

5

Análise Paramétrica do Fenômeno Físico Através do Sistema de Classificação

5.1

Introdução

O sistema neuro-fuzzy apresentado no Capítulo 4 foi treinado e testado com uma quantidade moderada de dados experimentais. A partir destes resultados, será apresentada neste capítulo uma validação adicional do modelo através de uma análise dos graus de ativação que são gerados para os três casos de colapso (plastificação, flambagem e enrugamento).

A avaliação do sistema neuro-fuzzy foi feita, portanto a partir da coerência dos graus de ativação em função da variação dos parâmetros envolvidos, que serão ferramentas adicionais para o desenvolvimento de uma análise paramétrica do fenômeno físico. Deve-se lembrar que os dados de teste foram todos classificados corretamente e que outra forma de investigação não é possível, posto que um estudo comportamental mais gradual dos três fenômenos físicos envolvidos é ainda inédito na literatura.

5.2

Avaliação dos resultados e análise paramétrica.

Os dados experimentais utilizados no treinamento estão compreendidos nas faixas de parâmetros geométricos e de material apresentadas na Tabela 5.1.

Para a escolha dos perfis a serem utilizados na análise paramétrica, foi feito um estudo dos resultados do sistema de classificação neuro-fuzzy para os perfis comerciais. Este estudo é apresentado no anexo D, adotando os seguintes critérios:

- tensões limite de escoamento da mesa e da alma: 345 MPa;
- comprimento carregado $c = 100$ mm;
- fator de forma do painel de alma $a/h = 3$.

Neste estudo verificou-se que os perfis mais sujeitos a problemas de instabilidade foram as vigas soldadas VS. Sendo assim, as investigações se

concentraram em perfis com dimensões iguais ou similares aos perfis comerciais VS, por apresentarem os comportamentos mais compatíveis com os dados experimentais utilizados no treinamento.

O primeiro estudo, da Figura 5.1 a Figura 5.8, concentrou-se na investigação da influência das espessuras da alma e da mesa carregada no comportamento estrutural de vigas sujeitas a cargas concentradas. Para esta investigação foram adotados os parâmetros apresentados na Tabela 5.2.

Tabela 5.1 – Faixa de Parâmetros do Treinamento da Rede.

Parâmetro	Valor mínimo	Valor máximo
Altura da alma h (mm)	250	1800
Comprimento do painel de alma a (mm)	300	9800
Espessura da alma t_w (mm)	2	4
Espessura da mesa t_f (mm)	3	32
Largura da Mesa b_f (mm)	50	500
Tensão limite de escoamento da alma σ_y^w (MPa)	178	400
Tensão limite de escoamento da mesa σ_y^{fl} (MPa)	221	400
Comprimento carregado c (mm)	5	300

As espessuras de mesa variaram de 6,3 a 31,5 mm respeitando os intervalos das espessuras comerciais para perfis soldados, e espessuras de alma de 4 e 12,5 mm. Todos os estudos serão executados empregando gráficos que apresentam os graus de ativação de cada fenômeno físico em função dos parâmetros físicos e geométricos das vigas. Ressalta-se que os graus de ativação correspondem a participação de cada comportamento estrutural na ruína das vigas. Para facilitar a visualização, foi adotada uma identidade gráfica para estes tipos de gráfico: os graus de ativação de plastificação serão sempre apresentados em verde, os de enrugamento em laranja e os de flambagem em azul. As tensões limite de escoamento foram fixadas em 345 MPa e o fator de forma do painel de alma (a/h) foi tomado como 3.

Tabela 5.2 – Dimensões dos perfis usados para o estudo $t_f \times t_w$.

Análise	h	b_f	c
1	375	170	37,5
2	375	170	187,5
3	375	375	37,5
4	375	375	187,5
5	1450	500	145,0
6	1450	500	725,0
7	1450	1400	145,0
8	1450	1400	725,0

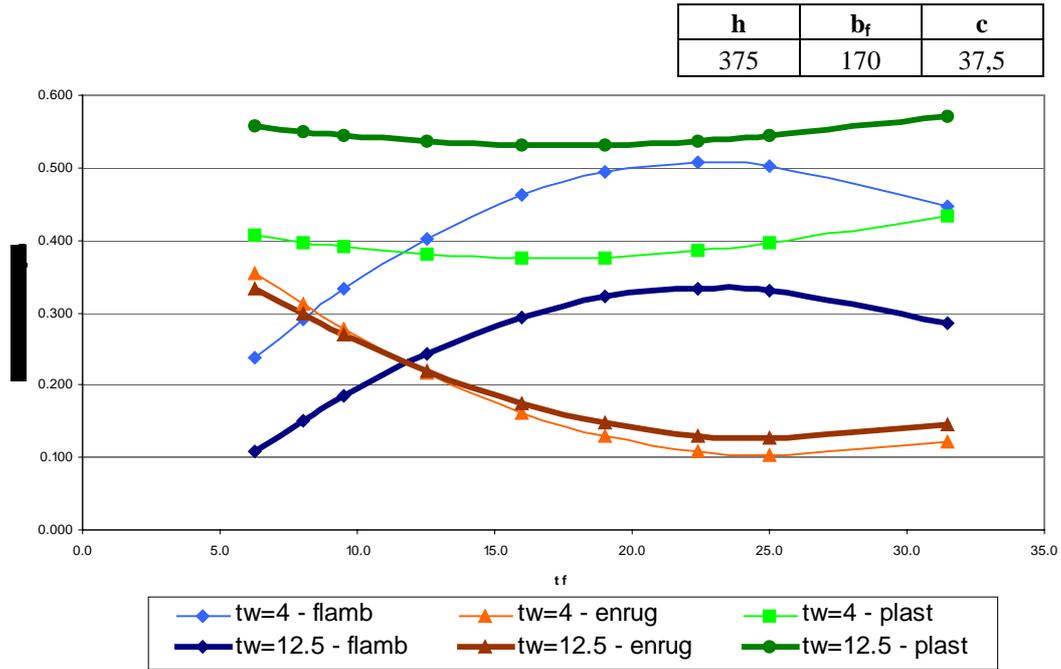


Figura 5.1 – Variação dos graus de ativação das três classes em função da espessura da mesa e da espessura de alma – análise 1.

PUC-Rio - Certificação Digital Nº null

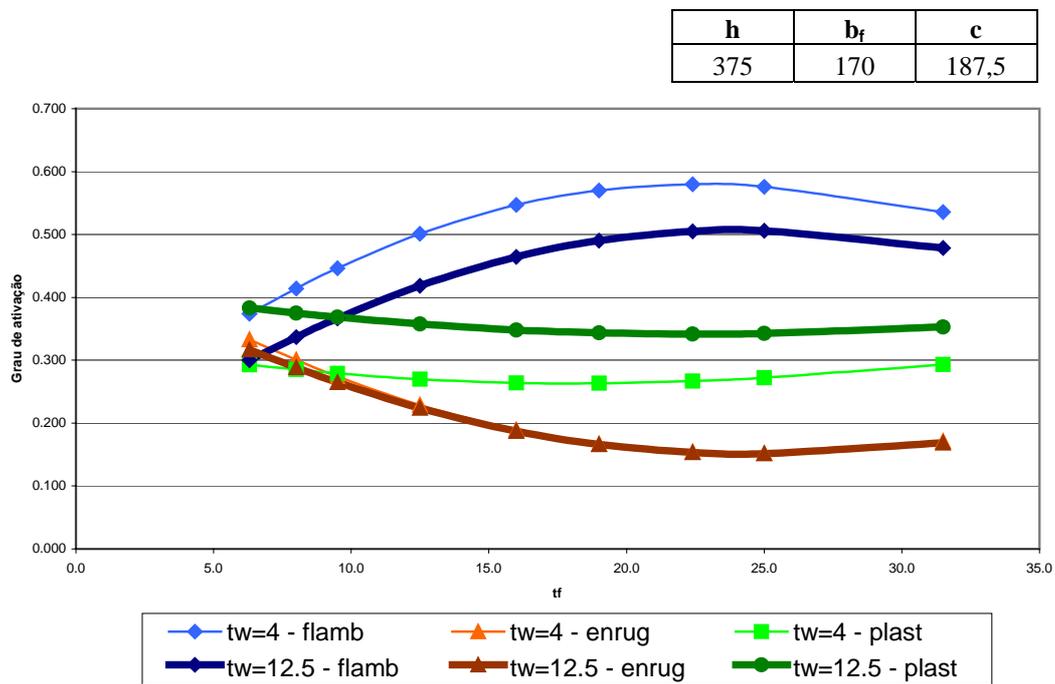


Figura 5.2 – Variação dos graus de ativação das três classes em função da espessura da mesa e da espessura de alma – análise 2.

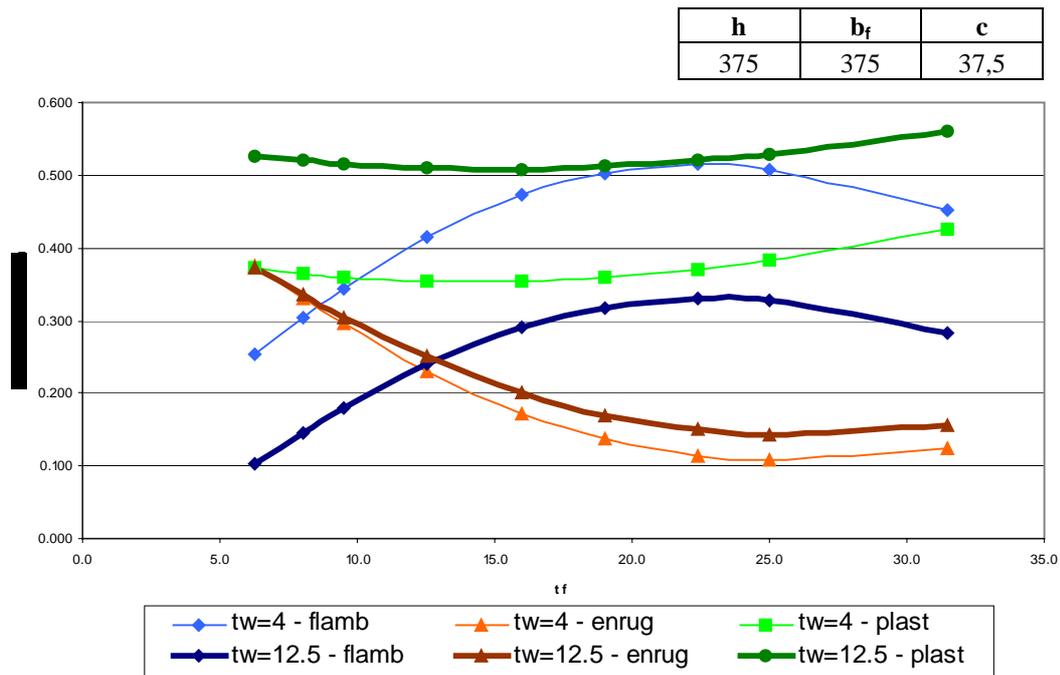


Figura 5.3 – Variação dos graus de ativação das três classes em função da espessura da mesa e da espessura de alma – análise 3.

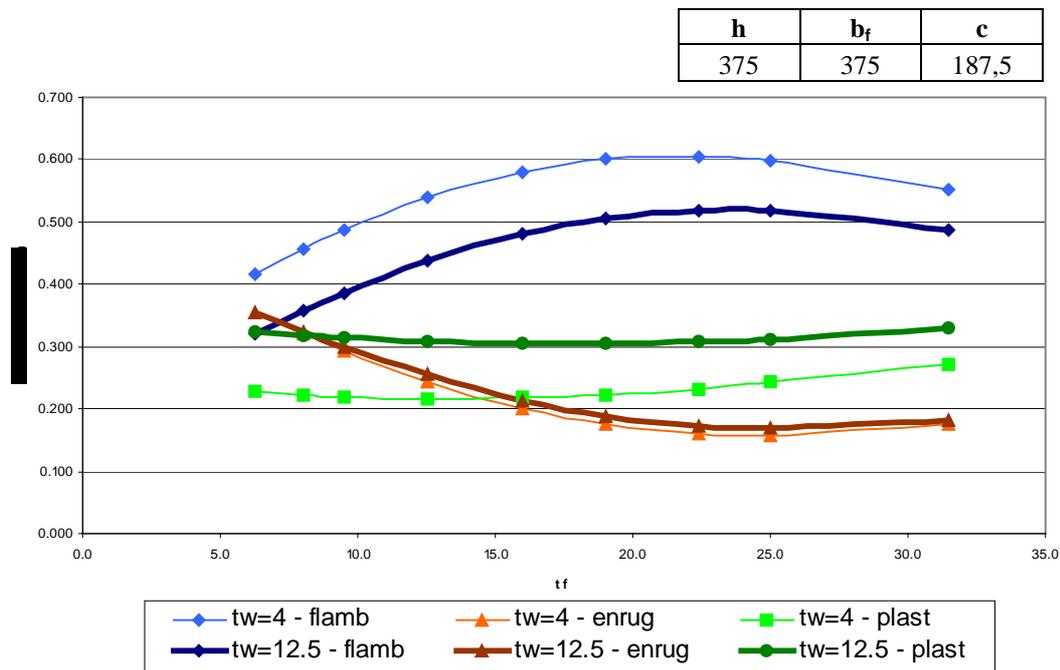


Figura 5.4 – Variação dos graus de ativação das três classes em função da espessura da mesa e da espessura de alma – análise 4.

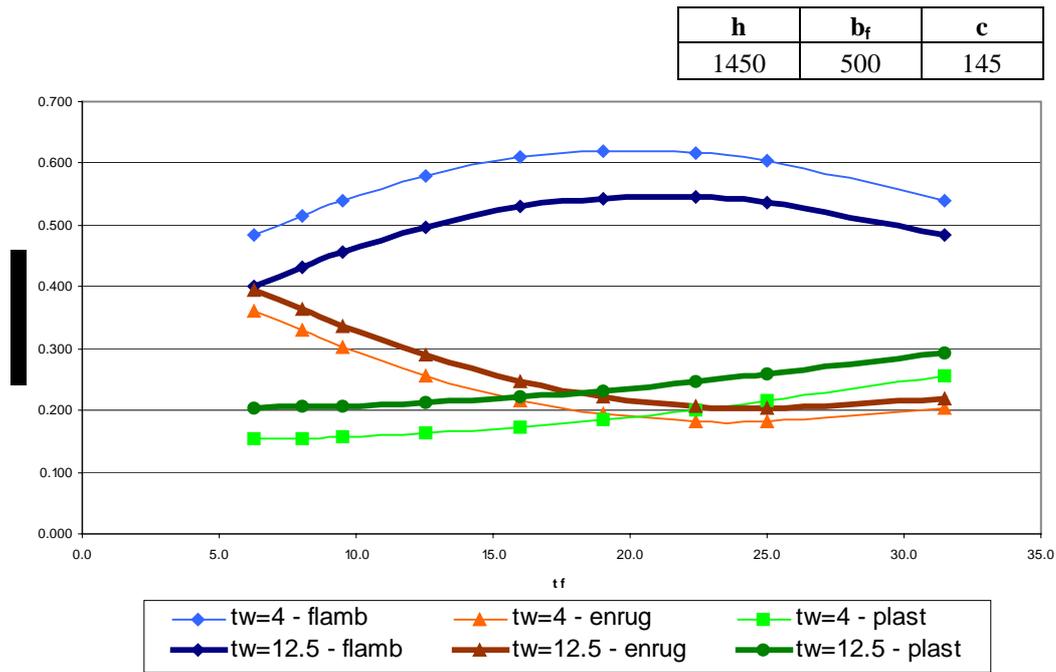


Figura 5.5 – Variação dos graus de ativação das três classes em função da espessura da mesa e da espessura de alma – análise 5.

PUC-Rio - Certificação Digital Nº null

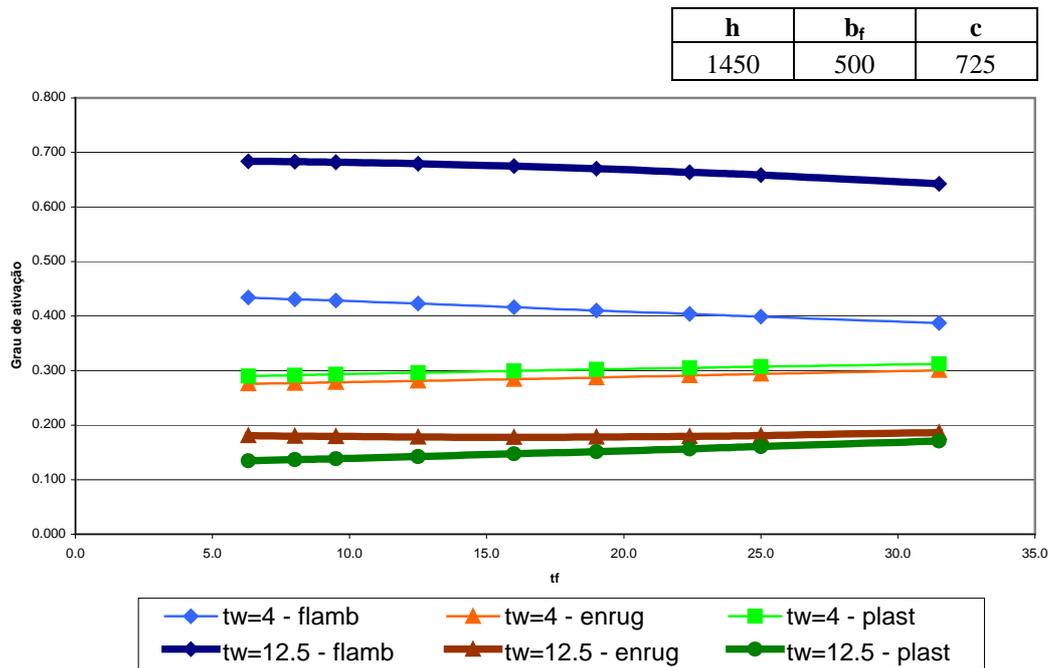


Figura 5.6 – Variação dos graus de ativação das três classes em função da espessura da mesa e da espessura de alma – análise 6.

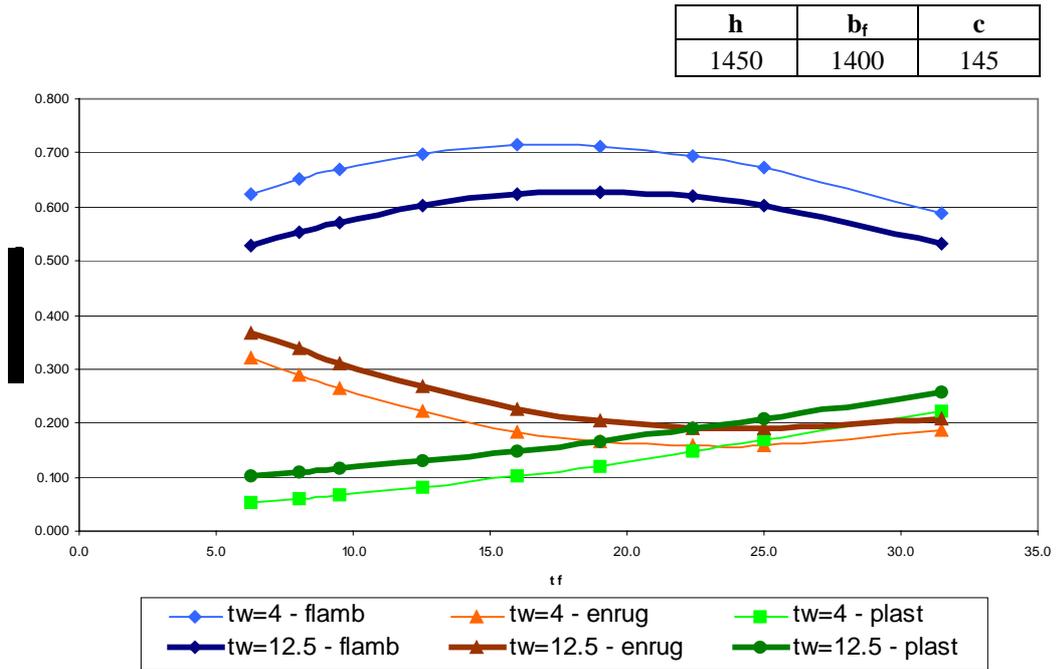


Figura 5.7 – Variação dos graus de ativação das três classes em função da espessura da mesa e da espessura de alma – análise 7.

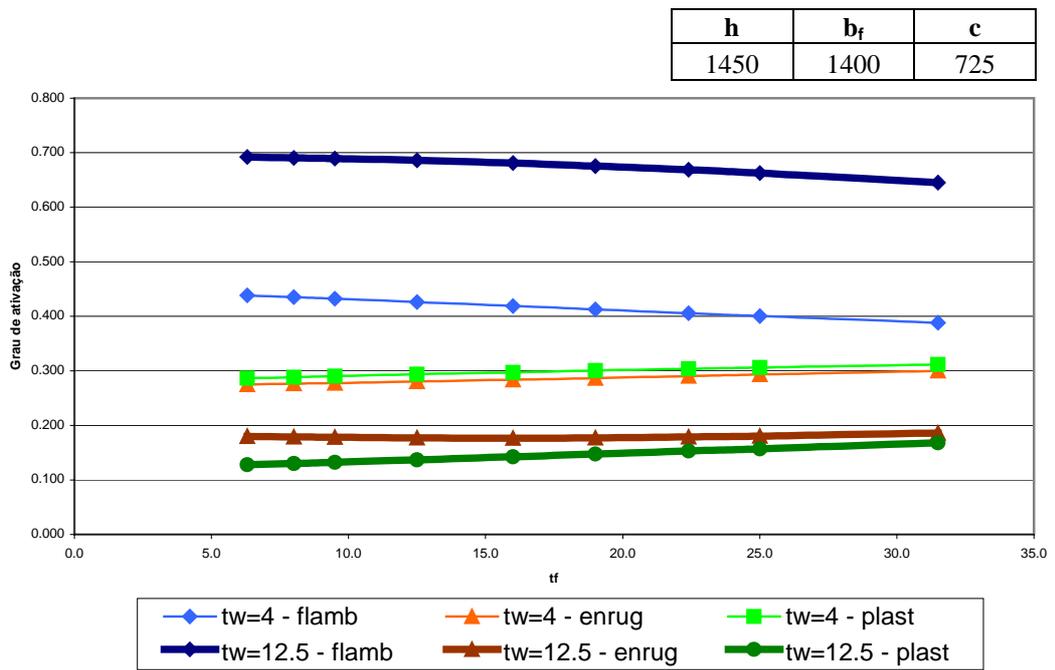


Figura 5.8 – Variação dos graus de ativação das três classes em função da espessura da mesa e da espessura de alma – análise 8.

Da Figura 5.1 a Figura 5.8 verifica-se que a flambagem é mais comum em vigas de almas mais flexíveis e mais esbeltas, sendo assim o sistema neuro-fuzzy confirma as conclusões da bibliografia. A Figura 5.1 e a Figura 5.3 mostram que em almas mais finas a flambagem é dominante enquanto a plastificação é mais evidente em almas mais espessas ou quando as mesas são mais rígidas. Outra informação destes gráficos é a predominância do enrugamento nas mesas de menor espessura. Nas outras análises a flambagem predomina e nota-se que a importância da variação da largura da mesa é pouco significativa e que um comprimento carregado maior aumenta as chances de flambagem global. O aumento da altura e conseqüente aumento da esbeltez também favorecem a flambagem global. Na Figura 5.6, verifica-se que a variação da espessura da mesa é menos significativa para o fenômeno físico em vigas de comprimentos carregados maiores e grandes alturas (mais esbeltas). Nestes casos, a flambagem global predomina.

Para avaliar a importância das dimensões da mesa foi feito um estudo semelhante, desta vez com larguras da mesa de 100 mm e 300 mm e a espessura variando de 4 a 31,5 mm. Para esta investigação foram adotados os parâmetros apresentados na Tabela 5.3:

Tabela 5.3 – Dimensões dos perfis usados para o estudo t_f x b_f .

Análise	h	t_w	c
1	375	4,7	37,5
2	375	4,7	187,5
3	1450	6,3	145,0
4	1450	6,3	725,0

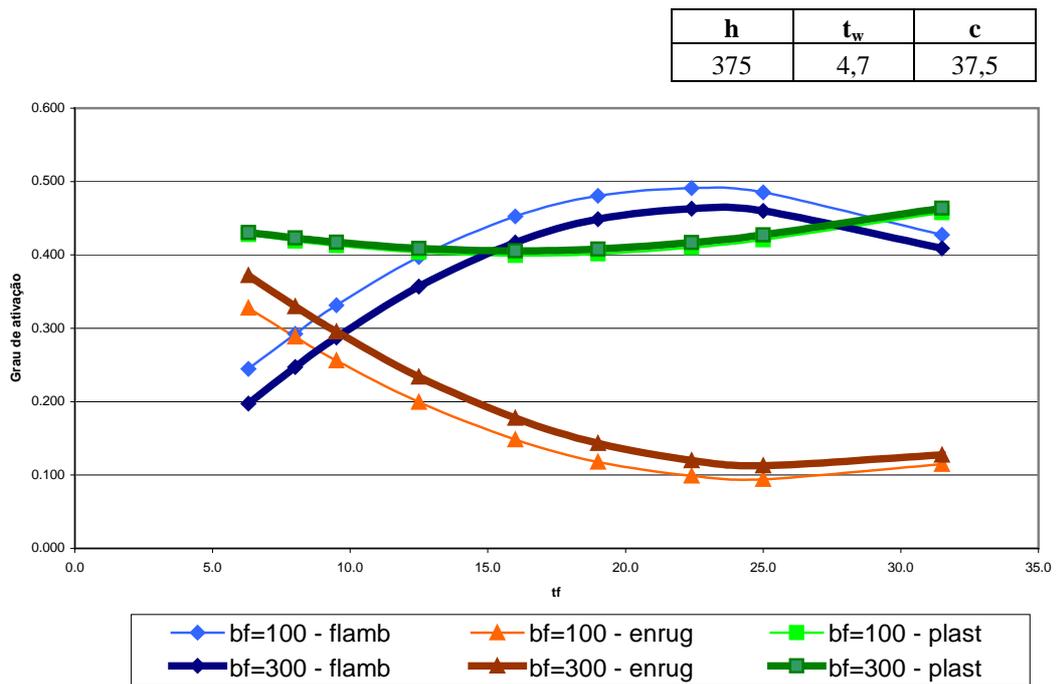


Figura 5.9 – Variação dos graus de ativação das três classes em função da espessura da mesa e da largura de mesa – análise 1.

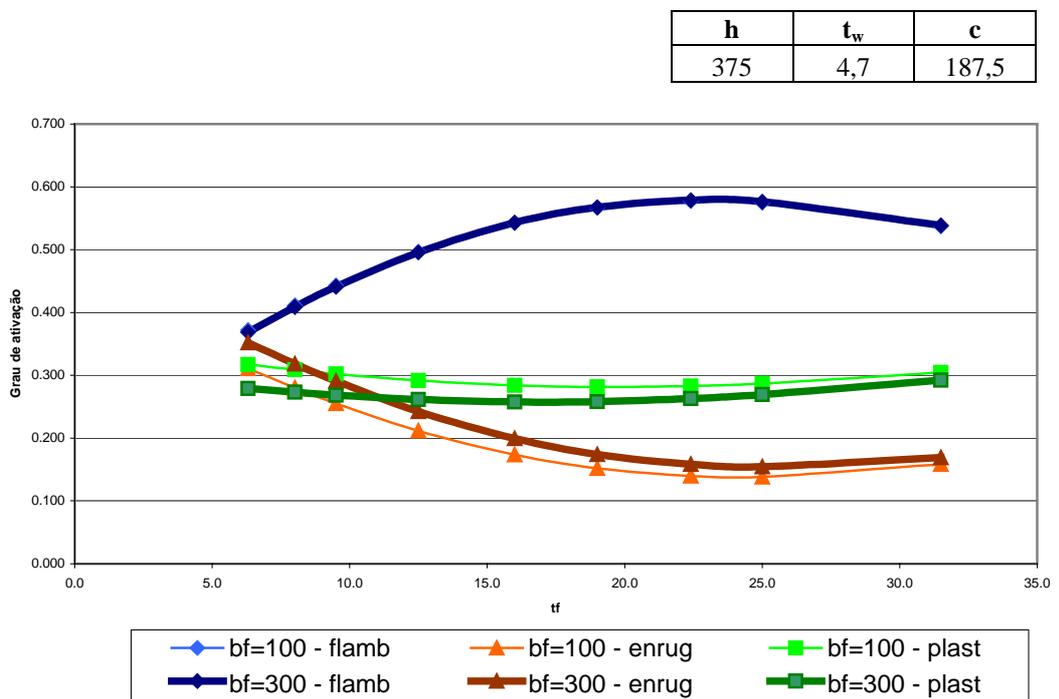


Figura 5.10 – Variação dos graus de ativação das três classes em função da espessura da mesa e da largura de mesa – análise 2.

h	t _w	c
1450	6,3	145

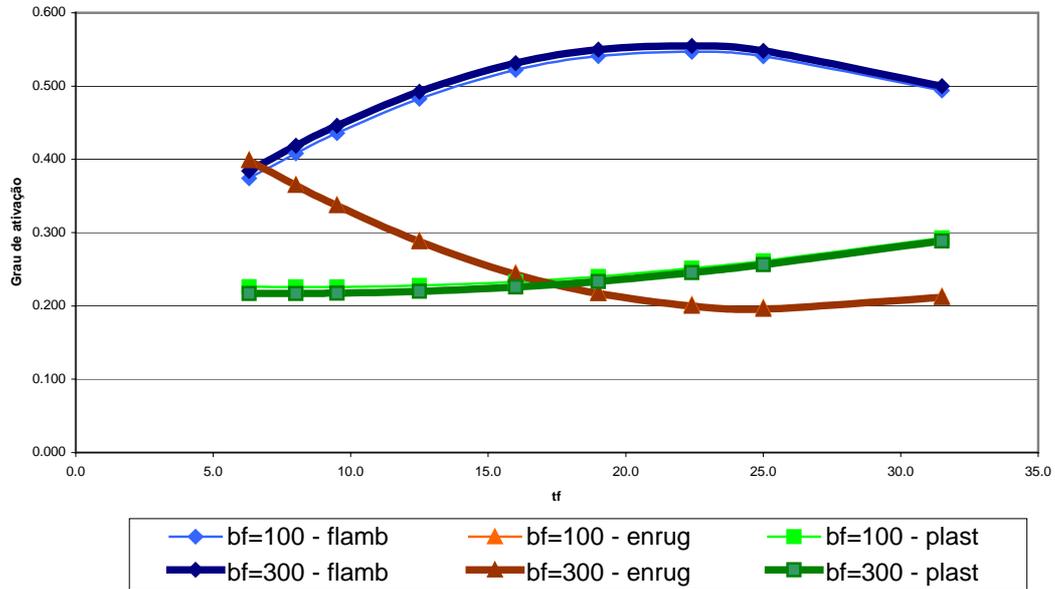


Figura 5.11 – Variação dos graus de ativação das três classes em função da espessura da mesa e da largura de mesa – análise 3.

h	t _w	c
1450	6,3	725

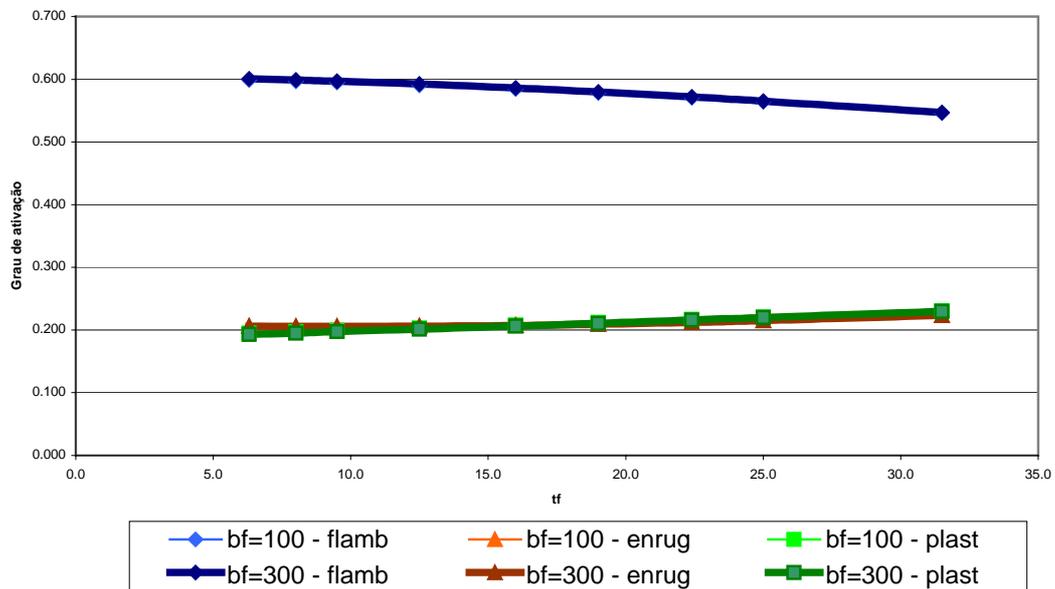


Figura 5.12 – Variação dos graus de ativação das três classes em função da espessura da mesa e da largura de mesa – análise 4.

Nas figuras de 5.9 a 5.12 pode-se verificar que a largura da mesa influencia muito pouco no fenômeno físico, no entanto, esta influência é relativamente maior em mesas mais finas, onde a largura da mesa aumenta ligeiramente a ocorrência de enrugamento, diminuindo a ocorrência de flambagem para cargas em um comprimento carregado menor e as chances de plastificação em comprimentos carregados maiores. Também se verifica que em vigas mais altas e mais esbeltas, a influência deste parâmetro é desprezível. Na Figura 5.9, verifica-se que a espessura da mesa exerce grande influência no fenômeno físico, quanto mais concentrada a carga, ainda assim, a Figura 5.11 mostra que em grandes alturas de alma, a flambagem é o fenômeno dominante.

As próximas análises apresentam uma avaliação da importância da altura da alma. Os parâmetros são apresentados na Tabela 5.4.

Tabela 5.4 – Dimensões dos perfis usados para o estudo $h \times b_f$.

Análise	t_w	t_f	c
1	4,7	6,3	37,5
2	4,7	6,3	187,5
3	4,7	16,0	37,5
4	4,7	16,0	187,5
5	6,3	16,0	145,0
6	6,3	16,0	725,0
7	6,3	32,5	145,0
8	6,3	32,5	725,0
9	9,5	6,3	37,5
10	9,5	6,3	187,5
11	9,5	16,0	37,5
12	9,5	16,0	187,5
13	12,5	16,0	145,0
14	12,5	16,0	725,0
15	12,5	32,5	145,0
16	12,5	32,5	725,0

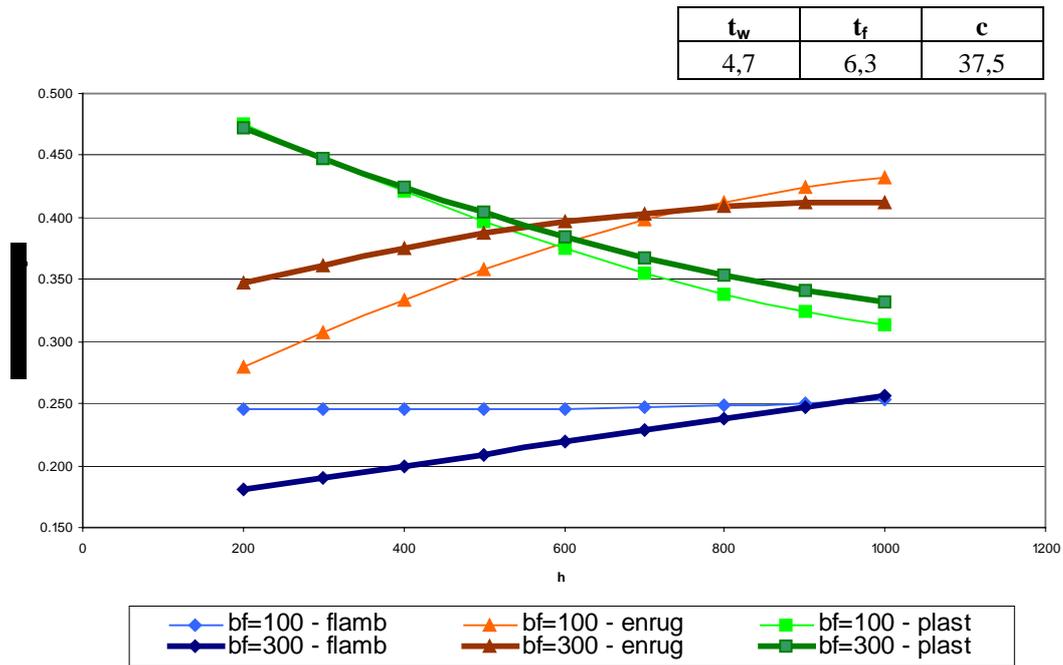


Figura 5.13 – Variação dos graus de ativação das três classes em função da altura da alma e da largura de mesa – análise 1.

PUC-Rio - Certificação Digital Nº null

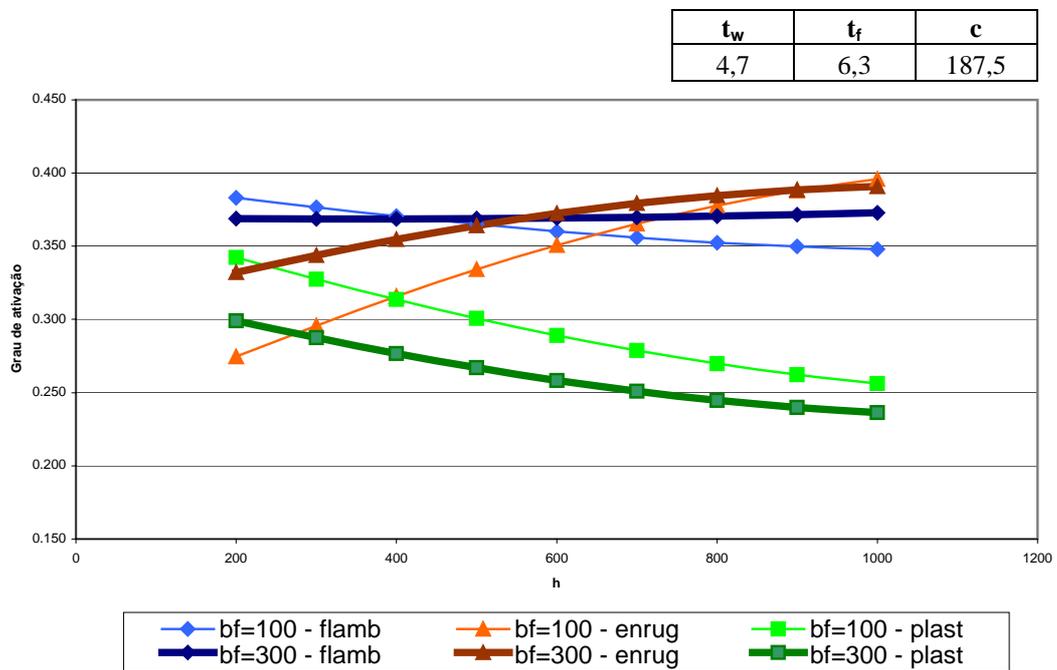


Figura 5.14 – Variação dos graus de ativação das três classes em função da altura da alma e da largura de mesa – análise 2.

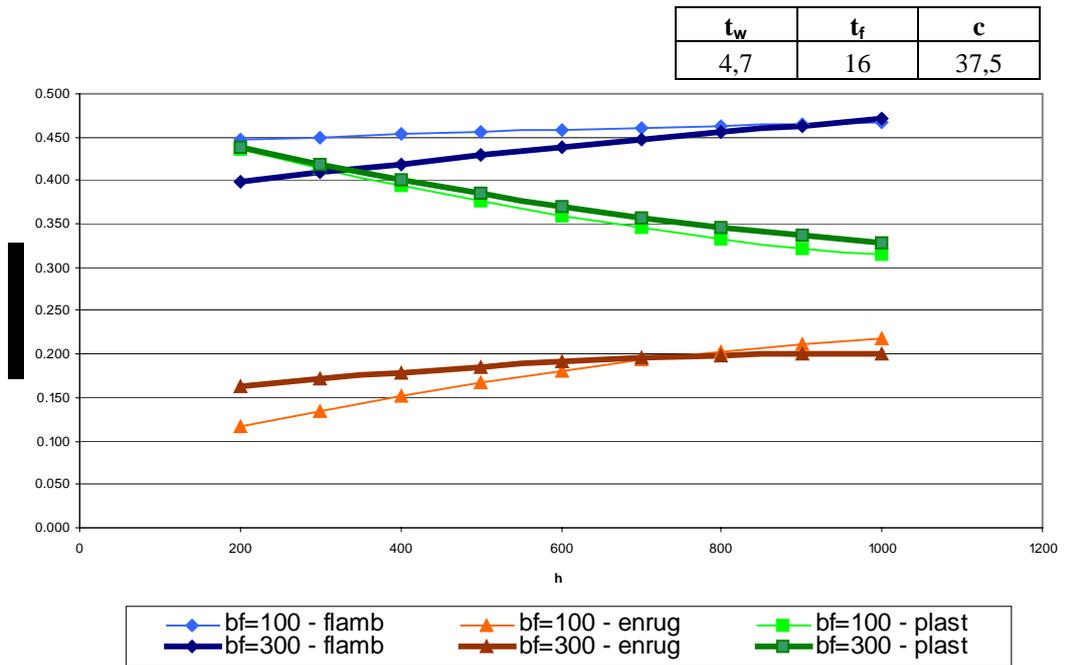


Figura 5.15 – Variação dos graus de ativação das três classes em função da altura da alma e da largura de mesa – análise 3.

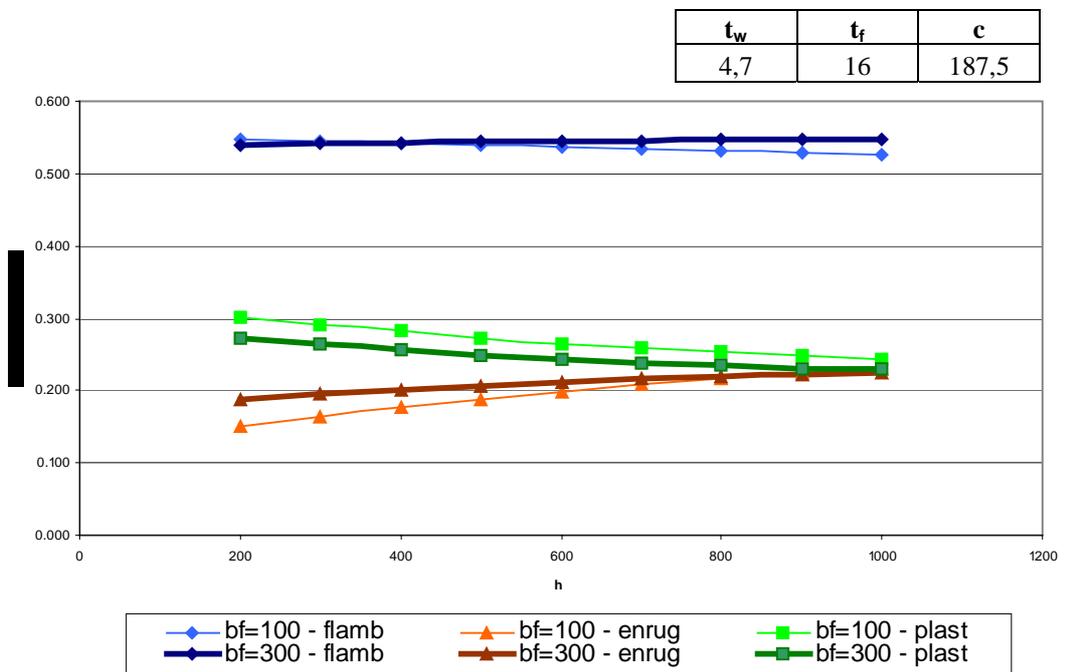


Figura 5.16 – Variação dos graus de ativação das três classes em função da altura da alma e da largura de mesa – análise 4.

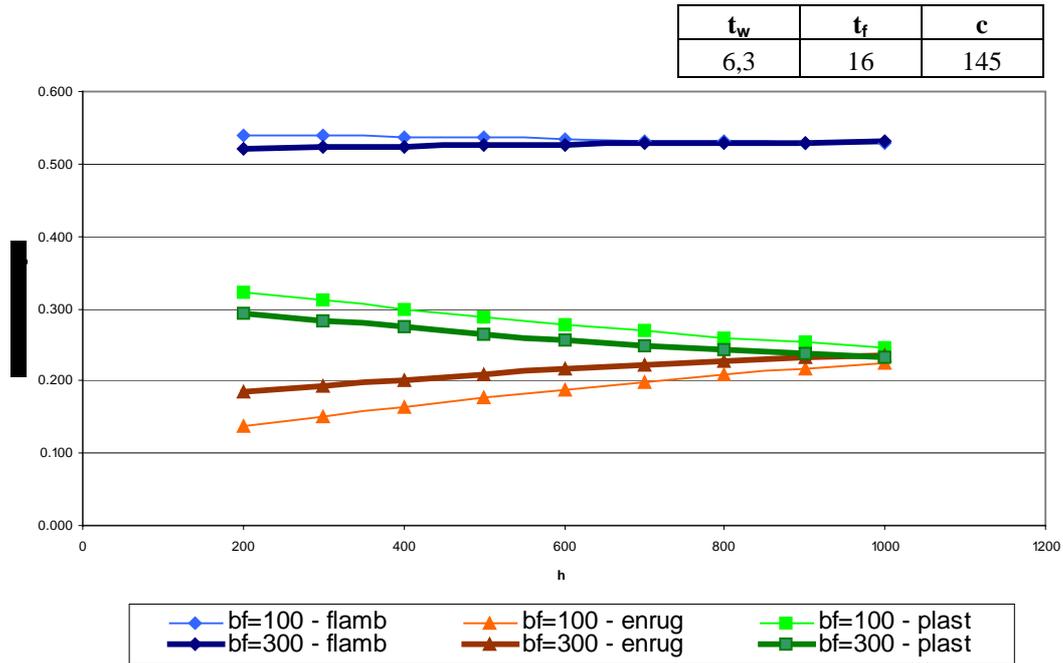


Figura 5.17 – Variação dos graus de ativação das três classes em função da altura da alma e da largura de mesa – análise 5.

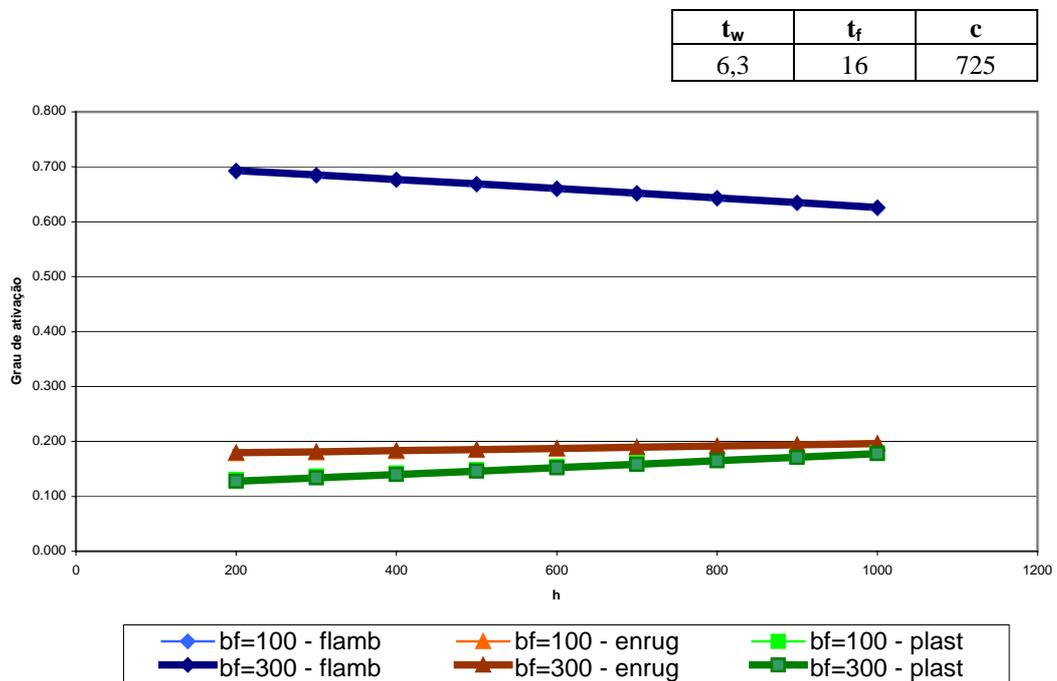


Figura 5.18 – Variação dos graus de ativação das três classes em função da altura da alma e da largura de mesa – análise 6.

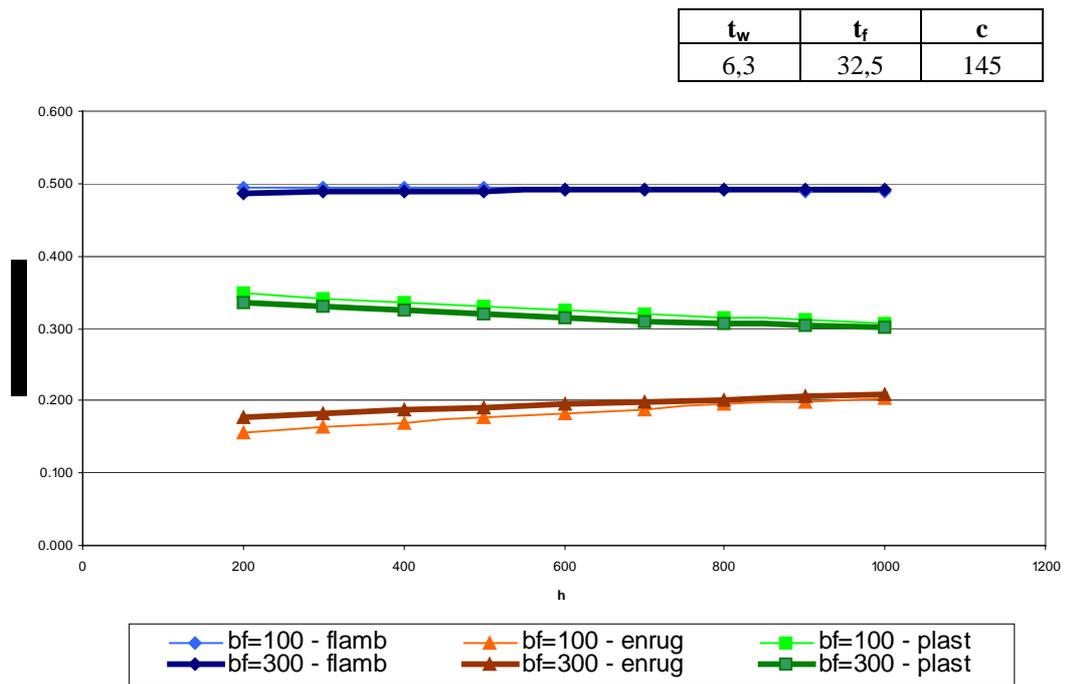


Figura 5.19 – Variação dos graus de ativação das três classes em função da altura da alma e da largura de mesa – análise 7.

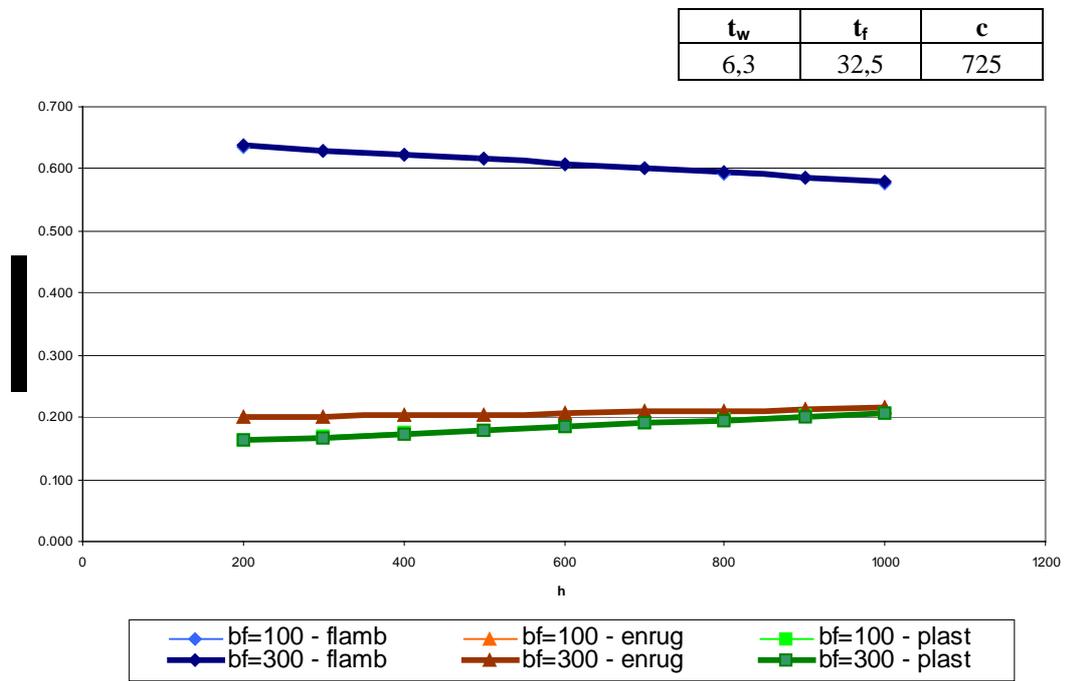


Figura 5.20 – Variação dos graus de ativação das três classes em função da altura da alma e da largura de mesa – análise 8.

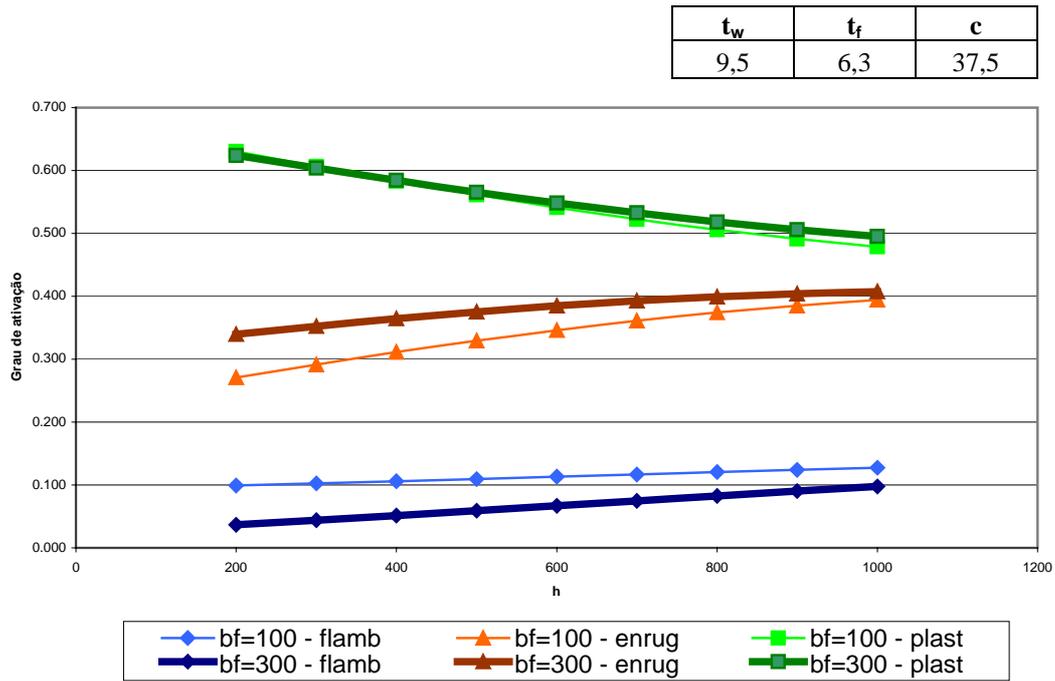


Figura 5.21 – Variação dos graus de ativação das três classes em função da altura da alma e da largura de mesa – análise 9.

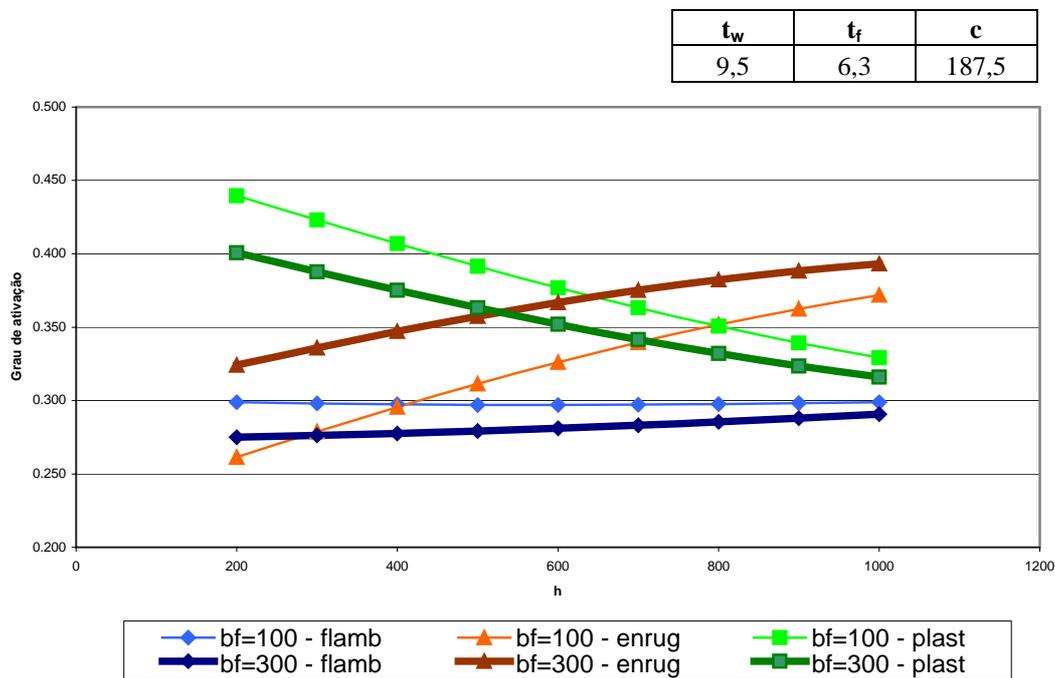


Figura 5.22 – Variação dos graus de ativação das três classes em função da altura da alma e da largura de mesa – análise 10.

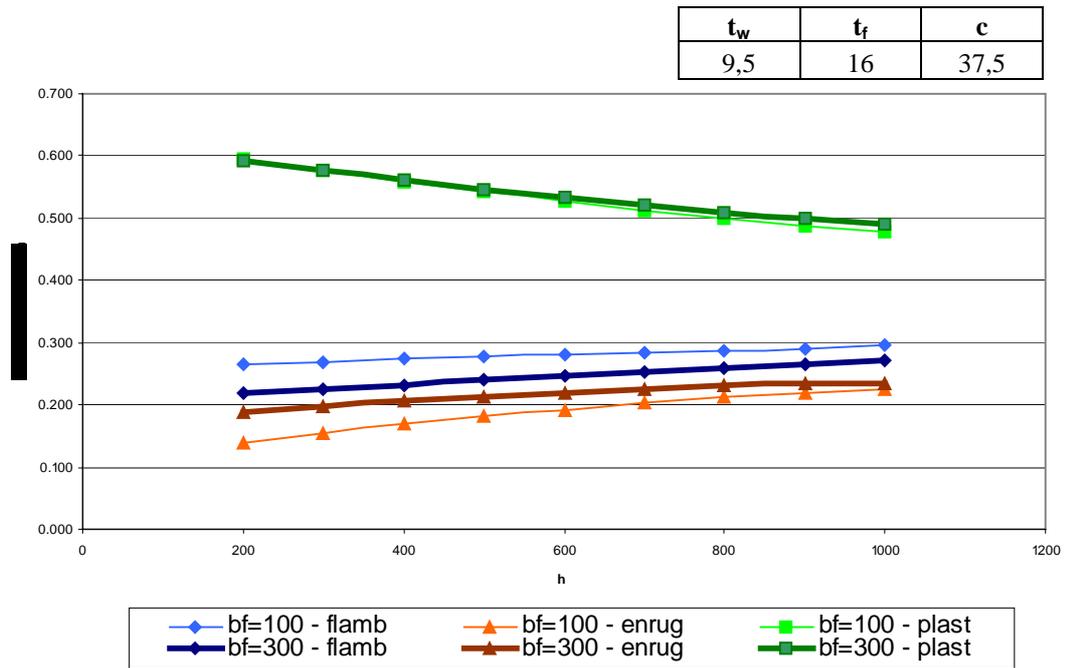


Figura 5.23 – Variação dos graus de ativação das três classes em função da altura da alma e da largura de mesa – análise 11.

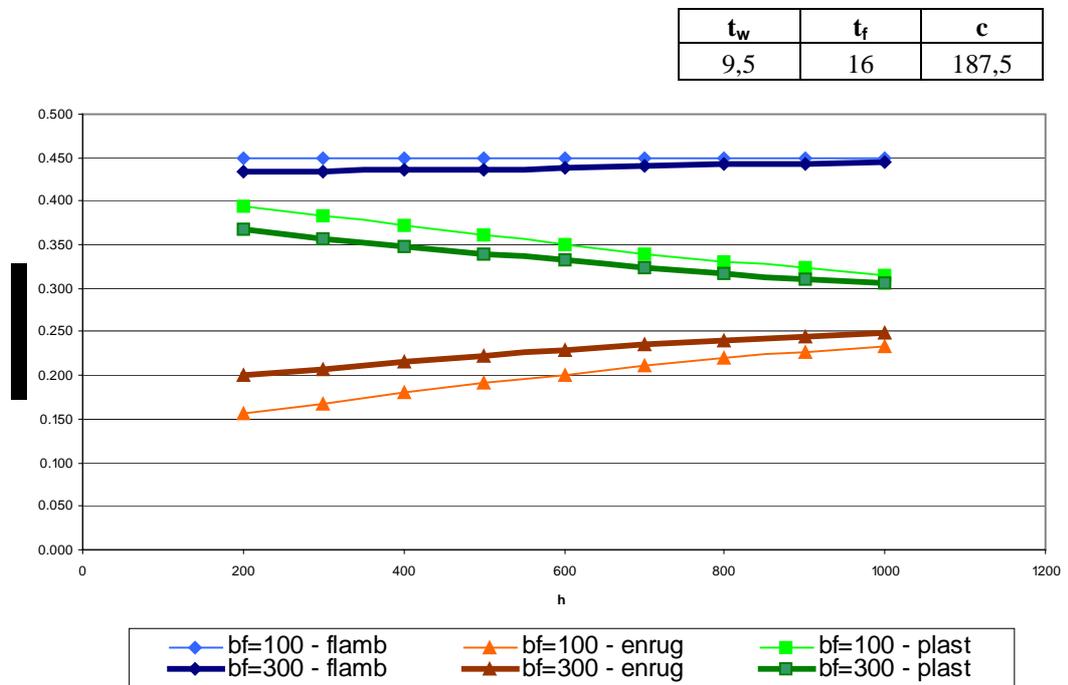


Figura 5.24 – Variação dos graus de ativação das três classes em função da altura da alma e da largura de mesa – análise 12.

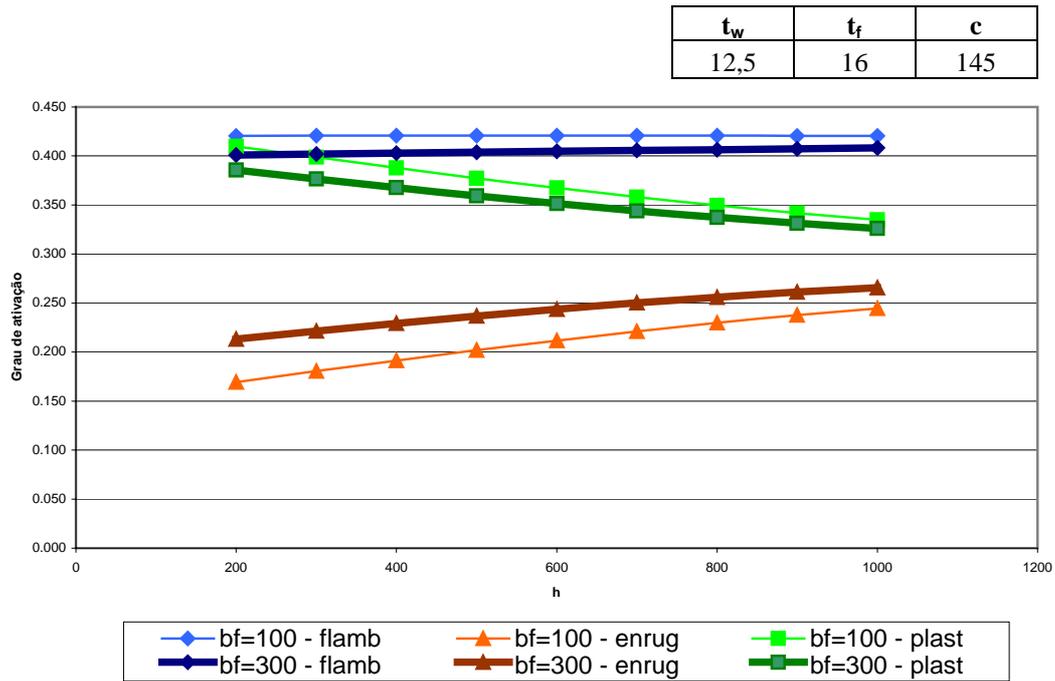


Figura 5.25 – Variação dos graus de ativação das três classes em função da altura da alma e da largura de mesa – análise 13.

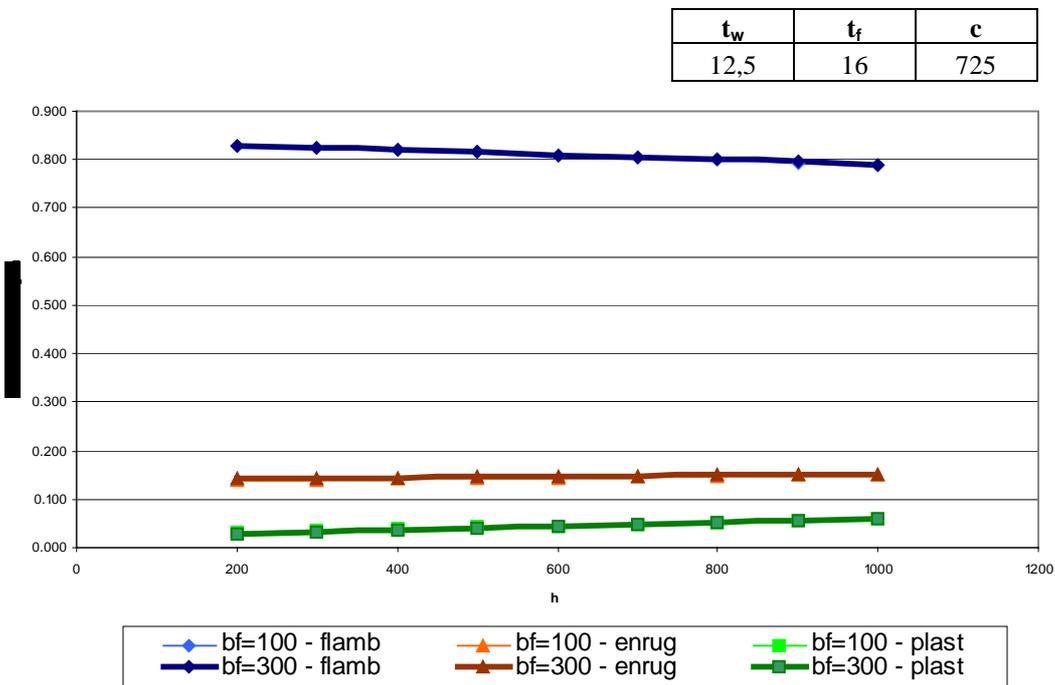


Figura 5.26 – Variação dos graus de ativação das três classes em função da altura da alma e da largura de mesa – análise 14.

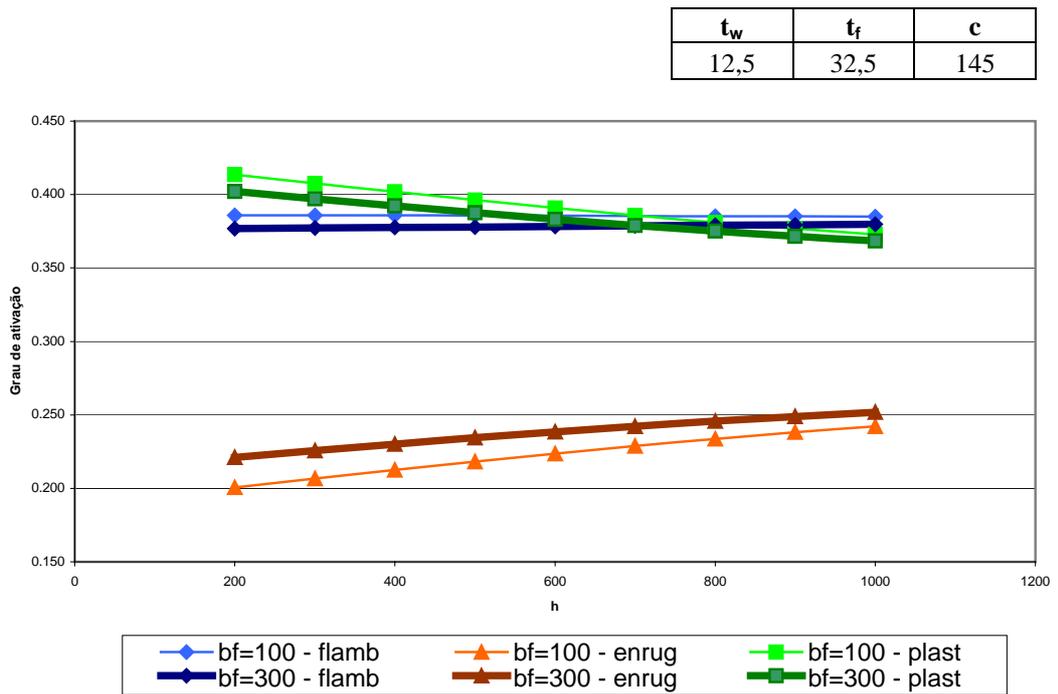


Figura 5.27 – Variação dos graus de ativação das três classes em função da altura da alma e da largura de mesa – análise 15.

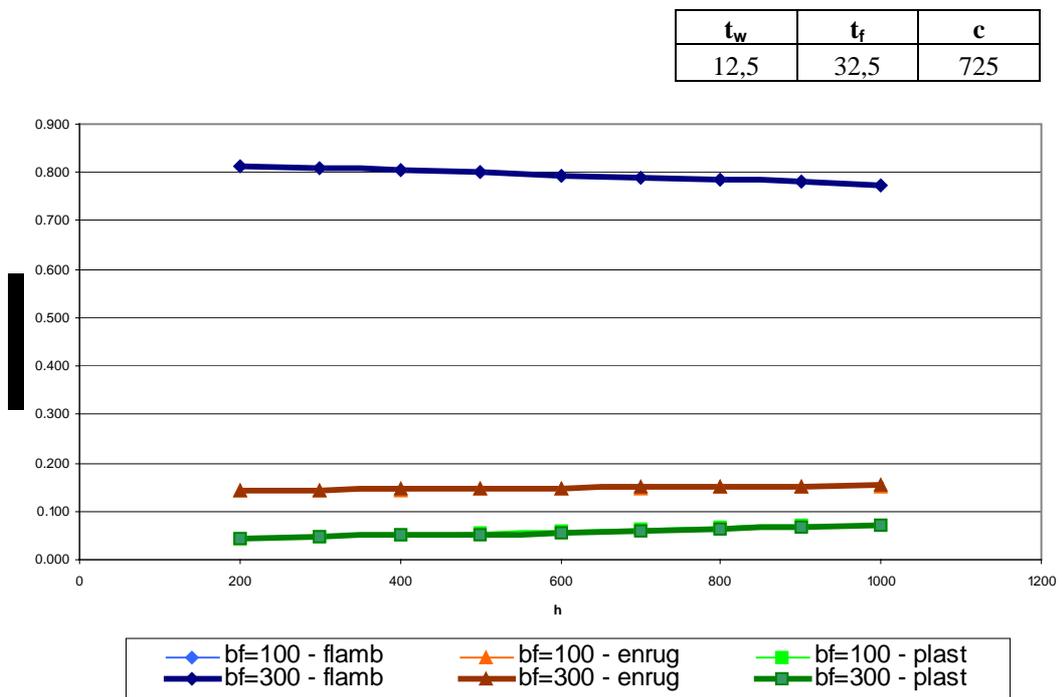


Figura 5.28 – Variação dos graus de ativação das três classes em função da altura da alma e da largura de mesa – análise 16.

As primeiras conclusões a partir da observação da Figura 5.13 a Figura 5.28 são compatíveis com a teoria, de que uma altura maior diminui as chances de plastificação e aumenta os problemas de instabilidade, principalmente o grau de ativação de enrugamento em mesas mais estreitas e almas mais finas. No entanto, deve-se observar que em cada gráfico, a espessura da alma é sempre a mesma, e desta forma, a esbeltez aumenta junto com a altura da alma ao mesmo tempo em que o fator de forma a/h diminui, assim, em vigas de almas e mesas mais espessas e carga mais distribuída, o grau de ativação de plastificação começa a aumentar ligeiramente.

As cargas concentradas em um comprimento menor aumentam as chances de plastificação e diminuem a ocorrência de flambagem global. Também se verifica que em mesa mais espessas o enrugamento é mais raro.

A fim de estudar a influência do fator de forma isoladamente, foram mantidas constantes a altura e espessura da alma, bem como a largura da mesa, e as espessuras de mesa foram de 6,3 mm, 16 mm e 31,5 mm, respeitando as espessuras comerciais de mesa para os perfis soldados. Os valores adotados para os parâmetros foram:

Tabela 5.5 – Dimensões dos perfis usados para o estudo $a/h \times t_f$.

Análise	h	t_w	c
1	375	4,7	37,5
2	375	4,7	187,5
3	375	9,5	37,5
4	375	9,5	187,5
5	1450	6,3	145,0
6	1450	6,3	725,0
7	1450	12,5	145,0
8	1450	12,5	725,0

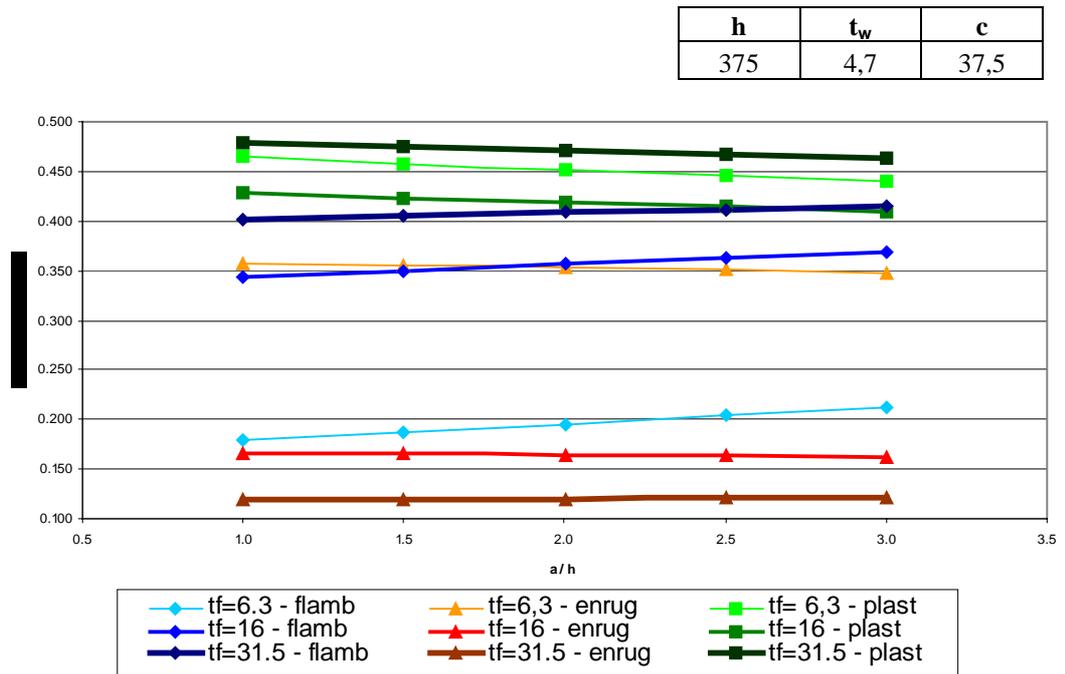


Figura 5.29 – Variação dos graus de ativação das três classes em função do fator de forma do painel de alma e da espessura de mesa – análise 1.

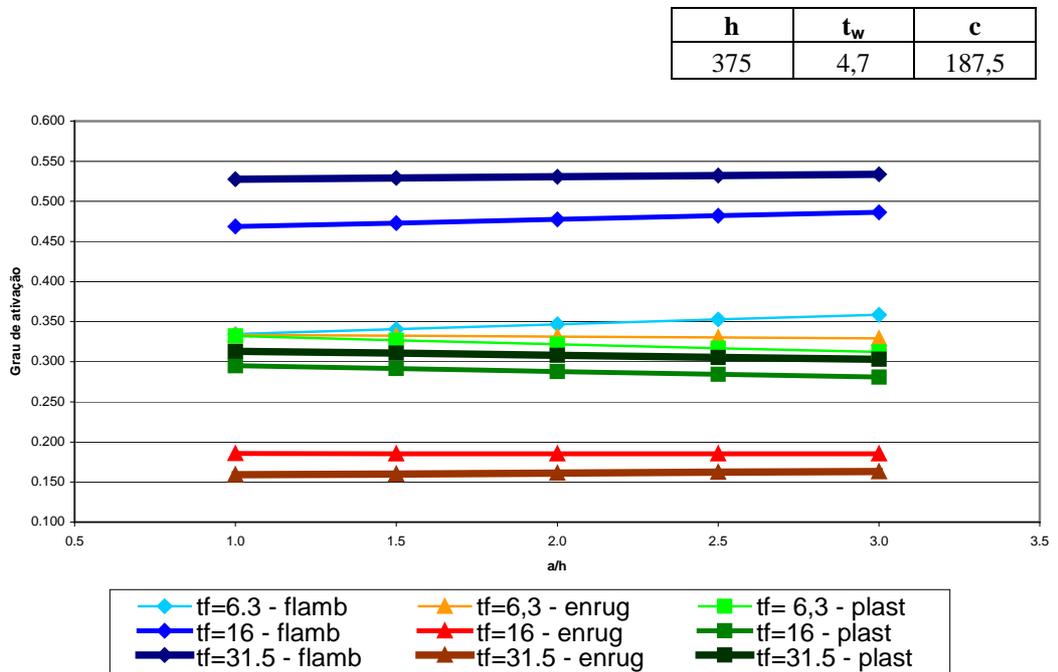


Figura 5.30 – Variação dos graus de ativação das três classes em função do fator de forma do painel de alma e da espessura de mesa – análise 2.

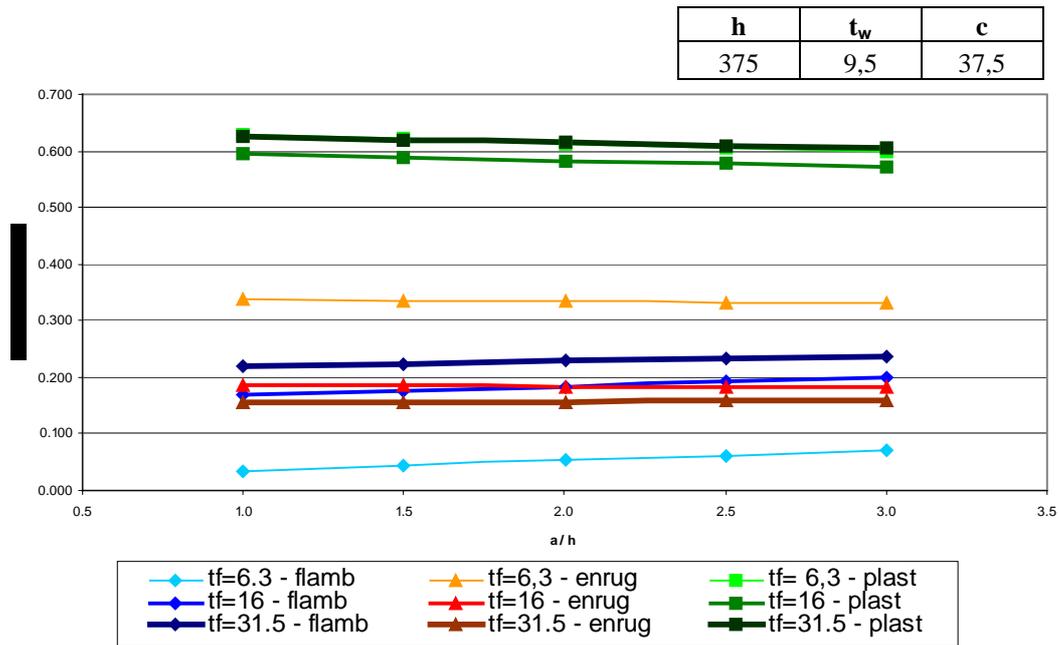


Figura 5.31 – Variação dos graus de ativação das três classes em função do fator de forma do painel de alma e da espessura de mesa – análise 3.

PUC-Rio - Certificação Digital Nº null

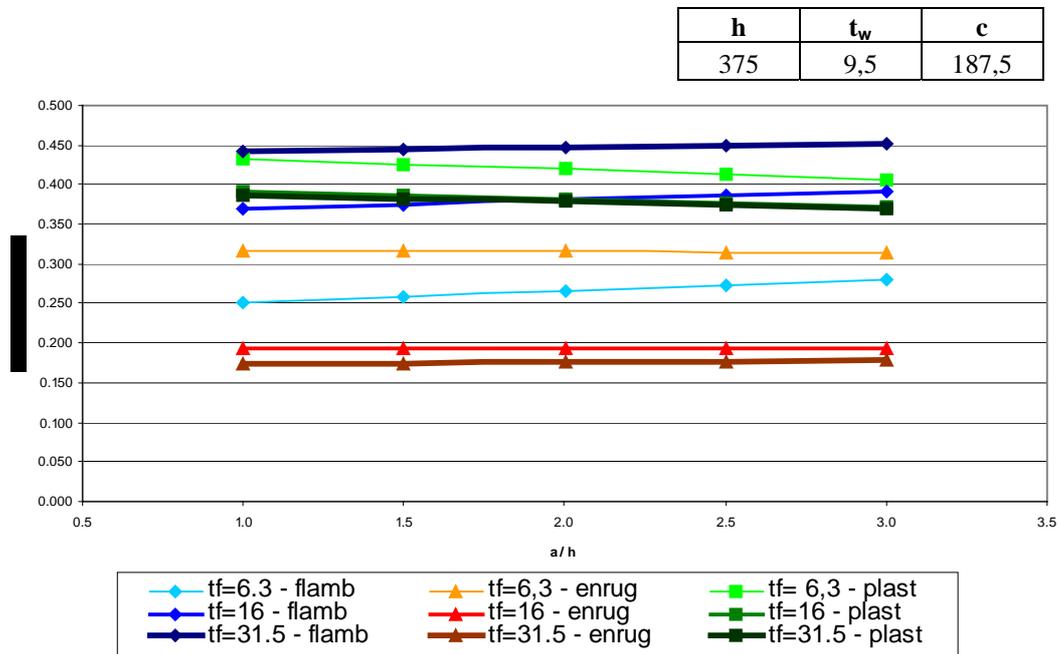


Figura 5.32 – Variação dos graus de ativação das três classes em função do fator de forma do painel de alma e da espessura de mesa – análise 4.

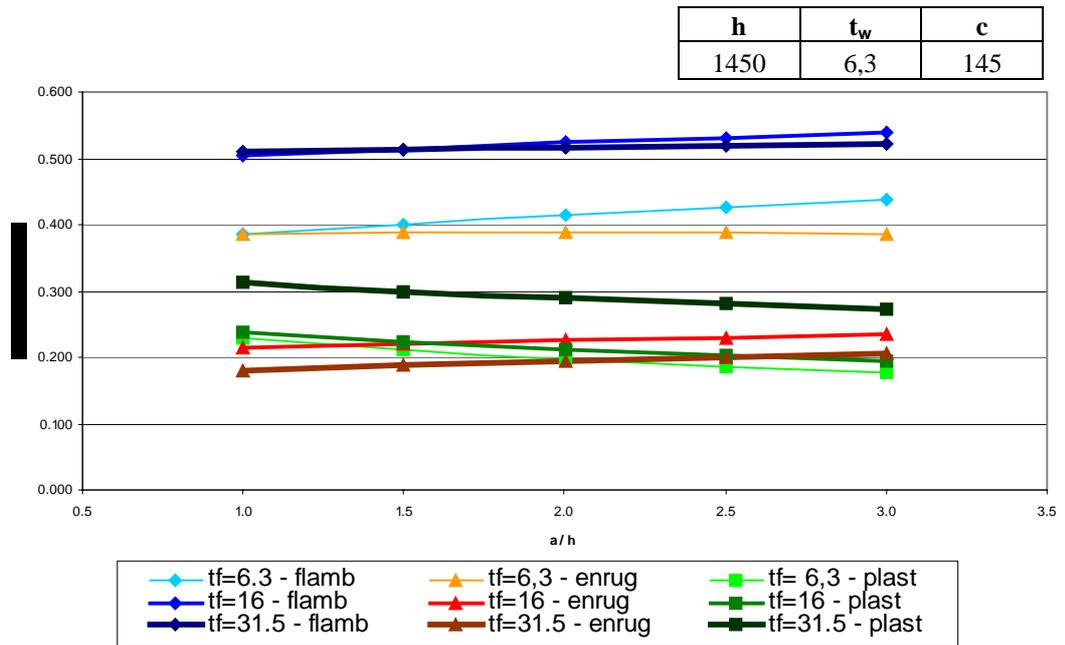


Figura 5.33 – Variação dos graus de ativação das três classes em função do fator de forma do painel de alma e da espessura de mesa – análise 5.

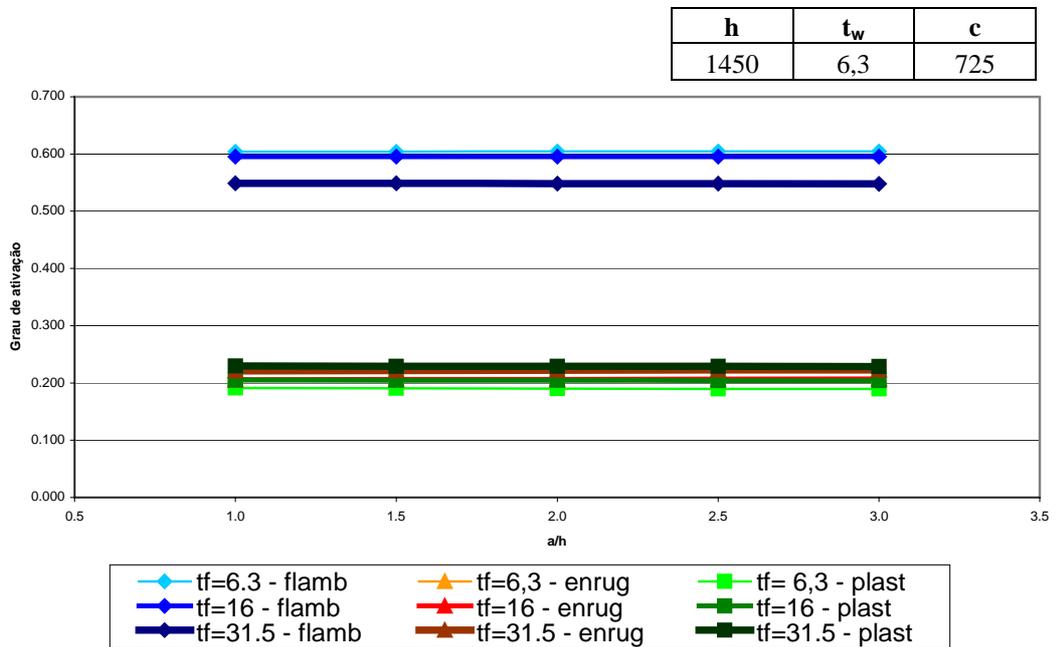


Figura 5.34 – Variação dos graus de ativação das três classes em função do fator de forma do painel de alma e da espessura de mesa – análise 6.

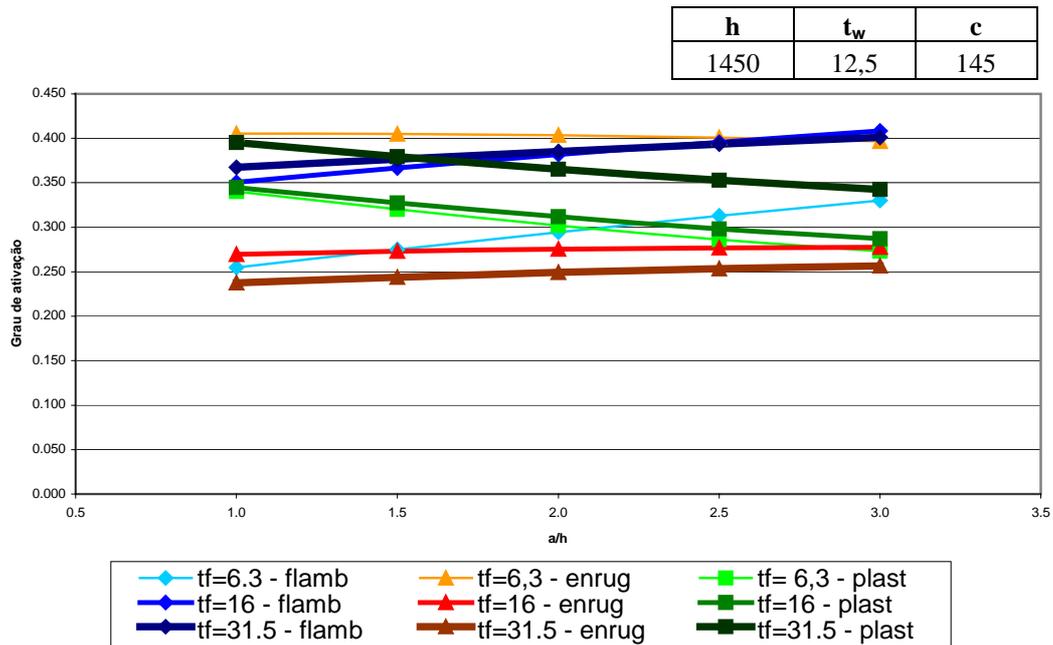


Figura 5.35 – Variação dos graus de ativação das três classes em função do fator de forma do painel de alma e da espessura de mesa – análise 7.

PUC-Rio - Certificação Digital Nº null

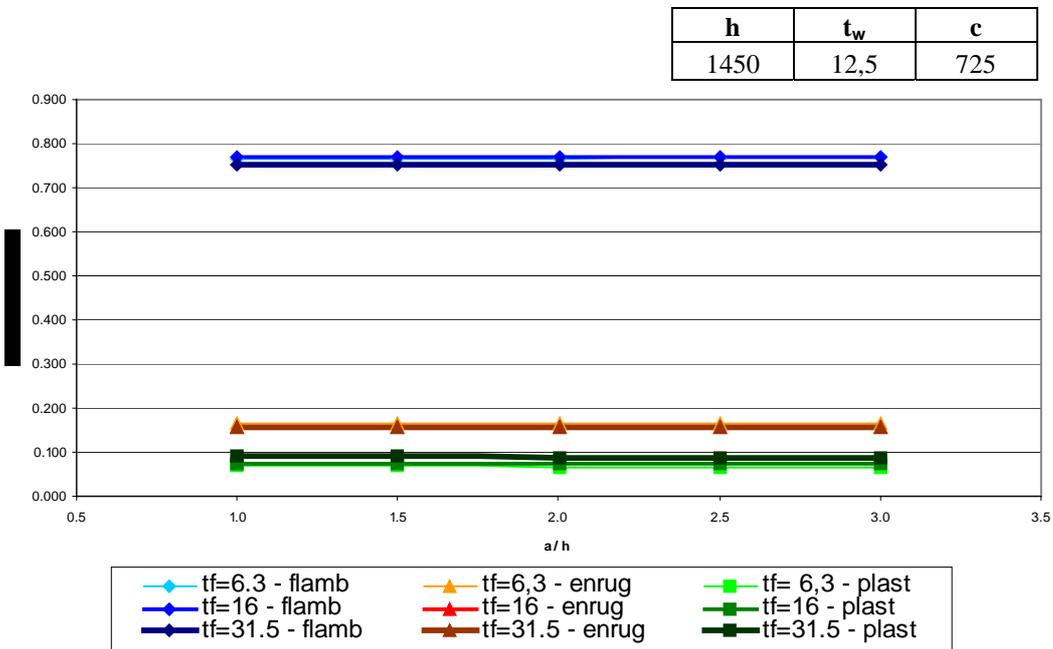


Figura 5.36 – Variação dos graus de ativação das três classes em função do fator de forma do painel de alma e da espessura de mesa – análise 8.

Da Figura 5.29 a Figura 5.36 verifica-se que o fator de forma a/h exerce pouca influência no fenômeno físico, no entanto esta influência tende a ser mais significativa em mesas mais finas, almas mais esbeltas e comprimentos carregados menores (análises 5 e 7). Nestes casos os graus de ativação de plastificação diminuem com o aumento da distância entre os enrijecedores, enquanto os de enrugamento e flambagem aumentam ligeiramente, na medida em que a estabilidade proporcionada pelos enrijecedores diminui.

Outro estudo avaliou os resultados da variação do comprimento carregado. A relação c/h variou de 0,1 a 0,5 para os seguintes parâmetros:

Tabela 5.6 – Dimensões dos perfis usados para o estudo c/h x t_r .

Análise	h	t_w
1	375	4,7
2	375	9,5
3	1450	6,3
4	1450	12,5

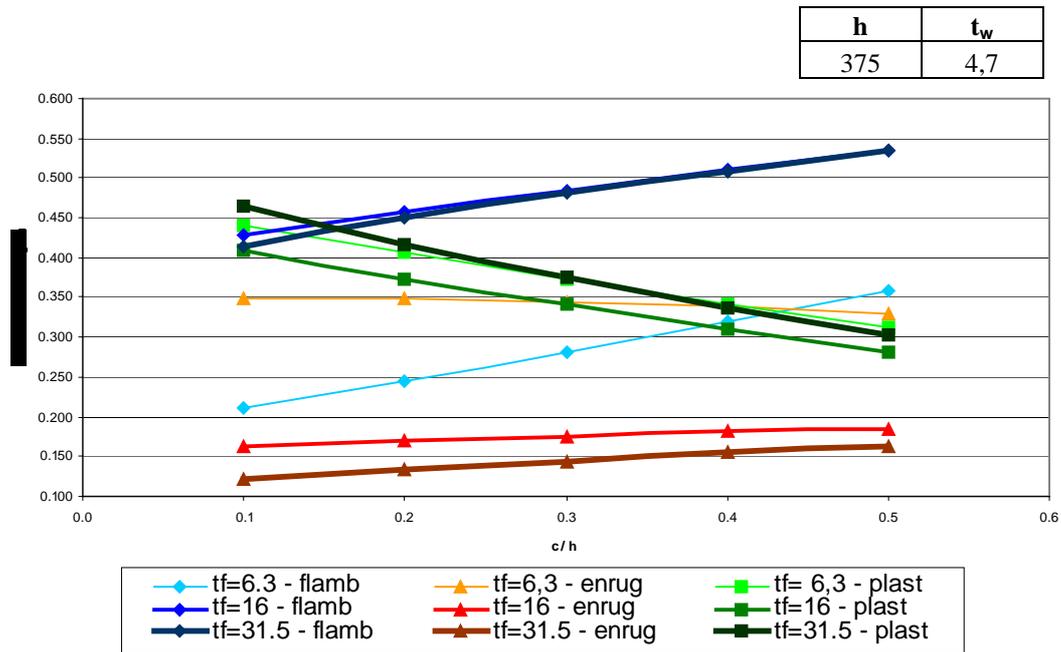


Figura 5.37 - Variação dos graus de ativação das três classes em função da relação c/h e da espessura de mesa – análise 1.

PUC-Rio - Certificação Digital Nº null

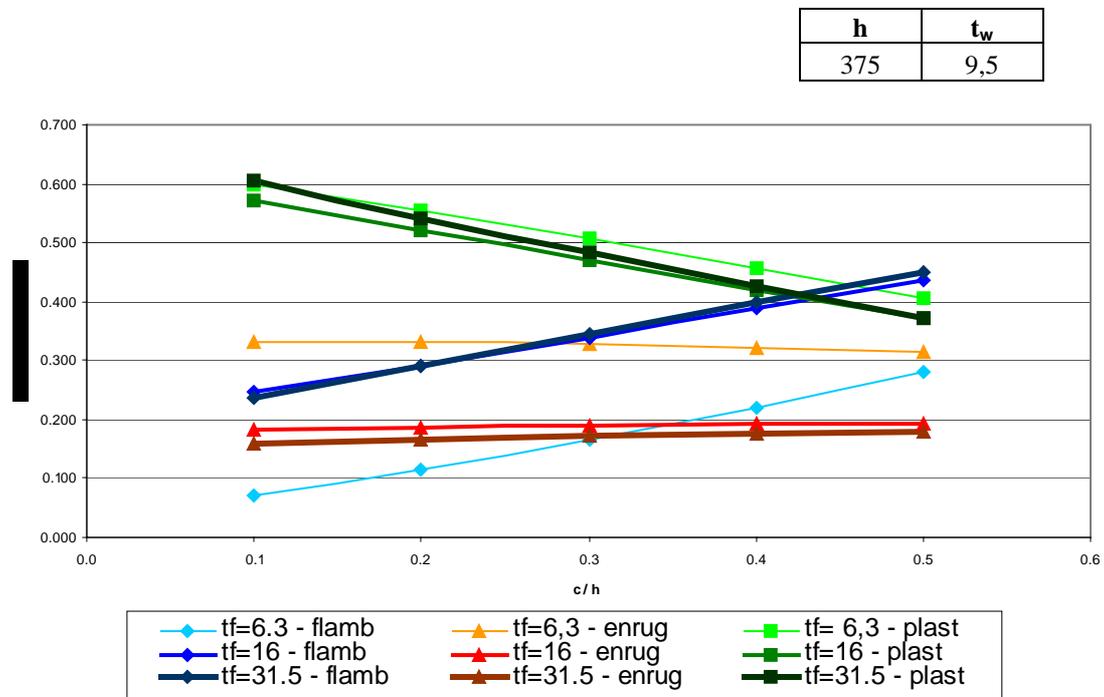


Figura 5.38 - Variação dos graus de ativação das três classes em função da relação c/h e da espessura de mesa – análise 2.

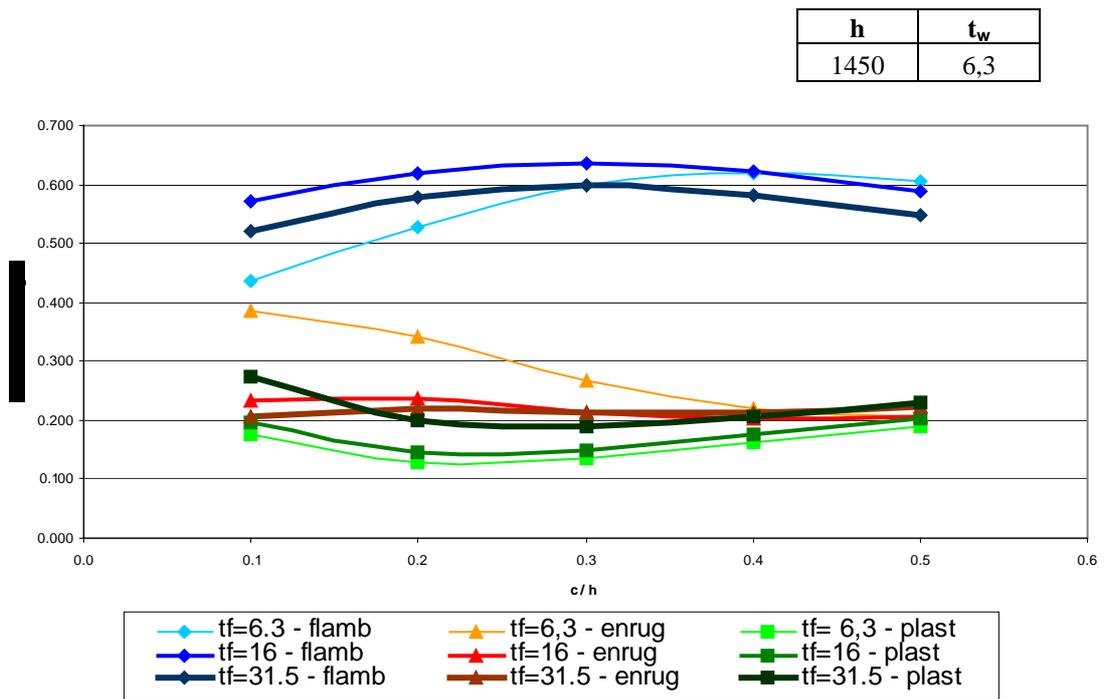


Figura 5.39 - Variação dos graus de ativação das três classes em função da relação c/h e da espessura de mesa – análise 3.

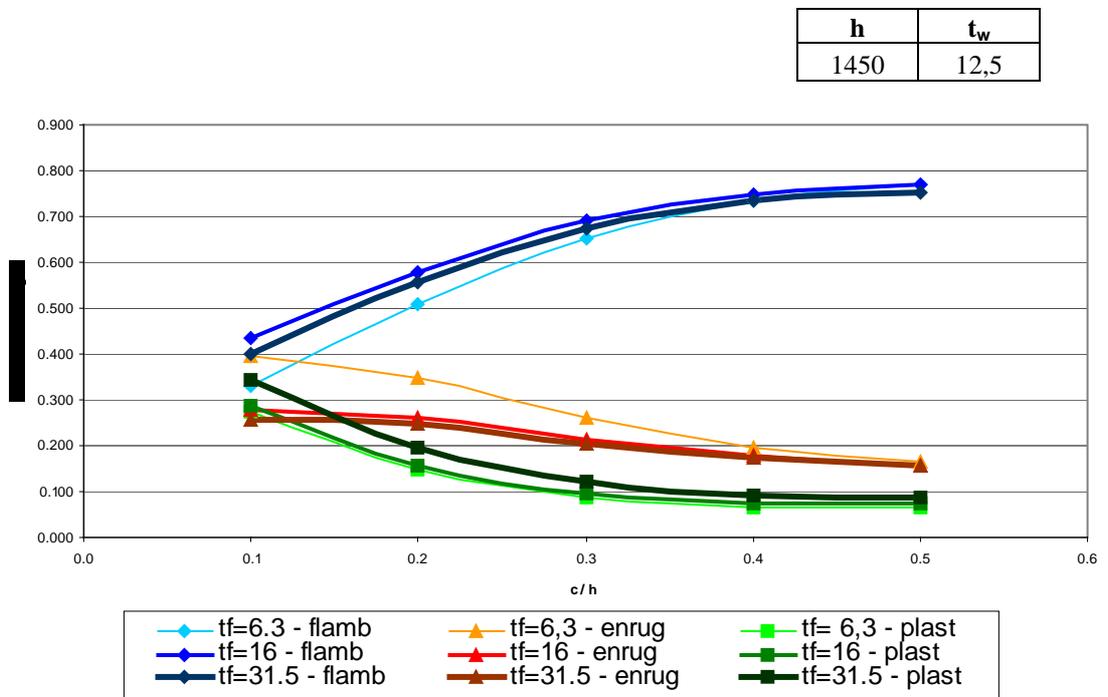


Figura 5.40 - Variação dos graus de ativação das três classes em função da relação c/h e da espessura de mesa – análise 4.

Como pode ser observado da Figura 5.37 a Figura 5.40, o aumento do comprimento carregado ajuda no espraçamento da carga, reduzindo os graus de ativação de plastificação e aumentando a probabilidade de problemas de instabilidade. No entanto, em vigas de mesa mais fina, este aumento da relação c/h também reduz a probabilidade de enrugamento e as chances de flambagem aumentam consideravelmente. Observa-se uma variação dos fenômenos mais linear em vigas de altura menor e almas mais compactas, enquanto para alturas de alma maiores a variação dos fenômenos é não linear. A variação da largura da mesa foi desprezada por não apresentar variação significativa no fenômeno físico.

A relação entre o fator de forma e o comprimento carregado também foi avaliada. A relação c/h variou de 0,1 a 0,5 e o fator de forma variou de 1 a 3.

Tabela 5.7 – Dimensões dos perfis usados para o estudo a/h x c/h .

Análise	h	t_w	b_f	t_f
1	375	4,7	170	6,3
2	375	4,7	170	16,0
3	375	4,7	375	6,3
4	375	4,7	375	16,0
5	375	9,5	170	6,3
6	375	9,5	170	16,0
7	375	9,5	375	6,3
8	375	9,5	375	16,0

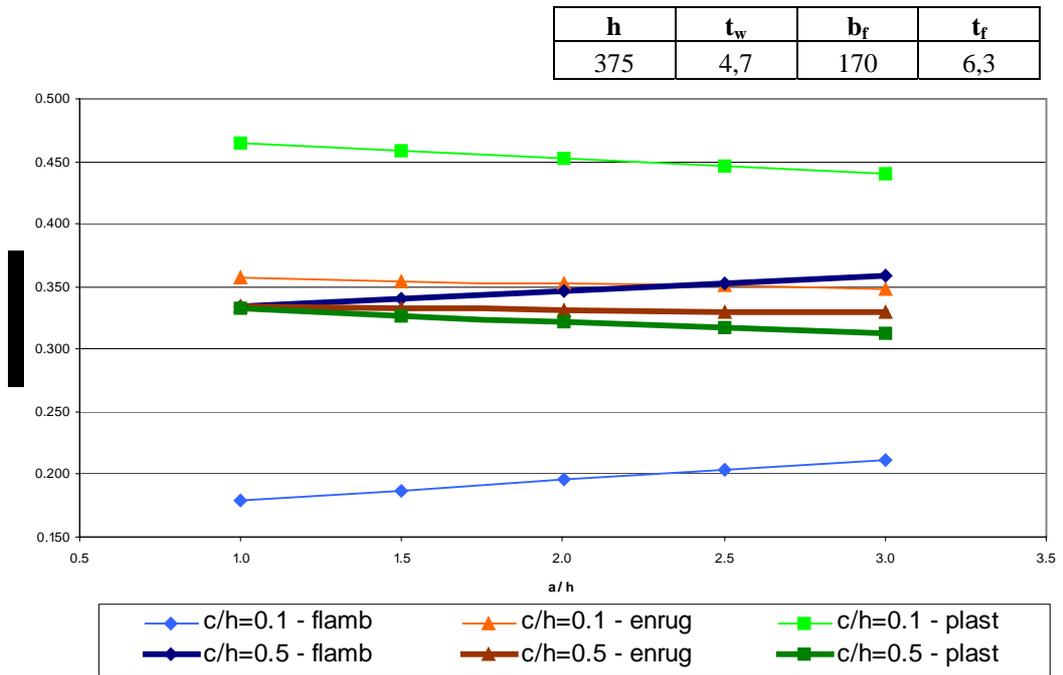


Figura 5.41 - Variação dos graus de ativação das três classes em função da relação a/h e do comprimento carregado – análise 1.

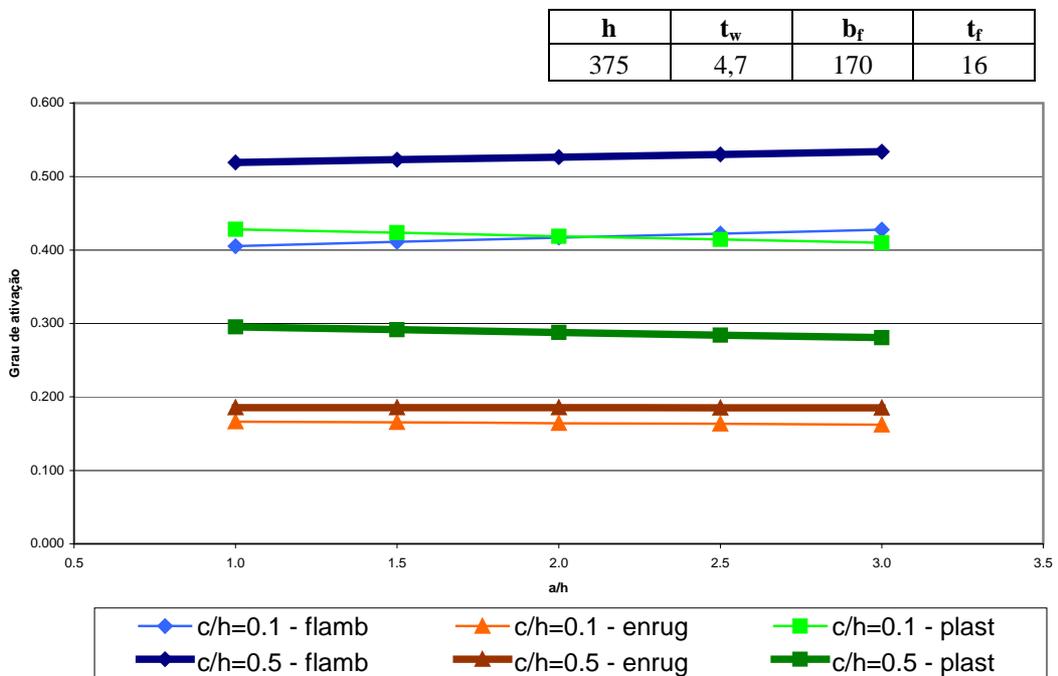


Figura 5.42 - Variação dos graus de ativação das três classes em função da relação a/h e do comprimento carregado – análise 2.

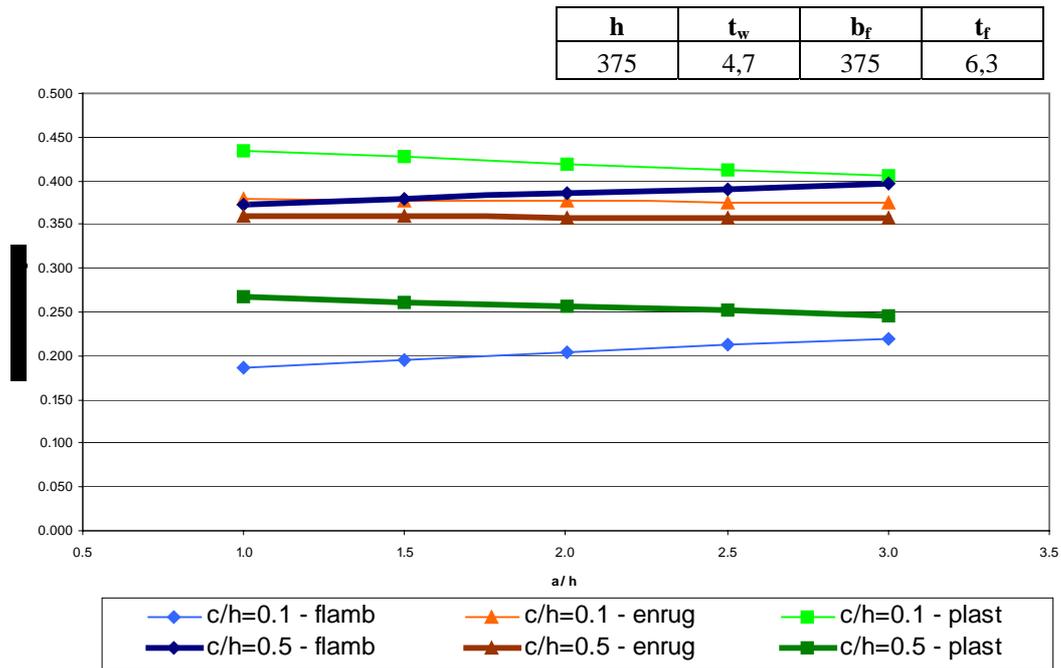


Figura 5.43 - Variação dos graus de ativação das três classes em função da relação a/h e do comprimento carregado – análise 3.

PUC-Rio - Certificação Digital Nº null

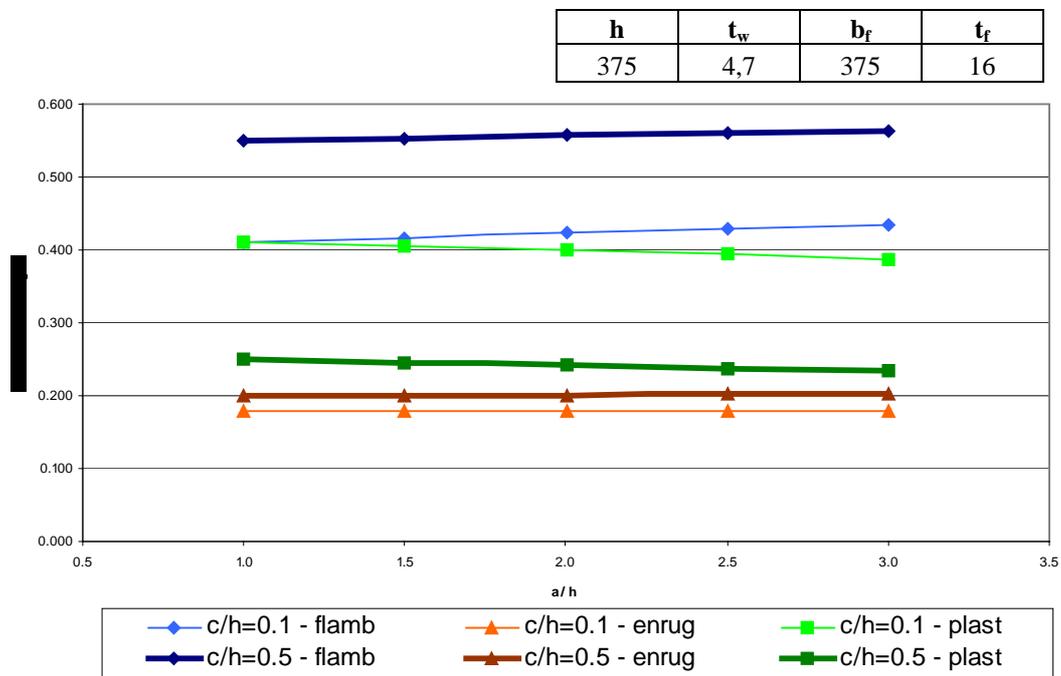


Figura 5.44 - Variação dos graus de ativação das três classes em função da relação a/h e do comprimento carregado – análise 4.

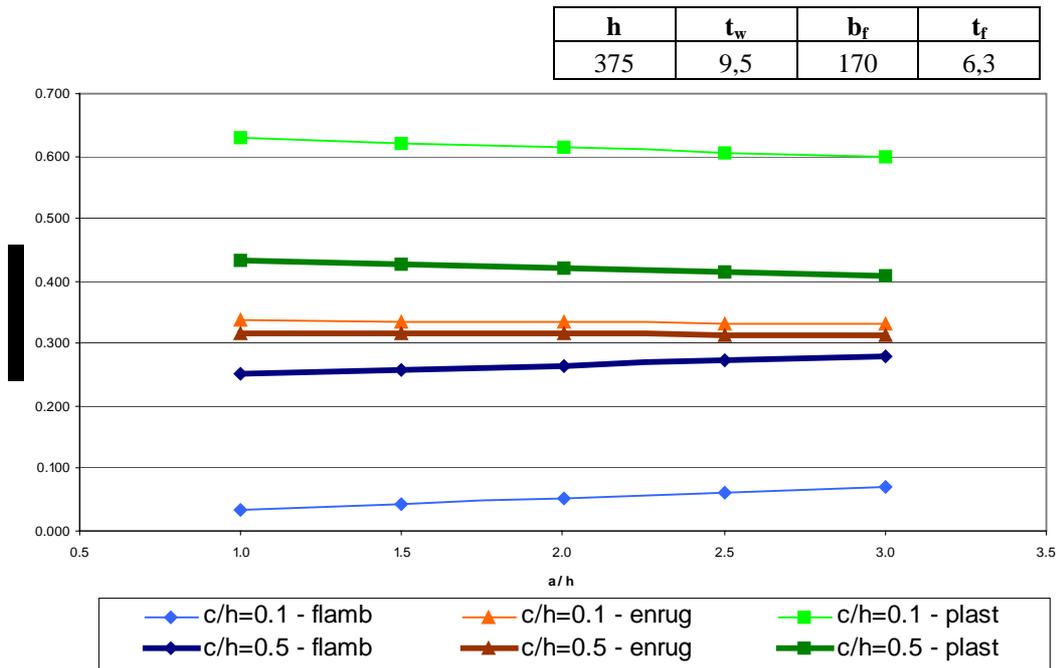


Figura 5.45 - Variação dos graus de ativação das três classes em função da relação a/h e do comprimento carregado – análise 5.

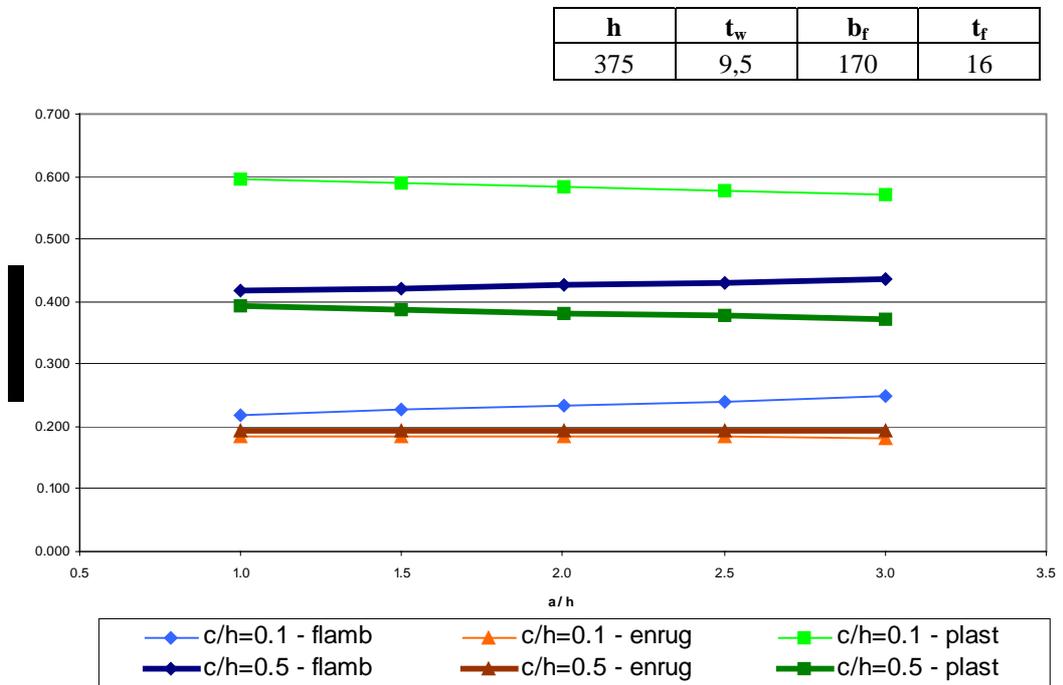


Figura 5.46 - Variação dos graus de ativação das três classes em função da relação a/h e do comprimento carregado – análise 6.

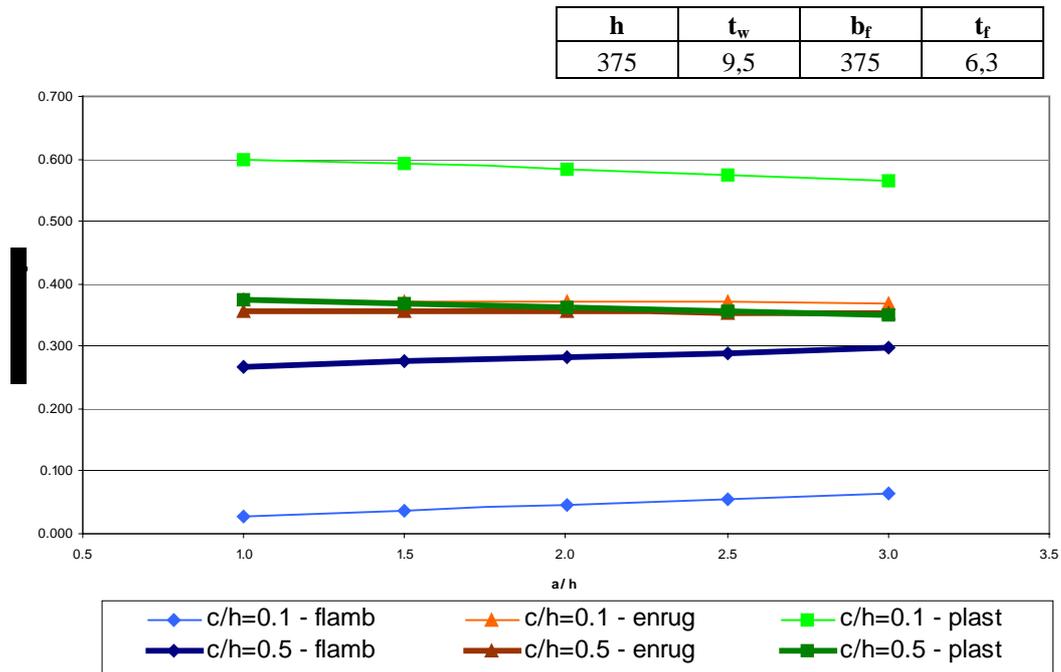


Figura 5.47 - Variação dos graus de ativação das três classes em função da relação a/h e do comprimento carregado – análise 7.

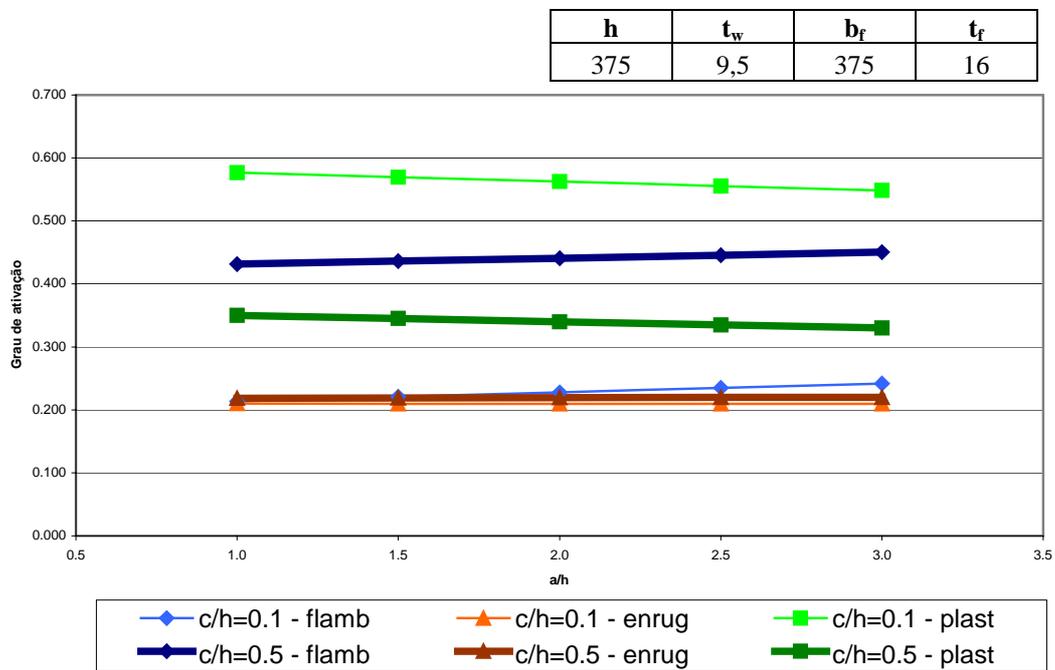


Figura 5.48 - Variação dos graus de ativação das três classes em função da relação a/h e do comprimento carregado – análise 8.

Observando as figuras de 5.41 a 5.48, verifica-se que em vigas de mesas mais finas e comprimentos carregados maiores, a flambagem predomina, enquanto para cargas mais concentradas, a plastificação da região é o fenômeno dominante. Os graus de ativação de enrugamento não apresentaram grandes alterações em função do fator de forma. A influência do fator de forma só é significativa em perfis de espessuras de mesa e de alma reduzidas.

Alguns estudos adicionais foram realizados, envolvendo as relações entre a espessura da alma e fatores como a altura da alma e o comprimento carregado. O primeiro, relacionando a altura e a espessura da alma, é apresentado a seguir.

Tabela 5.8 – Dimensões dos perfis usados para o estudo $h \times t_w$.

Análise	b_f	t_f	c
1	170	6,3	37,5
2	170	16,0	187,5
3	375	6,3	37,5
4	375	16,0	187,5
5	170	6,3	37,5
6	170	16,0	187,5
7	375	6,3	37,5
8	375	16,0	187,5

Tabela 5.9 – Dimensões dos perfis usados para o estudo $h \times t_f$.

Análise	t_w	b_f	c
1	4,7	170	37,5
2	4,7	170	187,5
3	9,5	170	37,5
4	9,5	170	187,5

Tabela 5.10 – Dimensões dos perfis usados para o estudo $c/h \times t_w$.

Análise	h	b_f	t_f
1	375	170	6,3
2	375	170	16,0
3	375	375	6,3
4	375	375	16,0

b_f	t_f	c
170	6,3	37,5

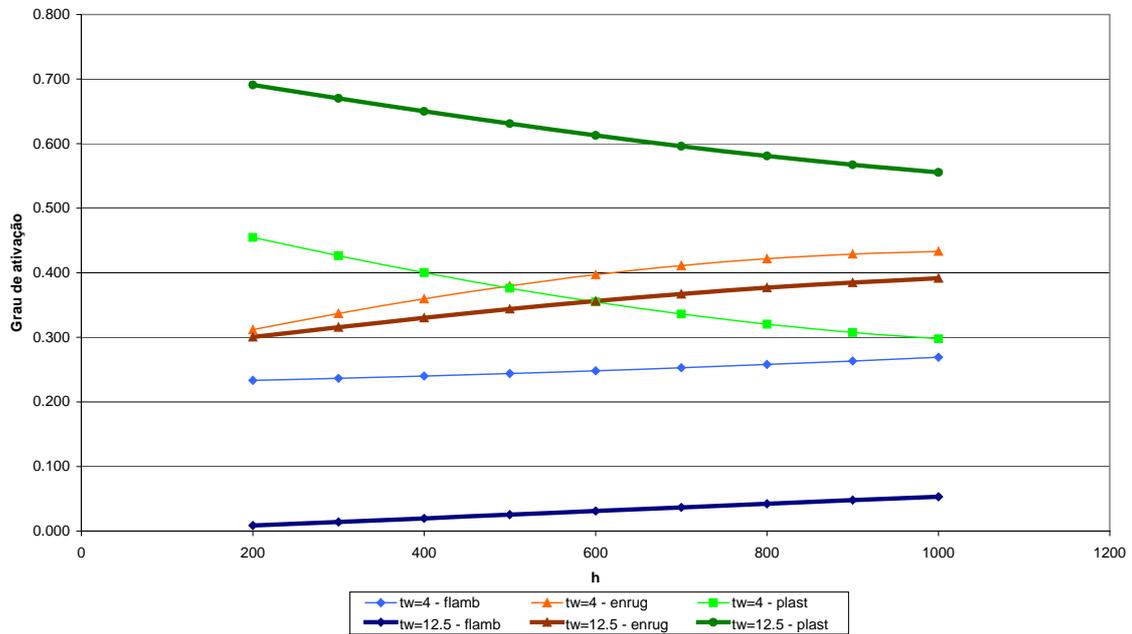


Figura 5.49 - Variação dos graus de ativação das três classes em função da altura da alma para diferentes espessuras de alma – análise 1.

b_f	t_f	c
170	6,3	187,5

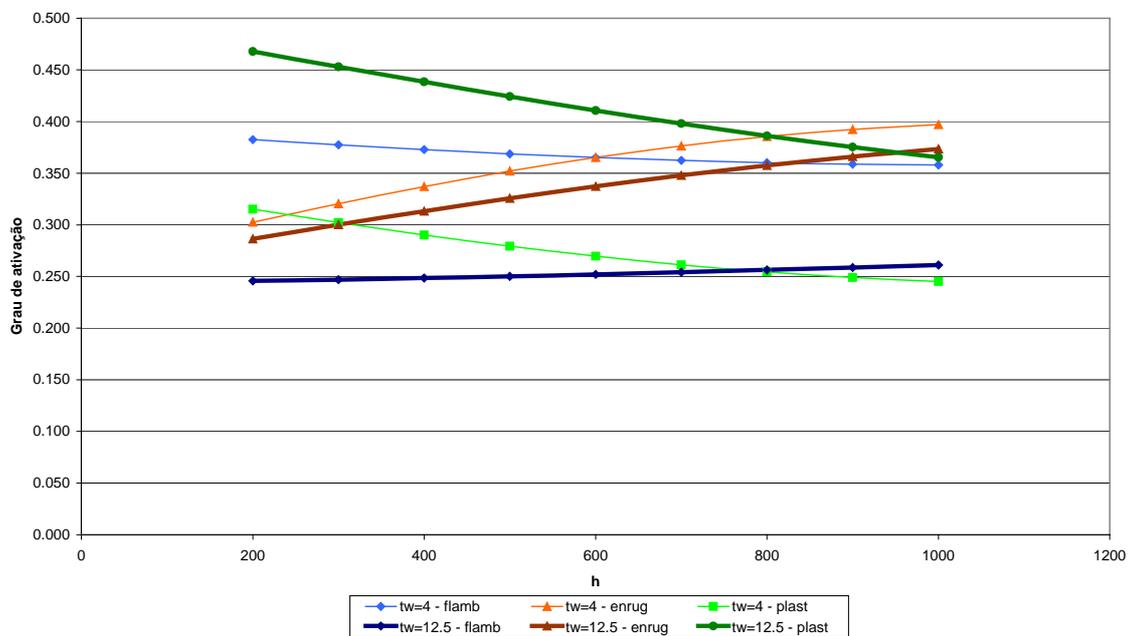


Figura 5.50 - Variação dos graus de ativação das três classes em função da altura da alma para diferentes espessuras de alma – análise 2.

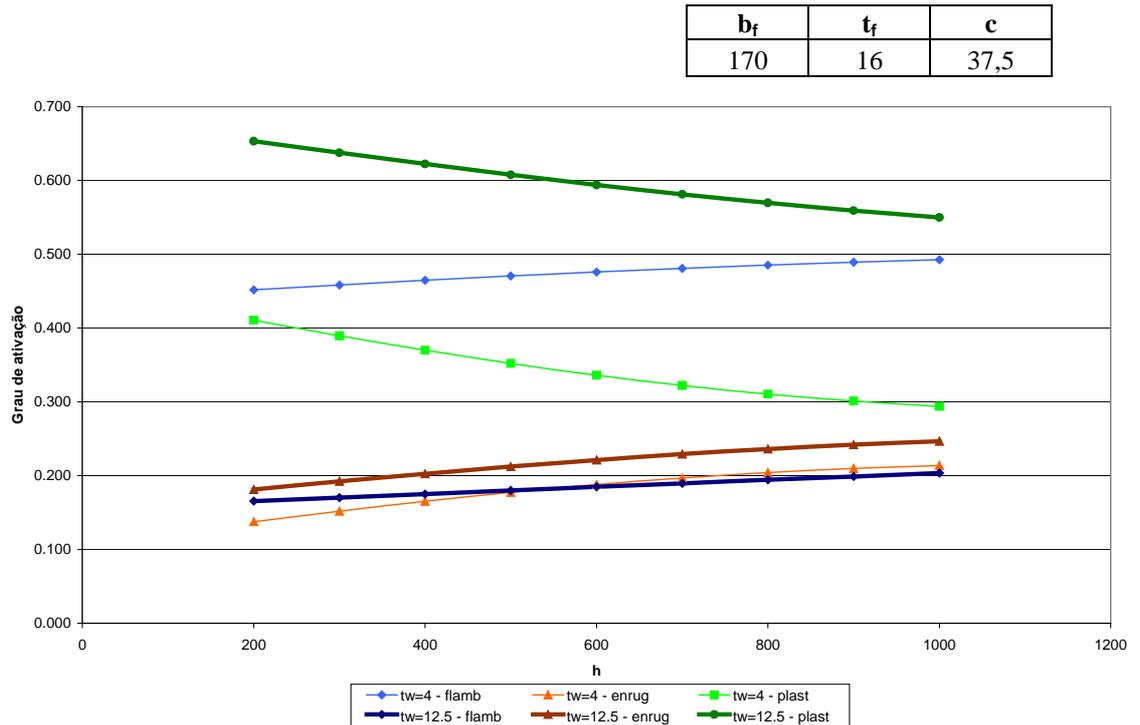


Figura 5.51 - Variação dos graus de ativação das três classes em função da altura da alma para diferentes espessuras de alma – análise 3.

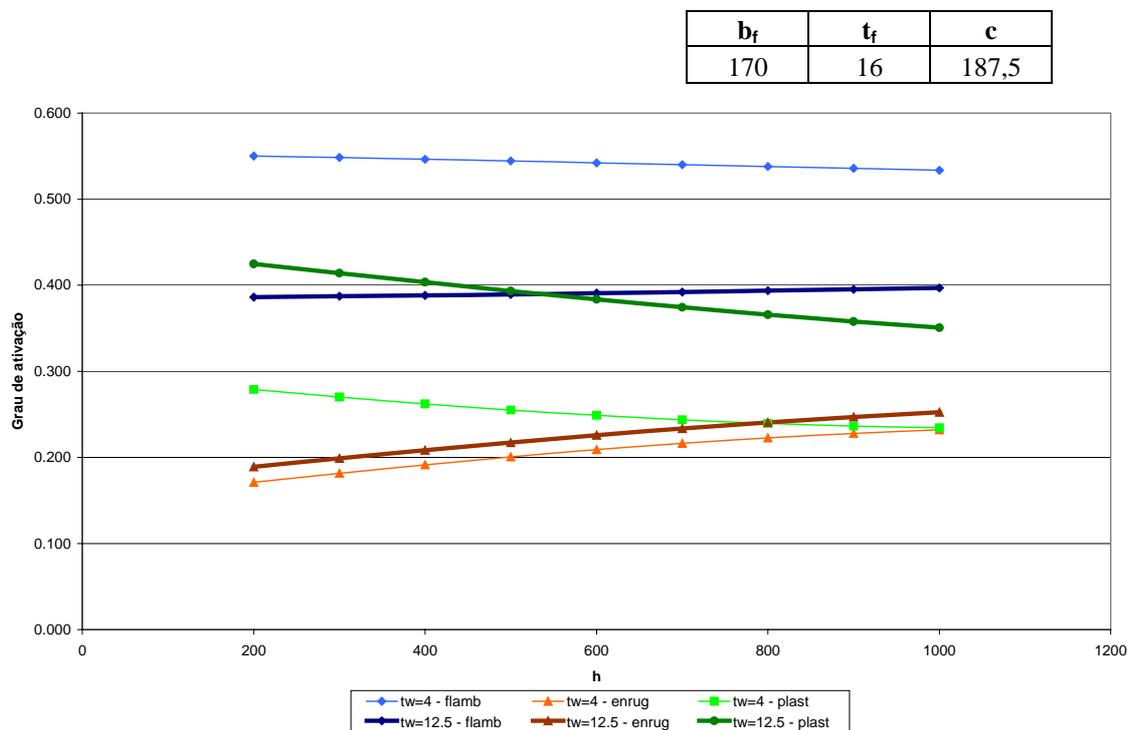


Figura 5.52 - Variação dos graus de ativação das três classes em função da altura da alma para diferentes espessuras de alma – análise 4.

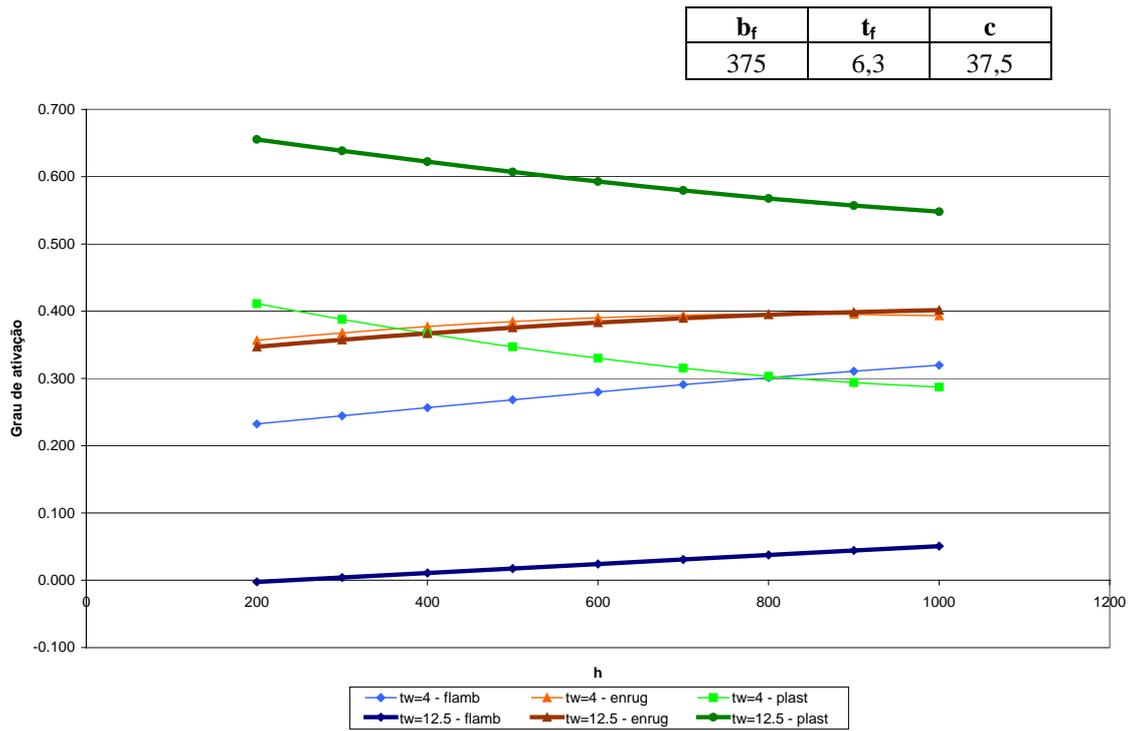


Figura 5.53 - Variação dos graus de ativação das três classes em função da altura da alma para diferentes espessuras de alma – análise 5.

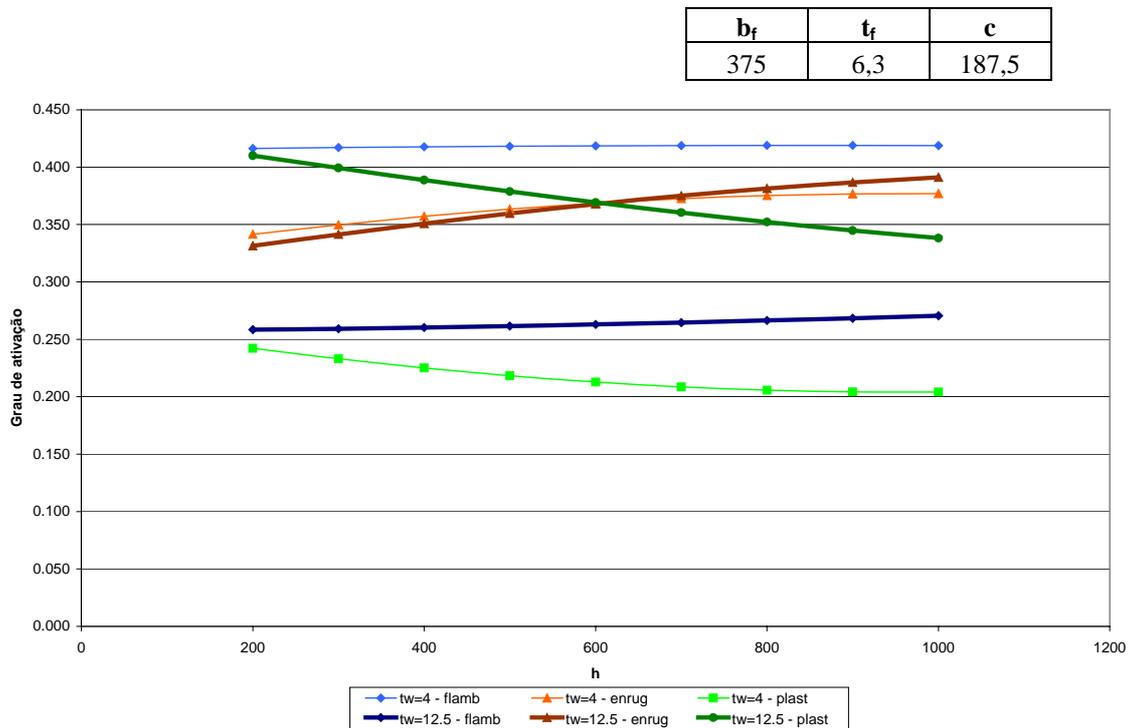


Figura 5.54 - Variação dos graus de ativação das três classes em função da altura da alma para diferentes espessuras de alma – análise 6.

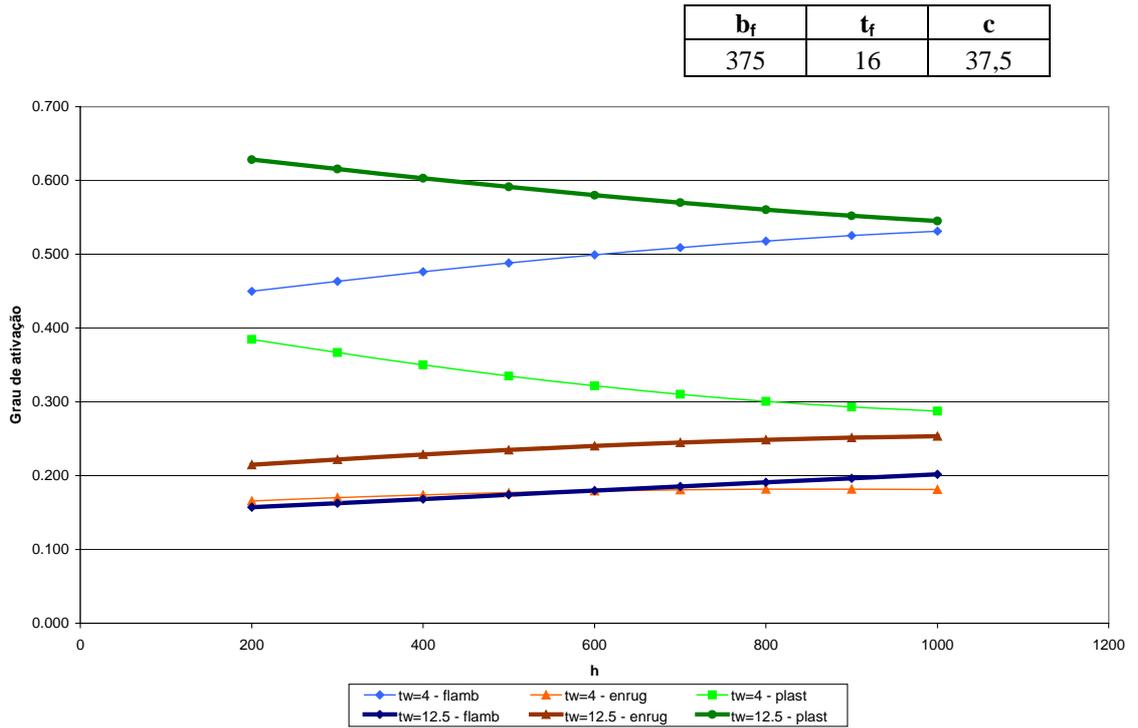


Figura 5.55 - Variação dos graus de ativação das três classes em função da altura da alma para diferentes espessuras de alma – análise 7.

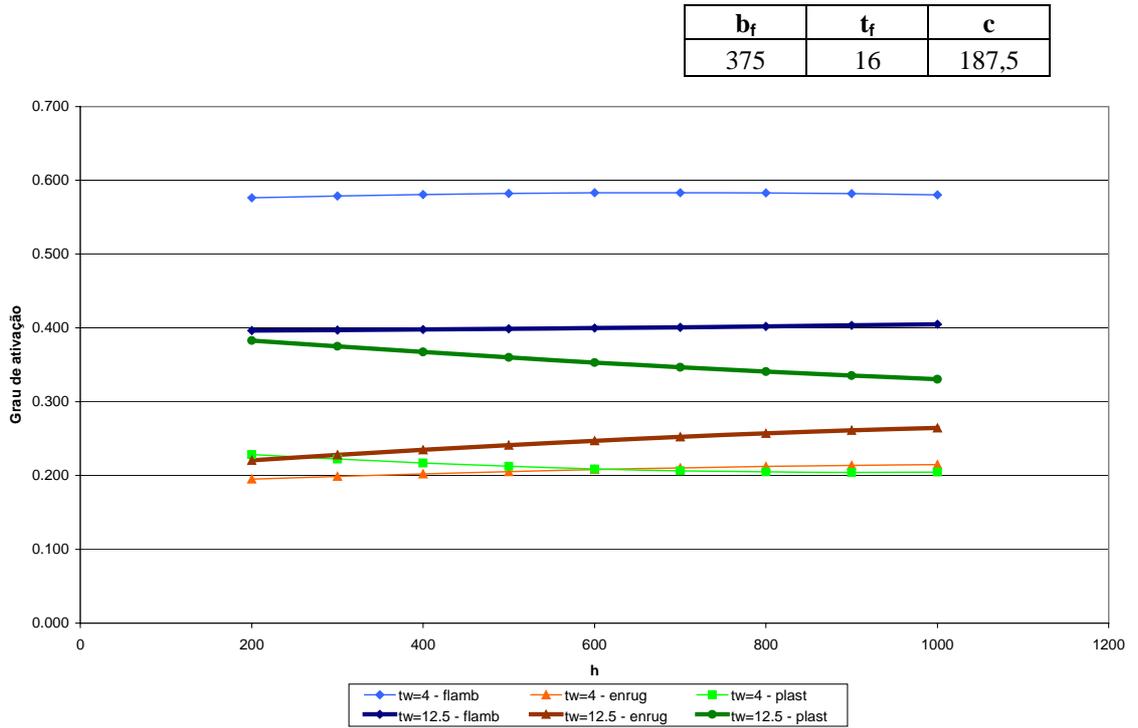


Figura 5.56 - Variação dos graus de ativação das três classes em função da altura da alma para diferentes espessuras de alma – análise 8.

Da Figura 5.49 a Figura 5.56 verifica-se que uma altura maior diminui as chances de plastificação e aumenta os problemas de instabilidade, principalmente em comprimentos carregados maiores.

A relação entre a altura da alma e a espessura da mesa também foi avaliada e os resultados são apresentados a seguir.

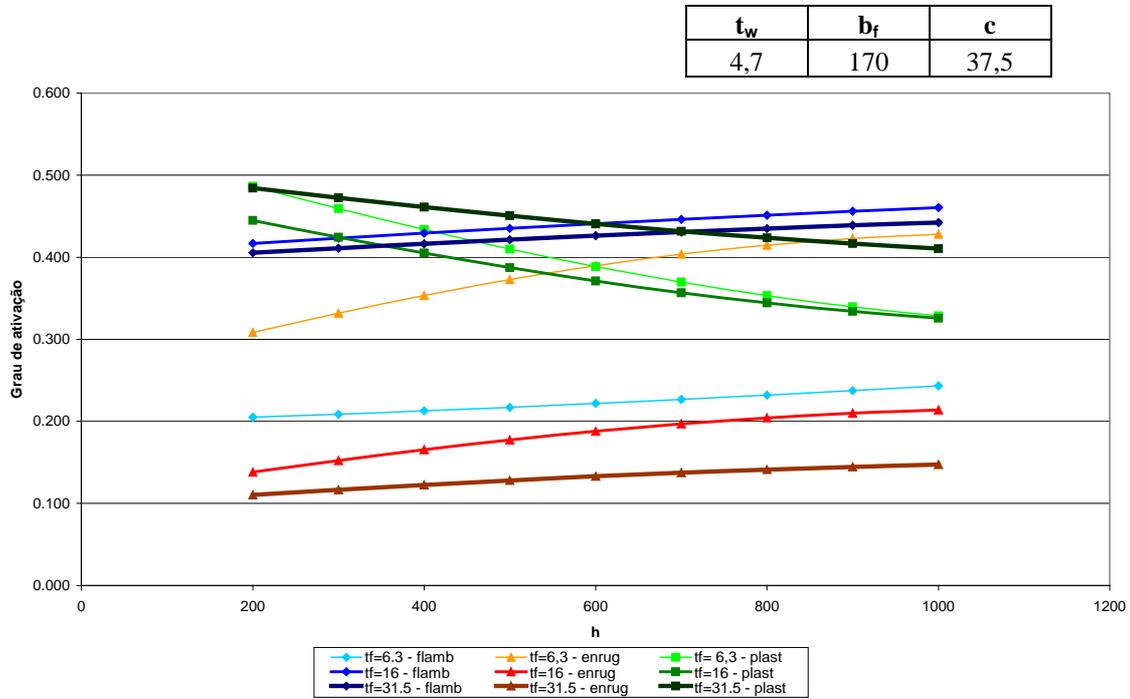


Figura 5.57 - Variação dos graus de ativação das três classes em função da altura da alma para diferentes espessuras de mesa – análise 1.

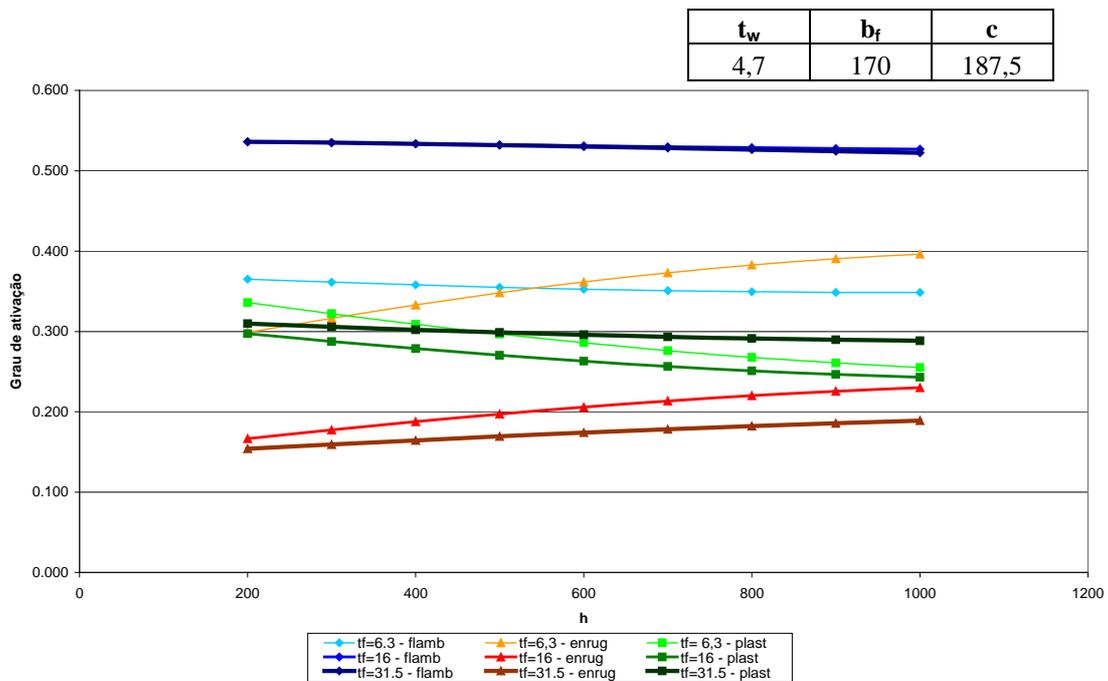


Figura 5.58 - Variação dos graus de ativação das três classes em função da altura da alma para diferentes espessuras de mesa – análise 2.

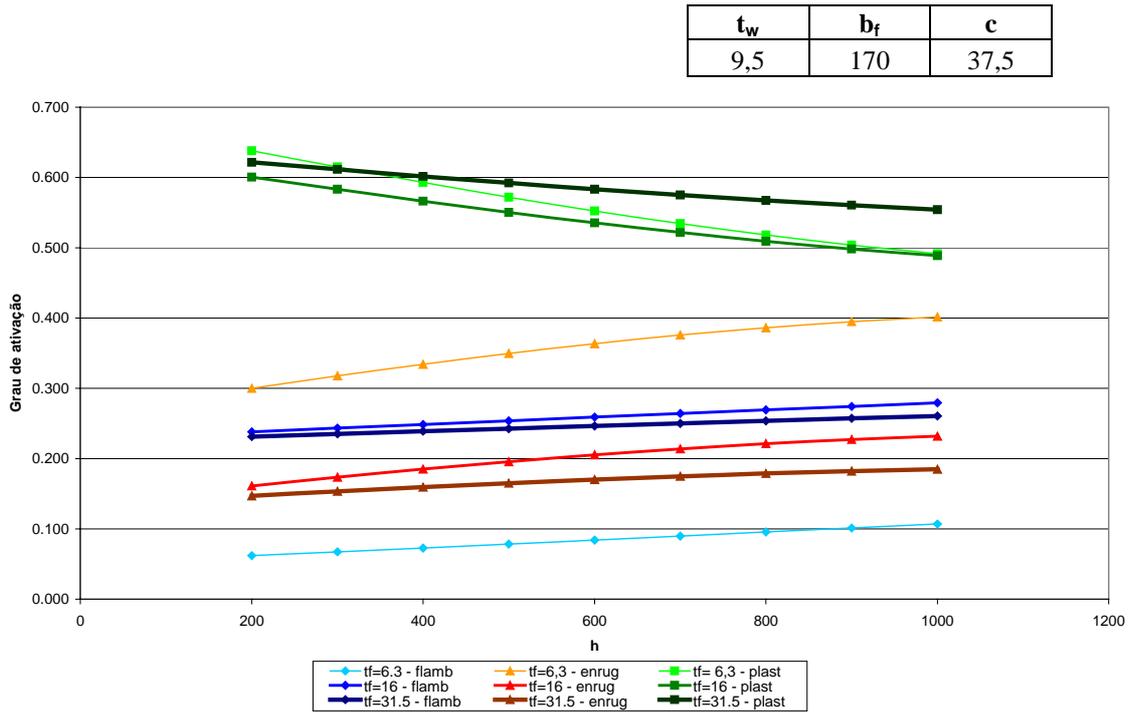


Figura 5.59 - Variação dos graus de ativação das três classes em função da altura da alma para diferentes espessuras de mesa – análise 3.

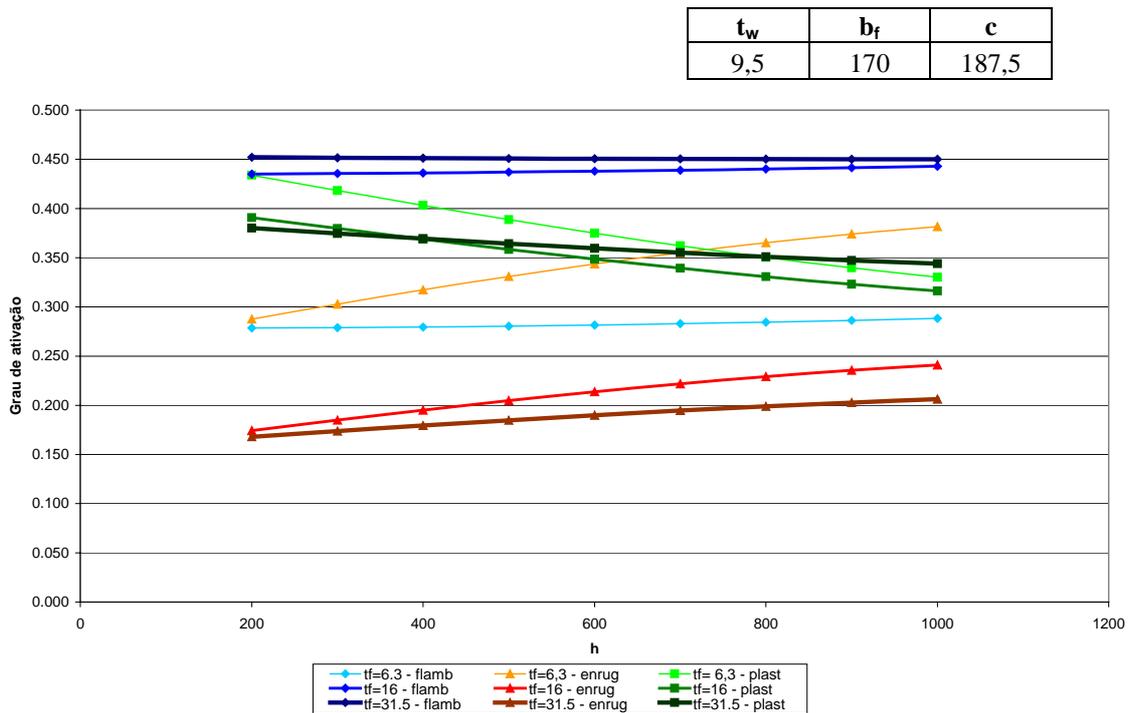


Figura 5.60 - Variação dos graus de ativação das três classes em função da altura da alma para diferentes espessuras de mesa – análise 4.

Da Figura 5.57 a Figura 5.60, conclui-se que o aumento da altura acentua a instabilidade, principalmente o crippling em vigas de mesas e almas mais finas.

Um estudo avaliando o comprimento carregado e a espessura da alma é apresentado a seguir.

h	b_f	t_f
375	170	6,3

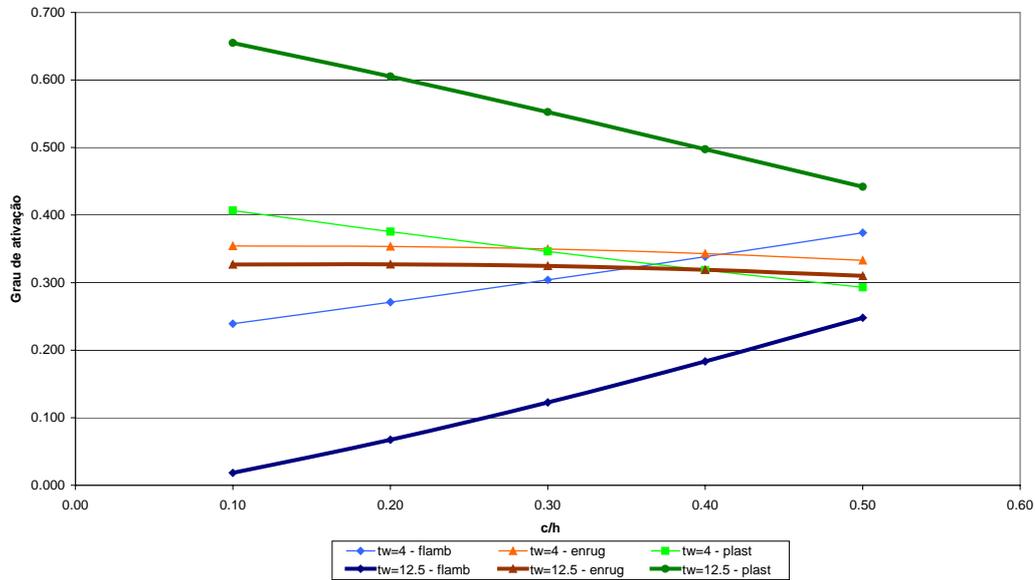


Figura 5.61 - Variação dos graus de ativação das três classes em função da relação c/h e da espessura de alma – análise 1.

h	b_f	t_f
375	170	16

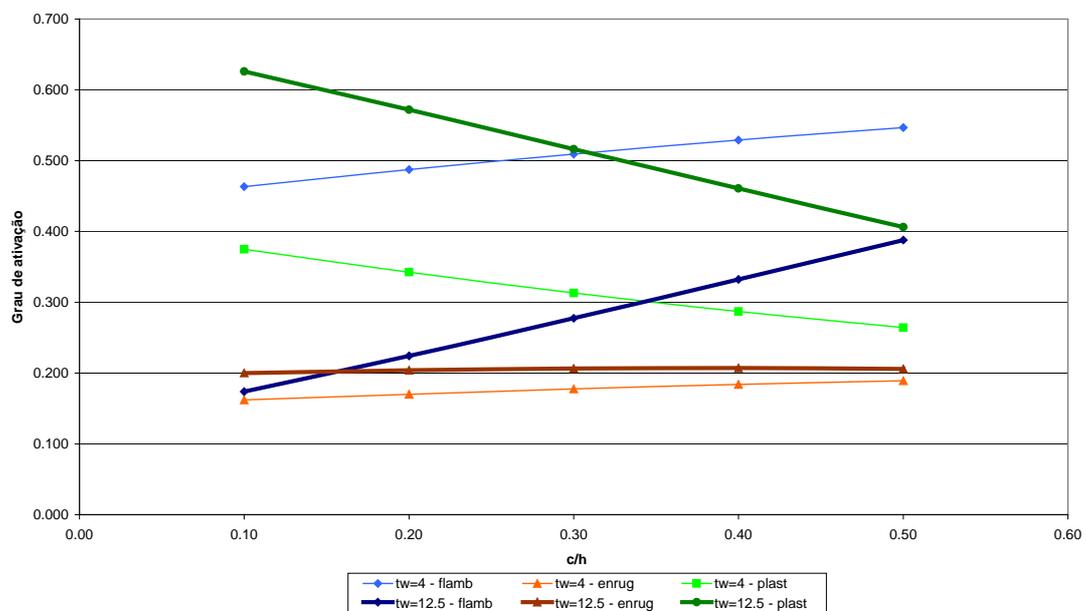


Figura 5.62 - Variação dos graus de ativação das três classes em função da relação c/h e da espessura de alma – análise 2.

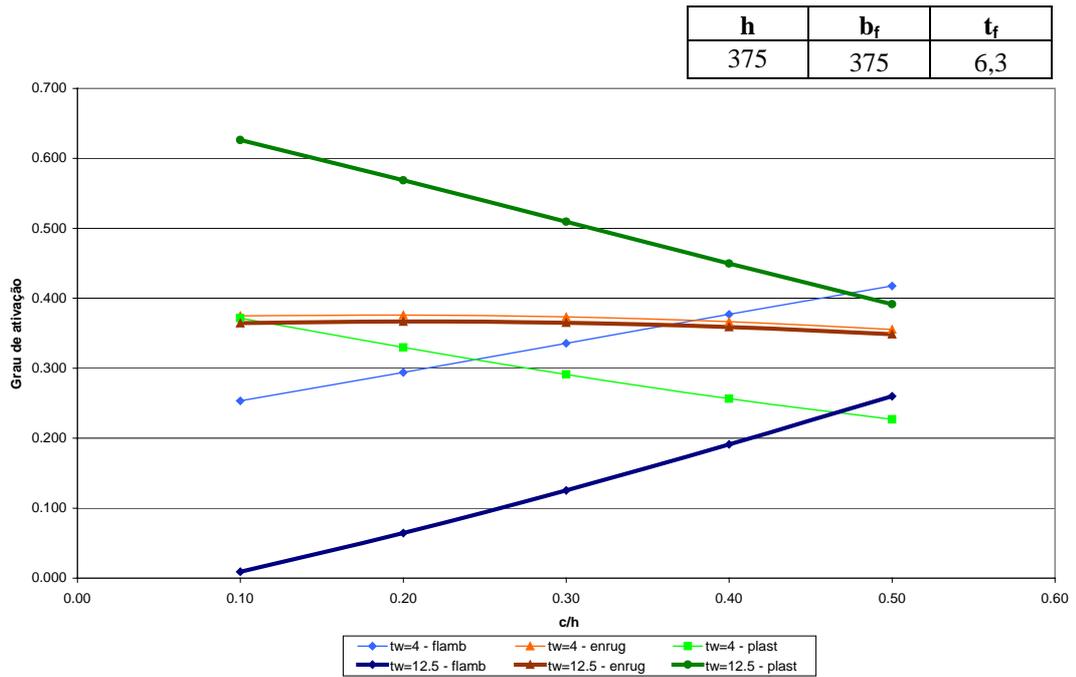


Figura 5.63 - Variação dos graus de ativação das três classes em função da relação c/h e da espessura de alma – análise 3.

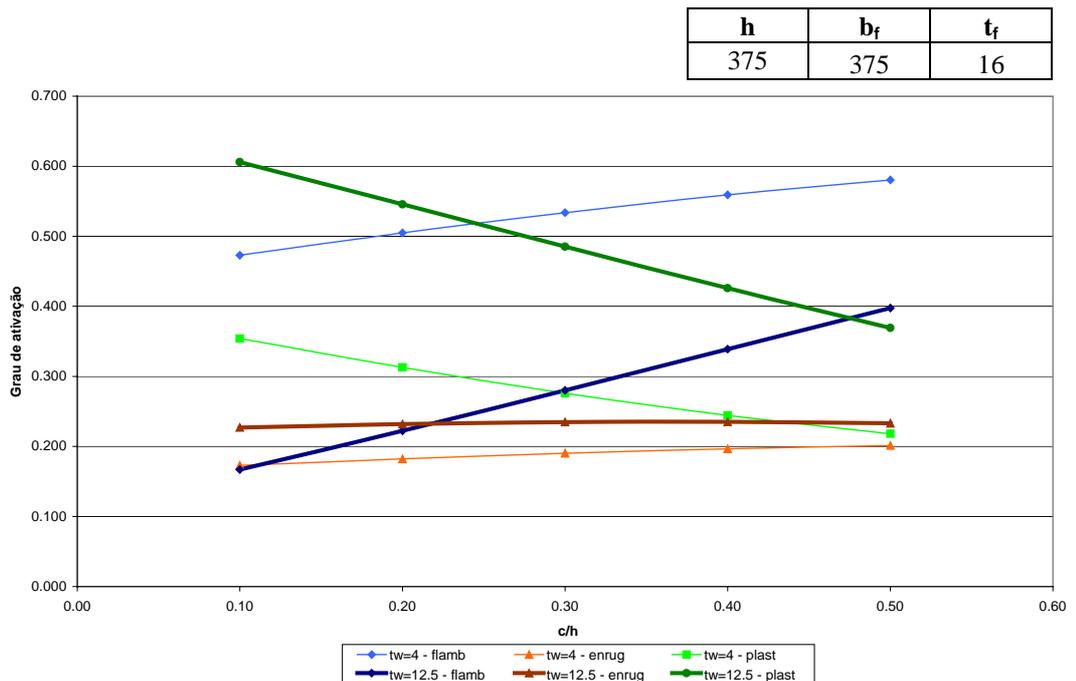


Figura 5.64 - Variação dos graus de ativação das três classes em função da relação c/h e da espessura de alma – análise 4.

O aumento do comprimento carregado tende a diminuir a tendência a plastificação e aumentar as chances de flambagem, principalmente em mesas mais espessas. O próximo capítulo apresenta um estudo semelhante para os resultados fornecidos pela rede neural de previsão da carga crítica.