

CARGA ÚLTIMA DE PÓRTICOS

CESAR BALLAROTTI*

RESUMO

Descrição de uma técnica numérica, através da qual é avaliada a carga de colapso de pórticos deslocáveis. Foram elaborados apropriados programas de computador, os quais possibilitam tais pesquisas. Com esses programas, grandes pórticos podem ser analisados com "tempos" razoáveis de processamento.

INTRODUÇÃO

Pouco se conhece ainda a respeito das relações carga-deslocamento de pórticos, em particular os elevados, considerando-se o comportamento não-linear do material. Uma das razões para esta falta de informações são as inúmeras dificuldades que se apresentam na elaboração de programas de computador para a análise dessas estruturas. Portanto, estudos numéricos a esse respeito não puderam ser iniciados antes que se tivesse desenvolvido apropriados programas de computador para esse fim⁽⁶⁾.

Através de um tratamento matricial, o problema da instabilidade elástica de pórticos é sistematizado com um programa de computador, em linguagem FORTRAN, que permite encontrar a carga crítica elástica de segunda ordem de pórticos⁽¹⁾. Por definição, a carga crítica de pórticos planos em regime elástico é aquela em que a estrutura deixa de ser estável em seu próprio plano pois sua estabilidade transversal é suposta assegurada por vinculação adequada. Apresenta-se uma formulação matricial para uma barra isolada dando-se à influência do esforço axial existente na barra, o qual afeta substancialmente seus coeficientes de rigidez. A matriz de rigidez da estrutura é montada a partir das matrizes de rigidez de suas barras. Por conseguinte são impostas condições à matriz de rigidez do sistema estrutural para que se possa encontrar a carga crítica. Maiores detalhes a esse respeito podem ser encontrados em ANTUNES⁽¹⁾.

Por outro lado faz-se a análise elasto-plástica em primeira ordem dos pórticos objetivando-se obter a carga de colapso plástico correspondente. Uma análise baseada numa determinação passo-a-passo das relações carga-deslocamento, onde rótulas e mais rótulas plásticas se formam é chamada "análise elasto-plástica". Ao ser iniciada a análise, toda a estrutura comporta-se elasticamente até que se forme a primeira rótula plástica. A partir daí, a estrutura continua elástica apenas nos segmentos entre rótulas, ou seja, nas seções onde o momento fletor M é menor que o momento de plastificação da referida seção (M_p), sendo utilizada a relação momento curvatura ($M - \Phi$) idealizada. Após a formação de determinadas rótulas plásticas a estrutura passa a reagir ao carregamento como se existisse rótulas reais naquelas seções, incapazes de resistirem a adicionais momentos fletores, sendo que o momento fletor naquelas seções permanece constante e igual a M_p . O desenvolvimento numérico desse modelo matemático é feito automaticamente através de um programa para computador, desenvolvido para esse fim.

Os tipos de pórticos a serem analisados por essas teorias terão duas restrições. A primeira é que as barras sejam prismáticas e que suas seções tenham o centro de cisalhamento coincidente com o centro de gravidade, de modo que não ocorra instabilidade por flexo-torção. Por outro lado essa restrição se deve ao fato de que a matriz de rigidez das barras é formulada em função de certos coeficientes que

supõe torção nula nas seções. A segunda restrição é que serão consideradas apenas cargas que atuem nos nós do pórtico, ou seja, nas conexões das vigas com os pilares.

PRELIMINARES E SITUAÇÃO DO PROBLEMA

Pesquisadores atuais tem dado muita importância aos problemas de instabilidade e à determinação da carga de colapso de estruturas que, por sua vez, são correlatos. De certa forma os motivos desse aumento de interesse pelo assunto se deve a diversos fatores como por exemplo o aparecimento de novas ligas de aço de alta resistência, a possibilidade da execução de estruturas elevadas, etc.. A possibilidade de se analisar tais estruturas de maneira mais exata tornou-se evidente com a difusão dos computadores digitais e o desenvolvimento dos métodos matriciais. Devido a esses fatores, teorias e métodos que há pouco tempo tinham limite de aplicabilidade bastante reduzido voltaram a ser usados e reestudados com maior atenção⁽²⁾.

Desde o trabalho de EULER⁽¹⁷⁵⁹⁾ a quem se atribuiu a primeira solução matemática do problema de instabilidade de colunas em regime elástico, muitos outros pesquisadores deram sua contribuição ao assunto, até que se tornou possível a análise de instabilidade de estruturas como um todo, onde todos os elementos participam simultaneamente, determinando o carregamento de instabilidade geral.

O pesquisador MERCHANT⁽⁷⁾, em

* Professor de Engenharia Civil - C.C.R.T. - FUEL

suas primeiras investigações a respeito da carga de colapso de pórticos, formulou a carga de colapso como uma função da carga de colapso plástico simples, da carga crítica elástica e um parâmetro corretivo. HORNE⁽⁵⁾ tem apresentado uma relação aproximada para a determinação de carga de colapso de pórticos. Uma solução alternativa foi apresentada por WOOD⁽⁹⁾, onde ele combina a análise plástica com a elástica num procedimento incremental, na tentativa de obter a carga de colapso de pórticos.

Mais recentemente os pesquisadores KORN & GALAMBOS⁽⁵⁾ usando um modelo matemático, no qual consideraram uma relação idealizada momento-curvatura em uma análise incremental na qual a matriz de rigidez dos elementos se obtinha a partir das funções convencionais de estabilidade "s" e "c", alterando-se a rigidez do sistema estrutural com a formação de rótulas plásticas, concluíram que a instabilidade, de modo geral, pode ocorrer nas seguintes condições:

a) um mecanismo de colapso plástico envolvendo muitas rótulas plásticas, fará com que o pórtico atinja a instabilidade através de um mecanismo lateral (sway collapse) envolvendo vários andares do pórtico, o que por sua vez reduz significativamente a carga de colapso.

b) um mecanismo de colapso envolvendo poucas rótulas plásticas, como por exemplo um macenismo de viga, não altera significativamente a carga de colapso.

Posteriormente, o pesquisador LIAPUNOV⁽⁶⁾ desenvolveu uma análise incremental-iterativa na qual ele considera o espalhamento das zonas de plastificação, as tensões residuais e o efeito P-Delta, entretanto, não considera o fechamento de rótulas plásticas (strain reversal). Pudemos comprovar que seus resultados têm sido bons, comparados com os de outros pesquisadores e aos nossos (temos pesquisado as relações carga-deslocamento de pórticos, considerando a não-linearidade física e geométrica).

MÉTODO DE ANÁLISE

A carga de colapso (carga última) de pórticos será avaliada pela seguinte expressão matemática:

$$\frac{1}{W_c} = \frac{1}{W_p} + \frac{1}{W_e} \dots \dots \dots \text{Eq. 1}$$

na qual W_c é o fator da carga de colapso, que propomos ser o fator de carga, da carga última da estrutura, W_p , o fator da carga de colapso plástico e W_e , o fator da carga de instabilidade elástica.

RANKINE apresentou uma expressão similar à eq. 1 para a predição da carga de colapso de pilares em flexão composta.

Para que se obtenham os parâmetros W_p e W_e calcula-se a estrutura para um mesmo carregamento através dos programas para computador (veja secção 1.), os quais nos fornecem, respectivamente, a carga crítica elástica P_e e a carga de colapso plástico P_p . Desta feita, os fatores de carga W_p e W_e são calculados da seguinte forma:

$W_p = P_p/P$, $W_e = P_e/P$ Eq. 2
sendo P um dos parâmetros que constituem o vetor de carga do carregamento, acima referido. Observa-se que os parâmetros P , P_p e P_e podem ser quaisquer dos que constituem os respectivos vetores de carga, desde que sejam homólogos. Obtido o valor de W_c pela eq. 1, bastará multiplicar-se o carregamento por este fator, para obter-se a carga de colapso da estrutura.

Na secção 4, são apresentados os resultados obtidos pelo presente método de análise, os quais comparamos com os obtidos por outros pesquisadores.

Temos a destacar que na determinação do parâmetro W_p , nossa análise prevê o fechamento de rótula(s) Plástica(s) (strain or stress reversal). Este refinamento, tornou a automatização um tanto quanto complexa e laboriosa. Contudo, em se tratando de estrutura irregulares quanto às suas características geométricas, tal consideração é imprescindível.

RESULTADOS

Várias estruturas foram analisadas, sendo que, os resultados obtidos mostraram-se satisfatórios, comparados com os de outros pesquisadores da bibliografia.

Apresentam-se, aqui, dois exemplos, os quais foram também analisados por GALAMBOS⁽³⁾ e TRANBERG; SWANNELL; MEEK⁽⁸⁾, respectivamente.

No primeiro exemplo, considera-se um pórtico de um andar e duas prumadas de pilares engastados na base⁽³⁾, cujas características elásticas e geométricas são as seguintes:

Perfis-H (aço A441 - Tensão de es-

coamento = 50 KSI);

Módulo de elasticidade = 30000 KSI;

Área da seção transversal dos pilares = 10,07 in²;

Momentos de inércia: pilares = 115,5 in⁴;

viga = 231,0 in⁴;

Comprimento da viga = 408 in;

Altura dos pilares = 204 in;

Momentos de plastificação: pilares = 1590 Kip-in;

viga = 1700 Kip-in;

O carregamento se constitui de cargas gravitacionais concentradas iguais, aplicadas nos dois nós do pórtico e, de uma carga horizontal concentrada, aplicada no nó esquerdo, na proporção de 1/10 em relação às cargas gravitacionais. Assim, temos:

Cargas gravitacionais = P

Carga horizontal = 0,1 P

Obteve-se como carga última o valor de 174 Kips, sendo que GALAMBOS⁽³⁾ delimitou a carga última entre os valores de 167 a 179 Kips.

No segundo exemplo, considera-se um pórtico de dois andares e duas prumadas de pilares engastados na base⁽⁸⁾, possuindo as seguintes características elásticas e geométricas:

Perfis-I (tensão de escoamento = 36 KSI);

Todas as barras possuem as mesmas características;

Módulo de elasticidade = 30000 KSI;

Área da seção transversal das barras = 3,2 in²;

Momentos de inércia = 51,2 in⁴;

Comprimento das barras = 400 in;

Momento de plastificação = 464 Kips-in;

O carregamento se constitui de cargas gravitacionais concentradas e iguais, aplicadas nos quatro nós do pórtico e de duas cargas horizontais concentradas, aplicadas nos dois nós da esquerda, na proporção de 1/6 em relação às cargas gravitacionais. Assim, temos:

Cargas gravitacionais = P

Cargas horizontais = $P/6$

Obteve-se como carga última o valor de 1,33 Kips (parâmetro, este, relativo às cargas horizontais). TRANBERG⁽⁸⁾ encontrou para esse mesmo pórtico um valor de 1,49 Kips. Esta discrepância, entretanto, deve-se ao fato de TRANBERG⁽⁸⁾ ter considerado em sua análise, o encruamento do aço de forma superestimada. Contudo, tem-se observado que em ensaios "reais" de modelos

e protótipos, as relações carga-deslocamento obtidas dão valores sempre superiores aos obtidos em análises que não consideram o encruamento do material⁽⁶⁾.

CONCLUSÃO

A razão pela qual o uso da eq. 1, na predição da carga de colapso leva a bons resultados é que os "modos" de colapso dos pórticos correspondentes

a W_c , W_p e W_e são, implicitamente, de forma similar. Além disso, tais resultados são geralmente moderados (conservativos) quando comparados com os experimentais.

As comparações feitas com métodos mais sofisticados indicam que o presente método de determinação da "carga última de pórticos" é de natureza aproximada, o que é próprio de sua formulação. Entretanto, fornece bons resultados, inclusive para os fins práticos da engenharia. Desde que se tenha acesso a um computador, a técnica proposta

poderá ser utilizada nos projetos, verificações de critérios de cálculo e dimensionamento de estruturas.

Todavia, atinente ao que foi considerado quanto à plastificação do material no terceiro parágrafo da seção 1, não se esgota o problema. Numa estrutura pode haver inúmeras zonas de plastificação, considerando-se os efeitos de todos os possíveis esforços solicitantes e das características do material. Dessa forma, há outros critérios e modelos matemáticos a serem utilizados e pesquisados.

ABSTRACT

This work describes a numerical technique for predict the actual collapse loads of unbraced frames. Suitable computer programs were developed for this type of research. With these computer programs, large frames may be analyzed within reasonable computer processing times.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

1. ANTUNES, H.M.C.C. *Instabilidade elástica de estruturas lineares planas usuais*. São Carlos, 1972. 101 p. (Tese. Engenharia Estrutural. Esc. Eng. S. Carlos - USP).
2. FIGUEIREDO, R.G. *Sobre a instabilidade elástica de pórticos tridimensionais de edifícios*. São Carlos, 1976. 160 p. (Tese. Engenharia Estrutural. Esc. Eng. S. Carlos - USP).
3. GALAMBOS, T.V. *Structural members and frames*. Washington, Prentice-Hall, 1968. 373 p.
4. HORNE, M.R. Elastic-plastic failure loads of plane frames. *Proc. R. Soc., London*, 274 (ST3): 343-64, May, 1963.
5. KORN, A. & GALAMBOS, T.V. Behavior of elastic-plastic frames. *J. Struc. Div., ASCE*, 94 (ST5): 1119-42, May, 1968.
6. LIAPUNOV, S. *Ultimate load studies of plane multistory steel rigid frames*. New York, 1973. 123 p. (Thesis. Structural Engineering. School of Engineering and Science of New York University).
7. MERCHANT, W. The failure load of rigid jointed frameworks as influenced by stability. *The Structural Engineer*, 32: 185-90, Jul., 1954.
8. TRANSBERG, W.; SWANNELL, P.; MEEK, J.L. Frame collapse using tangent stiffness. *J. Struc. Div. ASCE*, 102 (ST3): 659-75, Mar., 1976.
9. WOOD, R.H. The stability of tall buildings. *Proc. Inst. Civil Eng.*, 11: 69-102, Sep., 1958.