

UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO GRANDE DO SUL
ESCOLA DE ENGENHARIA
ENGENHARIA MECÂNICA

Trabalho de Diplomação

LUCAS TESTA PAULINO

**ESTUDO DE RESISTÊNCIA A FLAMBAGEM EM PERFIS FORMADOS A
FRIO**

Monografia apresentada ao Departamento de Engenharia Mecânica da Escola de Engenharia da Universidade Federal do Rio Grande do Sul, como parte dos requisitos para obtenção do diploma de Engenheiro Mecânico.

Orientadores: Prof. Dr. Ignacio Iturrioz
Prof. Dr. Gladimir de C. Grigoletti

Porto Alegre
2009



Universidade Federal do Rio Grande do Sul
Escola de Engenharia
Departamento de Engenharia Mecânica

ESTUDO DA RESISTÊNCIA A FLAMBAGEM EM PERFIS DE AÇO FORMADOS A FRIO

LUCAS TESTA PAULINO

**ESTA MONOGRAFIA FOI JULGADA ADEQUADA COMO PARTE DOS
REQUISITOS PARA A OBTENÇÃO DO DIPLOMA DE
ENGENHEIRO(A) MECÂNICO(A)
APROVADA EM SUA FORMA FINAL PELA BANCA EXAMINADORA DO
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA MECÂNICA**

**Prof. Paulo Otto Bayer
Coordenador do Curso de Engenharia Mecânica**

BANCA EXAMINADORA:

**Prof. Dr. Jun Sérgio Ono Fonseca
DEMEC / UFRGS**

**Prof. DR. Felipe Scheadler de Almeida
DEMEC / UFRGS**

**Prof. Dr. Juan Pablo Raggio Quintas
DEMEC / UFRGS**

**Porto Alegre
2009**

de modo especial, à Universidade Federal do Rio Grande do Sul pelo ensino gratuito e de qualidade.

AGRADECIMENTOS

Em primeiro lugar agradeço a toda a minha família pelo apoio e suporte durante todo o meu curso de graduação.

ao meu orientador, *Prof. Dr. Ignacio Iturrioz*, e ao meu co-orientador, *Gladimir Grigoletti*, pela excelente orientação oferecida desde o principio do trabalho.

aos professores *Rogério José Marczak* e *José Antônio E. Mazzaferro* que foram meus orientadores em projetos de Iniciação Científica e ajudaram muito em meu crescimento acadêmico.

ao meu avô, *Pedro Paulino*, e meu pai, *Ricardo Paulino*, que me ajudaram na construção dos corpos de prova para a realização desse trabalho

e ao departamento de Engenharia Mecânica da Universidade Federal do Rio Grande do Sul, *DEMEC*, pela estrutura oferecida.

Este trabalho contou com apoio das seguintes entidades:
- Laboratório de Mecânica Aplicada da UFRGS (Gmap);

Eficiência:
O difícil fazemos na hora,
o impossível demoramos um pouco mais.

PAULINO, L. T. **Estudo da Resistência a Flambagem em Perfis Formados a Frio**. 2009. 24p. Monografia (Trabalho de Conclusão do Curso de Engenharia Mecânica) – Departamento de Engenharia Mecânica, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2009.

RESUMO

A utilização dos perfis formados a frio vem aumentando de forma expressiva tanto na construção civil quanto na indústria mecânica. Com esse crescimento surge também uma necessidade de métodos de cálculo que auxiliem a avaliar corretamente seu desempenho estrutural. Nesse sentido, o presente trabalho propõe-se a fazer um estudo comparativo entre as cargas de colapso de um perfil U formado a frio sob compressão, analisando os mesmos experimentalmente, empregando o método das larguras efetivas e empregando o método da resistência direta. Para obtenção dos resultados analíticos utilizam-se ferramentas de análise computacionais de uso livre como o DimPerfil e o CUFSM. Os resultados experimentais foram bem diferentes dos resultados analíticos mostrando a ocorrência de alguma falha na realização dos ensaios ou na construção dos corpos de prova. Conclusões sobre a comparação dos resultados obtidos são apresentadas e discussões sobre as conclusões são apresentadas.

PALAVRAS-CHAVES: Perfis de Aço Formados a Frio, Compressão, Método da Resistência Direta, Método das Larguras Efetivas.

PAULINO, L. T. **Study of Buckling Resistance of Cold-formed steel members**. 2009. 24p. Monografia (Trabalho de Conclusão do Curso de Engenharia Mecânica) – Departamento de Engenharia Mecânica, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2009.

ABSTRACT

The use of cold-formed steel has increased significantly in both the standard civil buildings and mechanical industry. With this growth comes the need for calculation method which can help evaluate properly the structural performance of cold-formed steel members. In this sense, the present paper intends to make a comparative study among the critical buckling results of cold-formed steel channel members submitted to compression. To obtain the critical buckling are used experimental tests, effective width method and direct strength method. The analytical results are obtained using computational analysis tools such as free softwares DimPerfil and CUFSM. The experimental tests results were very different then the analytical results showing that there was a failure in the tests or in the construction of the specimens. Conclusions on the comparison of results obtained are presented and the discussions on the conclusions reached are presented.

KEYWORDS: Cold-Formed Steel, Compression, Direct Strength Method, Effective Width Method

SUMÁRIO

1. INTRODUÇÃO.....	1
OBJETIVO.....	1
ESTRUTURA DO TRABALHO.....	1
2. FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA.....	2
2.1. Flambagem.....	2
2.2. Modos de Flambagem.....	4
2.3. Comportamento Pós-Flambagem.....	5
2.4. Método das Larguras Efetivas.....	6
2.5. Método da Resistência Direta.....	6
3. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA.....	7
4. METODOLOGIA.....	8
4.1. Ensaio Experimental.....	8
4.2. Métodos Analíticos.....	10
5. APLICAÇÕES.....	11
5.1. Ensaio.....	12
5.2. Método das Larguras Efetivas.....	13
5.3. Método da Resistência Direta.....	14
6. DISCUSSÃO DOS RESULTADOS.....	15
7. CONCLUSÕES.....	17
8. REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....	18

ANEXO A – PROPRIEDADE DAS SEÇÕES.....	20
A.1. Barra A.....	20
A.2. Barra B.....	20
A.2. Barra C.....	21
ANEXO B – MÉTODO DAS LARGURAS EFETIVAS.....	21
B.1. Resultados Obtidos.....	22
ANEXO C – MÉTODO DA RESISTÊNCIA DIRETA.....	23
C.1. Resultados Obtidos.....	24

1. INTRODUÇÃO

As estruturas feitas de perfis de aço formados a frio podem ser usadas eficazmente em muitas aplicações onde a utilização de perfis de aço soldados ou laminados a quente não são econômicas. Uma maior economia na construção de estruturas com perfis de aço formados a frio (PFF) acontece pela alta relação inércia/peso que possuem, quando comparados com os perfis clássicos. Os PFF ainda possibilitam uma maior variedade de fabricação da seção transversal. Dentro deste cenário, sua utilização vem aumentando em larga escala, sendo utilizados tanto na construção mecânica quanto civil como, na construção de torres de transmissão, chassis de automóveis, estrutura de silos e outras estruturas industriais, estrutura de depósitos, edifícios residenciais por mencionar alguns exemplos.

Uma das características atrelada à leveza deste tipo de perfis é sua elevada esbelteza tornando-se muito suscetíveis a modos de instabilidade acentuados como flambagem (local, distorcional e global). Por isso a determinação da força resistente deste tipo de perfil está diretamente relacionada com a análise de estabilidade do mesmo. Para isso, é essencial que se identifique os modos críticos de flambagem e se calcule as suas respectivas forças críticas.

O Método da Resistência Direta (MRD), que ainda está em desenvolvimento aparece como uma boa opção de metodologia de cálculo. Aliado às pesquisas experimentais e teóricas em constante evolução, o MRD desponta como um método promissor, inclusive já fazendo em anexo na NBR 14762:2001, como um método alternativo ao Método das Larguras Efetivas, sendo este último o método clássico utilizado nas normas de cálculo para o dimensionamento de perfis de chapa dobrada.

O MRD (Schafer, 1997), necessita da determinação das cargas críticas de flambagem elástica global distorcional e local de todo perfil analisado. Para a obtenção destas cargas de flambagem elástica é possível utilizar métodos numéricos como o método dos Elementos Finitos (MEF), ou o Método das Faixas Finitas (MFF) (Cheung, 1988), método das Faixas Finitas Restringidas (MFFr) (Ádany e Schaffer, 2008), e a Teoria Generalizada de Vigas (GBT) (Camotin e Silvestrini 2007). Para a determinação das cargas críticas de flambagem global podem facilmente ser obtidas através de expressões analíticas clássicas disponíveis nas normas (ver, por exemplo, a NBR 14762:2001).

OBJETIVO

O presente trabalho tem como objetivo realizar um estudo comparativo entre as cargas de colapso obtidas experimentalmente e a determinada analiticamente pelo método da resistência direta e o método das larguras efetivas para um perfil de chapa dobrada a frio (U 60mmx30mmx1,20mm).

Para o MRD, por ser um método ainda em desenvolvimento e por não ter ainda o perfil U como uma seção pré-qualificada, procura-se também analisar o seu comportamento quando utilizado nos cálculos do perfil em estudo.

ESTRUTURA DO TRABALHO

Capítulo 1: introdução ao assunto e esclarecimento do objetivo do trabalho.

Capítulo 2: descrição e breve explicação dos fundamentos teóricos que se julgam fundamentais para um melhor entendimento do problema em estudo.

Capítulo 3: descreve de forma cronológica a evolução dos estudos relacionados ao assunto citando os principais pesquisadores e as teorias propostas pelos mesmos.

Capítulo 4: descreve as ferramentas utilizadas para execução do trabalho, tanto as ferramentas experimentais quanto as ferramentas analíticas. Nesse mesmo capítulo também podem ser encontradas as fontes bibliográficas utilizadas para realização do trabalho.

Capítulo 5: explica o problema físico estudado, as considerações feitas e apresenta os resultados encontrados para os ensaios e métodos analíticos.

Capítulo 6: discussão e análise dos resultados encontrados no capítulo anterior.

Capítulo 7: conclusões feitas e considerações sugeridas após a realização do trabalho.

Capítulo 8: referências bibliográficas utilizadas para realização do trabalho.

Anexo A: apresentação dos resultados das propriedades das seções calculadas.

Anexo B: descrição de cálculo e apresentação dos resultados obtidos através do método das larguras efetivas.

Anexo C: descrição de cálculo e apresentação dos resultados obtidos através do método da resistência direta.

2. FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

2.1. Flambagem

BARRAS

Flambagem é um fenômeno que ocorre em estruturas esbeltas (uma dimensão muito maior que as outras duas) sob compressão.

Considere uma barra de diâmetro D , submetida à compressão, se essa coluna tiver uma altura D , teoricamente suportaria uma carga que seria igual a sua tensão de escoamento, e não experimentaria nenhum tipo de instabilidade, agora, se essa mesma coluna tivesse uma altura igual a várias vezes seu diâmetro ela provavelmente suportaria uma carga menor do que a coluna curta, ou seja, flambaria.

Euler, solucionando um problema de uma viga em compressão a partir das equações diferenciais de equilíbrio, escritas para um estado deformado, determinou a carga crítica na qual a viga flambaria (Fig-2.1).

$$P_{crit} = \frac{\pi^2 EI}{l^2} \quad (2.1)$$

A Equação (2.1) é a carga na qual uma viga de comprimento l flamba elasticamente e esta equação foi determinada considerando os apoios rotulados. Porém na prática as vigas apresentam diferentes tipos de vinculações, sendo assim, a equação foi corrigida:

$$P_{crit} = \frac{\pi^2 EI}{(kl)^2} \quad (2.2)$$

Onde k é o coeficiente que leva em conta diferentes tipos de vinculações. Os valores de k podem ser encontrados em qualquer literatura sobre o assunto.

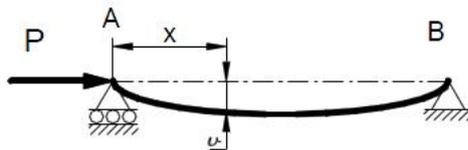


Figura-2.1.: Flambagem elástica de Euler.

PLACAS

Sob certas condições de carregamento os elementos de placa que compõem a seção de PFF podem flambar. A análise feita para obtenção da carga de instabilidade crítica é qualitativamente similar à feita por Euler para vigas, e essa carga depende da relação largura/espessura da placa, quanto menor a espessura menor a carga crítica de flambagem.

A carga crítica é deduzida a partir de uma placa apoiada em todo seu contorno considerando, que a placa é perfeitamente plana e as cargas são aplicadas estritamente na espessura média, nenhuma mudança na geometria ocorre durante a flambagem (flambagem linear) e as cargas são cargas mortas, ou seja, não mudam nem a magnitude nem a direção.

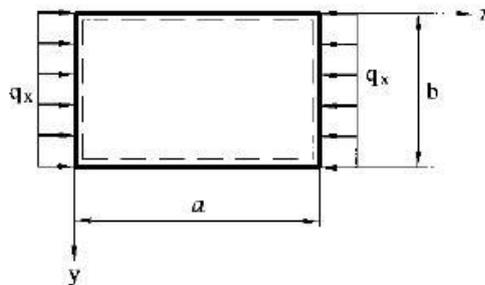


Figura-2.2 – Flambagem em placas.

Obtém-se, então, a carga crítica de flambagem elástica para placas Eq. (2.3).

$$f_{cr} = k \frac{\pi^2 E}{12(1-\nu^2) \left(\frac{b}{t}\right)^2} \quad (2.3)$$

Onde o valor de k , semelhante à teoria de flambagem em vigas, depende das condições de contorno da chapa.

2.2. Modos de Flambagem

Estão listadas abaixo as definições utilizadas pelas principais normas de PFF [NAS:2004, NBR-14762:2001, AS/NZS:2005] para identificar os modos de flambagem local, distorcional e global elásticos.

Flambagem local

Ocorre somente flexão do elemento (chapa) com as linhas de união dos elementos (chapas) adjacentes permanecendo retas, ou seja, não há translação dos pontos de união dos elementos que compõem o perfil. Este comportamento pode ocorrer, por exemplo, para perfis U sem enrijecedores de borda (figura-2.5). Este modo tem reserva pós-flambagem, ou seja, os componentes do perfil ainda possuem capacidade resistente após atingirem a tensão crítica de flambagem. A reserva pós-flambagem está associada a comprimentos de meia-onda menores ou iguais a maior dimensão da seção sob compressão.

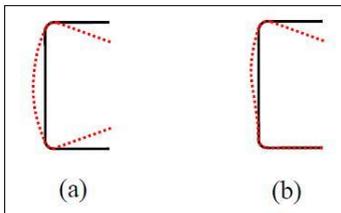


Figura-2.5: exemplos de flambagem local da seção transversal: a) Seção tipo U sob compressão uniforme, b) Seção tipo U sob flexão.

Os elementos planos que constituem a seção do perfil nas estruturas de chapa dobradas podem deformar-se (flambar) localmente quando solicitados à compressão axial, à compressão com flexão, ao cisalhamento, etc. Diferentemente da flambagem global de barras, a flambagem local não implica no fim da capacidade portante do perfil, mas, apenas uma redução de sua rigidez global.

Flambagem distorcional:

Neste caso há translação dos pontos de união dos elementos que compõem o perfil (figura-2.6). A distorção da seção provoca o deslocamento do conjunto de chapas que formam a mesa da seção, ou seja, dois elementos de chapas para as seções do tipo U ou Z enrijecido e três elementos de chapa para as seções do tipo “rack”.

Este modo tem uma moderada reserva pós-flambagem e está associado a comprimentos de meia-onda intermediários, ou seja, entre três e nove vezes a maior dimensão da seção (vide “Direct Strength Method (DSM) - Design Guide CF06-1, Committee on Specifications for the Design of Cold-Formed Steel Structural Members” da AISI, 2006).

Perfis sem enrijecedores de borda geralmente não tem a flambagem distorcional como crítica, sendo a flambagem local preponderante pelo fato do elemento comprimido (no caso mesa) possuir apenas uma borda apoiada.

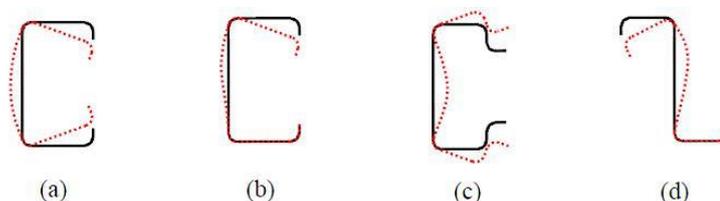


Figura-2.6: Exemplos de flambagem distorcional da seção transversal:

- a) Seção tipo U enrijecido sob compressão uniforme,
- b) Seção tipo U enrijecido sob flexão,
- c) Seção tipo rack sob compressão uniforme e
- d) Seção tipo Z enrijecido sob flexão

Flambagem global:

Há translação da seção transversal da barra sem distorção da seção, e pode ocorrer de três modos distintos:

- a) flambagem flexional da coluna (flambagem de Euler) como mostra o ponto E na figura-2.7;
- b) flambagem flexo-torcional da coluna como mostra o ponto D na figura-2.7; ou
- c) flambagem lateral com torção de vigas.

A flambagem global pode ser restringida por contraventamento lateral ou painéis conectados a mesa.

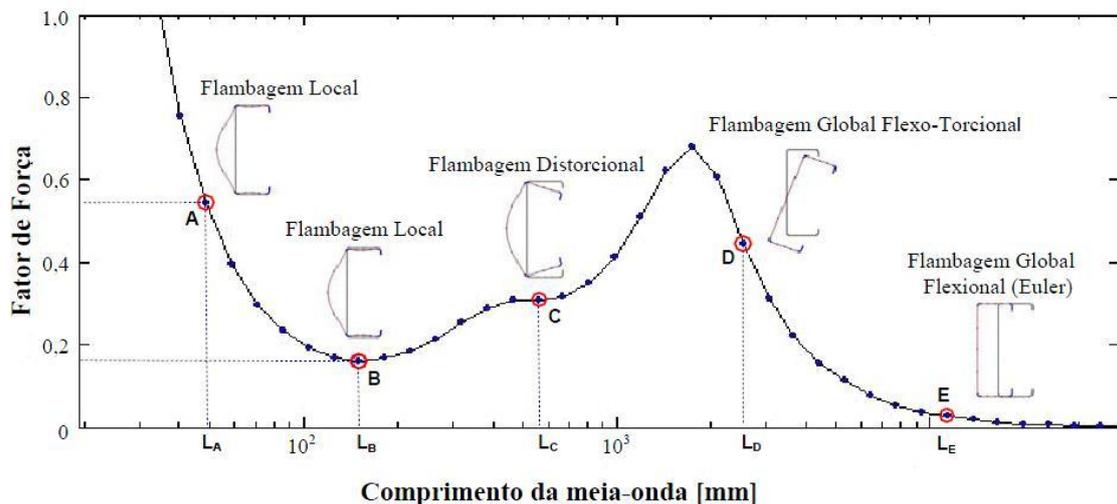


Figura-2.7: Gráfico tensão \times comprimento de meia-onda para uma barra sob compressão centrada.

O gráfico acima permite observar que o primeiro mínimo da curva (ponto B) corresponde à carga crítica para flambagem local e o segundo mínimo (ponto C) o ponto crítico para flambagem distorcional.

2.3. Comportamento Pós-flambagem

Ao contrário dos modos de instabilidade globais, a tensão crítica de chapa não caracteriza estado limite último. A solução deste fenômeno foi proposta inicialmente por Von Karman, em 1910, e é representada por um sistema de equações diferenciais de equilíbrio. Segundo Schafer (1997) as tensões críticas de flambagem elástica são, em geral, inferiores a tensão de escoamento do material nos perfis que apresentam grande índice de esbeltez.

O comportamento pós-flambagem (ou pós-crítico) pode ser visualizado na Fig. 2.8, em que a tensão na chapa permanece uniforme até se atingir a tensão crítica de flambagem (σ_{cr}). Em seguida, ocorre uma redistribuição não-uniforme até que a tensão nas bordas da chapa (região mais rígida) atinja a resistência ao escoamento (f_y), caracterizando o fim da capacidade resistente da chapa.

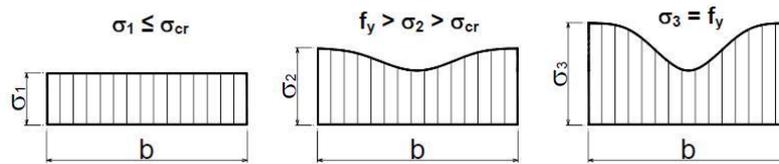


Figura-2.8: Estágios do comportamento de chapa com bordas apoiadas submetida à compressão uniforme.

De forma alternativa, foram estabelecidas expressões simplificadas para o tratamento das chapas em estado pós-crítico. Dentre estes métodos simplificados, o que teve maior aceitação foi o método das larguras efetivas (MLE).

2.4. Método das Larguras Efetivas

Método utilizado pelas normas ABNT NBR 14762:2001 e NAS:2004, proposto por Von Karman, em 1932, e posteriormente modificado e ajustado através de dados experimentais por Winter, 1944, considera a redução de rigidez da chapa por meio da substituição da chapa original de largura b por uma chapa de largura efetiva b_{ef} , sendo $b_{ef} < b$ (Figura-2.9).

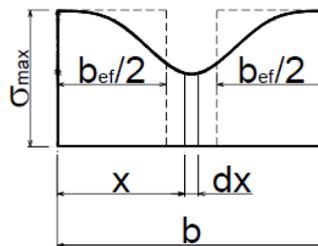


Figura-2.9: Largura efetiva em chapa com bordas apoiadas submetida à compressão uniforme.

O Método das Larguras Efetivas (MLE) é um método aproximado que analisa cada elemento (chapa) que forma a seção transversal de maneira isolada, porém levando em conta as condições de vizinhança com as outras chapas componentes do perfil.

O MLE consiste em diminuir as larguras dos elementos (chapas) que compõem as barras submetidas totalmente ou parcialmente a tensões de compressão e calcular, com as novas larguras, as novas propriedades geométricas da seção transversal. Com isso as propriedades geométricas efetivas do novo perfil são utilizadas para a análise, considerando-se com isso a resistência pós-flambagem dos elementos (chapas) e a interação entre os diferentes tipos de colapso (flambagem local - flambagem global; escoamento da seção - flambagem local) a que o elemento pode estar submetido (a ABNT NBR-8800:2008 usa a mesma metodologia para perfis laminados e soldados esbeltos).

O equacionamento, o roteiro de cálculo, bem como os resultados obtidos através do MLE para o perfil estudado serão mostrados mais detalhadamente no Anexo B do presente trabalho.

2.5. MÉTODO DA RESISTÊNCIA DIRETA

As normas de dimensionamento de estruturas de aço constituídas por perfis formados a frio, geralmente utilizam o tradicional método das larguras efetivas para avaliar a redução da força resistente de barras, devido à instabilidade local.

Em 1998 Schafer e Peköz apresentaram um novo procedimento de cálculo para esses perfis, o Método da Resistência Direta (MRD), que apresenta muitas vantagens em relação ao tradicional método das larguras efetivas.

O MRD considera a interação entre as chapas que compõem o perfil, o que não é feito no método das larguras efetivas, já que neste método cada chapa é analisada isoladamente. A análise é feita em relação às propriedades geométricas da seção bruta, não necessitando recalcular as propriedades da seção. Apresenta ainda a grande vantagem de permitir considerar explicitamente o modo distorcional.

Vale dizer que o MRD foi incorporado à NAS:2004 e à NBR 14762:2001 como um método de cálculo alternativo. Para o uso do método necessita-se fazer uma análise geral de estabilidade elástica, podendo-se utilizar para isso diversos métodos. Geralmente, são utilizados métodos numéricos tais como: faixas finitas, elementos finitos, e a teoria generalizada de vigas (GBT).

Para análise da estabilidade elástica (cargas críticas, modos de flambagem, etc.) do PFF foi utilizado o programa de uso livre CUFSM - Finite Strip Method – Cornell University, desenvolvido por Schafer, 1997 e 2001, que é baseado no método das faixas finitas [CHEUNG, 1988]. Maiores detalhes sobre o funcionamento desse programa serão abordados no Capítulo 4 deste trabalho.

O equacionamento, o roteiro de cálculo, bem como os resultados obtidos através do MRD para o perfil estudado serão mostrados mais detalhadamente no Anexo C do presente trabalho.

3. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

Segundo pesquisadores o estudo dos PFF iniciou em meados do século XIX e foram sendo intensificados até os dias atuais impulsionado pelo aumento do uso nas mais diversas áreas. As descobertas relevantes assim como os pesquisadores responsáveis são listados a seguir de forma cronológica:

1850: iniciaram-se os estudos dos PFF na Grã-Bretanha, mas com utilização restrita e sem informações técnicas sobre o comportamento estrutural dos mesmos.

1932: Von Karman propõe o método das larguras efetivas, posteriormente melhorado por Winter, 1944.

1939: iniciou-se efetivamente o estudo sobre perfis de chapa dobrada. Professor George Winter observou que o comportamento de instabilidade pode ocorrer por flexão, torção e ainda como uma combinação dos dois, flexo-torção. Os resultados desta pesquisa deram origem à primeira especificação técnica para elementos estruturais formados a frio que foi publicada pela AISI em 1946 utilizando o conceito de larguras efetivas.

1946: houve grande impulso na utilização de perfis formados a frio, não somente na indústria de construção civil, mas também em outros setores na indústria automobiliz e aeronáutica. Desde então, até 1996 varias especificações AISI foram publicadas, recentemente foi publicada a norma norte americana – North American Specification for the Design of Cold Steel Formed Structural Members, 2001 Edition, e também a edição comentada – Commentary on the Specification (2001), válidas nos Estados Unidos, Canadá e México.

1978: Takahashi foi pioneiro a publicar um artigo descrevendo o fenômeno de flambagem por distorção.

1997: Schafer aponta para o fato de que tensões críticas de flambagem elástica são, em geral, inferiores a tensão de escoamento do material, pela razão que estes apresentam grande índice de esbeltez.

1998: Schafer e Peköz propõem o método da resistência direta com o objetivo de contornar problemas encontrados no método proposto por Winter 1944.

Brasil:

1960: aumento na utilização de PFF com a aquisição de equipamentos como dobradeiras, prensas e mesas de roletes, por algumas empresas do setor metal mecânico. A inexistência de uma norma brasileira levou os projetistas a adotarem muitas vezes normas estrangeiras.

1997: a ABCEM (Associação Brasileira de Construção Metálica) juntamente com a USIMINAS, docentes de várias Universidades e profissionais do setor, uniram esforços para a elaboração de um texto-base para a norma brasileira. Após intensa pesquisa, buscando o embasamento teórico necessário e aliando a particularidades da construção metálica brasileira, permitiu-se a elaboração de um texto para a nova norma. O resultado de tal trabalho foi publicado a nova norma brasileira NBR 14762:2001 – Dimensionamento de Estruturas de Aço Constituídas por Perfis Formados a Frio.

2006: Chodraui atenta para o fato de que o fenômeno de instabilidade em perfis do tipo cantoneira é dominado pelo modo de flexo-torção, sendo errônea a idéia de se considerar a menor carga crítica elástica como referente à flexão e acrescenta também que, para barras mais curtas, o efeito de imperfeições geométricas exercem influência negativa nos resultados.

4. METODOLOGIA

4.1. ENSAIO EXPERIMENTAL

Construção dos corpos de prova: Os perfis dobrados foram comprados prontos e logo após soldou-se duas chapas quadradas (100mm x 100mm) nas suas extremidades para possibilitar a fixação no dispositivo de testes. Os corpos de prova foram construídos em três diferentes comprimentos: 150, 350 e 550 milímetros, sendo três amostras para cada comprimento totalizando nove corpos de prova. O perfil U possui medidas nominais conforme figura-4.1a e os corpos de prova prontos para o ensaio podem ser vistos na figura-4.1b.

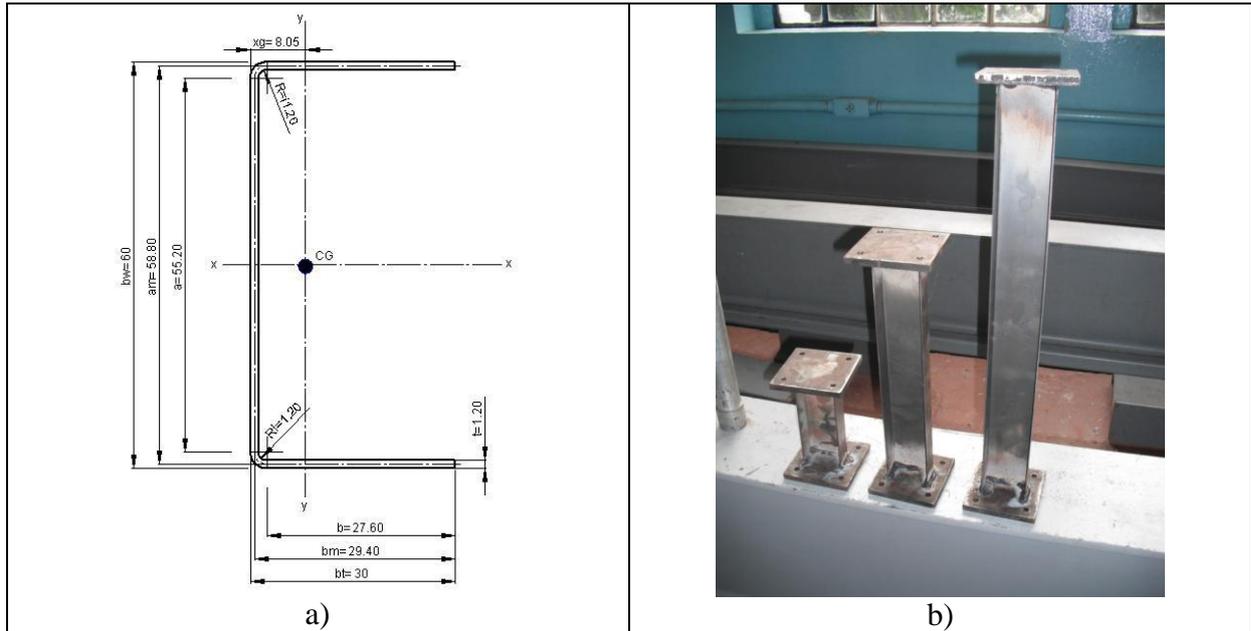


Figura-4.1: a) Dimensões nominais perfil U60x30x1,2 (nomenclatura das dimensões conforme norma NBR 6355:2003); b) Corpos de prova prontos para o ensaio.

Os perfis foram soldados nas chapas quadradas de forma que o centro de gravidade (ponto CG da figura-4.1a) do perfil ficou localizado no centro geométrico da chapa para possibilitar que após a montagem no dispositivo de testes a força seja aplicada no centro de gravidade do perfil.

Dispositivo de testes: O dispositivo de testes foi fornecido pelo Laboratório de Mecânica Aplicada da UFRGS (Gmap) que tem como objetivo principal restringir as possibilidades de rotação da peça somente a um eixo da seção do perfil e também fixar o corpo de prova ao pórtico de ensaio. Neste caso, os corpos de prova foram fixados de forma a possibilitar somente a rotação em torno do eixo yy (vide figura-4.1a), por este ser o eixo de menor inércia.

O dispositivo conta com quatro chapas quadradas, sendo duas dessas possuidoras de uma cunha metálica e uma terceira possui um furo no centro para possibilitar a fixação no cilindro hidráulico (figura-4.2).

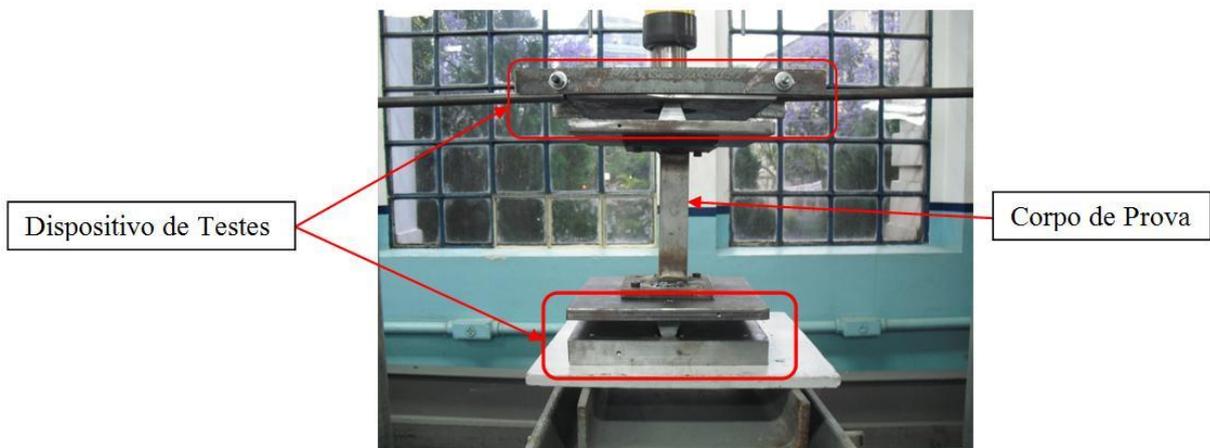


Figura-4.2: Dispositivo de Testes

Descrição da Bancada de Testes

Os testes foram realizados no Gmap onde há um pórtilco de estrutura metálica, especialmente montado para teste de compressão de barras e perfis como os testes realizados para este trabalho. Para os ensaios foram utilizados os seguintes equipamentos indicados na Tabela-4.1.

Tabela-4.1: Especificação dos equipamentos utilizados para realizar os ensaios nos perfis metálicos.

<ul style="list-style-type: none"> • <u>Célula de carga</u> <ul style="list-style-type: none"> - Marca: Transtec; - Tipo: N-500; - Escala Nominal: 0 até 10000Kgf; - Sensibilidade: 2mV/V; - Função: medir a carga aplicada no corpo de prova. 	<ul style="list-style-type: none"> • <u>Cilindro Hidráulico</u> <ul style="list-style-type: none"> - Marca: Enerpac; - Capacidade: 10000Kgf; - Função: aplicar a carga no corpo de prova.
<ul style="list-style-type: none"> • <u>Reservatório de Óleo Hidráulico</u> <ul style="list-style-type: none"> - Marca: Enerpac; - Tipo: Turbo II; - Função: fornecer óleo para o cilindro hidráulico e possibilitar o controle da carga aplicada pelo operador do ensaio sob o corpo de prova. 	<ul style="list-style-type: none"> • <u>Ar comprimido</u> <ul style="list-style-type: none"> - Fornecido pela rede de ar comprimido do laboratório; - Função: fornecer pressão para o reservatório de óleo hidráulico.
<ul style="list-style-type: none"> • <u>Instrumento de Painel Digital Micro-processado</u> <ul style="list-style-type: none"> - Marca/Modelo: Micropan PR-3945-TT - Variação: 0 a 10000Kgf. - Função: possibilitar a visualização da carga medida pela célula de carga (Figura-4.3). 	 <p>Figura-4.3</p>

A rede de ar comprimido alimenta o reservatório de óleo hidráulico que quando pressurizado possibilita a aplicação de carga pelo operador do ensaio através de um comando manual. Quando esse comando manual é acionado o cilindro hidráulico se movimenta e inicia a compressão do corpo de prova. A célula de carga mede a carga aplicada, e através de um cabo manda um sinal para o painel digital.

O Painel mostra não somente a variação da carga quando essa está sendo aplicada, mas também armazena a carga máxima (carga de pico) no final do ensaio após o colapso do corpo de prova.

Essa carga de pico que foi utilizada como resultado do ensaio para comparação com os resultados analíticos obtidos através das ferramentas descritas a seguir.

4.2. MÉTODOS ANALÍTICOS

Os cálculos analíticos foram feitos baseados nas especificações da norma NBR 14762:2001 (Minuta 6). Para o método das larguras efetivas foi utilizado um programa de uso livre chamado DimPerfil 1.1 para facilitar os cálculos. Já para aplicar o método da resistência direta que precisa da especificação das cargas de flambagem elástica dos perfis, estes últimos foram obtidos utilizando o CUFSM - Finite Strip Method proposto por Schafer.

DimPerfil: Programa de uso livre é parte integrante do livro “Dimensionamento de Perfis Formados a Frio conforme NBR 14762 e NBR 6255” que pode ser encontrado no website do CBCA – Centro Brasileiro de Construção em Aço (www.cbca-ibs.org.br).

O programa permite o cálculo de resistência dos perfis padronizados na norma NBR 6355 e também a composição de alguns deles através do método das larguras efetivas seguindo exatamente as especificações da NBR 14672.

O DimPerfil funciona basicamente para carregamentos de compressão centrada e fornece relatórios de cálculo tanto para o cálculo das larguras efetivas quanto para carga resistente que podem ser salvos em formato txt ou copiados e editados em qualquer outro editor de texto.

É importante observar que nesse trabalho o DimPerfil foi utilizado apenas para o cálculo das propriedades geométricas da seção e da área efetiva (método das larguras efetivas).

O cálculo resistente baseado no método das larguras efetivas feito pelo programa não foi utilizado, pois esse utiliza o roteiro de cálculo da versão primeira da norma e nesse trabalho optou-se por utilizar a revisão da norma NBR 14672, Minuta 6, maio de 2009.

CUFSM - Finite Strip Method: O CUFSM - Finite Strip Method – Cornell University, desenvolvido por Schafer, 1997 e 2001. O CUFSM (www.ce.jhu.edu/bschafer/cufsm) emprega o método das faixas finitas [CHEUNG, 1988] para a análise da estabilidade elástica de perfis com seções abertas. O programa pode ser aplicado livremente e é de fácil utilização.

Os dados de entrada são: geometria da seção transversal, propriedades elásticas do material, comprimentos de semi-onda a serem analisados e a distribuição de tensão. O programa faz a análise de estabilidade elástica e fornece uma curva que relaciona um “load factor” (relação entre a tensão crítica elástica e o valor da tensão de referência informado pelo usuário) com o comprimento de semi-onda.

Com isso, obtém-se a força normal relativa à estabilidade elástica para os modos local e distorcional (N_l e N_{dist}), necessários para o cálculo da força normal resistente.

5. APLICAÇÕES

A carga de colapso por flambagem de um perfil submetido a compressão é denominada pela NBR 14672:2001 como força normal de compressão resistente ($N_{c,rd}$). Buscou-se então calcular $N_{c,rd}$ utilizando três diferentes meios: ensaios experimentais, método da resistência direta e o método das larguras efetivas.

CONSIDERAÇÕES:

Para todos esses casos as condições de contorno consideradas no sistema foram as mesmas:

- Eixo x (conforme figura-4.1a): translação e rotação restringidas. Coeficiente de flambagem K_x igual a 0.5.
- Eixo y: translação restringida e rotação permitida. Coeficiente de flambagem K_y igual a 1.
- Eixo z: translação e rotação restringidas. Coeficiente de flambagem K_z igual a 0.5.

Considerando que o eixo y é o único que permite rotação no problema em estudo resolveu-se considerar o comprimento efetivo em relação ao eixo y ($K_y L_y$) como a distância total entre os vínculos e não somente o comprimento da barra como nos eixos x e z. Com isso todas as barras (A, B e C) sofrem um acréscimo de 10 cm no seu comprimento efetivo em relação ao eixo y.

As condições de contorno citadas acima podem ser melhor visualizadas na figura-5.1.

O aço utilizado para a construção dos perfis foi um SAE 1020. Este é um aço que não possui qualificação estrutural e pode ter uma variação bem grande da tensão de escoamento dependendo do processo de fabricação (laminado a frio ou a quente) e dos tratamentos térmicos impostos como recozimento, normalização, etc. Por ser um aço comercial, como é chamado, o fabricante não fornece as propriedades mecânicas do material, mas apenas a composição química do mesmo.

Segundo a norma NBR 14672:2001 a utilização de aços sem qualificação estrutural é tolerada se o aço possuir propriedades mecânicas para receber o trabalho a frio. A norma ainda diz que para esse mesmo aço não pode ser adotado valor superior a 180MPa para tensão de escoamento. Levando em consideração e dificuldade de se obter a tensão de escoamento correta para o material resolveu-se adotar o tensão de escoamento sugerida pela norma para os cálculos do MRD e MLE.

5.1. ENSAIOS

Pelos ensaios mecânicos pode-se obter a carga de colapso dos corpos de prova estudados. Foram testados três corpos de prova para cada comprimento de barra do perfil U (150mm, 350mm, 550mm).

Considerando as imperfeições no processo de dobra, a seção de cada barra foi medida antes dos ensaios utilizando um paquímetro com objetivo de utilizar para os cálculos as medidas reais de cada barra ao invés de uma medida nominal igual para todas as barras. Foi adotada uma média para a medida de cada corpo de prova nos diferentes comprimentos (tabela-5.1).

Tabela-5.1: dimensões medidas dos perfis U ensaiados

Barra	Base - b_w (mm)	Aba - b_f (mm)	Espessura - t (mm)
A (550mm)	62,60	30,08	1,25
B (350mm)	61,50	30,47	1,27
C (150mm)	60,73	30,47	1,30
Nominal	60,00	30,00	1,20

A carga de colapso foi obtida para os nove corpos de prova conforme tabela-5.2. A coluna “Desvio” mostra a porcentagem em que o valor da carga do respectivo corpo de prova difere da média calculada para a carga de colapso.

Tabela-5.2: Resultados dos ensaios – Carga de Colapso.

Barra A (550mm)			Barra B (350mm)			Barra C (150mm)		
	Carga (kN)	Desvio(%)		Carga (kN)	Desvio (%)		Carga (kN)	Desvio(%)
A1	14,80	15,81	B1	13,12	1,60	C1	17,81	8,42
A2	12,72	0,47	B2	13,67	5,86	C2	14,39	12,40
A3	10,82	15,34	B3	11,95	7,46	C3	17,08	3,98
Média	12,78		Média	12,91		Média	16,42	

Segunda a norma NBR 14762:2001, item 11 (Dimensionamento com base em ensaios), devem ser ensaiados no mínimo três corpos de prova idênticos, sendo que o desvio de um resultado qualquer em relação ao valor médio não pode ser maior que 15%. Sendo assim os corpos de prova A1 e A3 estariam fora das especificações da norma. Para situações como essa a norma sugere a realização de novos ensaios, sendo que a mesma diz que nenhum resultado pode ser desprezado.

Os corpos de prova deformados após os ensaios são apresentados na Figura 5.1.

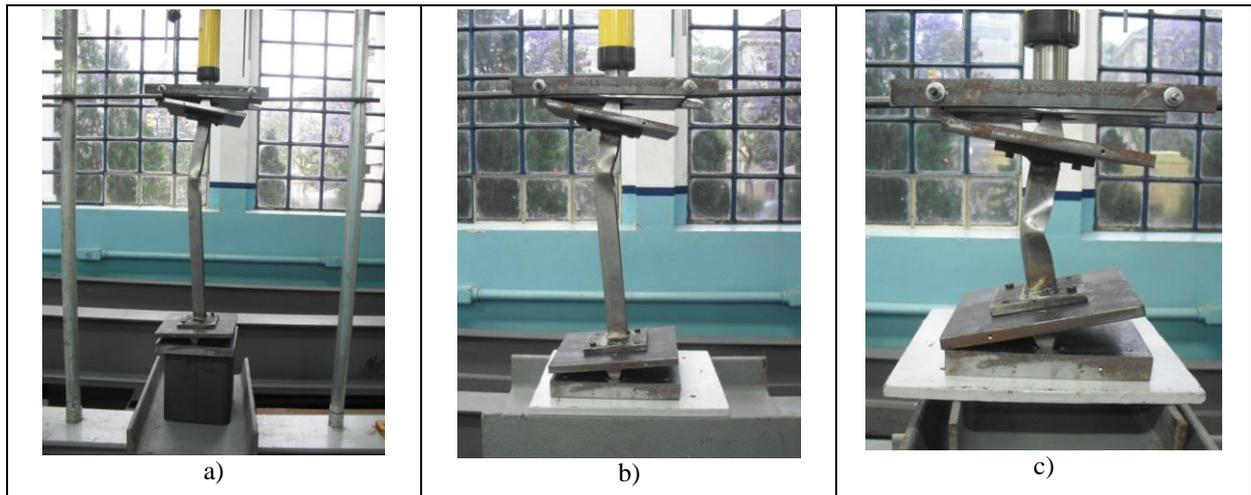


Figura-5.1: a) A3 após colapso; b) B2 após colapso; c) C1 após colapso.

5.2. MÉTODO DAS LARGURAS EFETIVAS

De acordo com as medidas apresentadas na tabela-5.1 foram calculadas as propriedades da seção para as barras A, B e C. Para o cálculo das propriedades da seção foi utilizado o programa DimPerfil já citado anteriormente. As tabelas com as propriedades das seções podem ser encontradas no Anexo A deste trabalho.

Os cálculos para obter a força normal de compressão resistente de cálculo ($N_{c,rd}$) foram realizados exatamente conforme especificações da NBR 14672:2001. O roteiro de cálculo não será apresentado nesse capítulo, mas pode ser encontrado no Anexo B deste trabalho.

Primeiramente calcula-se a força normal de flambagem N_e que será o menor valor entre N_{ex} , N_{ey} , N_{ez} e N_{exz} . Resultados conforme tabela abaixo:

Tabela-5.3: Cargas de flambagem global determinadas segundo expressões analíticas disponíveis na norma NBR 14672:2001

	N_{ex} (kN)	N_{ey} (kN)	N_{ez} (kN)	N_{exz} (kN)	Menor valor, N_e (kN)
A (550mm)	2386	62	270	260	$N_{ey}=62$
B (350mm)	5797	136	589	568	$N_{ey}=136$
C (150mm)	31318	449	2851	2852	$N_{ey}=449$

Sabendo que os valores de N_{ex} , N_{ey} , N_{ez} e N_{exz} representam a força de resistência do perfil de flambar em certa direção, então o menor valor entre estas grandezas representa como o perfil irá flambar. No caso da tabela-5.3 o menor valor em todos os casos foi N_{ey} (força normal de flambagem elástica por flexão em relação ao eixo y) o que nos permite afirmar que em todos os casos as barras irão flambar por flexão em relação ao eixo y.

Para podermos comparar os resultados calculados pelo método das larguras efetivas com os demais foi calculado o $N_{c,rd}$:

Tabela-5.4: $N_{c,rd}$ pelo MLE.

	A (550mm)	B (350mm)	C (150mm)
$N_{c,rd}$ (kN)	20,20	22,19	23,84

5.3. MÉTODO DA RESISTÊNCIA DIRETA

No método da resistência direta também foram usados os valores obtidos para as propriedades da seção obtidos anteriormente para o MLE pelo DimPerfil.

Assim como nos outros casos, no MRD busca-se a força axial de compressão resistente de cálculo $N_{c,rd}$. Para obter o $N_{c,rd}$ é necessário obter-se a força axial de compressão resistente $N_{c,Rk}$ que deve ser tomada como o menor valor calculado para a força axial de compressão resistente associado a flambagem global, local e distorcional, $N_{c,Re}$, $N_{c,Rl}$, $N_{c,Rdist}$, respectivamente.

Para o cálculo de $N_{c,Re}$, $N_{c,Rl}$ e $N_{c,Rdist}$ é necessário obter-se as forças axiais de compressão de flambagem elástica local, distorcional e global, N_l , N_{dist} e N_e , respectivamente para barras sob compressão centrada. No caso da flambagem global da barra, o valor obtido para N_e (tabela-5.3) no MLE é o mesmo da força axial de flambagem global elástica no MRD. Já as forças axiais de flambagem elástica local e distorcional, N_l e N_{dist} , devem ser obtidas através de uma análise de estabilidade elástica que neste caso foi feita através do programa CUFSM.

Na análise feita no programa CUFSM pode-se verificar que não ocorre flambagem distorcional no perfil estudado (perfil sem enrijecedores de borda) confirmando o que já havia sido mencionado na seção 2.2.

Os resultados obtidos para N_e e N_l são mostrados na tabela-5.5 e um exemplo de análise no CUFSM é mostrado na figura-5.2.

Tabela-5.5: Valores de flambagem local e global.

	Global	Local
	N_e (kN)	N_l (kN)
A (550mm)	62,45	32,80
B (350mm)	136,24	34,10
C (150mm)	449,28	36,58

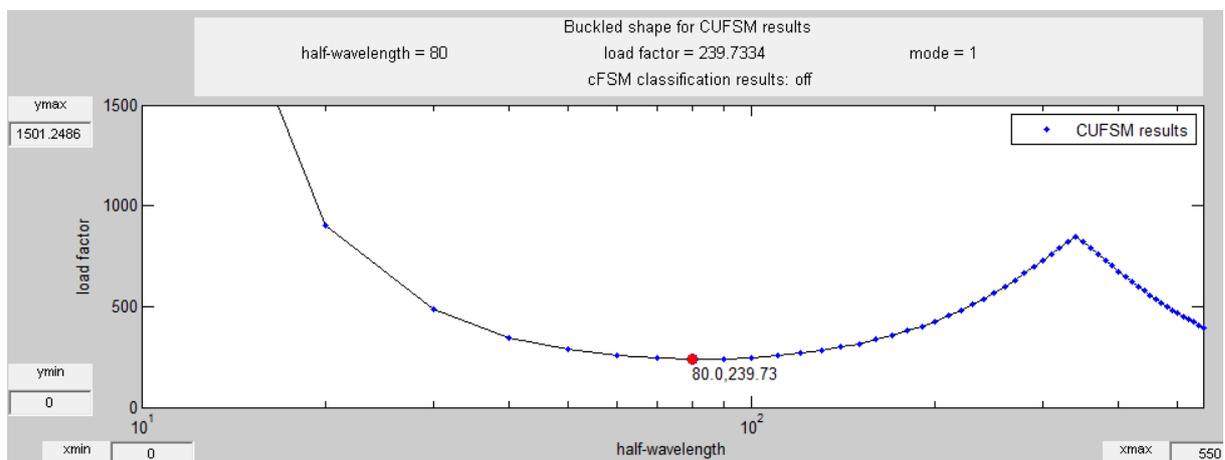


Figura-5.2: Análise da barra C no CUFSM. Fator de carga mínimo= 239MPa

Pela análise elástica utilizando o CUFSM pode-se obter os valores críticos (mínimos) de flambagem elástica. O primeiro mínimo corresponde ao valor crítico de flambagem local e o segundo de flambagem distorcional. Como se pode observar na figura-5.2, não ocorre um segundo mínimo na curva de meia-onda podendo assim afirmar-se que não ocorre flambagem distorcional no perfil analisado.

Por exemplo, para obter o valor de N_I para barra C através da análise de elasticidade no CUFSM (figura-5.2) basta multiplicar o fator de carga mínimo ($23,97\text{N/cm}^2$) pela área bruta da seção ($1,526\text{cm}^2$) que resulta em $36,58\text{kN}$, conforme tabela-5.5.

Após obter os valores para N_I e N_e foi calculado $N_{c,Re}$ e $N_{c,Rl}$.

O menor valor encontrado representará o modo de flambagem do perfil. Resultados conforme tabela-5.6.

Tabela-5.6: resultados para força axial resistente global e local

	Global	Local
	$N_{c,Re}$ (kN)	$N_{c,Rl}$ (kN)
A (550mm)	22,32	21,48
B (350mm)	24,88	23,42
C (150mm)	26,77	25,18

Observando a tabela-5.6 pode-se dizer que os perfis têm a tendência de flambar primeiro localmente.

Após os passos acima é possível adquirir o força axial de compressão resistente de cálculo $N_{c,rd}$ para os diferentes comprimentos do perfil:

Tabela-5.7: $N_{c,rd}$ pelo MRD.

	A (550mm)	B (350mm)	C (150mm)
$N_{c,rd}$ (kN)	21,48	23,42	25,18

6. DISCUSSÃO DOS RESULTADOS

Para facilitar a comparação dos resultados a tabela-6.1 mostra os resultados da força axial de compressão resistente $N_{c,rd}$ encontrados nos ensaios e pelo MRL e MRD em uma única tabela.

Tabela-6.1: Comparação de cargas de colapso experimentais e obtidas pelos dois métodos de análise utilizados.

Barra	MLE (kN)	Experimental (kN)	MRD (kN)
A (550mm)	20,20	12,78	21,48
B (350mm)	22,19	12,91	23,42
C (150mm)	23,84	16,42	25,18

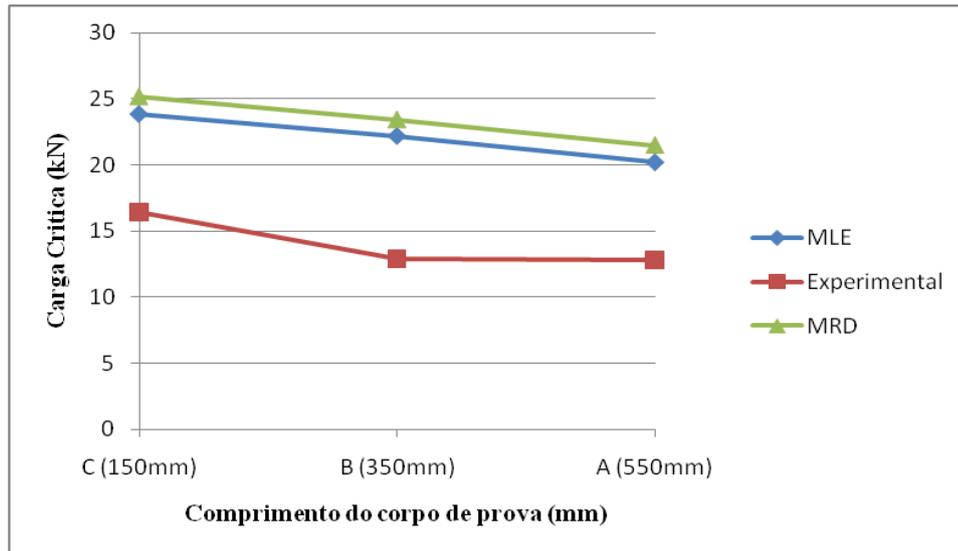


Figura-6.1: valores da tabela-6.1 representados graficamente

Os mesmos resultados são apresentados na Figura-6.1 onde é possível observar a concordância entre as cargas de colapso obtidas com as metodologias de análise. Por outro lado os resultados experimentais apresentaram muita diferença entre corpos de prova da mesma dimensão (diferença maior que 15%), indicando problemas na realização dos ensaios.

Realizando uma análise crítica das possíveis fontes de incerteza dos ensaios experimentais é possível citar:

- Pela baixa qualidade do material utilizado não se conhece o valor da tensão de escoamento de cada perfil o qual pode influir sensivelmente nos resultados
- Na figura-6.2 é possível observar que os corpos de prova sofreram uma torção durante o colapso ou não foram construídos de forma correta (chapas deveriam ser perfeitamente paralelas uma em relação à outra), introduzindo uma excentricidade inicial, diminuindo a carga de colapso esperada.

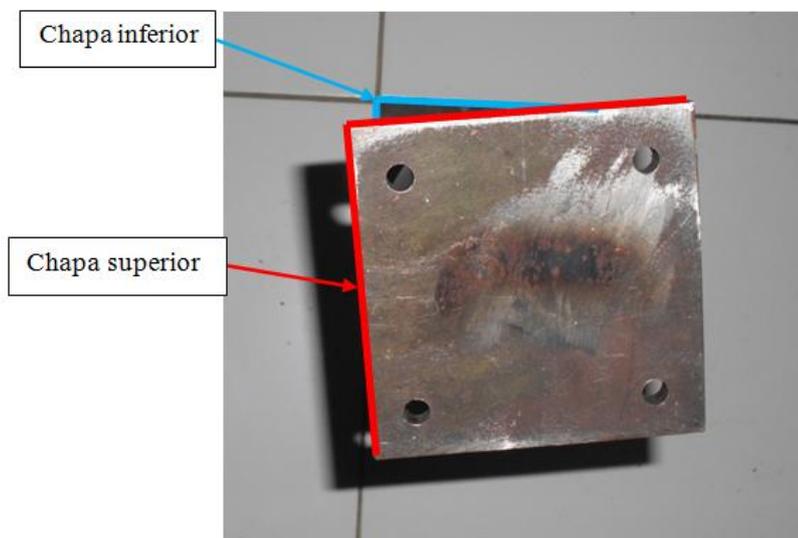


Figura-6.2: mostra a diferença de alinhamento entre as chapas superior e inferior do corpo de prova

- c) O modo de flambagem esperado era o de flexão e podemos ver nos ensaios que somente nos corpos de prova menores o colapso de flambagem local aconteceu mais próximo do meio da barra (onde por flexão as tensões seriam maiores) nos outros casos o colapso acontece nas proximidades dos apoios (figura-6.2) indicando uma excentricidade na carga axial aplicada.



Figura-6.3: diferença do local de falha ao longo do comprimento nos corpos de prova testados

7. CONCLUSÕES

Neste trabalho se realizou uma comparação em termos de cargas de colapso de perfis U submetidos a esforço normal centrado. Foram realizados ensaios experimentais e análise teórica utilizando o método das larguras efetivas e o método da resistência direta. Como produto do trabalho desenvolvido foi possível obter as seguintes conclusões:

- Os métodos teóricos utilizados apresentaram resultados compatíveis entre eles, sendo o método da resistência direta o de mais fácil utilização.
- Os resultados experimentais não se mostraram consistentes e permitiram observar a importância de ser cuidadosos na montagem do experimento. Também permitiu questionar se o tipo de vinculação que esta sendo utilizada é a mais adequada.

8. REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ÁDÁNY S., SCHAFER B.W., 2008. “**A full modal decomposition of thin-walled, single-branched open cross-section members via the constrained finite strip method**”. J of Contructional Steel Research, 64/1, pp 12-29.

AISI - American Iron and Steel Institute, 2004. “**NAS - North American Specification for the Design of Cold-Formed Steel Structural Members**”. Washington, DC.

AISI - American Iron and Steel Institute, 2007. “**NAS - North American Specification for the Design of Cold-Formed Steel Structural Members - Appendix 1, Design of Cold-Formed Steel Structural Members Using Direct Strength Method**”. Washington, DC.

AISI - American Iron and Steel Institute, 2006. “**Direct Strength Method (DSM) - Design Guide CF06-1, Committee on Specifications for the Design of Cold-Formed Steel Structural Members**”. Washington, DC. 170p.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS, 1986. **NBR-8800**: Projeto e execução de estruturas de aço de edifícios (método dos estados limites) - Procedimento. Rio de Janeiro.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS, 2001. **NBR-14762**: Dimensionamento de Estruturas de Aço Constituídas por Perfis Formados a Frio - Procedimento. Rio de Janeiro.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS, 2003. **NBR-6355**: Perfis Estruturais de Aço Formados a Frio - Padronização. Rio de Janeiro.

AUSTRALIAN/NEW ZEALAND STANDARD, 2005. **AS/NZS 4600**: Cold-formed Steel Structures. Sidney.

GRIGOLETTI, G., 2008. “**Otimização via algoritmos genéticos de perfis u formados a frio submetidos à compressão utilizando o método da resistência Direta**”. Dissertação (Doutorado em Engenharia) . Departamento de Engenharia Mecânica da UFRGS, Universidade Federal do Rio Grande do Sul. 184p.

GRIGOLETTI, G., ITURRIOZ, I. e CHAMBERLAIN, Z.M., “**Dimensionamento de perfis de aço formados a frio pelo método da resistência direta**”. Construção Metálica, Estudos e pesquisas recentes, Passo Fundo, Universidade de Passo Fundo Editora, 2005.

MAIA, W. F., 2008. **Sobre a estabilidade de cantoneiras de aço formadas a frio submetidas à compressão**. Dissertação (Mestrado) – Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Carlos, 182p.

SCHAFER, B.W., Ádány, S. “**Buckling analysis of cold-formed steel members using CUFSM: conventional and constrained finite strip methods**.” Eighteenth International Specialty Conference on Cold-Formed Steel Structures, Orlando, FL. October 2006.

SILVA, E.L. e SILVA V.P., 2008. “**Dimensionamento de perfis formados a frio conforme NBR 14762 e NBR 6355**”. Instituto brasileiro de siderurgia/Centro Brasileiro da Construção em Aço – CBCA. Rio de Janeiro. 119p (Série Manual de Construção em Aço).

SILVESTRE, N. e CAMOTIM, D., 2002. “**First-order generalised beam theory for arbitrary orthotropic materials**”. Elsevier, Thin-Walled Structures - Department of Civil Engineering, IST, Technical University of Lisbon, Lisbon, Portugal.

VAZQUEZ, E.G., 2002. “**Análise Teórica e Experimental da Instabilidade Torcional de Perfis Formados a Frio sob Compressão Centrada**”. Dissertação (Doutorado em Engenharia Civil). Departamento de Engenharia da UFRJ, Universidade Federal do Rio de Janeiro. 184p.

WINTER, G., 1944. “**Strenght of Slender Beams**”. ASCE Transactions, vol. 109, p. 1312.

ANEXO A – PROPRIEDADE DAS SEÇÕES

Este apêndice mostra em detalhes os valores das propriedades das seções calculadas para as Barras A, B e C.

Descrição das grandezas:

A – área bruta da seção

b_f – largura nominal do perfil

b_w – largura nominal da alma do perfil

C_w – constante de empenamento da seção

I_x – momento de inércia da seção bruta em relação ao eixo principal x

I_y – momento de inércia da seção bruta em relação ao eixo principal y

J – momento de inércia a torção uniforme

K – coeficiente de flambagem

$K_x L_x$ – comprimento efetivo de flambagem da barra em relação ao eixo x

$K_y L_y$ – comprimento efetivo de flambagem da barra em relação ao eixo y

$K_y L_y$ – comprimento efetivo de flambagem da barra por torção

L – comprimento da barra

r_o – raio de giração polar da seção bruta em relação ao centro de torção

t – espessura da chapa do perfil.

x_o – distancia do centro de torção ao centróide, na direção do eixo principal x

A.1. BARRA A

$A = 1,483 \text{ cm}^2$	$b_f = 3,008 \text{ cm}$	$b_w = 6,26 \text{ cm}$	$t = 0,13 \text{ cm}$
$C_w = 8,57 \text{ cm}^6$	$I_x = 9,142 \text{ cm}^4$	$I_y = 1,337 \text{ cm}^4$	$J = 0,008 \text{ cm}^4$
$K_x L_x = 27,5 \text{ cm}$	$K_y L_y = 65 \text{ cm}$	$K_y L_y = 27,5 \text{ cm}$	$r_o = 3,234 \text{ cm}$
$x_o = 1,842 \text{ cm}$			

Tabela-A.1

E importante ressaltar que o comprimento L da barra é 55cm mas foi considerado 10cm de acréscimo que correspondem a distância total aos vínculos que permitem a rotação do perfil em relação ao eixo y. Por isso o comprimento efetivo $K_y L_y$ é 65cm e não 55cm.

A.2. BARRA B

$A = 1,502 \text{ cm}^2$	$b_f = 3,047 \text{ cm}$	$b_w = 6,15 \text{ cm}$	$t = 0,127 \text{ cm}$
$C_w = 8,625 \text{ cm}^6$	$I_x = 8,994 \text{ cm}^4$	$I_y = 1,398 \text{ cm}^4$	$J = 0,008 \text{ cm}^4$
$K_x L_x = 17,5 \text{ cm}$	$K_y L_y = 45 \text{ cm}$	$K_y L_y = 17,5 \text{ cm}$	$r_o = 3,237 \text{ cm}$
$x_o = 1,887 \text{ cm}$			

Tabela-A.2

E importante ressaltar que o comprimento L da barra é 35 cm, mas foi considerado 10 cm de acréscimo que correspondem à distância total aos vínculos que permitem a rotação do perfil em relação ao eixo y. Por isso o comprimento efetivo $K_y L_y$ é 45cm e não 35cm.

A.2. BARRA C

$A = 1,526 \text{ cm}^2$	$b_f = 3,047 \text{ cm}$	$b_w = 6,073 \text{ cm}$	$t = 0,13 \text{ cm}$
$C_w = 8,534 \text{ cm}^6$	$I_x = 8,925 \text{ cm}^4$	$I_y = 1,423 \text{ cm}^4$	$J = 0,009 \text{ cm}^4$
$K_x L_x = 7,5 \text{ cm}$	$K_y L_y = 25 \text{ cm}$	$K_y L_y = 7,5 \text{ cm}$	$r_o = 3,221 \text{ cm}$
$x_o = 1,895 \text{ cm}$			

Tabela-A.2

É importante ressaltar que o comprimento L da barra é 15 cm, mas foi considerado 10 cm de acréscimo que correspondem a distância total aos vínculos que permitem a rotação do perfil em relação ao eixo y . Por isso o comprimento efetivo $K_y L_y$ é 25cm e não 15cm.

ANEXO B – MÉTODO DAS LARGURAS EFETIVAS

Os cálculos foram feitos baseados na revisão da ABNT NBR 14762:2001 (minuta 6 – maio 2009).

Para as propriedades do material foram adotadas as recomendações da norma citada acima, que são:

- $f_y = 180 \text{ MPa}$, tensão de escoamento do material;
- $E = 200000 \text{ MPa}$, módulo de elasticidade do aço;
- $G = 77000 \text{ MPa}$, módulo de elasticidade transversal do aço.

Para efeitos de comparação com o resultado obtidos nos ensaios e pelo MRD calcula-se a força axial de compressão resistente de cálculo $N_{c,Rd}$ que deve ser calculada por:

$$N_{c,Rd} = \chi A_{ef} f_y / \gamma \quad (\text{eq.-B.1})$$

onde:

χ é o fator de redução da força axial de compressão resistente, associado à flambagem global, calculado conforme indicado a seguir.

γ é o coeficiente de ponderação que nesse caso será igual a 1 para possibilitar a comparação dos resultados obtidos aqui com os resultados obtidos de forma experimental.

$$\text{- para } \lambda_0 \leq 1,5: \quad \chi = 0,625^{\lambda_0^2} \quad (\text{eq.-B.2})$$

$$\text{- para } \lambda_0 > 1,5: \quad \chi = \frac{0,877}{\lambda_0^2} \quad (\text{eq.-B.3})$$

λ_0 é o índice de esbelteza reduzido associado à flambagem global, dado por:

$$\lambda_0 = \left(\frac{A f_y}{N_e} \right)^{0,5} \quad (\text{eq.-B.4})$$

N_e é a força axial de flambagem global elástica.

A é a área bruta da seção transversal da barra.

A_{ef} é a área efetiva da seção transversal da barra, calculada com base no Método da Largura Efetiva (MLE), obtida através do programa DimPerfil, adotando $\sigma = \chi f_y$.

A força axial de flambagem global elástica N_e é o menor valor dentre os obtidos por a), b), c) e d):

a) força axial de flambagem global elástica por flexão em relação ao eixo principal x:

$$N_{ex} = \frac{\pi^2 EI_x}{(K_x L_x)^2} \quad (\text{eq.-B.5})$$

b) força axial de flambagem global elástica por flexão em relação ao eixo principal y:

$$N_{ey} = \frac{\pi^2 EI_y}{(K_y L_y)^2} \quad (\text{eq.-B.6})$$

c) força axial de flambagem global elástica por torção:

$$N_z = \frac{1}{r_0^2} \left[\frac{\pi^2 EC_w}{(K_z L_z)^2} + GJ \right] \quad (\text{eq.-B.7})$$

onde:

C_w é a constante de empenamento da seção;

E é o módulo de elasticidade;

G é o módulo de elasticidade transversal;

J é a constante de torção da seção;

$K_x L_x$ é o comprimento efetivo de flambagem global por flexão em relação ao eixo x;

$K_y L_y$ é o comprimento efetivo de flambagem global por flexão em relação ao eixo y;

$K_z L_z$ é o comprimento efetivo de flambagem global por torção;

r_0 é o raio de giração polar da seção bruta em relação ao centro de torção;

x_0 distância do centro de torção ao centróide, na direção dos eixo principal x.

d) força axial de flambagem global elástica por flexo-torção:

$$N_{exz} = \frac{N_{ex} + N_{ez}}{2[1 - (x_0 / r_0)^2]} \left[1 - \frac{4N_{ex}N_{ez}[1 - (x_0 / r_0)^2]}{(N_{ex} + N_{ez})^2} \right] \quad (\text{eq.-B.8})$$

B.1. RESULTADOS OBTIDOS

	A (550mm)	B (350mm)	C (150mm)
N_{ex} (kN)	2386,23	5797,26	31318,45
N_{ey} (kN)	62,45	136,24	449,28
N_{ez} (kN)	270,63	589,73	2951,08
N_{exz} (kN)	260,29	568,71	2852,11
N_e (kN)	62,45	136,24	449,28
λ_0	0,653	0,445	0,247
χ	0,836	0,920	0,974
σ (kN/cm ²)	15,05	16,56	17,54
A_{ef} (cm ²)	1,342	1,339	1,359
$N_{c,rd}$ (kN)	20,20	22,19	23,84
$N_{c,rd}$ (kgf)	2020,74	2219,02	2384,39

Tabela-B.1

ANEXO C – MÉTODO DA RESISTÊNCIA DIRETA

Os cálculos foram feitos baseados na revisão da ABNT NBR 14762:2001, Anexo C (minuta 6 – maio 2009).

Para as propriedades do material foram adotadas as recomendações da norma citada acima, que são:

- $f_y = 180\text{MPa}$, tensão de escoamento do material;
- $E = 200000\text{MPa}$, módulo de elasticidade do aço;
- $G = 77000\text{Mpa}$, módulo de elasticidade transversal do aço.

Para efeitos de comparação com o resultado obtidos nos ensaios e pelo MLE calcula-se a força axial de compressão resistente de cálculo $N_{c,Rd}$ que deve ser calculada de acordo com o roteiro que segue abaixo.

O valor característico da força axial de compressão resistente $N_{c,Rk}$ deve ser tomado como o menor valor calculado para flambagem global, local e distorcional, $N_{c,Re}$, $N_{c,RI}$, $N_{c,Rdist}$, respectivamente. A força axial de compressão resistente de cálculo $N_{c,Rd}$ é dada por $N_{c,Rk} / \gamma$, onde γ é igual a 1.0 para possibilitar a comparação com os resultados experimentais.

As forças axiais de compressão elástica local, distorcional e global, respectivamente para barras sob compressão centrada, N_l , N_{dist} , N_e devem ser calculados por meio de análise de estabilidade elástica. No caso da barra não apresentar um dos três modos de flambagem, basta que o cálculo do esforço resistente respectivo não seja levado em consideração.

No caso da flambagem global da barra, o menor valor obtido das equações B.5, B.6, B.7 e B.8 permite a obtenção do valor exato da força axial de flambagem global elástica, N_e . Para a obtenção dos valores críticos (valores mínimos) das forças axiais de flambagem elástica local e distorcional, respectivamente, N_l e N_{dist} , é necessário o uso de recursos de análise com base na teoria da estabilidade elástica. Para obtenção destes valores foi utilizado o programa CUFSM, citado anteriormente no Capítulo 4 deste trabalho.

Pode-se observar pelos resultados do CUFSM que o perfil estudado (perfis de seção aberta) não sofre flambagem distorcional, como já tinha sido mencionado no seção 2.2. Por esse motivo as equações para o cálculo da flambagem distorcional não serão incluídas nesse roteiro.

a) Flambagem Global

$$N_{c,Re} = (0,658^{\lambda_0^2}) Af_y \quad \text{para } \lambda_0 \leq 1,5 \quad (\text{eq.-C.1})$$

$$N_{c,Re} = \left(1 - \frac{0,877}{\lambda_0^2}\right) Af_y \quad \text{para } \lambda_0 > 1,5 \quad (\text{eq.-C.2})$$

$$\text{onde: } \lambda_0 = \left(\frac{Af_y}{N_e}\right)^{0,5} \quad (\text{eq.-C.3})$$

b) Flambagem Local

$$N_{c,RI} = N_{c,Re} \quad \text{para } \lambda_l \leq 0,776 \quad (\text{eq.-C.4})$$

$$N_{c,Rl} = \left(1 - \frac{0,15}{\lambda_l^{0,8}}\right) \frac{N_{c,Re}}{\lambda_l^{0,8}} \quad \text{para } \lambda_0 > 0,776 \quad (\text{eq.-C.5})$$

$$\text{onde: } \lambda_l = \left(\frac{N_{c,Re}}{N_l}\right)^{0,5} \quad (\text{eq.-C.6})$$

onde:

A é a área bruta da seção transversal da barra;

N_e é a força axial de flambagem global elástica;

N_l é a força axial de flambagem local elástica;

$N_{c,Rk}$ é o valor característico da força axial de compressão resistente;

$N_{c,Re}$ é o valor característico da força axial de compressão resistente, associado à flambagem global;

$N_{c,Rl}$ é o valor característico da força axial de compressão resistente, associado à flambagem local;

$N_{c,Rd}$ é a força axial de compressão resistente de cálculo;

λ_0 é o índice de esbeltez reduzido associado à flambagem global;

λ_l é o índice de esbeltez reduzido associado à flambagem local.

C.1. RESULTADOS OBTIDOS

	A (550mm)	B (350mm)	C (150mm)
Global			
N_e (kN)	62.45	136.24	449.28
λ_0	0.653	0.445	0.247
$N_{c,Re}$ (kN)	22.32	24.88	26.77
Local			
N_l (kN)	32.81	34.11	36.58
λ_l	0.8248	0.854	0.855
$N_{c,Rl}$ (kN)	21.48	23.42	25.18
$N_{c,rd}$ (kN)	21.48	23.42	25.18
$N_{c,rd}$ (kgf)	2148.24	2342.34	2517.95

Tabela-C.1