



SOFTWARE PECAD 07 PARA PROJETO DE ESTRUTURAS DE AÇO EM CHAPA DOBRADA A FRIO PELO MÉTODO DOS ESTADOS LIMITES SEGUNDO AS PRESCRIÇÕES DO AISI - EDIÇÃO DE 2007

Gabriel José Gonçalves Nobre

Rafael José Rabelo

José Humberto Matias de Paula

Marco Aurélio de Souza Bessa

gabrieljgnobre@gmail.com

rafabelo@hotmail.com

jhmatias2011@gmail.com

bessamarco@yahoo.com.br

Departamento de Engenharia Civil e Ambiental, UnB – Faculdade de Tecnologia, Campus Universitário Darcy Ribeiro, 70910-900, DF, Brasília, Brasil

Resumo: *Este trabalho apresenta os conceitos para o desenvolvimento da ferramenta computacional para dimensionamento de perfis de aço formados a frio: PECAD 2007 – Projeto de Elementos Estruturais de Chapa Dobrada a Frio. Baseia-se nas prescrições do código utilizado na América do Norte para projeto de perfis formados a frio: AISI/2007 - Standard-North American Specification for the Design of Cold-Formed Steel Structural Members, segundo o método dos Estados Limites (LRFD). O ambiente de programação adotado foi o C# desenvolvido pela Microsoft, com intuito de facilitar a continuidade do projeto. A escolha pela norma americana se deve, ao encabeçamento desta no desenvolvimento dos estudos de chapa dobrada, bem como servir como base para as demais normas do mundo, destacando a periodicidade de suas revisões, atualmente com intervalos de tempo menores que 5 anos. O PECAD 2007 apesar da função acadêmica e ser voltado para o ensino de estruturas de aço de chapa dobrada a frio, em cursos de graduação e pós-graduação, apresenta uma formatação amigável e usual, podendo ser utilizado em escritórios de projetos de engenharia, no Brasil.*

Palavras-chave: Método dos Estados Limites (LRFD), PECAD 07, C#

INTRODUÇÃO

Os perfis de chapa dobrada a frio há décadas são utilizados no mundo, desde a América do Norte, especialmente nos Estados Unidos, Reino Unido e Europa Continental, Ásia (destacando-se o Japão e a China) e Oceania (destaque para a Austrália). No Brasil, desde a década de 1970, o uso de perfis de chapa dobrada tem ganhado grande importância na construção civil, representando a grande maioria das estruturas leves no país.

Características relacionadas às ações meteorológicas, no Brasil, tornam os perfis formados a frio técnica e economicamente viáveis, tornando-se altamente competitivo. Assim, as velocidades moderadas de ventos, especialmente nas regiões geográficas centro-norte, ações sísmicas de baixa intensidade e, praticamente, ausência de cargas de neve, tornam os perfis dobrados altamente vantajosos para estruturas de galpões, coberturas, ginásios - estruturas leves em geral. Diante disso, é possível perceber que o uso de tais produtos no processo construtivo é até mais vantajoso do que nos Estados Unidos, Inglaterra e Europa, locais que regem o desenvolvimento técnico-científico de chapa dobrada.

Apesar de tratado muitas vezes de forma semelhante aos perfis laminados e soldados, a verificação da capacidade de resistência dos perfis de chapa dobrada, normalmente, é mais complexa. Isso em virtude dos perfis de chapa dobrada, normalmente, terem as suas seções compostas por paredes com esbeltez elevada, o que os leva a trabalhar em regime de resistência pós-flambagem, além da existência de seções transversais complexas.

Diante disso, o desenvolvimento de um software destinado ao auxílio do ensino de perfis de chapa dobrada a frio mostrou-se uma necessidade real. O primeiro software da família PECAD destinado a essa função, bem como comercial foi o PECAD/80. Desenvolvido na Universidade de Brasília (UnB) pelo professor José Humberto Matias de Paula ela se baseava no AISI/80 (o nome dos softwares PECAD sempre apresentam o ano da norma AISI referente), abordando o *Método das Tensões Admissíveis (ASD)* como meio para a análise de segurança dos cálculos de resistência, tendo versões posteriores sempre de acordo com a norma americana vigente. A última versão, antecessora ao PECAD 2007, foi o PECAD 1991, feito em 1995, o qual abordava o *Método dos Estados Limites (LRFD)* para o sistema operacional MSDOS Windows e escrito na linguagem de programação Turbo BASIC.

Como o intervalo entre o PECAD 1991 e o PECAD 2007 (sendo este desenvolvido 21 anos depois) fora muito grande, uma remodelação do layout do software bem como uma revisão geral dos métodos de cálculos abordados por ele e a linguagem de programação a ser utilizada fora feita. Sendo assim, a nova versão é baseada no AISI/07 em linguagem de programação C#.

A escolha do uso da linguagem C# para o desenvolvimento do PECAD 2007 está relacionada à estudos prévios de praticidade que ela representa, de forma a possibilitar melhoramentos e atualizações futuras. O primeiro ponto é o fato do C# possuir uma grande quantidade de materiais e cursos disponíveis online, tanto de usuários, como da própria empresa criadora, a Microsoft. Segundo, por ter se baseado nas linguagens de programação mais conhecidas no mundo (Java, Pascal C, C++, Smalltalk, Delphi e VB) a migração de alunos que já possuam familiaridade com programação se torna bastante fácil. Por fim, a escolha pelo AISI/2007 representa não apenas dar continuidade ao que já havia sendo feito nas versões anteriores, mas também possibilitar um contato constante com as novas tecnologias envolvendo os estudos de perfis de chapa dobrada a frio, bem como transmiti-las nos cursos de graduação e pós-graduação da UnB.

1 IMPLEMENTAÇÕES COMPUTACIONAIS

1.1 O Software e sua estruturação

O software PECAD 2007 é uma ferramenta computacional destinada a análise da resistência dos perfis de chapa dobrada a frio, para os diferentes tipos de solicitações: flexão, tração, cortante e flexão composta. Para isso ele conta com um banco de dados composto por quinze diferentes tipos de perfis que variam de perfis com paredes enrijecidas, paredes não enrijecidas, perfis tubos e compostos.

A ideia principal que regeu o desenvolvimento do PECAD 2007, para a análise de diferentes tipos de esforços, é a de resistência pós-flambagem em que as paredes esbeltas bidimensionais quando submetidos a compressão paralela ao plano não entram em ruína no estado de flambagem, comportamento este diferente do esperado em barras. Mesmo que o AISI/07 permita para alguns esforços uma análise baseada no início do escoamento, optou-se por fazer todas as análises seguindo o preceito de regime pós-flambagem. A Fig. 1 mostra o exemplo de uma parede enrijecida comprimida em que a distribuição de tensões deixa de ser uniforme após a flambagem e passa a ter a forma apresentada.

Na Fig. 1 (a), está representado o diagrama de tensões na parede quando a tensão crítica ainda não foi atingida (uniformemente distribuída). Se a tensão aumenta a um certo valor maior que a tensão crítica de flambagem, mas a um valor inferior à tensão de escoamento a redistribuição de tensões gera um diagrama apresentado na Fig. 1 (b). A Fig. 1 (c) apresenta o diagrama de tensões tal que a tensão atuante nas bordas da parede atingiu o valor da tensão de escoamento. Neste caso temos a pior situação admitida, visto que tensão de escoamento não deve ser ultrapassada.

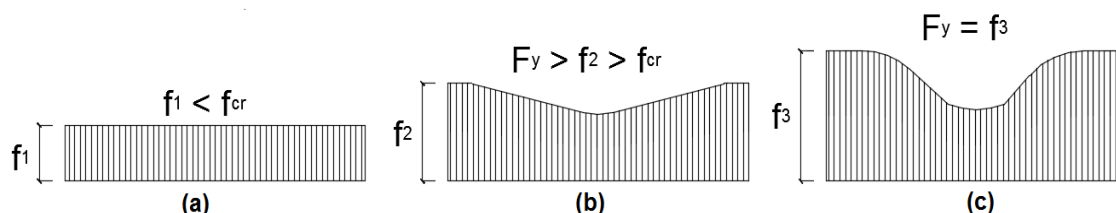


Figura 1. Distribuição de tensões após a flambagem

Diante disso a primeira etapa do desenvolvimento envolveu o agrupamento dos diferentes tipos de perfis utilizando o conceito de classe C#. Uma classe é um modo de representar um objeto composto por diferentes informações. Por exemplo, qualquer perfil deve possuir informações referentes ao comprimento da alma, espessura das paredes, comprimento da mesa e existência ou não de enrijecedor, bem como a partir desses dados, métodos de cálculo de outras propriedades geométricas e esforços a serem analisados.

Para evitar repetição, as classes podem ser agrupadas em classes mãe e classes filhas, de forma que os mesmos atributos e métodos que descrevem uma classe mãe estarão presentes em uma classe filha sem a necessidade de repetir a programação, fazendo apenas as devidas alterações necessárias. No software PECAD 2007 a principal classe mãe é a referente ao perfil C não enrijecido, ou seja, as demais classes são elaboradas a partir desta.

Após essa forma de estruturação da programação, o desafio foi organizar o layout do programa de forma que ocorresse a aceitação do software pelos usuários, dividindo-o em mecanismos visuais: formulário, relacionado ao pré-processamento dos dados (definição do tipo de perfil e suas propriedades geométricas), verificações, o qual representa um processamento intermediário de análise de esforços (nele já se pode visualizar as condições de resistência a uma dada solicitação) e por último um relatório, de fácil entendimento dos processos de cálculo.

1.2 Interface

Ao se abrir o programa, o usuário irá se deparar com o formulário, composto pelos 15 tipos de perfis associados, podendo ele escolher o perfil desejado pelo nome ou pela sua imagem associada. Feito isto, os dados referentes aos *Dados Iniciais da Seção* estarão liberados para o preenchimento. Dependendo do tipo de perfil algumas dessas caixas de preenchimento estará bloqueada, mesmo que o usuário tenha preenchido anteriormente com um valor, o qual não será utilizado nos cálculos. O software fornece alguns valores iniciais referentes as *Características do Aço*, no entanto não impossibilita que valores sejam dados segundo os interesses do usuário.

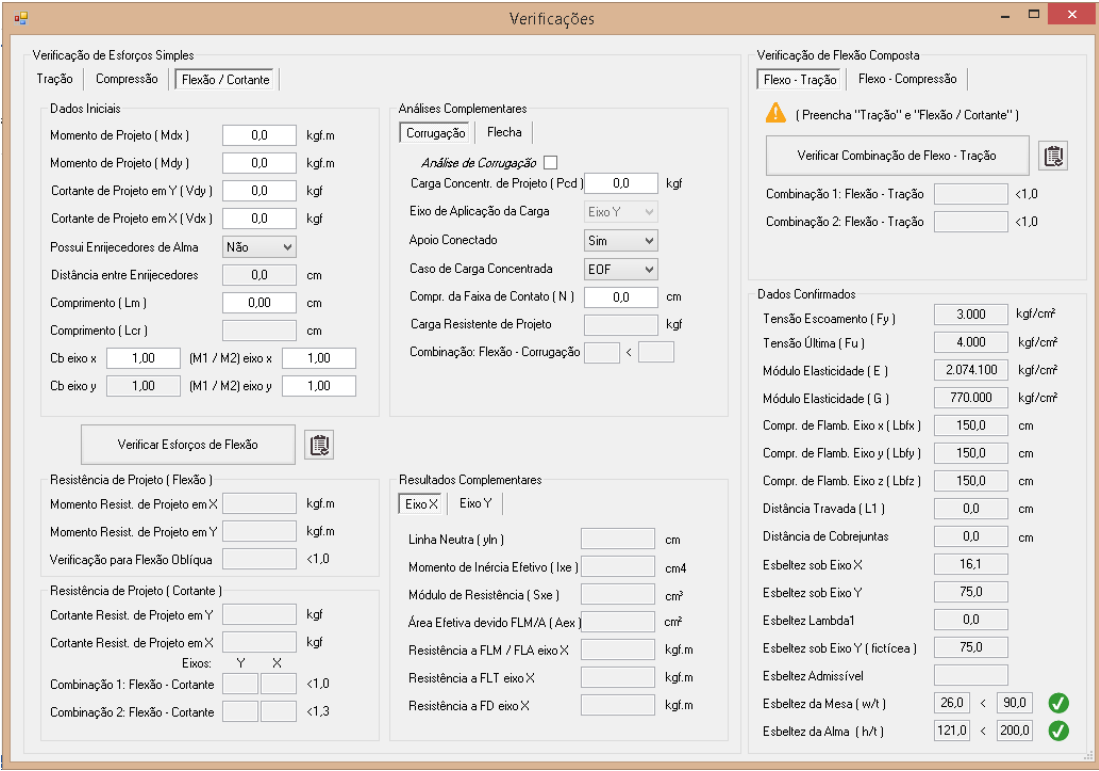
Definido os dados iniciais e clicado o botão *Calcular Propriedades Geométricas*, a área compreendida pelas *Propriedades Geométricas da Seção*, será preenchida automaticamente, ao mesmo tempo em que é liberado o botão *Confirmar Dados*. Esse botão está relacionado as áreas *Características do Aço* e *Dados Complementares*, os quais seus itens editáveis estão livres desde a primeira etapa de composição dos dados do perfil. Esta área compreende informações quanto à esbeltes do elemento estrutural escolhido, bem como as características do enrijecedor.

Figura 2. Formulário do PECAD 2007

Segundo o AISI/2007, para que um enrijecedor atenda as condições necessárias para o enrijecimento de uma parede, ele deve respeitar um mínimo momento de inércia. Dessa forma ele pode ser considerado curto ou longo, podendo ser necessário ou não estruturalmente para o perfil escolhido.

Ao apertar o botão *Verificações* um formulário com o mesmo nome será gerado indicando os diferentes tipos de esforços possivelmente analisados, permitindo comparar se o perfil escolhido será capaz de resistir a solicitação de interesse. É importante ressaltar que todas as solicitações devem ser fornecidas com o seu valor de projeto

No software, cinco são os símbolos que se destacam de forma a requerer atenção do usuário quando estiver manuseando-o. O primeiro é o símbolo , o qual representa que um resultado não está de acordo com os critérios da norma ou que a ruína do elemento pode vir a ocorrer devido a não conformidade com os critérios de segurança da mesma. O segundo símbolo, , representa o oposto do que fora declarada em relação ao primeiro, portanto irá representar a ideia de conformidade com os critérios da norma e de resistência. O símbolo  representa informações importantes que devem ser levadas em conta quando ocorre o preenchimento de uma caixa em questão. Já o símbolo  estará presente todas as vezes que uma caixa pode ser preenchida ou não. Caso o usuário opte por não preenche-la um valor conservador de norma será adotado. Por último tem-se o símbolo  responsável pela geração do relatório.



Verificação de Esforços Simples

Tração | Compressão | Flexão / Cortante

Dados Iniciais

Momento de Projeto (Mdx) 0,0 kgf.m
 Momento de Projeto (Mdy) 0,0 kgf.m
 Cortante de Projeto em Y (Vdy) 0,0 kgf
 Cortante de Projeto em X (Vdx) 0,0 kgf
 Possui Enrijecedores de Alma Não
 Distância entre Enrijecedores 0,0 cm
 Comprimento (Lm) 0,00 cm
 Comprimento (Lcr) cm
 Cb eixo x 1,00 (M1 / M2) eixo x 1,00
 Cb eixo y 1,00 (M1 / M2) eixo y 1,00

Análises Complementares

Corrugação | Flecha

Análise de Corrugação ☐
 Carga Concentr. de Projeto (Pod) 0,0 kgf
 Eixo de Aplicação da Carga Eixo Y
 Apoio Conectado Sim
 Caso de Carga Concentrada EOF
 Compr. da Faixa de Contato (N) 0,0 cm
 Carga Resistente de Projeto kgf
 Combinação: Flexão - Corrugação < >

Verificar Esforços de Flexão

Resistência de Projeto (Flexão)
 Momento Resist. de Projeto em X kgf.m
 Momento Resist. de Projeto em Y kgf.m
 Verificação para Flexão Obliqua <1,0
 Resistência de Projeto (Cortante)
 Cortante Resist. de Projeto em Y kgf
 Cortante Resist. de Projeto em X kgf
 Eixos: Y X
 Combinação 1: Flexão - Cortante <1,0
 Combinação 2: Flexão - Cortante <1,3

Resultados Complementares

Eixo X | Eixo Y

Linha Neutra (yln) cm
 Momento de Inércia Efetivo (Ixe) cm⁴
 Módulo de Resistência (Sxe) cm³
 Área Efetiva devido FLM/A (Aex) cm²
 Resistência a FLM / FLA eixo X kgf.m
 Resistência a FLT eixo X kgf.m
 Resistência a FD eixo X kgf.m

Verificação de Flexão Composta

Flexo - Tração | Flexo - Compressão

 (Preencha "Tração" e "Flexão / Cortante")

Verificar Combinação de Flexo - Tração 

Combinação 1: Flexão - Tração <1,0
 Combinação 2: Flexão - Tração <1,0

Dados Confirmados

Tensão Escoamento (Fy) 3.000 kgf/cm²
 Tensão Última (Fu) 4.000 kgf/cm²
 Módulo Elasticidade (E) 2.074.100 kgf/cm²
 Módulo Elasticidade (G) 770.000 kgf/cm²
 Compr. de Flamb. Eixo x (Lbfx) 150,0 cm
 Compr. de Flamb. Eixo y (Lbfy) 150,0 cm
 Compr. de Flamb. Eixo z (Lbfz) 150,0 cm
 Distância Travada (L1) 0,0 cm
 Distância de Cobrejuntas 0,0 cm
 Esbeltez sob Eixo X 16,1
 Esbeltez sob Eixo Y 75,0
 Esbeltez Lambda1 0,0
 Esbeltez sob Eixo Y (fictícia) 75,0
 Esbeltez Admissível
 Esbeltez da Mesa (w/t) 26,0 < 90,0 
 Esbeltez da Alma (h/t) 121,0 < 200,0 

Figura 3. Verificações do PECAD 2007



Figura 4. Relatório PECAD 2007

1.3 Comparações com o PECAD 1991

A primeira grande comparação é na própria linguagem de programação utilizada. Enquanto o PECAD 1991 foi desenvolvido em Turbo Basic, o PECAD 2007 foi programado em C#. Além disso, a outra grande alteração refere-se à própria interface dos programas, que apesar de arcaica, para a época, o PECAD 1991 mostrava-se bastante avançado principalmente quando referente aos métodos de cálculos, quando comparados com outros softwares nacionais.



Figura 5. Interface do PECAD 1991

Outras diferenças envolvendo os softwares estão relacionados a alguns métodos de cálculos, os quais foram alterados ou introduzidos no PECAD 2007. Essas alterações em sua grande maioria, estão associadas a mudanças que ocorreram nos AISI/96 e AISI/01, estão associadas à análise de capacidade do enrijecedor enrijecer uma parede, de forma a existir muitas vezes paredes parcialmente enrijecida, estabilidade local de perfis submetidos à compressão axial, as quais apresentam valores de resistência menores que os encontrados pelas equações originárias do AISI/91, no entanto se mostraram mais próximas da realidade o que permitiu valores de fatores de resistência maiores. Somados aos anteriores, houve a introdução de análise das regiões próximas à ligação submetidas à tração e a simplificação dos cálculos envolvendo corrugação da alma.

Por ser um software com caráter principalmente educativo e devido ao grande espaço de tempo que entre o desenvolvimento do PECAD 1991 e o PECAD 2007, a grande preocupação dos desenvolvedores era permitir que as próximas gerações que encabeçassem esse projeto tivessem facilidade em entender o que foi feito pelos antecessores. Para isso, a grande parte das linhas de programação trazem informações explicando como foi pensado e o que representam. Também é possível ver algumas áreas do programa que se encontram bloqueadas. Tais áreas tem como função servir para as melhorias do software, como por exemplo a introdução do aumento de resistência do trabalho a frio.

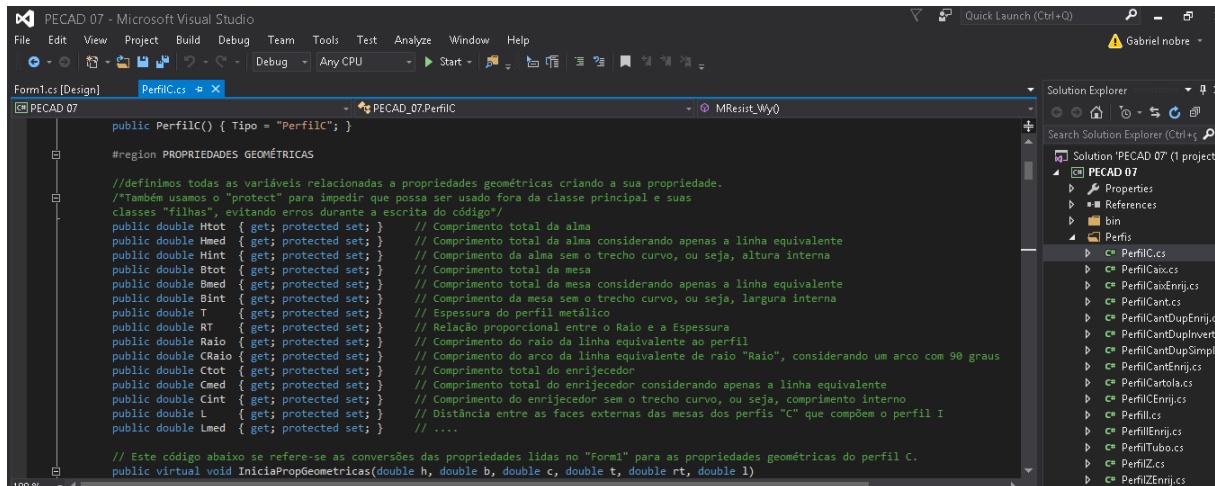


Figura 6. Método de programação com informações importantes associadas

2 APLICAÇÃO DO SOFTWARE

O exemplo a ser apresentado encontra-se presente no AISI - Cold Formed Steel Design Manual, o qual consta o passo a passo dos métodos de cálculo envolvidos para a análise de um perfil C enrijecido submetido a uma flexão-composta divididos nos exemplos I-1, I-8 e III-3, desde a definição das propriedades geométricas até a análise da condição da ação conjunta do momento e da compressão centrada. Além disso, os valores a serem apresentados serão expostos em unidades de medidas do SI e seus múltiplos semelhante aos valores do programa, apesar do exemplo ter sido desenvolvido, no manual, em unidades inglesas de engenharia. Dessa forma alguns dos valores apresentam uma pequena discrepância devido a conversão de valores de uma unidade para outra. A seguir, estão os dados relacionados ao exemplo:

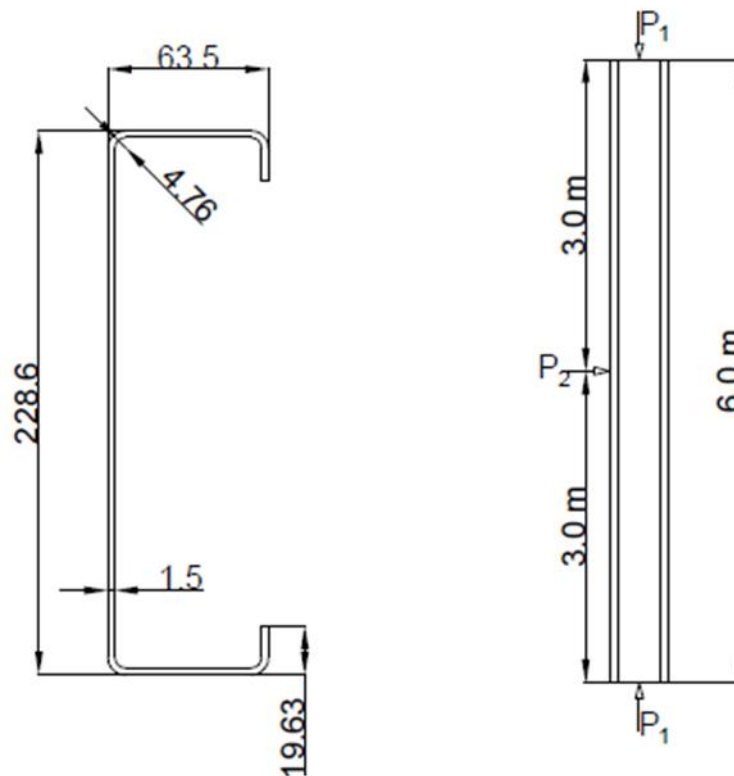


Figura 7. Perfil C enrijecido submetido à flexão composta

O perfil em questão equivale a um 9CS2.5x059 o qual encontra-se especificado no mesmo Manual em questão. Seu $F_y = 380$ MPa e $E = 203$ GPa, em que F_y é a tensão limite de escoamento e E representa o módulo de elasticidade. As cargas P_1 e P_2 são de projetos de forma que P_1 gera uma carga concentrada de 1690 Kgf nas extremidades, e o esforço gerado por P_2 é um momento $M_2 = 600$ kgf·m. Além disso, três simplificações foram definidas pelo Manual:

- 1) As extremidades encontram-se com apoios de segundo gênero;
- 2) Seção travada contra torção lateral, flexo-torção e flambagem distorcional
- 3) $K_x = 1.0$, $L_x = 6.0$ m;

O primeiro cálculo realizado pelo PECAD 2007 consiste na definição das propriedades geométricas do perfil escolhido a partir propriedades geométricas básicas definidas na Fig. 7. Nessa etapa, o cálculo é realizado pelo método linear, o qual substitui os elementos de área por segmentos de linhas retos e curvos, sendo a espessura t do perfil após o cálculo das propriedades geométricas da linha. Apesar do software calcular diferentes propriedades geométricas do perfil, por critérios de praticidade serão apresentados os valores que serão utilizados no exemplo. Dessa forma, os resultados foram:

Tabela 1. Propriedades geométricas do perfil 9CS2.5x059.

	Manual AISI/2007	PECAD 2007	Δ
$A_g(\text{cm}^2)$	5,68	5,69	0,18%
$I_x(\text{cm}^4)$	428,72	429,32	0,14%
$r_x(\text{cm})$	8,68	8,69	0,12%

Em que A_g é a área bruta do perfil, I_x o momento de inércia em relação ao eixo x (eixo simétrico da seção transversal do perfil) e r_x o raio de giração em relação ao eixo x.

Após calculado as propriedades geométricas com as características e o dados complementares, o PECAD 2007 analisa condições de esbeltez do perfil. Como o exemplo feito pelo Manual estabelece a condição 3 anteriormente citada, as únicas condições a serem verificadas são o comprimento de flambagem do perfil em relação ao eixo x e a capacidade do enrijecedor enrijecer completamente ou parcialmente a parede submetida à compressão. Diante disso, os comprimentos de flambagem em relação aos demais eixos são definidos com valores default muito pequenos de forma a evitarem possíveis erros de análise de cálculos. Com relação a análise do enrijecedor, o resultado fornecido pelo software refere-se apenas ao valor da tensão nominal do perfil submetido a uma compressão axial, não sendo o seu valor utilizado no cálculo da resistência do elemento submetido a outros esforços, ou seja, funciona como algo semelhante a um pré-dimensionamento.

Primeiramente, resolvendo a condição da compressão centrada do exemplo, percebe-se que a resistência do perfil escolhido é definida para uma situação de ruína por flambagem elástica de flexão (flambagem global) juntamente com uma flambagem local das paredes comprimidas do perfil. Os valores obtidos para a compressão axial são:

Tabela 2. Análise da compressão axial do perfil

	Manual AISI/2007	PECAD 2007	Δ
$A_e(\text{cm}^2)$	3,305	3,299	0,18%
I_s/I_a	0,614	0,61	0,66%
$P_u(\text{kN})$	73,05	72,95	0,14%

Na tabela anterior A_e representa a área efetiva do perfil, I_s/I_a é a razão do momento de inércia do enrijecedor em relação ao eixo que passa pelo seu centro de gravidade e paralelo a parede que está sendo enrijecida e o momento de inércia adequado do enrijecedor para que a parede comprimida possa se comportar como um elemento enrijecido. Já P_u é a carga resistente de projeto do perfil submetido a uma carga axial.

O PECAD 2007 fornece os valores da resistência para as demais possibilidades de ruína quando um elemento é submetido a uma compressão axial: flambagem por torção pura, flexo-torção, flexão em relação ao eixo y (eixo não simétrico da seção transversal do perfil) e flambagem distorcional, de forma a possibilitar ao usuário a validação dos cálculos realizados. Além disso, são calculadas duas áreas efetivas, uma considerada de projeto a qual representa a área efetiva para a máxima carga resistente de projeto e outra chamada de área efetiva de

escoamento, em que nesse caso usa-se a máxima tensão de escoamento para o seu cálculo servindo para demonstrar a resistência que o perfil teria caso o comprimento da barra não influenciasse na resistência.

Tabela 3. Análises complementares das resistências à compressão axial

Resultados Complementares PECAD 2007	
Flambagem por flexão no eixo x	72,948 kN
Flambagem por flexão no eixo y	91,908 kN
Flambagem por torção pura	91,908 kN
Flambagem por flexo torção	72,948 kN
Flambagem distorcional	183,824 kN

Tabela 4. Valores de áreas efetivas de projeto e de escoamento

Áreas Efetivas		
	$P_u(\text{kN})$	$A_e(\text{cm}^2)$
Compressão resistente de projeto	72,948	3,29
Compressão resistente de escoamento	91,908	2,84

Feita a análise da compressão axial tem-se a análise do elemento à flexão. Diante da Fig. 7 percebe-se que a carga P_2 está atuando apenas ao eixo x. dessa forma, os parâmetros de resistência relacionados aos demais eixos não foram considerados, visto que a condição 3 também influencia nas condições de resistência dos elementos submetidos à flexão. O software PECAD 2007 não fornece em seu relatório valores referentes à relação I_y/I_x (uma das implementações futuras é permitir que esse valor seja fornecido em seu relatório, nos diferentes tipos de esforços a serem analisados), sendo o processo semelhante ao que fora feito na etapa anterior.

O grande problema da análise de um elemento submetido à flexão é justamente identificar se um elemento está ou não enrijecido por um enrijecedor, o qual se deve ao fato AISI/2007 não trazer em seu conteúdo como analisar paredes parcialmente enrijecidas comprimidas à tensão gradiente (o item B4 refere-se apenas à análise de paredes parcialmente enrijecidas comprimidas submetidas à tensão uniforme). Por exemplo, no caso do perfil C representado pela Fig. 7, a solicitação do momento é feita em torno do eixo x, a mesa é suficientemente grande a ponto de ser possível considerar a alma enrijecida (o cálculo da área efetiva nessa situação é feita segundo o item B2.3 do AISI/2007) e a mesa comprimida encontra-se submetido a uma tensão uniforme ao longo de todo o seu comprimento. No entanto, em uma situação em que o momento esteja atuando em torno do eixo y de forma que os enrijecedores são submetidos a uma tensão de compressão constante, enquanto a mesa (no caso em questão a denominação mesa é apenas para manter a ideia de que é a parede com enrijecedor) encontra-se submetida a uma tensão gradiente, a norma não responde como agir diante dessa situação. Dessa forma, a escolha feita foi considerar o procedimento realizado para o caso de almas enrijecidas submetidas à tensão gradiente, visto o fato da esbeltez desta parede, em muitos casos, ser bastante inferior ao limite de norma, bem como os cálculos demonstrarem que perfis com apenas um eixo de simetria apresentam baixa resistência quando solicitados a momentos em torno do eixo y.

Os resultados do momento fletor são apresentados de forma perecida ao de compressão axial:

Tabela 5. Análise do momento fletor do perfil

	Manual AISI/2007	PECAD 2007	Δ
$I_{xe}(\text{cm}^4)$	382,1	382,357	0,07%
$S_{xe}(\text{cm}^3)$	30,97	30,97	0,00%
$M_u(\text{kNm})$	11,11	11,18	0,63%

Tabela 6. Análises complementares das resistências ao momento fletor

Resultados Complementares PECAD 2007	
Flambagem local da mesa/alma (eixo x)	11,18 kNm
Flambagem lateral por torção (eixo x)	11,18 kNm
Flambagem distorcional	12,84 kNm

I_{xe} é o momento de inércia efetivo do perfil em relação ao eixo x, S_{xe} representa o momento resistente efetivo em relação ao eixo x o perfil e M_u a resistência de projeto do perfil em questão. O PECAD 2007 traz também informações sobre a resistência ao momento fletor em relação ao eixo y, o qual fora desconsiderado devido a não ser requisito para a análise do exemplo em questão.

Por fim, tem-se a análise conjunta do momento fletor e da compressão centrada, ou seja a análise de flexão composta, a qual satisfazer as seguintes equações:

$$\frac{\bar{P}}{\varphi_c P_n} + \frac{C_{mx} \bar{M}_x}{\varphi_b M_{nx} \alpha_x} + \frac{C_{my} \bar{M}_y}{\varphi_b M_{ny} \alpha_y} \leq 1,0 \quad (1)$$

$$\frac{\bar{P}}{\varphi_c P_{n0}} + \frac{\bar{M}_x}{\varphi_b M_{nx}} + \frac{\bar{M}_y}{\varphi_b M_{ny}} \leq 1,0 \quad (2)$$

Em que $\bar{P}$ é a carga axial solicitante, $\bar{M}_x$ e $\bar{M}_y$ são os Momentos solicitantes em suas respectivas direções, φ_c e φ_b são os fatores de resistências à compressão e ao momento fletor, P_n , M_{nx} , M_{ny} são as resistências características dos perfis tanto à compressão centrada quanto ao momento fletor respectivamente. Dessa forma, os resultados para a flexão composta foram:

Tabela 7. Análise de flexão composta

	Manual AISI/2007	PECAD 2007	Δ
Eq. (1)	0,82	0,81	1,23%
Eq. (2)	0,77	0,72	6,94%

3 CONCLUSÃO

Voltado para implementação dos estudos de perfis de aço de chapa dobrada a frio, o software PECAD 2007 tem servido bem a esta função. Permite aos usuários uma visão ampla das necessidades e considerações que devem ser adotadas durante o desenvolvimento de projetos estruturais utilizando esses materiais. O mais importante, está no fato de possibilitar uma constante adequação do programa às novas normas do AISI devido a forma como foi construído o programa e sua linguagem de programação abordada.

REFERÊNCIAS

AISI S100-07-C, *Commentary on North American Specification for the Design of Cold Formed Steel Structural Members*.

AISI S100-07, *North American Specification for the Design of Cold Formed Steel Structural Members*.

AISI Manual, 2008, *Cold Formed Steel Design*, vol.1, pp. I-57 – I-60, I-84 – I-90, III-32 – III-35.

De Paula, J.H.M., 1995, *Projeto de Perfis de Aço de Chapa Dobrada a Frio*, Publicação Interna, UnB-FT-ENC, 297p.

Hancock, G.J, Murray, T.M, Ellifritt, D.S, *Cold Formed Steel Structures to the AISI Specification*, 1st ed. Marcel Dekker, Inc, NY, USA, 398 p.

Nobre, G.J.G e Rabelo, R.J (2016) Projeto de Estruturas de Aço em Chapa Dobrada a Frio pelo Método dos Estados Limites segundo AISI/2007-LRFD, *Monografia de Projeto Final em Estruturas*, Departamento de Engenharia Civil e Ambiental, Universidade de Brasília, 203 p.

Yu, W.W., *Cold Formed Steel Design*, 4th ed. John Wiley e Sons, NY, USA 491 p.