

Análise Dinâmica

O presente capítulo apresenta um estudo do comportamento dinâmico da coluna de aço estaiada, abrangendo análises modais para determinação da frequência natural, com e sem protensão [32] e as análises transientes com aplicação de uma carga súbita através de um pulso retangular no topo da coluna de aço estaiada, com e sem protensão.

Embora a solução estrutural para este tipo de estrutura remonta-se desde 1960 a solução dinâmica não é totalmente compreendida, principalmente quando sujeitas a ações de impacto. Isto motivou um estudo detalhado do comportamento dinâmico do sistema estrutural por meio de simulações de elementos finitos numa análise dinâmica no programa ANSYS.

As principais variáveis do estudo paramétrico foram a rigidez dos estais e a magnitude de carga de protensão aplicada nos mesmos. Estas duas variáveis alteram substancialmente a resposta dinâmica da estrutura e provaram ser os elementos fundamentais para uma melhor compreensão deste sistema estrutural.

6.1 Modelagem computacional

Tanto na análise modal quanto na análise transiente, adotou-se um tubo para a coluna central e um tubo de diâmetro menor para as barras perpendiculares, com as seguintes dimensões: altura da coluna de 12 m; comprimento das barras perpendiculares de 0,6 m (inclinação de 10% entre a coluna principal e os estais até o centro da estrutura); diâmetro externo do tubo principal de 89,3 mm com espessura a parede de 3,2 mm; diâmetro externo das barras perpendiculares de 42,6 mm com espessura da parede de 3 mm e diâmetro dos cabos: de 6,35 mm. Também se levou em consideração uma imperfeição inicial de 8 mm no centro da coluna principal compatível com os valores medidos nos ensaios da coluna utilizada em escala real no laboratório. A coluna principal e os braços foram modelados utilizando o elemento PIPE20 enquanto que os estais foram simulados com o elemento LINK10 (especificado com a opção de somente absorver esforços de tração). Foi considerada uma

análise não-linear geométrica e um comportamento bi-linear do material na coluna de aço estaiada e protendida.

Dois diferentes materiais foram usados na análise. O primeiro tipo, usado nas coluna principal e nos braços, possui um módulo de elasticidade de 205.000 MPa e um módulo tangente de 20.500 MPa, um coeficiente de Poisson da ordem de 0,3, tensão de escoamento de 380 MPa (medido em ensaio de laboratório [1]) e uma densidade de 7850 kg/m³. O segundo tipo, usado nos estais, possui um módulo de elasticidade de 100.000 MPa (de acordo com o catálogo da CIMA [17]) e um módulo tangente de 10.000 MPa, um coeficiente de Poisson da ordem de 0,3, tensão de escoamento de 750 MPa [17] e densidade de 9100 kg/m³ [17].

O modelo foi dividido em três partes: a coluna principal com doze elementos de com um metro de comprimento; os braços com dois elementos com trezentos milímetros cada e os estais com um elemento ligando uma das extremidades da coluna principal à extremidade do braço através de uma ligação não-rotulada, caracterizando uma inclinação dos estais em 10% em relação a coluna principal (Figura 6.1).

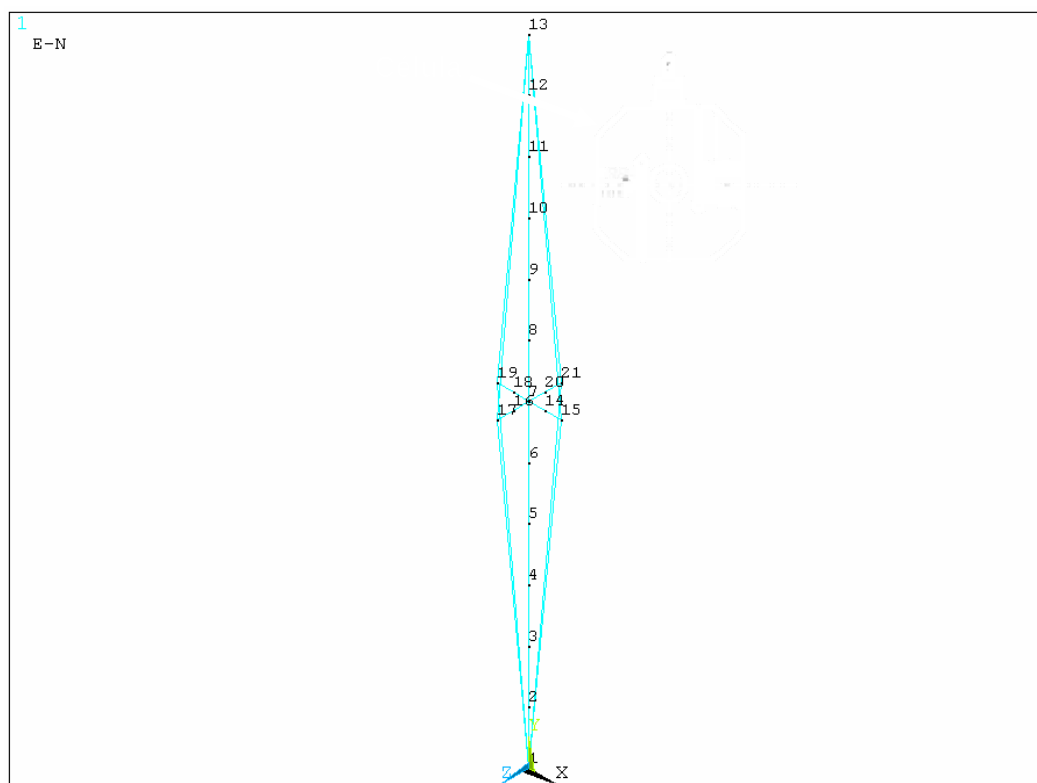


Figura 6.1 Posicionamento representativo da célula na extremidade da coluna

6.2

Análise modal

A análise modal foi dividida em duas partes distintas: uma análise sem a aplicação da protensão e a outra com a aplicação da protensão. Em ambas as análises foram realizadas variações na massa (em múltiplos de 10) para verificar a influência dos cabos na estabilidade da coluna de aço estaiada. Para propósito prático neste estudo, foram realizadas análises lineares no domínio-tempo.

6.2.1

Análise modal de coluna de aço sem estais

Uma primeira verificação da frequência natural da coluna de aço foi realizada sem a utilização de estais para que se tivesse um valor base de referência, e também para testar se a influência dos estais aumenta a rigidez da coluna de aço. A Tabela 6.1 apresenta os resultados das doze primeiras frequências naturais da coluna de aço obtidos.

Modelos	Frequências Naturais (Hz)					
	f01	f02	f03	f04	f05	f06
FN1	1,71	1,71	6,85	6,85	15,41	15,41
FN2	1,58	1,58	6,84	6,84	14,31	14,31
	f07	f08	f09	f10	f11	f12
FN1	27,37	27,37	42,75	42,75	61,57	61,57
FN2	22,85	27,20	27,20	39,93	39,93	60,33

Tabela 6.1 – Tabela com as frequências naturais da coluna de aço sem estais;

O modelo FN1 representa a coluna de aço com 8mm de imperfeição no centro sem os braços, enquanto que o modelo FN2 representa a coluna de aço com a utilização dos braços.

6.2.2

Análise modal de coluna de aço estaiada sem protensão

Inicialmente, os valores das frequências naturais e configurações dos modos de vibração das colunas foram obtidos sem a consideração da protensão dos cabos. Nesta parte da análise, além de variar o valor da massa para verificar a influência dos cabos na estabilidade global da coluna de aço estaiada também se utilizou três tipos de diâmetro e dois tipos materiais (cabo de aço e barra tipo

vergalhão) para os estais. A massa, que neste capítulo será adotado a letra M para representá-la, foi variada em sete níveis: de 10^{-3} M à 10^3 M.

6.2.2.1

Utilizando cabos como estais

A Tabela 6.2 apresenta os valores das frequências naturais para a coluna em estudo, com base na variação do diâmetro e da massa dos estais (representada pela letra M correspondente ao modelo estrutural real). As variações feitas em torno deste valor servem para analisar as modificações dos valores das frequências e, bem como, possíveis alterações nas configurações modais.

ϕ (mm)	Massa	Frequências Naturais para cabos - f_{0i} (Hz)					
		f_{01}	f_{02}	f_{03}	f_{04}	f_{05}	f_{06}
3,2	0,001M	1,99	1,99	7,49	7,49	14,34	14,34
	0,01M	1,99	1,99	7,49	7,49	14,34	14,34
	0,1M	1,99	1,99	7,49	7,49	14,34	14,34
	M	1,97	1,97	7,49	7,49	14,27	14,27
	10M	1,87	1,87	7,48	7,48	12,59	13,72
	100M	1,31	1,31	4,67	7,40	7,40	11,69
	1000M	0,53	0,53	1,50	5,77	5,77	6,03
6,3	0,001M	2,87	2,87	7,89	7,89	14,47	14,47
	0,01M	2,87	2,87	7,89	7,89	14,46	14,46
	0,1M	2,86	2,86	7,89	7,89	14,43	14,43
	M	2,80	2,80	7,89	7,89	14,18	14,18
	10M	2,34	2,34	7,16	7,88	7,88	12,66
	100M	1,16	1,16	2,37	7,82	7,82	9,51
	1000M	0,39	0,39	0,74	2,95	4,15	4,15
13	0,001M	4,93	4,93	8,09	8,09	15,00	15,00
	0,01M	4,93	4,93	8,09	8,09	14,99	14,99
	0,1M	4,89	4,89	8,09	8,09	14,86	14,86
	M	4,55	4,55	8,09	8,09	10,45	13,82
	10M	2,89	2,89	3,66	8,08	8,08	11,26
	100M	1,08	1,08	1,17	4,69	6,55	6,55
	1000M	0,35	0,35	0,37	1,49	2,13	2,13

Tabela 6.2 – Frequências naturais para o modelo com cabos sem protensão nos estais;

As Figura 6.2, Figura 6.3 e Figura 6.4 apresentam os modos de vibração correspondentes a coluna estaiada com base no emprego de cabos com diâmetro dos 6,3 mm. Observa-se que os seis primeiros modos de vibração do sistema estrutural investigado são predominantemente de flexão, apresentando um caráter simétrico, de acordo com a geometria do modelo.

Na Figura 6.2a o modo de vibração ocorre no plano ZY e na Figura 6.2b o modo de vibração ocorre no plano XY e ambos os modos representam o primeiro modo de flexão da coluna. Na Figura 6.3a o modo de vibração ocorre no plano ZY e na Figura 6.3b ocorre no plano XY, onde estas figuras representam o segundo modo de flexão do modelo. Finalmente, na Figura 6.4a o modo de vibração do sistema ocorre no plano ZY e na Figura 6.4b no plano XY, ambas associadas ao terceiro modo de flexão da coluna.

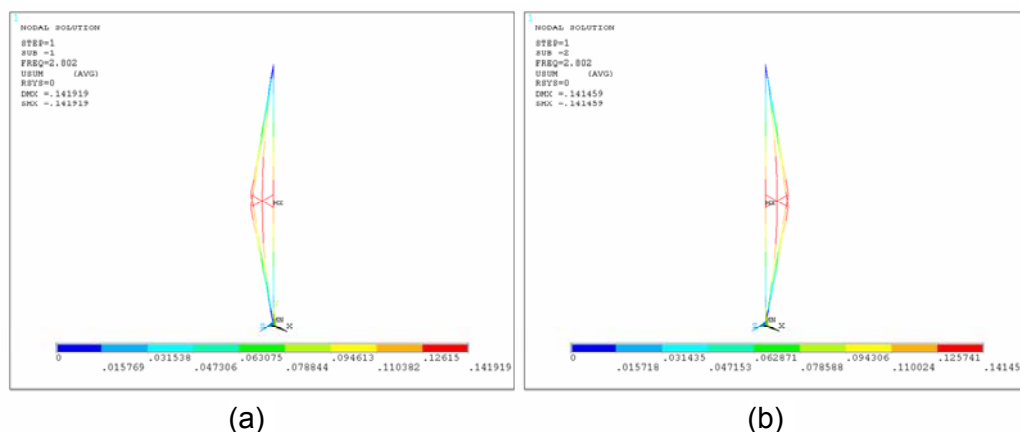


Figura 6.2 Modos de vibração para a coluna sem protensão: a) associado com a 1^a frequência natural $f_{01} = 2,80$ Hz; b) associado com a 2^a frequência natural $f_{02} = 2,80$ Hz;

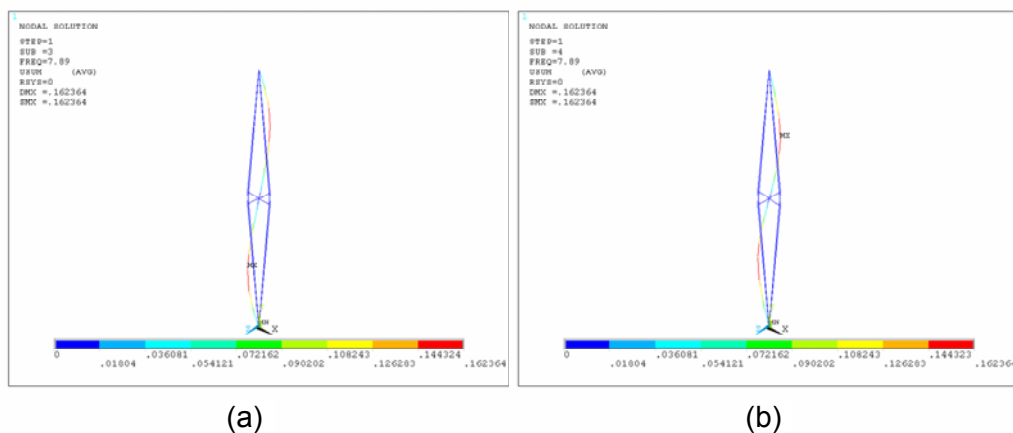


Figura 6.3 Modos de vibração para a coluna sem protensão: a) associado com a 3^a frequência natural $f_{03} = 7,89$ Hz; b) associado com a 4^a frequência natural $f_{04} = 7,89$ Hz;

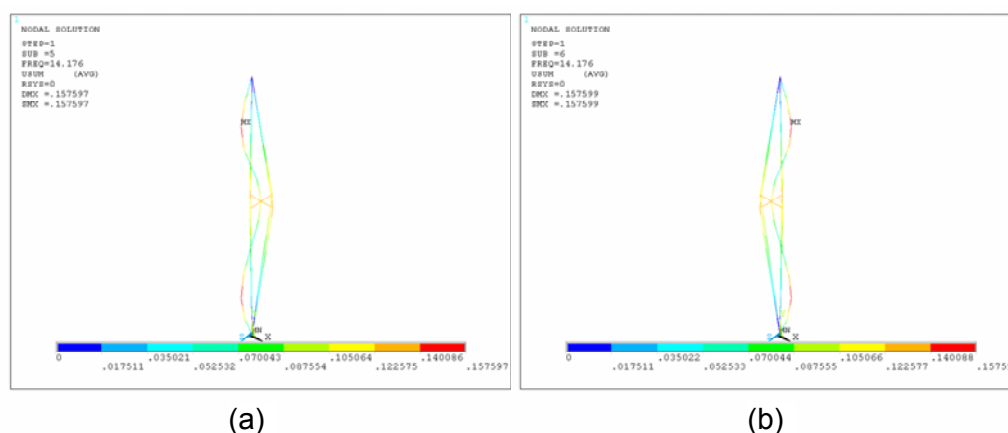


Figura 6.4 Modos de vibração para a coluna sem protensão: a) associado com a 5ª frequência natural $f_{05}=14,18$ Hz; b) associado com a 6ª frequência natural $f_{06}=14,18$ Hz;

6.2.2.2

Utilizando barras redondas como estais

A Tabela 6.3 apresenta os valores das frequências naturais e configurações dos modos de vibração das colunas, com base no emprego de elementos finitos de viga espaciais para a representação dos estais como barras, ainda sem a consideração da protensão dos cabos. A Tabela 6.3 apresenta esses valores para a coluna em estudo, com base na variação do diâmetro e da massa dos estais.

Observando-se os resultados apresentados nas Tabela 6.2 e Tabela 6.3, percebe-se que quando os estais dos modelos são simulados por elementos de viga espaciais, ao invés do emprego de elementos de cabo, os valores das frequências naturais dos modelos aumentam substancialmente, demonstrando que o modelo torna-se mais rígido. Tal fato é importante, pois a frequência fundamental das colunas deve situar-se em uma faixa bem distinta de frequências de excitações dinâmicas que possam a vir a atuar sobre o modelo, evitando assim o fenômeno indesejável da ressonância.

No que diz respeito os modos de vibração, a influência do emprego de elementos de viga espaciais (barras) ou de cabo para simular os estais das colunas foi pequena. Ressalta-se apenas que nesta situação existe ainda a predominância dos modos de vibração de flexão nas primeiras configurações modais dos modelos estudados.

ϕ (mm)	Massa	Frequências Naturais para barras - f_{0i} (Hz)					
		f_{01}	f_{02}	f_{03}	f_{04}	f_{05}	f_{06}
3,2	0,001M	2,89	2,89	7,89	7,89	14,47	14,47
	0,01M	2,89	2,89	7,89	7,89	14,47	14,47
	0,1M	2,89	2,89	7,89	7,89	14,46	14,46
	M	2,86	2,86	7,89	7,89	14,34	14,34
	10M	2,62	2,62	7,89	7,89	10,29	13,45
	100M	1,62	1,62	3,60	7,87	7,87	11,21
	1000M	0,60	0,60	1,15	4,61	6,38	6,38
6,3	0,001M	4,88	4,88	8,08	8,08	14,98	14,98
	0,01M	4,88	4,88	8,08	8,08	14,98	14,98
	0,1M	4,86	4,86	8,08	8,08	14,92	14,92
	M	4,71	4,71	8,08	8,08	14,31	14,43
	10M	3,68	3,68	5,62	8,08	8,08	12,21
	100M	1,62	1,62	1,83	7,33	8,07	8,07
	1000M	0,54	0,54	0,58	2,32	3,31	3,31
12,7	0,001M	7,96	7,96	8,14	8,14	17,37	17,38
	0,01M	7,95	7,95	8,14	8,14	17,34	17,34
	0,1M	7,91	7,91	8,14	8,14	16,99	17,01
	M	7,43	7,43	8,14	8,14	8,52	14,59
	10M	2,88	4,46	4,46	8,14	8,14	10,84
	100M	0,92	1,56	1,56	3,67	5,38	5,38
	1000M	0,29	0,50	0,50	1,16	1,73	1,73

Tabela 6.3 – Frequências naturais para o modelo com barras sem protensão nos estais;

6.2.3

Análise modal de coluna de aço estaiada com protensão

Os valores das frequências naturais e configurações dos modos de vibração das colunas foram obtidos com protensão nos cabos. Também, além de variar o valor da massa para verificar a influência dos estais na estabilidade global da coluna de aço estaiada também se utilizou três tipos de diâmetro e dois tipos materiais (cabo de aço e barra redonda tipo vergalhão) para os estais. Do mesmo modo que na análise sem protensão, a massa será adotado a letra M para representá-la, variando em sete níveis: de 10^{-3} M à 10^3 M.

6.2.3.1

Utilizando cabos como estais

A Tabela 6.1 apresenta os valores das frequências naturais obtidos com base na consideração da protensão dos cabos. Para esta investigação foi considerado apenas o modelo que possui estais com diâmetro de 6,3 mm. Para este modelo em particular foram utilizados elementos finitos de cabo para a representação dos estais da coluna. Ressalta-se, novamente, que “M” representa o valor da massa correspondente ao modelo estrutural real. Por sua vez, P_R indica os níveis de protensão aplicados nos estais, sendo o primeiro valor a análise da coluna estaiada sem protensão, o segundo valor a coluna com a protensão ideal [1] e o terceiro valor é a protensão máxima aplicada na coluna obtida no estudo paramétrico [1], de acordo com a Tabela 6.4.

Mass	P_r (kN)	Frequências Naturais f_{0i} (Hz)					
		f_{01}	f_{02}	f_{03}	f_{04}	f_{05}	f_{06}
0,001M	0,00	2,87	2,87	7,89	7,89	14,47	14,47
	2,35	2,77	2,77	7,22	7,22	13,83	13,84
	7,85	2,47	2,47	5,34	5,34	12,22	12,22
0,01M	0,00	2,87	2,87	7,89	7,89	14,46	14,46
	2,35	2,77	2,77	7,22	7,22	13,83	13,83
	7,85	2,47	2,47	5,34	5,34	12,22	12,22
0,1M	0,00	2,86	2,86	7,89	7,89	14,43	14,43
	2,35	2,77	2,77	7,22	7,22	13,80	13,80
	7,85	2,46	2,46	5,34	5,34	12,19	12,19
M	0,00	2,80	2,80	7,89	7,89	14,18	14,18
	2,35	2,71	2,71	7,22	7,22	13,55	13,55
	7,85	2,41	2,41	5,34	5,34	11,96	11,96
10M	0,00	2,34	2,34	7,16	7,88	7,88	12,66
	2,35	2,27	2,27	7,16	7,22	7,22	12,08
	7,85	2,05	2,05	5,33	5,33	7,18	10,59
100M	0,00	1,16	1,16	2,37	7,82	7,82	9,51
	2,35	1,13	1,13	2,37	7,16	7,16	9,51
	7,85	1,05	1,05	2,38	5,30	5,30	8,78
1000M	0,00	0,39	0,39	0,74	2,95	4,15	4,15
	2,35	0,39	0,39	0,75	3,02	4,23	4,23
	7,85	0,36	0,36	0,76	3,02	4,21	4,21

Tabela 6.4 – Frequências naturais para o modelo com cabos e com protensão nos estais;

As Figura 6.5, Figura 6.6 e Figura 6.7 apresentam os modos de vibração correspondentes a coluna estaiada com base no emprego de cabos com diâmetro dos 6,3 mm. Observa-se, novamente, que os seis primeiros modos de

vibração do sistema estrutural investigado são predominantemente de flexão, apresentando um caráter simétrico, de acordo com a geometria das colunas.

Ressalta-se que o efeito da protensão não influenciou de forma significativa a forma das configurações modais, Figura 6.5 à Figura 6.7, e estas apresentam-se similares aquelas anteriormente mostradas nas Figura 6.2 à Figura 6.4 (sem o efeito da protensão).

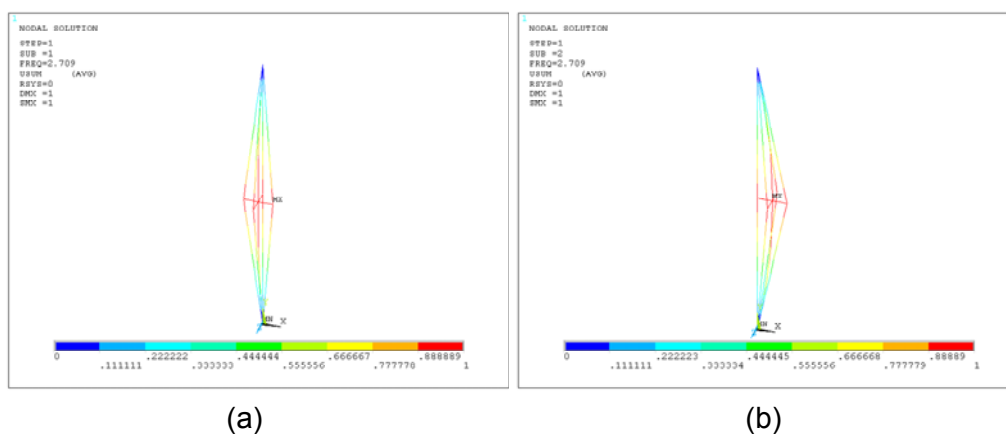


Figura 6.5 Modos de vibração para a coluna com protensão: a) associado com a 1ª frequência natural $f_{01} = 2,71$ Hz; b) associado com a 2ª frequência natural $f_{02} = 2,71$ Hz;

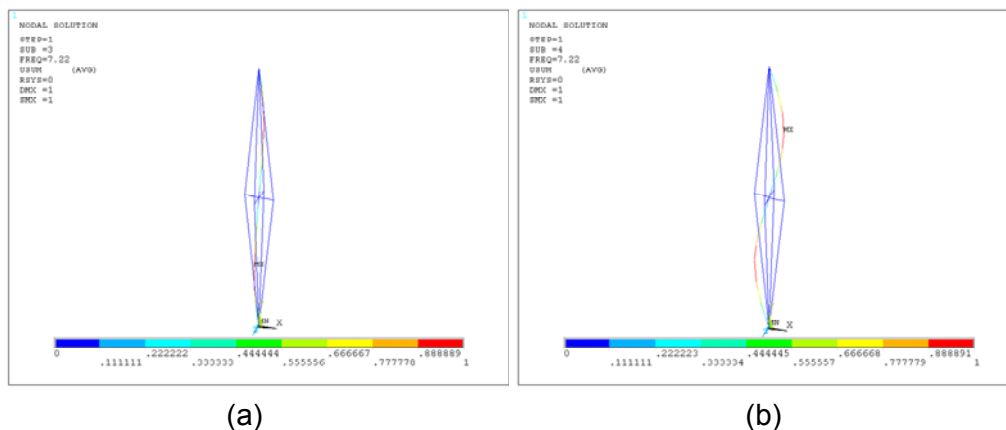


Figura 6.6 Modos de vibração para a coluna com protensão: a) associado com a 3ª frequência natural $f_{03} = 7,22$ Hz; b) associado com a 4ª frequência natural $f_{04} = 7,22$ Hz;

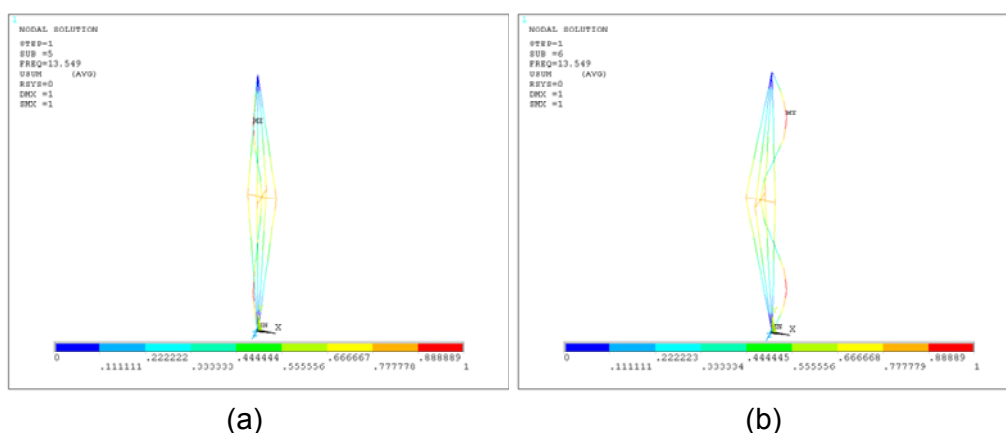


Figura 6.7 Modos de vibração para a coluna com protensão: a) associado com a 5ª frequência natural $f_{05}=13,55$ Hz; b) associado com a 6ª frequência natural $f_{06}=13,55$ Hz;

6.2.3.2

Utilizando barras como estais

A Tabela 6.5 apresenta os valores das frequências naturais e configurações dos modos de vibração das colunas, com base no emprego de elementos finitos de viga espaciais para a representação dos estais, agora, com a consideração da protensão dos cabos. A Tabela 6.5 apresenta estes valores para a coluna em estudo, com base na variação do diâmetro e da massa dos estais.

Observando os resultados apresentados nas Tabela 6.4 e Tabela 6.5, percebe-se que a situação se repete, ou seja: quando os estais das colunas são simulados por elementos de viga espaciais, ao invés do emprego de elementos de cabo, os valores das frequências naturais dos modelos crescem significativamente, demonstrando que o modelo torna-se mais rígido.

No que tange aos modos de vibração, novamente, a influência do emprego de elementos de viga espaciais (simulando barras) ou de cabo para simular os estais das colunas foi pequena. Destaca-se ainda neste caso existe ainda a predominância dos modos de vibração de flexão nas primeiras configurações modais dos modelos estudados.

Mass	P_r (kN)	Frequências Naturais f_{0i} (Hz)					
		f_{01}	f_{02}	f_{03}	f_{04}	f_{05}	f_{06}
0,001M	0,00	4,88	4,88	8,08	8,08	14,98	14,98
	9,95 - C	4,71	4,71	7,12	7,12	14,11	14,11
	9,95 - T	5,01	5,01	8,95	8,95	15,81	15,81
0,01M	0,00	4,88	4,88	8,08	8,08	14,98	14,98
	9,95 - C	4,71	4,71	7,12	7,12	14,10	14,10
	9,95 - T	5,01	5,01	8,95	8,95	15,81	15,81
0,1M	0,00	4,86	4,86	8,08	8,08	14,92	14,92
	9,95 - C	4,70	4,70	7,12	7,12	14,05	14,05
	9,95 - T	4,99	4,99	8,95	8,95	15,75	15,75
M	0,00	4,71	4,71	8,08	8,08	14,31	14,43
	9,95 - C	4,56	4,57	7,12	7,12	13,57	13,57
	9,95 - T	4,83	4,83	8,95	8,95	14,31	15,24
10M	0,00	3,68	3,68	5,62	8,08	8,08	12,21
	9,95 - C	3,61	3,61	5,63	7,12	7,12	11,40
	9,95 - T	3,74	3,74	5,62	8,95	8,95	12,96
100M	0,00	1,62	1,62	1,83	7,33	8,07	8,07
	9,95 - C	1,60	1,60	1,83	7,11	7,11	7,33
	9,95 - T	1,63	1,63	1,83	7,33	8,93	8,93
1000M	0,00	0,54	0,54	0,58	2,32	3,31	3,31
	9,95 - C	0,53	0,53	0,58	2,32	3,30	3,30
	9,95 - T	0,54	0,54	0,58	2,32	3,32	3,32
C: Compressão, T: Tração,							

Tabela 6.5 – Frequências naturais para o modelo com cabos e com protensão nos estais;

6.2.4 Visão global das simulações

As Figura 6.8, Figura 6.9 e Figura 6.10 ilustram a variação da frequência fundamental das colunas de acordo com a modelagem dos estais (elementos finitos de cabo ou de viga espaciais), variação da massa dos modelos e variação da força de protensão aplicada nos estais.

Observando a Figura 6.8 (coluna sem protensão) percebe-se, claramente, que a frequência fundamental do sistema estrutural cresce substancialmente na medida em que o diâmetro dos estais aumenta. Tal fato ocorre independentemente da modelagem dos estais (elementos finitos de cabo ou de

viga espaciais). Como já era esperado, quando os estais são simulados com elementos finitos de viga espaciais o nível da frequência fundamental das colunas é bem superior. Evidentemente, a frequência fundamental das colunas sem a contribuição dos estais é bem inferior a dos demais modelos.

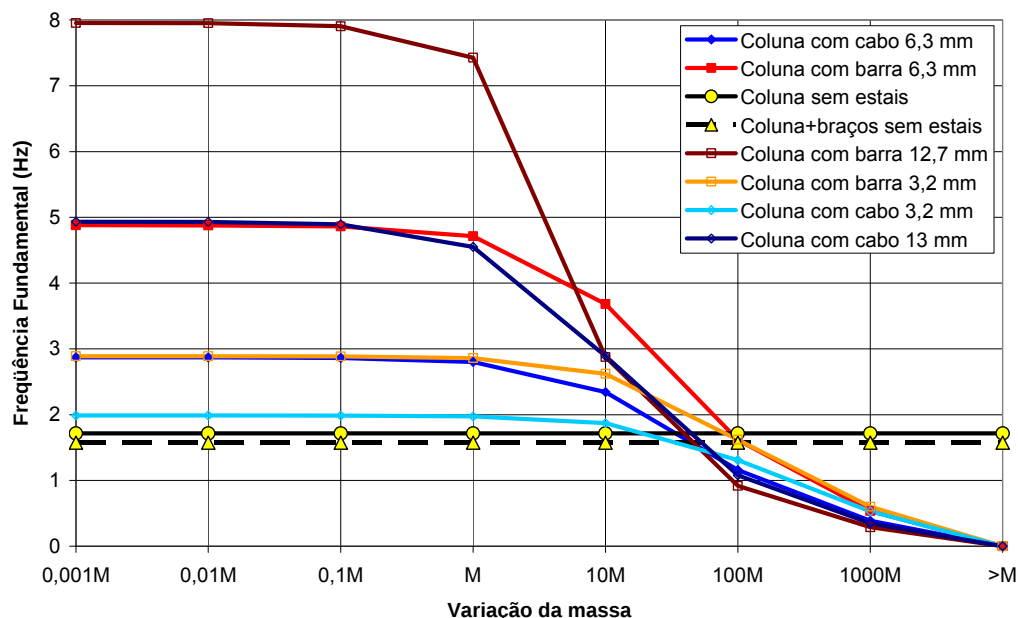


Figura 6.8 Frequência fundamental da coluna de aço estaiada sem protensão;

As Figura 6.9 e Figura 6.10 apresentam um estudo sobre a frequência fundamental das colunas com diâmetro de 6,3 mm, com base na variação dos níveis de protensão aplicada nos estais. Com referência a modelagem dos estais a partir do emprego de elementos finitos de cabo, foram utilizados dois níveis de protensão, a saber: a protensão considerada ótima (força de protensão que induz o sistema a fornecer o mais valor de resistência da coluna) e a força protensão máxima resistida pela coluna, através da análise paramétrica [1].

Verifica-se que a frequência fundamental das colunas foi maior quando os estais (simulados por elementos de cabo) não são protendidos, conforme mostrado na Figura 6.9. Tal fato é explicado com base na atuação do peso próprio da coluna, a partir da aplicação da força de protensão nos estais, ou seja: com a aplicação da força de protensão o peso do sistema atua de forma a gerar na coluna uma perda rigidez.

Por outro lado, quando os estais são modelados a partir da utilização de elementos de viga espaciais, de acordo com a Figura 6.10, verifica-se que a situação é bem distinta, pois a frequência fundamental das colunas é maior quando os estais são submetidos a forças de compressão. No caso em que os

estais são tracionados o valor da frequência fundamental diminui ligeiramente, como apresentado na Figura 6.10.

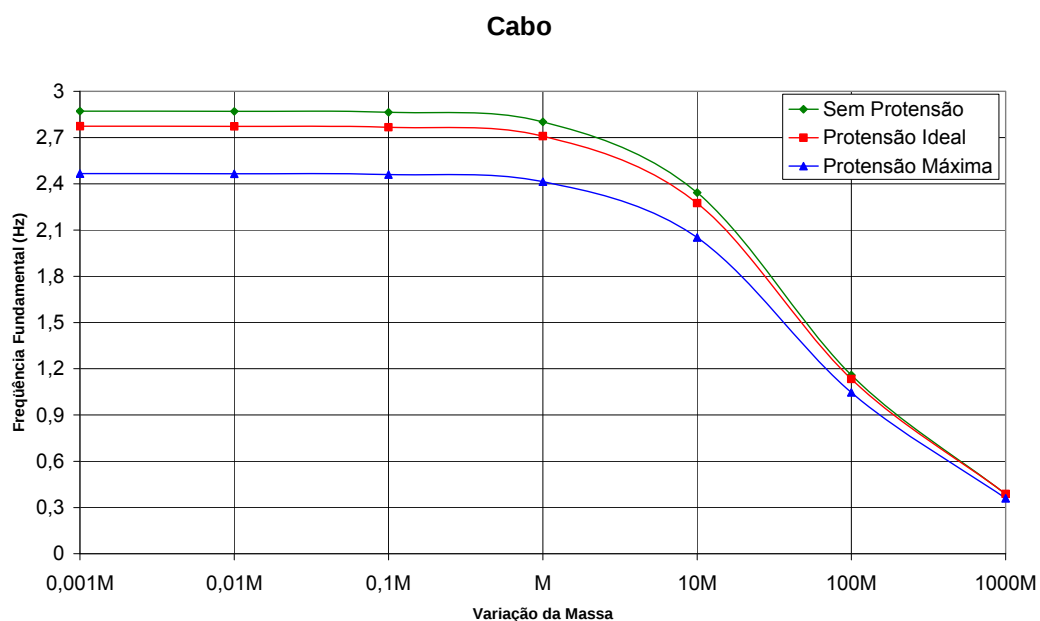


Figura 6.9 Frequência fundamental da coluna de aço estaiada e protendida com os estais simulados como cabos de aço;

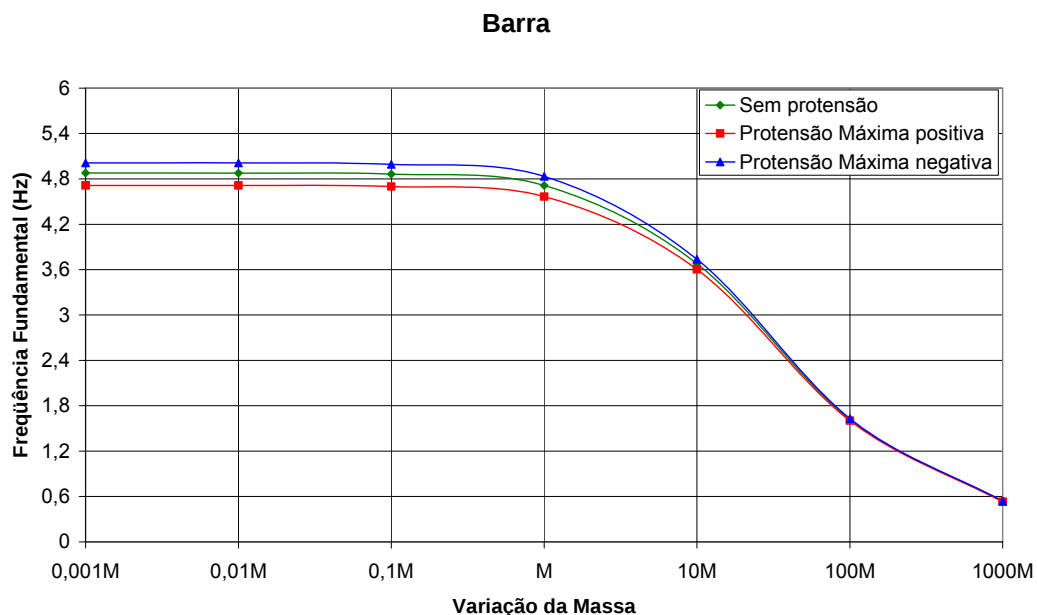


Figura 6.10 Frequência fundamental da coluna de aço estaiada e protendida com os estais simulados como barras;

Nesta situação à medida que se induz uma compressão no sistema, via protensão dos estais, a frequência fundamental das colunas cresce. Quando a

força atuante nos estais é de tração, o sistema torna-se mais flexível e a frequência fundamental diminui. Tal fato pode ser explicado, pois quando uma força de compressão é aplicada nos estais o sistema ganha rigidez e no caso contrário, devido a atuação do peso próprio das colunas, o sistema perde rigidez.

6.3

Análise Transiente

A modelagem geométrica para a análise transiente foi a mesma utilizada na análise modal da coluna de aço estaiada e protendida, porém somente foi modelada a coluna estaiada com cabos de aço, a mesma realizada no laboratório para os ensaios da primeira e segunda coluna. A carga utilizada para a análise foi um pulso retangular de cinco segundos aplicado no topo da coluna de forma a simular, por exemplo, o instante em que a estrutura é submetida a um componente súbito..

Procurou-se estudar o comportamento da coluna em relação a variação da carga aplicada de 10% a 100% do valor de resistência da coluna de aço estaiada sem protensão e com protensão, além de avaliar o comportamento com e sem amortecimento. Com estas análises foi possível gerar uma tabela do fator de amplificação da coluna de aço estaiada e protendida.

Para se ter uma melhor comparação com a norma brasileira [27] os nós que serão estudados estarão ao longo da coluna principal e será verificado o seu deslocamento e comparado com o limite de $L/500$ [27], sendo L o comprimento total da coluna estaiada de valor igual a 12 m. Também serão estudados a velocidade e a aceleração em cada nó. Os nós escolhidos são: o central ($L/2 - 6$ m) e os que estão a um quarto do comprimento e a três quartos ($L/4$ e $3L/4 - 3$ m e 9 m respectivamente) apresentados na Figura 6.11. Deve-se ressaltar que uma imperfeição de 8 mm aplicada no nó central (nó 7) foi adotada na direção X.

6.3.1

Determinação do valor de amortecimento

Dois valores de amortecimento para a análise: um para a coluna estaiada sem protensão e outro para a protendida foram determinados.

6.3.1.1 Sem protensão

A Tabela 6.2 apresenta os valores das frequências naturais referentes ao primeiro, segundo e décimo modo de vibração da coluna: 2,80 Hz; 7,89 Hz e 39,23 Hz respectivamente.

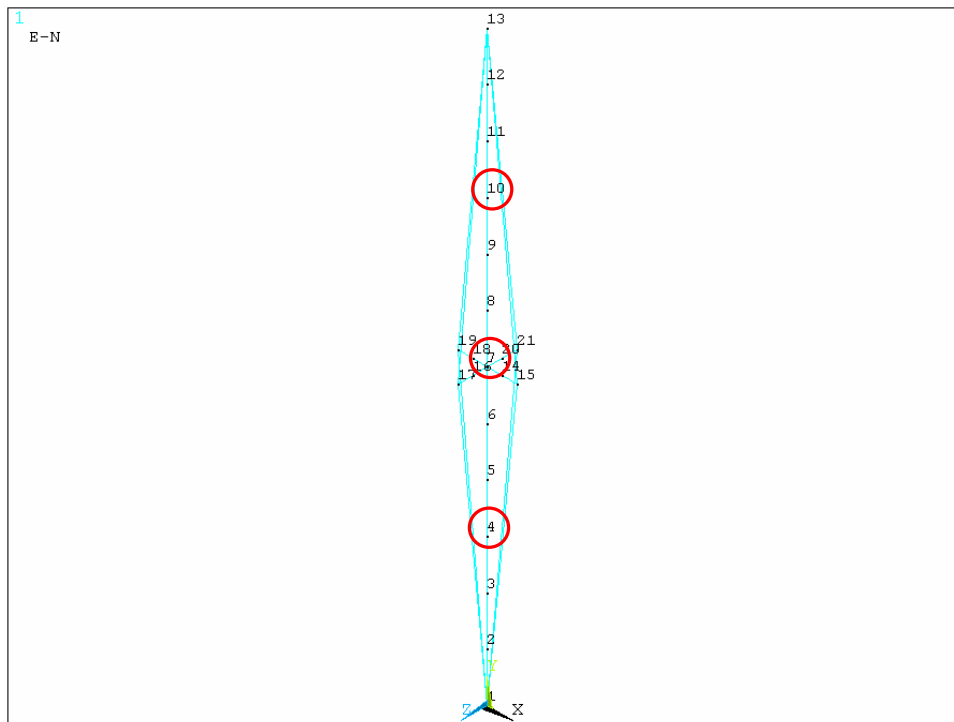


Figura 6.11 Apresentação dos nós que serão avaliados na análise transiente.;

A variação do tempo (passo) foi determinado calculando a inversa de dez vezes o valor da frequência natural referente ao décimo modo de flambagem, conforme a equação (6.1, obtendo o valor de $2,55 \times 10^{-3}$ s, que foi aproximado para 1×10^{-3} .

$$\Delta t = \frac{1}{10 f_{10}} \quad (6.1)$$

O coeficiente de amortecimento ξ foi adotado igual a 0,5%. Para se chegar ao cálculo dos coeficientes α e β para determinação do amortecimento, são necessários se ter os valores das frequências naturais circulares ω_1 e ω_2 . Pelas equações (6.2 e (6.3 são determinados os valores de 17,61 e 49,58 respectivamente.

$$\omega_1 = 2\pi f_{01} \quad (6.2)$$

$$\omega_2 = 2\pi f_{02} \quad (6.3)$$

O cálculo do coeficiente β é descrito na equação (6.4, obtendo o valor de $14,88 \times 10^{-5}$.

$$\beta = \frac{2(\xi\omega_2 - \xi\omega_1)}{\omega_2^2 - \omega_1^2} \quad (6.4)$$

O cálculo do coeficiente α é descrito na equação (6.5, obtendo o valor de 0,130.

$$\alpha = 2\xi\omega_1 - \beta\omega_1^2 \quad (6.5)$$

6.3.1.2

Com protensão

Utilizando as mesmas equações descritas no item 6.3.1.1 foi calculado os coeficientes α e β para valores de frequência natural da coluna estaiada e protendida: 2,71 Hz (primeiro modo de vibração), 7,22 Hz (segundo modo de vibração) e 38,58 Hz (décimo modo de vibração). Os valores de α e β calculados foram: $16,03 \times 10^{-5}$ e 0,124, respectivamente.

6.3.2

Fator de amplificação dinâmica

Com os valores de amortecimento calculados, pode-se realizar as análises transientes utilizando o programa de elementos finitos ANSYS [17] e assim determinar os fatores de amplificação da coluna para uma carga súbita aplicada no topo da coluna estaiada com e sem protensão.

As seguintes siglas são usadas na tabelas do cálculo do fator de amplificação dinâmica: P_{cr} (carga crítica da coluna estaiada com e sem protensão); Δ (deslocamento axial na extremidade livre da coluna estaiada modelada); Δ_e (deslocamento estático); Δ_d (deslocamento dinâmico); SA (sem

amortecimento); CA (com amortecimento) e FAD (fator de amplificação dinâmico).

6.3.2.1

Sem protensão

A Tabela 6.6 apresenta o cálculo do fator de amplificação dinâmico para a coluna estaiada sem carga de protensão, juntamente com os deslocamentos obtidos, no nó central (nó 7), para cada nível de carga súbita aplicada. Ressalta-se que para uma carga súbita de 60% da carga crítica para cima, o deslocamento no nó central extrapola o limite máximo de $L/500$ sugerido na norma brasileira [27].

Sem Protensão						
Pcr 21086,8 N	Eixo X (mm)		Eixo Y (mm)		FAD - X	FAD - Y
	Δ_e	Δ_d	Δ_e	Δ_d		
		CA		CA	$\Delta_d(CA)/\Delta_e$	$\Delta_d(CA)/\Delta_e$
Pcr 10%	1,1677	2,16917	7,37E-02	0,134011	1,86	1,82
Pcr 20%	2,581	4,82801	0,149	0,268022	1,87	1,80
Pcr 30%	4,330	8,149	0,225	0,402032	1,88	1,79
Pcr 40%	6,552	12,3995	0,304	0,536043	1,89	1,77
Pcr 50%	9,474	18,039	0,387	0,670054	1,90	1,73
Pcr 60%	13,503	25,8871	0,477	0,804065	1,92	1,69
Pcr 70%	19,440	37,5296	0,583	0,938076	1,93	1,61
Pcr 80%	29,175	56,8913	0,729	1,07209	1,95	1,47

Tabela 6.6 – Fator de amplificação dinâmico para a coluna estaiada sem protensão;

A Figura 6.12 apresenta o comportamento da coluna de aço estaiada após aplicação de uma carga súbita de 10% da carga crítica, durante 5 s, na extremidade da coluna.

6.3.2.2

Com protensão

A Tabela 6.7 apresenta o cálculo do fator de amplificação dinâmico para a coluna estaiada com carga de protensão, juntamente com os deslocamentos obtidos, no nó central (nó 7), para cada nível de carga súbita aplicada. Ressalta-se que para uma carga súbita de 70% da carga crítica para cima, o deslocamento no nó central extrapola o limite máximo de $L/500$ sugerido na norma brasileira [27].

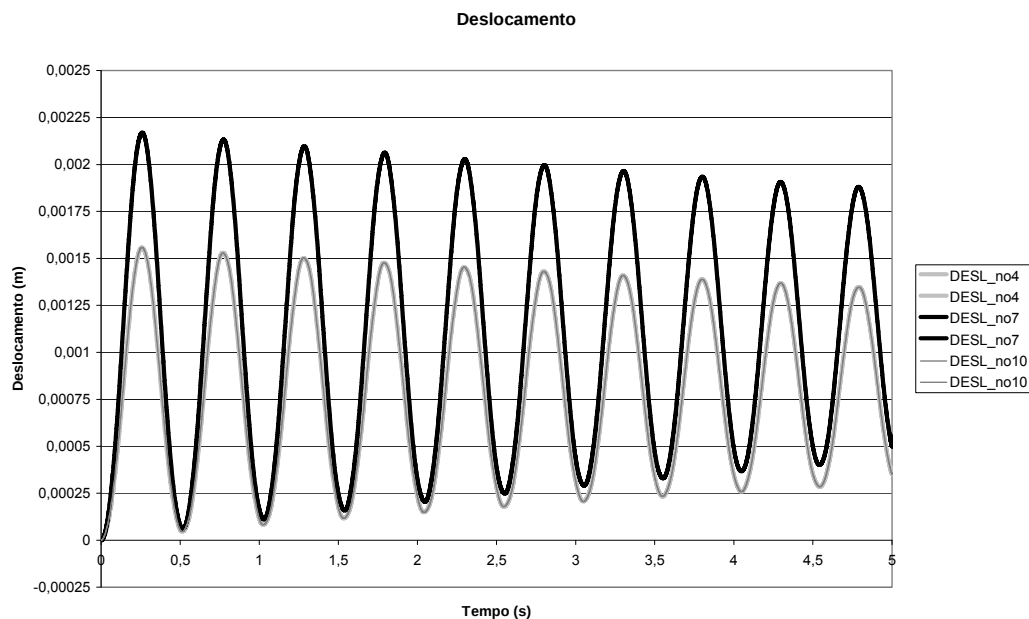


Figura 6.12 Gráfico do deslocamento devido a carga súbita de 10% de P_{cr} ;

Protensão Ideal						
Pcr 30916 N	Eixo X (mm)		Eixo Y (mm)		FAD - X	FAD - Y
	Δ_e	Δ_d	Δ_e	Δ_d		
		CA		CA	$\Delta_d(CA)/\Delta_e$	$\Delta_d(CA)/\Delta_e$
Pcr 10%	1,1496	2,39091	4,18E-01	0,776056	2,08	1,85
Pcr 20%	2,108	4,25696	0,521	0,964219	2,02	1,85
Pcr 30%	3,303	6,64857	0,625	1,15238	2,01	1,84
Pcr 40%	4,832	9,6998	0,730	1,34054	2,01	1,84
Pcr 50%	6,864	13,6886	0,837	1,52871	1,99	1,83
Pcr 60%	9,697	19,1977	0,948	1,71687	1,98	1,81
Pcr 70%	13,928	27,5763	1,068	1,90503	1,98	1,78
Pcr 80%	20,939	41,3238	1,209	2,09319	1,97	1,73

Tabela 6.7 – Fator de amplificação dinâmico para a coluna estaiada com protensão ideal;

A Figura 6.13 apresenta o comportamento da coluna de aço estaiada após aplicação de uma carga súbita de 10% da carga crítica, durante 5 s, na extremidade da coluna.

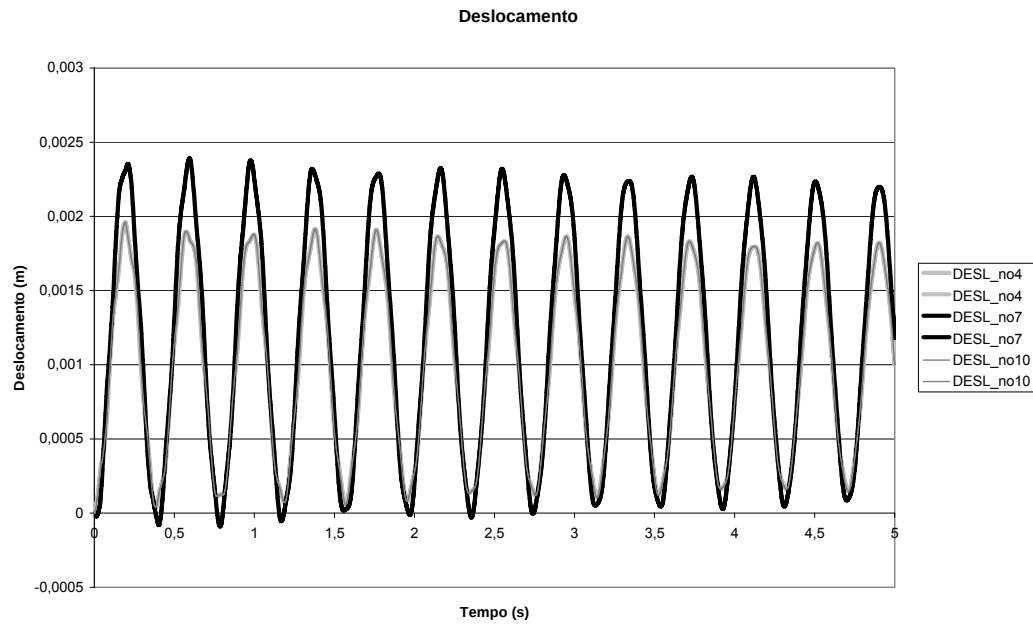


Figura 6.13 Gráfico do deslocamento devido a carga súbita de 10% de P_{cr} na coluna com protensão;