



MINISTÉRIO DA EDUCAÇÃO  
Universidade Federal de Ouro Preto  
Escola de Minas – Departamento de Engenharia Civil  
Curso de Graduação em Engenharia Civil

---

**William Douglas de Paula Lopes**

**ANÁLISE NUMÉRICA DE PERFIS FORMADOS A FRIO EM  
SEÇÃO U ENRIJECIDO SUSCEPTÍVEIS À FLAMBAGEM  
DISTRORCIONAL**

Ouro Preto

2022

Análise numérica de perfis formados a frio em seção U enrijecido susceptíveis à flambagem distorcional

William Douglas de Paula Lopes

Monografia de conclusão de curso para obtenção do grau de Engenheiro Civil na Universidade Federal de Ouro Preto defendida e aprovada pela Universidade Federal de Itajubá, aprovada em 05 de Dezembro de 2019.

Banca examinadora: Prof. D.Sc. André Luis Riqueira Brandão - UNIFEI, Prof. D.Sc. Washington Batista Vieira – UNIFEI, Prof. D.Sc. Flávio Teixeira de Souza – UFOP.

Área de concentração: Materiais e Componentes da Construção

Orientador: Prof. D.Sc. André Luis Riqueira Brandão - UNIFEI

Co-orientador: Prof. D.Sc. Washington Batista Vieira – UNIFEI

Ouro Preto

2022



MINISTÉRIO DA EDUCAÇÃO  
Universidade Federal de Ouro Preto  
Escola de Minas  
Colegiado do Curso de Engenharia Civil – CECIV

---



## Declaração

Declaro para os devidos fins que o Colegiado do Curso de Engenharia Civil deferiu o pedido de aproveitamento de estudos, do discente William Douglas de Paula Lopes (20.1.1999), para a disciplina CIV191 – Trabalho de Conclusão de Curso II. Título do trabalho aprovado na forma de Trabalho de Conclusão de Curso: “Análise numérica de perfis formados a frio em seção U enrijecido susceptíveis à flambagem distorcional”.

Ouro Preto, 24 de junho de 2022

Profª. Kátia Inácio da Silva  
Presidente do CECIV

## **AGRADECIMENTOS**

Agradeço primeiramente a Deus, por tudo. A minha mãe Eliani e ao meu pai Luiz Carlos por sempre me incentivarem e acreditarem em meu potencial, a minha irmã Kelly, que sempre que eu precisei esteve muito disposta a me ajudar. Agradeço também à toda minha família, aos tios e tias, avós e primos, que sempre procuraram me ajudar de alguma forma, durante a primeira e a segunda graduação, e aos meus amigos, que foram companheiros em toda essa caminhada e que sempre pude contar para todos os momentos.

Por fim, agradeço a todos os professores do curso por todo aprendizado repassado a mim e de forma especial, aos meus orientadores André e Washington, pela confiança e apreço de sempre agradeço a Universidade Federal de Itajubá e a Universidade Federal de Ouro Preto, por apresentarem ensino gratuito de qualidade, que me proporcionou muito conhecimento e oportunidades durante todos esses anos.

## RESUMO

Este artigo apresenta investigações analíticas e teóricas sobre a capacidade resistente e o comportamento de perfis em aço formados a frio (PFF) submetidos à flexão. Os PFF são fabricados a partir de dobragem de chapas de aço em temperatura ambiente, possibilitando a obtenção de variados perfis de seção aberta com grande aplicação na construção civil. Este trabalho foi realizado com ênfase no modo de instabilidade distorcional, realizado por meio de análise numérica utilizando o método dos elementos finitos. Os perfis foram analisados com auxílio de programa computacional de elementos finitos, considerando o material com comportamento elastoplástico e não linearidade física e geométrica. Na etapa de validação do modelo numérico, os resultados apresentaram boa concordância com valores experimentais obtidos da literatura. No estudo paramétrico realizado, os resultados foram comparados com os obtidos pelas equações normativas para obtenção dos dados estatísticos do erro das equações normativas. A título de demonstração, o índice de confiabilidade de 2,84 foi calculado a partir das estatísticas do erro do modelo e para uma situação específica da norma brasileira ABNT NBR 14762 (2010). Tendo em vista a qualidade dos dados estatísticos do erro, os resultados poderão ser empregados em trabalhos futuros de análise de confiabilidade estrutural.

Palavras-chaves: Perfil formado a frio, Análise numérica, Abaqus.

## **ABSTRACT**

This article presents analytical and theoretical investigations on the strength and behavior of cold-formed steel profiles (CFS) subjected to bending. The CFS are manufactured from the bending of steel sheets at room temperature, making it possible to obtain various open-section profiles with wide application in civil construction. This work was carried out with emphasis on the distortional instability mode, performed through numerical analysis using the finite element method. The profiles were analyzed with the aid of a finite element computer program, considering the material with elastoplastic behavior and physical and geometric non-linearity. In the validation stage of the numerical model, the results showed good agreement with experimental values obtained from the literature. In the parametric study performed, the results were compared with those obtained by the normative equations to obtain statistical data on the error of the normative equations. As a demonstration, the reliability index of 2.84 was calculated from the model error statistics and for a specific situation of the Brazilian standard ABNT NBR 14762 (2010). In view of the quality of the statistical error data, the results may be used in future works on structural reliability analysis.

Keywords: Cold-formed steel profiles, Numerical analysis, Abaqus.

## LISTA DE FIGURAS

Fig. 1 - Exemplo de construção em Light Steel Frame. ....	8
Fig. 2 - Variabilidade construtiva em seções abertas de perfis formados a frio. .	12
Fig. 3 - Processo de perfilação .....	12
Fig. 4 - Processo descontínuo de conformação das chapas. ....	13
Fig. 5 - Exemplos de análise de flambagem elástica por flexão. ....	16
Fig. 6 - Detalhamento das etapas necessárias para a realização do ensaio numérico.....	19
Fig. 7- Ensaio experimental de vigas em perfil formado a frio. ....	21
Fig. 8 - Perfil modelado mostrando componente utilizado para aplicação das cargas e evidenciando o uso do elemento S4R. ....	23
Fig. 9 - Comparação dos resultados experimentais e numéricos. ....	24
Fig. 10 - Comparação do resultado visual do mesmo perfil com procedimentos de análise distintos.....	25
Fig. 11 - Resultados para variação da espessura dos perfis. ....	27
Fig. 12 - Comparação dos métodos de dimensionamento variando a espessura. ....	28
Fig. 13 - Distribuição de frequência e função densidade de probabilidade (lognormal) do erro (a) P1 (MEXP/MMEF) e (b) P2 (MMEF/MMRD). ....	31

## LISTA DE TABELAS

Tabela 1– Dados geométricos das vigas e resultados da análise experimental .	22
Tabela 2 - Objetividade da malha .....	24
Tabela 3 -Valores mínimos da relação $D/bw$ de seções $U_e$ e $Z_e$ sob flexão simples em torno do eixo de maior inércia, para dispensar a verificação da flambagem distorcional. ....	25
Tabela 4 - Resultado do estudo da variação de parâmetros. ....	26

## LISTA DE SIGLAS

AISI	American Iron and Steel Institute
ABNT	Associação Brasileira de normas de técnicas
FLT	Flambagem Lateral Com Torção
MEF	Método dos Elementos Finitos
MLE	Método De Largura Efetiva
MRD	Método Da Resistência Direta
MSE	Método De Seção Efetiva
NBR	Norma Brasileira
PFF	Perfil Formado a Frio
LSF	Light Steel Frame
UFMG	Universidade Federal de Minas Gerais
UFOP	Universidade Federal de Ouro Preto

## SUMÁRIO

1. INTRODUÇÃO .....	8
1.1. Objetivo.....	9
1.1.1 Objetivos Específicos .....	9
2. REVISÃO BIBLIOGRAFICA .....	10
2.1. Perfil Formado a Frio .....	10
2.2. História do perfil formado a frio .....	10
2.3. Métodos Construtivos e Características de Fabricação .....	12
2.4. Comportamento dos Perfis Formados a Frio .....	13
2.5. Modos de instabilidade em perfis formados a frio.....	14
2.6. O Método da Resistência Direta .....	16
2.7. Modelagem Numérica.....	18
3. PROCEDIMENTOS METODOLÓGICOS.....	19
4. RECURSOS.....	20
5. RESULTADOS.....	21
5.1. DADOS EXPERIMENTAIS .....	21
5.2. ANÁLISE NUMÉRICA.....	22
5.3. Características do modelo numérico.....	22
5.3.1. Validação do modelo numérico.....	24
5.4. ESTUDO DE VARIAÇÃO DE PARÂMETROS.....	25

5.5. CONFIABILIDADE ESTRUTURAL .....	28
6. CONCLUSÃO .....	31
7. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS .....	33

## 1. INTRODUÇÃO

A NBR 14762 (2010) define os perfis formados a frio (PFF) como sendo elementos formados por chapas planas de aço dobradas a frio. Atualmente, os PFF são bastante versáteis na construção civil sendo algumas de suas aplicações em coberturas, galpões e residências. Na Fig 1 é mostrada uma residência construída com PFF, com a utilização de perfis U e U enrijecidos, segundo sistema Light Steel Frame (LSF). Devido à elevada esbelteza de suas paredes, é susceptível à ocorrência de flambagem local, sendo caracterizada pela flexão das paredes sem deslocamento dos bordos longitudinais internos.



**Fig. 1 - Exemplo de construção em Light Steel Frame.**

Fonte: Agência Brasileira de Desenvolvimento Industrial (2015).

A falha nas vigas de perfis formados a frio pode ser iniciada por um dos três modos de instabilidade: flambagem local, flambagem distorcional ou flambagem lateral com torção (FLT). Em vigas com restrição à FLT e sem restrição na mesa comprimida, flambagem distorcional pode ser o modo de falha predominante. O presente trabalho trata do modo de flambagem distorcional em perfis U enrijecidos ( $U_e$ ), com flexão em torno do eixo de maior inércia. O modo de flambagem distorcional é um tipo de instabilidade com poucos dados experimentais disponíveis na literatura, comparado aos outros modos de flambagem. O modelo numérico deste trabalho foi desenvolvido com o software ABAQUS e validado com resultados experimentais da literatura, o que possibilitou o desenvolvimento de um estudo de variação de parâmetros, que poderá servir de base para estudos posteriores de confiabilidade estrutural.

## 1.1. Objetivo

O objetivo principal deste trabalho é a análise numérica de perfis formados a frio em seção u enrijecido susceptíveis à flambagem distorcional.

### 1.1.1 Objetivos Específicos

Em função do objetivo principal, outros específicos foram determinados, tais como:

- a) desenvolver um modelo numérico pelo método dos elementos finitos, utilizando o *software* ABAQUS
- b) realizar a validação e calibração do modelo numérico, tendo como parâmetros resultados experimentais obtidos em literatura, tanto em termos de capacidade resistente como de modos de colapso;
- c) elaborar um estudo comparativo do comportamento estrutural das vigas formadas por diferentes seções;
- d) realizar um estudo de variação de parâmetros, de modo a obter um banco de dados de resultados, para complementar os resultados existentes na literatura para estudos futuros relacionados à confiabilidade estrutural de vigas em perfis formados a frio.

## **2. REVISÃO BIBLIOGRAFICA**

### **2.1. Perfil Formado a Frio**

Devido ao aumento da competitividade no ramo da construção civil, surgem opções cada vez mais econômicas para se construir com segurança e com menor preço. Sendo assim, o projeto estrutural deve atender às seguintes diretrizes: ser resistente e durável, mas com menor custo. A partir desta premissa, surgem os perfis formados a frio (PFF), que produzem estruturas mais leves que, com baixa relação de massa/resistência, conseguindo garantir segurança e elegância na obra.

### **2.2. História do perfil formado a frio**

A busca por estruturas mais leves é algo que começou no século XIX, surgindo por meio disso os PFF, com intuito de atender a essa necessidade. Por volta de 1850, os PFF começaram a ser fabricados, tendo iniciado nos Estados Unidos e na Inglaterra. Contudo, somente em 1931, iniciaram-se os estudos na área, tendo como pioneiro o Professor George Winter, da Universidade de Cornell, nos Estados Unidos.

Os perfis de chapa dobrada apresentavam grandes vantagens em relação aos perfis da época; no entanto, a ausência de uma norma vigente para auxiliar nos processos construtivos e de fabricação dificultou a expansão e aplicação inicial. Desta forma, apenas por volta dos anos 40 do século passado, que eles começaram a ser produzidos em maior escala. Um dos motivos da ampliação da utilização foi a publicação de normas tanto na América do Norte como na Europa, auxiliando diretamente no processo de expansão da fabricação.

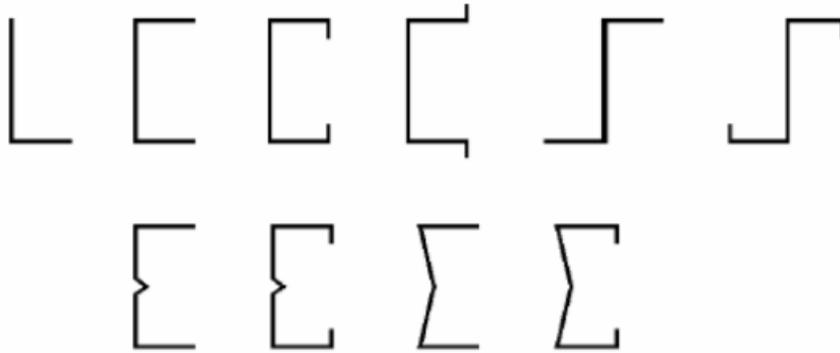
A primeira norma efetiva ocorreu pela iniciativa do Instituto Americano de Ferro e Aço ou, em inglês, American Iron and Steel Institute (AISI) em 1938. Para isso foi criado um corpo técnico que, na época, fixou algumas especificações para perfis leves no geral. Desde então, diversos estudos foram produzidos até que, em 2001, foi criada a North American Specification for the Design of Cold-Formed Steel Structural Members.

O processo de expansão dos PFF no Brasil demorou para acontecer. A dependência de norma estrangeiras e o desuso das normas brasileiras vigentes na época – a ABNT NBR 143 (ABNT, 1967) e a ABNT NBR 6355 (ABNT, 1980) – dificultaram a expansão no Brasil. Este problema foi definitivamente solucionado com a atualização recente da norma técnica ABNT NBR 6355 (ABNT, 2012).

Atualmente os PFF já se apresentam como solução principal para diversas situações estruturais, levando economia e até mesmo elegância visual para obra. A ideia de utilização dos PFF é simples, sendo de fácil construção, manuseio e transporte. Outras vantagens que conferem o atual destaque dos perfis estão listadas a seguir:

- a) possibilitam o vencimento de grandes vãos gerando economia na construção;
- b) têm a facilidade de serem fabricadas em diversos tipos de seções, tendo como outra vantagem excelente relação massa/resistência;
- c) podem ser facilmente submetidos a perfuração que é utilizado para montagem de estruturas de suporte, utilizado também para passagem de cabeamentos, além de diminuir ainda mais a leveza da estrutura.
- d) excelente capacidade de reutilização.

Dentro das vantagens citadas, vale destacar a facilidade de produzir diversos tipos de seções (Figura 2), dentre os quais os de seção U e seção Z são os mais utilizados.



**Fig. 2 - Variabilidade construtiva em seções abertas de perfis formados a frio.**

Fonte: Riqueira, 2007.

### **2.3. Métodos Construtivos e Características de Fabricação**

A fabricação do perfil formado a frio é feita a partir de um processo denominado conformação. Segundo Silva e Pignata (2008), o processo de conformação é dividido em duas partes: processo contínuo e processo descontínuo.

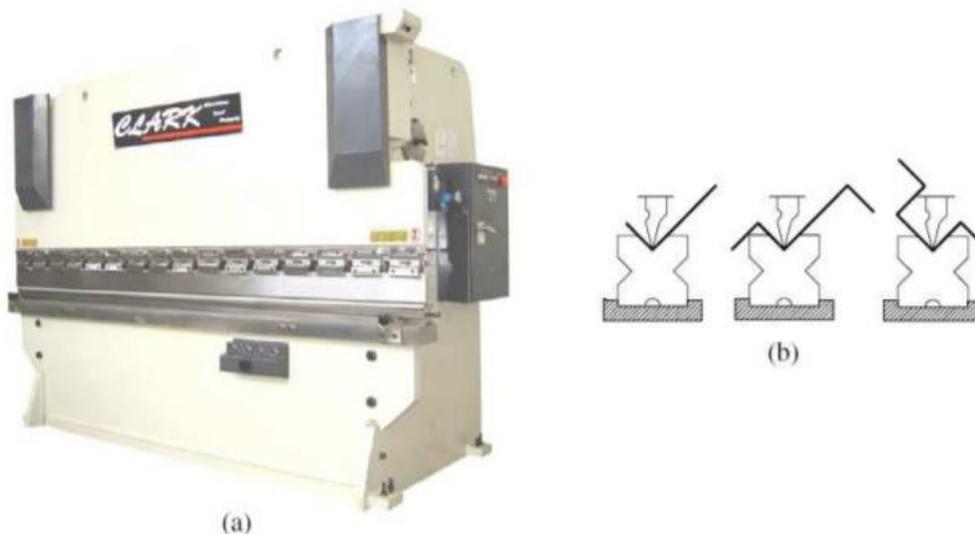
O primeiro processo é realizado a partir do deslocamento longitudinal de uma chapa de aço, sobre os roletes de uma linha de perfilação (Figura 3). Os roletes vão garantindo a forma do perfil à chapa.



**Fig. 3 - Processo de perfilação**

Fonte: (Catalogo Técnico, CSN, 2001)

O processo descontínuo (Figura 4) é realizado a partir de uma chapa dobradeira. As diferentes seções são produzidas a partir dos dobramentos contínuos sobre a mesma chapa de modo a criar a seção desejada. Este processo comumente é realizado por empresas especializadas em estruturas metálicas.



**Fig. 4 - Processo descontínuo de conformação das chapas.**

Fonte: (a) Prensa Dobradeira; (b) Sequência de fabricação do perfil dobrado

Fonte: Manual CBCA (2008)

Outra característica vantajosa dos PFF é que o processo de fabricação muitas vezes, pode ser particular para cada obra, podendo variar as seções, a espessura, de modo que os perfis possam suportar as solicitações impostas, sem superdimensionamento, gerando economia para a obra. As chapas produzidas possuem espessura finas que variam entre 0,378 mm e 6,35 mm, porém, se o projeto solicitar espessuras maiores, a espessura pode chegar até a 25,4 mm, sendo necessário que haja tipos de dobradeiras mais sofisticadas para executar a fabricação.

#### **2.4. Comportamento dos Perfis Formados a Frio**

Os perfis formados a frio normalmente são constituídos de aço. O aço é formado pela união de carbono e ferro. As variações da dosagem destes elementos

são fundamentais para determinar alguns parâmetros do aço. Quando formado por maiores teores de carbono, o aço apresenta com comportamento mais resistente às solicitações, no entanto, o excesso diminui a ductilidade do aço, tornando-o mais frágil. Aços com elevada fragilidade pode apresentar riscos as edificações devido à falta de demonstração visual de falta de segurança e/ou ruptura brusca. Outros aspectos também influenciam no comportamento dos perfis, dentre os quais estão os listados a seguir:

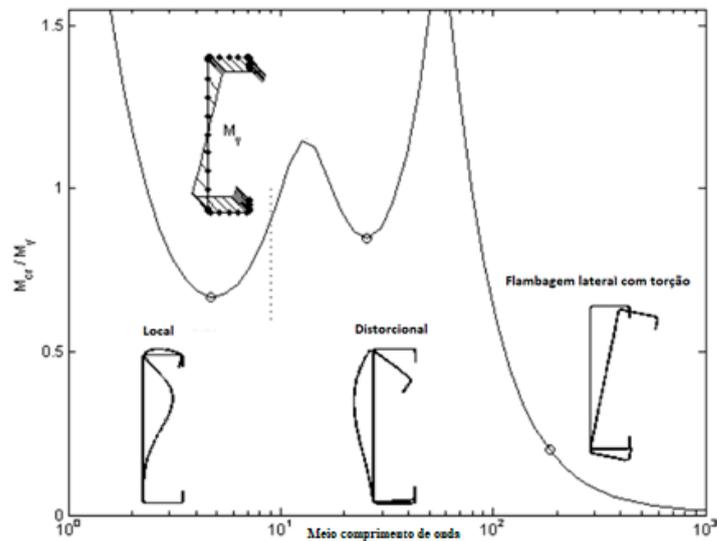
- a) os perfis formados a frio, como já citados, são caracterizados pela elevada esbeltez. Como Riqueira (2007) relata, esse fenômeno faz com que os modos de flambagem sejam críticos nestes tipos de elementos, ocorrendo muitas vezes o colapso da estrutura antes da tensão de escoamento do material;
- b) vale ressaltar também a influência dos processos de fabricação no comportamento do aço, sendo que o processo de dobragem do perfil para se adquirir as seções especificadas proporciona fenômenos que necessitam de atenção. Como relatado em Yu (2010), a conformação do aço modifica as características dos materiais. Nas regiões de dobramento, o perfil sofre o fenômeno de encruamento, quando ocorre deformação abaixo da temperatura de recristalização do aço, a tensão de escoamento é maior (Figura 8), a resistência mecânica nas dobras é maior, no entanto, ocorre um acréscimo das tensões residuais Javaroni (2002).

## **2.5. Modos de instabilidade em perfis formados a frio**

Uma vez que são constituídos de chapas finas, os PFF geralmente têm seus elementos sujeitos à flambagem local de placa. Este fenômeno não representa colapso estrutural, e sim uma redução significativa da rigidez da seção. A capacidade resistente dos PFF pode aumentar com a utilização de seções transversais enrijecidas, porém, o comportamento estrutural do perfil é alterado. Perfis com enrijecedor podem apresentar o modo distorcional. Dependendo da geometria da

seção transversal o modo distorcional pode governar o dimensionamento do perfil, pois a força crítica associada ao modo distorcional pode ser inferior à força crítica que provoca a flambagem local.

Na Fig. 2 são mostrados os modos de flambagem de um perfil U enrijecido, em que a parte comprimida da seção sofre o fenômeno de flambagem. A FLT acontece globalmente, sendo tanto mais susceptível quanto maior for o comprimento destravado da viga. Segundo Javaroni (2007), na flambagem local, a posição dos vértices das arestas é conservada, enquanto que na flambagem distorcional, ocorre um deslocamento da alma e conseqüente rotação das mesas do perfil, ocorrendo em perfis com enrijecedores, que estão travados contra o deslocamento lateral ou torção. A ocorrência desses três modos de flambagem torna-se cada vez mais determinante no comportamento das estruturas devido à crescente esbeltez dos sistemas Souza (2013). Longitudinalmente, a deformada associada a cada um dos três modos de flambagem é caracterizada pela forma senoidal, com meio comprimento de onda identificado pelo ponto de mínimo da curva ilustrada resultante de uma análise de estabilidade elástica. Esse tipo de análise pode ser realizado por meio de um recurso computacional, com softwares como o CUFSM 4.03® (SCHAFER E ÁDÁNY (2006)) ou o GBTUL 2.0.4.4© (BEBIANO *et al.*, (2008)).



**Fig. 5 - Exemplos de análise de flambagem elástica por flexão.**

Fonte: Adaptado de Schaefer (2002).

## 2.6. O Método da Resistência Direta

A NBR 14762 (2010), desenvolvida com a filosofia do método dos estados-limites, estabelece requisitos básicos que devem ser atendidos no dimensionamento de PFF, constituídos por chapas de aço carbono ou aço de baixa liga, destinado a estruturas de edifícios. Esta norma prevê três métodos de projeto: método de largura efetiva (MLE), método de seção efetiva (MSE) e método da resistência direta (MRD). Neste artigo, foi adotado o MRD, que considera as propriedades geométricas da seção bruta e a análise geral da estabilidade elástica, que identifica, para este caso, todos os modos de flambagem e seus esforços críticos.

O método utiliza curvas específicas para o cálculo da resistência considerando a interação entre os modos de flambagem local e lateral com torção,  $M_{Rl}$ , e distorcional,  $M_{Rd}$ , de vigas, devidamente calibradas e ajustadas para estes modos de flambagem.

O momento fletor resistente característico,  $M_{Rk}$ , é a menor resistência verificada considerando apenas a flambagem lateral com torção,  $M_{Re}$ , ou aquela devido à

interação entre flambagem local com a flambagem lateral com torção,  $M_{Rl}$ , ou, ainda, aquela verificada considerando somente o modo de flambagem distorcional,  $M_{Rdist}$ . Ou seja,  $M_{Rk} = \min(M_{Rk}; M_{Rl}; M_{Rdist})$ .

De acordo com o MRD, as equações para flexão que consideram as capacidades de reserva inelástica para flambagem torção lateral ( $M_{Re}$ ), flambagem local ( $M_{Rl}$ ) e flambagem distorcional ( $M_{Rdist}$ ) estão resumidas a seguir.

### Flambagem lateral com torção:

$$M_{Re} = \begin{cases} W f_y & \text{se } \lambda_o \leq 0,6 \\ 1,11(1 - 0,278\lambda_o^2) W f_y & \text{se } 0,6 < \lambda_o < 1,336 \\ \frac{W f_y}{\lambda_o^2} & \text{se } \lambda_o \geq 1,336 \end{cases} \quad (1)$$

sendo  $\lambda_o$ , o índice de esbeltez reduzido associado à flambagem global,  $W$ , o módulo de resistência elástico da seção bruta em relação à fibra externa que atinge o escoamento,  $f_y$ , a resistência ao escoamento do material, e  $M_e$ , momento fletor de flambagem elástica, dado por:

$$\lambda_o = \sqrt{\frac{W f_y}{M_e}} \quad (2)$$

### Flambagem local:

$$M_{Rl} = \begin{cases} M_{Re} & \text{se } \lambda_l \leq 0,776 \\ \left(1 - \frac{0,15}{\lambda_l^{0,8}}\right) \frac{M_{Re}}{\lambda_l^{0,8}} & \text{se } \lambda_l > 0,776 \end{cases} \quad (3)$$

sendo  $\lambda_l$ , o índice de esbeltez reduzido associado à flambagem local, e  $M_l$ , momento fletor de flambagem local, dado por:

$$\lambda_l = \sqrt{\frac{M_{Re}}{M_l}}$$

### Flambagem distorcional:

$$M_{Rdist} = \begin{cases} W f_y & \text{se } \lambda_{dist} \leq 0,673 \\ \left(1 - \frac{0,22}{\lambda_{dist}}\right) \frac{W f_y}{\lambda_{dist}} & \text{se } \lambda_{dist} > 0,673 \end{cases} \quad (4)$$

sendo  $\lambda_{dist}$ , o índice de esbeltez reduzido associado à flambagem distorcional, e  $M_{dist}$ , momento fletor de flambagem distorcional, dado por:

$$\lambda_{dist} = \sqrt{\frac{W f_y}{M_{dist}}} \quad (5)$$

## 2.7. Modelagem Numérica

Os modelos numéricos na engenharia estrutural são ferramentas importantes para representar o comportamento de estruturas, reduzindo a necessidade de excessivos ensaios experimentais, possibilitando economia e facilidade de execução através da replicação dos perfis numericamente. Atualmente, o grande desenvolvimento dos computadores e dos programas de análise numérica têm facilitado o seu uso dando suporte para a modelagem dos mais diversos problemas da engenharia.

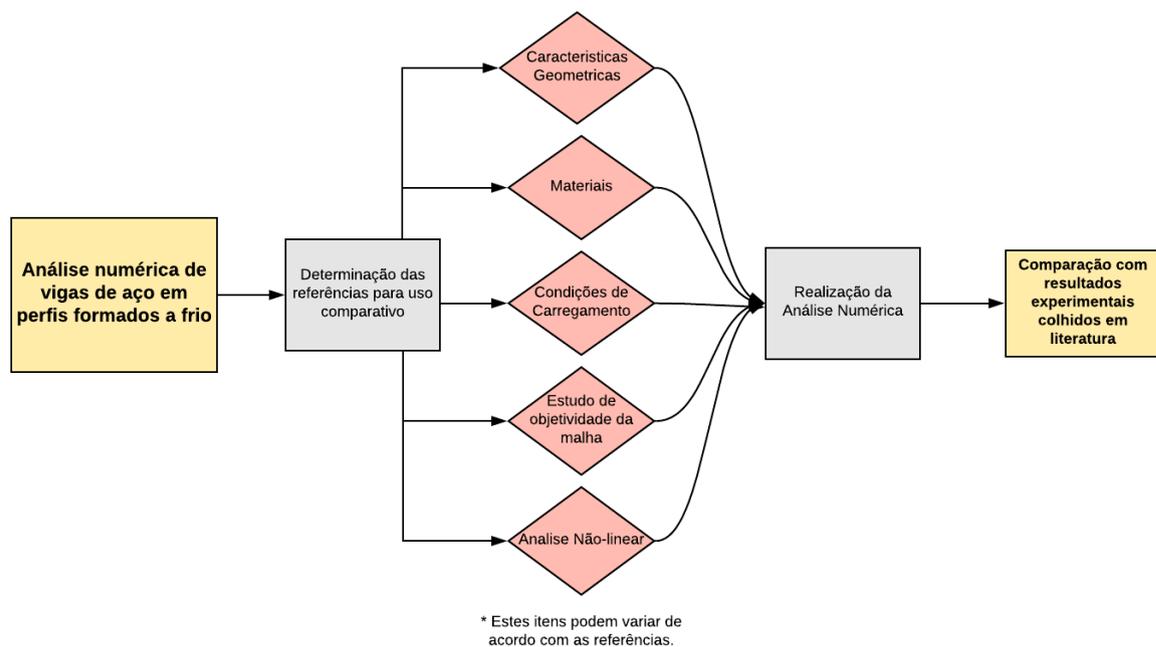
Evidentemente, as informações experimentais são fundamentais para a calibração desses métodos e modelos numéricos e não se pode prescindir delas, sob risco de serem obtidas soluções sem respaldo da realidade. Bem empregado e dentro de certos limites, entretanto, o método dos elementos finitos possibilita o aumento do conhecimento da resposta estrutural, possibilitando identificar regiões com alta concentração de tensões e prever o desenvolvimento das deformações na estrutura, (DE PAULA (2006)).

Entres os métodos de análise, destaca-se o Método dos Elementos Finitos (MEF). Segundo Souza (2013), esse método baseia-se na discretização da estrutura em elementos, gerando assim uma malha de elementos com dimensões finitas. Através de funções de interpolação convenientes, este sistema discreto simula o comportamento do sistema contínuo original. A vantagem do método dos elementos

finitos é a amplitude de possibilidades de utilização, uma vez que os elementos finitos se adaptam à geometria.

### 3. PROCEDIMENTOS METODOLÓGICOS

A metodologia adotada para atingir os objetivos propostos é apresentada de forma geral nesta seção. Na sequência do estudo, serão detalhados os itens expostos na figura a seguir.



**Fig. 6 - Detalhamento das etapas necessárias para a realização do ensaio numérico.**

Fonte: Autor (2019)

A pesquisa será realizada nas seguintes fases:

- a) Definição de um programa numérico, a partir das etapas:
  - i. determinar as referências que serão utilizadas como base de calibração e validação do modelo;
  - ii. estudo prévio de ensaios experimentais, com base na literatura, observando-se principalmente as condições de ensaio, carregamento e

- características geométricas de cada autor, esse estudo auxilia na produção dos parâmetros de ensaio numérico;
- iii. realizar um estudo do programa ABAQUS, para desenvolvimento de um modelo numérico que confira as condições de ensaio experimental;
- b) realização de um estudo de variação de parâmetros, com o modelo numérico, para se obter um conjunto de resultados, em que se variam: a espessura da chapa, o comprimento da viga, a resistência a escoamento da viga e as imperfeições iniciais, as seções do perfil;
- i. com base na variação, elaborar um banco de dados de modo a favorecer trabalhos futuros de segurança estrutural.
  - ii. elaborar uma análise comparativa do comportamento estrutural com base na variação das seções.

#### **4. RECURSOS**

Este trabalho realizara análises numéricas de modo a obter resultados que contribuam para a pesquisa da segurança de perfis formados a frio, para isso, serão necessários alguns itens que estão dispostos a seguir:

- I. Utilização do laboratório de estruturas da UNIFEI para uso dos computadores;
- II. Utilização do software ABAQUS para realização da modelagem numérica, a sua utilização provem de uma parceria afirmada com a Universidade Federal de Viçosa (UFV).

## 5. RESULTADOS

### 5.1. DADOS EXPERIMENTAIS

O modelo numérico foi desenvolvido com a simulação de um programa experimental, com ensaios de flexão, desenvolvido por Yao e Guo (2016). Os ensaios foram realizados de maneira a ensaiar um par de vigas simultaneamente, como mostrado na Fig. 3, com a força aplicada de modo a evitar a torção do perfil. Cada elemento da viga foi travado à rotação, nas extremidades e nas regiões de aplicação de força. O esquema de carregamento também está representado na Fig. 3.

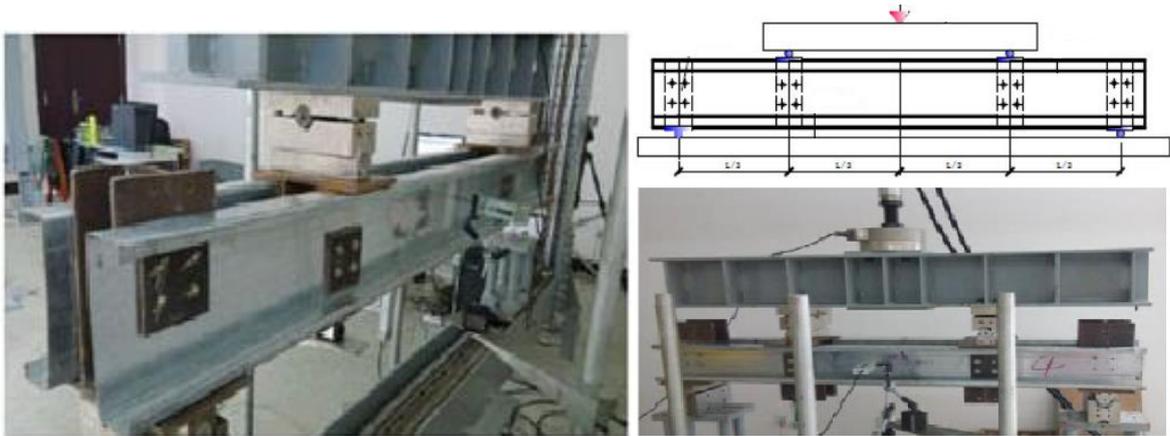


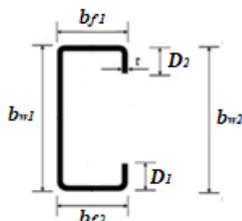
Fig. 7- Ensaio experimental de vigas em perfil formado a frio.

Fonte: Yao e Guo (2016).

O material das vigas ensaiadas por Yao e Guo (2016) tem resistência ao escoamento ( $f_y$ ) de 295 MPa, módulo de elasticidade ( $E$ ) de 207,4 GPa e alongamento de 32%. As vigas foram denominadas de modo que cada perfil pudesse ser facilmente identificado (Tabela 1) por exemplo, na denominação “B600H160-1a”, o “B600” está relacionado ao comprimento destravado ( $L=600\text{mm}$ ). O “H160” indica altura do perfil de 160 mm. O número “1” significa que foi a primeira repetição do teste para estes parâmetros, e as letras “a” e “b” representam cada perfil da dupla que foi ensaiado simultaneamente. O raio de curvatura foi estimado como duas vezes a espessura ( $t$ ) do perfil.

**Tabela 1– Dados geométricos das vigas e resultados da análise experimental**

Nomeclatura	$L$	$bw1$	$bw2$	$bf$	$bf2$	$D1$	$D2$	$t$	$M_{exp}$	$M_{num}$	$M_i/M_{num}$
	mm	mm	mm	mm	mm	mm	mm	mm	kNm	kNm	
<b>B600H160-1a</b>	600	156	157	58,24	57,99	17,00	16,29	1,95	8,65	8,47	1,02
<b>B600H160-1b</b>	600	158	156	58,32	58,24	17,75	19,18	1,98	8,65	9,09	0,95
<b>B600H160-2a</b>	600	156	157	58,19	58,72	17,99	17,82	1,93	8,77	8,50	1,03
<b>B600H160-2b</b>	600	157	159	58,6	58,46	17,6	17,95	1,95	8,77	9,02	0,97
<b>B600H160-3a</b>	600	159	158	58,22	59,67	18,06	18,34	1,95	9,04	9,01	1,00
<b>B600H160-3b</b>	600	157	158	58,27	58,19	17,92	18,54	1,93	9,04	8,66	1,04
<b>B600H180-1a</b>	600	172	178	60,59	60,3	12,5	13,25	1,95	9,78	9,53	1,03
<b>B600H180-1b</b>	600	177	181	58,25	58,42	15,54	9,19	1,94	9,78	9,62	1,02
<b>B900H140-1a</b>	900	137	137	38,32	38,98	15,72	16,88	1,95	5,83	5,68	1,03
<b>B900H140-1b</b>	900	137	135	38,96	38,99	15,66	16,37	1,95	5,83	5,54	1,05
<b>B900H140-2a</b>	900	138	136	38,38	39,1	15,56	18,03	1,96	5,75	5,71	1,01
<b>B900H140-2b</b>	900	138	135	38,12	38,16	16,28	15,64	1,92	5,75	5,49	1,05
<b>B900H140-3a</b>	900	138	136	38,11	38,14	15,74	17,05	1,93	5,79	5,53	1,05
<b>B900H140-3b</b>	900	137	138	38,36	38,1	15,81	15,71	1,96	5,79	5,63	1,03



Fonte: Yao e Guo (2016).

## 5.2. ANÁLISE NUMÉRICA

### 5.3. Características do modelo numérico

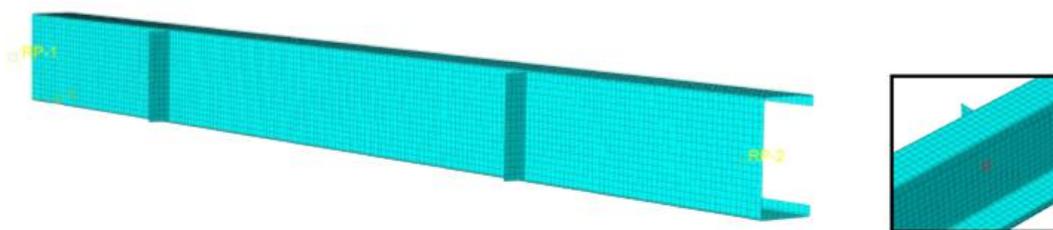
A análise numérica foi desenvolvida com uso do software ABAQUS. Nas análises realizadas foram consideradas as não linearidades geométricas e material e as imperfeições geométricas iniciais a partir de uma análise elástica de flambagem.

Adotou-se um modelo homogêneo, tridimensional, formado por elemento de casca fina do tipo deformável. As condições de contorno experimentais e a aplicação do carregamento foram reproduzidas no modelo numérico, a partir da utilização do algoritmo *Riks* modificado (método do comprimento de arco). Para o material, foi adotado um modelo constitutivo elastoplástico perfeito, isto é, o material possui comportamento perfeitamente elástico até a resistência de escoamento e completamente plástico ( $E = 0$ ) após atingir o patamar de escoamento.

Na análise não linear, o modelo é iniciado com a deformada obtida de uma análise prévia de flambagem. Para execução da análise não-linear, é necessário aplicar uma imperfeição inicial ao modelo, correspondente ao modo de flambagem encontrado na

análise elástica. Adotou-se o valor de imperfeição inicial igual a  $L/750$  do comprimento de flexão da viga, assim como feito no trabalho de Yao e Guo (2016). As tensões residuais foram desconsideradas neste trabalho.

De modo a realizar o ensaio numérico em vigas separadas, o modelo necessitou de um componente de chapa conforme ilustrado na Fig. 4, para que fossem aplicadas as forças no centro de cisalhamento do perfil, simulando um esforço de flexão simples. Para verificar se a influência da espessura da chapa seria relevante na capacidade resistiva do perfil, foi realizada a análise do perfil “B600H180-1a” variando a espessura da chapa em 5, 10, 12.5 e 15 mm. A resistência da viga com chapa de 15 mm em relação à viga com chapa de 5 mm teve um aumento de apenas 0,33%. Tendo em vista a baixa influência da espessura da chapa nos resultados, adotou-se, para todas as vigas, chapa de 5 mm de espessura. A Fig. 4 também, apresenta a malha utilizada no modelo numérico. Para criação da malha, utilizaram-se os elementos S4R da biblioteca do ABAQUS com elementos quadrilaterais de largura igual a 10 mm.



**Fig. 8 - Perfil modelado mostrando componente utilizado para aplicação das cargas e evidenciando o uso do elemento S4R.**

Para avaliar a objetividade da malha, foram realizadas análises preliminares variando as dimensões do elemento S4R. Esta análise tem o objetivo de relacionar a qualidade dos resultados, levando em consideração a precisão e o menor custo computacional. O resultado, como apresentado na Tabela 2, explica a utilização da malha com 10 mm de comprimento do elemento.

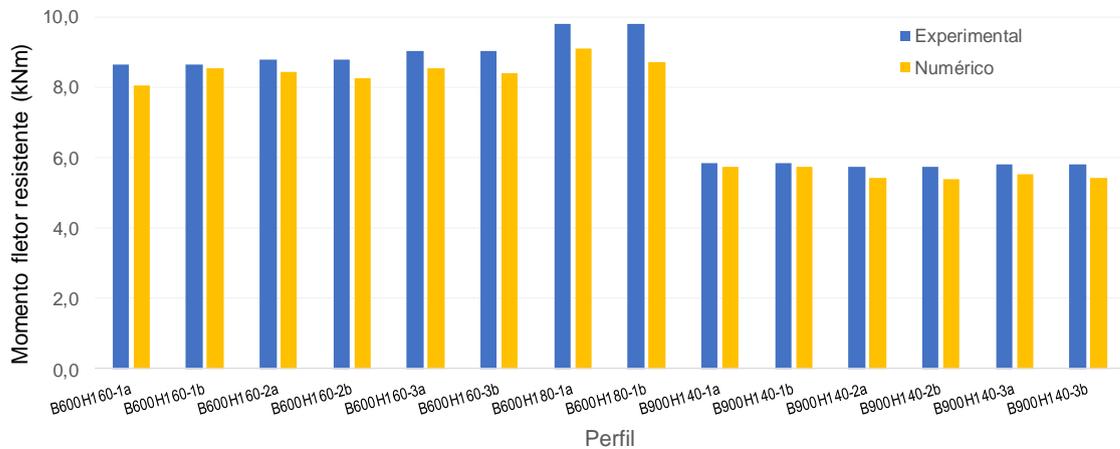
**Tabela 2 - Objetividade da malha**

Perfis	Dimensão do elemento mm <sup>2</sup>	$M_{Rk}$ kNm	$M_R / M_{R,ref}$	Tempo de processamento min
B600H160-1a	20x20	9,29	1,163	4,23
B600H160-1a	15x15	8,70	1,089	6,25
B600H160-1a	10x10	8,06	1,009	9,21
B600H160-1a	08x08	7,99	1,000	16,37

Fonte: Autor (2019)

### 5.3.1. Validação do modelo numérico

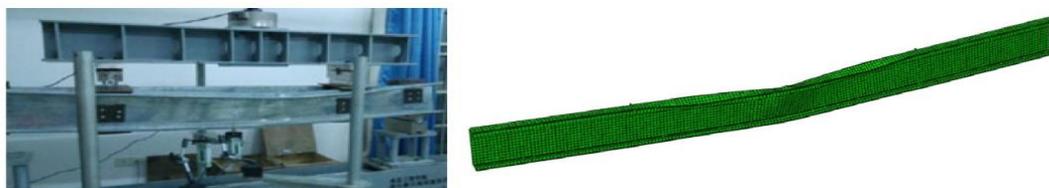
Para validação do modelo numérico foram modeladas 14 vigas de seção Ue com base nas características das vigas reais. Na Fig. 5 são mostrados os resultados obtidos das análises numéricas em comparação com os resultados experimentais. Nota-se que os resultados numéricos encontrados obtiveram valores menores que os experimentais, por ser conservador entende-se que o modelo numérico além de econômico é uma opção de análise segura. O erro ( $P_1$ ) definido como a relação entre o momento fletor experimental e o momento fletor da análise numérica, apresentou um valor médio de 1,06. O coeficiente de variação ( $V_{P1}$ ), desta relação foi de 2,74%. Esses resultados indicam que os modelos numéricos apresentam boa concordância com os modelos experimentais.



**Figura 9 - Comparação dos resultados experimentais e numéricos.**

Fonte: Autor (2019)

O perfil “B900H140-1a” representado na Fig. 6, demonstra que o perfil simulado numericamente apresentou o mesmo modo de colapso observado no modelo experimental.



**Fig. 10 - Comparação do resultado visual do mesmo perfil com procedimentos de análise distintos.**

Fonte: Yao e Guo, (2016) e Autor, (2019)

#### 5.4. ESTUDO DE VARIAÇÃO DE PARÂMETROS

O estudo de variação de parâmetros é realizado com a simulação de vários ensaios numéricos variando-se um ou alguns parâmetros, com a utilização do modelo numérico validado na seção anterior. No caso em análise, esses parâmetros estão relacionados à geometria do perfil, tendo como objetivo o estudo do modo de instabilidade distorcional. De acordo com a norma ABNT NBR 14762:2010, para barras de seção  $U_e$ , sob flexão simples em torno do eixo de maior inércia, esta verificação pode ser dispensada, se a relação  $D/b_w$  for maior ou igual aos valores da Tabela 3. Os modelos escolhidos para análise, foram encontrados realizando o procedimento inverso ao da verificação desta instabilidade.

**Tabela 3 -Valores mínimos da relação  $D/b_w$  de seções  $U_e$  e  $Z_e$  sob flexão simples em torno do eixo de maior inércia, para dispensar a verificação da flambagem distorcional.**

$b_w/t$	250	200	125	100	50
$b_f/b_w = 0,4$	0,05	0,06	0,10	0,12	0,25
$b_f/b_w = 0,6$	0,05	0,06	0,10	0,12	0,25
$b_f/b_w = 0,8$	0,05	0,06	0,09	0,12	0,22
$b_f/b_w = 1,0$	0,05	0,06	0,09	0,11	0,22
$b_f/b_w = 1,2$	0,05	0,06	0,09	0,11	0,20
$b_f/b_w = 1,4$	0,05	0,06	0,09	0,10	0,20
$b_f/b_w = 1,6$	0,05	0,06	0,09	0,10	0,20
$b_f/b_w = 1,8$	0,05	0,06	0,09	0,10	0,19
$b_f/b_w = 2,0$	0,05	0,06	0,09	0,10	0,19

Fonte: NBR 14762 (2010).

Na Tabela 4 são apresentados os resultados de momento fletor obtido da análise numérica ( $M_{MEF}$ ) e do momento fletor resistente pelo modelo analítico ( $M_{MRD}$ ). Verificou-se que a média do erro ( $P_2$ ),  $M_{MEF}/M_{MRD}$ , foi de 1,10 e o coeficiente de variação ( $V_{P_2}$ ) foi de 2,34%. O software utilizado para encontrar o momento crítico de flambagem utilizado no cálculo pelo MRD, foi o CUFSM.

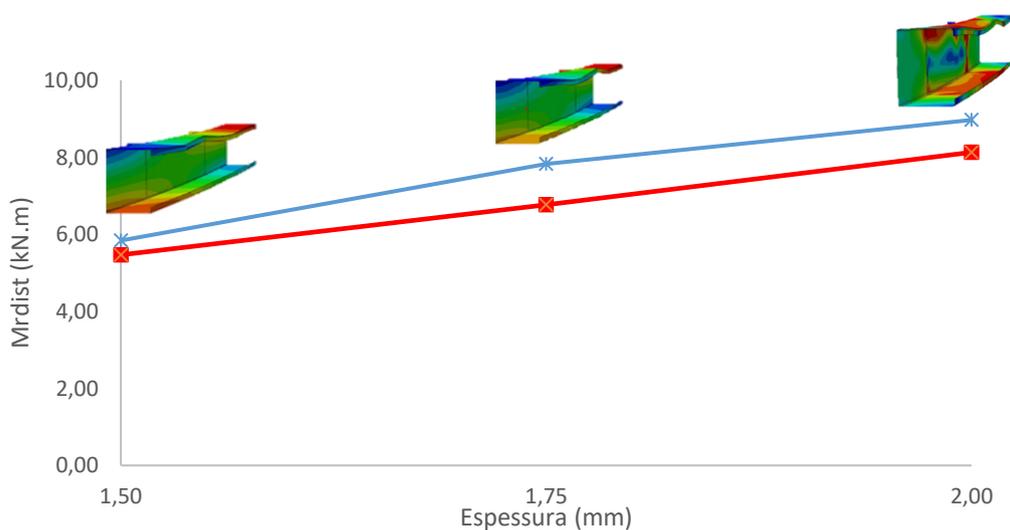
**Tabela 4 - Resultado do estudo da variação de parâmetros.**

Nomeclatura	$M_{MEF}$	$M_{MRD}$	$M_{MEF}/M_{MRD}$	Nomeclatura	$M_{MEF}$	$M_{MRD}$	$M_{MEF}/M_{MRD}$
150x90x15x1,5	5,47	5,84	1,07	190x90x15x1,75	8,83	9,72	1,10
155x90x15x1,5	5,64	6,21	1,10	195x90x15x1,75	9,11	10,01	1,10
160x90x15x1,5	5,88	6,33	1,08	200x90x15x1,75	9,35	10,25	1,10
165x90x15x1,5	6,03	6,79	1,13	205x90x15x1,75	9,60	10,46	1,09
170x90x15x1,5	6,27	7,01	1,12	210x90x15x1,75	9,89	10,77	1,09
175x90x15x1,5	6,46	7,26	1,12	215x90x15x1,75	10,17	10,93	1,08
180x90x15x1,5	6,65	7,49	1,13	220x90x15x1,75	10,39	11,35	1,09
185x90x15x1,5	6,89	7,66	1,11	225x90x15x1,75	10,70	11,57	1,08
190x90x15x1,5	7,07	7,94	1,12	150x90x15x2	8,13	8,97	1,10
195x90x15x1,5	7,29	8,17	1,12	155x90x15x2	8,57	9,12	1,06
200x90x15x1,5	7,51	8,34	1,11	160x90x15x2	8,73	9,37	1,07
205x90x15x1,5	7,73	8,69	1,12	165x90x15x2	8,88	9,92	1,12
210x90x15x1,5	7,89	8,89	1,13	170x90x15x2	9,17	10,01	1,09
215x90x15x1,5	8,12	9,20	1,13	175x90x15x2	9,29	10,37	1,12
220x90x15x1,5	8,35	9,10	1,09	180x90x15x2	9,53	10,51	1,10
225x90x15x1,5	8,51	9,62	1,13	185x90x15x2	9,87	10,64	1,08
150x90x15x1,75	6,77	7,83	1,16	190x90x15x2	10,13	10,98	1,08
155x90x15x1,75	7,01	8,05	1,15	195x90x15x2	10,37	11,09	1,07
160x90x15x1,75	7,26	8,35	1,15	200x90x15x2	10,61	11,35	1,07
165x90x15x1,75	7,57	8,57	1,13	205x90x15x2	10,89	11,98	1,10
170x90x15x1,75	7,82	8,82	1,13	210x90x15x2	11,16	12,13	1,09
175x90x15x1,75	8,01	9,14	1,14	215x90x15x2	11,56	12,34	1,07
180x90x15x1,75	8,28	9,35	1,13	220x90x15x2	11,98	12,98	1,08
185x90x15x1,75	9,04	9,57	1,06	225x90x15x2	12,62	13,45	1,07
						<b>Média:</b>	1,06
						<b>Coefficiente de Variação:</b>	2,70%

Observa-se através da Fig.7 que os resultados obtidos com as simulações numérica aproximam-se muito dos calculados com a Eq. 3, com o momento crítico sempre se elevando com o aumento da espessura do perfil, uma vez que esse aumento eleva substancialmente a rigidez lateral da alma. Nota-se que a capacidade resistente teórica obtida com o MRD para estes casos fica sempre inferior ao resultado numéricos, sendo um método mais conservador para o escopo deste trabalho.

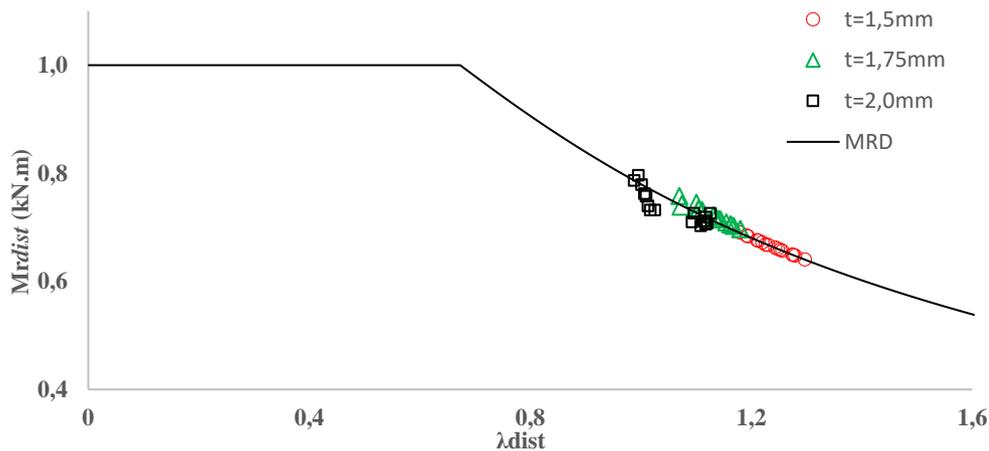
A variação da espessura também, não interferiu no modo de colapso. Como mostrado na Fig. 7, todos os perfis atingiram o estado limite de flambagem distorcional. A criação de modelos que fogem das relações expressas na Tabela 3 garantiu a ocorrência desse modo de colapso, observado na simulação numérica e confirmada com o modelo analítico MRD.

No gráfico da Fig. 8 são apresentados os resultados numéricos comparados à curva de resistência do MRD. Percebe-se que os perfis menos esbeltos (com chapas de menor espessura) apresentam concordância melhor com o método MRD, possivelmente, pelo fato de a influência das imperfeições iniciais nesse intervalo de esbeltez ser mais importante na capacidade resistente da viga.



**Fig. 11 - Resultados para variação da espessura dos perfis.**

Fonte: Autor (2019)



**Fig. 12 - Comparação dos métodos de dimensionamento variando a espessura.**

Fonte: Autor (2019)

## 5.5. CONFIABILIDADE ESTRUTURAL

O objetivo da análise da confiabilidade estrutural é a determinação do índice de confiabilidade, considerando as incertezas associadas às resistências e às ações. A teoria da confiabilidade estrutural baseia-se na modelagem probabilística dessas incertezas e fornece métodos para a determinação da probabilidade de as estruturas não atenderem aos critérios de desempenho.

Com métodos de confiabilidade estrutural, coeficientes de ponderação da resistência podem ser escolhidos para as equações de projeto, de modo a obter-se o mesmo nível de segurança de componentes estruturais projetados com mesma norma. Esse processo, incluindo a escolha do nível de confiabilidade desejado ou "índice de confiabilidade alvo", geralmente é entendido como calibração de norma. O processo de calibração de norma de PFF tem como base a teoria da confiabilidade formulada por vários pesquisadores (HSIAO, 1989; RAVINDRA E GALAMBOS, 1978).

Neste trabalho foi obtido um índice de confiabilidade para PFF sujeito à flambagem distorcional por flexão, empregando-se o método FORM (*First Order Reliability*

*Method*). Os valores característicos (nominais) das ações permanente ( $F_{G,k}$ ) e variável ( $F_{Q,k}$ ) definem a combinação última utilizada na análise:  $1,25 F_{G,k} + 1,5 F_{Q,k}$ , o coeficiente de ponderação da resistência adotado é  $\gamma_m = 1,20$  (ABNT NBR 14762:2010) e a razão de carregamento usual,  $\rho = F_{Q,k} / F_{G,k} = 5$ . Segundo Hsiao (1989) um componente estrutural em PFF de confiabilidade adequada é aquele cujo índice de confiabilidade é próximo ao valor alvo de 2,50. O índice de confiabilidade alvo  $\beta_o = 2,50$ , que representa uma probabilidade de falha ( $P_f$ ) de 0,621%, tem sido referência para a calibração da norma AISI S100 (2016).

A função de falha para análise de confiabilidade pode ser descrita em termos da resistência (R) e da sollicitação (S) de uma estrutura ou componente estrutural. A Eq. (4) descreve a função de falha na flexão em termos das variáveis momento resistente ( $M_R$ ) e o momento sollicitante ( $M_S$ ).

$$G(\cdot) = M_R - M_S \quad (6)$$

O momento resistente pode ser tratado como uma função de variáveis que refletem a incerteza do material (M), de fabricação ou geométrica (F), e do erro do modelo (P, do inglês *Professional Factor*). O momento sollicitante é uma função das variáveis das ações permanente ( $F_G$ ) e variável ( $F_Q$ ). Então, a função de falha na forma expandida pode ser expressa como:

$$G(\cdot) = M \cdot F \cdot P \cdot M_{Rk} - c(F_G + F_Q) \quad (7)$$

sendo  $M_{Rk}$  o momento fletor resistente característico, e  $c$  um coeficiente determinístico que transforma as ações em sollicitações (momento fletor).

Ellingwood *et al.* (1980) resumiram os dados estatísticos das variáveis aleatórias  $M$ ,  $F$ ,  $F_G$  e  $F_Q$ . De modo geral, as estatísticas do erro do modelo ( $P$ ) podem ser obtidas pela relação entre a resistência experimental e a calculada por uma equação de projeto. Desta forma, o erro pode ser obtido da Eq. 6.

$$P = \frac{M_{EXP}}{M_{MRD}} \quad (8)$$

Segundo Galambos (1998), é possível incorporar resultados de análise numérica, com o intuito de ampliar os dados estatísticos do erro do modelo ( $P$ ). O procedimento consta de duas etapas: (1) análise experimental para calibrar e validar o modelo numérico – nesta etapa define-se a variável  $P_1$ , de média  $P_{1m}$  e o coeficiente de variação  $V_{P1}$  e (2) análise numérica para verificar as equações teóricas (ou de projeto) – nesta etapa define-se a variável  $P_2$ , de média  $P_{2m}$  e o coeficiente de variação  $V_{P2}$ .

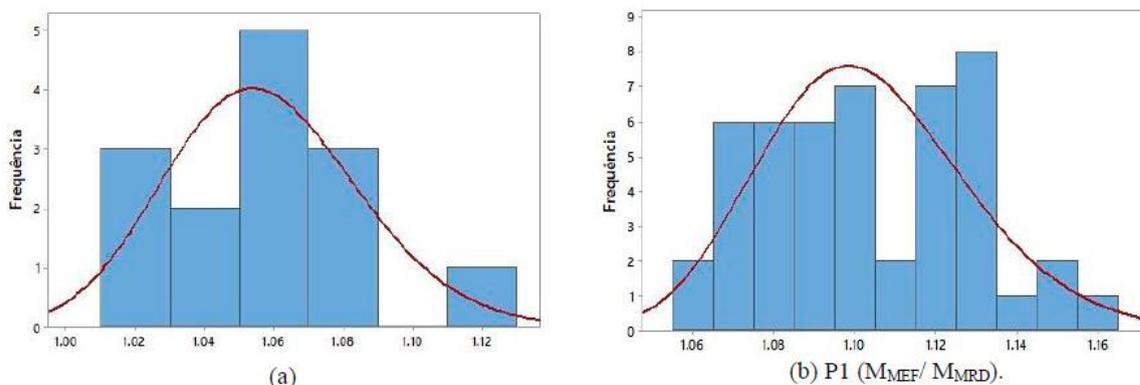
A aplicação do procedimento descrito por Galambos (1998) no presente trabalho, para obtenção da média  $P_m$  e do coeficiente de variação  $V_P$  podem ser resumidos pelas Eqs. 7 e 8.

$$P_m = P_{1m} \cdot P_{2m} \quad (9)$$

$$V_P = \sqrt{V_{P1}^2 + V_{P2}^2} \quad (10)$$

onde  $P_{1m}$  é a média da relação entre os valores experimentais e numéricos do momento fletor ( $M_{EXP}/M_{MEF}$ ) e  $P_{2m}$  é a média da relação entre os valores numéricos e analíticos do momento fletor ( $M_{MEF}/M_{MRD}$ ). Os dados estatísticos dos erros  $P_1$  e  $P_2$  estão descritos na seção 5. Das Eqs. 7 e 8 pode obter-se os valores de  $P_m = 1,17$  e  $V_P = 3,9\%$ .

Com os dados de  $P_1$  e  $P_2$ , foram realizados testes de Kolmogorov-Smirnov para prova de aderência, cujos resultados para um nível de significância de 5% mostraram que tanto a distribuição normal quanto a lognormal são adequadas. A Fig. 11 ilustra a sobreposição de curvas lognormal sobre os histogramas destas análises. Uma vez que a função de distribuição lognormal representa as amostras de  $P_1$  e  $P_2$ , foi considerado neste trabalho que a variável  $P$  também pode ser descrita também por uma lognormal.



**Fig. 13 - Distribuição de frequência e função densidade de probabilidade (lognormal) do erro (a) P1 (MEXP/MMEF) e (b) P2 (MMEF/MMRD).**

Fonte: Autor (2019)

Com o método *FORM*, utilizando-se os parâmetros estatísticos descritos, foi obtido um o índice de confiabilidade ( $\beta$ ) de 2,84, relativamente superior ao valor alvo de 2,5.

## 6. CONCLUSÃO

O objetivo deste trabalho, de desenvolver um estudo de variação de parâmetros para servir de base para estudos mais aprofundados de confiabilidade estrutural, foi atingido. Foi apresentado um estudo de perfis Ue sujeitos à flexão, utilizando análise de numérica e aplicação de equações de projeto do MRD. Um modelo de elementos finitos com não linearidades física e geométrica foi desenvolvido e validado com resultados experimentais.

A simulação numérica apresentada no presente trabalho mostrou-se concordante com os resultados obtidos experimentalmente: os resultados numéricos apresentaram valores médios de 6% inferiores aos dos resultados experimentais, mostrando-se um modelo favorável à segurança.

Um estudo paramétrico da variação da seção transversal foi realizado com o modelo numérico desenvolvido. A largura da seção e a dimensão da borda enrijecida foram fixadas em 90 mm e 15 mm. Os perfis foram modelados com espessuras de 1,50, 1,75 e 2,00 mm, e com altura que variou de 150 mm a 225 mm. Uma comparação da capacidade resistente dos perfis obtida a partir da

análise de elementos finitos e calculado pelo MRD foi apresentada. Os resultados da equação foram, em média, 10% inferiores aos resultados numéricos.

Utilizando o método FORM, obteve-se um índice de confiabilidade  $\beta = 2,84$ , superior ao índice de confiabilidade alvo ( $\beta_o = 2,5$ ). Pela análise de confiabilidade, demonstrou-se que a formulação do MRD é conservadora para o caso de flambagem distorcional na flexão.

## 7. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ABDI - Agência Brasileira de Desenvolvimento Industrial (2015). Manual da Construção Industrializada.

AISI S100 (2016). Specification for the design of Cold-Formed Steel Structural Members.

Bebiano R; Pina P; Silvestre N; Camotim D; (2008). Buckling and Vibration Analysis of Thin-Walled Members, DECivil/IST, Technical University of Lisbon, GBTUL.

De Paula, V. F. (2006) Análise Experimental e Numérica de Cantoneiras de Aço Formadas a Frio sob Tração e Conectadas por Parafusos. Tese (Doutorado) – Universidade de Brasília, Brasília – DF.

Ellingwood, B., MacGregor, J.G., Galambos, T.V., Cornell, C.A. (1980). Development of a Probability-Based Load Criterion for American National Standard A58 – NBS Special Publication, 577, National Bureau of Standards, United States Department of Commerce, Washington, D.C..

Galambos, T. V. (1998). Design Codes. Engineering Safety, McGraw-Hill, Inglaterra, pp. 47-71.

Hsiao, L.E. (1989). Reliability Based Criteria for Cold-Formed Steel Members. Ph. D. Thesis, University of Missouri-Rolla.

Javaroni, C.E. (2007) Sobre o dimensionamento dos perfis de aço formados a frio axialmente comprimidos.

NBR 14762:2010. (2010) Dimensionamento de Estruturas de Aço Constituídas por Perfis Formados a Frio.

Ravindra, M. K. e Galambos, T.V. (1978). Load and Resistance factor design for steel. Journal of the structural division, ASCE, vol. 104, 9, pp. 1337-1353.

Schafer, B. (2002) Local, distortional and Euler buckling of thin-Walled columns. Journal of Structural Engineering 128, p.289-299.

Schafer, B., Ádány, S. (2006) Buckling analysis of cold-formed steel members using CUFSM: conventional and constrained methods. 18th International Specialty Conference on Cold Formed Steel Structures, Orlando, Florida, 2006.

Souza, F. T. (2013) Análise Teórico-Experimental da Estabilidade de Colunas Perfuradas em Perfis de Aço Formados a Frio em Seções Tipo Rack. Tese de Doutorado, PROPEC – UFOP.

Yao, X; Guo, Y. (2016) Inelastic Test and Design Method of Cold-formed Steel Lipped Channel Members in Bending.





MINISTÉRIO DA EDUCAÇÃO  
Universidade Federal de Ouro Preto  
Escola de Minas  
Colegiado do Curso de Engenharia Civil – CECIV



## Declaração

Declaro para os devidos fins que o Colegiado do Curso de Engenharia Civil deferiu o pedido de aproveitamento de estudos, do discente William Douglas de Paula Lopes (20.1.1999), para a disciplina CIV191 – Trabalho de Conclusão de Curso II. Título do trabalho aprovado na forma de Trabalho de Conclusão de Curso: “Análise numérica de perfis formados a frio em seção U enrijecido susceptíveis à flambagem distorcional”.

Ouro Preto, 24 de junho de 2022

KATIA INACIO DA SILVA:039284496  
64

Assinado de forma digital  
por KATIA INACIO DA  
SILVA:03928449664  
Dados: 2022.06.24 15:40:31  
-03'00'

Profa. Kátia Inácio da Silva  
Presidente do CECIV