

Análise via elementos finitos do comportamento de placas de base de sistemas de armazenagem industrial (racks)

F. T. Souza¹; M. S. R. Freitas²; A. M. S. Freitas².

¹ Instituto Federal de Minas Gerais- Campus Congonhas – Congonhas, MG

CEP: 36415-000

e-mail: flavio.souza@ifmg.edu.br

² Departamento de Engenharia Civil, Escola de Minas, UFOP

CEP: 35400-000

e-mail: marcelio@em.ufop.br, arlene@em.ufop.br

Resumo. *Os sistemas de armazenagem industrial são estruturas metálicas de elevada esbeltez, construídas com perfis formados a frio e utilizadas em depósitos com o fim de otimizar a utilização do espaço, uma vez que permitem a verticalização dos estoques. Caracterizam-se por apresentar custo relativamente baixo, porém, devido à esbeltez de seus componentes, são sujeitos a fenômenos de instabilidade que não acontecem em estruturas mais compactas, como as construídas em perfis laminados e soldados. Assim, a estabilidade destas estruturas é obtida a partir da interação entre os seus diversos componentes. Um dos elementos mais importantes é a placa de base, que provê fixação ao piso e também estabilidade lateral à estrutura. Por isto, a verificação do comportamento deste componente e ainda a determinação da rigidez que ele transmite ao sistema é fundamental para que se obtenha um dimensionamento racional dos racks. Este trabalho apresenta a avaliação da placa de base através de análise via elementos finitos desenvolvida no software comercial ANSYS. Esta análise torna-se interessante devido à necessidade de simular a interação entre a placa de base, a coluna e o piso, o que demanda a utilização de elementos de casca e de contato no modelo. Devido ainda ao surgimento de grandes deslocamentos, técnicas especiais de solução são utilizadas para que se possa avaliar a trajetória de equilíbrio e a rigidez da placa de base. Esta rigidez é então introduzida em um modelo numérico do sistema de armazenagem, elaborado com elementos de viga, de treliça e de mola, cujos resultados são comparados a dados experimentais. Esta comparação valida os modelos desenvolvidos, e permite a avaliação da real influência da placa de base na estabilidade global dos sistemas de armazenagem industrial.*

Palavras-chave: *estruturas metálicas, perfis formados a frio, elementos finitos, sistemas de armazenagem industrial.*

1 INTRODUÇÃO

Os sistemas de armazenagem industrial são amplamente utilizados em todo o mundo devido à crescente necessidade de racionalização do espaço disponível para a estocagem de bens. Estas estruturas, que variam de estantes de pequeno porte a grandes estruturas com mais de 30 metros de altura são, em geral, comportas por perfis formados a frio, e apresentam diversas particularidades. (Freitas (2005,2008,2010)).

Entre as diversas particularidades destas estruturas, é relevante se destacar as ligações entre vigas e colunas que são, em geral, obtidas a partir de encaixes e parafusos através de furos existentes nas colunas, com o objetivo de agilizar a montagem da estrutura. Outra particularidade da estrutura é a sua ligação ao piso do depósito, feito geralmente através de placas de base, também compostas por perfis formados a frio, parafusadas ou soldadas à coluna e presas ao piso através de parabolts.

Estas placas de base, apesar de sua esbelteza, possuem importante função na estabilidade lateral dos sistemas. O objetivo deste trabalho é apresentar uma avaliação da rigidez destas placas de base a partir de simulações numéricas e demonstrar sua importância na estabilidade lateral do sistema. Será ainda apresentada uma equação para a previsão da resistência da placa de base.

2 PLACA DE BASE

Existem diversos tipos de placas de base, que se adaptam ao tipo de sistema de armazenagem e à geometria da coluna. A figura 1 apresenta alguns tipos de placas de base existentes.



Figura 1. Placas de base fixadas às colunas. (Bulldog (2009)).

A placa de base tem como objetivo a fixação das bases da coluna para evitar o seu deslocamento lateral e ainda prover rigidez para a estabilização lateral do pórtico. A avaliação experimental da rigidez proporcionada pelas placas de base é complexa, uma vez que exige a aplicação de uma carga normal à seção da coluna proporcional a uma carga lateral para a geração da rotação a partir da qual será possível avaliar a rigidez da placa. Godley (2007) sugere a montagem experimental apresentada na figura 2. Nesta montagem, observa-se que um bloco de concreto serve de apoio para as placas de base ensaiadas. Utiliza-se um arranjo simétrico, em que duas placas são ensaiadas simultaneamente. A partir de um atuador hidráulico posicionado no topo de uma das colunas, é aplicada uma carga axial F1. Esta carga deve ser mantida constante durante o ensaio, pois ela representa o carregamento aplicado à base pela coluna. Observa-se ainda que tanto o atuador hidráulico quanto o apoio existentes nas extremidades das duas colunas são equipados com rótulas que permitem a livre rotação do sistema durante todo o procedimento do ensaio.

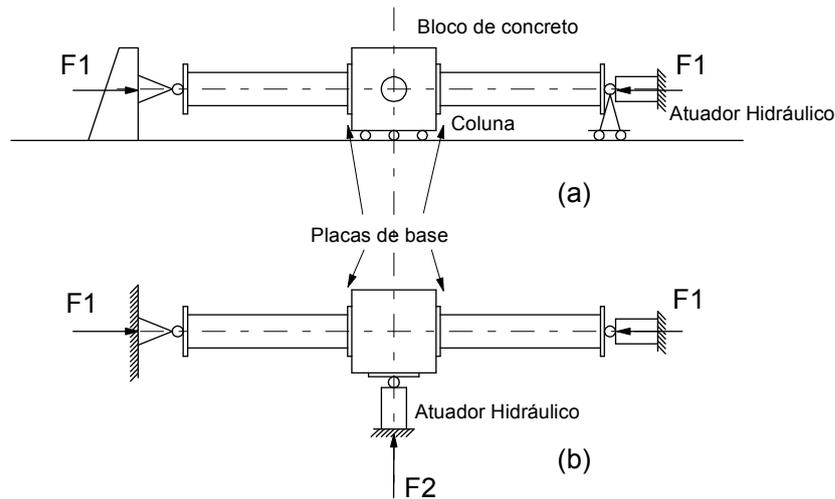


Figura 2. Esquema de ensaio das placas de base (a) Elevação lateral e (b) Planta.

Uma vez aplicada a carga axial, um segundo atuador hidráulico aplica no bloco uma carga perpendicular às colunas F_2 . Esta carga tem a função de instabilizar lateralmente o sistema, provocando assim uma rotação no mesmo. Os deslocamentos laterais obtidos são medidos, e a partir deles é determinada a curva momento rotação para a placa de base em estudo. Ressalta-se que a carga axial aplicada na coluna tem importante papel na rigidez da placa de base, e é aconselhável a sua aplicação em diferentes níveis a fim que se tenham meios de quantificar sua influência no comportamento da coluna (Godley (2007)).

Neste trabalho foi estudada a placa de base utilizada por um fabricante de sistemas de armazenagem industrial nacional (Águia (2004)). A pesquisa foi realizada a partir de simulações via elementos finitos desenvolvidas no pacote comercial ANSYS (2008), em que a metodologia utilizada no ensaio apresentado anteriormente foi inserida no modelo numérico apresentado na figura 3. Análise semelhante a esta foi realizada por Díaz (2006).

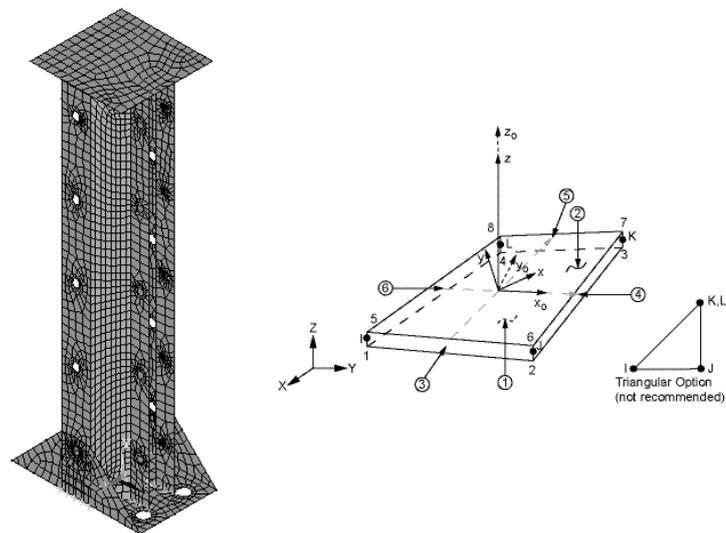


Figura 3. Modelo numérico e elemento SHELL181.

Pode-se observar na figura o modelo gerado e seus componentes. O comprimento da coluna é determinado de modo a evitar que ela entre em colapso pelo efeito da flexão a que está submetida antes que a placa de base apresente seu colapso. A placa posicionada no topo da coluna tem o objetivo de garantir a aplicação da carga sempre vertical e no centro de gravidade da seção durante todos os estágios do carregamento.

Para a união da coluna com a placa de base foram acoplados deslocamentos nos nós dos furos em ambas as peças. Para a simulação do contato entre placa de base e o piso,

foram aplicados deslocamentos na direção vertical nos nós da parte inferior da placa de base em contato com a parte comprimida dos blocos. Na região dos furos da placa de base, para a simulação do efeito dos parafusos, foi feito o acoplamento dos deslocamentos de translação nas três direções. A figura 4 apresenta as condições de apoio entre a coluna e a base e também o acoplamento entre a coluna e a placa de base.

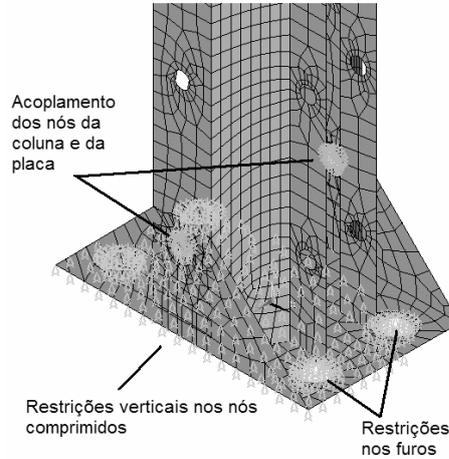


Figura 4. Restrições aplicadas ao modelo.

Na figura 5, são mostrados os pares de contato criados. Os contatos 1 e 3 fazem a interface entre as abas da placa de base e o flange da coluna. Nele são utilizados os elementos de contato TARGE170 e CONTA174. Estes elementos são adequados para o contato entre superfícies. Já o contato entre os nós da extremidade da coluna e o pé da placa de base, representado pelo contato 2, é modelado com os elementos TARGE170 e CONTA175, adequados para o contato entre nós e superfícies. Os elementos são apresentados na tabela 1. As propriedades utilizadas para o aço são $E = 205 \text{ GPa}$ e $f_y = 320,23 \text{ MPa}$.

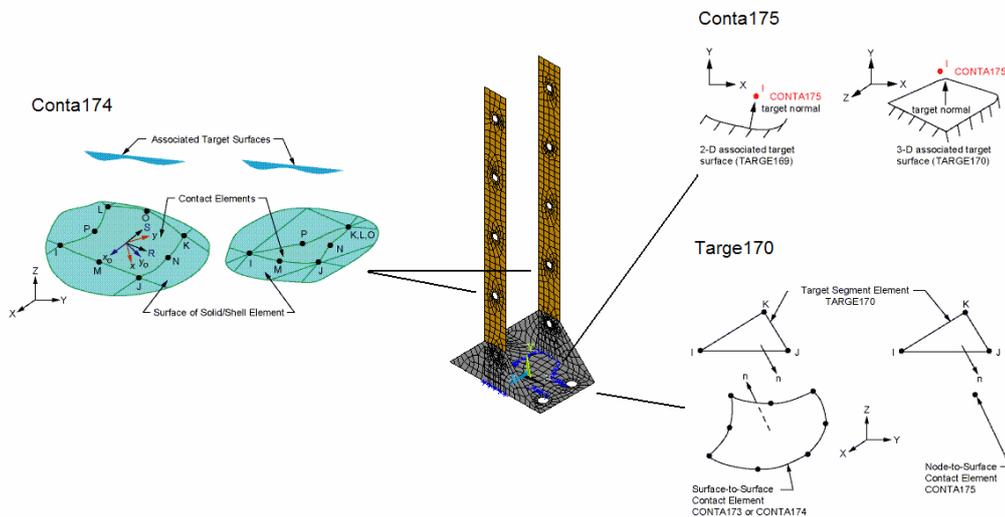


Figura 5. Elementos de Contato.

Tabela 1 – Elementos utilizados na simulação da placa de base.

Elemento	Número de nós	Graus de liberdade	Quantidade
SHELL181	4	UX,UY,UZ,RX,RY,RZ	3356
TARGE170	4	UX,UY,UZ	474
CONTA174	4	UX,UY,UZ	721
CONTA175	1	UX,UY,UZ	46

Foram aplicados no modelo dois casos de carregamento. No primeiro, foi aplicada uma carga axial igual à carga de projeto prevista para a placa de base. No segundo, foi aplicado na extremidade livre da coluna um deslocamento lateral na direção em que se deseja avaliar a rigidez da placa de base, de maneira incremental. Desta forma, ao fim de cada passo de carga, foi determinada a reação da ligação ao deslocamento, permitindo assim a determinação da curva Momento x Rotação necessária para a determinação da rigidez da ligação. A curva obtida é mostrada na figura 6.

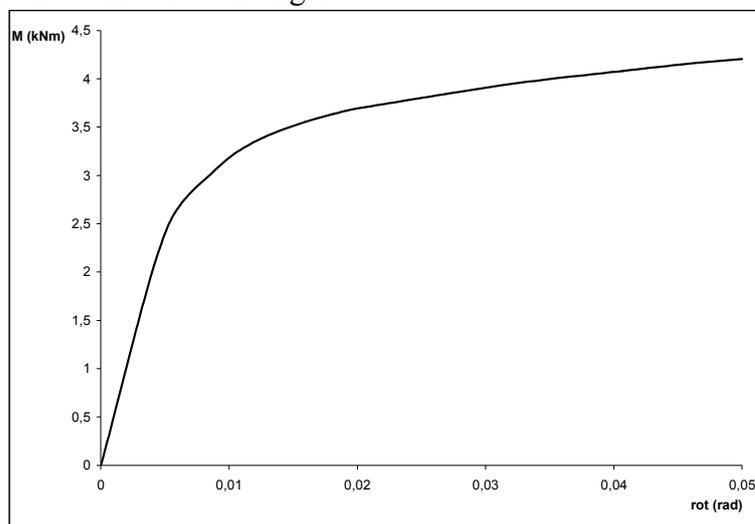


Figura 6. Curva Momento x Rotação para a placa de base.

Observa-se que no trecho inicial da curva a relação entre momento e rotação é linear. A partir de determinado valor de momento, a ligação perde rigidez. Adota-se então como rigidez da placa de base aquela do trecho inicial do diagrama, uma vez que o valor da rigidez no segundo trecho é baixo, sendo, portanto, insuficiente para conferir estabilidade lateral à estrutura. Assim, o valor determinado da rigidez foi 479,78 kNm/rad.

3 INTRODUÇÃO DA RIGIDEZ DA LIGAÇÃO AO PÓRTICO

Para a avaliação da validade da simulação numérica apresentada acima, o valor de rigidez determinado foi introduzido num modelo numérico de um sistema drive-in projetado e fornecido por um fabricante nacional (Águia (2004)), também construído no software ANSYS, e seus resultados foram comparados a resultados experimentais (Souza (2005)). A figura 7 apresenta o modelo numérico do sistema drive-in e uma vista geral do protótipo experimental.

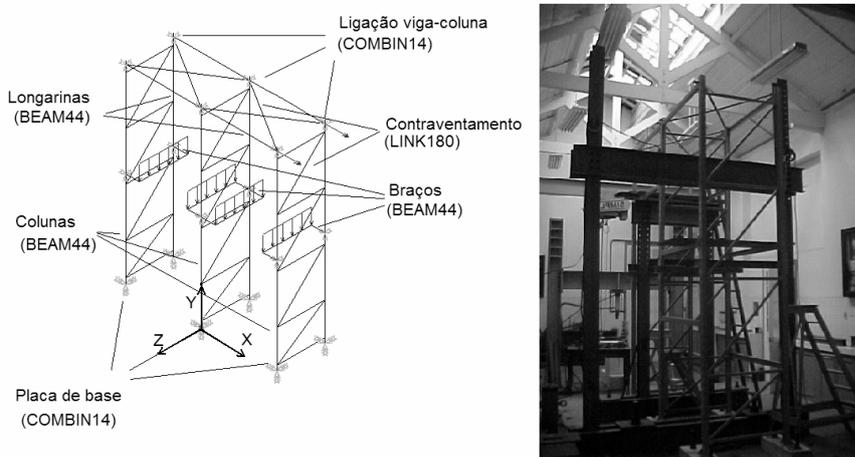


Figura 7 – Modelo numérico gerado no Ansys e protótipo real.

Como pode se observar na figura, na direção transversal à em que se deslocam as empilhadeiras (direção x) não existem vigas ou contraventamentos que assegurem a estabilidade. Neste caso, a estabilização é provida pelas ligações semi-rígidas entre a viga e a coluna e na placa de base. Isto torna fundamental a determinação da rigidez destas ligações.

A determinação da rigidez da ligação entre a viga e a coluna foi feita experimentalmente por Oliveira (2000). Já a rigidez da placa de base foi obtida a partir da análise numérica apresentada no item anterior. Ambas foram introduzidas no modelo através do emprego de elementos de mola COMBIN14. As vigas e colunas foram modeladas com elemento de barra BEAM44. Os contraventamentos na direção longitudinal da estrutura (direção z) foram simulados com elemento de treliça LINK180. A tabela 2 apresenta informações sobre os elementos utilizados na simulação do pórtico.

Tabela 2 – Elementos utilizados na simulação do pórtico.

Elemento	Número de nós	Graus de liberdade	Quantidade
BEAM44	2	UX,UY,UZ,RX,RY,RZ	192
LINK180	2	UX,UY,UZ	30
COMBIN14	2 (nós coincidentes)	RZ	39

O carregamento aplicado, conforme apresentado na figura 7, consistiu em uma carga uniformemente distribuída nas vigas de túnel e uma carga horizontal concentrada aplicada no topo da estrutura. A carga distribuída simula o carregamento imposto pelos paletes na estrutura. A carga horizontal no topo, considerada igual a 1,5% da carga vertical aplicada em cada passo de carga, tem o objetivo de instabilizar lateralmente o sistema. Como parâmetro de controle foram medidos os deslocamentos horizontais no topo do rack.

Os resultados experimentais foram então comparados com os resultados numéricos obtidos a partir da simulação do pórtico, com a aplicação da rigidez da placa de base obtida a partir da simulação numérica apresentada no item 2. A figura 8 apresenta a comparação entre os resultados numéricos e experimentais. Observa-se que existe uma boa correlação entre os resultados numéricos e experimentais. Este fato valida as simulações numéricas realizadas, tanto para representar o comportamento global do sistema como para a determinação do comportamento e da rigidez da placa de base. A partir desta validação, fica comprovada a possibilidade da utilização do modelo da placa de base para análises mais profundas sobre seu comportamento.

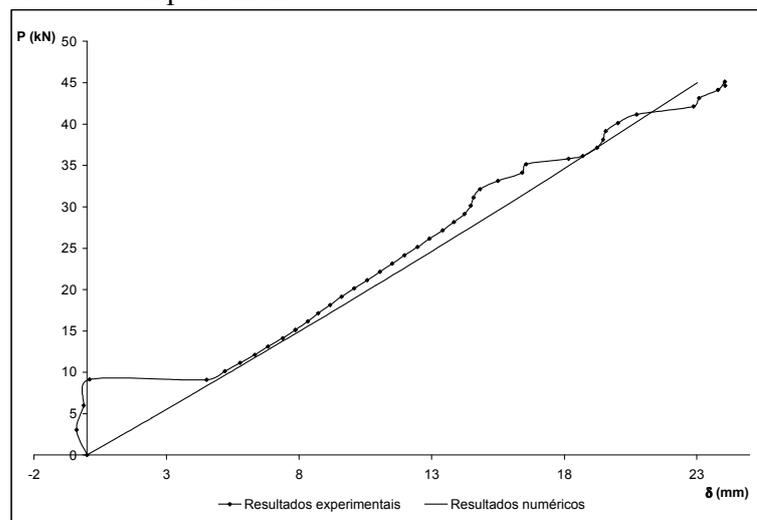


Figura 8. Deslocamentos horizontais no topo da estrutura para os modelos numérico e experimental.

4 COMPORTAMENTO E RESISTÊNCIA DA PLACA DE BASE

Durante o carregamento apresentado no item 2, a placa de base é submetida à flexão excêntrica. Assim, observam-se os deslocamentos apresentados na figura 9. Observa-se claramente a existência de um eixo de rotação alinhado com os furos da placa de base na parte tracionada de sua parte inferior.

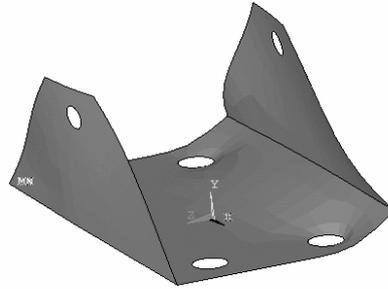


Figura 9. Deslocamentos na placa de base ampliados em 20 vezes.

A partir desta constatação foi estudado o desenvolvimento das tensões na parte inferior da placa de base. A figura 10 mostra a evolução destas tensões. Observa-se claramente o desenvolvimento de uma zona de concentração de tensões na região dos furos. Comparando os resultados apresentados na figura 10 com a curva momento rotação apresentada na figura 6 pode-se notar que para momentos fletores na ordem de 3 kNm a placa começa a perder a sua rigidez, sendo este momento exatamente aquele em que a zona de plastificação se desenvolve. Conclui-se assim que o colapso da placa de base se dá por plastificação na região dos furos.

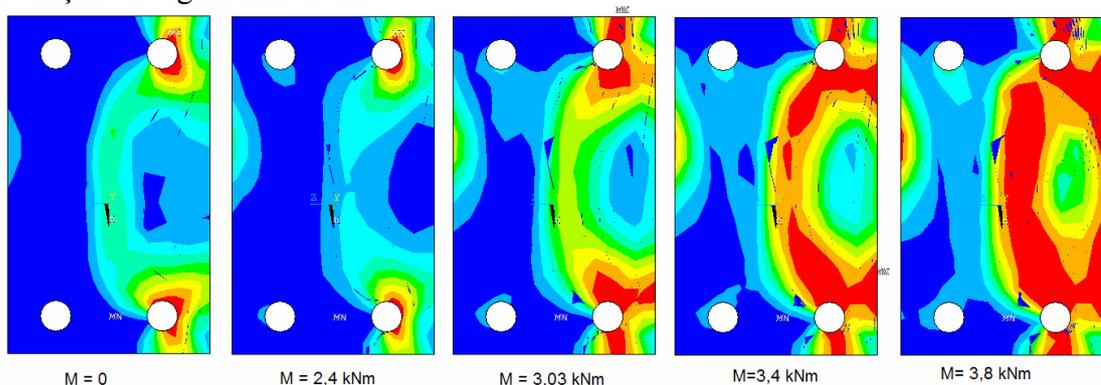


Figura 10. Evolução das tensões de Von Mises na parte inferior da placa de base.

Como antes da plastificação a placa de base apresenta uma rigidez considerável, capaz de garantir a estabilidade lateral do pórtico conforme mostrado no item 3, é importante a determinação do momento fletor limite, acima do qual a placa perde a sua capacidade de suporte. A figura 11 apresenta a placa de base com as forças nela atuantes. Além das componentes devidas ao carregamento (carga P e momento M), observa-se que esta parte tracionada possui uma força resistente, devida à rigidez da placa, dada por:

$$F_R = \frac{M_P}{d}$$

Onde M_P é o momento de plastificação da seção líquida da placa de base, ou seja, da seção mais afetada pelos furos, e d é a distância entre o furo e a borda da placa de base. A partir destas premissas e considerando-se o equilíbrio da aba tracionada, pode-se escrever:

$$\frac{M}{b} = \frac{P}{2} + F_R$$

Assim, o momento máximo suportado pela placa é dado por:

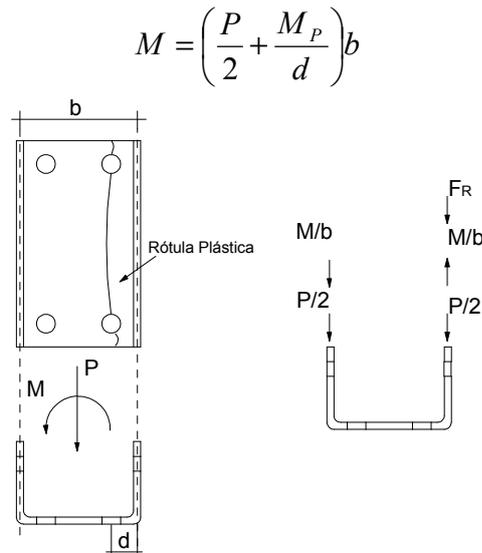


Figura 11. Forças atuantes na placa de base.

A validade desta equação foi comprovada a partir da comparação entre seus resultados e resultados obtidos a partir do modelo numérico apresentado no item 2. Para que a avaliação fosse levada a efeito, variou-se a espessura da placa de base. Foram então simuladas placas com espessuras de 3 mm, 4 mm e 4,7 mm, que é a espessura da placa de base real. A figura 12 apresenta a comparação entre os resultados numéricos e os resultados obtidos a partir da equação apresentada acima. Na figura fica demonstrada a eficiência da placa de base na previsão da resistência da placa de base.

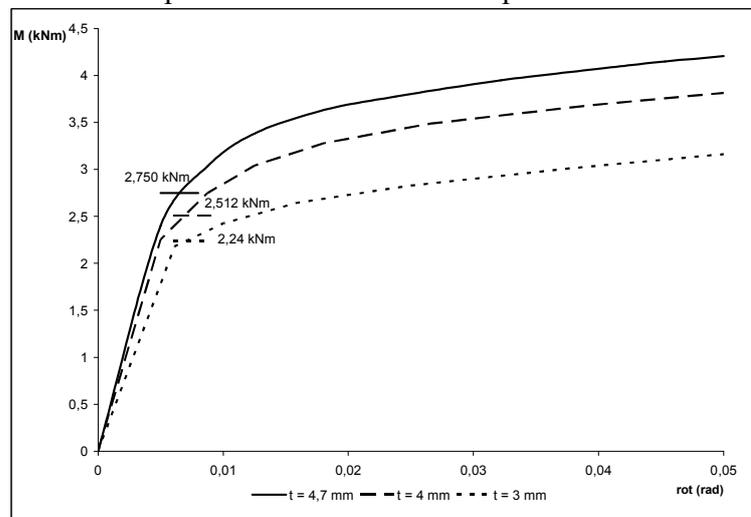


Figura 12. Comparação entre resultados numéricos e resultados obtidos a partir da equação.

5 CONCLUSÕES

Sistemas de armazenagem industrial são importantes devido à crescente demanda por racionalização do espaço. Com a necessidade de estruturas seguras e econômicas, existem vários trabalhos buscando utilizar nestas estruturas sistemas estruturais compatíveis com os perfis formados a frio. Neste trabalho, foi avaliada a influência da placa de base na estabilidade do sistema. Observou-se que a placa de base é um componente fundamental na estabilidade do sistema, principalmente para o modelo drive-in. Observou-se ainda que nos primeiros estágios do carregamento a placa de base apresenta elevada rigidez, e que este valor se deteriora a partir de um determinado momento, o que determina o colapso da

placa. Uma equação que prevê este momento limite da placa foi desenvolvida e seus resultados validados a partir de comparação com resultados numéricos.

Agradecimentos

Os autores agradecem à Águia Sistemas de Armazenagem Industrial, ao CNPq e à FAPEMIG pelo suporte no desenvolvimento do presente trabalho.

REFERÊNCIAS

- Águia, 2004. Projeto de Sistema de Armazenagem Industrial do Tipo “Drive-in”.
- ANSYS, 2008. User’s Manual for revision 11. Swanson Analysis Systems Inc. Inc., Houston, PA.
- Bulldog, 2009. Bulldog Rack Co. www.bulldograck.com/product.htm - 22/10/2009.
- Díaz J.J.D., Nieto P.J.G., Biempica C.B., Rougeot G.F., 2006. Non-linear analysis of unbolted base plates by the FEM and experimental validation. *Thin-Walled Structures* 44(5):529-541.
- Freitas A.M.S., Freitas M.S.R., Souza F.T., 2005. “Analysis of steel storage rack columns”. *Journal of Constructional Steel Research*, 61(8):1135-1146, 2005.
- Freitas, A. M. S.; Freitas, M. S. R.; Souza, F. T., 2008. Sistemas de armazenagem industrial - racks. In: Moacir Kripka, Zacarias Chamberlain. (Org.). *Novos estudos e pesquisas em construção metálica*. 1 ed. Passo Fundo: UPF Editora, v. 1, p. 119-147.
- Freitas A.M.S., Souza F.T., Freitas M.S.R., 2010. “Analysis and behavior of steel storage drive-in racks”. *Thin Walled Structures*, 61(8):1135-1146, 2010.
- Godley M. H. R., 2007. The behaviour of storage racking base plates. In: *Proc. of ICSAS,07*. Oxford: Oxford Brookes University; . p. 433-440.
- Oliveira, A. M., 2000. *Análise Teórico-Experimental de Sistemas Estruturais de Armazenamento (Rack`s)*. Dissertação de Mestrado, UFOP, Ouro Preto.
- Souza F.T., 2005. *Análise teórico-experimental de sistemas aperticados com elementos perfurados em perfis formados a frio - racks*. Dissertação de Mestrado, UFOP, Ouro Preto.

6 DIREITOS AUTORAIS

Os autores são os únicos responsáveis pelo conteúdo do material impresso incluído no seu trabalho.