

Paulo Cavalcante Ormonde
 Prof. Dr., Universidade Federal de São Carlos – UFSCar,
 Departamento de Engenharia Civil-DECiv, autora4@ufscar.br

Software Educacional Livre para análise não-linear e dimensionamento de pórticos planos em estruturas metálicas

Neste artigo, serão demonstrados os recursos do software Educacional Livre TRAME 4.2, desenvolvido para uso em sala de aula e com foco nas disciplinas de projeto de estruturas metálicas. Também serão discutidos os conceitos, as vantagens e as principais possibilidades de uso de uma ferramenta computacional livre.

INTRODUÇÃO

É natural e notório o crescente interesse por parte de estudantes e profissionais pela construção metálica e pelos avanços alcançados por meio do uso do aço no mercado da construção civil brasileiro. A necessidade de programas de ensino que melhor abranjam o universo da construção metálica em cursos de graduação de Engenharia Civil traz consigo grandes desafios no âmbito educacional. Dentre estes desafios, destaca-se o avanço das normas de projeto que trazem novos e fundamentais conteúdos a serem inseridos dentro de um ensino qualidade.

O desenvolvimento de ferramentas educacionais que estimulem e possibilitem a integração dos conteúdos necessários ao ensino da elaboração de projetos em estruturas metálicas, coaduna-se com estas necessidades e desafios. Dificilmente um único software comercial ou educacional atenderá todas as necessidades pedagógicas e de projeto sem que lhe sejam introduzidas modificações ou complementos. Somente softwares de código livre, projetados para este fim, possibilitam tais adequações.

Dentro deste panorama, foi desenvolvido um programa computacional educacional de código livre, aqui denominado TRAME (criado em 2004 e atualmente na versão 4.2), que automatiza a análise não-linear geométrica e a classificação de pórticos planos em estruturas metálicas quanto à deslocabilidade. O programa integra, por meio de uma plataforma gráfi-

34 Construção Metálica

O conceito de software livre coaduna-se com os próprios princípios de construção e apropriação do conhecimento por parte da sociedade, democratizando as possibilidades de gerar inovação, muitas vezes restritas a grupos com uma determinada gama de conhecimentos. A proposição de se estimular o desenvolvimento de softwares educacionais no modelo de software livre visa permitir que as instituições de ensino, pesquisadores, professores e alunos possam adaptar os programas às suas necessidades pedagógicas e de pesquisa. Conseqüentemente, estimular um ambiente de maior cooperação, integração entre projetos e disciplinas.

Ao se tratar, no caso específico de programas de computador denominados livres, é importante destacar o que significa este conceito baseado em quatro liberdades fundamentais da Fundação do Software Livre (Free Software Foundation)², criada em 1985 e que define se um software é livre ou não. Com base no estudo de Falcão et al (2005) são elas:

- A liberdade de executar o programa para qualquer propósito;
- A liberdade de estudar como o programa funciona e de adaptá-lo às suas necessidades. O acesso ao código-fonte é uma condição prévia para o exercício dessa liberdade;
- A liberdade de redistribuir cópias, de modo que você possa auxiliar outras pessoas;
- A liberdade de aperfeiçoar o programa e distribuir esses aperfeiçoamentos para o público, de modo a beneficiar toda a comunidade. O acesso ao código-fonte é também uma condição prévia para o exercício dessa liberdade.

Não existindo norma ou critérios específicos de software educacional para análise e projeto de estruturas, procurou-se traçar um panorama das aplicações disponíveis gratuitamente na internet, utilizadas nesta área e de possível aplicação educacional.

Na Tabela 1, apresenta-se o resumo dos softwares pesquisados com destaque aos aspectos considerados mais relevantes à proposta de software educacional livre.

Na versão TRAME 4.2, os recursos de dimensionamento estão sendo inseridos por meio de calculadoras e a documentação constantemente atualizada por meio de vídeos e tutoriais inseridos na internet.

³www.fsf.org

ca interativa, as etapas de pré-processamento, processamento e pós-processamento.

A classificação da estrutura quanto à deslocabilidade é realizada pelo programa com base no método simplificado (B1 e B2) de classificação e amplificação de esforços, proposto pela NBR 8800:2008, que define as estruturas como sendo de pequena, média e grande deslocabilidade. Adicionalmente foi implementado o cálculo do coeficiente Gama-Z, segundo a norma NBR 6118:2007, objetivando a rápida comparação.

O programa também é resultado de uma pesquisa de mestrado orientada pelo Prof. Dr. Alex Sander Clemente de Souza, no ano de 2013. Utilizado pelo autor desde o ano de 2007 nas disciplinas de estruturas metálicas dos cursos de graduação em que leciona, em especial na Faculdade MetroCamp de Campinas, tem sido objeto de diversos trabalhos de conclusão de curso.

SOFTWARES EDUCACIONAIS NO ENSINO WDE ENGENHARIA DE ESTRUTURAS

Para que um software seja considerado educacional, ele deve ser preferencialmente livre, permitindo o desenvolvimento continuado por meio de uma documentação do código fonte, estar disponível e bem documentado. Atualmente, com o advento da internet, a questão da disponibilidade do programa, do código fonte e da documentação se torna extremamente simples e viável.

Software	Classificação de estruturas em termos de deslocabilidade	Análise Não-Linear Geométrica	Cálculo Gama-Z disponível	Pré-processamento (Geração de elementos e barras)	Dimensionamento de barras	Combinações de ações	Documentação
o-rcos	Não	Não	Não	Sim	Não	Não	Sim
Avaliador 4.1	Não	Não	Não	Não	Sim	Sim	Sim
e-Flux	Não	Não	Não	Sim	Não	Não	Não
Trame 3.0	Não	Não	Não	Não	Não	Não	Sim
Arred 4.4	Não	Não	Não	Não	Não	Sim	Sim
Trame 1.1	Não	Não	Não	Sim	Não	Não	Sim
AnalFrame Beta	Não	Sim (Suíte)	Não	Sim	Não	Sim	Sim
Ftool	Não	Não	Não	Sim	Não	Não	Sim
Visual Beam 1.0	Não	Não	Não	Não	Não	Não	Sim
Master2 3.1	Não	Sim (Suíte)	Não	Não	Não	Não	Sim
Trame 4.0	Sim	Sim	Sim	Sim	Não	Sim	Sim

Tabela 1: Relação dos softwares para fins educacionais

RECURSOS DO PROGRAMA

O desenvolvimento do TRAME 4.2 em linguagem Object Pascal de programação visou, além da facilidade de compreensão do código computacional, a facilidade de adaptação do programa para diferentes sistemas operacionais por meio de ferramentas de desenvolvimento de código livre, como é o caso dos projetos Lazarus³ e FreePascal⁴, ambos sob a licença GNU⁵ GPL (GNU General Public License ou Licença Pública do GNU).

Os principais diferenciais do programa TRAME 4.2 baseiam-se na implementação dos recursos focados nas disciplinas de projeto, que são:

- A interface gráfica e interativa com recursos avançados de desenho e representação da estrutura e seus carregamentos;
- Interação com outros programas por meio da importação e exportação de arquivos DXF;
- Gerenciamento de grupos de barras e comandos de seleção, a exemplo de programas comerciais como o STRAP;
- Os recursos de combinações de ações;
- A classificação da estrutura em termos de deslocabilidade de acordo com os códigos de projeto;
- A configuração de unidades;
- Cálculo automático do peso próprio da estrutura com base no gerenciador de perfis e no gerenciador de materiais;
- Calculadoras de dimensionamento de perfis e ligações;
- A possibilidade de expansão dos seus recursos por meio de um código computacional livre e de fácil assimilação.

³www.lazarus.freepascal.org | ⁴www.freepascal.org | ⁵GNU (GNU is not Unix)

Construção Metálica 35

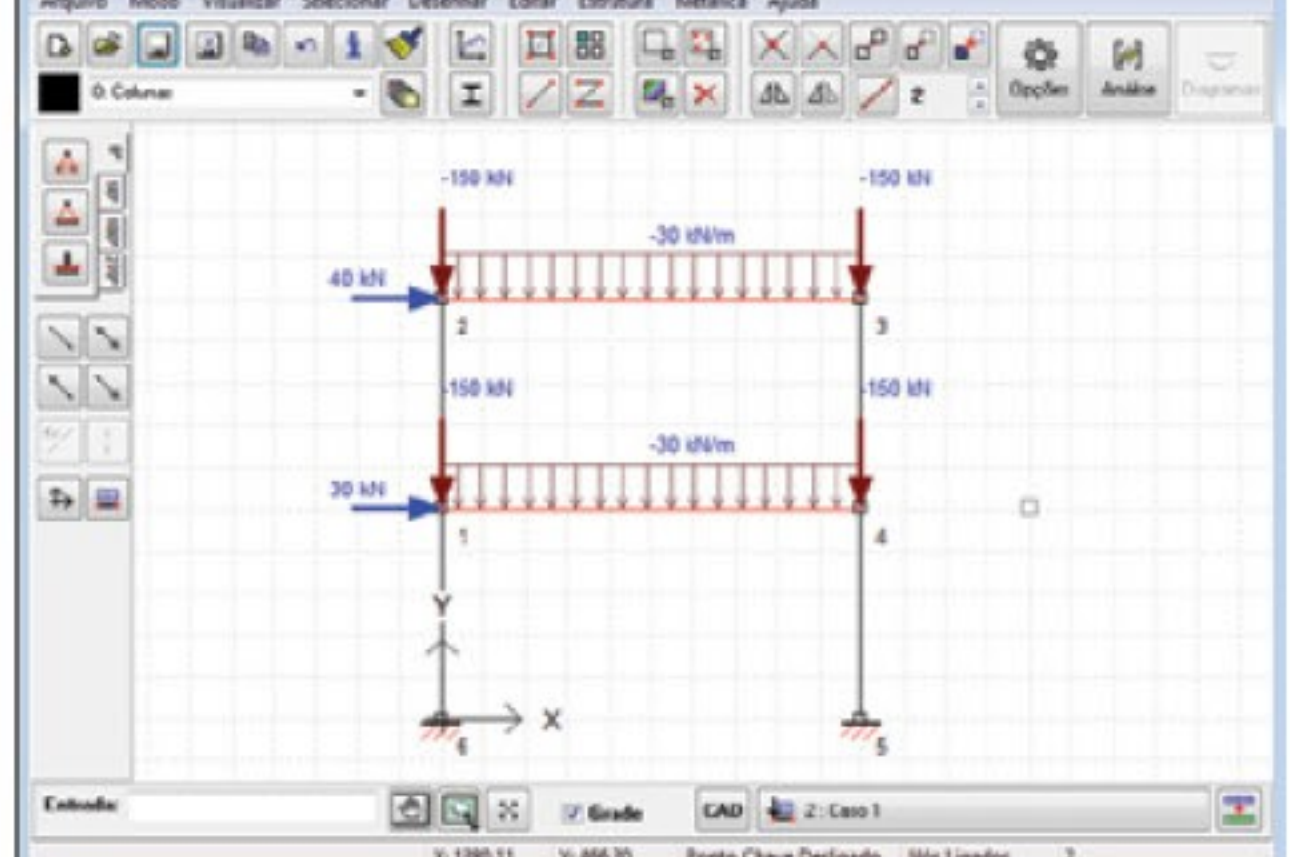


Figura 1: Tela do programa TRAME 4.2

Ao grupo de barras são atribuídas as propriedades de material e seção transversal. Por meio do gerenciador é possível definir o grupo ativo para desenho, ligar ou desligar a visualização do grupo na área gráfica e impedir que as barras de determinado grupo sejam capturadas por meio de comandos de seleção (opção de travar o grupo). Outro recurso importante do gerenciador é o de poder atribuir uma descrição para os grupos utilizados. O gerenciamento de barras é recurso fundamental nas disciplinas de projeto. As funções do gerenciador de grupos de barras estão sucintamente apresentadas na Figura 2.

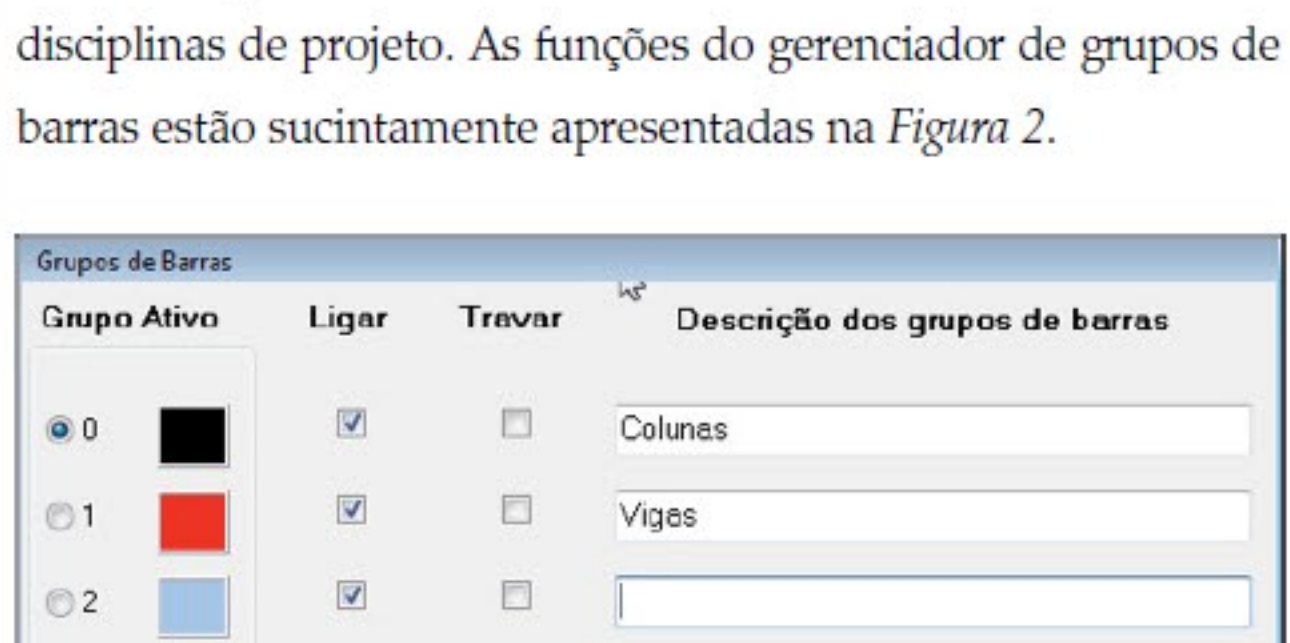


Figura 2: Gerenciador de grupos de barras

36 Construção Metálica

Para cada grupo de barras deve ser definido um perfil necessário à análise da estrutura. Diversos perfis laminados, soldados, formados a frio e seção genérica estão disponíveis para imediata utilização por meio do gerenciador de perfis. No gerenciador é possível obter recursos de orientação da seção, adição de novos perfis e cálculo automático das características geométricas das seções adicionadas.

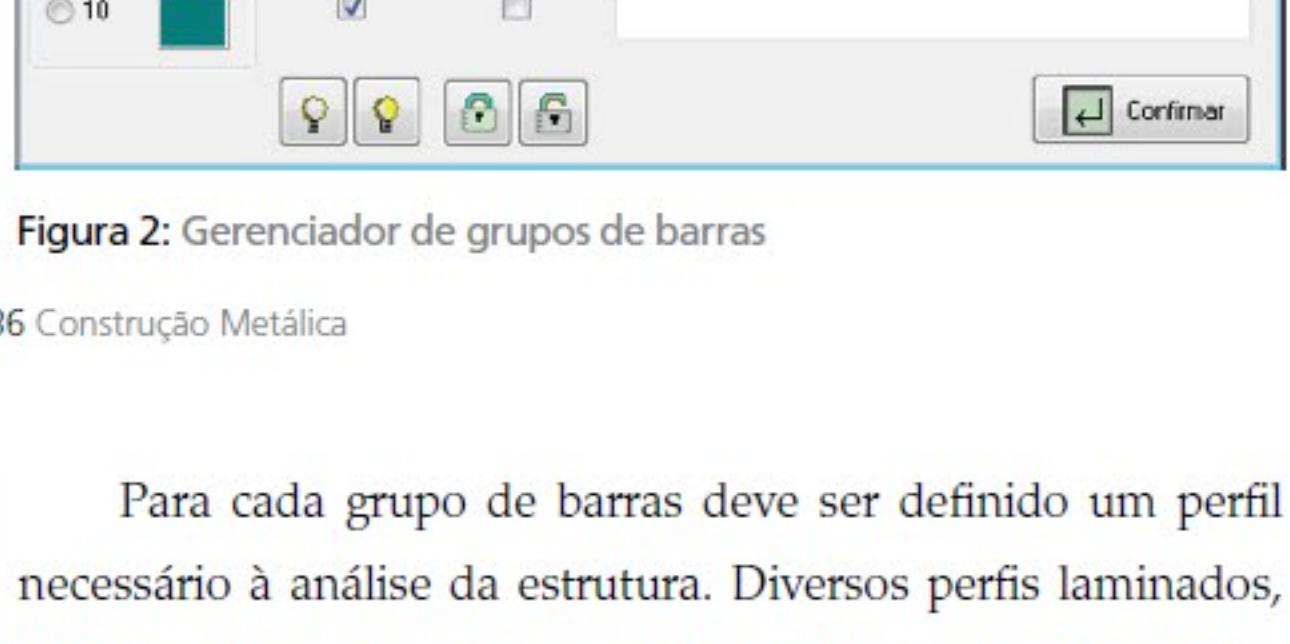


Figura 5: Gerenciador de perfis metálicos

36 Construção Metálica

Para a caixa de configuração da análise da estrutura é possível obter os seguintes resultados e recursos:

- Visualizar os pavimentos definidos automaticamente pelo programa antes da análise;
- Verificar os dados das barras e nós da estrutura antes da análise;
- Visualizar as matrizes de rigidez das barras e da estrutura antes da análise;
- Configurar se a estrutura é contraventada ou não, afetando o cálculo do coeficiente B2;
- Configurar o fator de redução das rigidezes axial e flexional;
- Efetuar a análise elástica linear para os casos e combinações de carregamento;
- Incluir a análise da não-linearidade geométrica global para as combinações de carregamentos;
- Gerar os relatórios de esforços e classificação das estruturas;
- Gerar o relatório de esforços da análise não-linear e do método de amplificação de esforços (B₁ e B₂) para as combinações de carregamento.

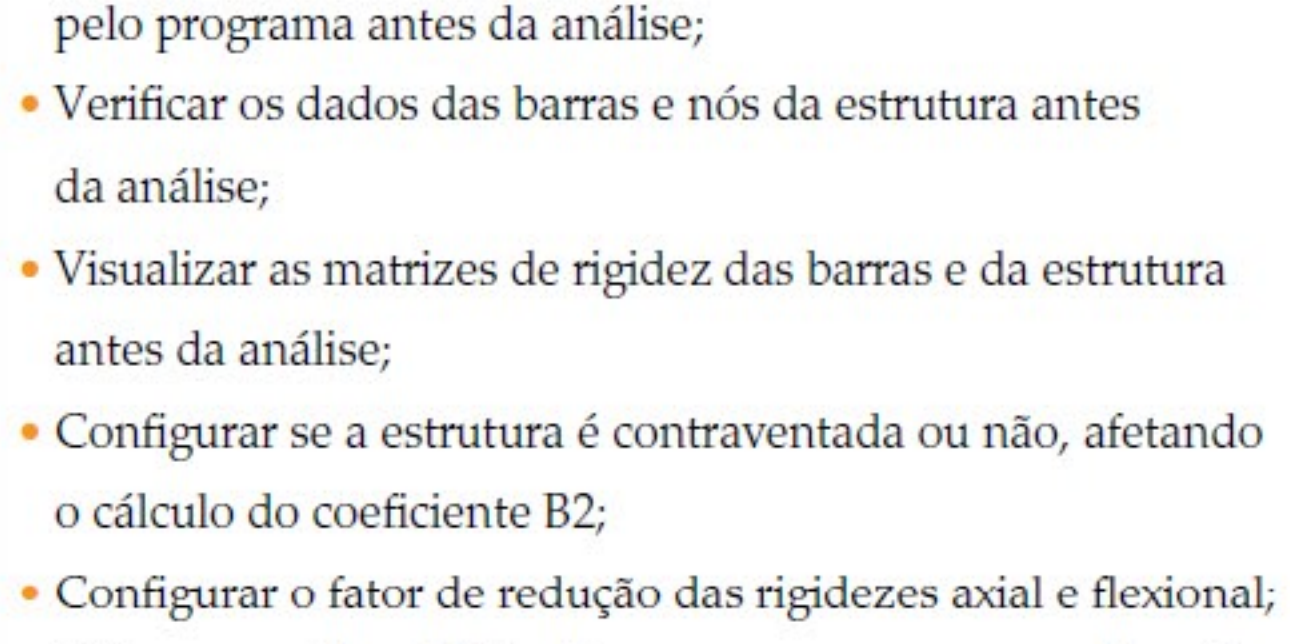


Figura 6: Caixa de diálogo da análise da estrutura

36 Construção Metálica

Além dos relatórios numéricos, é possível obter todos os diagramas de esforços e de deformada da estrutura para os casos e combinações de carregamentos criados pelo usuário.



Figura 7: Resultados gráficos do programa

36 Construção Metálica

Como estratégia educacional, são distribuídas com o programa diversas calculadoras de projeto. Estas calculadoras, desenvolvidas no programa gratuito Smath Studio (http://en.smath.info/), possuem a particularidade de permitir a fácil edição e ampliação de recursos sem a necessidade de conhecimento de programação.



Figura 8: Calculadoras de dimensionamento

36 Construção Metálica

Como estratégia de divulgação, foi criada uma página na internet, um blog⁶, onde as atividades de desenvolvimento, tutoriais e vídeos são publicados.

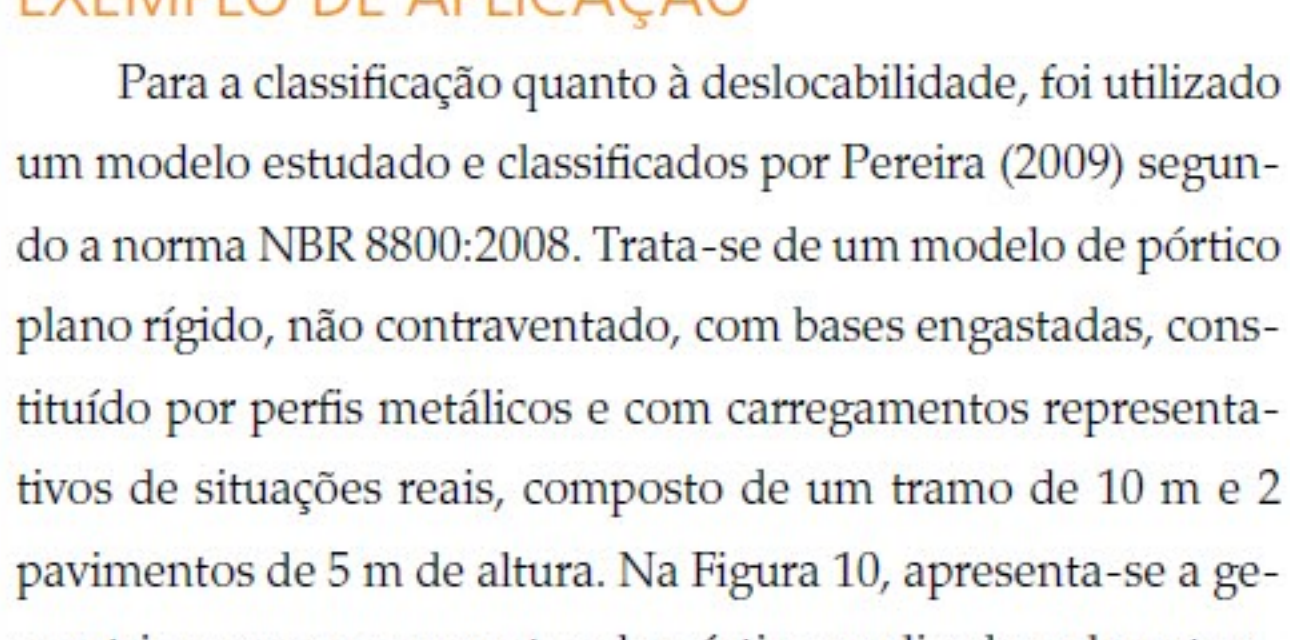


Figura 9: Blog do programa TRAME 4.0

⁶http://trame4.blogspot.com.br

EXEMPLO DE APLICAÇÃO

Para a classificação quanto à deslocabilidade, foi utilizado um modelo NBR 8800:2008. Trata-se de um pórtico plano rígido, não contraventado, com bases engastadas, constituído por perfis metálicos e com carregamentos representativos de situações reais, composto de um tramo de 10 m e 2 pavimentos de 5 m de altura. Na Figura 10, apresenta-se a geometria e os carregamentos do pórtico.



Figura 10: Geometria e carregamento do pórtico

36 Construção Metálica

A Tabela 2 apresenta o cálculo de B₂ obtido por Pereira (2009), incluindo os efeitos dessas imperfeições de material. Na Figura 11 é apresentado o método de B2, considerando as imperfeições de material por meio da redução das rigidezes disponíveis na caixa de diálogo da análise do TRAME 4.2. Nota-se a convergência de resultados no cálculo do coeficiente B₂.

PAVIMENTO	h (cm)	δ (cm)	Δ1h (cm)	SN _{ed} (kN)	SH _{ed} (kN)	B ₂
1	500	3,54	3,54	1296	70	1,18
2	500	6,77	3,20	573	30	1,12

Tabela 2: Classificação da estrutura

36 Construção Metálica

Pavimento	Altura (mm)	D ₁ (mm)	D ₂ (mm)	N _{ed} (kN)	F _{ed} (kN)	B ₂	Deslocabilidade
1	500.0000	4.819	3.660	-171.00	40.00	1.119	Média
2	500.0000	3.4259	3.4259	-1296.00	70.00	1.119	Média
0	0.0000	0.0000	0.0000	-1296.00	70.00	0.000	---

Figura 11: Relatório de classificação da estrutura gerado no TRAME 4.2

36 Construção Metálica

Completando a análise de classificação da estrutura e validação do Método de Carga de Gravidade Interativa, adotado pelo TRAME 4.2, realizou-se por meio dos softwares educacio-

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

1. ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR 8800:2008: Projeto de Estrutura de Aço. Edição de Rituera Mista de Aço e Concreto de Edifícios. Rio de Janeiro, 2008. 237p.
2. PEREIRA, Margot F. Análise dos Efeitos de Segunda Ordem em Pórticos Planos de Aço. Artigo. Congresso de Iniciação Científica, 17. São Carlos – SP, 2009.

Construção Metálica 39

nais Mastan2 e AcadFrame, análises linear e não-linear geométrica exata em regime elástico. Por meio destas análises, podemos avaliar e comparar o efeito P-Δ calculado por cada programa.

Figura 12: Análise do pórtico de 2 pavimentos nos softwares MASTAN2 e AcadFrame

Os deslocamentos foram obtidos em análise linear e em análise não-linear geométrica da estrutura. A relação entre os deslocamentos das análises estão listados na Tabela 3, com resultados muito próximos obtidos pelos três programas. Com relação a classificação quanto a deslocabilidade da estrutura, os resultados se aproximam (especificamente neste caso de análise) do coeficiente B₂ do método simplificado proposto pela NBR 8800:2008, classificando a estrutura como de média deslocabilidade. Os resultados obtidos com o AcadFrame, neste caso, foram os resultados maiores, se justificam pelo fato do programa possuir os recursos de análise não-linear geométrica exata e deformações por cisalhamento.

PAVIMENTO	Efeito P-Δ		
	D ₂ / D ₁		
	TRAME 4.0	MASTAN2	AcadFrame
1	1,106	1,113	1,129
2	1,097	1,102	1,113

Tabela 3: Efeito P-Δ

CONSIDERAÇÕES FINAIS

O uso de ferramentas computacionais no ensino da análise e do projeto de estruturas se configura um importante aliado na inclusão de novos conteúdos que, em abordagens manuais, exigiriam grande aumento de carga horária nos programas e os cursos de graduação.

O programa permite a classificação das estruturas quanto

à deslocabilidade e a obtenção dos parâmetros (B1 e B2) para a amplificação de esforços em que se considera os efeitos da não-linearidade geométrica. Adicionalmente, é possível uma comparação direta entre os coeficiente B2 e Gama-z (γz).

O método de carga de gravidade interativa foi proposto, apresentando bons resultados para o método simplificado dos efeitos globais de segunda ordem, P-Δ.

Na comparação com o software comercial STRAP e com os softwares educacionais (Ftool, MASTAN e AcadFrame), pode-se observar a adequada representação dos diagramas de esforços.

Mais do que apresentar um produto acabado em termos de software, o principal objetivo que permeou este trabalho é o de continuidade de desenvolvimento de um programa acadêmico, por meio da filosofia de software livre.

O próprio uso e identificação de falhas no programa se caracteriza como uma proposta futura de desenvolvimento, pois o amadurecimento de um software de análise de estruturas ocorre após exaustivos testes, em diferentes tipologias de estruturas e carregamentos. Propostas educacionais de utilização do programa nas disciplinas de análise de estruturas e em disciplinas de projeto são trabalhos que podem contribuir para o aperfeiçoamento do programa e identificação de falhas a serem corrigidas. ■