

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

Cassiano Antonio Gasparini de Barros<sup>1</sup>, Germano Francisco Simon Romera<sup>2</sup>

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

<sup>2</sup>Professor, 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.

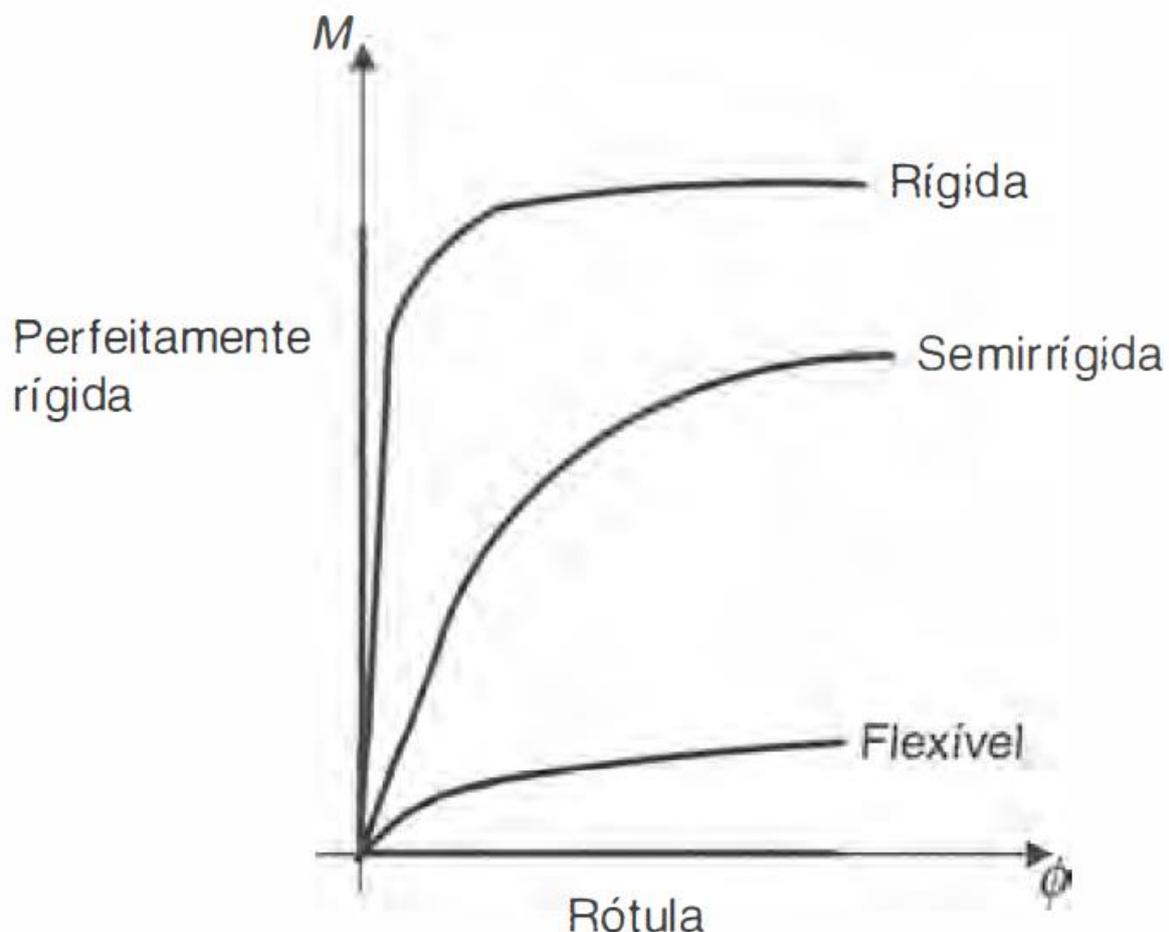
Em razão disso, surgiu um tipo de ligação capaz de potencializar o uso de sistemas que envolvem colunas do tipo tubular com vigas abertas, denominado *reverse channel*. Conforme Málaga-Chuquitaype e Elghazouli (2010), ele consiste no uso de um perfil em U invertido soldado na coluna tubular, de modo 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).

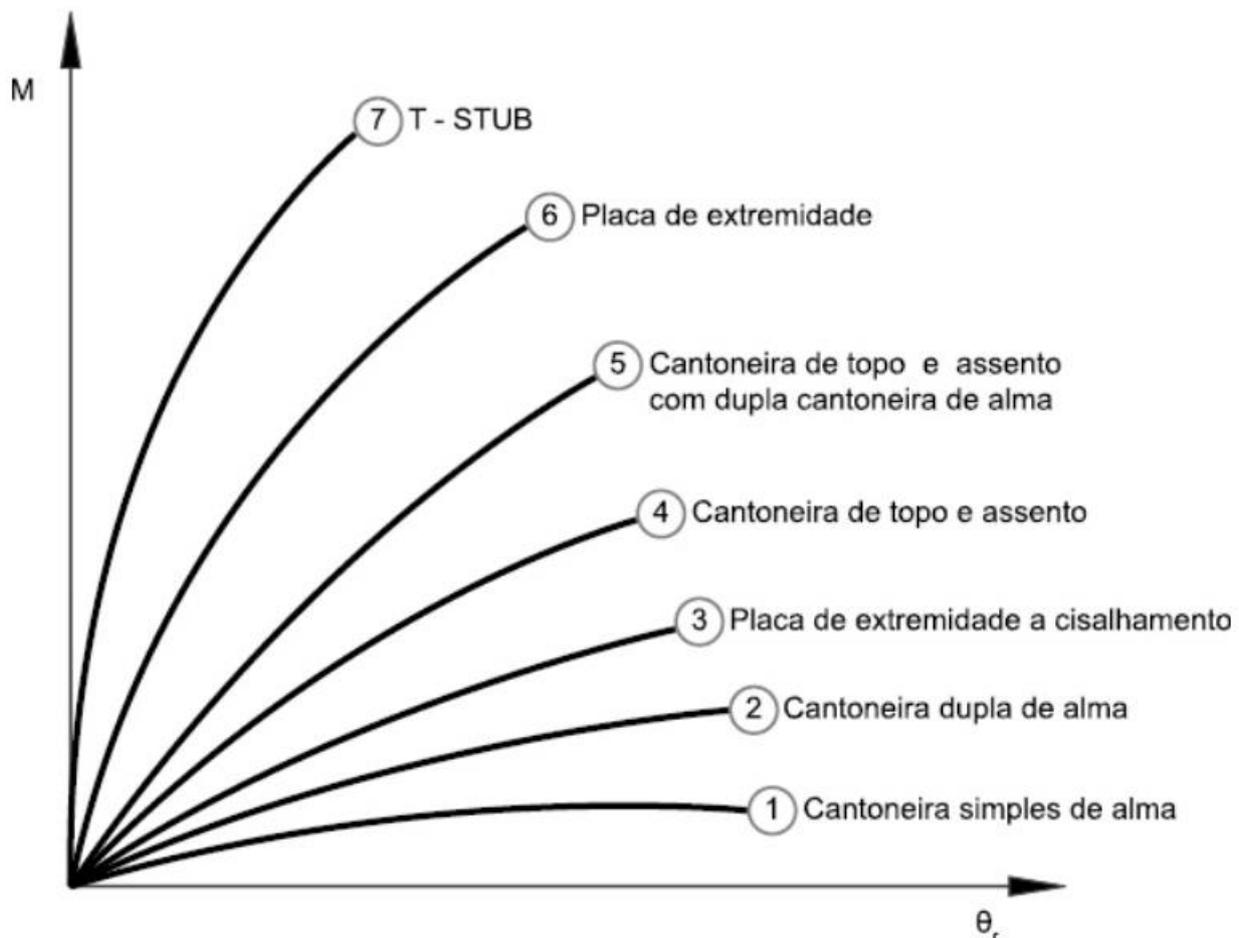
De acordo com Walter Pfeil e Michele Pfeil (2008), é comum fazer a consideração das ligações como sendo perfeitamente rígidas ou rotuladas, ainda podendo pressupor uma rigidez intermediária entre as duas. Tal rigidez pode ser analisada pela curva de comportamento não-linear do gráfico momento versus 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).

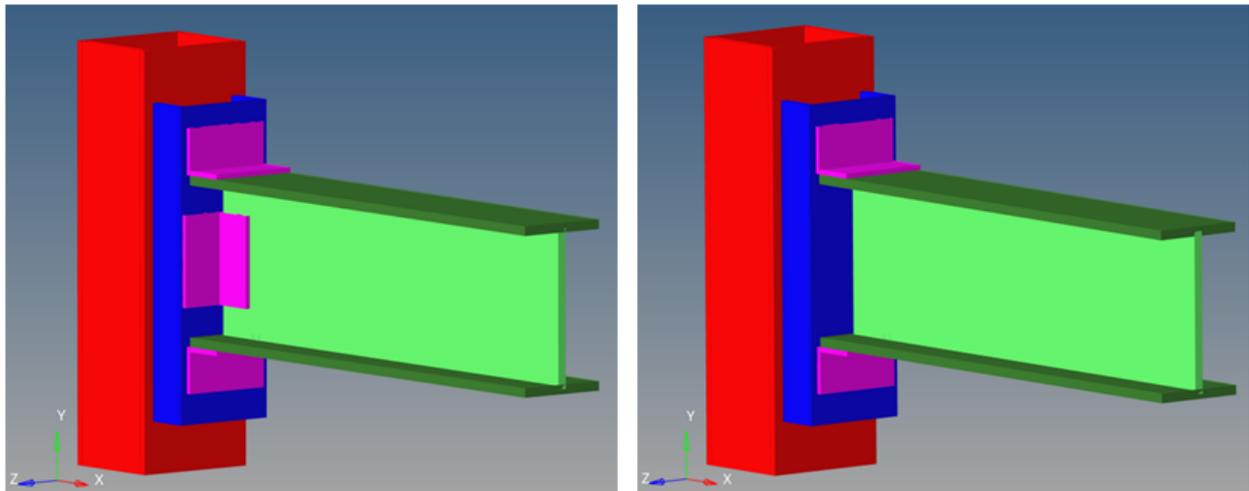


**Gráfico 2:** Curvas do gráfico momento versus rotação para diversos tipos de ligações  
**Fonte:** Andrade e Vellasco (2016)

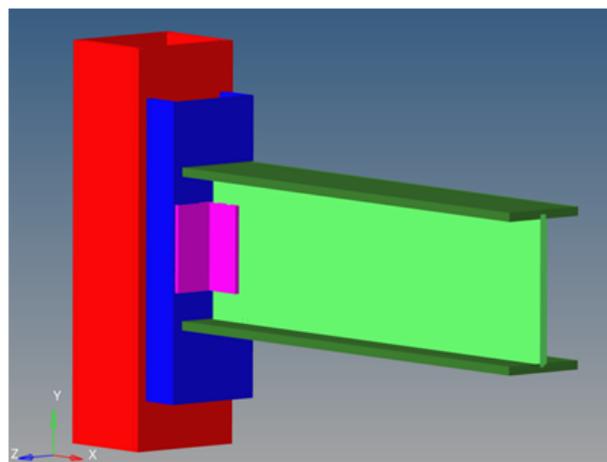
Visto a enorme importância de se ter o conhecimento do comportamento das ligações e ainda o grande desconhecimento sobre ligações realizadas em perfis do tipo tubular, o presente artigo busca fazer análises numéricas do desempenho de ligações do tipo *reverse channel* através de conexões parafusadas 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



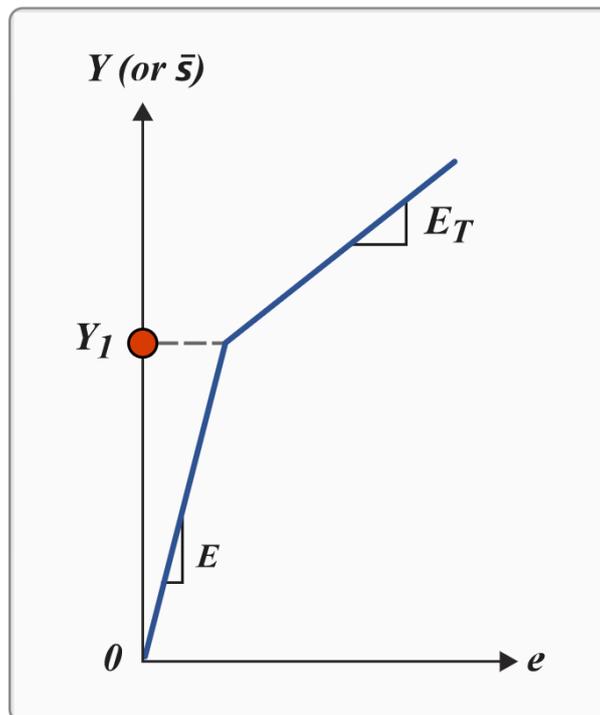
(c) Cantoneira dupla de alma

**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).

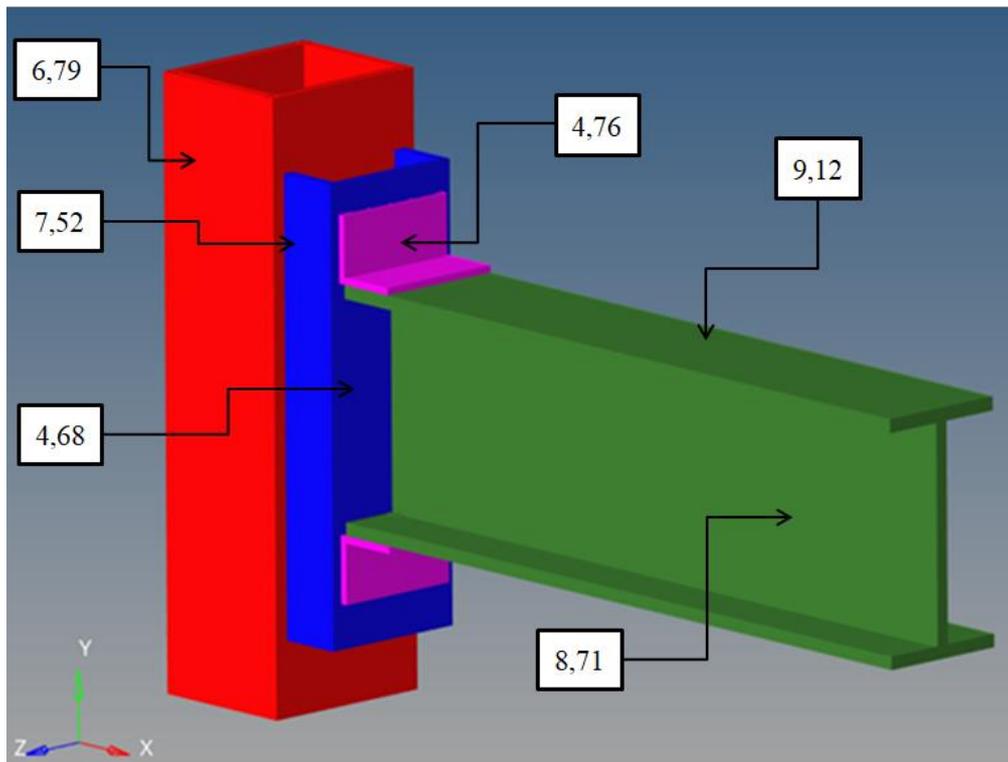
**Tabela 1:** Propriedades do aço A36 e A490

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

**Fonte:** Autor (2021)

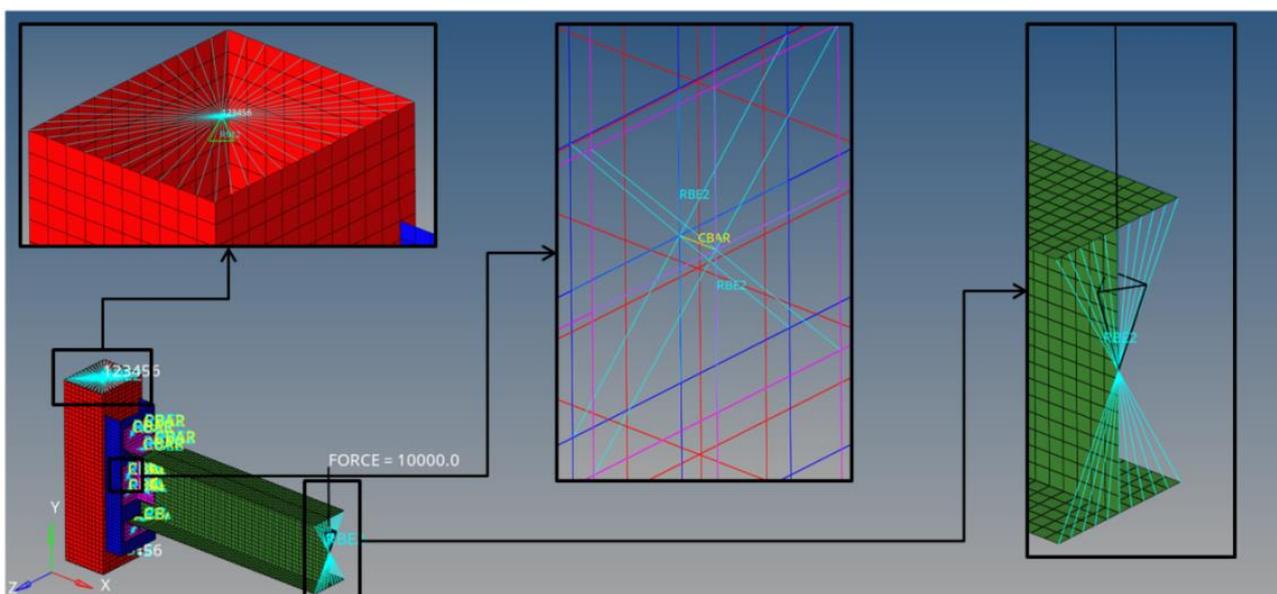
Em que  $Y_1$  é a resistência ao escoamento,  $Y_T$  é a resistência à ruptura,  $\epsilon$  é a deformação específica e  $\nu$  é o coeficiente de Poisson.

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)

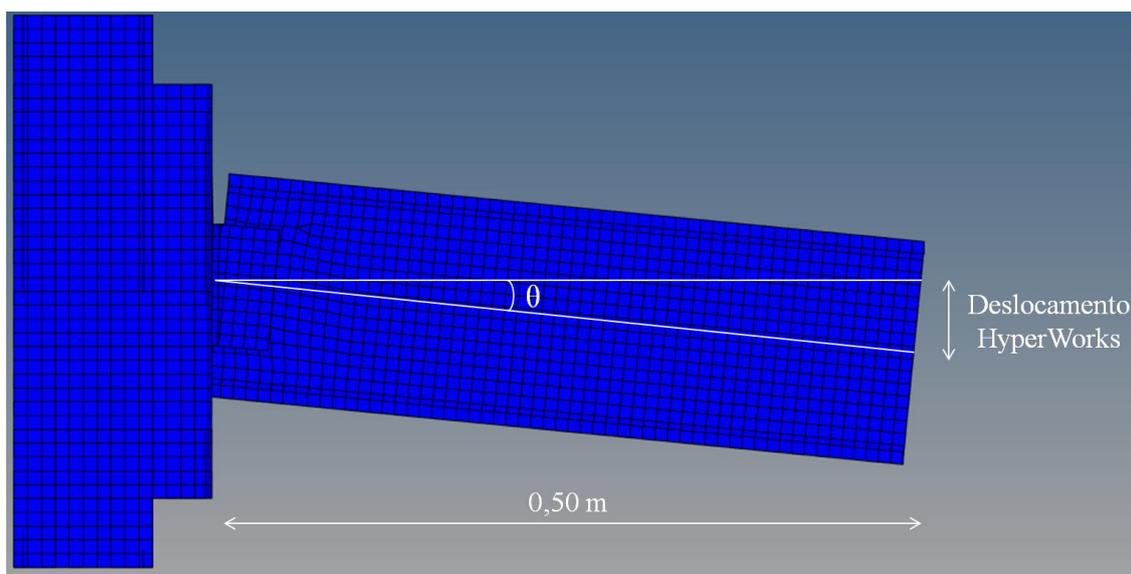
Os parafusos utilizados para a modelagem são representados por elementos de barra (CBAR) que fazem a união das cantoneiras com o perfil U e também com a viga. A cabeça do parafuso foi representada por elemento rígido denominado RBE2, cuja localização também foi presente nas extremidades da coluna tubular 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).

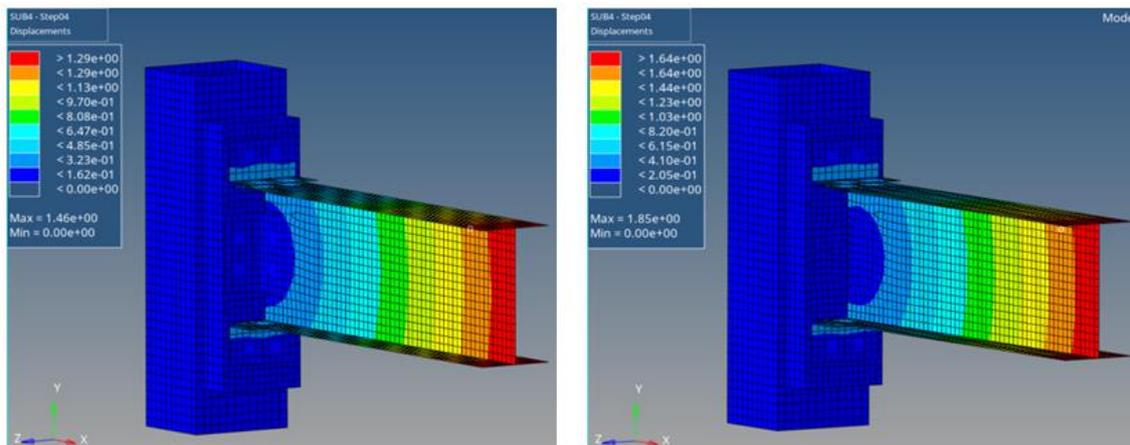
$$y_{m\acute{a}x} = -\frac{P * L^3}{3 * E * I} \quad (2)$$

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  $1003 \text{ cm}^4$ , 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.

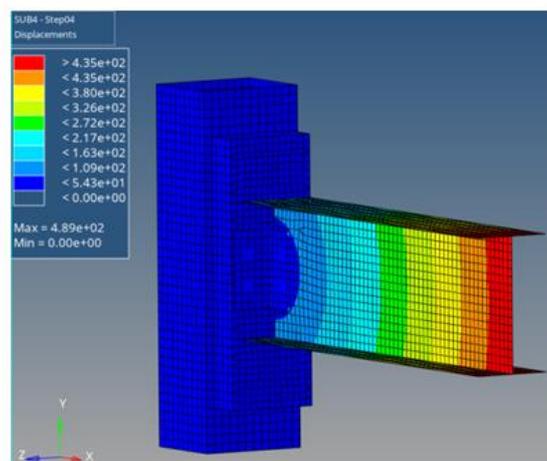
## 3 RESULTADOS E DISCUSSÕES

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

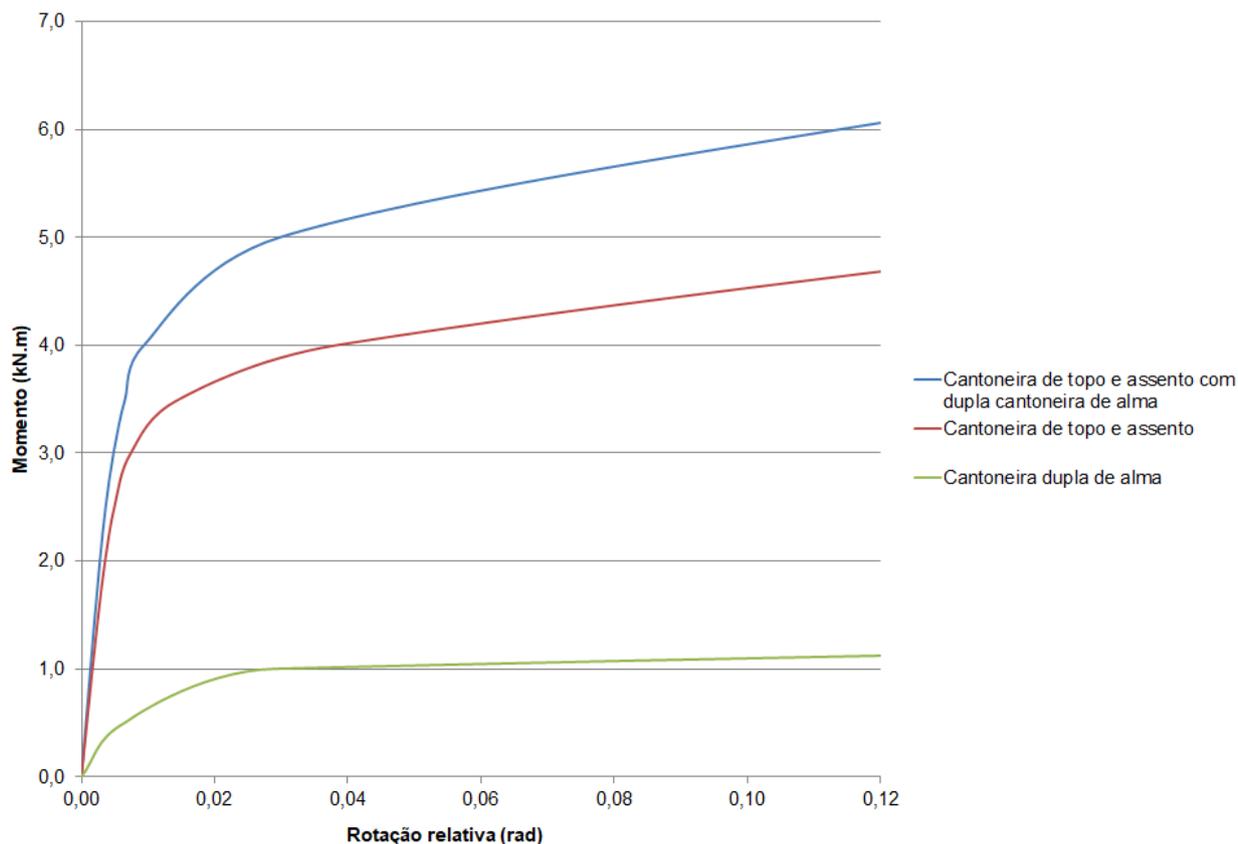
**Figura 5:** Comportamento das três estruturas submetidas à mesma magnitude de carregamento (medidas em milímetros)

**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.

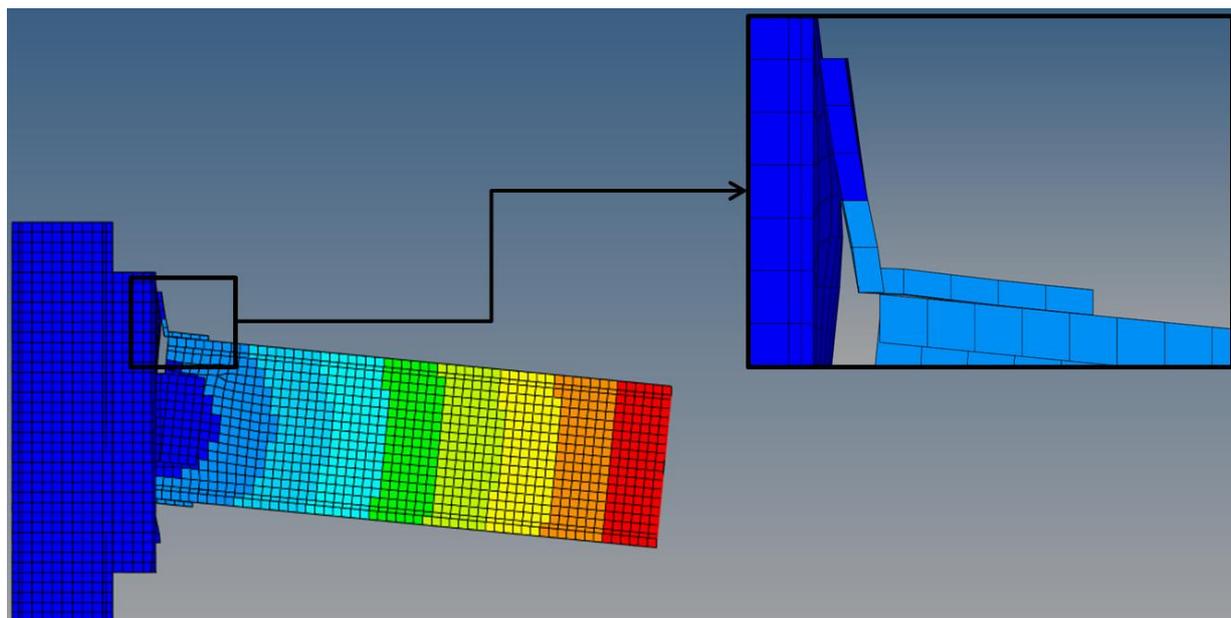
Nota-se que já com pouco incremento de carregamento a ligação com cantoneira dupla de alma começa a apresentar sua curva de maneira não-linear realizando muito pouco a transmissão de momento, portando-se com características de ligação flexível. Na ligação *reverse channel* com cantoneira de topo e assento 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 *softawre 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.