

ESTABILIDADE E RESISTÊNCIA DE COLUNAS EM PERFIS *U* PULTRUDADOS REFORÇADOS COM FIBRA DE VIDRO SOB FALHA GLOBAL

Mariana H. Brand¹, Alexandre Landesmann¹, Dinar Camotim², André D. Martins²

Resumo: As diversas vantagens dos polímeros reforçados com fibras de vidro (PRFV), citando-se eficiência estrutural, durabilidade em ambientes agressivos, diversidade de seções transversais, leveza, alta resistência, fácil e rápida instalação, entre outros, têm estimulado o emprego deste sistema construtivo em distintos setores da construção civil. Neste contexto, o presente trabalho apresenta um estudo numérico-computacional sobre o desempenho de colunas engastadas constituídas de perfis *U* formadas a partir de PRFV sob modo de falha global por flexão ou flexo-torção. A primeira etapa consiste na cuidadosa seleção de colunas (geometria e comprimentos) a serem avaliadas, utilizando o programa GBTul (segundo a Teoria Generalizada de Vigas). Em seguida, aplica-se o MEF (Método de Elementos Finitos) via código computacional/comercial ANSYS para análise não-linear física e geométrica, com emprego de elementos de casca, para simulação do comportamento estrutural de flambagem, pós-flambagem e resistência última. Os resultados obtidos, nomeadamente trajetórias de equilíbrio, modos de flambagem e a resistência definida por um critério de colapso, são analisados para uma melhor compreensão da performance deste tipo de compósito.

Palavras-chave: polímeros reforçados com fibras de vidro, análise via MEF, flexão e flexo-torção.

¹ Programa de Engenharia Civil, COPPE, Universidade Federal do Rio de Janeiro, Brasil.
mariana.brand@coc.ufrj.br, alandes@coc.ufrj.br

² CERIS, ICIST, DECivil, Instituto Superior Técnico, Universidade de Lisboa, Portugal.
dcamotim@civil.ist.utl.pt, andrerdmartind@tecnico.ulisboa.pt

1- INTRODUÇÃO

A indústria da construção civil busca, constantemente, o desenvolvimento e aperfeiçoamento de materiais que possam atender as suas necessidades de uma maneira mais completa. Atualmente, os compósitos vêm ganhando visibilidade neste setor, por se tratarem de arranjo oriundo de constituintes de diferentes características, que resultam em um material com propriedades superiores àqueles que o originou.

Esse material, diferentemente do aço, possui distintas propriedades mecânicas em cada eixo e quando se trata de perfis reforçados com fibras, essas características se tornam suscetíveis a variação de acordo com o teor de fibras, o tipo de resina, o volume de vazios e o modo de fabricação, tornando-os mais complexos na previsão do comportamento. Além disso, segundo Cintra (2017), o uso de perfis esbeltos combinados com o baixo módulo de elasticidade leva a importantes problemas de instabilidade (*e.g.*, flambagem).

Nos últimos anos, pesquisas como a de Cintra (2017), Graça (2016), Turvey & Zhang (2006), Teixeira (2010), Togashi (2017), Cardoso (2014) e Seruti (2013) vêm sendo desenvolvidas com a finalidade de melhor compreender os parâmetros que influenciam na resistência última de PRFVs, como por exemplo: (i) a relação entre os componentes da seção transversal e o comprimento; (ii) as propriedades mecânicas; (iii) a distribuição não-linear de tensões; (iv) estudos numéricos e experimentais abrangendo a falha inicial; (v) a representação do desempenho dos membros por equações; e (vi) o comportamento pós-crítico.

No entanto, grande parte das investigações anteriores utilizou perfis de dupla simetria e avaliou o comportamento de colunas na ocorrência de flambagem local ou flambagem global por flexão. Neste contexto, o presente trabalho examina, por meio de análises não-lineares numérico-computacionais, colunas em perfis de seção transversal U sujeitas ao modo de falha global por flexão ou por flexo-torção utilizando um material, o compósito PRFV.

2- SELEÇÃO DAS COLUNAS

O processo de seleção das colunas utiliza o programa GBTul (Bebiano *et al.* 2010ab), com base na Teoria Generalizada de Vigas. As dimensões da seção transversal e os comprimentos são escolhidos através das seguintes premissas: (i) ocorrência de flambagem global por flexão ou flexo-torção; (ii) utilização das propriedades elásticas dos compósitos reforçados com fibra de vidro descritas por Jones (1999), são elas, módulo de elasticidade longitudinal – direção das fibras ($E_y = 54$ GPa), módulo de elasticidade transversal ($E_x = E_z = 18$ GPa), módulo de cisalhamento transversal ($G_{xz} = 8,31$ GPa) e coeficiente de deformação ($\nu_{xy} = \nu_{yz} = 0,25$ e $\nu_{xz} = 0,08$); (iii) emprego dos limites de resistência à tração ($T_x = T_z = 28$ MPa e $T_y = 1035$ MPa), à compressão ($C_x = C_z = 138$ MPa e $C_y =$

1035 MPa) e ao cisalhamento ($S = 41$ MPa) conforme a Figura 1, também descrita por Jones (1999); (iv) consideração que a matriz de epóxi e o volume de fibra permanecem constantes; (v) extremidades fixa, ou seja, a condição de apoio utilizada é o engaste, impedindo totalmente as rotações e o empenamento.

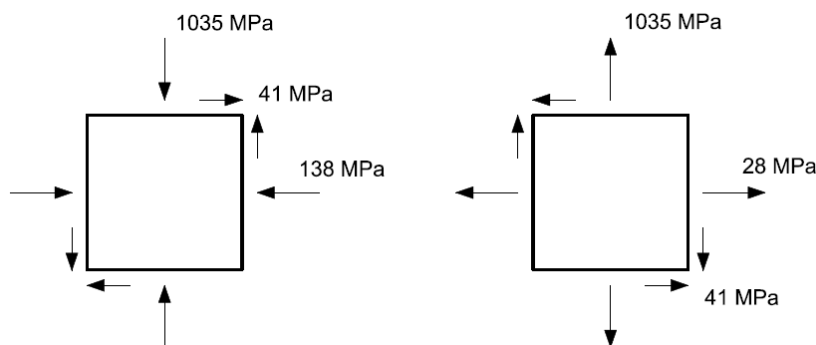


Figura 1 – Indicação dos limites de resistência à tração, à compressão e ao cisalhamento dos perfis PRFVs selecionados.

A seleção é realizada por meio de uma análise de flambagem em uma estratégia de tentativa e erro, assegurando que o modo crítico de falha seja global, tanto por flexão ou por flexo-torção. Além disso, utilizam-se dimensões comumente empregadas na indústria de perfis PRFVs tendo como base os perfis de seção U da empresa Cogumelo Indústria e Comércio Ltda.

A Tabela 1 exibe: (i) as geometrias - b_w (alma), b_f (mesa) e t (espessura), considerando as dimensões externas e a não existência de raios de concordância; (ii) a área da seção transversal; (iii) os comprimentos (L) das colunas selecionados; (iv) o modo de flambagem, ou seja, se ocorre flexão (F_m) ou flexo-torção (F_{MT}); (v) a tensão crítica de flambagem (f_{cr}); e (vi) o valor da primeira tensão de bifurcação (f_{bl}), assegurando um valor superior a f_{cr} em, no mínimo, 20% para evitar interação entre os modos. Além disso, no gráfico da Figura 2 observa-se a relação entre a esbeltez e a tensão crítica atuante para as 48 colunas selecionados.

Já a Tabela 2 apresenta a participação dos modos de deformação 2 – **P2** (flexão no eixo de maior inércia), 3 – **P3** (flexão no eixo de menor inércia), 4 – **P4** (torção), 5 – **P5**, 6 – **P6** e 7 – **P7** (os três últimos representam modos locais) e a presença dos demais modos – **Poutros**. Pode-se concluir, pela análise desta tabela, que nas colunas com seção transversal U_1 , U_2 , U_3 , U_4 , U_5 e U_6 ocorre flambagem por flexão na menor inércia com predominância do modo de deformação 3. Já nas colunas U_7 , U_8 , U_9 , U_{10} , U_{11} e U_{12} prevalecem os modos 2+4 superior a 80%, caracterizando o modo de flambagem de flexo-torção.

A Figura 3 retrata as deformações das seções transversais à meia altura e a sua decomposição nos modos mais influentes para uma coluna com flambagem por F_m (U_3-L_1) e uma por

F_{MT} (U_8-L_1), respectivamente. Dessa forma, é possível observar que os perfis submetidos à F_m , possuem além do modo 3 de deformação, dois modos locais (5 e 7), que estão presentes em proporção menor. Já nos perfis que sofrem F_{MT} , os modos 2 e 4 são acrescidos do modo local 6, assim como apresentado na Tabela 2.

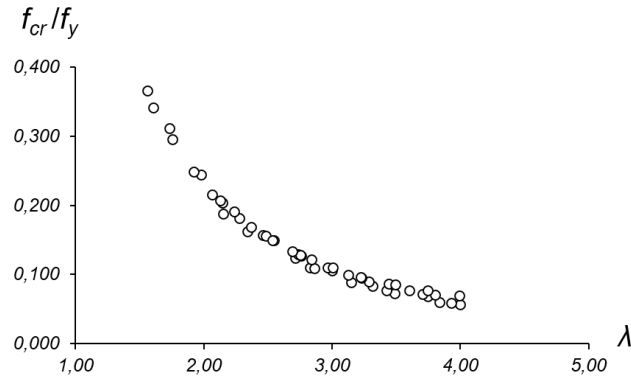


Figura 2 – Gráfico f_{cr}/f_y versus λ para colunas estudadas.

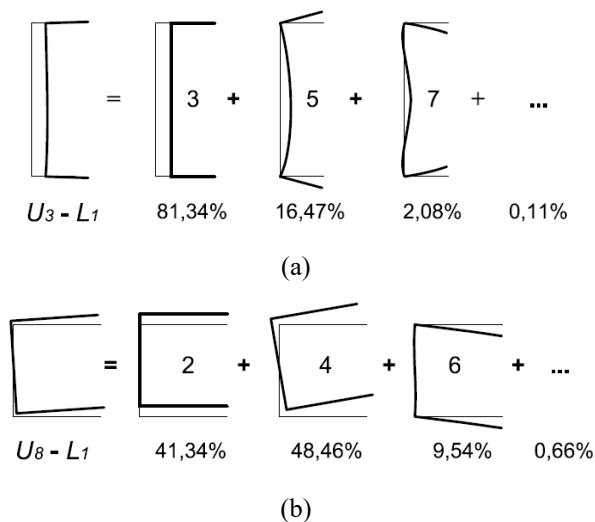


Figura 3 – Decomposição da seção transversal à meia altura nos modos de deformação predominantes (a) U_3-L_1 , (b) U_8-L_1 .

Tabela 1 – Dimensões da seção transversal, área, comprimento, modo crítico e tensão crítica de flambagem e tensão da 1ª carga de bifurcação das colunas U selecionadas.

Coluna	b_w (cm)	b_f (cm)	t (cm)	Área (cm ²)	L (cm)	Modo de f_{cr}	f_{cr} (MPa)	f_{b1} (MPa)	f_{b1}/f_{cr}
U_1	20,32	5,08	0,950	28,96	L_1 175	F _m	129,64	193,26	1,49
					L_2 200	F _m	104,40	175,31	1,68
					L_3 225	F _m	85,05	147,17	1,73
					L_4 250	F _m	70,28	127,02	1,81
U_2	15,24	3,175	0,950	20,51	L_1 85	F _m	188,70	313,34	1,66
					L_2 110	F _m	126,21	218,83	1,73
					L_3 135	F _m	88,31	179,46	2,03
					L_4 160	F _m	64,65	133,65	2,07
U_3	10,16	2,86	0,635	10,08	L_1 75	F _m	223,58	349,76	1,56
					L_2 100	F _m	140,85	232,95	1,65
					L_3 125	F _m	94,30	173,41	1,84
					L_4 150	F _m	66,97	139,11	2,08
U_4	8,26	2,35	0,785	10,17	L_1 45	F _m	402,17	716,21	1,78
					L_2 70	F _m	199,53	386,79	1,94
					L_3 95	F _m	114,83	244,15	2,13
					L_4 120	F _m	73,87	155,68	2,11
U_5	7,62	3,175	0,950	13,27	L_1 75	F _m	344,79	478,61	1,39
					L_2 100	F _m	206,46	347,69	1,68
					L_3 125	F _m	135,98	284,94	2,10
					L_4 150	F _m	95,91	202,55	2,11
U_6	6,03	2,86	0,785	9,22	L_1 80	F _m	264,18	353,62	1,34
					L_2 105	F _m	159,46	271,65	1,70
					L_3 130	F _m	105,97	223,79	2,11
					L_4 155	F _m	75,31	157,72	2,09
U_7	10,16	8,26	1,950	52,03	L_1 120	F _{MT}	423,85	797,13	1,88
					L_2 145	F _{MT}	337,02	614,42	1,82
					L_3 170	F _{MT}	280,80	493,28	1,76
					L_4 195	F _{MT}	242,24	411,53	1,70
U_8	6,03	5,715	0,950	16,59	L_1 100	F _{MT}	225,49	406,73	1,80
					L_2 125	F _{MT}	170,73	297,76	1,74
					L_3 150	F _{MT}	138,42	231,67	1,67
					L_4 175	F _{MT}	117,53	189,84	1,62
U_9	4,13	3,81	0,476	5,59	L_1 75	F _{MT}	167,89	297,75	1,77
					L_2 100	F _{MT}	114,44	198,62	1,74
					L_3 125	F _{MT}	87,32	144,29	1,65
					L_4 150	F _{MT}	71,60	113,16	1,58
U_{10}	3,175	3,175	0,476	4,53	L_1 50	F _{MT}	228,55	405,96	1,78
					L_2 75	F _{MT}	136,55	233,75	1,71
					L_3 100	F _{MT}	99,34	158,94	1,60
					L_4 125	F _{MT}	79,70	121,99	1,53
U_{11}	15,240	10,160	1,350	48,01	L_1 250	F _{MT}	184,04	334,31	1,82
					L_2 275	F _{MT}	160,97	290,38	1,80
					L_3 300	F _{MT}	142,91	254,45	1,78
					L_4 325	F _{MT}	128,55	225,29	1,75
U_{12}	10,160	7,620	0,635	16,13	L_1 225	F _{MT}	99,51	136,73	1,37
					L_2 250	F _{MT}	84,84	137,69	1,62
					L_3 275	F _{MT}	73,67	132,18	1,79
					L_4 300	F _{MT}	64,99	115,22	1,77

Tabela 2 – Participação modal das colunas U selecionadas.

Coluna	L (cm)	P2 (%)	P3 (%)	P4 (%)	P5 (%)	P6 (%)	P7 (%)	Poutros(%)
U_1	L_1 175	-	85,24	-	13,55	-	1,13	0,08
	L_2 200	-	91,28	-	8,07	-	0,61	0,04
	L_3 225	-	94,50	-	5,11	-	0,37	0,02
	L_4 250	-	96,35	-	3,39	-	0,24	0,02
U_2	L_1 85	-	80,86	-	17,54	-	1,45	0,15
	L_2 110	-	91,92	-	7,53	-	0,50	0,05
	L_3 135	-	96,11	-	3,66	-	0,21	0,02
	L_4 160	-	97,93	-	1,95	-	0,11	0,01
U_3	L_1 75	-	81,34	-	16,47	-	2,08	0,11
	L_2 100	-	93,75	-	5,60	-	0,61	0,03
	L_3 125	-	97,35	-	2,39	-	0,25	0,01
	L_4 150	-	98,68	-	1,18	-	0,13	0,01
U_4	L_1 45	-	80,17	-	16,84	-	2,84	0,16
	L_2 70	-	95,66	-	3,81	-	0,51	0,02
	L_3 95	-	98,61	-	1,23	-	0,16	0,01
	L_4 120	-	99,44	-	0,49	-	0,07	0,00
U_5	L_1 75	-	94,58	-	4,69	-	0,71	0,02
	L_2 100	-	98,17	-	1,58	-	0,24	0,01
	L_3 125	-	99,24	-	0,66	-	0,10	0,00
	L_4 150	-	99,64	-	0,31	-	0,05	0,00
U_6	L_1 80	-	97,50	-	2,16	-	0,33	0,01
	L_2 105	-	99,14	-	0,74	-	0,12	0,00
	L_3 130	-	99,64	-	0,30	-	0,05	0,00
	L_4 155	-	99,84	-	0,14	-	0,02	0,00
U_7	L_1 120	47,52	-	38,80	-	12,57	-	1,10
	L_2 145	56,06	-	39,48	-	3,77	-	0,69
	L_3 170	61,91	-	37,26	-	0,38	-	0,45
	L_4 195	65,4	-	33,53	-	0,77	-	0,30
U_8	L_1 100	41,34	-	48,46	-	9,54	-	0,66
	L_2 125	49,06	-	48,17	-	2,40	-	0,37
	L_3 150	54,88	-	44,68	-	0,21	-	0,23
	L_4 175	59,39	-	40,04	-	0,43	-	0,14
U_9	L_1 75	28,76	-	58,44	-	12,30	-	0,50
	L_2 100	36,09	-	60,82	-	2,85	-	0,24
	L_3 125	41,91	-	57,46	-	0,51	-	0,13
	L_4 150	47,30	-	52,50	-	0,12	-	0,08
U_{10}	L_1 50	26,05	-	60,04	-	13,27	-	0,64
	L_2 75	36,24	-	62,21	-	1,33	-	0,22
	L_3 100	44,39	-	55,27	-	0,23	-	0,10
	L_4 125	52,14	-	47,43	-	0,38	-	0,05
U_{11}	L_1 250	44,89	-	39,74	-	14,82	-	0,56
	L_2 275	48,99	-	41,14	-	9,43	-	0,45
	L_3 300	52,24	-	41,47	-	5,92	-	0,36
	L_4 325	54,94	-	41,13	-	3,63	-	0,30
U_{12}	L_1 225	37,57	-	45,80	-	16,22	-	0,41
	L_2 250	41,20	-	48,02	-	10,46	-	0,32
	L_3 275	44,05	-	48,91	-	6,79	-	0,25
	L_4 300	46,42	-	48,96	-	4,42	-	0,20

As curvas de estabilidade são obtidas mediante o emprego do programa GBTul (Bebiano *et al.*, 2010ab) e são apresentadas na Figura 4(a) para a seção U_I e na Figura 5(a) para a seção U_7 na forma f_{cr} versus L (em escala logarítmica), assim como seus modos de flambagem.

Já a Figura 4(b) e a Figura 5(b) apresentamos diagramas de participação modal associados à GBT para os perfis U_I e U_7 , (representando os perfis com flambagem por F_m e F_{MT} , respectivamente) que incluem 9 modos de deformação, 4 globais (1-4) e 5 locais (5-9). Com base nas informações ilustradas, é possível notar que os perfis apresentam duas zonas distintas, a primeira associada à flambagem local e a segunda à flambagem global.

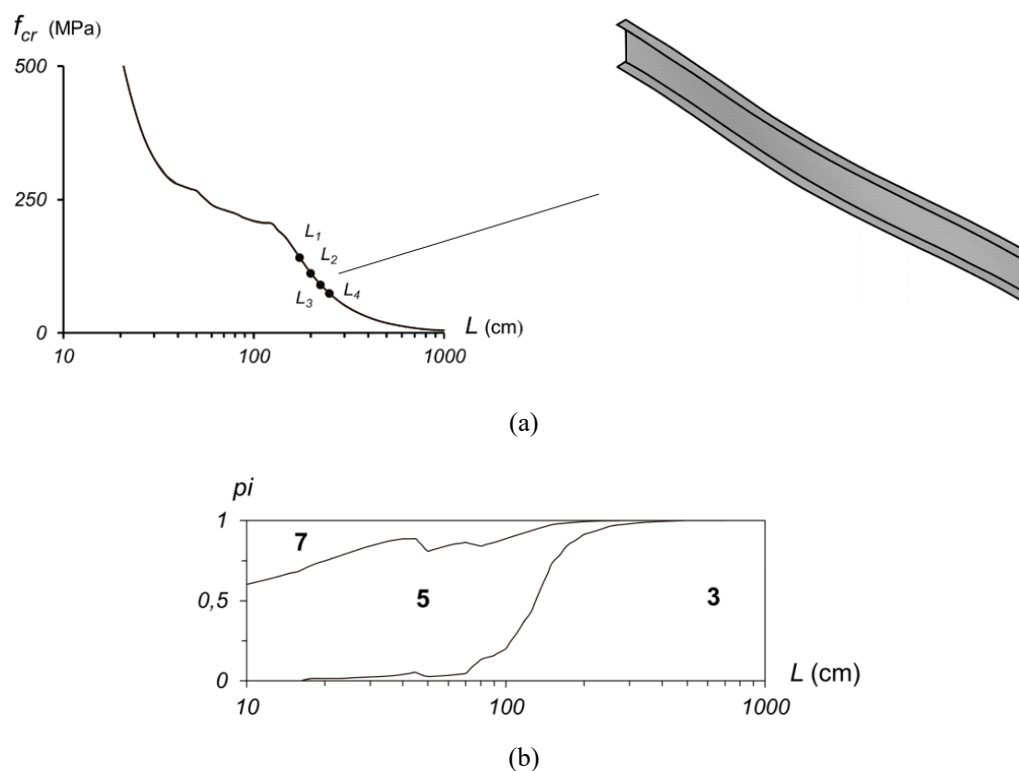


Figura 4 – (a) Curva de estabilidade f_{cr} vs. L para a seção U_I e modo de flambagem da coluna U_IL_3 , (b) diagrama de participação modal GBT de U_I .

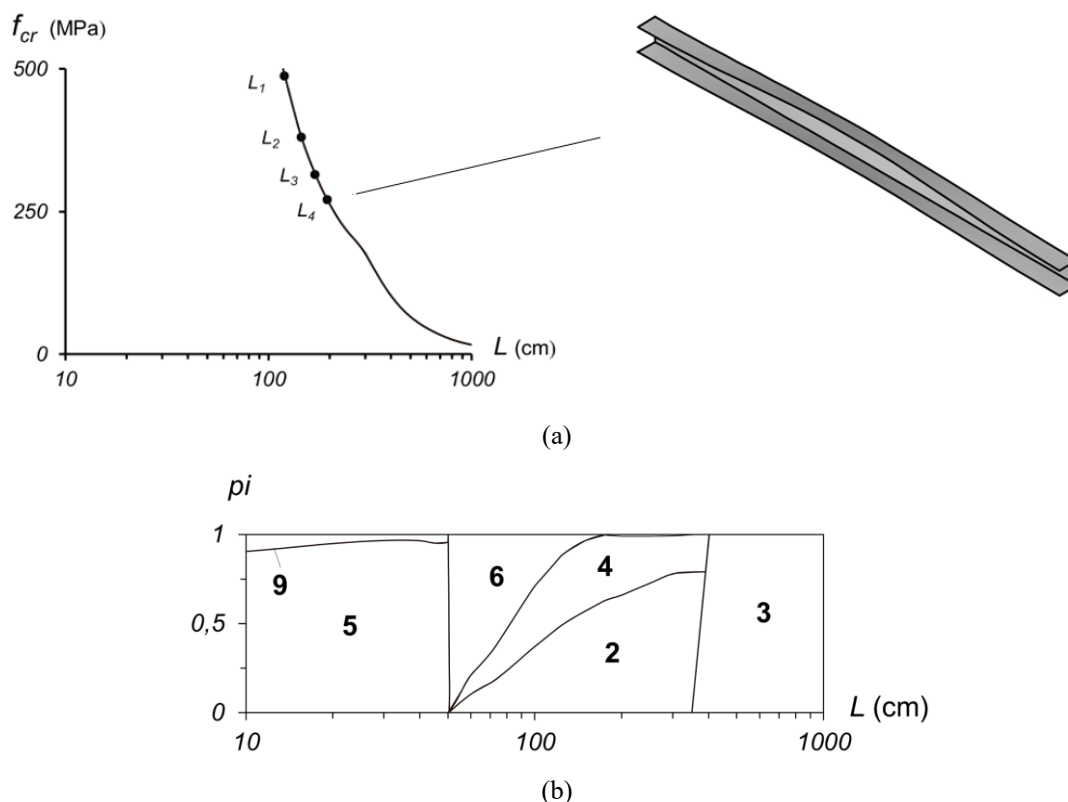


Figura 5 – (a) Curva de estabilidade f_{cr} vs. L para a seção U_7 e modo de flambagem da coluna U_7L_4 , (b) diagrama de participação modal GBT de U_7 .

3- MODELO NUMÉRICO E ANÁLISE DE PÓS-FLAMBAGEM

Após análise dos resultados de carga crítica de flambagem utilizando o GBTul (Bebiano *et al.*, 2010ab), obtém-se as trajetórias de equilíbrio de pós-flambagem dos perfis selecionados, por meio de modelos de análise não-linear física e geométrica via MEF no programa Ansys (2009). As colunas são discretizadas em elementos de casca (*Shell181*), que segundo o programa representam elementos de parede fina com inclusão de deformação de cisalhamento transversal, integração completa, com quatro nós e seis graus de liberdade por nó assim como exibido na Figura 6. A malha utilizada possui dimensões de 5 mm x 5 mm e ilustra-se na Figura 6(a).

A condição de contorno de engaste (FF) foi estabelecida mediante a modelagem de uma placa rígida inserida na extremidade da seção transversal da coluna impedindo, desta forma, a ocorrência de deslocamentos e rotações locais. É importante lembrar que a translação do corpo rígido axial é liberada em ambas as extremidades do perfil.

Para inserção da carga, é necessária a criação de um nó na chapa rígida com as coordenadas do centróide da seção transversal (Figura 6(b)). Desse modo, a força é aplicada de forma concentrada em pequenos passos de carga de maneira automática. Realiza-se o processo de acréscimo de carga

recorrendo a uma técnica de solução incremental-iterativa, que combina o método de *Newton-Raphson* com uma estratégia de controle de comprimento de arco.

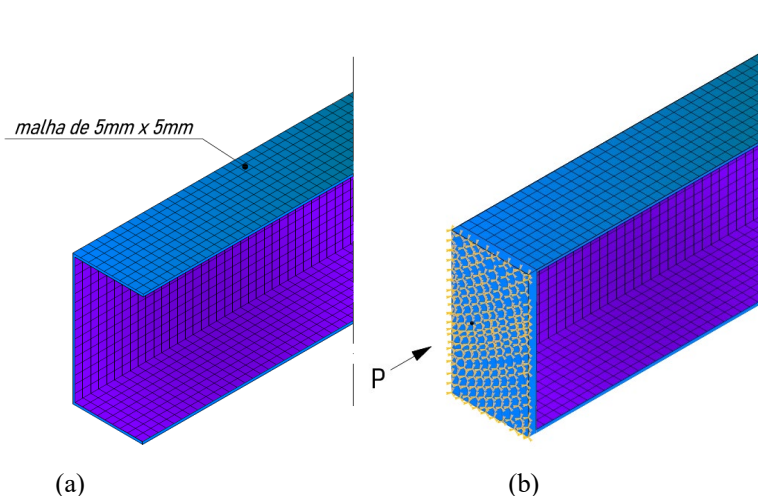
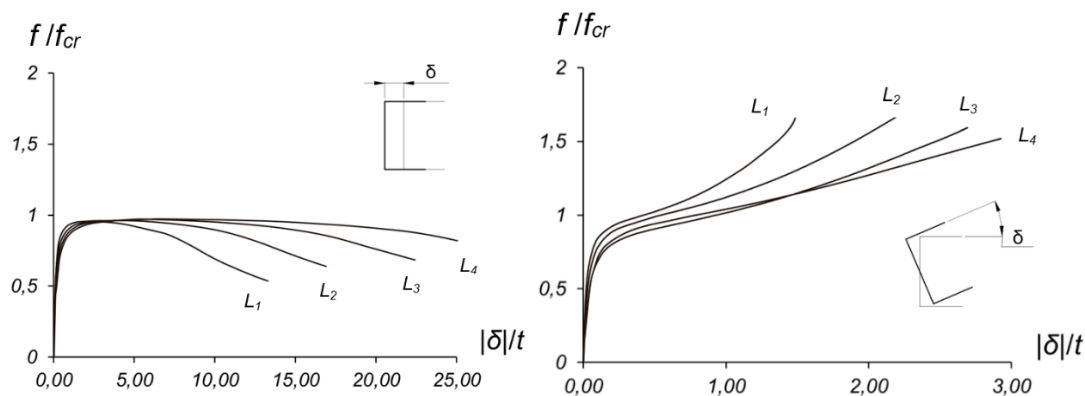


Figura 6 – Modelo numérico (a) discretização da coluna em malha de 5mm x 5mm e (b) condição de contorno FF e aplicação de P .

As imperfeições iniciais são adicionadas às colunas de maneira automática por meio do processo descrito por Landesmann & Camotim (2013), que consiste em determinar a forma do modo crítico de flambagem, através de uma análise linear via Ansys (2009), em seguida, a malha é reconstituída impondo o modo crítico (neste caso F_m ou F_{MT}) e amplitude igual de $L/1000$ - na pesquisa citada foi utilizada amplitude de $0,1t$, pois tratava-se de flambagem distorcional. Ou seja, os dados de saída da análise de flambagem se tornam dados de entrada para a análise não linear.

Após comparar os valores da carga crítica de flambagem (P_{cr}) provindos do GBTul (Bebiano *et al.*, 2010ab) e do Ansys (2009) para as colunas estudadas nessa pesquisa, prossegue-se para as análises de pós-flambagem elástica. Desse modo, foi possível identificar diferenças no comportamento quando varia-se o tipo de flambagem global (F_m ou F_{MT}) e também quando modifica-se o comprimento.

A Figura 7(a)-(b) apresenta os gráficos de trajetória de pós-flambagem para as colunas U_5 e U_{10} , à F_m e à F_{MT} , respectivamente. Esses gráficos relacionam a tensão atuante normalizada pela tensão crítica (f/f_{cr}) com os deslocamentos normalizados ($|\delta|/t$). Para U_5 , $|\delta|$ é o deslocamento transversal máximo que ocorre no eixo x , já para U_{10} , $|\delta|$ representa a rotação máxima da seção transversal. Por meio da observação das figuras citadas podem-se verificar as seguintes ocorrências:



(a)

(b)

Figura 7 – Gráfico f/f_{cr} versus $|\delta|/t$ para colunas (a) U_5L_1 , U_5L_2 , U_5L_3 e U_5L_4 (b) $U_{10}L_1$, $U_{10}L_2$, $U_{10}L_3$ e $U_{10}L_4$.

(i) Os perfis submetidos à F_m (exemplificados por U_5) não apresentam reserva de resistência de pós-flambagem e não atingem valores $f/f_{cr} > 1$. Além disso, quanto maior o comprimento L da coluna, a trajetória mantém-se mais próxima de uma função constante após atingir seu valor máximo;

(ii) Os perfis submetidos à F_{MT} (exemplificados por U_{10}) detém trajetória de pós-flambagem estável, ou seja, $f/f_{cr} > 1$, exibindo resistência elástica pós-crítica. E também, observa-se que quanto menor o comprimento, mais rápido atinge-se maiores reservas de energia.

Vale salientar que esses comportamentos explanados quanto à F_m e à F_{MT} são exibidos por todas as seções transversais estudadas, e não apenas para U_5 e U_{10} .

4- FALHA INICIAL

Para a identificação do momento em que a coluna inicia a apresentação de falha, além da carga e do local, utiliza-se o critério de *Tsai-Wu* (Tsai-Wu, 1971) que considera a interação entre as tensões últimas. No modelo implementado via Ansys (2009), os critérios de falha aparecem utilizando a noção de índice de falha (I_f), e esse valor é modificado em cada acréscimo de carga.

Para verificar o modo de deformação das colunas e identificar o momento de início da falha, faz-se necessário acompanhar o progresso de I_f perante cada incremento de carga. Esse acompanhamento é possível devido ao fato do Ansys (2009) fornecer em cada *substep* o valor do I_f dos nós e, além disso, exibir os nós com valores máximos e mínimos de falha. Desse modo, identifica-se o ponto que igualou ou ultrapassou o número um, pioneiramente ($I_f \geq 1$), ou seja, o local onde inicia a falha.

A Figura 8(a) exibe o gráfico com a progressão do I_f versus f/f_{cr} para a coluna U_9 de comprimento L_I . E na Figura 8(b) visualiza-se a evolução da configuração deformada junto da expansão da falha por meio de seis estágios. Analisando estas imagens podem-se tirar as seguintes conclusões:

- (i) A falha se propaga próximo aos nós localizados na mesa em comprimentos de aproximadamente 25% e 75% de L – áreas em vermelho;
- (ii) À medida que a relação f/f_{cr} se aproxima de 1, I_f aumenta de forma expressiva para poucas variações de carga.

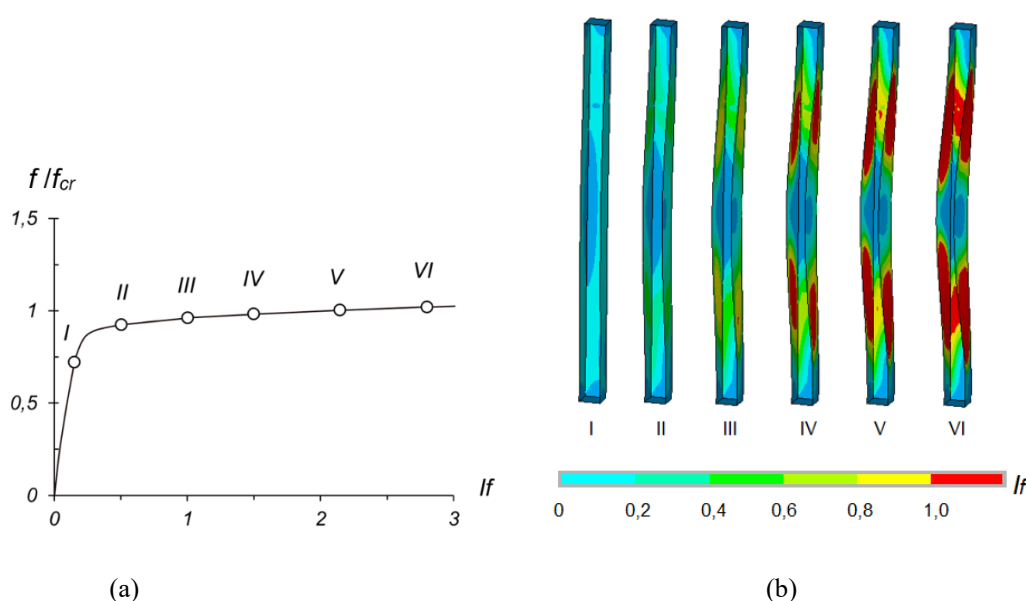


Figura 8 – (a) Curva f/f_{cr} versus I_f para a coluna U_9L_I e (b) configuração deformada em correspondência com I_f em seis estágios.

A Tabela 3 apresenta f_u que representa a tensão atuante na coluna no momento em que $I_f = 1$, ou seja, quando a falha inicia. Também é exposta a tensão máxima alcançada por cada perfil, além das comparações com f_{cr} . Por meio da observação desta tabela pode-se concluir que:

- (i) Para os perfis estudados nesse estudo, a falha ocorre em tensões relativamente próximas a f_{cr} , ocorrendo uma variação média de 5,07% no geral, sendo 7,74% nas colunas submetidas à F_m e 2,39% nas colunas que flambam por F_{MT} ;
- (ii) Para todas as colunas em que acontece F_m (U_1 , U_2 , U_3 , U_4 , U_5 e U_6) o valor de f_u é inferior a f_{cr} , já nas que ocorre F_{MT} (U_7 , U_8 , U_9 , U_{10} , U_{11} e U_{12}) esse valor ora é superior, ora é inferior;
- (iii) A tensão atuante máxima nos perfis em que ocorre F_{MT} alcança valores de até $1,856 f_{cr}$ superando em todos os casos, no mínimo, 30% f_{cr} , no entanto, em perfis com F_m a tensão máxima é sempre próxima a f_{cr} e não supera esta em mais de 5% em nenhum caso estudado.

5- CONCLUSÕES

O presente artigo apresenta um estudo numérico-computacional sobre o comportamento de colunas *U* pultrudadas PRFV na ocorrência de flambagem global por F_m e por F_{MT} . Por se tratar de um material com diversas vantagens, como eficiência estrutural, durabilidade à corrosão e diversidade de seções transversais, tem-se estimulado o emprego deste sistema construtivo em distintos setores da construção civil. Por esse motivo, torna-se necessária a previsão da resistência última destes perfis.

Inicialmente, após descrever o procedimento da seleção de colunas via GBTul, para a identificação de colunas que assegurassem a flambagem no modo global foram desenvolvidos modelos via MEF para análises sobre o comportamento de pós-flambagem elástica das colunas selecionadas. Os resultados numéricos apresentados e discutidos compreenderam as trajetórias de equilíbrio, a evolução das tensões principais, incluindo a estimativa da falha inicial (I_f) apresentada pelas colunas, e estimativa da resistência última (f_u), com base no critério de falha de *Tsai-Wu* (TSAI-WU, 1971).

Entre as principais conclusões desta pesquisa estão que as colunas PRFV sujeitas à F_m estudadas não apresentaram resistência de pós-flambagem, enquanto as que estavam sujeitas à F_{MT} exibiram notória reserva de energia, alcançando, em alguns casos, valores superiores à $1,8 f_{cr}$. Além disso, as falhas iniciais ocorreram próximas às f_{cr} , sendo que para todos os casos de F_m a carga no momento que $I_f=1$ é menor que f_{cr} .

Os resultados completos e mais detalhadas acerca dessa pesquisa encontram-se na dissertação de mestrado da COPPE/UFRJ de Brand (2021).

Tabela 3 – Tensão para $I_f = 1$, tensão máxima e variação em relação a f_{cr} para perfis U utilizados.

Coluna	L	f_u (MPa)	f_{max} (MPa)	f_u/f_{cr}	f_{max}/f_{cr}
U_1	L_1	113,51	114,58	0,876	1,009
	L_2	91,66	93,60	0,878	1,021
	L_3	74,86	77,13	0,880	1,030
	L_4	61,91	64,31	0,881	1,039
U_2	L_1	167,63	167,84	0,888	1,001
	L_2	112,99	114,43	0,895	1,013
	L_3	79,40	81,33	0,899	1,024
	L_4	58,17	60,20	0,900	1,035
U_3	L_1	194,95	200,00	0,872	1,026
	L_2	128,09	129,22	0,909	1,009
	L_3	86,25	87,85	0,915	1,019
	L_4	61,31	63,00	0,915	1,028
U_4	L_1	353,08	369,04	0,878	1,045
	L_2	187,33	187,38	0,939	1,000
	L_3	108,90	109,26	0,948	1,003
	L_4	70,30	70,84	0,952	1,008
U_5	L_1	322,42	329,99	0,935	1,023
	L_2	198,31	199,15	0,960	1,004
	L_3	131,70	131,78	0,968	1,001
	L_4	93,26	93,26	0,972	1,000
U_6	L_1	253,06	255,37	0,958	1,009
	L_2	154,62	154,94	0,970	1,002
	L_3	103,31	103,32	0,975	1,000
	L_4	73,63	73,65	0,978	1,000
U_7	L_1	378,53	573,58	0,893	1,515
	L_2	306,16	465,01	0,908	1,519
	L_3	257,33	383,95	0,916	1,492
	L_4	223,33	321,30	0,922	1,439
U_8	L_1	211,21	370,21	0,937	1,753
	L_2	162,46	288,07	0,952	1,773
	L_3	133,17	228,91	0,962	1,719
	L_4	113,97	185,35	0,970	1,626
U_9	L_1	161,08	284,59	0,959	1,767
	L_2	113,72	206,53	0,994	1,816
	L_3	89,01	154,59	1,019	1,737
	L_4	72,57	119,17	1,013	1,642
U_{10}	L_1	213,87	383,60	0,936	1,794
	L_2	132,27	245,51	0,969	1,856
	L_3	98,05	167,87	0,987	1,712
	L_4	79,41	120,91	0,996	1,523
U_{11}	L_1	174,95	237,10	0,951	1,355
	L_2	154,62	212,77	0,961	1,376
	L_3	138,45	191,70	0,969	1,385
	L_4	125,46	173,32	0,976	1,382
U_{12}	L_1	100,02	152,73	1,005	1,527
	L_2	88,57	135,76	1,044	1,533
	L_3	79,43	121,15	1,078	1,525
	L_4	72,10	108,51	1,109	1,505

6- REFERÊNCIAS

- Almeida, S. (2004). Avaliação das propriedades mecânicas de compósitos pultrudados de matriz polimérica com reforço de fibra de vidro. Dissertação de M.Sc., COPPE/UFRJ, Rio de Janeiro, Brasil.
- Ansys, (2009). Reference Manual, Swanson Analysis Systems (SAS), versão 12.0.1.
- Bebiano, R., Pina, P., Silvestre, N., Camotim, D. (2010a). GBTUL 1,0_β –Buckling and Vibration Analysis of Thin-Walled Members. DECivil/IST, Technical University of Lisbon, (<http://www.civil.ist.utl.pt/gbt>).
- Bebiano, R., Pina, P., Silvestre, N., Camotim, D. (2010b). Manual User, GBTUL 1,0_β – Buckling and Vibration Analysis of Thin-Walled Members. DECivil/IST, Technical University of Lisbon, (<http://www.civil.ist.utl.pt/gbt>).
- Bebiano, R., Camotim, D., Gonçalves, R. (2018). GBTUL 2,0 – A second-generation code for the GBT-based buckling and vibration analysis of thin-walled members. Thin-walled Structures, v.124, pp. 235-257.
- Cardoso, D. (2014). Compressive strength of pultruded glass-fiber reinforced polymer (GFRP) columns. Tese de D.Sc., COPPE/UFRJ, Rio de Janeiro, Brasil.
- Cintra, G.G. (2017). Local buckling behavior of pultruded glass-fiber reinforced polymer (PGFRP) I-section column. Dissertação de M.Sc., Pontífica Universidade Católica, Rio de Janeiro, Brasil.
- Graça, M. (2016). Sobre o dimensionamento à flambagem distorcional de colunas pultrudadas de PRF via MEF. Dissertação de M.Sc., COPPE/UFRJ, Rio de Janeiro, Brasil.
- Jones, R.M. (1999). Mechanics of composite materials. Philadelphia: Taylor & Francis.
- Landesmann, A., Camotim, D. (2013). On the Direct Strength Method (DSM) design of cold-formed steel columns against distortional failure. Thin-walled Structures, v.67, pp. 168-187.
- Seruti, C. A. (2013). Caracterização Mecânica e Desempenho Estrutural de Elementos Pultrudados. Dissertação de M.Sc., COPPE/UFRJ, Rio de Janeiro, Brasil.
- Teixeira, M. (2010). Analysis and design of pultruded GFRP profiles. DECivil/IST, Technical University of Lisbon.

Togashi, B. S. (2017). Desempenho E Resistência À Compressão De Cantoneiras Pultrudadas Curtas De Polímero Reforçado Com Fibra De Vidro (PRFV). Dissertação de M.Sc., Pontífica Universidade Católica, Rio de Janeiro, Brasil,

Tsai, S. M., Wu, E. M. (1971). General theory of strenght for anisotropic materials. J. Compos.Mater., 5(1), pp, 58-80.

Turvey, G. J., Zhang Y, (2006). A computational and experimental analysis of the buckling, postbuckling and initial failure of pultruded GRP columns. Lancaster University.

ABSTRACT EXTENDED

The construction industry is constantly seeking the development and improvement of materials that can meet its needs in a more complete way. Currently, composites are gaining visibility in this sector, as they are an arrangement arising from constituents with different characteristics, which result in a material with properties superior to those that originated it.

Glass fiber reinforced polymers (GRPs) have several advantages, including structural efficiency, durability to corrosion and the diversity of cross sections that have encouraged the use of this constructive system in different sectors. This material, unlike steel, has different mechanical properties on each axis and when it comes to fiber reinforced profiles, these characteristics are susceptible to variation according to fiber content, resin type, void volume and manufacturing mode, making them more complex in predicting behavior. Furthermore, according to Cintra (2017), the use of slender profiles combined with a low modulus of elasticity leads to important instability problems (e.g., buckling).

In this context, the current work presents, through a numerical-computational study, on the performance of fixed-ended columns consisting of U-profiles formed from GRPs under global failure mode by flexural-torsional or flexural. The first step consists of the careful selection of columns (geometry and lengths) to be evaluated, using the GBTul program (according to the Generalized Beam Theory). At this stage, ten cross sections are obtained, and a total of forty-eight columns are chosen.

After that, the FEM (Finite Element Method) is applied via Ansys computational/commercial code for non-linear physical and geometric analysis, using shell elements (Shell 181), to simulate the structural behavior of buckling, post-buckling and ultimate resistance. The results obtained, namely

equilibrium trajectories and modes of buckling and initial collapse (above all), are analyzed for a better understanding of the performance of this type of composite.

Among the main conclusions of this research are the studied GRP columns subjected to F_m did not present post-buckling resistance, while those subjected to F_{MT} exhibited a notable energy reserve, reaching, in some cases, values higher than $1,8 P_{cr}$; Furthermore, the initial failures occurred close to f_{cr} , and for all cases of F_m the load at the time $I_f=1$ is smaller than f_{cr} .