

ANÁLISE NUMÉRICA DO COMPORTAMENTO MECÂNICO DE LIGAÇÕES DO TIPO REVERSE CHANNEL COM O USO DE CANTONEIRAS

Cassiano Antonio Gasparini de Barros¹, Germano Francisco Simon Romera²

¹Graduado no Curso de Engenharia Civil, Campus Umuarama/PR, Universidade Estadual de Maringá – UEM. ra99486@uem.br

²Professor, Mestre, Departamento de Tecnologia, UEM. Professor e Coordenador Adjunto do Curso de Engenharia Civil da Universidade Estadual de Maringá (UEM) Campus de Umuarama. gfsromera2@uem.br

RESUMO

Muitas vezes a utilização de perfis do tipo tubular em estruturas de aço é descartada. Isso se dá pela dificuldade de se ter acesso à parte interna para a execução das ligações, além da carência de métodos de dimensionamento. Como solução destes problemas surgiu o *reverse channel*, ligação envolvendo um perfil em U soldado a coluna tubular. O pouco conhecimento a respeito traz a necessidade de explorar suas características, bem como sua variabilidade. O presente estudo busca realizar análises numéricas com o uso do software *HyperWorks* de ligações do tipo *reverse channel* que fazem a conexão entre uma viga de perfil I e uma coluna tubular, buscando avaliar a rigidez para suas variações através de um gráfico momento versus rotação relativa. Desenvolveu-se no software três modelos com uso de cantoneiras parafusadas na viga e no perfil U com propriedade de material não-linear e então foram aplicados incrementos de carregamento na extremidade da viga para a obtenção das deflexões máximas. Com este valor subtraiu-se a parcela referente à flexão da viga para obter o comportamento da ligação e plotar um gráfico momento versus rotação para análise da rigidez. Os resultados encontrados foram condizentes com o referencial teórico e mais característicos de ligações flexíveis do que rígidas, tendo a cantoneira dupla de alma como a mais próxima de uma rótula. Conclui-se que uma boa projeção da rigidez de uma ligação pode trazer economia, além de que este tipo de ligação pode vir a viabilizar o uso mais frequente de perfis tubulares.

PALAVRAS-CHAVE: Perfil tubular; *HyperWorks*; Rigidez.

1 INTRODUÇÃO

O emprego de perfis do tipo tubular em estruturas metálicas ainda não é uma saída corriqueira entre os profissionais da área, mesmo tal configuração possuir diversas qualidades como, por exemplo, alta resistência, redução de custos, boa aparência estética, além de proporcionar o uso para os sistemas de aquecimento e ventilação (MAGALHÃES; REBELO; JORDÃO, 2015).

A pouca utilização deste tipo de perfil, também denominado RHS (*Rectangular Hollow Sections*) para tipos retangulares segundo CIDECT (2010), é devido à complexidade de conceber tipos viáveis de ligações, pelo fato da dificuldade de se ter acesso à parte interna do perfil (MAGALHÃES; REBELO; JORDÃO, 2015). Além disso, há uma notória escassez de métodos amplos que descrevem sobre a análise e o dimensionamento de ligações para este tipo de perfil. De acordo com a própria norma brasileira ABNT NBR 8800:2008 (Associação Brasileira de Normas Técnicas), várias das disposições sobre ligações apontadas nela não se aplicam a perfis do tipo tubular.

Em razão disso, surgiu um tipo de ligação capaz de potencializar o uso de sistemas que envolvem colunas do tipo tubular com vigas abertas, denominado *reverse channel*. Conforme Málaga-Chuquitaype e Elghazouli (2010), ele consiste no uso de um perfil em U invertido soldado na coluna tubular, de modo que a viga faça a conexão de forma parafusada com o mesmo. Apesar de já haverem estudos relacionados a este tipo de ligação inovadora, ainda há uma falta de investigações sobre o comportamento mecânico deste tipo de conexão, bem como modelos para o seu dimensionamento (REIS, 2015).

Entender o funcionamento do *reverse channel*, assim como de ligações no geral é de extrema importância para que o comportamento teórico previsto não seja discrepante

na prática. Segundo Nunes (2012), ligação é todo detalhe construtivo que execute a conexão entre componentes estruturais, permitindo uma grande variabilidade de situações em que é empregado.

A rigidez de uma ligação, ou seja, o potencial que um determinado elemento tem de impedir a rotação relativa entre as estruturas conectadas é a causadora do comportamento final das estruturas no que diz respeito a declividades e deflexões (NUNES, 2012).

De acordo com Walter Pfeil e Michele Pfeil (2008), é comum fazer a consideração das ligações como sendo perfeitamente rígidas ou rotuladas, ainda podendo pressupor uma rigidez intermediária entre as duas. Tal rigidez pode ser analisada pela curva de comportamento não-linear do gráfico momento versus rotação relativa, conforme mostra o gráfico abaixo (Gráfico 1), sendo possível fazer a classificação em ligações rígidas, flexíveis ou semirrígidas (ANDRADE; VELLASCO, 2016).

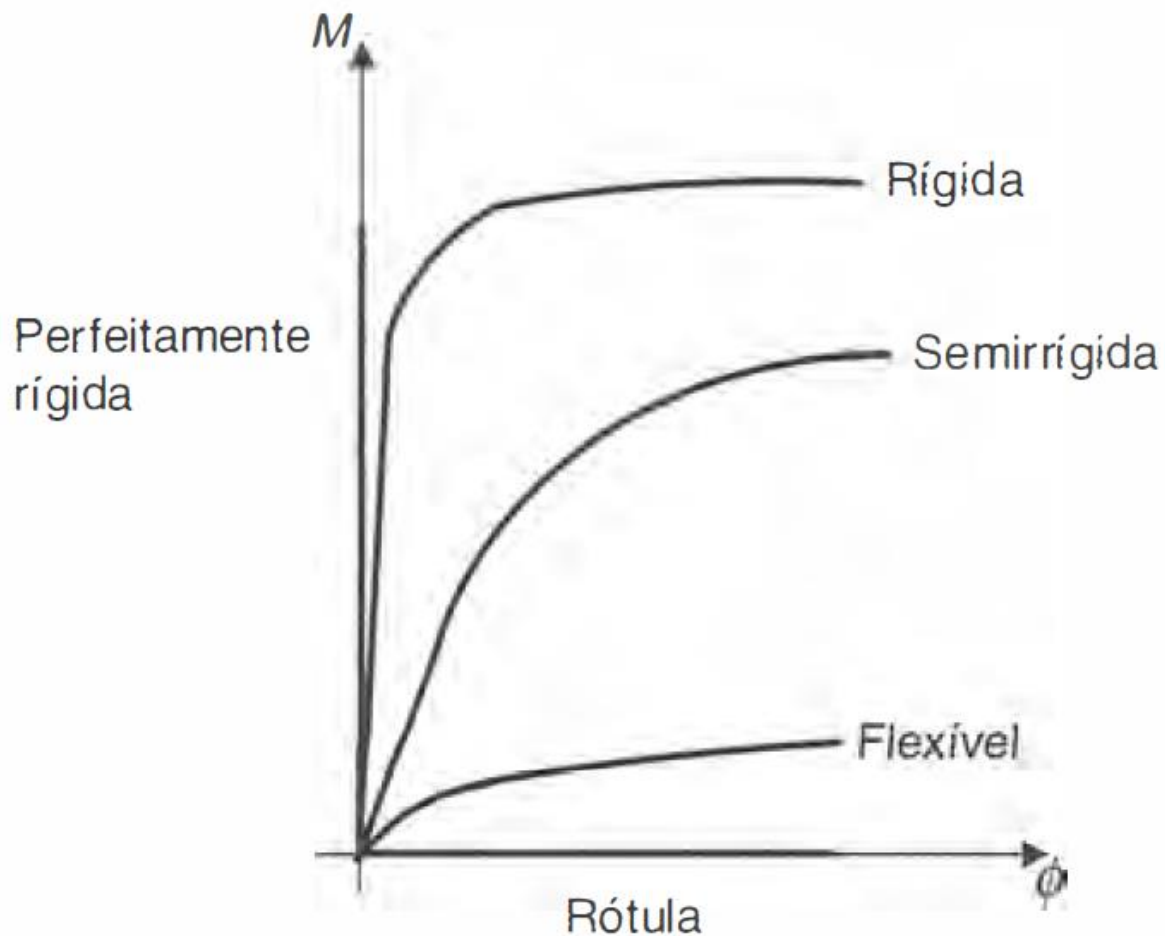


Gráfico 1: Curvas do gráfico momento versus rotação para diversas rigidezes de ligações
Fonte: Walter Pfeil e Michele Pfeil (2008)

Ligações do tipo rígidas são aquelas capazes de manter o ângulo entre as peças ligadas quase nulo, permanecendo desta forma até atingir o momento resistente da ligação. As do tipo flexível possuem a capacidade de transmitir uma pequena parcela de momento fletor, tendo seu comportamento próximo de uma rótula. Ligações do tipo semirrígidas possuem desempenho intermediário aos dois apresentados anteriormente e podem levar a projetos mais econômicos, porém pela dificuldade de se obter sua rigidez ela é raramente usada. Vale destacar que ligações do tipo perfeitamente rígidas ou rotuladas são casos ideais que não ocorrem na prática e correspondem as retas alinhadas à ordenada e a abcissa do gráfico acima (Gráfico 1), respectivamente (PFEIL, W.; PFEIL, M., 2008). No

gráfico momento versus rotação relativa a seguir (Gráfico 2) é apresentado as curvas de vários exemplos de ligações, partindo da mais flexível (cantoneira simples de alma) até a mais rígida (T-STUB) (ANDRADE; VELLASCO, 2016).

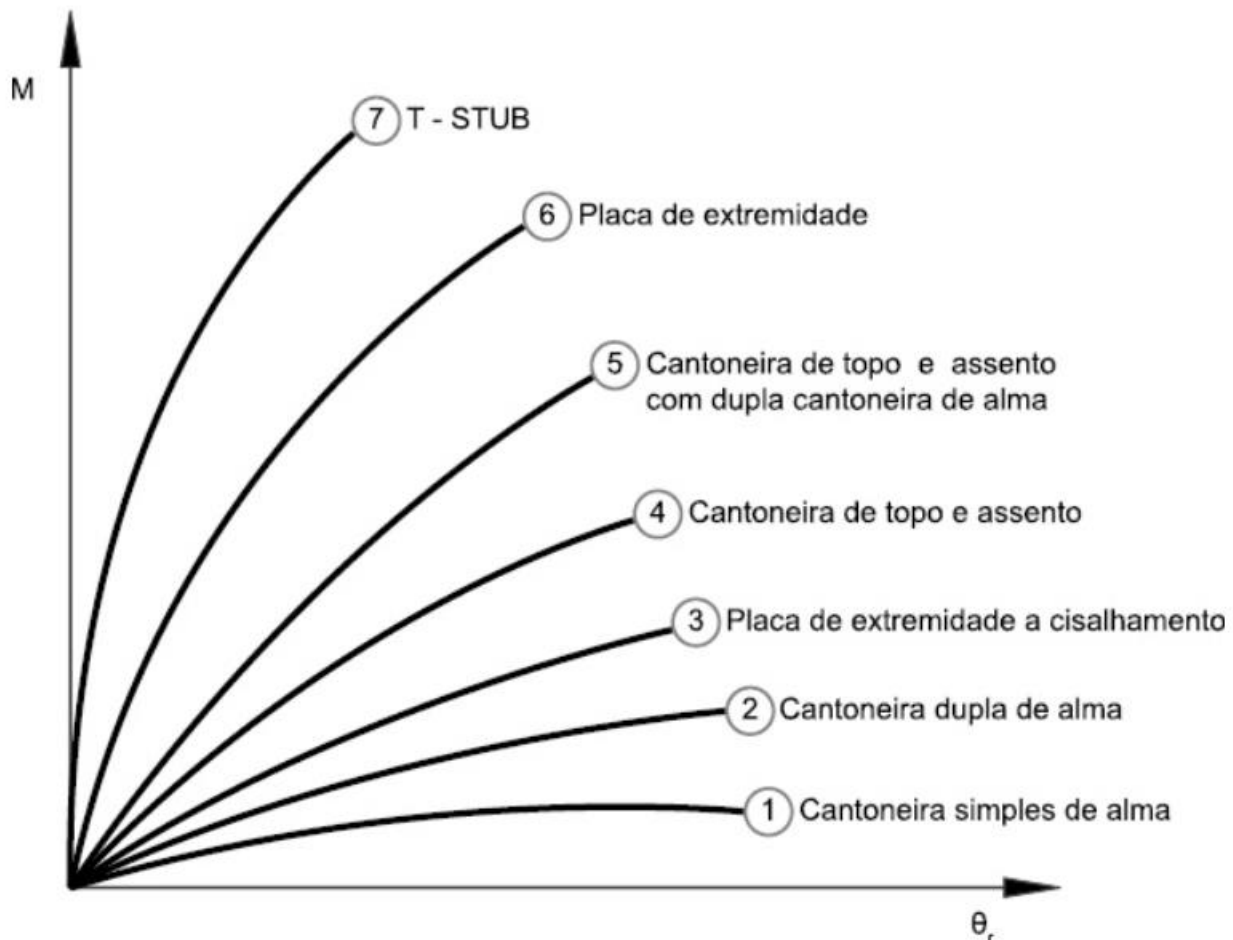
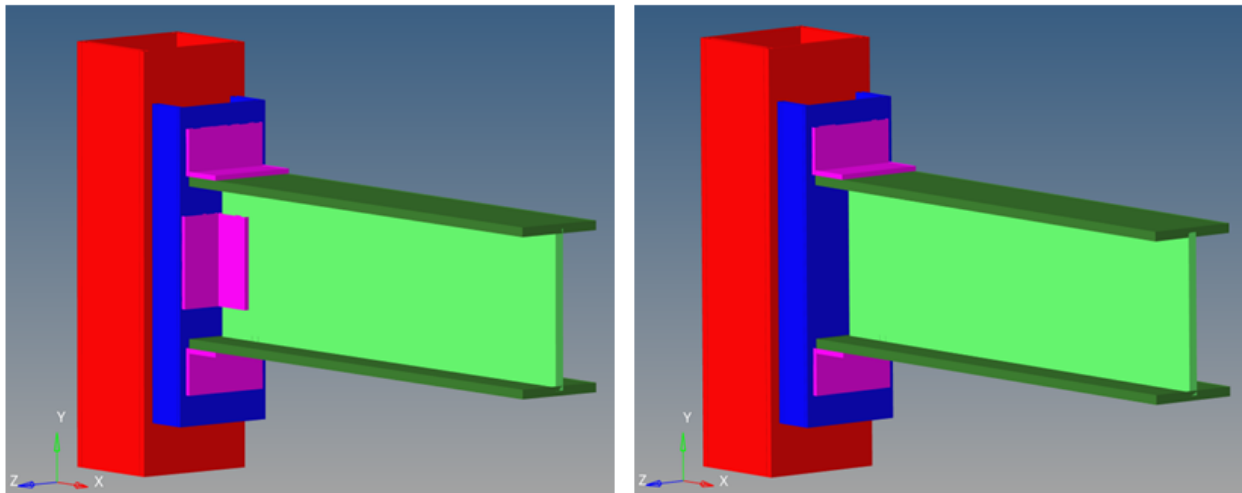


Gráfico 2: Curvas do gráfico momento versus rotação para diversos tipos de ligações
Fonte: Andrade e Vellasco (2016)

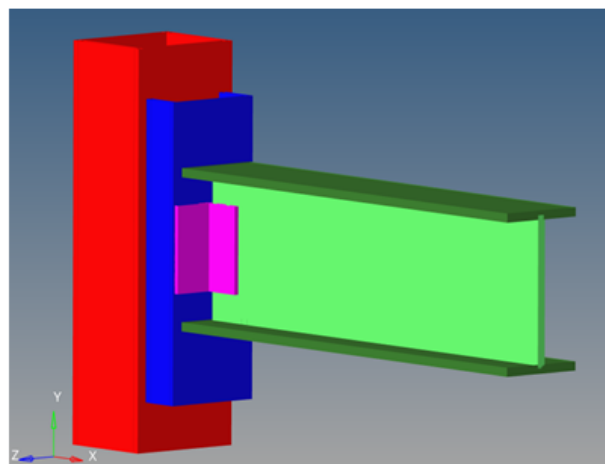
Visto a enorme importância de se ter o conhecimento do comportamento das ligações e ainda o grande desconhecimento sobre ligações realizadas em perfis do tipo tubular, o presente artigo busca fazer análises numéricas do desempenho de ligações do tipo *reverse channel* através de conexões parafusadas com elementos de cantoneira, ligando uma coluna de perfil RHS com uma viga de perfil I, fazendo a utilização do *software HyperWorks* para a avaliação das rigidezes com o uso de um gráfico de momento versus rotação relativa, para então averiguar a possibilidade de incremento deste tipo de ligação na prática.

2 MATERIAIS E MÉTODOS

Para a elaboração da presente pesquisa foram realizadas três análises numéricas com o uso da versão educacional do *software HyperWorks*, elaborado pela empresa *Altair Engineering*. Estas análises foram fundamentadas na representação da ligação do tipo *reverse channel*, utilizando um modelo com cantoneira de topo e assento com dupla cantoneira de alma (Figura 1 (a)), um modelo com cantoneira de topo e assento (Figura 1 (b)) e um modelo com cantoneira dupla de alma (Figura 1 (c)).



(a) Cantoneira de topo e assento com dupla cantoneira de alma (b) Cantoneira de topo e assento



(c) Cantoneira dupla de alma

Figura 1: Ligações do tipo *reverse channel* modeladas no *software*
Fonte: Autor (2021)

Para a confecção dos três tipos de estruturas foram consultados os catálogos das empresas Ferronor e Gerdau (FERRONOR FERRO E AÇO; GERDAU BRASIL), selecionando para a coluna um perfil tubular RHS 120x100x6,79 unido a um perfil U 101,6x40,23. A viga possuía perfil W 152,40x87,50 e fazia a conexão com o perfil em U por cantoneiras L 44,45x44,45x4,76 as quais possuíam cada uma dois parafusos de 16 mm de diâmetro. Não foi estudado o comportamento das soldas nestas estruturas visto que o objetivo era a análise do desempenho das uniões parafusadas.

2.1 MODELAGEM

Primeiramente, para todos os componentes da estrutura foram atribuídas às propriedades mecânicas do aço A36, exceto para os parafusos cujo material utilizado foi o aço A490. A análise foi do tipo não-linear, de forma que o gráfico tensão versus deformação específica seja caracterizado por duas inclinações que representam E (módulo de elasticidade) e E_T (módulo tangencial), caracterizando as fases elástica e plástica, respectivamente, conforme mostra o gráfico abaixo (Gráfico 3), responsável pela definição do cartão não-linear no *software*.

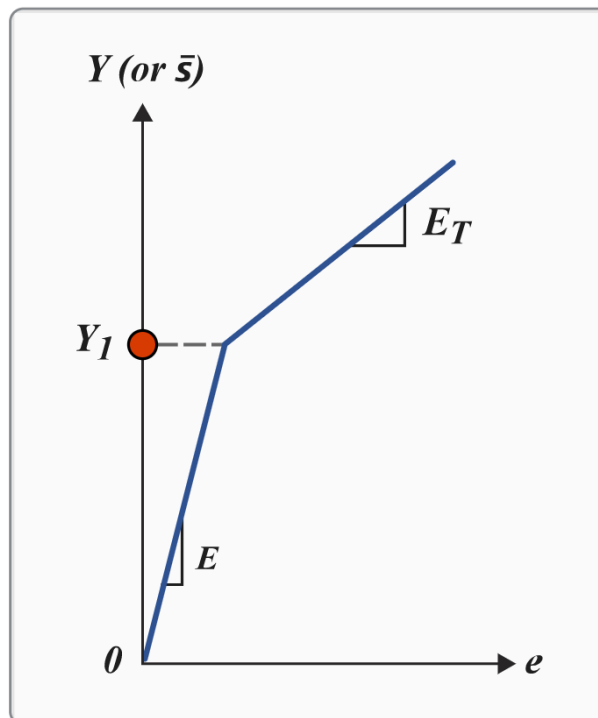


Gráfico 3: Gráfico tensão versus deformação para definição do cartão não-linear no *HyperWorks*
Fonte: Altair University (2021)

Com o valor destes dois parâmetros é possível determinar um terceiro através da equação abaixo (Equação 1), denominado módulo de plasticidade (H), necessário para compor o cartão não-linear MATS1 no *software HyperWorks*.

$$H = \frac{E_T}{1 - \frac{E_T}{E}} \quad (1)$$

Os valores das propriedades utilizadas se encontram na tabela a seguir (Tabela 1), baseadas em Júnior (2002) e ABNT NBR 8800:2008 (Associação Brasileira de Normas Técnicas).

Tabela 1: Propriedades do aço A36 e A490

Propriedade	A36	A490
E (GPa)	207	207
Y_1 (MPa)	250	895
Y_T (MPa)	500	1035
ϵ (%)	23	23
E_T (MPa)	1093	620
H (MPa)	1099	622
ν	0,3	0,3

Fonte: Autor (2021)

Em que Y_1 é a resistência ao escoamento, Y_T é a resistência à ruptura, ϵ é a deformação específica e ν é o coeficiente de Poisson.

Posteriormente foram atribuídas as espessuras de cada componente, especificadas na figura a seguir (Figura 2), e a criação destes.

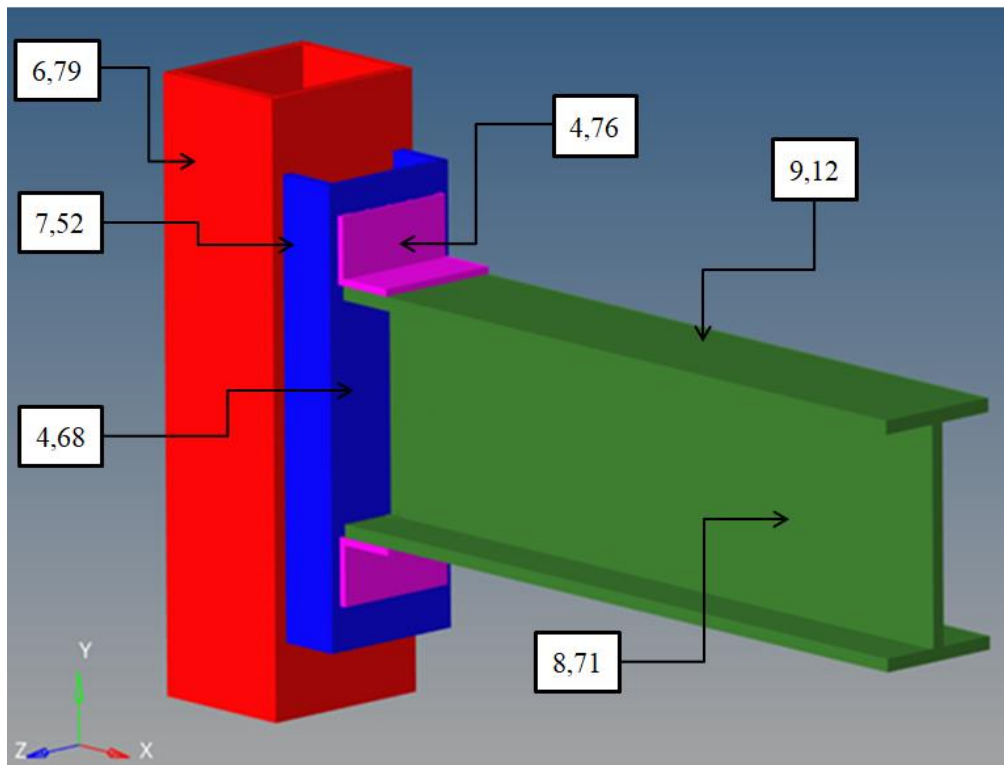


Figura 2: Espessuras dos elementos em milímetros
Fonte: Autor (2021)

Os parafusos utilizados para a modelagem são representados por elementos de barra (CBAR) que fazem a união das cantoneiras com o perfil U e também com a viga. A cabeça do parafuso foi representada por elemento rígido denominado RBE2, cuja localização também foi presente nas extremidades da coluna tubular para o emprego do engastamento (SPC) e na ponta da viga de 0,50 m de comprimento para a aplicação da força concentrada (LOAD). Tal carregamento gera momento na ligação, sendo seu valor caracterizado pelo produto entre a força concentrada pelo comprimento da viga. A representação dos elementos citados se encontra na figura abaixo (Figura 3).

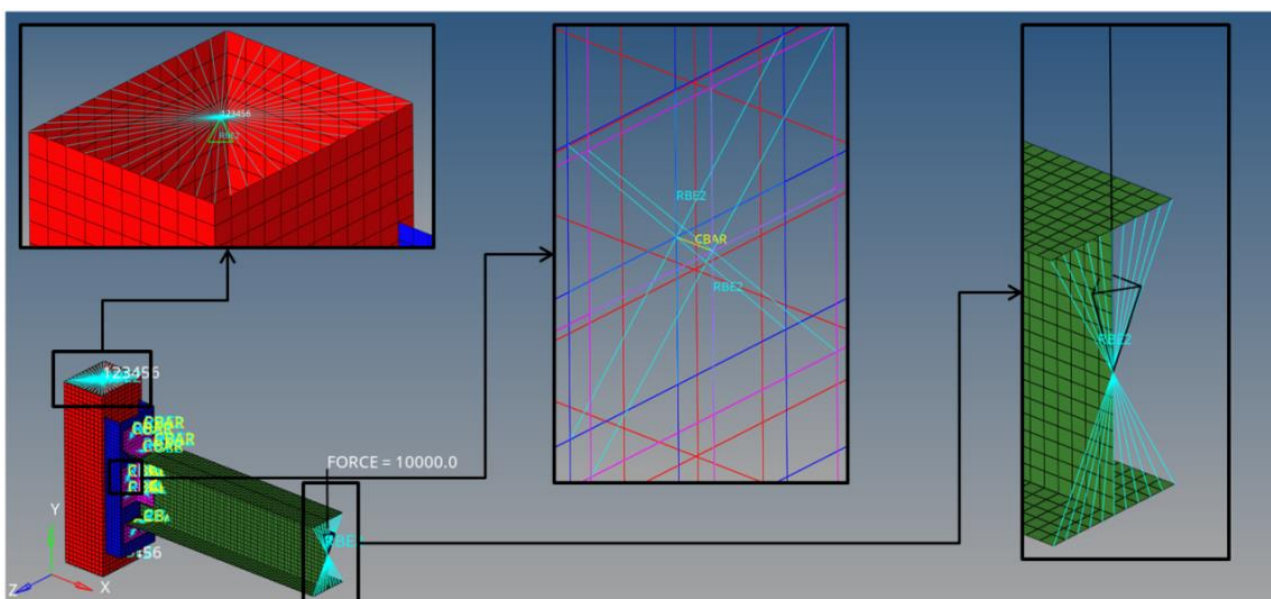


Figura 3: Detalhamento dos elementos rígidos e de barra
Fonte: Autor (2021)

2.2 REALIZAÇÃO DA ANÁLISE

Para gerar o gráfico momento versus rotação das estruturas, aplicaram-se vários subcasos de carregamento na extremidade da viga, sendo que o subcaso seguinte utiliza a matriz de rigidez já atualizada do subcaso anterior, ocasionando diferentes valores de momentos na região da ligação e, conseqüentemente, diferentes valores de deflexão máxima na ponta da viga. Esta deflexão é resultado da rotação na região da ligação somado com a própria deflexão da viga por flexão, conforme mostra a figura a seguir amplificada em 50 vezes para melhor visualização (Figura 4).

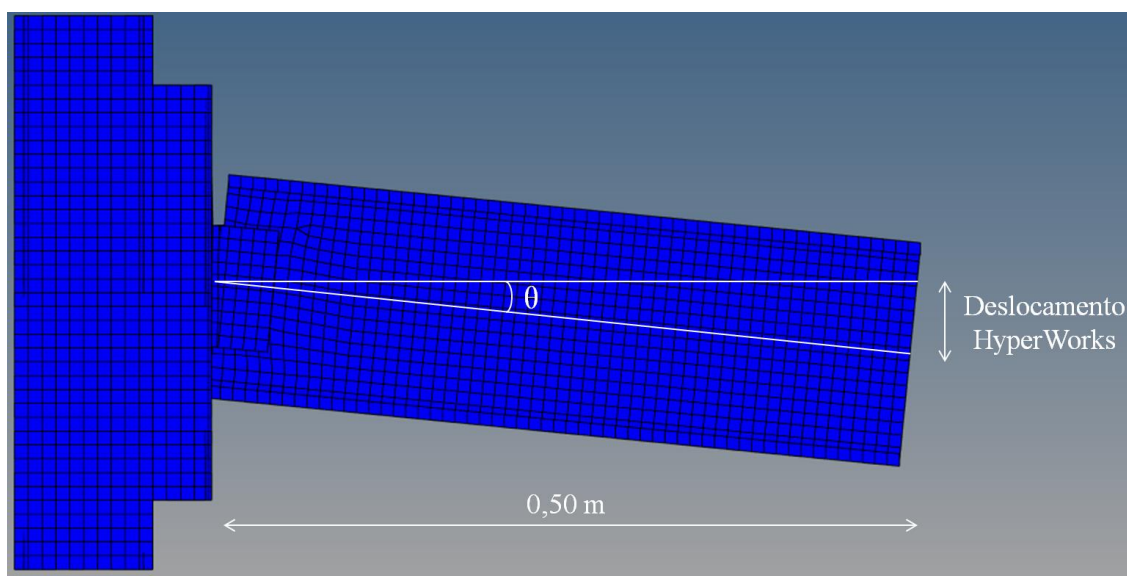


Figura 4: Comportamento da estrutura
Fonte: Autor (2021)

A flecha correspondente a flexão da viga é resultado da equação abaixo (Equação 2), conforme Beer et al. (2015).

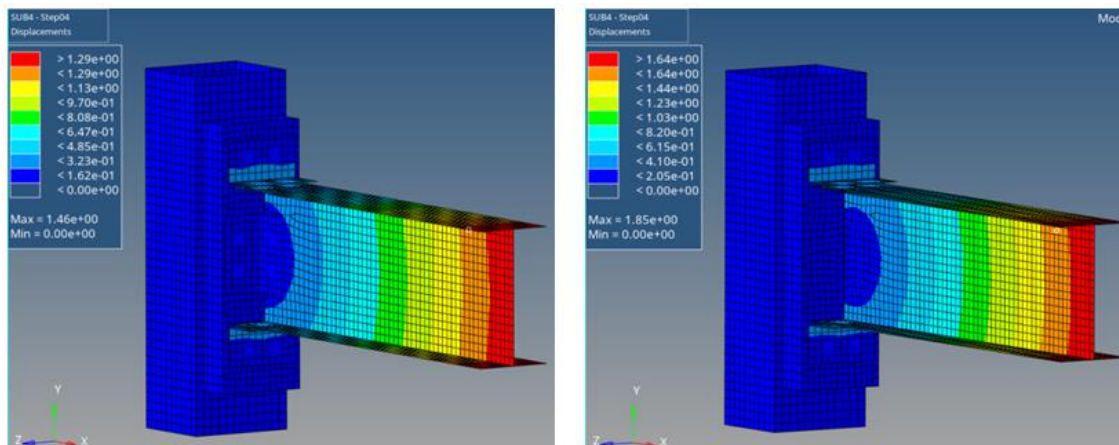
$$y_{m\acute{a}x} = -\frac{P * L^3}{3 * E * I} \quad (2)$$

Em que $y_{m\acute{a}x}$ é a deflexão na ponta da viga, P é a força aplicada na extremidade da viga, L é o comprimento da viga, E é o módulo de elasticidade e I é o momento de inércia da viga com valor de 1003 cm^4 , segundo Gerdaul Brasil.

Portanto, para obter o valor do deslocamento causado pela ligação basta subtrair o resultado obtido pelo *software HyperWorks* pelo valor encontrado com a Equação 2. Com este resultado, faz-se a divisão pelo comprimento da viga de 0,50 m para obter a rotação relativa em radianos. Vale ressaltar que este processo é válido apenas para pequenos deslocamentos que ocasionam pequenas declividades.

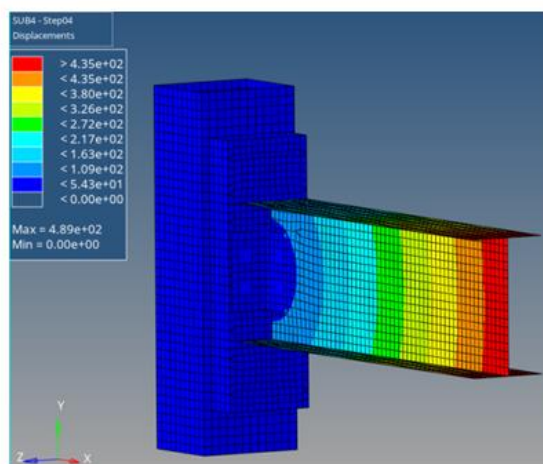
3 RESULTADOS E DISCUSSÕES

Na figura a seguir (Figura 5) é mostrado o comportamento das três estruturas frente à mesma magnitude de carregamento (4 kN) na extremidade da viga. É possível notar tamanha diferença nos valores das deflexões máximas obtidas nos dois primeiros modelos (Figura 5 (a) e (b)) com a do terceiro modelo (Figura 5 (c)).



(a) Cantoneira de topo e assento com dupla cantoneira de alma

(b) Cantoneira de topo e assento



(c) Cantoneira dupla de alma

Figura 5: Comportamento das três estruturas submetidas à mesma magnitude de carregamento (medidas em milímetros)

Fonte: Autor (2021)

No gráfico momento versus rotação relativa a seguir (Gráfico 4) é mostrado as curvas para os três tipos de ligações do tipo *reverse channel* mencionadas na presente pesquisa. As curvas se comportaram de maneira semelhante ao gráfico apresentado por Andrade e Vellasco (2016) (Gráfico 2) onde a ligação com maior rigidez dentre as três é a do tipo cantoneira de topo e assento com dupla cantoneira de alma. Com uma rigidez intermediária a ligação do tipo cantoneira de topo e assento vem logo depois, seguida da cantoneira dupla de alma com a menor rigidez.

Nota-se que já com pouco incremento de carregamento a ligação com cantoneira dupla de alma começa a apresentar sua curva de maneira não-linear realizando muito pouco a transmissão de momento, portando-se com características de ligação flexível. Na ligação *reverse channel* com cantoneira de topo e assento esta transição da fase linear para não-linear se inicia um pouco depois, por volta dos 3 kN.m, onde começa o comportamento não-linear da estrutura e uma redução significativa na transmissão de momento. Na ligação mais rígida, ou seja, cantoneira de topo e assento com dupla cantoneira de alma, a transferência de momento se reduz por volta dos 4 kN.m, onde a curva para de se comportar de forma linear.

Vale ressaltar que as três ligações estudadas do tipo *reverse channel* tiveram muito pouca capacidade de transmissão de momento, visto que com baixos incrementos de carregamento as três curvas tiveram uma redução brusca em suas inclinações.

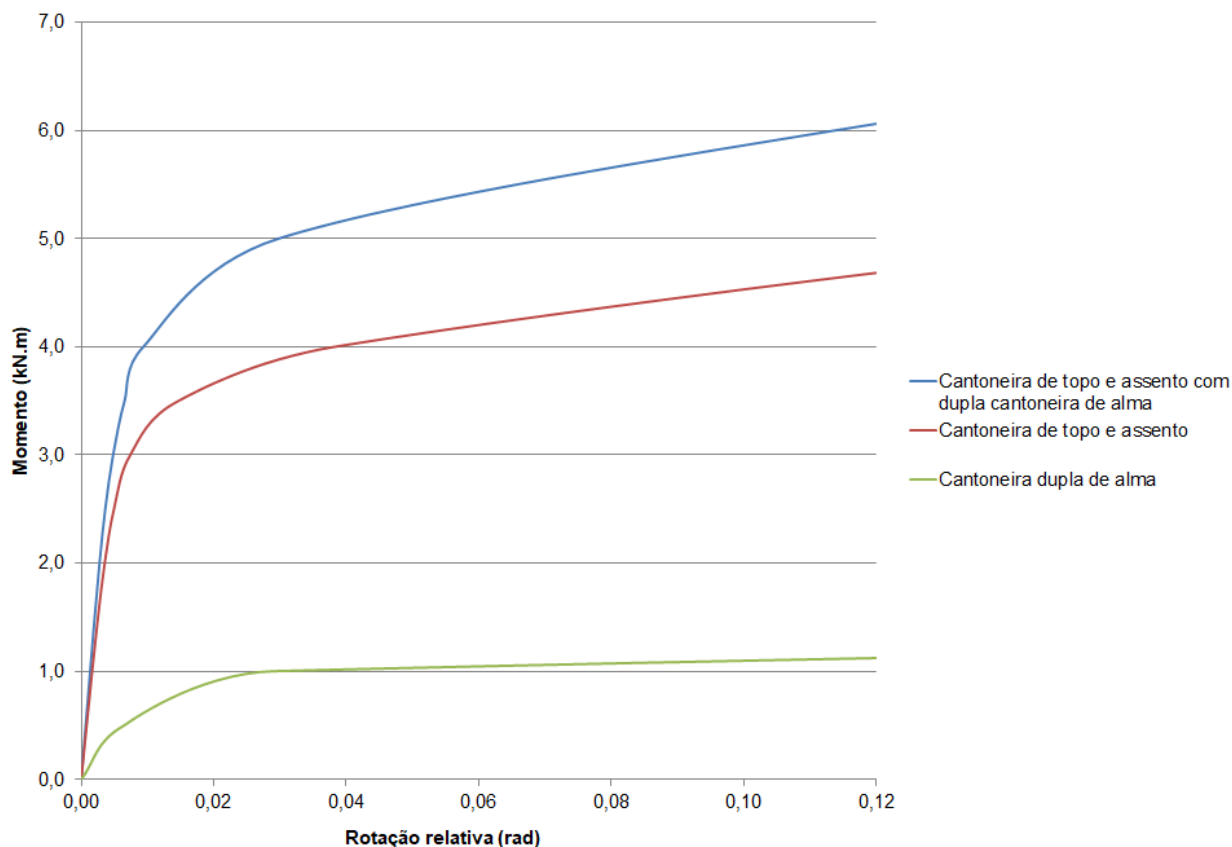


Gráfico 4: Gráfico momento versus rotação dos três tipos de ligação *reverse channel*
Fonte: Autor (2021)

Na figura a seguir (Figura 6) é mostrada a deformação na alma da estrutura do perfil em U aumentada em 10 vezes para melhor visualização do seu desempenho. Tal comportamento certamente influenciou nos resultados gerados pelo *software HyperWorks*, levando à deflexões atribuídas às ligações um pouco maiores que o seu comportamento real.

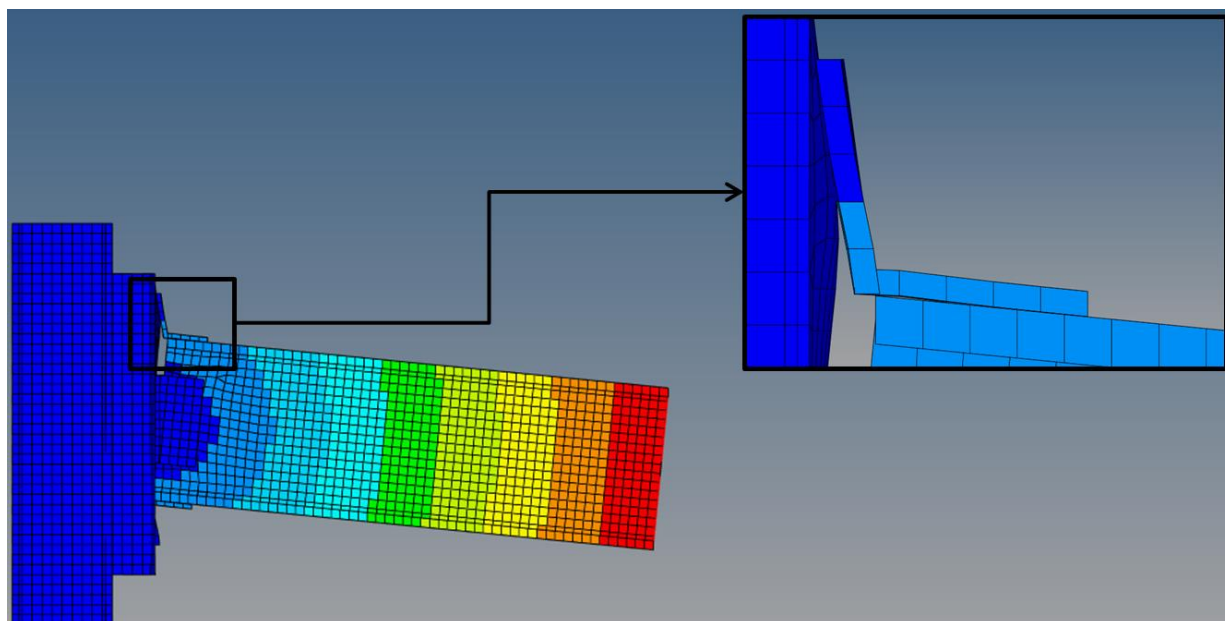


Figura 6: Comportamento do perfil em U
Fonte: Autor (2021)

4 CONCLUSÕES

Este trabalho buscou expor as características de ligações do tipo *reverse channel*, enfatizando o estudo do seu comportamento mecânico de forma numérica perante três modelos de ligações parafusadas por cantoneiras. A pesquisa procurou analisar a rigidez dos modelos para investigar a possibilidade de incremento destas ligações na prática. A partir deste estudo foi possível concluir:

As três análises produziram resultados característicos mais próximos de ligações do tipo flexível do que do tipo rígida, ou seja, em uma análise ideal o correto seria pressupor conexões rotuladas, principalmente para a ligação com dupla cantoneira de alma. Contudo, com as curvas do gráfico momento versus rotação relativa é possível presumir as rigidezes das ligações em projeto, favorecendo a redução de custos por não haver superdimensionamento destes elementos, além de possibilitar a previsão de um comportamento mais próximo da realidade das estruturas conectadas.

Outro ponto que se pôde observar é a deformação do perfil em U o qual influencia nos deslocamentos da estrutura como um todo, chegando à conclusão que a rigidez deste perfil interfere nos valores encontrados de rigidez para as ligações.

Sugere-se que para pesquisas futuras sejam realizadas análises com elementos que possam trazer resultados de ligações do tipo rígidas, como por exemplo, T-STUB e placas de extremidade, com e sem o uso de enrijecedores, para ampliar o conhecimento e a disponibilidade de tipos de ligações *reverse channel*. Outros tópicos que podem ser aprimorados é a realização de análises levando em conta o contato entre os componentes, o desenvolvimento de elementos de solda conectando as estruturas e um estudo voltado para avaliar o tamanho da influência da deformação da alma do perfil em U nos deslocamentos da estrutura. Pressupõe-se então que os resultados alcançados sejam mais precisos, aumentando a confiabilidade no uso de ligações do tipo *reverse channel*.

Em função do exposto, ligações deste tipo demonstram ter um comportamento coerente com o referencial teórico, demonstrando serem viáveis para aplicação em perfis tubulares e possibilitando um potencial aumento do uso destes.

REFERÊNCIAS

ABNT - Associação Brasileira de Normas Técnicas. NBR 8800: **Projeto de estrutura de aço e de estrutura mista de aço e concreto de edifícios**. Rio de Janeiro, 2008.

ALTAIR UNIVERSITY. **Practical Aspects of Structural Optimization**. 2021. Disponível em: <http://www.altairuniversity.com/learning-library> - Acesso em: 5 de julho de 2021.

ANDRADE, S.; VELLASCO, P. **Comportamento e projeto de estruturas de aço**. Rio de Janeiro: Puc Rio, 2016.

BEER, F. P.; JOHNSTON JR, E. R.; DEWOLF, J. T.; MAZUREK, D. F. **Mecânica dos materiais**. 7. ed. Porto Alegre: AMGH, 2015.

CIDECT, W. J.; PACKER, J. A.; ZHAO, X. -L.; van der VEGTE, G. J. **Hollow section in structural applications**. 2010.

FERRONOR FERRO E AÇO. **Tabela - Tubo de Aço Retangular (Tubo de Ferro Retangular)**. Disponível em: <https://www.ferronor.com.br/tubo-aco-retangular>. Acesso em: 2 jul. 2021.

GERDAU BRASIL. **Barras e perfis Gerdau**. Disponível em:
<https://www2.gerdau.com.br/catalogos-e-manuais>. Acesso em: 2 jul. 2021.

GERDAU BRASIL. **Perfil I e U Gerdau**. Disponível em:
<https://www2.gerdau.com.br/catalogos-e-manuais>. Acesso em: 2 jul. 2021.

JÚNIOR, W. D. C. **Ciência e engenharia de materiais**. 5. ed. Rio de Janeiro: LTC, 2002.

MAGALHÃES, L.; REBELO, C.; JORDÃO, S. Avaliação numérica do comportamento de colunas tubulares nas ligações a vigas i com perfis em u invertidos soldados. 2015. *In*: CONGRESSO DE CONSTRUÇÃO METÁLICA E MISTA, 10., Coimbra. **Anais [...]**. Coimbra, 2015.

MÁLAGA-CHUQUITAYPE, C.; ELGHAZOULI, A. Y. Behaviour of combined channel/angle connections to tubular columns under monotonic and cyclic loading. **Engineering Structures**, Londres, v. 32, p. 1600-1616, 2010.

NUNES, T. C. **Análise de ligações metálicas soldadas entre pilar de seção RHS e viga de seção I**. 2012. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) - Universidade Federal de Ouro Preto, Ouro Preto, 2012.

PFEIL, W.; PFEIL, M. **Estruturas de aço**: dimensionamento prático. Rio de Janeiro: LTC, 2008.

REIS, A. M. M. **Comportamento de ligações entre vigas e pilares de seção tubular em situação de incêndio**. 2015. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) - Universidade de Coimbra, Coimbra, 2015.