AVALIAÇÃO DE MÉTODOS NUMÉRICOS DE ANÁLISE LINEAR DE ESTABILIDADE PARA PERFIS DE AÇO FORMADOS A FRIO

Débora Coting Braga[1]

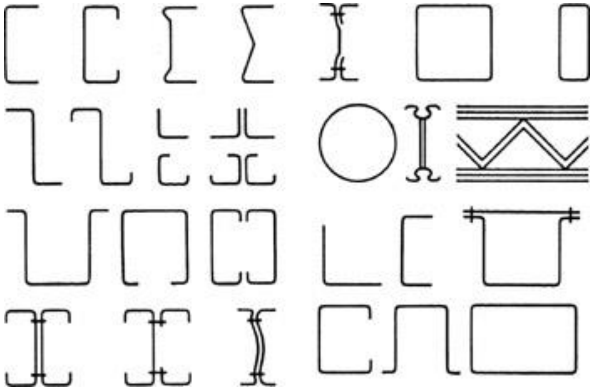
Eduardo M. B. Campello[2]

[1] Mestranda, Departamento de Engenharia de Estruturas e Geotécnica, Escola Politécnica da USP, São Paulo, SP – Brasil.
[2] Professor Doutor, Departamento de Engenharia de Estruturas e Geotécnica, Escola Politécnica da USP, São Paulo, SP – Brasil.

1. INTRODUÇÃO

PERFIS DE AÇO FORMADOS A FRIO

- ✓ Facilidade de fabricação, transporte e estoque;
- ✓ Economia no manuseio e na montagem;
- ✓ Versatilidade de seções transversais;
- ✓ Leves, esbeltos e alta eficiência estrutural.



É indispensável a consideração da perda de estabilidade no projeto de estruturas de chapa dobrada!

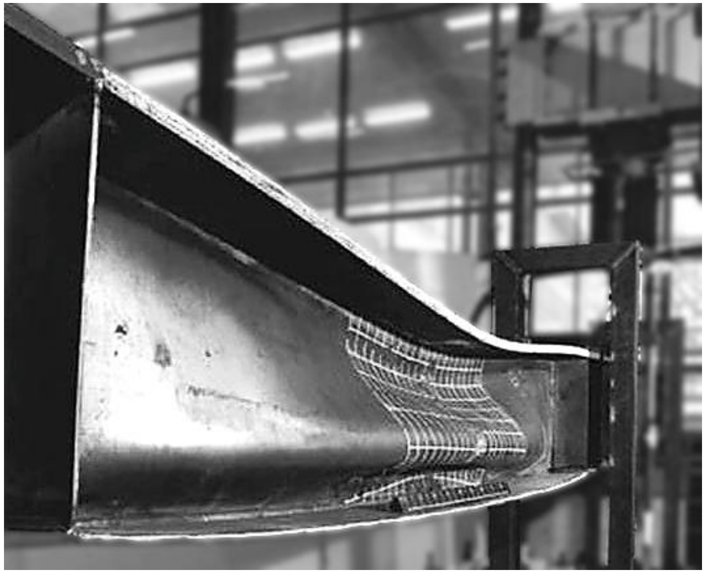
Disponível em: http://www.hiseamarine.com/

Disponível em: http://www.smtformingmachine.com.pt/

1. INTRODUÇÃO

Os fenômenos de instabilidade manifestam-se repentina e violentamente, mesmo quando a velocidade de crescimento das intensidades das ações não sofre acréscimos bruscos.

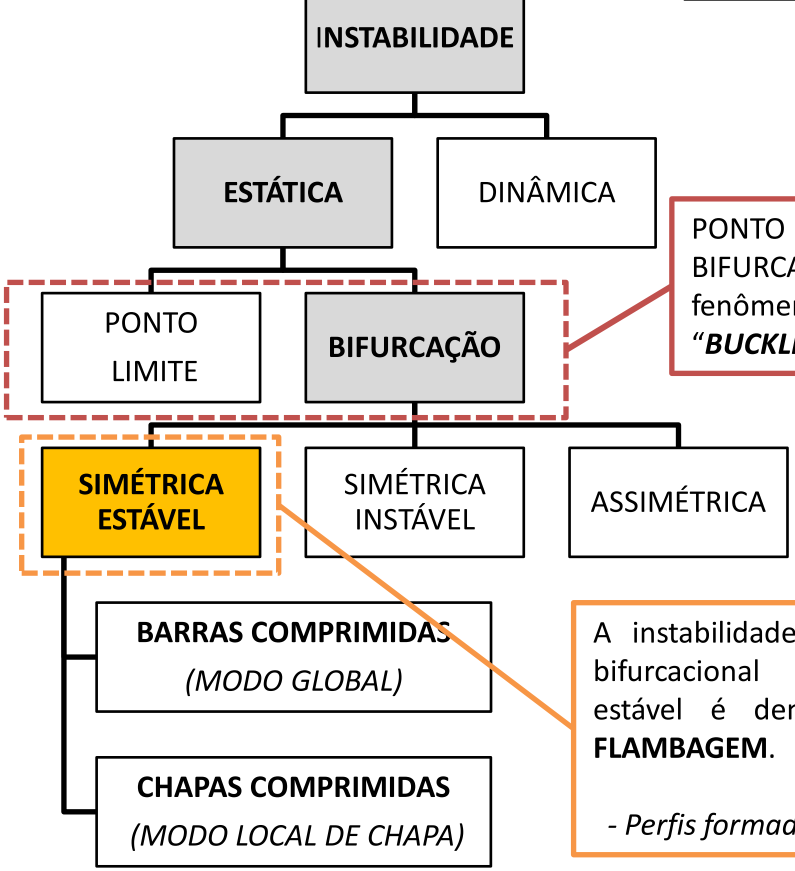
As ruínas produzidas por instabilidade são sem aviso e quase sempre produzem grandes danos à estrutura.



LED – Laufs Engineering Design
Disponível em: http://www.laufsed.com/

ARENA CORINTHIANS
Fonte: os autores.

1. INTRODUÇÃO



INSTABILIDADE

ESTÁTICA

DINÂMICA

PONTO LIMITE

BIFURCAÇÃO

SIMÉTRICA ESTÁVEL

SIMÉTRICA INSTÁVEL

ASSIMÉTRICA

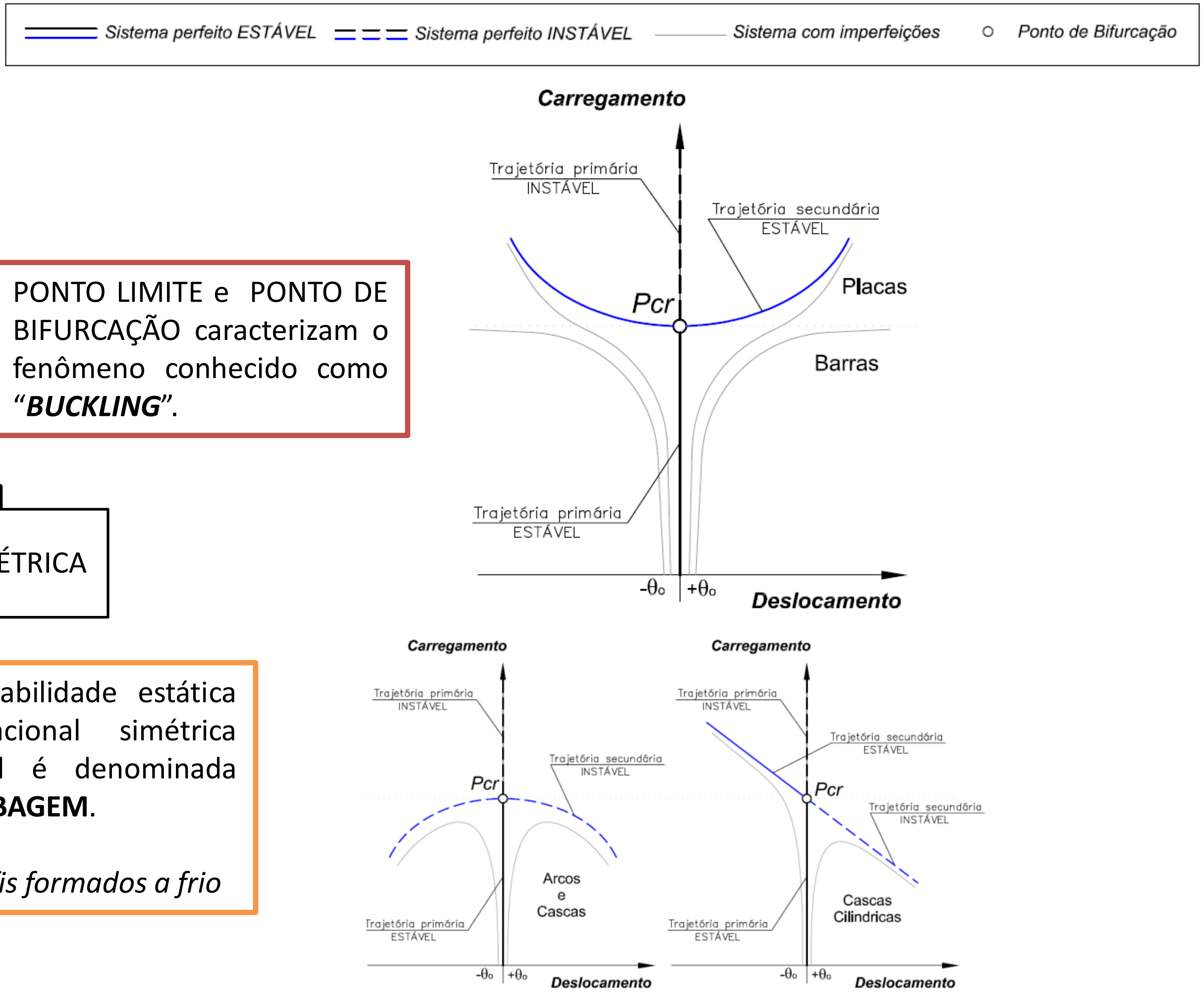
BARRAS COMPRIMIDAS
(MODO GLOBAL)

CHAPAS COMPRIMIDAS
(MODO LOCAL DE CHAPA)

PONTO LIMITE e PONTO DE BIFURCAÇÃO caracterizam o fenômeno conhecido como “***BUCKLING***”.

A instabilidade estática bifurcacional simétrica estável é denominada **FLAMBAGEM**.

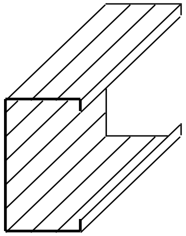
- Perfis formados a frio



2. OBJETIVO

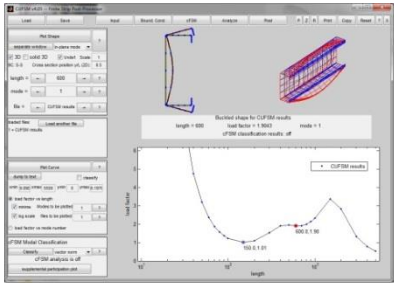
Dentro do contexto da análise linear de estabilidade, pretende-se avaliar três diferentes métodos numéricos de obtenção de carregamentos críticos elásticos bifurcacionais e seus correspondentes modos de instabilidade, quando aplicados a perfis de aço de chapa dobrada.

MÉTODO DAS FAIXAS FINITAS

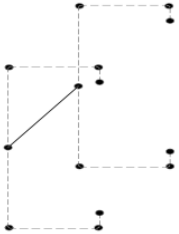


CUFSM

Schafer & Ádány Universidade Johns Hopkins de Baltimore.

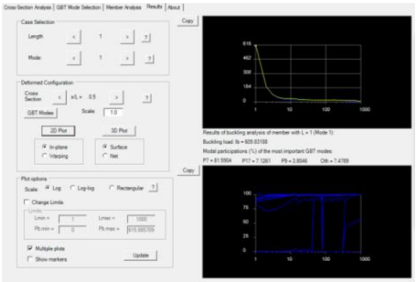


MÉTODO DA TEORIA GENERALIZADA DE VIGA

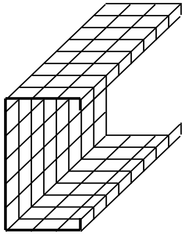


GBTUL

Bebiano, Pina, Silvestre & Camotim Universidade Técnica de Lisboa.

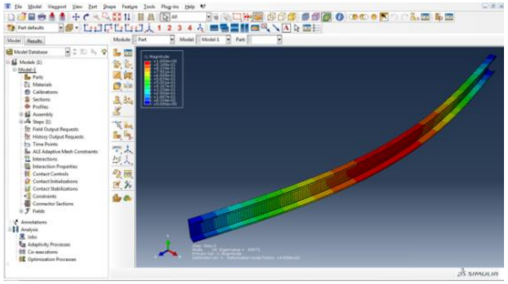


MÉTODO DOS ELEMENTOS FINITOS



ABAQUS

Comercializado pela Dassault Systemes Simulia Corporation.



2. MATERIAIS E MÉTODOS

Os três métodos utilizam métodos variacionais para a formulação do problema de autovalores, que compreende em resolver o seguinte problema generalizado de autovalores:

$$(\mathbf{K_e} - \lambda \mathbf{K_g})\boldsymbol{\phi} = 0$$

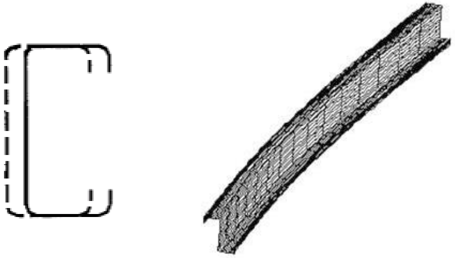
$\mathbf{K_e}$ ... matriz de rigidez elástica.
$\mathbf{K_g}$ ... matriz de rigidez geométrica.
λ ... autovalor.
$\boldsymbol{\phi}$ ... autovetor.

As *n* raízes da equação são denominadas de *autovalores* e a cada raiz λ há um vetor $\boldsymbol{\phi}$, não nulo, correspondente que satisfaz a equação. A menor das raízes no contexto da instabilidade bifurcacional está associada ao primeiro ponto crítico, consequentemente ao carregamento critico mínimo.

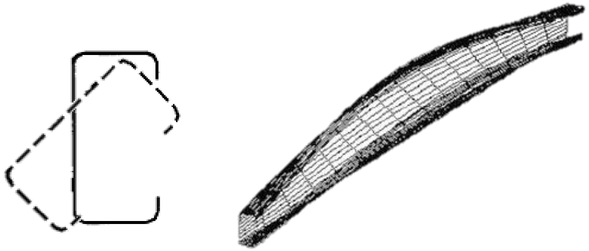
2. MATERIAIS E MÉTODOS

MODOS GLOBAIS

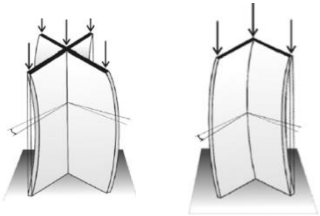
- Modo global por flexão (MGF)



- Modo global por flexotorção (MGFT)

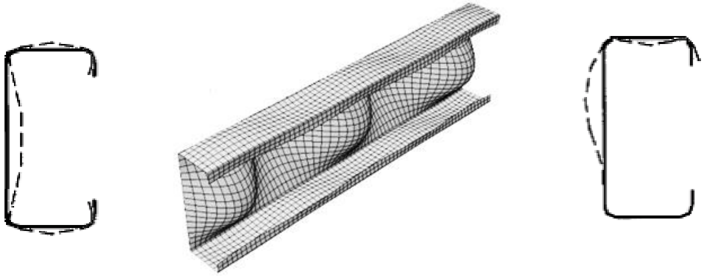


- Modo global por torção (MGT)

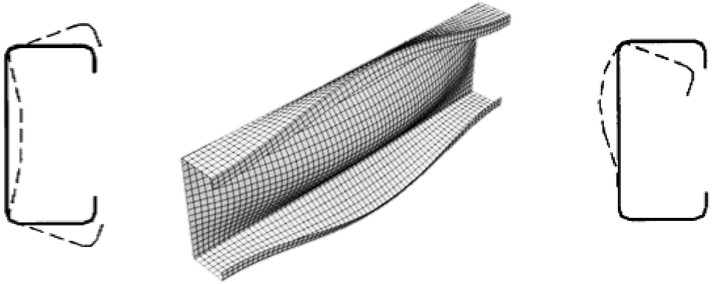


MODOS LOCAIS

- Modo local de chapa (MLC)



- Modo distorcional (MD)



3. RESULTADOS E DISCUSSÃO

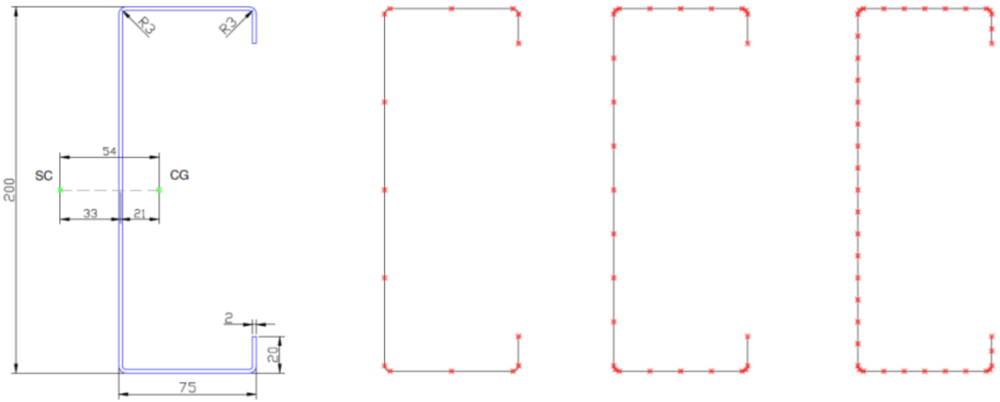
Determinar os carregamentos críticos elásticos e seus correspondentes modos de instabilidade, via:

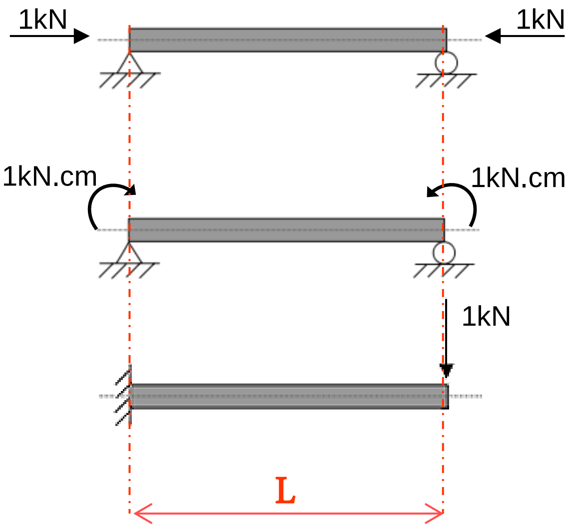
✓ MFF → CUFSM
✓ MEF-GBT → GBTUL
✓ MEF-cascas → ABAQUS

Condições de carregamento e vinculação:

1. **barra isolada biarticulada sem restrição ao empenamento, submetida à compressão uniforme;**
2. barra isolada biarticulada sem restrição ao empenamento, submetida à flexão pura;
3. barra isolada engastada em uma extremidade e livre na outra, submetida à flexão simples.

Ue 200x75x20x2



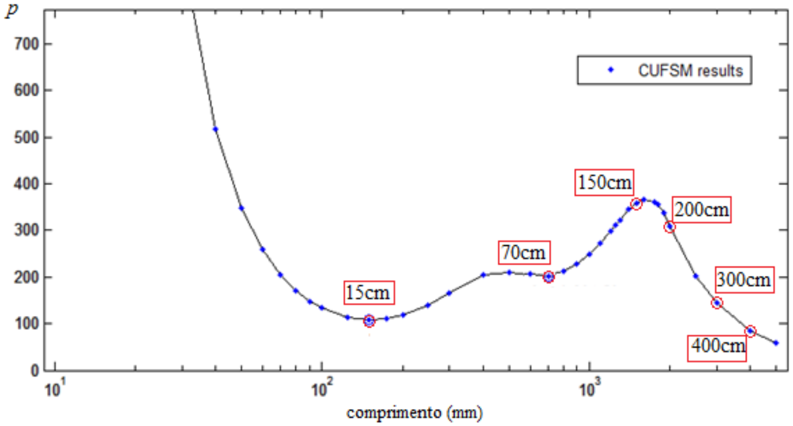


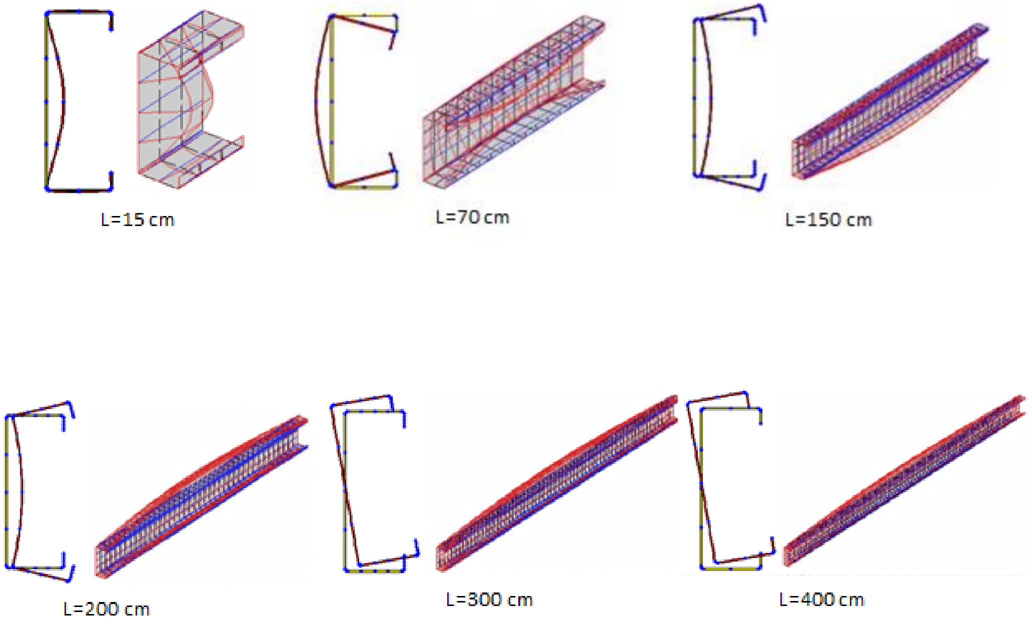
Comprimentos (L): 15cm, 70cm, 150cm, 200cm, 300cm e 400cm.

3. RESULTADOS E DISCUSSÃO

3.1. Barra biarticulada submetida a compressão uniforme

CUFSM





CARREGAMENTOS CRÍTICOS [kN]:

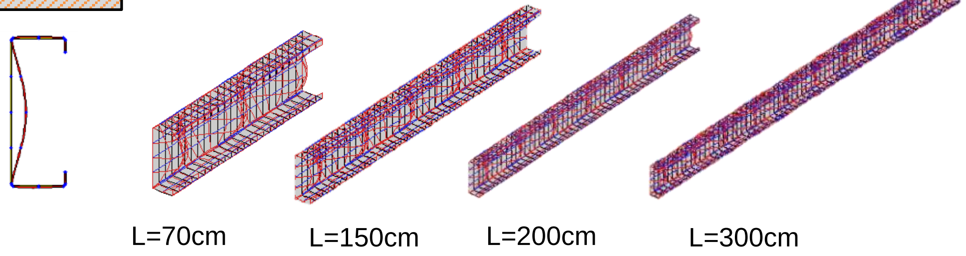
	L (cm)					
Gr.	**15,0**	**70,0**	**150,0**	**200,0**	**300,0**	**400,0**
1	82,15	155,58	271,73	232,84	109,06	64,84
2	82,08	155,34	271,25	231,54	108,48	64,51
3	82,07	154,36	271,04	231,19	108,32	64,43

L= 70 a 300 cm

P_{cr}=82kN

MODO LOCAL DE CHAPA com mais de uma semionda longitudinal!

cFSM

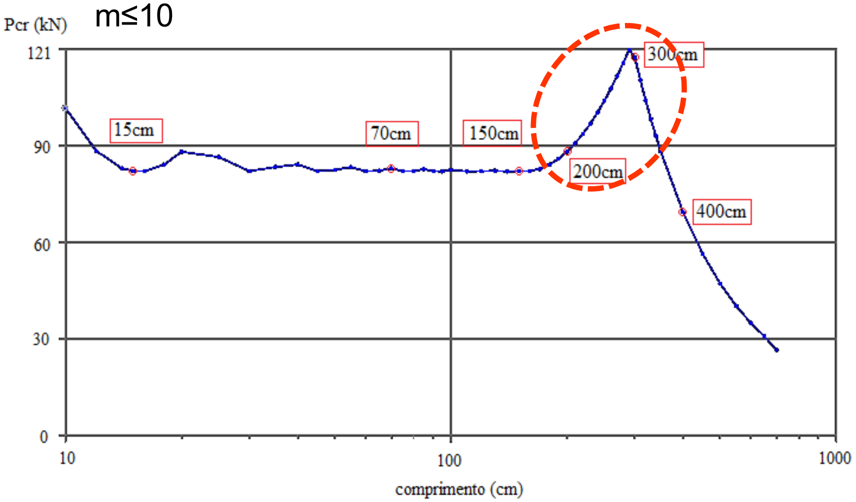


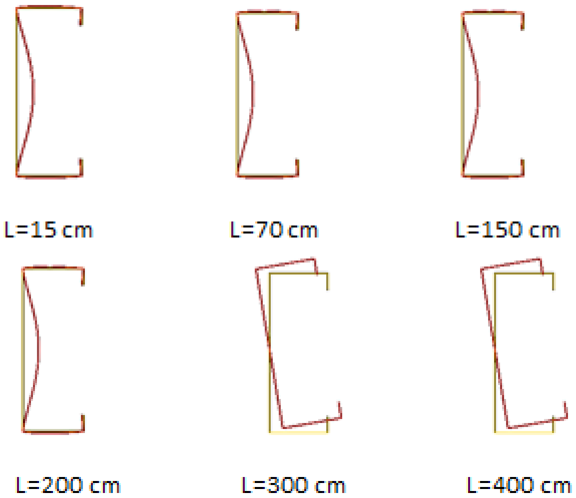
3. RESULTADOS E DISCUSSÃO

3.1. Barra biarticulada submetida a compressão uniforme

GBTUL

m≤10



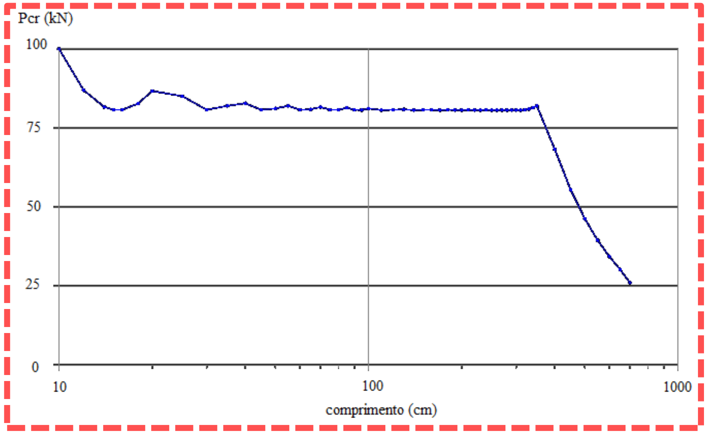


CARREGAMENTOS CRÍTICOS [kN]:

	L (cm)					
Gr.	**15,0**	**70,0**	**150,0**	**200,0**	**300,0**	**400,0**
1	82,61	83,51	82,61	~~88,71~~	~~118,10~~	69,78
2	82,58	83,48	82,59	~~88,67~~	~~118,10~~	69,78
3	82,59	83,48	82,59	~~88,67~~	~~118,10~~	69,78

L (cm)	
200,0	**300,0**
82,52	82,55
82,49	82,52
82,49	82,52

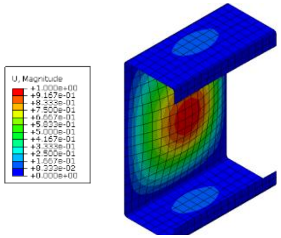
m≤20



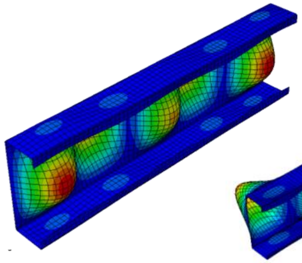
3. RESULTADOS E DISCUSSÃO

3.1. Barra biarticulada submetida a compressão uniforme

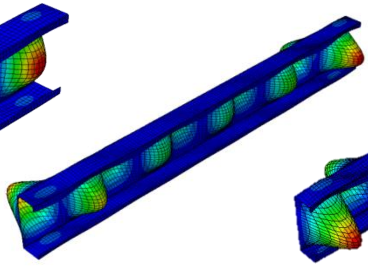
ABAQUS



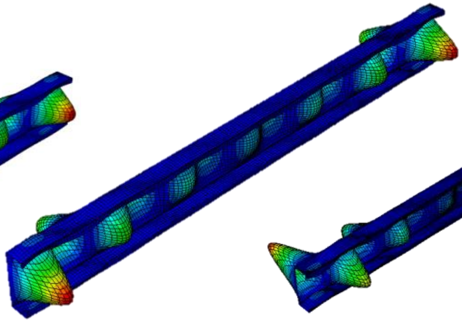
Pcr = 80kN
L=15cm



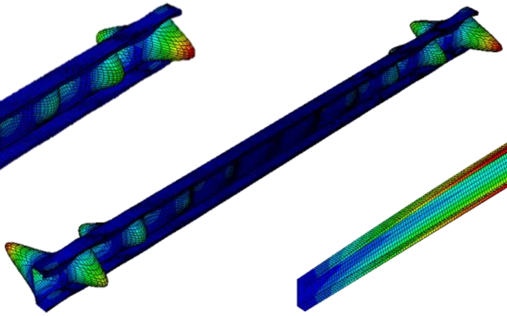
Pcr = 82kN
L=70cm



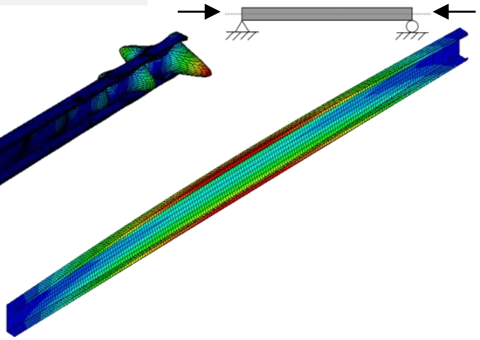
Pcr = 81kN
L=150cm



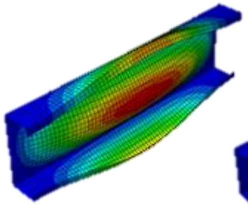
Pcr = 81kN
L=200cm



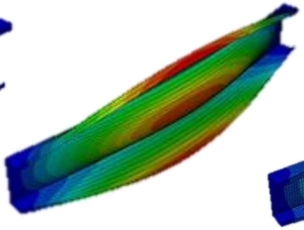
Pcr = 81kN
L=300cm



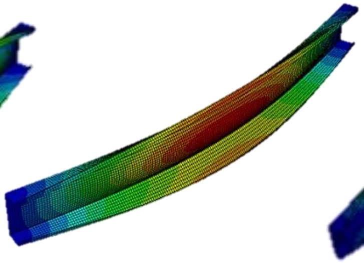
Pcr = 64kN
L=400cm



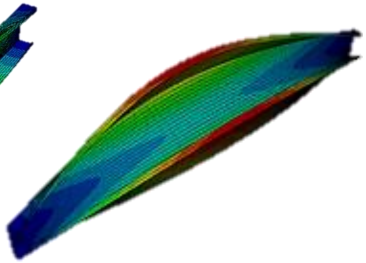
Pcr = 156kN
(20° modo)



Pcr = 270kN
(31° modo)

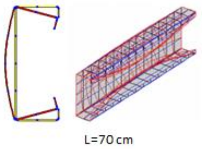


Pcr = 234kN
(17° modo)

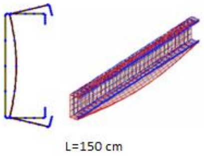


Pcr = 107kN
(22° modo)

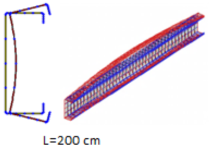
CUFSM



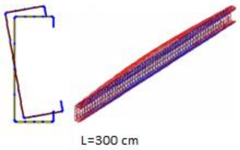
Pcr = 154kN



Pcr = 271kN



Pcr = 231kN



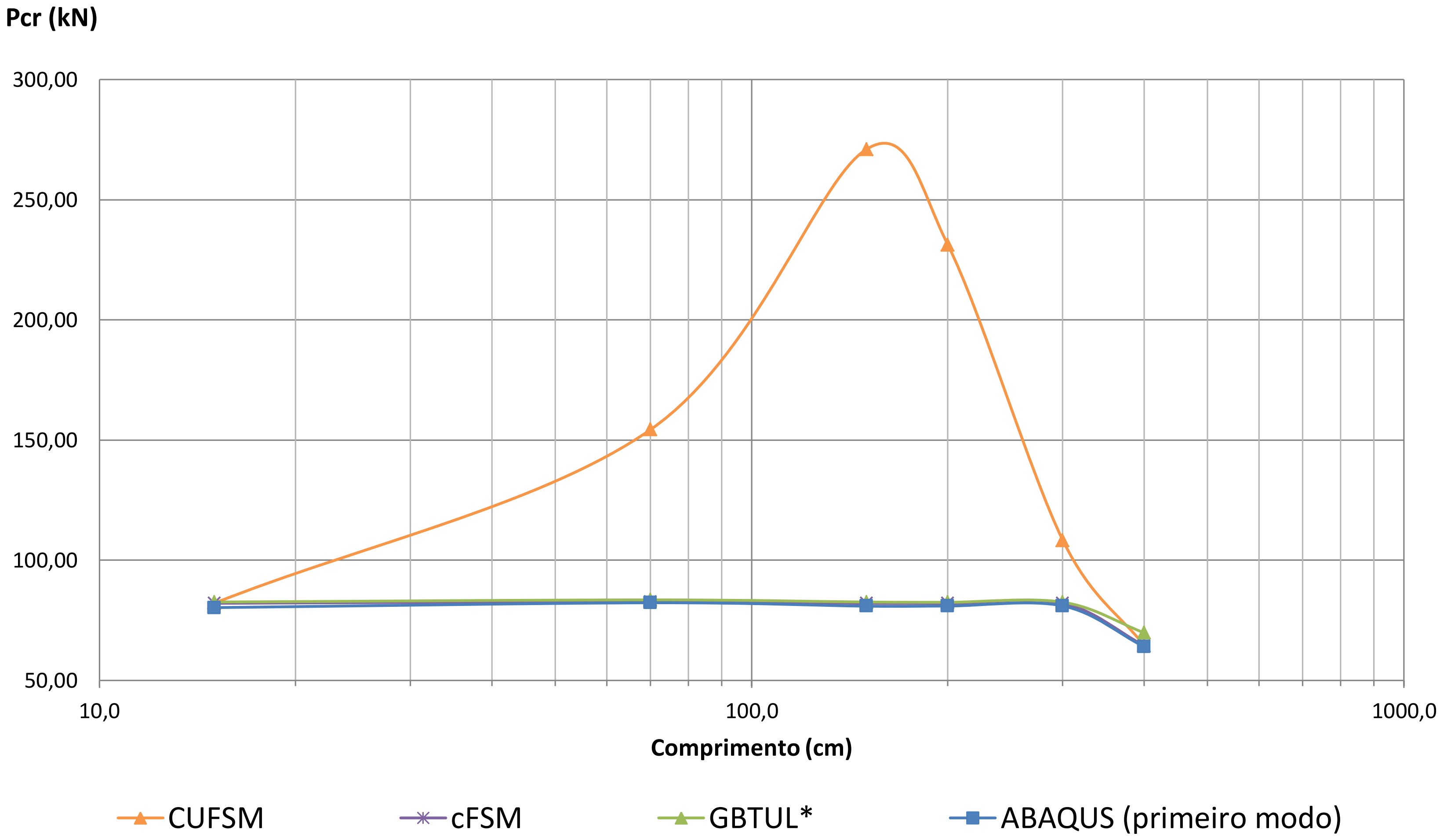
Pcr = 108kN

CARREGAMENTOS CRÍTICOS [kN]:

	L (cm)					
Gr.	**15,0**	**70,0**	**150,0**	**200,0**	**300,0**	**400,0**
1	87,70	90,76	85,82	85,89	85,97	60,12
2	82,57	83,98	83,31	83,37	83,44	62,86
3	80,26	82,28	80,87	80,93	80,98	63,95

3. RESULTADOS E DISCUSSÃO

3.1. Barra biarticulada submetida a compressão uniforme



3. RESULTADOS E DISCUSSÃO

3.2. Barra biarticulada submetida a flexão pura

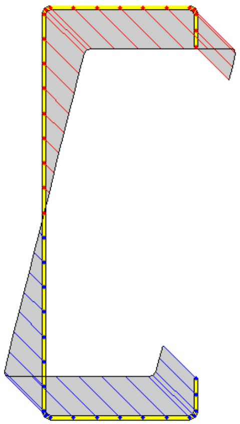
Condições de carregamento e vinculação:

1. barra isolada biarticulada sem restrição ao empenamento, submetida à compressão uniforme;
2. **barra isolada biarticulada sem restrição ao empenamento, submetida à flexão pura;**
3. barra isolada engastada em uma extremidade e livre na outra, submetida à flexão simples.

Ue 200x75x20x2

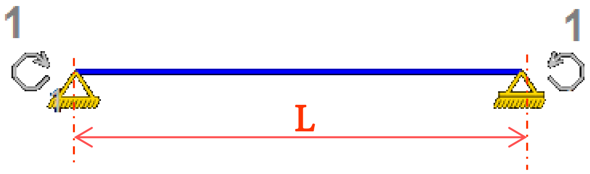
Comprimentos (L): 15cm, 70cm, 150cm, 200cm, 300cm e 400cm.

Os resultados obtidos nessa análise são para seções com o grau de refinamento tipo 3.

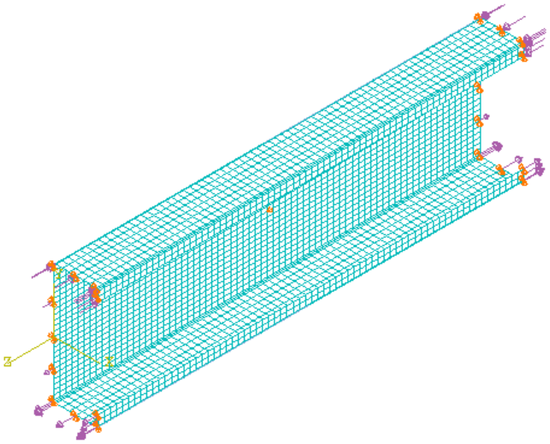


$$\sigma = \frac{M}{I} y \ [kN/cm^2]$$

Sendo, M = 1kN.cm



M = 1kN.cm



$$q = \frac{M \times t}{I} y \ [kN/cm]$$

Sendo, M = 1kN.cm

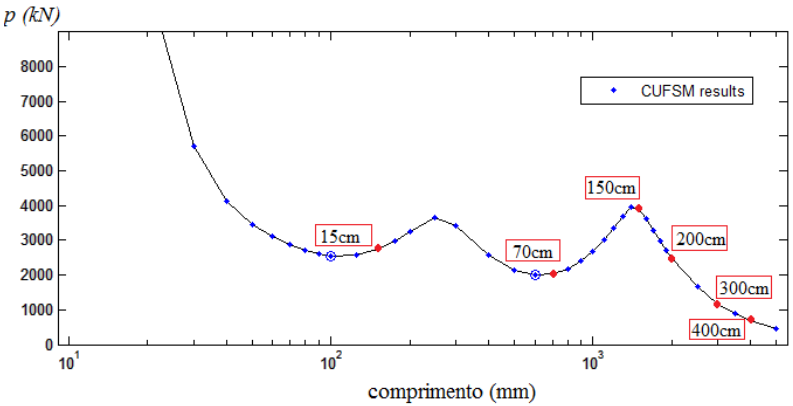
3. RESULTADOS E DISCUSSÃO

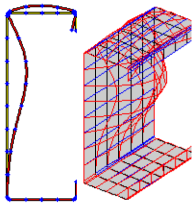
3.2. Barra biarticulada submetida a flexão pura

CUFSM

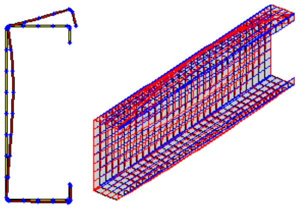
CARREGAMENTOS CRÍTICOS:

	Mcr (kN.cm)					
L (cm)	**15**	**70**	**150**	**200**	**300**	**400**
CUFSM	2736	2041	3908	2493	1177	687
cFSM	-	-	2101	2016	-	-

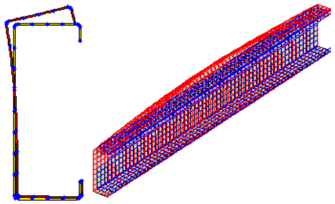




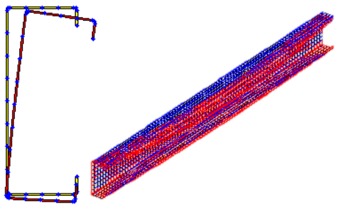
Mcr = 2736 kN.cm
(L=15cm)



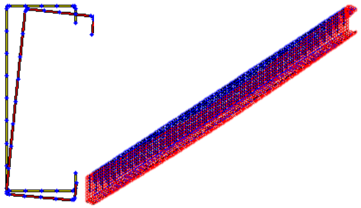
Mcr = 2041 kN.cm
(L=70cm)



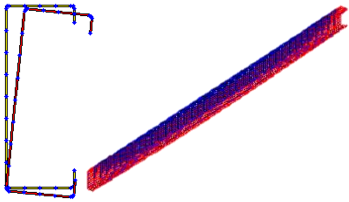
Mcr = 3908 kN.cm
(L=150cm)



Mcr = 2493 kN.cm
(L=200cm)

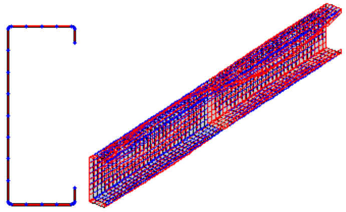


Mcr = 1177 kN.cm
(L=300cm)

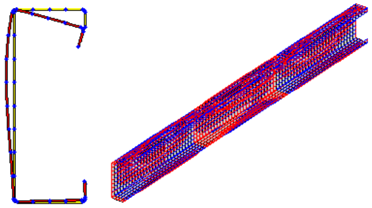


Mcr = 687 kN.cm
(L=400cm)

cFSM



Mcr = 2101 kN.cm
(L=150cm)

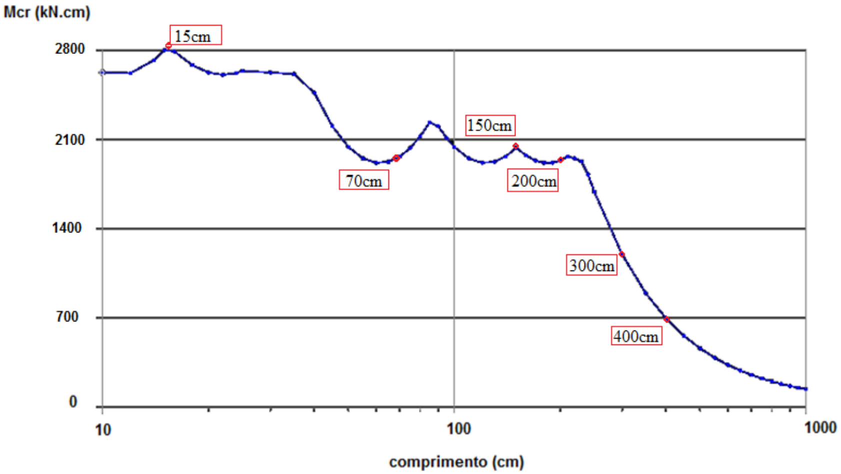


Mcr = 2015 kN.cm
(L=200cm)

3. RESULTADOS E DISCUSSÃO

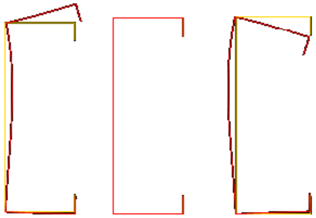
3.2. Barra biarticulada submetida a flexão pura

GBTUL

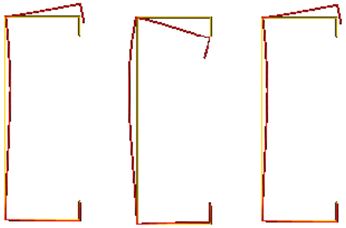


Mcr = 2783 kN.cm (L=15cm)

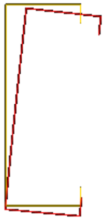
Mcr = 1955 kN.cm (L=70cm)



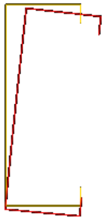
Mcr = 2023 kN.cm (L=150cm)



Mcr = 1925 kN.cm (L=200cm)



Mcr = 1194 kN.cm (L=300cm)

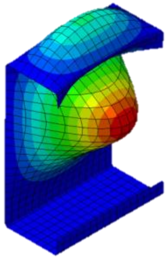


Mcr = 695 kN.cm (L=400cm)

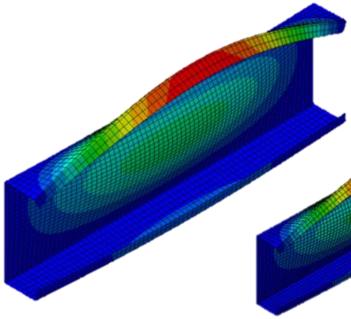
3. RESULTADOS E DISCUSSÃO

3.2. Barra biarticulada submetida a flexão pura

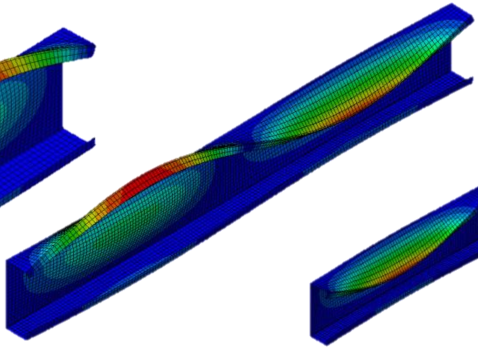
ABAQUS



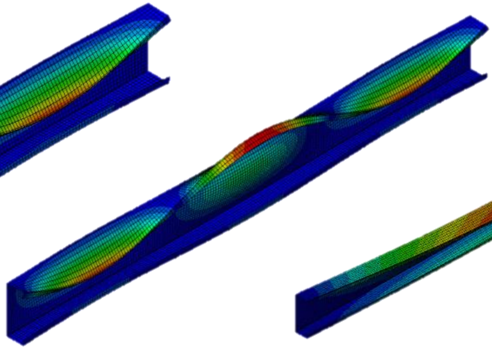
Mcr = 2714 kN.cm
(L=15cm)



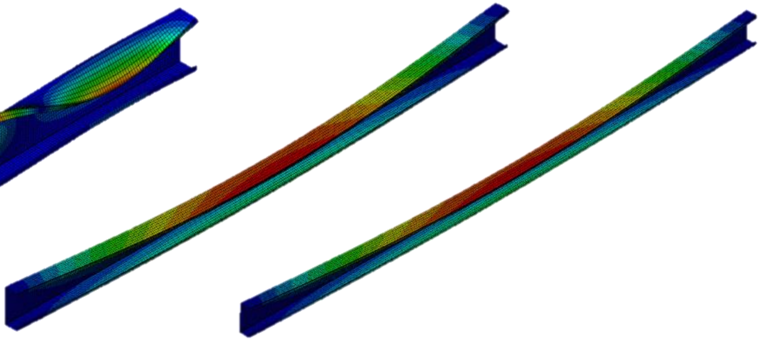
Mcr = 1896 kN.cm
(L=70cm)



Mcr = 2087 kN.cm
(L=150cm)

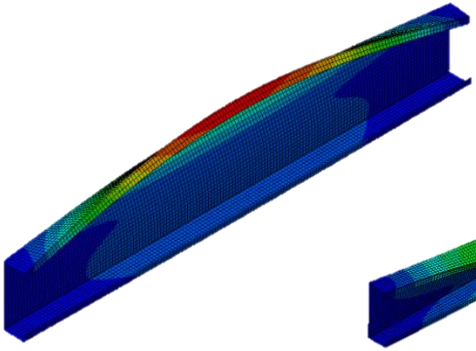


Mcr = 1988 kN.cm
(L=200cm)

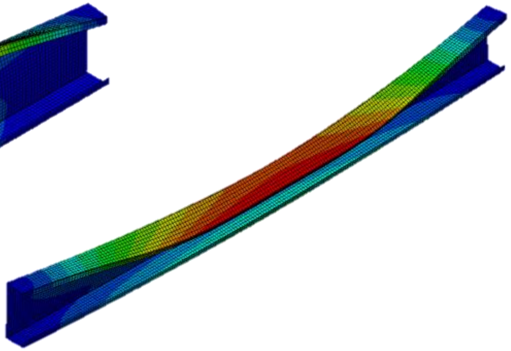


Mcr = 1186 kN.cm
(L=300cm)

Mcr = 691 kN.cm
(L=400cm)



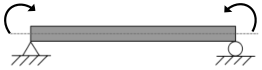
Mcr = 3954 kN.cm
(66° modo)

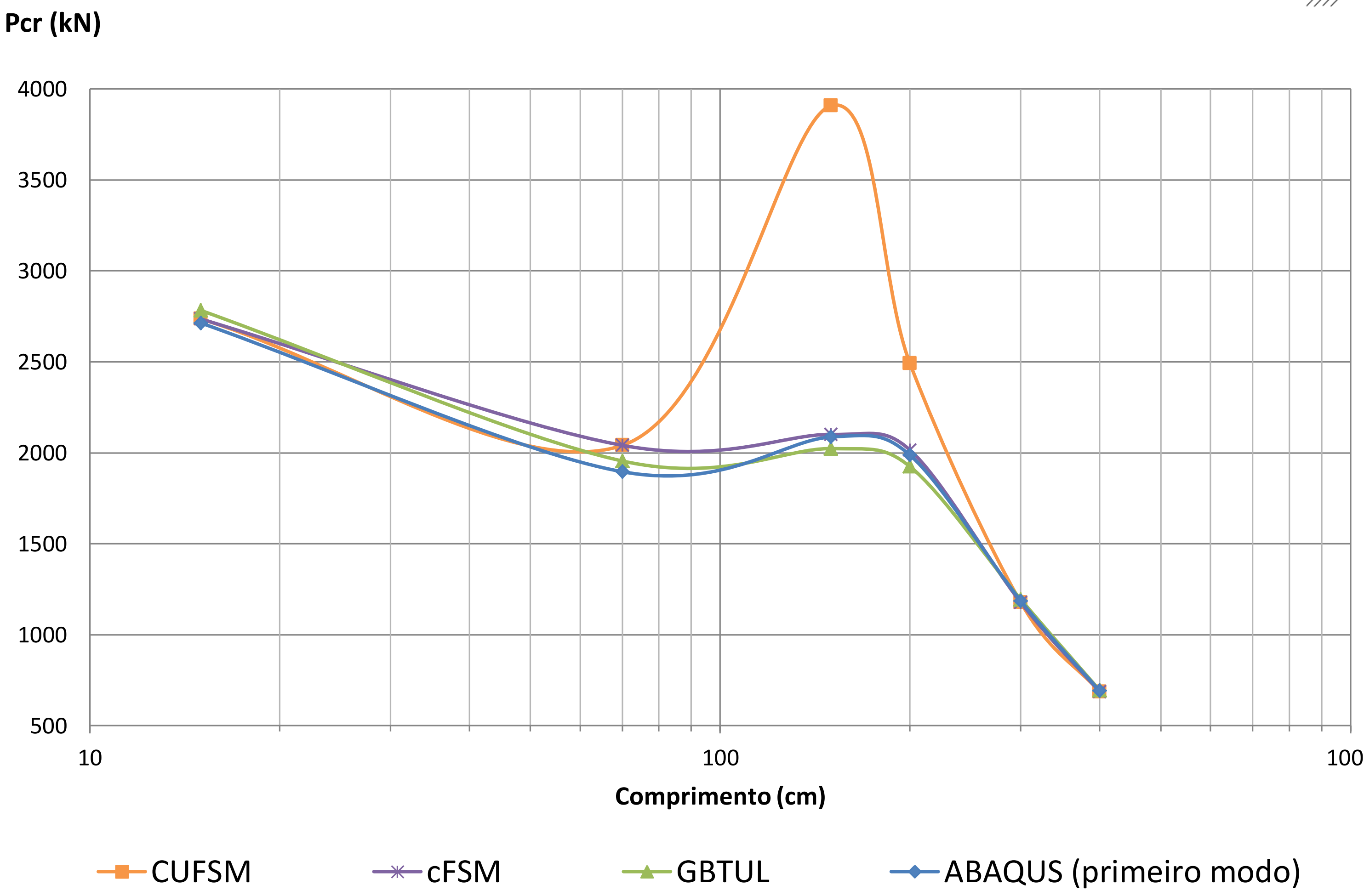


Mcr = 2516 kN.cm
(5° modo)

3. RESULTADOS E DISCUSSÃO

3.2. Barra biarticulada submetida a flexão pura





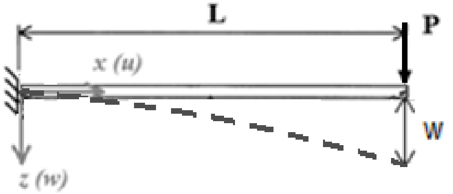
3. RESULTADOS E DISCUSSÃO

3.3. Barra engastada submetida a flexão simples

Condições de carregamento e vinculação:

1. barra isolada biarticulada sem restrição ao empenamento, submetida à compressão uniforme;
2. barra isolada biarticulada sem restrição ao empenamento, submetida à flexão pura;
3. **barra isolada engastada em uma extremidade e livre na outra, submetida à flexão simples.**

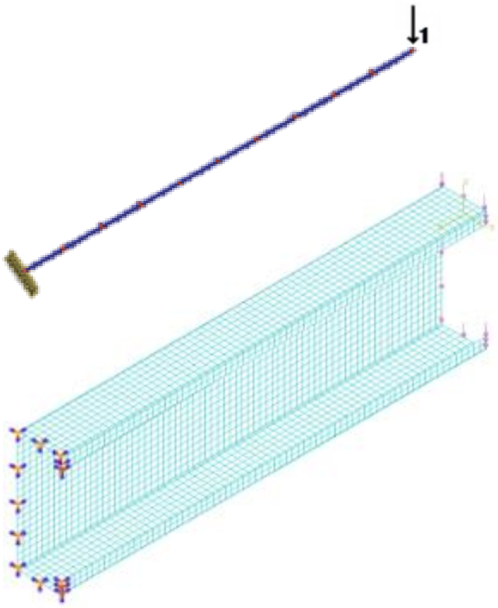
Ue 200x75x20x2



Comprimentos (**L**): 15cm, 70cm, 150cm, 200cm, 300cm e 400cm.

Os resultados obtidos nessa análise são para seções com o grau de refinamento tipo 3.

Como os esforços não são constantes ao longo do eixo longitudinal da barra, o CUFSM não consegue simular esse problema e não será utilizado nesta análise.

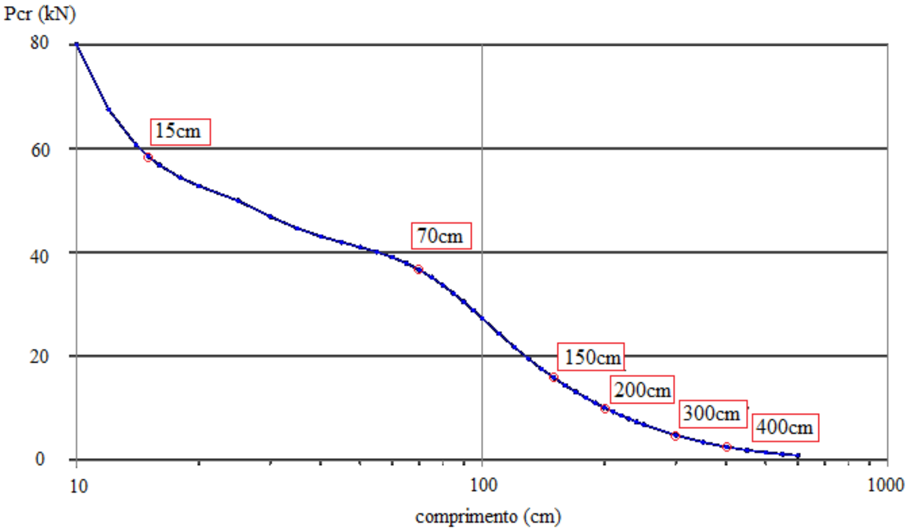


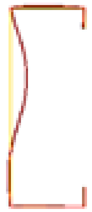
Aborda-se então a comparação das diferenças de modelagem e dos resultados entre o MEF-GBT e o MEF-cascas através dos programas GBTUL e ABAQUS, respectivamente.

3. RESULTADOS E DISCUSSÃO

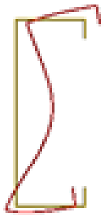
3.3. Barra engastada submetida a flexão simples

GBTUL

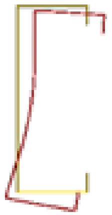




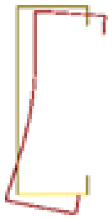
Pcr = 59kN
L=15cm



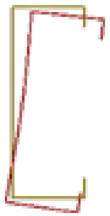
Pcr = 37kN
L=70cm



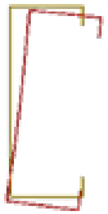
Pcr = 16kN
L=150cm



Pcr = 10kN
L=200cm



Pcr = 5kN
L=300cm



Pcr = 2,6kN
L=400cm

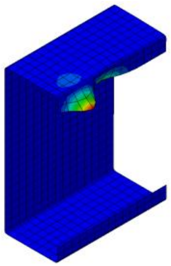
CARREGAMENTOS CRÍTICOS:

	Pcr (kN)					
L (cm)	**15,0**	**70,0**	**150,0**	**200,0**	**300,0**	**400,0**
GBTUL	58,83	36,85	16,01	10,23	4,87	2,61

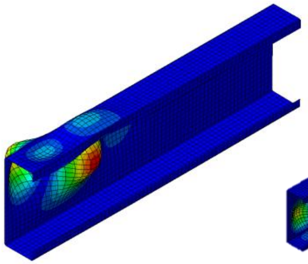
3. RESULTADOS E DISCUSSÃO

3.3. Barra engastada submetida a flexão simples

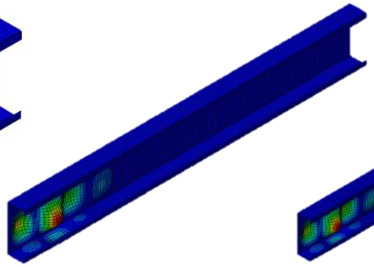
ABAQUS



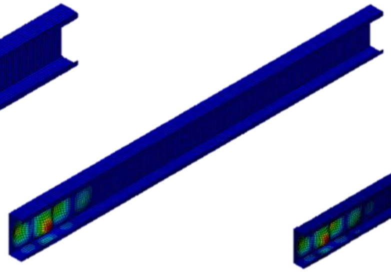
Pcr = 45kN
L=15cm



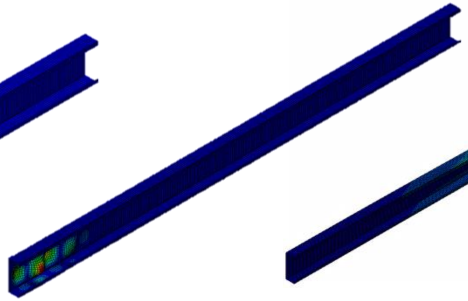
Pcr = 17kN
L=70cm



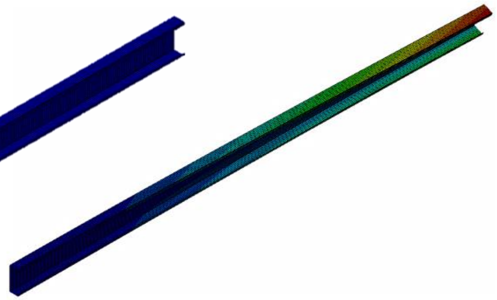
Pcr = 7kN
L=150cm



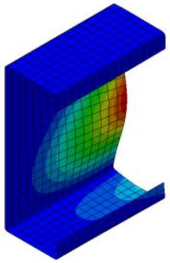
Pcr = 6kN
L=200cm



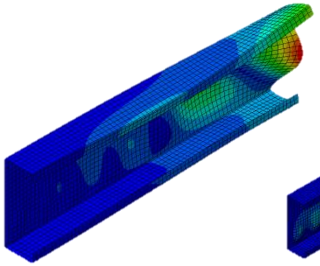
Pcr = 4kN
L=300cm



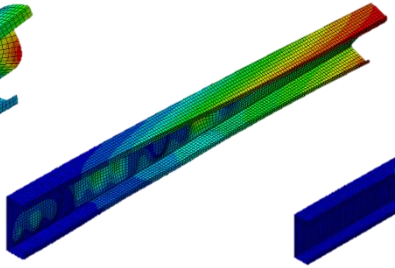
Pcr = 2kN
L=400cm



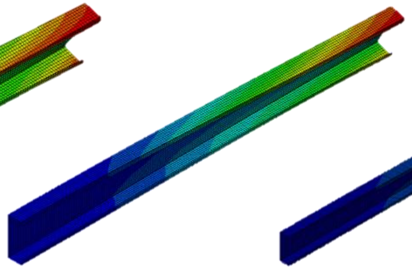
Pcr = 72kN
(5° modo)



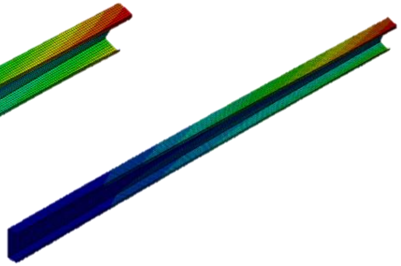
Pcr = 36kN
(17° modo)



Pcr = 16kN
(30° modo)



Pcr = 10kN
(29° modo)



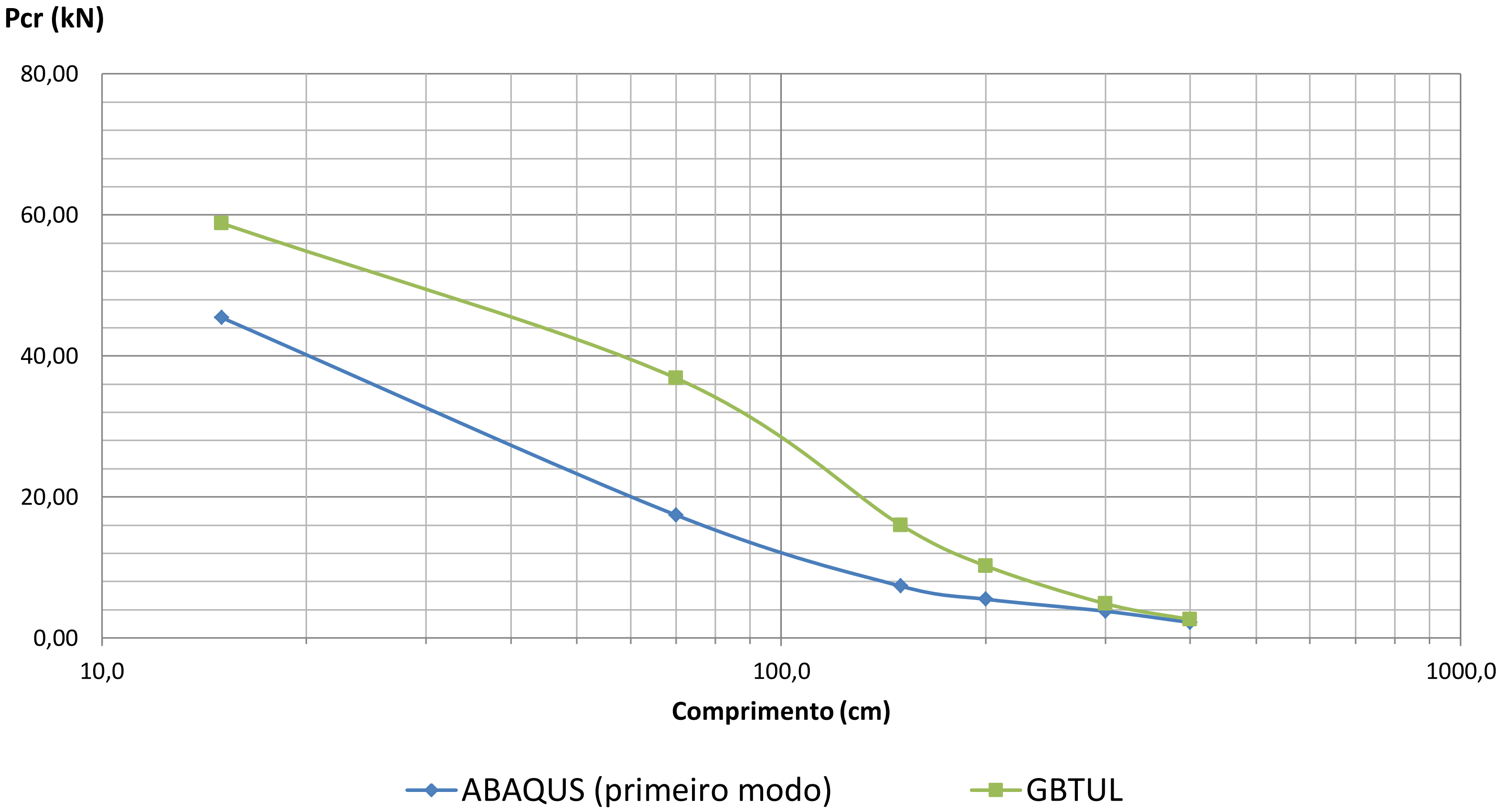
Pcr = 5kN
(9° modo)

CARREGAMENTOS CRÍTICOS:

	Pcr (kN)					
L (cm)	**15,0**	**70,0**	**150,0**	**200,0**	**300,0**	**400,0**
GBTUL	58,83	36,85	16,01	10,23	4,87	2,61
ABAQUS	45,45	17,43	7,35	5,50	3,80	2,20

3. RESULTADOS E DISCUSSÃO

3.3. Barra engastada submetida a flexão simples



4. CONCLUSÃO

Método das Faixas Finitas – CUFSM

👍 Alternativa de baixo custo computacional, prática e simples;

👎 Limitações nos casos a serem estudados;

👎 Em determinados casos o CUFSM não é capaz de fornecer mínimos distintos para os modos locais (MLC e MD), pois o método convencional das faixas finitas considera apenas uma semionda “m” ao longo do comprimento longitudinal. Esse problema pode ser parcialmente contornado utilizando-se a formulação alternativa do MFF confinado, ou cFSM.

Teoria Generalizada de Vigas por meio de elementos finitos de barra - GBTUL

👍 Abordagem mais geral do que o MFF;

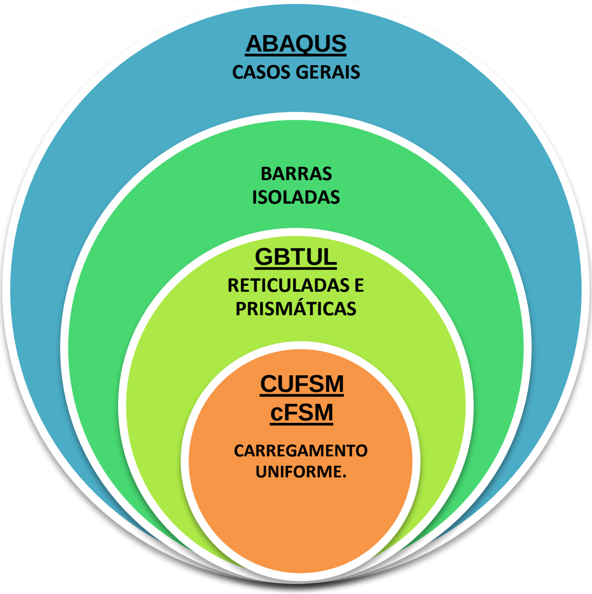
👍 Oferece bons resultados analíticos (barras simplesmente apoiadas);

👎 Chama-se a atenção para a escolha do número máximo de semiondas a serem levadas em consideração na determinação dos carregamentos críticos. A escolha insuficiente do parâmetro “m” pode levar ao falso resultado de carregamentos superiores ao mínimo.

Método dos Elementos Finitos utilizando elementos de casca - ABAQUS

👍 Versátil, confiável e geral;

👎 Requer a imposição criteriosa das condições de contorno e dos carregamentos. A incorreta modelagem dessas condições pode acarretar em modos e carregamentos críticos completamente falseados.



ABAQUS
CASOS GERAIS

BARRAS
ISOLADAS

GBTUL
RETICULADAS E
PRISMÁTICAS

CUFSM
cFSM
CARREGAMENTO
UNIFORME.

Desde que modele-se corretamente o problema, a análise com o MEF-cascas será sempre a mais confiável, uma vez que o modelo de casca representa mais fielmente o problema físico.