

Análise de Confiabilidade Estrutural de Pórticos Metálicos Planos Considerando a Não Linearidade Geométrica

Bruno Márcio Agostini.
Instituto Federal do Sudeste de Minas Gerais, Brasil

Marcílio Sousa da Rocha Freitas, Ricardo Azoubel da Mota Silveira, Andréa Regina Dias da Silva.
Universidade Federal de Ouro Preto, Brasil

1. INTRODUÇÃO

Em um projeto estrutural procura-se a solução mais econômica e segura possível. Isso significa que a estrutura deve apresentar-se resistente, estável, durável e econômica. Por outro lado, sabe-se que o risco é inerente às estruturas pois as incertezas estão sempre presentes nas variáveis envolvidas.

Tradicionalmente busca-se obter a confiabilidade de sistemas estruturais através da utilização de coeficientes de segurança e da adoção de suposições conservadoras nos métodos de cálculo. A fim de evoluir nesse processo emprega-se a Teoria da Confiabilidade Estrutural com o objetivo de melhor avaliar e obter a segurança estrutural.

A confiabilidade pode ser prevista com base nos modelos mecânicos que governam a falha e na descrição estatística das variáveis de resistência e de solicitação. O enfoque probabilístico adotado para a análise de confiabilidade de estruturas se deve ao fato de que importantes parâmetros envolvidos são de natureza aleatória. Desta forma, busca-se uma melhor avaliação da probabilidade de falha e consequente obtenção de estruturas mais seguras.

2. OBJETIVOS

O presente artigo envolve a implementação computacional conjunta de teorias existentes relacionadas à confiabilidade estrutural e à análise avançada de estruturas. A pesquisa realizada foi um primeiro passo do grupo na busca da avaliação da segurança estrutural de pórticos metálicos projetados com análise avançada.

O presente artigo aborda o cálculo do nível de segurança de estruturas projetadas com a consideração dos efeitos da não linearidade geométrica ao se fixar determinado deslocamento como estado limite de serviço (ELS). Para realizar esse cálculo, desenvolveu-se um programa computacional, Módulo de Confiabilidade Estrutural (MCE) para a análise de confiabilidade estrutural. Esse programa é composto por módulos interligados que realizam a análise de confiabilidade e a análise estrutural de pórticos planos metálicos. A análise de confiabilidade é realizada com base no método First-Order Reliability Method (FORM). Para a análise estrutural de pórticos planos é utilizado o programa Computational System for Advanced Structural Analysis (CS-ASA) [1], desenvolvido por pesquisadores da Universidade Federal de Ouro Preto, o qual possui recursos para considerar o comportamento semirrígido das ligações, a não linearidade física e também geométrica na análise da estrutura.

3. MATERIAL E MÉTODO

Para a criação do programa computacional, MCE, utilizou-se a linguagem de programação Fortran 95 no ambiente de programação Microsoft Visual Studio 2010 [2]. O MCE foi projetado para uma integração com as rotinas estatísticas e matemáticas da biblioteca numérica para Fortran, IMSL™, versão 6.0, [3] assim como para uma integração com o programa de análise estrutural CS-ASA [1].

O MCE foi criado para trabalhar com função de falha (equação de estado limite) não analítica permitindo a análise de confiabilidade de diferentes tipos de pórticos planos. A condição de não atendimento a determinado estado limite está vinculada a um único modo de falha, relacionado a um deslocamento específico. De posse do deslocamento limite (dl) para o nó e direção em análise assim como do deslocamento calculado (dc) em cada chamada à solução não linear do programa CS-ASA [1], a função de falha $G(u)=1-(dc/dl)$ é avaliada. A chamada à solução não linear ocorre para acréscimos a direita e à esquerda no valor de cada variável aleatória. O resultado da avaliação da função de falha é retornado para a

seqüência de cálculo do método FORM para subsidiar a determinação de gradientes, utilizando o processo de diferenças finitas central.

A implementação realizada permite considerar como variáveis aleatórias um módulo de elasticidade, duas áreas de seção transversal, dois momentos de inércia, três ações permanentes e cinco ações acidentais. Visando modelar essas variáveis, foram implementadas as distribuições: normal, lognormal e extremo do tipo 1(Máximo). Para as duas últimas distribuições foram criadas duas subrotinas denominadas: *lognormal_normalequivalente* e *tipo1max_normalequivalente*. Essas subrotinas possuem vínculo específico com o módulo de confiabilidade e objetivam realizar o cálculo de média e desvio padrão equivalentes ao de uma distribuição normal.

Para a determinação do ponto de partida no espaço reduzido foi utilizada a transformação de Nataf [4] e para a determinação do ponto de projeto no espaço reduzido o algoritmo HLRF [5, 6].

Equações para a determinação de índices de sensibilidade e fatores de importância, conforme apresentado por Sagrilo [7], também foram implementadas no MCE.

Para a realização da integração com a biblioteca IMSL™ [3] foi necessário realizar ajustes na configuração do projeto criado no ambiente do Microsoft Visual Studio 2010 [2]. Para essa configuração seguiu-se as orientações disponibilizadas no site da Intel® [8].

O processo de análise de confiabilidade adota a estrutura original do programa CS-ASA [1]. Esse programa trabalha com os arquivos de entrada 1, 2 e 3. O arquivo 1 traz informações gerais como tipo de análise, coordenadas, carregamentos, propriedade do material e das seções transversais. O arquivo 2 contém os parâmetros relacionados com a estratégia de solução não linear. O arquivo 3 refere-se à análise dinâmica, a qual não foi abordada no presente trabalho.

Para a realização de análise de confiabilidade é necessário que o arquivo de entrada 4 seja criado. A leitura desse arquivo de texto é realizada somente pelo MCE. Os parâmetros que compõem o arquivo de entrada 4, na seqüência da primeira para a última linha do arquivo, são: método de análise; número de iterações para o método FORM; tolerância para interrupção do processo iterativo que envolve o método FORM; deslocamento limite em análise; parâmetro numérico de diferenças finitas para a realização de acréscimos à direita e à esquerda; indicador da existência de variável correlacionada; e por fim, numa mesma linha para cada variável aleatória: tipo de variável aleatória, valores de média e desvio padrão.

Integrando os arquivos de saída do CS-ASA [1] foi criado o arquivo, “arquivo 4.out”, o qual traz tanto a impressão dos dados de entrada relacionados com a análise de confiabilidade como também os resultados dessa análise.

A análise de confiabilidade tem início a partir do programa CS-ASA [1], com a leitura do arquivo de entrada 1. Assim que a opção por realização de uma análise de confiabilidade é identificada no arquivo 1, o MCE é acionado. Caso não seja definida a análise de confiabilidade, a leitura do arquivo 1 prossegue normalmente para a realização de um dos diferentes tipos de análise que compõem o CS-ASA [1]. Com a gerência do processo de análise, o MCE realiza chamadas à subrotina *m_load* e também à subrotina *solnl*, pertencentes ao programa CS-ASA [1]. A subrotina *m_load* tem a função de realizar a montagem do vetor de cargas nodais. Já a subrotina *solnl* tem a função de obter a solução não linear e linear da estrutura em análise, fornecendo a resposta estrutural em termos de deslocamentos.

Na Figura 1 apresenta-se um fluxograma que indica em caixa tracejada a nova funcionalidade do CS-ASA [1]: análise de confiabilidade pelo método FORM. Um aspecto importante da Figura 1 é a interação entre a análise de confiabilidade e a análise estática, indicada em seta dupla. Essa interação ocorre somente com comando partindo do MCE e visa obter a resposta estrutural em termos de deslocamentos de determinado pórtico plano. Na Figura 2 apresenta-se o fluxograma do MCE.

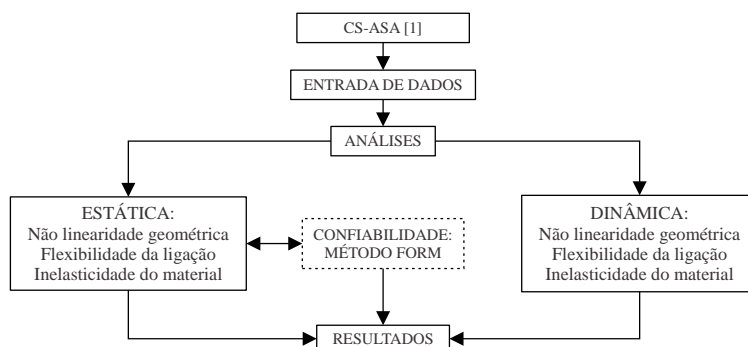


Figura 1 - Nova funcionalidade do programa CS-ASA [1]: análise de confiabilidade (tracejado)

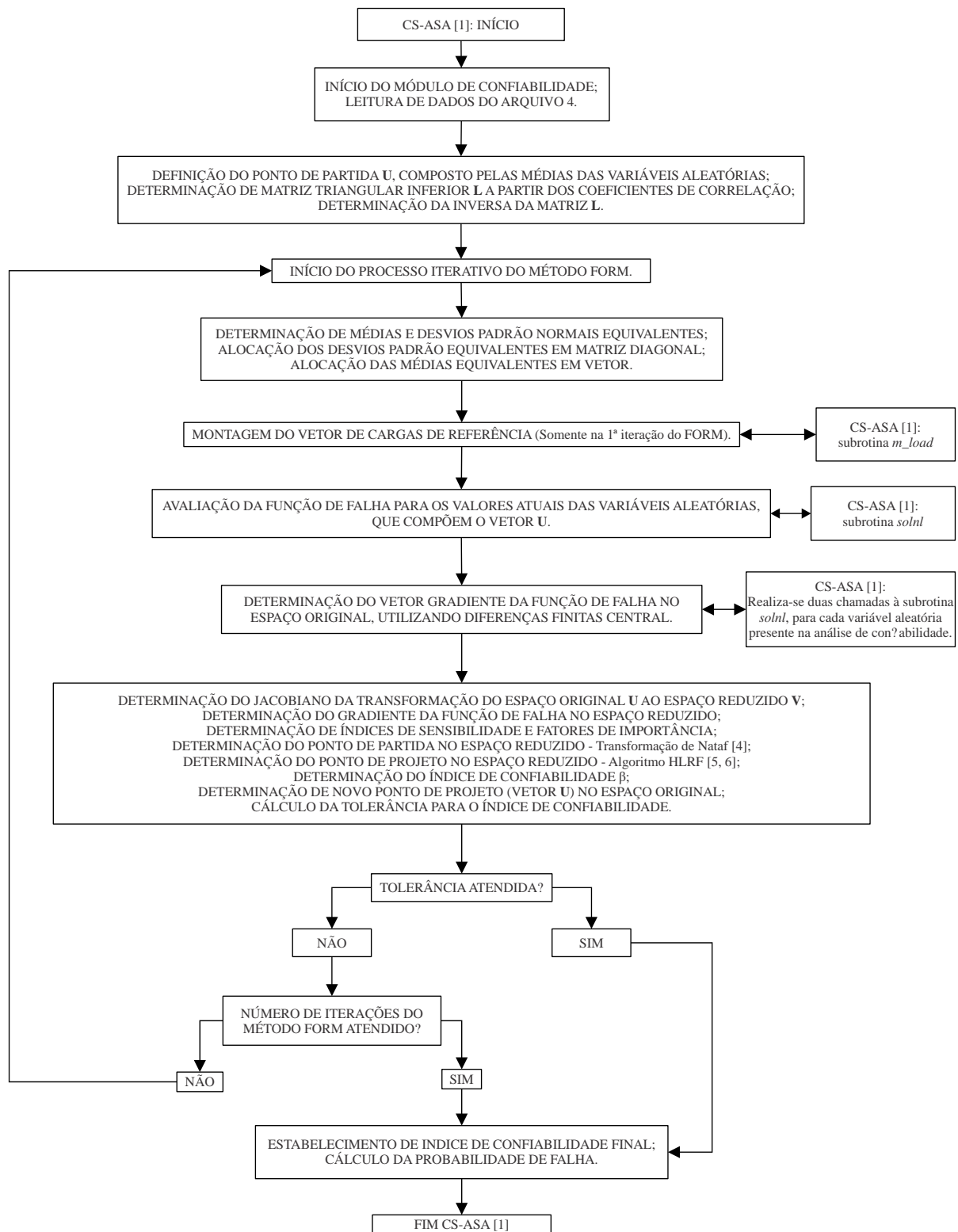


Figura 2 - Fluxograma do MCE

4. RESULTADOS

Após a realização de validação do MCE com base no trabalho de Agostini e Freitas [9], foram analisadas diferentes estruturas. Os resultados encontrados são apresentados de acordo com os exemplos 1, 2 e 3. Para esses exemplos realizou-se análise de confiabilidade estrutural com base em análise linear e análise não linear geométrica e comparou com os resultados obtidos por Haldar e Mahadevan [10]. Dentre as principais considerações para a realização de análise não linear geométrica tem-se: adoção de formulação de segunda ordem SOF2 [2], utilização de estratégia de incremento constante de carga, utilização de estratégia

de iteração a carga constante, fixação do incremento inicial do parâmetro de carga com o valor de 10% da carga total, divisão do carregamento em 10 incrementos e adoção do Método Newton Raphson padrão. O número de iterações do método FORM adotado nas análises foi definido com o mesmo valor indicado em Haldar e Mahadevan [10]. No entanto, nas análises em que o número de iterações do método FORM resultou em valor inferior ao da bibliografia de referência, apresentou-se o valor gerado pelo MCE, como consequência de uma tolerância de interrupção igual a 10^{-4} .

4.1 Exemplo 1: Pórtico Plano com Três Elementos

A estrutura da Figura 3 é a primeira estrutura a ser analisada. As propriedades estatísticas das variáveis aleatórias consideradas na análise desse pórtico estão descritas na Tabela 1. Realizou-se análise de confiabilidade estrutural tanto com base em análise linear como não linear geométrica, sendo que os resultados dessas duas situações estão apresentados, respectivamente, na Tabela 2 e na Tabela 3. O estado limite analisado refere-se ao deslocamento lateral do 2, limitado a 0,0114 m (altura/400) em serviço.

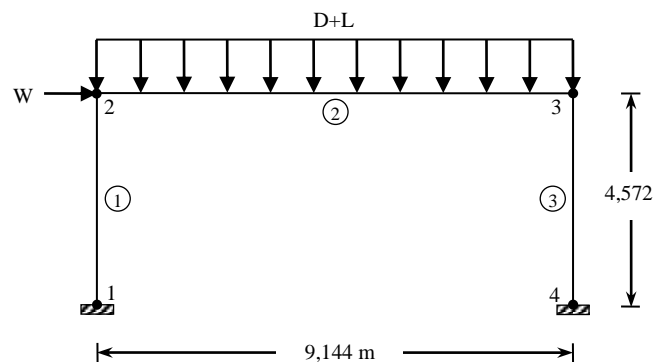


Figura 3 - Pórtico plano com três elementos e ligações semirrígidas: geometria, carregamento e discretização

Tabela 1 - Propriedades estatísticas das variáveis aleatórias

Variável	Unidade	Valor nominal	Média / Valor nominal	Coefficiente de variação	Tipo de distribuição
E	MPa	199948,04	1,00	0,06	Lognormal
A	m ²	0,01271	1,00	0,05	Lognormal
I	m ⁴	0,0003970848	1,00	0,05	Lognormal
D	kN/m	43,78	1,05	0,10	Lognormal
L	kN/m	16,05	1,00	0,25	Ext. Tipo 1
W	kN	28,91	0,78	0,37	Ext. Tipo 1

Tabela 2 - Resultados da análise de confiabilidade, com base em análise estática linear

Variável	Índice de sensibilidade		Valor inicial da variável		Valor final da variável	
	Haldar e Mahadevan [10]	Presente trabalho	Haldar e Mahadevan [10]	Presente trabalho	Haldar e Mahadevan [10]	Presente trabalho
E	-0,2183	-0,2024	199948,04	199948,04	190490,57	187695,36
A	-0,0051	-0,0050	0,01271	0,01271	0,012697	0,012678
I	-0,1769	-0,1637	0,0003970848	0,0003970848	0,0003854594	0,0003804941
D	0,0044	0,0047	45,97	45,97	46,08	45,85
L	0,0035	0,0060	16,05	16,05	16,25	15,50
W	0,9597	0,9655	22,55	22,55	143,81	113,08
Função de performance	-	-	0,8071	0,8062	-0,0009	-0,0002
Índice de confiabilidade (β)	-	-	12,84	12,76	5,96	5,06
Probabilidade de falha	-	-	-	-	-	2,057e-7
Nº de iterações	-	-	-	-	4	4

Tabela 3 - Resultados da análise de confiabilidade, com base em análise estática não linear geométrica

Variável	Índice de sensibilidade		Valor inicial da variável		Valor final da variável	
	Haldar e Mahadevan [10]	Presente trabalho	Haldar e Mahadevan [10]	Presente trabalho	Haldar e Mahadevan [10]	Presente trabalho
E	-0,0275	-0,2037	199948,04	199948,04	195550,36	187706,14
A	-0,0007	-0,0049	0,01271	0,01271	0,012697	0,012679
I	-0,1609	-0,1649	0,0003970848	0,0003970848	0,0003805562	0,0003804954
D	0,0086	0,0081	45,97	45,97	46,11	45,93
L	0,0068	0,0063	16,05	16,05	16,74	15,50
W	0,9865	0,9650	22,55	22,55	130,96	111,85
Função de performance	-	-	0,7989	0,8044	-0,0008	-0,00000002
Índice de confiabilidade (β)	-	-	12,54	12,61	5,47	5,03
Probabilidade de falha	-	-	-	-	-	2,488e-7
Nº de iterações	-	-	-	-	6	5

Analisando os resultados indicados nas Tabelas 2 e 3 percebe-se proximidade entre os resultados da análise de confiabilidade, gerada com base em análise linear e não linear geométrica. Haldar e Mahadevan [10] também constataram esse fato, no entanto os resultados obtidos indicam menor variação do índice de confiabilidade com a consideração da não linearidade geométrica. A partir dos índices de sensibilidade indicados nessas tabelas detecta-se a grande dependência do estado limite analisado com a carga W , e de forma mais discreta com relação ao momento de inércia. Por fim, salienta-se que o número de iterações e o valor final da função de falha indicam boa convergência do MCE.

4.2 Exemplo 2: Pórtico Plano com Sete Elementos

O segundo exemplo diz respeito ao pórtico plano apresentado na Figura 4. Na Tabela 4 estão indicadas as características das variáveis aleatórias envolvidas, sendo que A_v e I_v correspondem à área e momento de inércia das vigas e, A_c e I_c referem-se às colunas. A estrutura do pórtico em questão é composta por perfis W18x55 para as vigas e W14x68 para as colunas, com dimensionamento efetuado pelos autores Haldar e Mahadevan [10] seguindo prescrições LRFD [11]. Como estado limite nesse exemplo foi estabelecido o deslocamento vertical do nó 4 fixado em 0,0203 m (vão/360) em serviço. Os resultados apresentados na Tabela 5 dizem respeito às análises linear e não linear geométrica. Já na Tabela 6 tem-se uma comparação entre os resultados disponibilizados por Haldar e Mahadevan [10] e os obtidos neste trabalho.

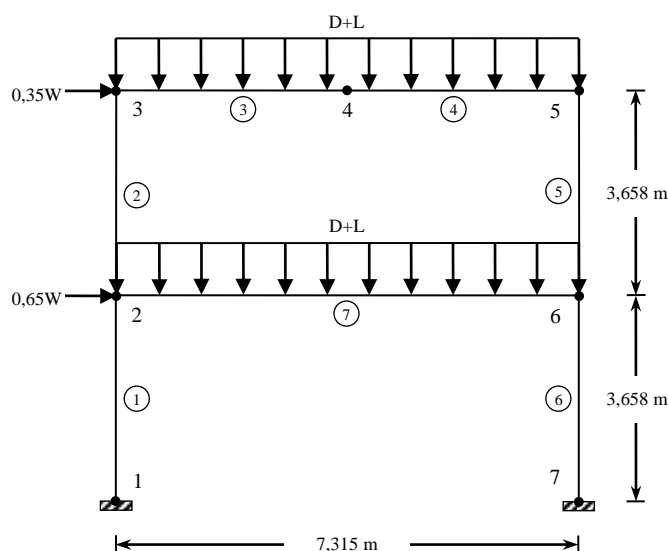


Figura 4 - Pórtico plano com sete elementos: geometria, carregamento e discretização

Tabela 4 - Propriedades estatísticas das variáveis aleatórias

Variável	Unidade	Valor nominal	Média / Valor nominal	Coefficiente de variação	Tipo de distribuição
E	MPa	199948,04	1,00	0,06	Lognormal
A_v	m ²	0,010452	1,00	0,05	Lognormal
A_c	m ²	0,012903	1,00	0,05	Lognormal
I_v	m ⁴	0,0003704460	1,00	0,05	Lognormal
I_c	m ⁴	0,0003009353	1,00	0,05	Lognormal
D	kN/m	43,78	1,05	0,10	Lognormal
L	kN/m	16,05	1,00	0,25	Ext. Tipo 1
W	kN	57,03	0,78	0,37	Ext. Tipo 1

Tabela 5 - Resultados obtidos considerando o deslocamento vertical do nó 4

Variável	Índice de sensibilidade		Valor inicial da variável		Valor final da variável	
	Análise linear	Análise não linear geométrica	Análise linear	Análise não linear geométrica	Análise linear	Análise não linear geométrica
E	-0,4022	-0,4040	199948,04	199948,04	181652,25	181724,64
A_v	-0,0042	-0,0041	0,010452	0,010452	0,010430	0,010431
A_c	-0,0254	-0,0253	0,012903	0,012903	0,012823	0,012824
I_v	-0,2034	-0,2047	0,0003704460	0,0003704460	0,0003555872	0,0003556153
I_c	-0,1023	-0,1027	0,0003009353	0,0003009353	0,0002946156	0,0002946484
D	0,4012	0,4054	45,97	45,97	53,48	53,50
L	0,7904	0,7870	16,05	16,05	35,82	35,40
W	-0,0004	-0,00008	44,48	44,48	41,76	41,77
Função de performance	-	-	0,3893	0,3873	0,0000005	0,0000006
Índice de confiabilidade (β)	-	-	5,47	5,41	3,91	3,87
Probabilidade de falha	-	-	-	-	4,697e-5	5,395e-5
Nº de iterações	-	-	-	-	6	6

Tabela 6 - Valores de β obtidos no presente trabalho e determinados por Haldar e Mahadevan [10]

	β (análise linear)		β (análise não linear geométrica)	
	Haldar e Mahadevan [10]	Presente trabalho	Haldar e Mahadevan [10]	Presente trabalho
Deslocamento vertical do nó 4	4,40	3,91	4,41	3,87

Diante da análise dos resultados das Tabela 5 percebe-se pouca diferença de valores para a análise de confiabilidade realizada com base em análise linear e não linear geométrica. Entende-se que essa pouca diferença ocorreu, pois, os parâmetros de geometria, carregamento e propriedade do material que compõem essa estrutura, não propiciam a ocorrência de deslocamentos que gerem considerável manifestação de não linearidade geométrica dentro do ELS. Haldar e Mahadevan [10] afirmam que para os casos linear e não linear e ELS, os índices de confiabilidades obtidos, e indicados na Tabela 6, são muito similares pois a deformação estrutural para o caso linear não apresenta diferenças significantes se comparada ao caso não linear.

Com relação aos índices de sensibilidade indicados na Tabela 5, percebe-se a maior influência das cargas D e L, módulo de elasticidade e momento de inércia da viga, para a confiabilidade da estrutura. Nesse caso, possíveis alterações de D, L, E ou I_v afetarão de forma mais acentuada o deslocamento vertical do nó quatro, o qual está vinculado ao estado limite estabelecido.

4.3 Exemplo 3: Pórtico Plano com Onze Elementos

O terceiro exemplo, apresentado na Figura 5, é composto pelo pórtico com disposição assimétrica de seus elementos. As propriedades estatísticas das variáveis relacionadas à estrutura em questão estão indicadas na Tabela 7 com os subíndices “v” e “c” para área e momento de inércia significando, respectivamente, viga e coluna. O deslocamento lateral do nó 1 foi limitado em 0,0254 m, configurando, portanto, o ELS considerado no exemplo 3. Na Tabela 8 são apresentados os resultados da análise de confiabilidade realizada para o presente exemplo, tanto com base em análise linear como não linear geométrica. Já na Tabela 9 tem-se um resumo para os índices de confiabilidade β determinados a partir de análise linear e não linear geométrica incluindo valores obtidos por Haldar e Mahadevan [10].

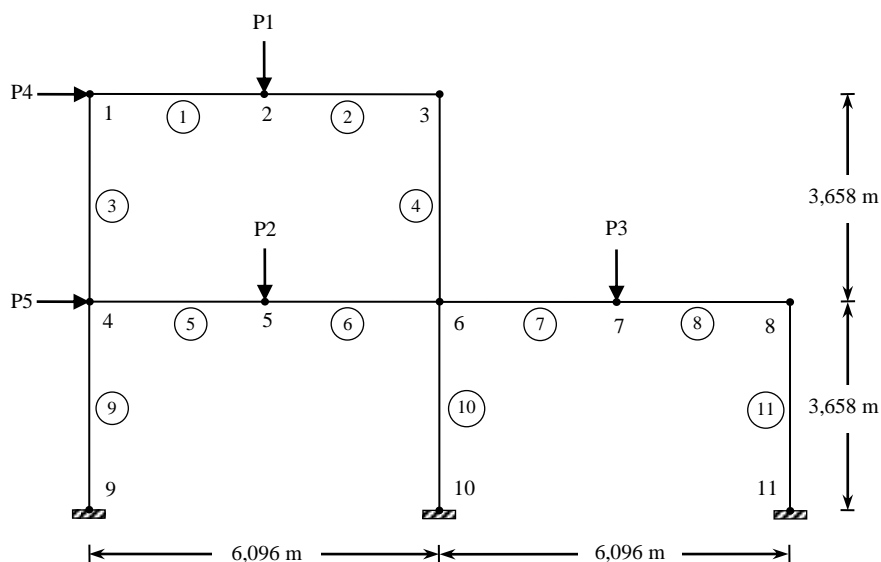


Figura 5 - Pórtico plano com onze elementos: geometria, carregamento e discretização

Tabela 7 - Propriedades estatísticas das variáveis aleatórias

Variável	Unidade	Média	Coefficiente de variação	Tipo de distribuição
E	MPa	199948,04	0,06	Lognormal
A_v	m ²	0,007613	0,05	Lognormal
A_c	m ²	0,011419	0,05	Lognormal
I_v	m ⁴	0,0002151916	0,05	Lognormal
I_c	m ⁴	0,0001431836	0,05	Lognormal
$P1$ (Permanente)	kN	44,48	0,10	Lognormal
$P2$ (Permanente)	kN	88,96	0,10	Lognormal
$P3$ (Permanente)	kN	88,96	0,10	Lognormal
$P4$ (Vento)	kN	44,48	0,37	Ext. Tipo 1
$P5$ (Vento)	kN	22,24	0,37	Ext. Tipo 1

Tabela 8 - Resultados obtidos considerando o deslocamento lateral do nó 1

Variável	Índice de sensibilidade		Valor inicial da variável		Valor final da variável	
	Análise linear	Análise não linear	Análise linear	Análise não linear	Análise linear	Análise não linear
E	-0,182986	-0,183625	199948,04	199948,04	194716,96	194731,43
A_v	-0,001573	-0,001566	0,007613	0,007613	0,007602	0,07602
A_c	-0,001099	-0,000923	0,011419	0,011419	0,011403	0,011404
I_v	-0,065100	-0,065437	0,0002151916	0,0002151916	0,0002133527	0,0002133548
I_c	-0,084845	-0,085225	0,0001431836	0,0001431836	0,0001416446	0,0001416474
$P1$	-0,001382	-0,000862	44,48	44,48	44,25	44,25
$P2$	0,008176	0,008469	88,96	88,96	88,68	88,69
$P3$	0,003952	0,004246	88,96	88,96	88,60	88,60
$P4$	0,973712	0,973498	44,48	44,48	91,69	91,21
$P5$	0,082917	0,083330	22,24	22,24	22,32	22,31
Função de performance	-	-	0,4763	0,4743	-0,0000002	-0,0000002
Índice de confiabilidade (β)	-	-	3,289	3,262	2,254	2,240
Probabilidade de falha	-	-	-	-	1,208e-2	1,255e-2
Nº de iterações	-	-	-	-	4	4

Tabela 9 - Valores de β obtidos no presente trabalho e determinados por Haldar e Mahadevan [10]

	β (análise linear)		β (análise não linear geométrica)	
	Haldar e Mahadevan [10]	Presente trabalho	Haldar e Mahadevan [10]	Presente trabalho
Deslocamento lateral do nó 1	2,283	2,254	2,274	2,240

Comparando-se os resultados com aqueles determinados por Haldar e Mahadevan [10] e indicados na Tabela 8, detecta-se boa concordância entre os valores. Analisando os resultados apresentados nas Tabelas 8 e 9 percebe-se, principalmente, que a consideração de não linearidade geométrica não resultou em grandes diferenças no índice de confiabilidade, índices de sensibilidade e valores finais das variáveis. Assim como já observado para os exemplos anteriores, entende-se que para o carregamento incidente, propriedade do material e características geométricas dessa estrutura, não ocorrem grandes manifestações dos efeitos da não linearidade geométrica diante do estado limite em questão. Percebe-se também, com base nos índices de sensibilidade indicados na Tabela 8, que a carga $P4$ e o módulo de elasticidade são as variáveis com maior influência na confiabilidade do pórtico analisado.

5. CONCLUSÕES

O estudo realizado buscou responder qual a influência na confiabilidade de pórticos metálicos planos ao ser adotada análise linear ou não linear geométrica. Para as três análises de confiabilidade apresentadas, as quais envolveram somente o ELS, ficou evidenciado uma diminuição do índice de confiabilidade β quando se inseriu os efeitos da não linearidade geométrica. Essa diminuição ocorreu de forma discreta uma vez que os deslocamentos obtidos para as estruturas analisadas proporcionaram baixa manifestação de efeitos de segunda ordem.

Com relação ao MCE destaca-se os seguintes aspectos: convergência em todas as análises realizadas; possibilidade de inclusão de outras funcionalidades relativas à confiabilidade estrutural; funcionamento integrado ao programa de análise estrutural CS-ASA [1] viabilizando a implementação futura de outros efeitos de segunda ordem.

6. AGRADECIMENTOS

Os autores agradecem à Universidade Federal de Ouro Preto e ao Campus São João del-Rei do Instituto Federal do Sudeste de Minas Gerais.

7. REFERÊNCIAS

- [1] SILVA, A. R. D. *Sistema Computacional para Análise Avançada Estática e Dinâmica de Estruturas Metálicas*. Tese (Doutorado em Engenharia Civil) - Universidade Federal de Ouro Preto, Ouro Preto-MG. 322p. (2009).

- [2] MICROSOFT VISUAL STUDIO 2010. Version 10.0.30319.1 RTMRrel. Microsoft Corporation, 2010.
- [3] IMSL™ FORTRAN NUMERICAL LIBRARY. Version 6.0. Houston: Visual Numerics®, (2006).
- [4] MELCHERS, R. E. *Structural Reliability Analysis and Prediction*. 2nd ed. John Wiley & Sons Ltd, England, 431p. (1999).
- [5] HASOFER, A. M., LIND, N. C. “An Exact and Invariant First-Order Reliability Format.” *Journal of Engineering Mechanics*, v.100, p.111-121, (1974).
- [6] RACKWITZ, R., FIESSLER, B. “Structural Reliability under Combined Random Load Sequences.” *Computer and Structures*, v.9, p.489-494, (1978).
- [7] SAGRILO, L. V. S. “Confiabilidade Estrutural - Notas de Aula”, COPPE/UFRJ, (2004).
- [8] INTEL® DEVELOPER ZONE. Santa Clara, c2011. *Installing and using the IMSL libraries*. Disponível em: <<https://software.intel.com/en-us/articles/installing-and-using-the-imsl-libraries>>. Acesso em: 6 set. 2014.
- [9] AGOSTINI, B. M., FREITAS, M. S. R. “Procedimento para Avaliação da Confiabilidade Estrutural de Pórticos Planos.” XXXII CILAMCE - Iberian Latin American Congress on Computational Methods in Engineering. Ouro Preto - MG, (2011).
- [10] HALDAR, A., MAHADEVAN, S. *Reliability Assessment Using Stochastic Finit Element Analysis*. John Wiley & Sons, England, (2000).
- [11] AMERICAN INSTITUTE OF STEEL CONSTRUCTION. *Load and Resistance Factor Design Specification for Structural Steel Buildings*. 2nd ed. Chicago, (1994).