

MODELAGEM COMPUTACIONAL DE PERFIL METÁLICO TIPO U ENRIJECIDO VIA MEF (Método dos Elementos Finitos)

Simone Pimentel Ribeiro¹, Tauana de Oliveira Batista².

¹Graduanda em Engenharia Civil, Faculdade de Ciências Gerenciais de Manhuaçu,
siimonepimentel@hotmail.com

²Mestre em Engenharia Civil com ênfase em Estruturas e Materiais, Faculdade de Ciências
Gerenciais de Manhuaçu, tauana@sempre.facig.edu.br

Resumo-As estruturas metálicas apresentam algumas vantagens em comparação com outros materiais tradicionais, como: elevada resistência do aço; redução dos desperdícios na construção; facilidade de transporte e manuseio, além de ter um peso reduzido. Os Perfis metálicos Formados à Frio de paredes finas são amplamente empregados no mercado de construção civil. Nunes (2016) e Silva (2017) realizaram um estudo numérico computacional do comportamento estrutural de colunas de aço bi-apoiadas com seção transversal tipo U enrijecido, sujeitas à compressão axial, os quais apresentaram e discutiram os resultados das análises numéricas de flambagem distorcional obtidas através do programa *GBTul 2.0* (BEBIANO et. Al 2010a, b) ao variar as dimensões b_w (dimensão da alma) em relação a b_f (dimensão da mesa). Este trabalho realizou com sucesso a modelagem da geometria destes perfis, previamente analisados, utilizando o software de simulações de engenharia *Ansys (Student version 19.1, 2018)*, mostrando a viabilidade do programa para modelagem computacional de estruturas metálicas.

Palavras-chave: Modelagem Computacional; Estruturas Metálicas; U Enrijecido; MEF.

Área do Conhecimento: Engenharias.

1 INTRODUÇÃO

O aço possui características que o destaca perante outros materiais utilizados na construção civil, dentre elas as mais significativas são: alta resistência, suportando a diversos esforços de solicitação; leveza, gerando economia nas fundações; segurança, por se tratar de um material fabricado na indústria que passa por diversas verificações para controle de qualidade antes de ser comercializado; facilidade na montagem, desmontagem e reaproveitamento; rapidez e limpeza na execução; entre outras vantagens.

As peças metálicas estruturais podem ser produzidas em usinas siderúrgicas ou metalúrgicas em forma de chapas, barras, cabos, cordoalhas, fios trefilados, perfis laminados ou soldados.

Os perfis de parede fina possuem uma maior relação largura/espessura, ou seja, são muito esbeltos, esta característica torna-os propensos ao fenômeno de flambagem, por isto é necessário realizar uma análise minuciosa da estabilidade estrutural dos mesmos. Neste contexto surgem os programas que realizam análises estruturais através da modelagem computacional. O presente trabalho realiza uma continuidade do estudo numérico computacional de Nunes (2016) e Silva (2017), para tal será utilizado o programa *Ansys (Student version 19.1, 2018)* que trabalha com o Método dos Elementos Finitos (MEF), os perfis são do tipo U enrijecido formados por chapas dobradas, os quais possuem as mesmas propriedades geométricas e mecânicas dos trabalhos citados acima. A partir dos resultados obtidos pelos autores mencionados realiza-se a modelagem computacional da geometria destes perfis.

2 REFERENCIAL TEÓRICO

2.1. Perfis Formados a Frio (PFF)

Segundo Kimura (2014) os Perfis metálicos Formados à Frio (PFF) de paredes finas começaram a serem utilizados experimentalmente nos Estados Unidos e Grã-Bretanha por volta de

1850, porém somente em 1939 iniciaram os estudos sobre o desempenho estrutural destes perfis na Universidade de Cornell (EUA) por George Winter com patrocínio da AISI Committee on Building Research and Technology, com o objetivo de obter informações para formulação de normas técnicas específicas.

No Brasil, de acordo com Chodraui (2006), o início do estudo do comportamento de tais perfis se deve à falta de perfis laminados, e também à forte demanda de PFF's devido às suas vantagens, tais como; a redução do tempo de produção e execução, maior disponibilidade do produto, além de serem muito úteis para formar estruturas de galpões (Figura 1), andaimes, escoramentos, residências (Figura 2) e até mesmo edifícios de pequeno e médio porte.

Figura 1– Galpão para alocação de maquinário agrícola feito com Perfil Formado a Frio (PFF) tipo U enrijecido.



Fonte: Autora, 2018.

Figura 2 – Estrutura *steel frame* de uma residência.

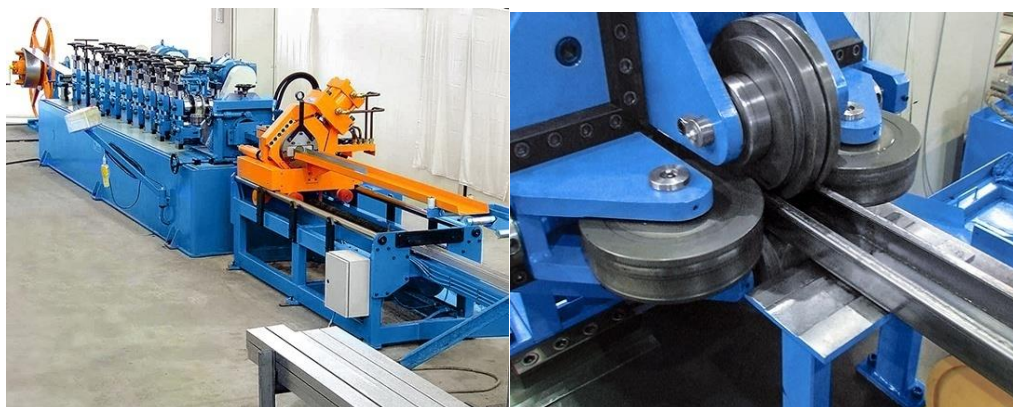


Fonte: Saletto, 2018.

Os perfis formados a frio são cada vez mais utilizados nas construções, pois atendem às solicitações de resistência, economia, estética, e também são versáteis quanto à geometria (SILVA, 2017).

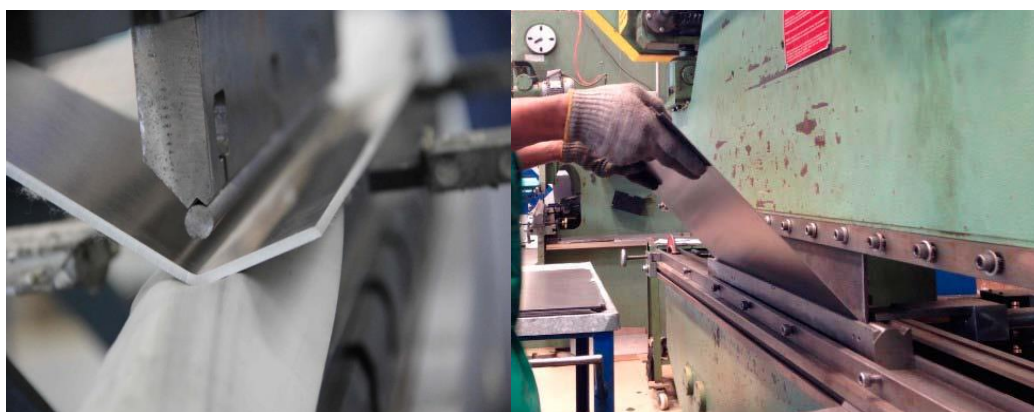
O processo de fabricação de perfis formados a frio se dá através de chapas perfiladas ou dobradas em temperatura ambiente, através de processo contínuo ou descontínuo, respectivamente. No primeiro caso, desloca-se uma chapa de aço por roletes de perfilação (Figura 3), ao sair da máquina o perfil é cortado no tamanho desejado, trata-se de uma fabricação de maiores quantidades e comprimentos, e é utilizado por fábricas especializadas nestes perfis. No segundo caso usam-se dobradeiras (Figura 4) para dar forma aos perfis, sua extensão dependerá do tamanho da máquina. É uma produção menor em relação ao tamanho e número, sendo produzida por fabricantes de estruturas metálicas.

Figura 3 – Máquina de perfilação de perfis estruturais.



Fonte: Zikeli, 2018

Figura 4–Detalhes do dobramento de chapas de aço.



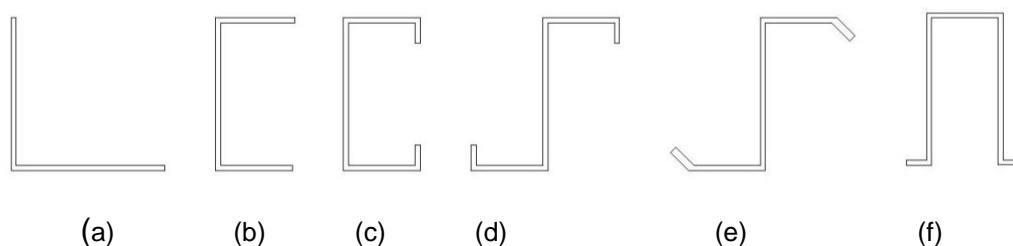
Fonte: Camacam, 2018

Na perfilação a produção é única para cada tipo de perfil, usando de uma máquina mais sofisticada que necessita de cuidados ao utilizá-la, porém de pouca mão-de-obra. Entretanto nas dobradeiras tem-se a flexibilidade de produzir peças de várias formas usando de poucas ferramentas, um equipamento de fácil manuseio e baixo custo.

Quanto às tensões residuais, na perfilação estas são melhores distribuídas ao longo da peça se comparada ao dobramento das chapas, no qual ficam concentradas nos cantos.

A Associação Brasileira de Normas Técnicas (ABNT) elaborou a norma que padroniza os Perfis Estruturais de Aço Formados a Frio, a NBR 6355:2012. Nesta consta requisitos do processo de fabricação, como a identificação, acondicionamento e inspeção, além de designar as geometrias comerciais como mostra a figura 5.

Figura 5 – Geometria de perfis estruturais formados a frio: (a) cantoneira de abas iguais, (b) U simples, (c) U enrijecido, (d) Z enrijecido a 90°, (e) Z enrijecido a 45° e (f) cartola.



Fonte: Autora, 2018.

A norma que orienta quanto ao dimensionamento, à temperatura ambientes, de perfis estruturais de aço formados a frio é a NBR 14762:2010, levando em consideração critérios como segurança, resistência, estabilidade, entre outros, porém, como mostrado, a possibilidade de criação de novas geometrias, modificando e acrescentando enrijecedores e as infinitas possibilidades de dobra,

fazem com que as normas sempre sejam revistas e ampliam o emprego da modelagem computacional para avaliar o comportamento de novas estruturas.

2.2. Método dos Elementos Finitos – MEF

O MEF trata-se de uma análise numérica computacional, que permite resolver um problema subdividindo-o em menores partes, analisando-o mais detalhadamente.

Esta pesquisa se baseia neste método, utilizando para isso o programa comercial *Ansys (Student version 19.1, 2018)*. Conforme informações da parceira oficial do *Ansys* na América Latina e Ibéria, Esss (2018), este programa usa de simulações para desenvolver produtos e processos utilizados em todos os campos da engenharia. Fundada em 1970, a companhia tem atuação mundial com mais de 90 parcerias, e é líder global em simulações envolvendo análise estrutural, fluidodinâmica, eletromagnética e multifísica. É utilizado por diversas empresas, universidades e centros de pesquisas por ajudar no desenvolvimento de conceitos e produtos. Produz resultados rápidos e com elevada precisão, modelando materiais complexos e de comportamento não-linear. O site oficial do *Ansys (2018)* explica sobre suas diversas interfaces, a *Mechanical* possui aplicativos que facilitam na preparação da geometria, possibilita desenvolver rapidamente uma malha ideal para modelar materiais, como ligas hiperelásticas, concreto, solos, estruturas plásticas ou metálicas, ou até mesmo definir novo tipo. Conta também com algoritmos automáticos que permitem ajuste, quando necessário.

Um perfil é uma peça que possui um número infinito de variáveis, o MEF permite a substituição destes por elementos que apresentem comportamento definido. A divisão da geometria da peça pode ser de diversas formas, em pequenos triângulos ou quadrados, de acordo com cada problema a ser resolvido. O perfil passa então, a ter dimensões finitas, os elementos finitos. Estes são conectados entre si por nós (ou pontos nodais). E o conjunto (elementos e nós) forma a malha.

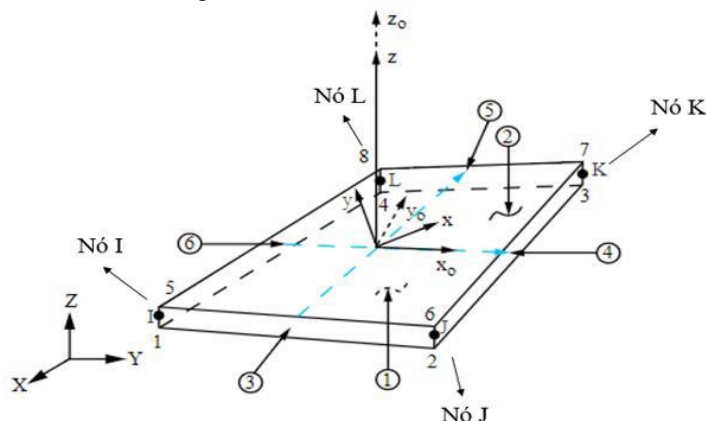
Subdividir o perfil em pequenos elementos permite que o programa desenvolva os resultados das equações matemáticas que regem seu comportamento físico em uma análise bem próxima da exata. A precisão dos resultados depende do tamanho da malha e do tipo dos elementos, ou seja, quanto menor o tamanho do elemento, maior o número deles e a quantidade de nós, assim melhor será a análise total da peça.

3. METODOLOGIA

Foi realizada uma modelagem computacional da geometria de colunas metálicas bi-apoiadas com seção transversal tipo U enrijecido. Utiliza-se o Método dos Elementos Finitos (MEF) através do programa *Ansys (Student version 19.1, 2018)*, tendo como base os perfis analisados previamente para flambagem distorcional, presentes nos artigos acadêmicos de Nunes (2016) e Silva (2017), que selecionaram as geometrias através do programa *GBTul 2.0* (BEBIANO et. Al 2010 a, b).

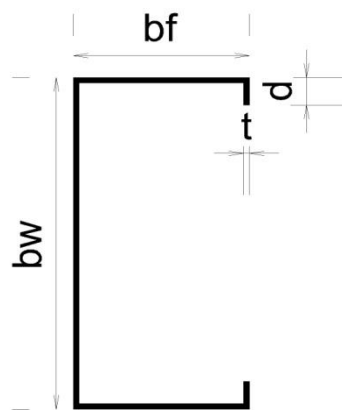
Nesta pesquisa, os perfis foram divididos em malhas, de acordo com MEF, e cada elemento será definido como *SHELL 181*, ou seja, possuindo quatro nós com seis graus de liberdade cada um: três translações (em torno dos eixos x, y e z) e três rotações (em torno dos eixos x, y e z), como mostra a figura 6 abaixo.

Figura 6 – Elemento *SHELL 181*.



Fonte: Matsubara (2018).

Figura 7 – Seção transversal do perfil tipo U enrijecido.



Fonte: Autora, 2018.

O perfil analisado é U enrijecido, ver figura 7, em que b_w representa a dimensão da alma, b_f a dimensão da mesa e d a dimensão do enrijecedor do perfil.

3.RESULTADOS E DISCUSSÃO

Nunes (2016) realizou uma análise numérica computacional da flambagem distorcional e resistência última de perfis metálicos tipo U enrijecido, sujeitos a compressão axial. Utilizando o programa *GBTul 2.0* inseriu 12 geometrias diferentes, ou seja, variando as dimensões da alma (b_w) e da mesa (b_f). Considerando o Módulo de Elasticidade (E) igual a 210 GPa, o Módulo de Young igual a 205 GPa e o Coeficiente de Poisson (ν) igual 0,3, sendo uma peça simplesmente apoiada nas extremidades, ou seja, permitindo deslocamentos, empenamentos e rotações locais/globais. Tais colunas apresentaram modo de flambagem “puramente” distorcional, em que este é dominante perante aos demais modos de deformação.

Em sua pesquisa, Nunes (2016) chegou às conclusões:

- (i) Conforme aumenta a dimensão da alma (b_w) a carga crítica ($P_{Cr,D}$) diminui, dentro de cada grupo;
- (ii) O perfil que apresentou maior carga crítica ($P_{Cr,D}$), grupo G3 linha 12, possui relação b_w / b_f igual a 1;
- (iii) A carga última cresce de acordo com o aumento de b_w .

Dando continuidade nesta pesquisa, Silva (2017) verificou a estabilidade estrutural de perfis metálicos de paredes finas tipo U enrijecido, utilizando o mesmo programa. No estudo numérico comportamental, foram analisadas colunas bi-apoiadas submetidas à compressão axial, em modo de deformação distorcional, variando b_w em relação a b_f . Com perfis nas mesmas condições citadas anteriormente no trabalho de Nunes (2016).

Conclusões:

- (i) Quando b_w é menor que b_f a mesa tende à rotacionar, apresentando deslocamentos na junção alma/mesa pelo efeito de flexão.
- (ii) Nos perfis em que b_w é maior que b_f observou-se maior flexão no plano de simetria;
- (iii) A coluna com maior carga crítica ($P_{Cr,D}$), também apresenta relação b_w / b_f igual a 1, grupo G3 linha 12, onde há valor maior da espessura e comprimento do enrijecedor comparada aos grupos G1 e G2 mostrando peças que tendem ao formato quadrado são mais rígidas.
- (iv) A carga crítica ($P_{Cr,D}$) tende à diminuir quando aumenta b_w .
- (v) Uma coluna foi eliminada da análise, pois não apresentou flambagem crítica no modo distorcional, como era o objetivo da pesquisa.

Dos trabalhos feitos por Nunes (2016) e Silva (2017) foram selecionadas informações importantes para continuidade desta pesquisa, e estão presentes na Tabela 1, onde b_w , b_f e d representam as dimensões da alma, mesa e enrijecedor do perfil, respectivamente (Ver Figura 7); t é a espessura, A é a área da seção transversal, E é o módulo de elasticidade do aço, L_D é a extensão do perfil e $P_{Cr,D}$ é a carga crítica.

Tabela 1: Perfis analisados por Nunes (2016) e Silva (2017)

Perfis analisados por Nunes (2016) e Silva (2017)										
Grupos	Perfis	b_w (cm)	b_f (cm)	d (cm)	t (cm)	A (cm ²)	E (Gpa)	b_w / b_f -	L_D (cm)	$P_{cr,D}$ (KN)
G1	1	6	6	1	0,2	4	210	1	30	165,9
	2	7	6	1	0,2	4,2	210	1,17	30	165,8
	3	8	6	1	0,2	4,4	210	1,33	30	165,7
	4	10	6	1	0,2	4,8	210	1,67	40	159,9
	5	12	6	1	0,2	5,2	210	2	140	148,5
G2	6	7,5	7,5	1	0,2	4,9	210	1	40	128,9
	7	8,5	7,5	1	0,2	5,1	210	1,13	40	128,4
	8	9,5	7,5	1	0,2	5,3	210	1,27	40	127,9
	9	11,5	7,5	1	0,2	5,7	210	1,53	40	126,1
	10	15	7,5	1	0,2	6,4	210	2	180	117,19
	11	22,5	7,5	1	0,2	7,9	210	3	350	77,69
G3	12	8,5	8,5	1,06	0,265	7,1	205	1	40	217,3
	13	9,5	8,5	1,06	0,265	7,6	205	1,12	40	217,1
	14	10,5	8,5	1,06	0,265	7,8	205	1,24	40	216,8
	15	12,5	8,5	1,06	0,265	8,4	205	1,47	40	215,6
	16	17	8,5	1,06	0,265	9,57	205	2	40	203,05
	17	25,5	8,5	1,06	0,265	11,82	205	3	350	137,64
G4	18	10	14,29	1,06	0,265	10,8	205	0,7	60	121
	19	11	14,29	1,06	0,265	11,1	205	0,77	60	120,8
	20	12	14,29	1,06	0,265	11,3	205	0,84	60	120,7
	21	14	14,29	1,06	0,265	11,8	205	0,98	60	120,7
	22	20	14,29	1,06	0,265	13,43	205	1,39958	60	121,04
	23	30	14,29	1,06	0,265	16,08	205	2,1	60	111,23

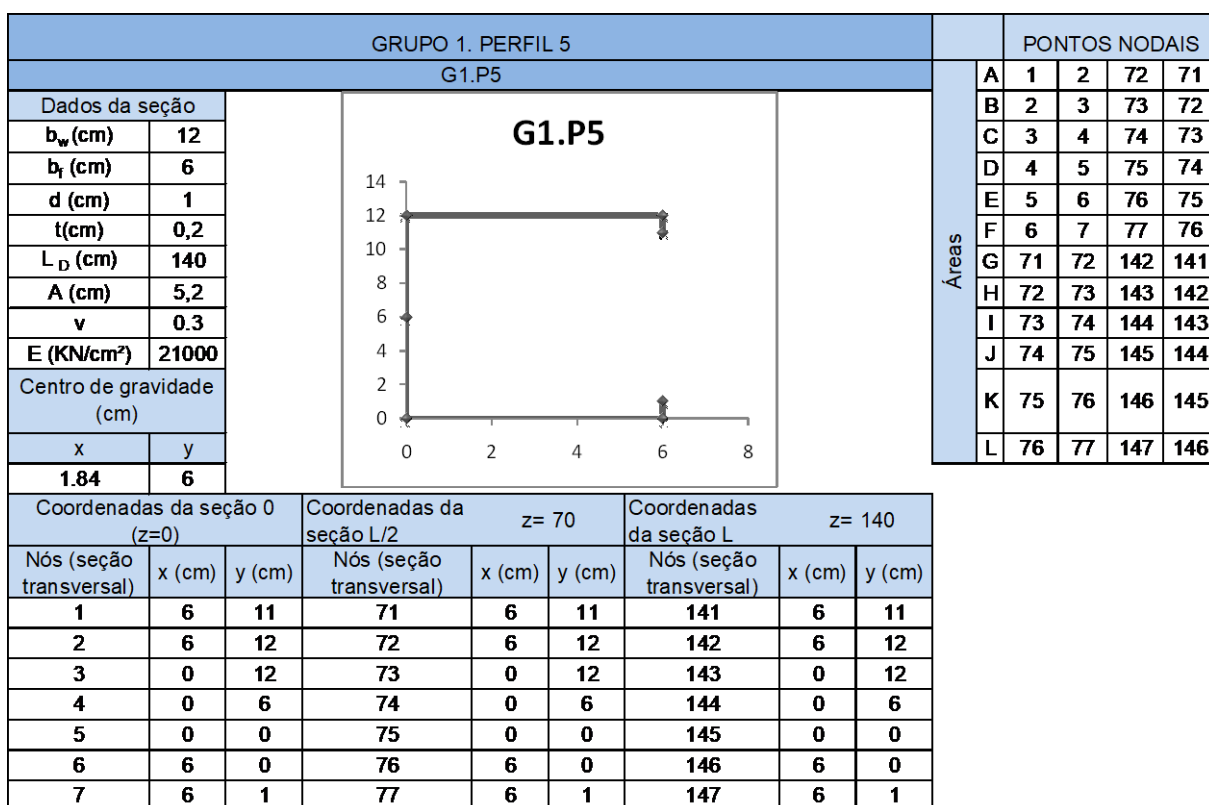
Fonte: Autora, 2018.

Para a realização do estudo, são utilizados os perfis com geometrias previamente verificadas no programa GBTul 2.0 (BEBIANO *et. al.* 2010a, b), considera-se condição de apoio de extremidade simplesmente apoiada (deslocamentos e rotações globais/locais e empenamento livres).

Foram elaborados códigos computacionais, com base no curso de ANSYS apresentado por Cunha (2012), contendo as características de cada perfil, como propriedades geométrica e elástica, as coordenadas x, y e z de cada ponto (nó) no início, meio e extremidade final das peças, áreas formadas pelas ligações dos pontos (nós), geração da malha em elemento Shell 181 com dimensão de 0,5 cm. Para a realização da modelagem, foi utilizada a interface *Mechanical APDL 19.1*, os códigos de cada perfil foram inseridos no *prompt* de comandos para modelagem das geometrias.

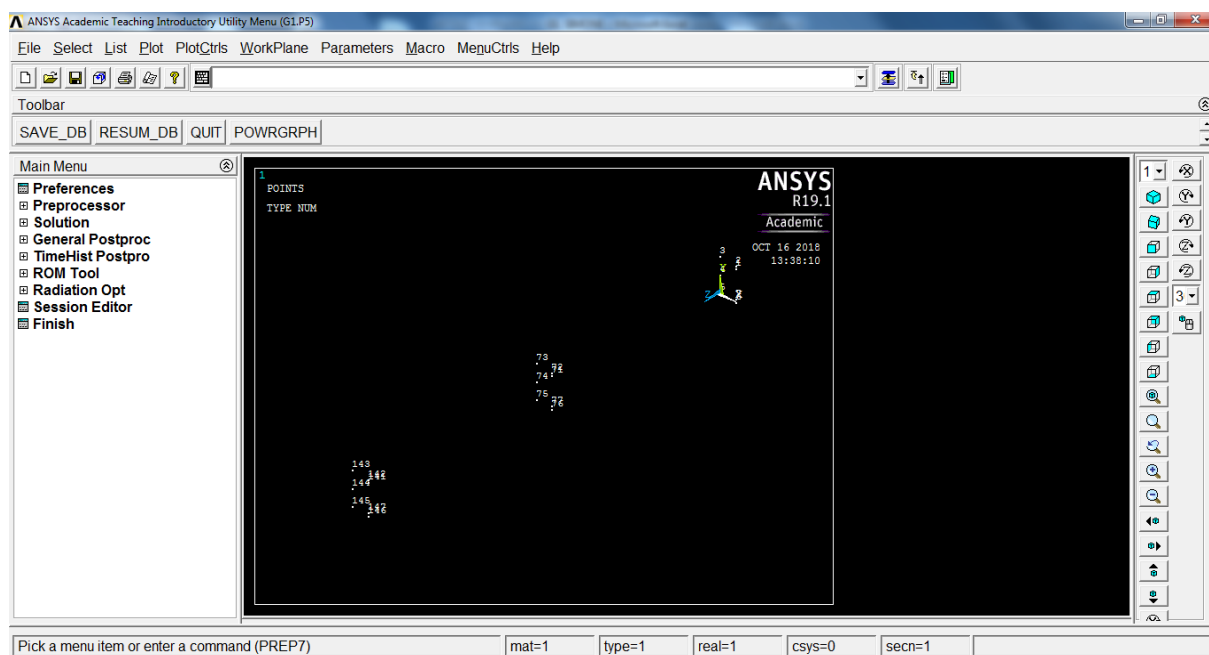
A Figura 8 mostra como os dados são disponibilizados para que o código computacional possa processar as informações de maneira automatizada, sendo assim, a parte inicial da planilha funciona como uma declaração de variáveis que serão utilizadas para a modelagem da geometria do perfil. A Figura 9 e 10 ilustra os *Keypoints* (nós) gerados no *Ansys*, o comando responsável pela geração dos *Keypoints*, obedece as coordenadas das seções; $z=0$, $z=70$ e $z=140$, bem como o número dos nós (*Keypoints*) da seção transversal.

Figura 8 – Declaração de variáveis: dados da geometria do perfil em estudo.



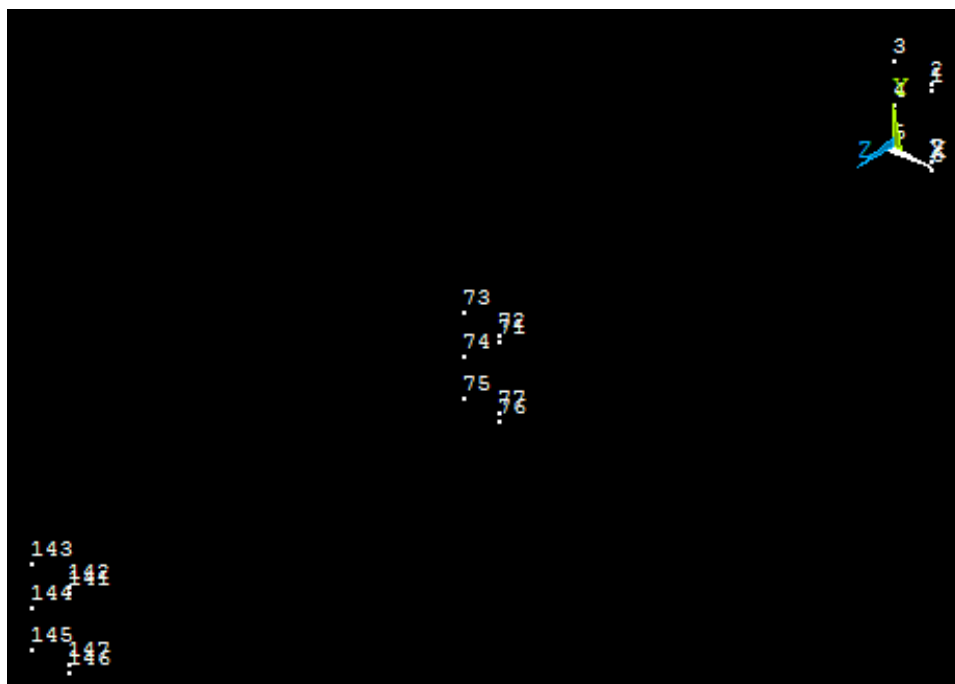
Fonte: Autora, 2018.

Figura 9 – *Keypoints* criados no *Ansys* apresenta a tela principal de comandos e (b) tela aproximada para melhor visualização dos *Keypoints*.



Fonte: Autora, 2018.

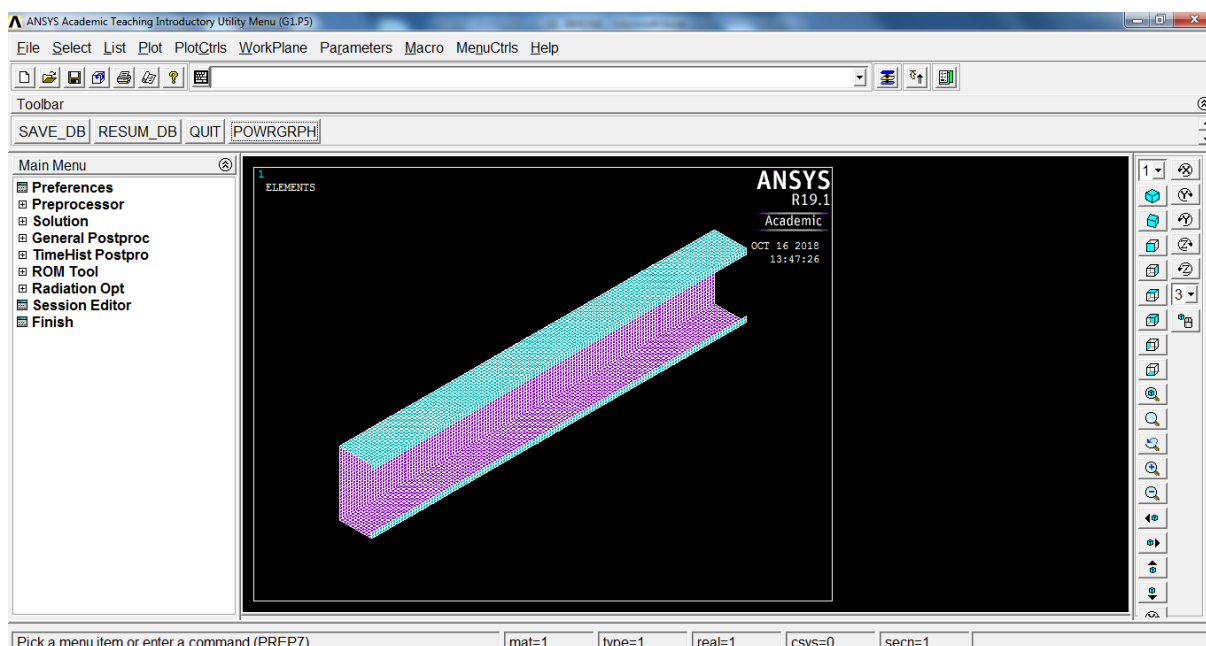
Figura 10 – *Keypoints* criados no *Ansys* apresenta a tela aproximada para melhor visualização dos *Keypoints*.



Fonte: Autora, 2018.

As áreas foram criadas a partir da ligação dos *Keypoints* e a malha é definida pelo próprio usuário, lembrando que resultados mais precisos provêm de malhas mais refinadas, ou seja, menores (Figura 11).

Figura 11 – Geometria modelada no *Ansys*: áreas e malha.



Fonte: Autora, 2018.

A modelagem computacional é parte essencial para realizar a análise de perfis, como os estudados nesta pesquisa, portanto se torna relevante tal estudo pois assim possibilita realizar uma investigação mais próxima da exata destas colunas, devido a uma malha refinada como a que foi

apresentada. Conhecer o comportamento destas peças é importante para aprofundar estudos, os quais podem levar à revisões das normas que direcionam quanto ao dimensionamento destes perfis.

4 CONCLUSÃO

Esta pesquisa realizou a modelagem computacional da geometria de perfis metálicos utilizando peças previamente analisadas por Nunes (2016) e Silva (2017). Para tanto, foram elaborados códigos computacionais contendo as características dos perfis, que foram processados através do *software ANSYS Mechanical APDL 19.1* (2018) para criar as geometrias.

Durante o processo percebeu-se que a versão do programa disponibilizada para estudantes possui uma limitação na geração de malhas, não realizando trabalhos que necessitem de malhas muito refinadas, ficou claro que o programa se mostra eficiente na modelagem da geometria escolhida e que pode ser utilizado para modelar diferentes estruturas, constituídas de diferentes materiais, além de realizar diversas análises estruturais, ficando como sugestão para trabalhos futuros a realização de análises de flambagem e modelagem das condições de contorno.

5 REFERÊNCIAS

ABNT, 2010. **Norma Brasileira para Dimensionamento de estruturas de aço constituídas por perfis formados a frio**. (NBR 14762:2016), Associação Brasileira de Normas Técnicas, Rio de Janeiro, RJ.

ABNT, 2012. **Norma Brasileira para Perfis estruturais de aço formados a frio – Padronização**. (NBR 6355:2003), Associação Brasileira de Normas Técnicas, Rio de Janeiro, RJ.

ANSYS, 2018. Student Version 19.1. Disponível em: <<https://www.ansys.com/academic/free-student-products>>. Acesso em: 23 de abril, 2018.

ANSYS, 2018. **Software de simulação de engenharia**. Disponível em : <<https://www.ansys.com/products/structures/ansys-mechanical-enterprise>>. Acesso em: 05 de outubro, 2018.

BATISTA, Tauana de Oliveira. **Estabilidade e resistência última de colunas metálicas com seção transversal poligonal regular de paredes finas via MEF**. 2016. Dissertação (Mestrado em engenharia civil) – COPPE, Instituto Alberto Luiz Coimbra de Pós-Graduação e pesquisa de Engenharia, Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2016.

BEBIANO R., PINA P., SILVESTRE N., CAMOTIM D., 2010a. GBTul 1.0 □ – 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 □ – Buckling and Vibration Analysis of Thin-Walled Members, DECivil/IST, Technical University of Lisbon. (<http://www.civil.ist.utl.pt/gbt>).

CAMACAM, Ligas especiais/ Fabricação e Distribuição. **Corte e dobra**. Disponível em: <<http://camacam.com.br/servicos/corte-e-dobra>>. Acesso em: 16 de julho, 2018.

CHODRAUI, Gustavo Monteiro de Barros. **Análise teórica e experimental de perfis de aço formado a frio submetido à compressão**. 2006. Tese (Doutorado em Ciências, Programa de Engenharia Civil – Estruturas) – Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Carlos, 2006.

CUNHA, 2012. **Curso básico do programa de elementos finitos ANSYS**. Minicurso de Engenharia Civil. Maio/2010. Notas de aula. PET/Engenharia Civil Universidade Federal de Uberlândia.

ESSS, 2018. **Parceira oficial ANSYS para América Latina e Iberia**. Disponível em: <<https://www.esss.co/ansys>>. Acesso em: 05 de outubro, 2018.

KIMURA, Érica Fernanda Aiko. **Comportamento estrutural de perfis formados a frio com seção transversal composta de U enrijecido em temperaturas elevadas**. 2014. Tese (Doutorado em

Engenharia de Estruturas) - Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Estruturas, Escola de Engenharia de São Carlos da Universidade de São Paulo, São Paulo, 2014.

MATSUBARA, Gustavo Yoshio. **Análise da interação entre modos de flambagem local e distorcional em perfis de aço formados a frio com seção U enrijecido sob compressão axial.** 2018. Dissertação (Mestrado em engenharia civil) – COPPE, Instituto Alberto Luiz Coimbra de Pós-Graduação e pesquisa de Engenharia, Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2018.

NUNES, Lucas Cesar. **Análise de Flambagem Distorcional e Resistência última de perfil metálico tipo U enrijecido.** 2016. Trabalho de Conclusão de Curso - FACIG, Faculdade de Ciências Gerenciais de Manhuaçu, 2016.

SILVA, Bianca do Nascimento. **Estabilidade Estrutural para perfil metálico de paredes finas tipo U enrijecido.** 2017. Trabalho de Conclusão de Curso - FACIG, Faculdade de Ciências Gerenciais de Manhuaçu, 2017.

SILVA, Ana Carolina Campilho da. **Dimensionamento à flambagem distorcional via MRD de colunas metálicas perfuradas em perfil rack.** 2017. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) – COPPE, Instituto Alberto Luiz Coimbra de Pós-Graduação e pesquisa de Engenharia, Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2017.

SALETTTO, Engenharia de Serviços. **Steel Frame é tendência de construção civil.** Disponível em: <<https://www.saletto.com.br/steel-frame-e-tendencia-de-construcao-sustentavel/>>. Acesso em: 12 de julho, 2018.

ZIKELI, Indústria Mecânica. **Portfólio Perfiladeiras Estruturais.** Disponível em: <<http://www.zikeli.com.br/portfolio/perfiladeira-estruturais/>>. Acesso em: 12 de julho, 2018.