ANÁLISE NUMÉRICA DE COLUNAS METÁLICAS EM AÇOS DE ALTA E ULTRA–ALTA RESISTÊNCIA.

Matheus Paulim da Silva (PIC/UEM), Giovanna Rafaely Senedese Lemes (PIBIT/UEM), José Osvaldo Ferreira Filho (Coorientador), Carlos Humberto Martins (Orientador). E-mail: chmartins@uem.br

Universidade Estadual de Maringá, Centro de Tecnologia, Departamento de Engenharia Civil, Maringá, PR.

Área e subárea do conhecimento: Engenharias / Engenharia Civil – Estruturas.

Palavras-chave: Flambagem por flexão; Tensões residuais; Análise GMNIA.

RESUMO

O emprego de aços de alta resistência (S460 e S690) e de ultra-alta resistência (S960) permite estruturas mais leves, mas mantém a instabilidade como estado limite crítico. Este trabalho avaliou numericamente a estabilidade de colunas soldadas de seção I nesses três aços, comparando a flambagem elástica e a capacidade última. Cinco colunas (I2-L1 a I2-L5), com esbeltezes reduzidas de 0,92 a 1,56, foram modeladas no programa ABAQUS com elementos de casca S4R e malha de 3 mm, tomando como referência os ensaios de Su, Liang e Zhao. Realizou-se uma análise linear de flambagem, cujas cargas críticas apresentaram diferença média de 3,6% em relação à solução de Euler, seguida de análises geométrica e materialmente não lineares com imperfeições (GMNIA), com imperfeição geométrica inicial de L/1000 e um campo autoequilibrado de tensões residuais de soldagem. A capacidade última cresceu com a resistência do aço: a razão média entre a carga última e a carga crítica foi de 81,6%, 84,4% e 88,0% para S460, S690 e S960. O ganho de capacidade do S960 sobre o S460 alcançou 13,7% na coluna menos esbelta e reduziu-se a 4,2% na mais esbelta, confirmando que o benefício do material é mais bem aproveitado em colunas menos esbeltas, nas quais a instabilidade não impede a mobilização da resistência adicional.

INTRODUÇÃO

A demanda por estruturas mais leves e eficientes tem impulsionado o emprego de aços com limites de escoamento superiores aos dos graus convencionais. Os aços de alta resistência (HSS), como o S460 e o S690, e os de ultra-alta resistência (UHSS), como o S960, permitem reduzir a massa dos elementos e o consumo de recursos associados à fabricação, ao transporte e à montagem. Esse ganho de resistência, contudo, não elimina os problemas de estabilidade: a adoção de seções mais esbeltas pode tornar a flambagem determinante antes do pleno aproveitamento da resistência do material.

Somam-se a isso as imperfeições geométricas iniciais e as tensões residuais de soldagem, que alteram a resposta não linear e a capacidade última. Como o campo de tensões residuais depende pouco do limite de escoamento, sua importância relativa varia entre as classes de aço, e a calibração das curvas de flambagem, inclusive no Eurocode 3, ainda depende do acúmulo de evidências numéricas e experimentais.
Nesse contexto, o objetivo deste trabalho é investigar numericamente, pelo Método dos Elementos Finitos, a estabilidade de colunas metálicas soldadas em aços S460, S690 e S960, comparando a flambagem elástica e a capacidade última obtida por análises não lineares e quantificando a influência do limite de escoamento e da esbeltez.

MATERIAIS E MÉTODOS

O estudo consistiu na modelagem, no programa de elementos finitos ABAQUS, de cinco colunas soldadas de seção I, identificadas como I2-L1 a I2-L5, com base no programa experimental e numérico de Su, Liang e Zhao. Todos os modelos partem da seção nominal I-80×60×6, diferenciando-se pelo comprimento, o que resulta em esbeltezes reduzidas crescentes de 0,92 a 1,56 e permite avaliar a transição de colunas menos esbeltas para modelos de maior esbeltez global.
Adotaram-se elementos de casca S4R com malha de 3 mm, módulo de elasticidade E = 210 GPa e coeficiente de Poisson v = 0,30. As extremidades foram vinculadas de modo a permitir apenas a translação axial de uma delas, com a carga aplicada a um ponto de referência acoplado (Coupling) à face, reproduzindo placas de apoio rígidas. Para isolar o efeito do material, a geometria, a malha, as condições de contorno e o campo de tensões residuais foram mantidos constantes, variando-se apenas o limite de escoamento (460, 690 e 960 MPa).
A análise foi conduzida em duas etapas. Primeiro, uma análise linear de flambagem (Buckle) forneceu as cargas críticas e os modos próprios, empregados como imperfeição geométrica inicial de amplitude L/1000. Em seguida, realizaram-se as análises GMNIA, que consideram conjuntamente a não linearidade geométrica e do material, a imperfeição inicial e um campo autoequilibrado de tensões residuais de soldagem. Manteve-se o mesmo campo absoluto de tensões residuais nos três aços, de modo que o pico de tração (+235 MPa) corresponde a 51,1% de fy no S460, 34,1% no S690 e 24,5% no S960.

RESULTADOS E DISCUSSÃO

Na validação elástica, as cargas críticas numéricas foram comparadas à solução de Euler, com razões entre 0,95 e 1,01 e diferença média de aproximadamente 3,6%, confirmando a adequação da rigidez, dos vínculos e da malha. Como esperado, a carga crítica independe do limite de escoamento: mantidas a geometria, os apoios e o módulo de elasticidade, a mudança de S460 para S690 ou S960 não altera a carga crítica, pois a formulação de Euler depende de E e da inércia, e não de fy. O benefício do material surge, portanto, na fase inelástica. A Tabela 1 reúne as cargas críticas e as capacidades últimas (GMNIA) dos cinco modelos nos três aços.

Tabela 1 – Cargas críticas e capacidades últimas (GMNIA) dos cinco modelos

Modelo	P_{cr} (kN)	P_{ult}, S460 (kN)	P_{ult}, S690 (kN)	P_{ult}, S960 (kN)
I2-L1	1321,90	1023,18	1084,37	1163,27
I2-L2	994,31	798,42	831,64	874,99
I2-L3	756,69	621,73	640,28	665,89
I2-L4	591,95	494,56	506,12	520,92
I2-L5	476,17	402,11	409,83	419,03

P_{cr} obtida na análise linear de flambagem. Razão média P_{ult},GMNIA/P_{cr}: 0,816 (S460); 0,844 (S690); 0,880 (S960).

A capacidade última cresce de forma consistente com o limite de escoamento. Entre o S460 e o S960, o ganho médio foi de aproximadamente 8,0%, mas fortemente dependente da esbeltez: na análise GMNIA, o ganho do S960 sobre o S460 caiu de 13,7% no modelo menos esbelto (I2-L1) para 4,2% no mais esbelto (I2-L5), como mostra a Figura 1(b). Esse comportamento confirma que, à medida que a esbeltez aumenta, a instabilidade global passa a limitar o aproveitamento de fy. A razão entre a carga última e a carga crítica também se aproxima da unidade com o aumento da resistência (Figura 1(a)); para o S960, essa razão manteve-se praticamente constante (0,880) em toda a faixa de esbeltez, ao passo que para o S460 e o S690 ela cresce com a esbeltez.

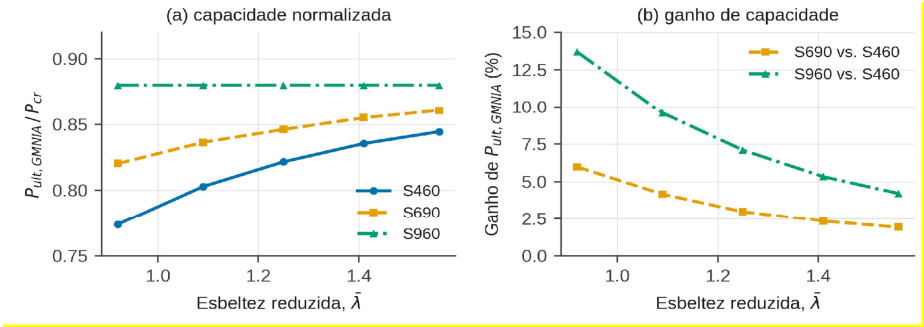


Figura 1 – (a) razão entre a carga última (GMNIA) e a carga crítica e (b) ganho de capacidade em relação ao S460, em função da esbeltez reduzida.

A consideração conjunta da não linearidade, da imperfeição geométrica e das tensões residuais (GMNIA) reduziu a capacidade em cerca de 6,6% em relação à análise sem esses efeitos, nas três classes; como o mesmo campo absoluto de tensões residuais representa parcela decrescente de fy, sua influência relativa é menor nos aços mais resistentes. Todos os modelos apresentaram modo fundamental de flambagem global por flexão; a Figura 2 ilustra o obtido para o modelo mais esbelto (I2-L5) e a Figura 3 ilustra o resultado de um perfil com sua deformada.

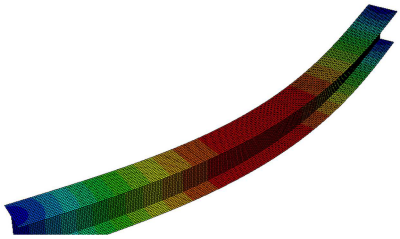


Figura 2 – Modo fundamental de flambagem global por flexão do modelo I2-L5.

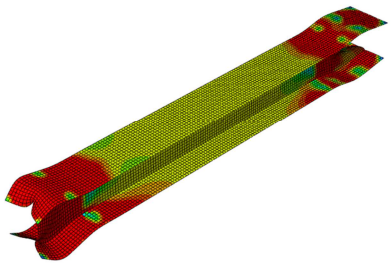


Figura 3 – Configuração deformada e distribuição de tensões residuais obtida na análise GMNIA.

CONCLUSÕES

O modelo desenvolvido no ABAQUS reproduziu adequadamente os modos globais de flambagem, com diferença média de aproximadamente 3,6% em relação às cargas críticas de Euler, o que valida a estratégia de modelagem.
A carga crítica mostrou-se essencialmente independente do limite de escoamento quando geometria, módulo de elasticidade e vínculos permanecem constantes; o efeito da classe do aço manifesta-se nas análises não lineares. Nas GMNIA, as razões médias entre a carga última e a carga crítica foram de 81,6%, 84,4% e 88,0% para S460, S690 e S960, e o ganho médio de capacidade entre S460 e S960 (cerca de 8,0%) caiu de 13,7% no I2-L1 para 4,2% no I2-L5, de modo que a maior resistência do material é mais bem aproveitada nas colunas menos esbeltas.

AGRADECIMENTOS

Os autores agradecem à Universidade Estadual de Maringá, por meio do Programa de Iniciação Científica (PIC/UEM), pelo apoio à realização desta pesquisa.

REFERÊNCIAS

BAN, H.; SHI, G.; SHI, Y.; BRADFORD, M. A. Experimental investigation of the overall buckling behaviour of 960 MPa high strength steel columns. **Journal of Constructional Steel Research**, v. 88, p. 256-266, 2013.

CEN. **Eurocode 3: design of steel structures**. Brussels: European Committee for Standardization, 2024.

FERREIRA FILHO, J. O.; SIMÕES DA SILVA, L.; TANKOVA, T.; CARVALHO, H. Influence of geometrical imperfections and residual stresses on the reliability of high strength steel welded I-section columns using Monte Carlo simulation. **Journal of Constructional Steel Research**, v. 215, 108548, 2024.

SU, A.; LIANG, Y.; ZHAO, O. Experimental and numerical studies of S960 ultra-high strength steel welded I-section columns. **Thin-Walled Structures**, v. 159, 107166, 2021.