapso possíveis. Este estudo é extenso e diferente em cada situação de carregamento ou geometria. Deve-se tomar muito cuidado com as soluções tradicionais obtidas pelo traçado de charneiras retilíneas partindo dos vértices. Ao desconsiderar efeitos como o da bifurcação das charneiras nos cantos, pode-se chegar a erros consideráveis.

É possível se exemplificar a complexidade existente pelo cálculo de uma laje retangular simplesmente apoiada com uma carga concentrada em seu centro. Além da configuração com charneiras retilíneas, tem-se duas outras situações, baseadas na formação de charneiras negativas afastadas dos cantos:

Figura 2 - Configurações possíveis para uma laje com carga concentrada

Embora a laje seja simplesmente apoiada, as duas últimas configurações têm seu resultado afetado pelo valor do momento de plastificação negativo m' . Pode-se expressá-lo pela relação:

$$\mu = \frac{m'}{m + m'}$$

Análise de lajes: Análise de lajes pelo método das charneiras plásticas

O gráfico a seguir apresenta o valor da carga última em função das dimensões da laje e do coeficiente μ .

Figura 3 - Carga última para diversas configurações

Ao adotar a configuração retilínea, pode-se chegar a valores bastante contrários à segurança. Para $\mu=0$ (momento de plastificação negativo nulo), tem-se a segunda configuração como sendo a de ruína.

Análise de lajes: Análise de lajes pelo método das charneiras plásticas

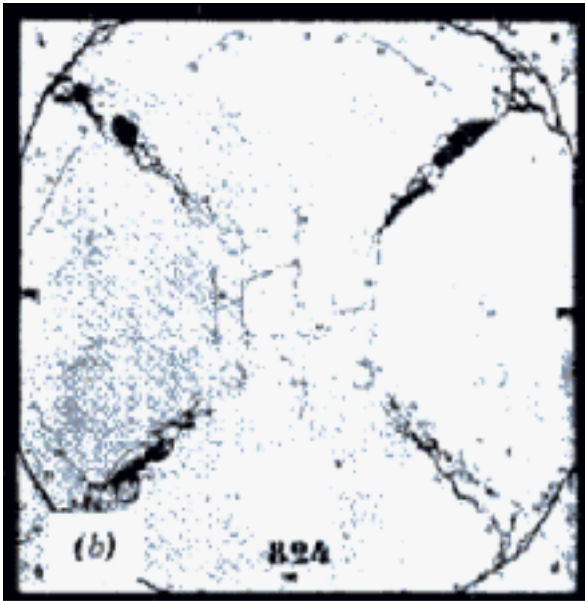


Figura 4 - Configuração de ruína obtida em ensaio (PARK & GAMBLE, 1980)

Como segundo exemplo, pode-se utilizar uma laje triangular simplesmente apoiada, submetida a uma carga concentrada:

Figura 5 - Configurações possíveis para uma laje triangular

Análise de lajes: Análise de lajes pelo método das charneiras plásticas

| Configuração | $\mu = 0$ | $\mu = 0.5$ |
|--------------|-----------|-------------|
| b | P = 13.85 | P = 13.85 |
| f | P = 6.28 | P = 11.42 |
| d | P = 6.70 | P = 11.20 |
| e | P = 7.10 | P = 10.60 |

Para $m=0$, a configuração de ruína será a “ c ” (cone circular). Já para $m=0.5$, a configuração será a “ e ” (charneiras tocando os três lados).

Mecanismos de colapso compostos viga-laje

Nos exemplos efetuados até o momento, foi assumido que os apoios eram suficientemente resistentes para suportar as cargas últimas da laje. Com isso, pode-se estudar os mecanismos de colapso considerando apenas as lajes.

Em pisos com vigas de rigidez relativamente baixa (o que é muito comum nas soluções arquitetônicas recentes), as lajes poderão entrar em colapso por um mecanismo alternativo, que envolve rótulas plásticas tanto nas vigas como nas linhas de ruptura na laje.

Este mecanismo de colapso composto viga-laje pode ser analisado levando-se em conta a resistência à flexão das vigas de apoio.

Por exemplo, em uma laje retangular com carga uniformemente distribuída, apoiada em vigas simplesmente apoiadas em suas extremidades, três mecanismos possíveis de colapso são mostrados abaixo:

Análise de lajes: Análise de lajes pelo método das charneiras plásticas

O mecanismo de colapso será aquele com a menor carga última. É possível que as resistências relativas das vigas e das lajes sejam tais que todos os três modos tenham a mesma carga última. Neste caso, o mecanismo combinado pode ser algo como o seguinte:

A figura abaixo representa o resultado de um ensaio de ruptura de um painel com duas lajes. Pode-se notar claramente a ruptura nas vigas verticais, com uma carga última inferior à carga teórica obtida considerando-se a ruptura de cada laje isolada.

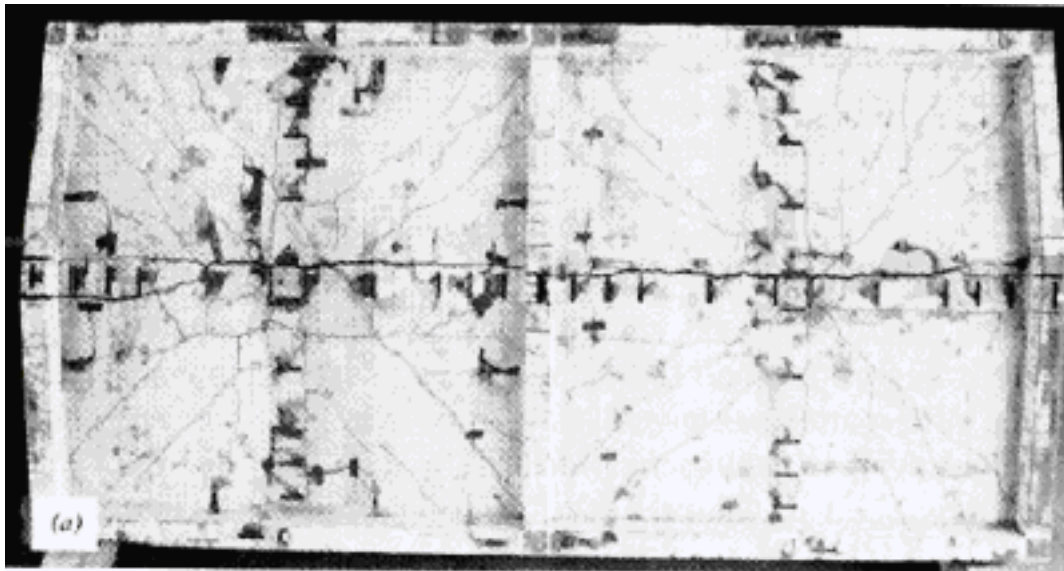


Figura 6 - Configuração de ruína composta vigas-lajes (PARK & GAMBLE, 1980)

Conclusões e recomendações

A Teoria das Charneiras Plásticas é capaz de prever a carga última das lajes com notável precisão em relação aos resultados obtidos através de ensaios. Além disso, permite aproveitar melhor a capacidade resistente da laje, resultando em dimensionamentos mais econômicos.

Por outro lado, isso só é prático em situações relativamente simples, como lajes retangulares com carga uniformemente distribuída apoiadas em vigas suficientemente resistentes. Ao estender esses conceitos para outras geometrias ou carregamentos, pode-se inserir erros na análise que serão contrários à segurança. O engenheiro deve conhecer claramente as premissas do método para utilizar a sua correta aplicação em projeto.

Uma formulação geral do método, que pudesse pesquisar todas as configurações de ruína

Análise de lajes: Análise de lajes pelo método das charneiras plásticas

possíveis, seria de difícil implementação. Por isso, praticamente todos os programas computacionais disponíveis para elaboração de projetos adotam soluções de limite inferior, partindo de resultados elásticos e, gradativamente, incluindo refinamentos ao modelo que busquem soluções mais econômicas mantendo-se sempre ao lado favorável à segurança.

Referências bibliográficas

ID de solução único: #1585

Autor: : Eng.º André Luiz Banki / Engº Jano d'Araujo Coelho / Profº Daniel Domingues Loriggio

Última atualização: 2013-04-25 14:31