

**UNIVERSIDADE FEDERAL DE SÃO CARLOS**  
CENTRO DE CIÊNCIAS EXATAS E DE TECNOLOGIA  
***PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ESTRUTURAS E  
CONSTRUÇÃO CIVIL***

**“Software Educacional Livre para análise não linear de pórticos planos em estruturas metálicas”.**

**Paulo Cavalcante Ormonde**

Dissertação de Mestrado  
apresentado ao Programa de Pós-  
Graduação em Estruturas e Construção  
Civil da Universidade Federal de São  
Carlos como parte dos requisitos para a  
obtenção do Título de Mestre.

**Orientador:** Alex Sander Clemente de Souza

São Carlos  
2013

**Ficha catalográfica elaborada pelo DePT da  
Biblioteca Comunitária da UFSCar**

O73se

Ormonde, Paulo Cavalcante.

Software educacional livre para análise não linear de pórticos planos em estruturas metálicas / Paulo Cavalcante Ormonde. -- São Carlos : UFSCar, 2013.  
123 f.

Dissertação (Mestrado) -- Universidade Federal de São Carlos, 2013.

1. Estruturas metálicas. 2. Software e educação. 3. Pórticos planos. 4. Análise não-linear. I. Título.

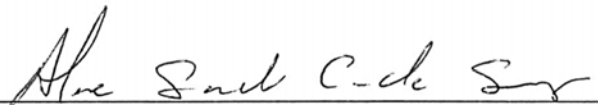
CDD: 624.182 (20ª)

**SOFTWARE EDUCACIONAL LIVRE PARA ANÁLISE NÃO-LINEAR E DIMENSIONAMENTO DE  
PÓRTICO PLANO EM ESTRUTURAS METÁLICAS**


**PAULO CAVALCANTE ORMONDE**

**Dissertação de Mestrado defendida e aprovada em 10 de maio de 2013.**

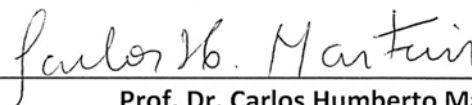
**Banca Examinadora constituída pelos membros:**



**Prof. Dr. Alex Sander Clemente de Souza**  
Departamento de Engenharia Civil/PPGECiv/UFSCar  
**Orientador**



**Prof. Dr. Rodrigo Ribeiro Paccola**  
Departamento de Engenharia de Estruturas/EESC/USP  
**Examinador externo**



**Prof. Dr. Carlos Humberto Martins**  
Departamento de Engenharia Civil/Universidade Estadual de Maringá/UEM  
**Examinador Externo**

## *DEDICATÓRIA*

---

Aos meus pais, Francisco e Iara, por todas as calçadas da vida que junto caminhamos até aqui.

Meus agradecimentos póstumos aos meus avós e, em especial minha avó Nazareth, pelos exemplos de vida.

Aos meus filhos, Pedro e Mateus, à minha esposa Mariza e a toda minha família, cerne de minha motivação.

Ao Prof. Dr. André Bartholomeu, grande amigo e que me iniciou na vida acadêmica.

Ao grande engenheiro Guerino Mário Pescarini e ao Prof. Vicenti Rossi Neto, minha dedicação póstuma pelo exemplo de amor à profissão e aos estudos.

À Prof<sup>a</sup>. Dr<sup>a</sup> Raquel Gonçalves, pela paciência e ensinamentos transmitidos tão docemente.

Ao Prof. Dr. Alex Sander Clemente de Souza, por tantas e memoráveis aulas.

Àqueles que habitam o invisível para os olhos mas que estão conectados ao meu coração.



## AGRADECIMENTOS

---

Ao meu orientador Prof. Dr. Alex Sander Clemente de Souza, pela confiança depositada, pela dedicação, conhecimento e motivação sempre presentes ao longo deste trabalho.

À Universidade Federal de São Carlos, em especial aos professores do Programa de Pós-Graduação em Estruturas e Construção Civil, Prof<sup>a</sup>. Dr<sup>a</sup>. Sivana De Nardin, Prof. Dr. José Carlos Paliari, Prof. Dr. Jasson Rodrigues de Figueire Filho, Prof. Dr. Roberto Chust Carvalho, Prof. Dr. Guilherme Aris Parsekian e ao Prof. Dr. Sidney Furlan Junior que, pela transferência de conhecimentos, contribuindo inequivocamente na minha formação profissional e na conclusão deste trabalho.

À toda secretaria e funcionários do Programa de Pós-Graduação em Estruturas e Construção Civil, em especial à secretária Solange Damha, por todo auxílio e orientação gentil.

## RESUMO

Neste trabalho foi desenvolvida uma ferramenta computacional de software livre, para fins educacionais e profissionais, que automatiza de forma integrada a análise linear elástica, a classificação das estruturas quanto à deslocabilidade e a consideração da não-linearidade geométrica (global e local) na obtenção dos esforços para dimensionamento.

Esta solução, aqui denominada TRAME 4.0<sup>1</sup>, foi construída a partir do aprimoramento dos recursos existentes no software gratuito TRAME 3.0<sup>2</sup>. 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.

Esta classificação permite o julgar do tipo de análise a ser utilizada e as não-linearidades, físicas e geométricas, a serem consideradas. É de fundamental importância o desenvolvimento de ferramentas educacionais que acompanhem os constantes avanços das normas de projeto. O desenvolvimento por meio de códigos abertos de programação, permite a contínua inclusão destes avanços e o surgimento de novas pesquisas relacionadas ao tema.

Dentro de uma proposta educacional, foram incorporados ao programa, recursos de pré-processamento e pós-processamento integrados em uma única interface. Seu ambiente interativo, utiliza os recursos gráficos disponíveis na linguagem Object-Pascal.

Por meio de exemplos numéricos, foi possível validar os recursos implementados nesta ferramenta computacional, apresentando bons resultados na comparação com outros programas. Espera-se contribuir para uma melhor dinâmica nas disciplinas de projeto de estruturas metálicas nos cursos de engenharia civil do Brasil.

**Palavras chave:** Software educacional, software livre, Pórticos planos, análise não-linear, estruturas metálicas.

---

<sup>1</sup> <http://trame4.blogspot.com.br/>

<sup>2</sup> <http://www.ormond.com.br>

## ABSTRACT

The goal of this work was develop an free educational computation tool that automates the nonlinear geometric analysis (by simple and approximate methods), the design and classification based on displacement for planar frames. The classification is made by simple method (B1 and B2) give in the NBR8800:2008, that define the structures in lower, median and high displacement. The Knowledge of the displacement classification will provide the type of analysis and nonlinearities to consider.

The free source code allows the continuation of the project and the emergence of new research related to the topic. The development of this tool with a graphical and iterative interface wrote in Object-Pascal language will turn the analysis process more practical to educational or professional works. The use of this tool in steel structures contents of civil engineer courses and the knowledge of the type of analysis that must be use, from the displacement classification, are the results.

Through educational parameters implemented in this computational tool, we hope to contribute to a better dynamic in the disciplines of design of steel structures in civil engineering courses in Brazil.

*Key-words: Educacional software, free software, nonlinear analysis, steel structures.*

---

<b>1. INTRODUÇÃO .....</b>	<b>8</b>
1.1 Objetivos .....	9
1.2 Justificativas .....	9
1.3 Estrutura do texto .....	11
<b>2. O PROGRAMA TRAME 3.0.....</b>	<b>12</b>
<b>3. SOFTWARE NO ENSINO DE ENGENHARIA DE ESTRUTURAS.....</b>	<b>14</b>
3.1 Softwares educacionais .....	14
3.2 Softwares educacionais para a análise de estruturas .....	19
<b>4. ANÁLISE NÃO LINEAR GEOMÉTRICA .....</b>	<b>36</b>
4.1 Tipos de análise de estruturas reticuladas .....	37
4.2 Análise não-linear elástica .....	39
4.3 Classificação da estrutura quanto à deslocabilidade e determinação de esforços .....	40
4.3.1 Classificação quanto à deslocabilidade e a determinação dos esforços solicitantes segundo a NBR 8800:2008.....	40
4.3.2 Classificação quanto à deslocabilidade e a determinação dos esforços solicitantes segundo a NBR 6118:2003.....	45
4.4 Métodos simplificados para avaliação dos efeitos globais de não-linearidade geométrica .....	46
<b>5. METODOLOGIA .....</b>	<b>48</b>
5.1 Recursos e características existentes do software trame 3.0 .....	48
5.2 Características e etapas de implementação do programa computacional.....	49
5.2.1 Sistema de pré-processamento .....	49
5.2.2 Sistema de processamento .....	52

5.2.3	Sistema de pós-processamento .....	53
5.2.4	Validação inicial dos resultados .....	54
5.3	<b>Estratégias de divulgação, documentação e manutenção do programa .....</b>	<b>54</b>
6.	<b>DESENVOLVIMENTO .....</b>	<b>56</b>
6.1	Recursos de desenho e definição da geometria das estruturas .....	57
6.2	Restrições de apoio.....	66
6.3	Casos e combinações de carregamento.....	67
6.4	Material e seção transversal das barras .....	71
6.5	Análise da estrutura .....	76
7.	<b>VALIDAÇÃO DOS RESULTADOS.....</b>	<b>79</b>
7.1	Resultados para análise de treliças planas .....	79
7.1.1	Treliça isostática simples .....	79
7.1.2	Treliça isostática composta.....	82
7.1.3	Treliça hiperestática.....	84
7.2	Resultados para análise de vigas.....	87
7.3	<b>Validação do método de carga de gravidade interativa e da classificação de deslocabilidade das estruturas.....</b>	<b>91</b>
7.3.1	Exemplo numérico de pórtico de múltiplos pavimentos .....	91
7.3.2	Exemplo numérico de pórtico com 2 pavimentos .....	96
7.4	Validação das combinações de ações .....	103
7.5	Resultados das estratégias de divulgação .....	114
8.	<b>CONSIDERAÇÕES FINAIS .....</b>	<b>115</b>
9.	<b>REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....</b>	<b>118</b>
10.	<b>ANEXO .....</b>	<b>123</b>

# 1. INTRODUÇÃO

Com o avanço dos recursos e modelos de análise de estruturas, alicerçados pelo constante desenvolvimento tecnológico dos computadores e softwares de projeto, a realidade das análises avançadas vem ganhando cada vez mais espaço dentro dos escritórios de engenharia, tanto em função de aspectos de competitividade como de maior segurança para as soluções propostas. Mas esse avanço não acontece sem erros e riscos.

Começam a surgir pelo Brasil casos severos de patologias e colapsos de estruturas, tendo por causa principal, o uso inadequado destas novas ferramentas. Conhecer profundamente a ferramenta que se utiliza e o que se espera obter de seu uso, são conceitos fundamentais a serem adotados para minimizar os riscos de acidentes. Programas podem produzir erros de resultados, principalmente quando mal compreendidos, daí a importância de métodos e processos simplificados somados aos adequados fundamentos teóricos das análises utilizadas, para que o engenheiro tenha condições de perceber estes erros quando ocorrerem.

A importância de se introduzir, desde a graduação aos cursos de especialização, os conceitos mais avançados em análise de estruturas, vem de encontro com esta problemática como uma das possíveis soluções capazes de minimizar os riscos apresentados.

Difícilmente um único software comercial ou educacional atenderá a todas as necessidades pedagógicas e de projeto sem que lhe sejam introduzidas modificações ou complementos. Somente softwares de código livre projetados para este fim é que possibilitam tais adequações, abrindo espaço para integração entre pesquisas, disciplinas e para a continuidade de desenvolvimento, independente de interesses de autor ou empresa.

Dentro deste panorama foi desenvolvida uma solução computacional educacional de código livre, 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 gráfica, as etapas de pré-processamento, processamento e pós-processamento.

Com esta proposta de trabalho espera-se garantir por meio de adequadas estratégias de disponibilização, documentação, divulgação e manutenção, a continuidade e ampliação do desenvolvimento do programa para fins de ensino, pesquisa e de projetos em estruturas metálicas.

## 1.1 OBJETIVOS

Desenvolver uma solução computacional educacional de código livre, aqui denominada TRAME 4.0, aprimorando os recursos existentes no software gratuito TRAME 3.0, automatizando a classificação de pórticos planos em estruturas metálicas quanto à deslocabilidade (método B1 e B2), a análise não-linear geométrica simplificada (processo P- $\Delta$ ).

Além de integrar etapas de projeto, este trabalho objetivou promover um ambiente de modelagem e simulação interativo, que abranja em uma única interface, as etapas do pré ao pós-processamento da estrutura. Nesta interface, se utiliza uma base CAD (Computer-aided design) independente, desenvolvida especificamente para estimular a experimentação.

Outro objetivo específico é servir de base para um desenvolvimento continuado por meio de adequadas estratégias de documentação, manutenção e divulgação do conteúdo proposto. Espera-se o contínuo desenvolvimento e aprimoramento do programa por meio de um modelo de software educacional livre.

## 1.2 JUSTIFICATIVAS

Muitos trabalhos relacionados ao desenvolvimento de programas computacionais para análise e dimensionamento de estruturas foram desenvolvidos em projetos acadêmicos nas últimas décadas. Infelizmente, pouquíssimas ferramentas encontram-se disponíveis ou suficientemente documentadas de forma a possibilitar o uso nas universidades e pela sociedade de um modo geral, ficando seu uso restrito aos seus respectivos desenvolvedores e grupos fechados de pesquisa.

Praticamente inexitem no Brasil softwares educacionais integrados para projetos de estruturas, ou seja, que abranjam as etapas de análise, dimensionamento e, em alguns casos, o detalhamento das estruturas metálicas. Em se tratando de programas de código aberto, bem documentados, interativos e que além de considerar as não-linearidades da

estrutura permita sua classificação em termos de deslocabilidade, coadunando-se com as atuais exigências de projeto, o quadro é bem menos animador.

Obviamente, é quase impossível para um único software abranger todo o ciclo de desenvolvimento de um projeto, mas dentro de cada disciplina, acredita-se que soluções integradas permitam e estimulem um uso e desenvolvimento continuado da proposta desenvolvida, sendo exatamente este o foco deste trabalho.

A disciplina de projeto de estruturas metálicas está presente na maioria dos cursos de graduação de engenharia civil, abrangendo principalmente as estruturas formadas por treliças e pórticos planos. Nas estruturas em quadros ou pórticos planos, amplamente utilizados nas construções, o conhecimento dos efeitos da não-linearidade geométrica é de grande importância para uma determinação mais realista dos esforços atuantes nas estruturas.

Considerando a nova abordagem da NBR 8800:2008 quanto aos processos de análise e determinação de esforços nas estruturas, faz-se necessário o desenvolvimento de uma ferramenta para classificação de pórticos planos em estruturas metálicas quanto à deslocabilidade. Esta classificação é baseada no método simplificado, conhecido como o método da amplificação de esforços solicitantes, que classifica as estruturas como sendo de pequena, média ou grande deslocabilidade.

A adequada classificação das estruturas metálicas quanto à deslocabilidade permite saber o quanto a estrutura é sensível aos efeitos das imperfeições geométricas iniciais, decorrentes dos deslocamentos horizontais da estrutura, permitindo o julgamento do tipo de análise a ser utilizada e, conseqüentemente, das não linearidades a serem consideradas. É fundamental o desenvolvimento de ferramentas para fins educacionais e de pesquisa que automatizem a análise e facilitem o entendimento do comportamento da estrutura.

Em se tratando de análise não-linear, é imprescindível que o programa possibilite combinações dos diversos casos de carregamento, realizadas antes do processamento da análise, que não admite, como no caso de análises lineares, a superposição de esforços e deslocamentos.

O desenvolvimento do TRAME 4.0 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 o é o caso dos projetos Lazarus<sup>3</sup> e FreePascal<sup>4</sup>, ambos sob a licença GNU<sup>5</sup> GPL (GNU General Public License ou Licença Pública do GNU).

### 1.3 ESTRUTURA DO TEXTO

O trabalho consiste em descrever os conceitos e processos utilizados para o desenvolvimento de um software educacional livre para análise, classificação e dimensionamento de pórticos planos em estruturas metálicas, incluindo como resultado a validação do programa por meio de exemplos de aplicação numérica. A seguir, são apresentados os conteúdos dos capítulos deste trabalho.

**Capítulo 1:** apresentação do trabalho, introduzindo a problemática do tema, os objetivos, métodos e processos utilizados e a caracterização dos resultados.

**Capítulo 2:** breve histórico do desenvolvimento da ferramenta computacional TRAME que é a base deste projeto.

**Capítulo 3:** revisão bibliográfica sobre os conceitos de software educacional e de software livre. Neste capítulo é feita uma descrição de várias ferramentas computacionais disponíveis na internet e uma análise sucinta dos recursos de maior relevância com enfoque educacional.

**Capítulo 4:** revisão bibliográfica dos tipos de análise de estruturas, dos conceitos e métodos para consideração da não-linearidade geométrica na análise e dos métodos simplificados para classificação das estruturas quanto à deslocabilidade, propostos pelas normas de projeto.

**Capítulo 5:** apresentação dos métodos utilizados para desenvolvimento do programa, caracterização e divisão dos recursos em módulos. São descritos também, os métodos de validação do programa e as estratégias de promoção do projeto à comunidade.

**Capítulo 6:** descrição do desenvolvimento computacional realizado e breve apresentação dos recursos e comandos do programa.

**Capítulo 7:** validação do programa por meio de exemplos numéricos.

**Capítulo 8:** considerações finais e sugestões para novas pesquisas.

---

<sup>3</sup> [www.lazarus.freepascal.org](http://www.lazarus.freepascal.org)

<sup>4</sup> [www.freepascal.org](http://www.freepascal.org)

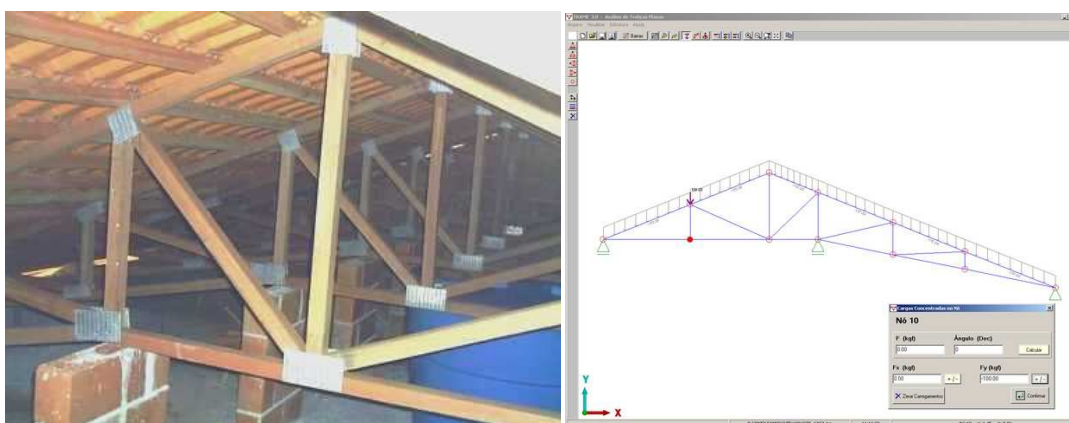
<sup>5</sup> GNU (GNU is not Unix)

## 2. O PROGRAMA TRAME 3.0

O TRAME<sup>6</sup> é um software proprietário, criado por Ormond (2004), para análise elástica linear do comportamento estrutural de treliças planas, com base no **Método dos Deslocamentos**. Este software foi especialmente desenvolvido para projetar treliças pré-fabricadas de madeira, utilizadas comercialmente na fabricação de estruturas de cobertura.

Este software foi criado fundamentalmente para importar a geometria da estrutura por meio de arquivos do tipo DXF, gerados em programas comerciais de desenho. Na Figura 1, observa-se uma estrutura de uma treliças pré-fabricada de madeira, cuja análise estrutural foi realizada com programa TRAME.

**Figura 1: Cobertura projetada com o uso do software Trame 3.0**



Fonte: Autor - 09/05/2012.

O TRAME foi concebido no mês de novembro de 2004 a partir de um programa escrito em **Scilab**<sup>7</sup>, software gratuito para a resolução de problemas numéricos, com lançamento de dados e obtenção de resultados apenas em modo numérico. A linguagem de programação utilizada para o desenvolvimento do TRAME 3.0 foi o Object-Pascal, do DELPHI 4.0 e, mais recentemente o Turbo Delphi, ambos da empresa Borland.

<sup>6</sup> [www.ormond.com.br](http://www.ormond.com.br)

<sup>7</sup> [www.scilab.org](http://www.scilab.org)

O programa foi utilizado proprietariamente até o dia 12 de fevereiro de 2005, data em que foi publicada sua primeira versão, TRAME 1.0, disponibilizada gratuitamente na Internet por meio do site da empresa do autor, a Ormond Projetos.

Em sua segunda versão, TRAME 2.0, publicada no dia 25 de abril de 2005, foram adicionados novos recursos de manipulação de arquivos incluindo a exportação do desenho da estrutura, com a indicação dos esforços solicitantes nas barras, para o padrão DXF. Também foi adicionado o ajuste dinâmico da escala de visualização da área gráfica, uma barra de status com diversas informações de operação do programa, caixa de configuração das propriedades das barras e a inclusão do cálculo das tensões e das deformações longitudinais das barras no relatório de análise.

No dia 15 de novembro de 2005, foi lançada a terceira e última versão a ser publicada na Internet do software, o TRAME 3.0. Revisão que passou a permitir o lançamento de cargas uniformemente distribuídas, discretizadas automaticamente como cargas nodais pelo programa sem gerar esforços de flexão nas barras. A criação de treliças por meio de dados fornecidos manualmente pelo usuário ou por modificação de um projeto existente, completam a lista de recursos implementados nesta versão. Além dos novos recursos, todas as janelas do programa sofreram alguma revisão.

A partir de sua terceira versão, o programa passou a ser utilizado em palestras promovidas em escolas técnicas e de ensino superior na divulgação dos sistemas treliçados de madeira. Posteriormente seu uso foi estendido para o ensino das disciplinas de estruturas de madeira e estruturas metálicas, na Faculdade Anhanguera de Jundiaí, num período de 5 anos.

Apesar de ser distribuído gratuitamente na Internet sem restrições de uso, o TRAME 3.0 não pode ser classificado como um software livre, pois seu código fonte não foi disponibilizado para que usuários com conhecimento de programação pudessem modificá-lo.

O software TRAME 3.0 continuou a ser desenvolvido internamente pela Ormond Projetos, passando a contar com uma plataforma CAD (Computer Aids Design) independente e recursos especializados para análise e dimensionamento de treliças planas em estruturas metálicas. A experiência adquirida com o desenvolvimento e utilização do programa TRAME 3.0, foi a base para a realização deste trabalho.

# 3. SOFTWARE NO ENSINO DE ENGENHARIA DE ESTRUTURAS

## 3.1 SOFTWARES EDUCACIONAIS

Para que um software seja considerado educacional, ele deve ser preferencialmente livre, permitir 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.

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. Consequentemente, estimular um ambiente de maior cooperação, integração entre projetos e disciplinas.

Vieira (2011) propõe uma ficha para registro da avaliação de um software educativo com base em aspectos técnicos e pedagógicos, dos quais se destacam:

- o software educativo deve ser pensado segundo teorias de construção do conhecimento;
- não descartar ou restringir a intervenção do professor como agente de aprendizagem;

- dentro de uma concepção construtivista, o software, para ser educativo, deve proporcionar um ambiente interativo que permita ao aluno propor e testar hipóteses;
- a integração de diferentes disciplinas é uma característica importante na classificação de um software como educativo;
- tecnicamente, o software educativo deve apresentar uma boa qualidade de telas, clareza de instruções, compatibilização com outros softwares, recursos de hipertexto e hiperlink, help-desk, manuais técnicos com linguagem apropriada ao professor e ao aluno, facilidade de manuseio, etc.

A regulação sobre a desenfreada produção e comercialização de softwares educativos passa, segundo Vieira (2011), pela conscientização dos educadores sobre a escolha do software adequado à proposta pedagógica a ser desenvolvida, evitando-se aqueles que pouco ou nada contribuem.

Azevedo (2000) defende a utilização de softwares no ensino universitário sem, no entanto, limitar os cursos no mero treino de usuários dos programas adotados ou, ao contrário, limitar a uma abordagem totalmente teórica sem as aplicações práticas sistematicamente utilizadas no mercado de trabalho, sugerindo uma solução intermediária com maior ênfase nos aspectos teóricos.

Quanto ao tipo de aplicação, Azevedo (2000) divide os softwares em duas grandes categorias: os desenvolvidos localmente nas universidades e os desenvolvidos por empresas profissionais. Destaca que é necessário o compromisso de também dividir os alunos entre os que têm talento e interesse na programação, utilizando softwares desenvolvidos localmente com a totalidade do código fonte de domínio público, e os alunos que se dedicarão essencialmente à utilização de software profissional que, preferencialmente, apresente na documentação os fundamentos teóricos das tarefas realizadas.

A experiência de utilização de softwares como ferramenta didática, relatada por Veríssimo e Paes (2000), no Curso de Engenharia Civil da Universidade Federal de Viçosa, resultou no desenvolvimento sistematizado de programas de dimensionamento de elementos e ligações metálicas em trabalhos de iniciação científica e tecnológica apoiados pelo Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico – CNPq. O uso de softwares isolados, ao contrário dos softwares de projeto integrado, permitiu uma melhor

análise do encadeamento das etapas de projeto para os mais diversos tipos de estruturas, mantendo o embasamento teórico ao mesmo tempo em que se informatizam as extensas formulações de cálculo exigidas pelas normas atuais. Veríssimo e Paes (2000) afirmam um maior interesse e motivação por parte dos alunos pela área de trabalho, além de uma visão mais crítica sobre o uso das ferramentas computacionais. Os autores concluem que o uso de softwares no ensino de estruturas metálicas, quando bem conduzido, forma profissionais claramente conscientes da importância do trabalho do engenheiro, que software algum poderá substituir.

O Ftool<sup>8</sup> (*Two-dimensional Frame Analysis tool*), é um exemplo de software desenvolvido localmente na PUC-Rio, criado por Martha (2010) no mês de março de 1991 e constantemente atualizado com a participação de alunos de iniciação científica, mestrado e doutorado. Martha (2010) destaca que, além de universidades nacionais e internacionais, diversos escritórios de projeto estrutural utilizam o programa.

Uma nova abordagem para o ensino da análise de estruturas, entendida como uma simulação computacional do comportamento das estruturas, foi possível por meio do uso do Ftool, segundo Martha (2010). No site do programa é possível encontrar propostas educacionais de utilização do Ftool para ensino do método das forças e o método dos deslocamentos.

Um aspecto importante dos softwares desenvolvidos localmente é a possibilidade, nem sempre muito explorada, de se adicionar recursos não encontrados em pacotes comerciais, cujos objetivos estão exclusivamente voltados para produção de projetos profissionais.

Um exemplo de software destinado à pesquisa e simulação é o MASTAN2<sup>9</sup>, que oferece quatro diferentes tipos de análise: elástica e inelástica linear; elástica e inelástica não-linear.

Fonseca e Pintangueira (2004) consideram que o fracasso de desenvolvimento de softwares dentro do âmbito acadêmico se deve ao uso de linguagens de programação inadequadas à expansão, manutenção e distribuição. O uso de linguagens dependentes de sistema operacional é apontado pelos autores, como um importante fator limitante deste desenvolvimento. Outra crítica é o desenvolvimento por equipes fechadas e a documentação deficiente.

---

<sup>8</sup> web.tecgraf.puc-rio.br/ftool/

<sup>9</sup> www.mastan2.com

Chamberlain Praiva e Kripka (2011) comentam a inexistência de pesquisas, no Brasil, destinadas a avaliar os erros provocados por uso inadequado de computadores e por programas que se autodenominam educacionais, e alertam para o uso cauteloso destas ferramentas. No trabalho, apresentam propostas para o uso e desenvolvimento de ferramentas computacionais que em resumo destaca-se por:

- explicar e demonstrar os erros que podem ocorrer no uso dos computadores e programas para estruturas;
- alertar sobre as responsabilidades do usuário quanto ao uso do programa;
- demonstrar que o software não substitui a capacidade de interpretação e entendimento do comportamento da estrutura;
- escolher cuidadosamente os programas educacionais, procurando resolver exemplos simples coadunados com aplicações reais, com objetivo na fixação de conceitos e não na mera obtenção de resultados;
- preferir programas bem documentados, testados, com farto número de exemplos de uso e que chamem a atenção do usuário sobre a necessidade de verificação de dados e resultados.

Gama et. al. (2008) apresentam o conceito de objetos educacionais na forma de APPLETs (pequenos programas de computador construídos na linguagem JAVA de programação) e dos repositórios NUMELOS<sup>10</sup> (Numerical Methods Learning Objects) e OE3<sup>11</sup> (Objetos educacionais para engenharia). Os autores destacam a acentuada carência de softwares de ensino e aprendizagem de conteúdos matemáticos avançados disponíveis na internet que podem ser aplicados na resolução de diversos problemas de engenharia, sugerindo que os objetos educacionais, em conjunto com os repositórios, como uma alternativa de suprir esta demanda com base nos seguintes conceitos e conclusões:

- permitir o conhecimento disponível em qualquer momento e lugar por meio dos repositórios de objetos mantidos na internet;
- o uso repositórios como um banco de dados de informações padronizadas sobre os objetos educacionais confere rapidez de busca aos conteúdos desejados,

---

<sup>10</sup> [www.cesec.ufpr.br/etools/numelos](http://www.cesec.ufpr.br/etools/numelos)

<sup>11</sup> [www.cesec.ufpr.br/etools/oe3](http://www.cesec.ufpr.br/etools/oe3)

garantindo acessibilidade e qualidade das referências. Na Figura 2 é apresentada a página do repositório OE3, com as tabelas de classificação dos objetos;

- promover a construção de objetos educacionais reutilizáveis em diversos ambientes, independentes de plataforma (acessibilidade) e que garantam durabilidade (no sentido de se manter útil) e eficácia nos cálculos;
- objetos educacionais livres e de qualidade são resultado de pessoas de livre pensamento e interessadas na melhoria dos processos de ensino e aprendizagem dos futuros engenheiros;
- o uso de softwares ou *applets* de baixa qualidade podem comprometer a aprendizagem.

Figura 2: Repositório OE3, categorias de objetos educacionais.

The screenshot shows the OE3 repository interface. At the top, it says 'OBJETOS EDUCACIONAIS PARA ENGENHARIA DE ESTRUTURAS'. Below this, there are search options: 'BUSCA RÁPIDA' and 'BUSCA AVANÇADA'. The main content area is titled 'Classificação dos objetos:' and contains the following text:

Os "Objetos Educacionais" foram classificados de duas formas distintas: **Assuntos**, onde estão classificados de acordo com as disciplinas do Curso Engenharia Civil da UFPR, e **Categorias Estruturais**, organizados a partir dos sistemas construtivos fundamentais.

**Informações sobre as licenças de uso das obras disponibilizadas pelo CESEC:**  
É permitido: COPIAR, DISTRIBUIR, EXIBIR, TRADUZIR, EXECUTAR as obras e ainda CRIAR obras derivadas.  
**Sob as seguintes condições:**  
Você deve dar crédito ao autor original da forma especificada pelo autor ou licenciente.  
Você não pode utilizar esta obra com finalidades comerciais.  
Para cada novo uso ou distribuição, você deve deixar clara para outros os termos da licença desta obra.

The classification is divided into two main sections:

#### Assuntos

Sistemas Estruturais	Concreto Armado e Protendido
	Madeira
	Metálicos
	Mistos
Mecânica Geral	
Resistência dos Materiais	
Estrutura de Edifícios	
Teoria das Estruturas	Hiperestáticas
	Isostáticas

#### Categorias Estruturais

Tridimensionais	Sólidos	Barrações
		Blocos de Fundações
		Muros de Arrimo
Bidimensionais	Cascas	Abobodas
		Cúpulas
	Placas	Chapas
		Placas
Reticuladas	Arcos	
	Cabos	
	Pórticos	Espacial
		Pilar
		Plano
		Viga
	Trelças	Espacial
		Plana

The footer of the page includes logos for UFPR, CESEC, and CNPq.

Ao se tratar, no caso específico de programas de computador denominados livres, é importante destacar o significado este conceito baseado em quatro liberdades fundamentais, da criação em 1985 da Fundação do Software Livre (Free Software Foundation)<sup>12</sup> que define se um software é livre ou não. Com base no estudo de Falcão et al (2005) são elas:

<sup>12</sup> www.fsf.org



- *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.*

### **3.2 SOFTWARES EDUCACIONAIS PARA A ANÁLISE DE ESTRUTURAS**

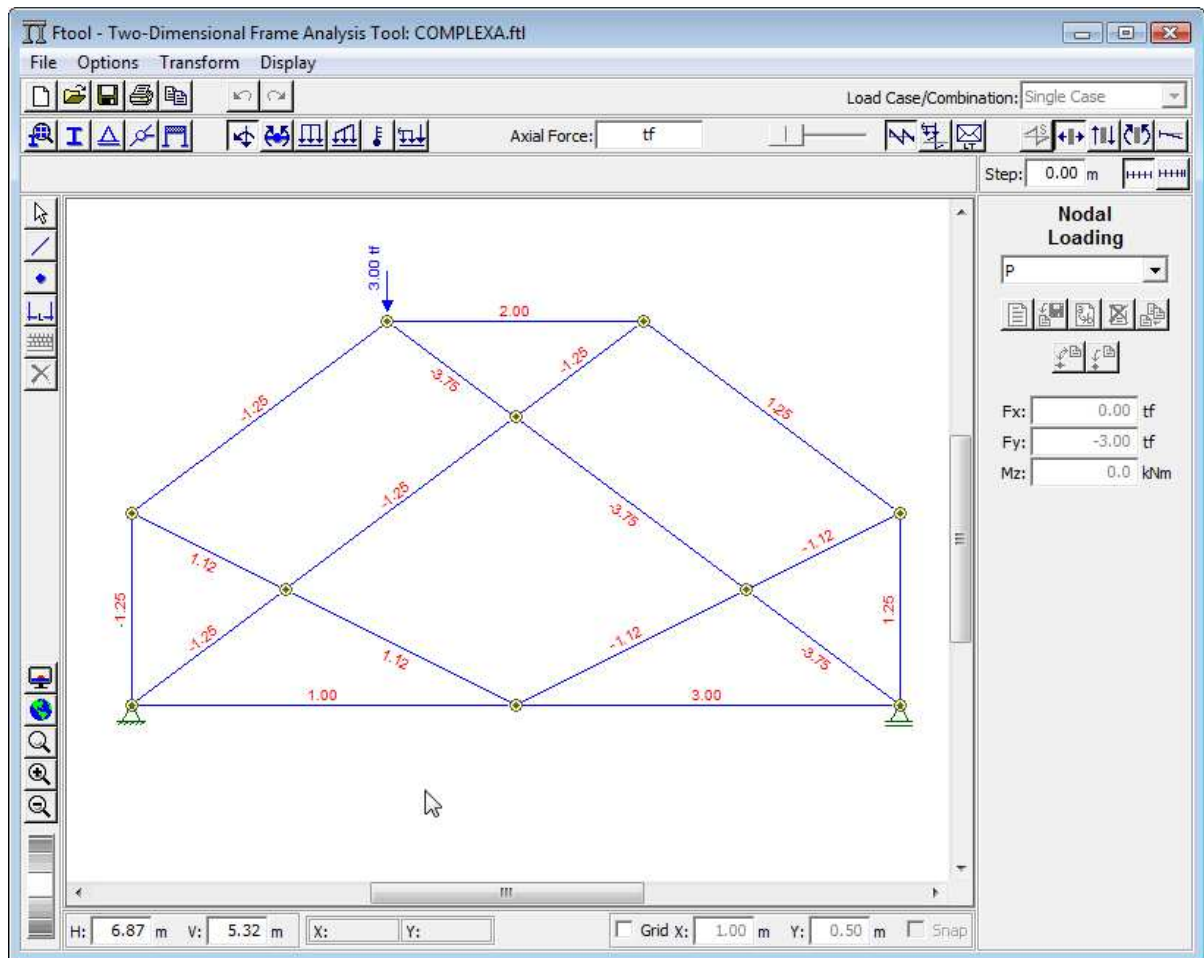
Não existindo norma ou critérios específicos de software educacional para análise de estruturas, procurou-se traçar um panorama das aplicações disponíveis gratuitamente na internet utilizadas nesta área e de possível aplicação educacional.

O Ftool (*Two-dimensional Frame Analysis Tool*), é um exemplo bem sucedido de software interativo para o ensino do comportamento de estruturas e plataforma para desenvolvimento de soluções específicas, como a desenvolvida por Kaefer (2000) para análises não-lineares físico-geométricas de pórticos de concreto armado. O Ftool se destaca por suas ferramentas para criação e manipulação da geometria de forma simples e intuitiva, aliadas a uma rápida análise e visualização dos resultados.

Segundo Kaefer (2000), o Ftool utiliza o método dos deslocamentos na sua abordagem matricial para resolução da estrutura. Kaefer (2000) destaca que seu sistema gráfico permite o uso do programa em qualquer plataforma. Atualmente ele é distribuído para os sistemas operacionais Windows e Linux.

Do ponto de vista da análise de treliças planas, o Ftool pode apresentar certa dificuldade, pelo menos do ponto de vista de representação gráfica, principalmente na modelagem de treliças classificadas como complexas, onde é comum o cruzamento de barras independentes. Neste caso o programa cria automaticamente um nó na interseção de barras sem a possibilidade de remoção, conforme exemplificado na Figura 3. Outra dificuldade para disciplinas de projeto é o fato de não haver recursos para combinações de casos de carregamentos, pelo menos na versão distribuída gratuitamente na internet.

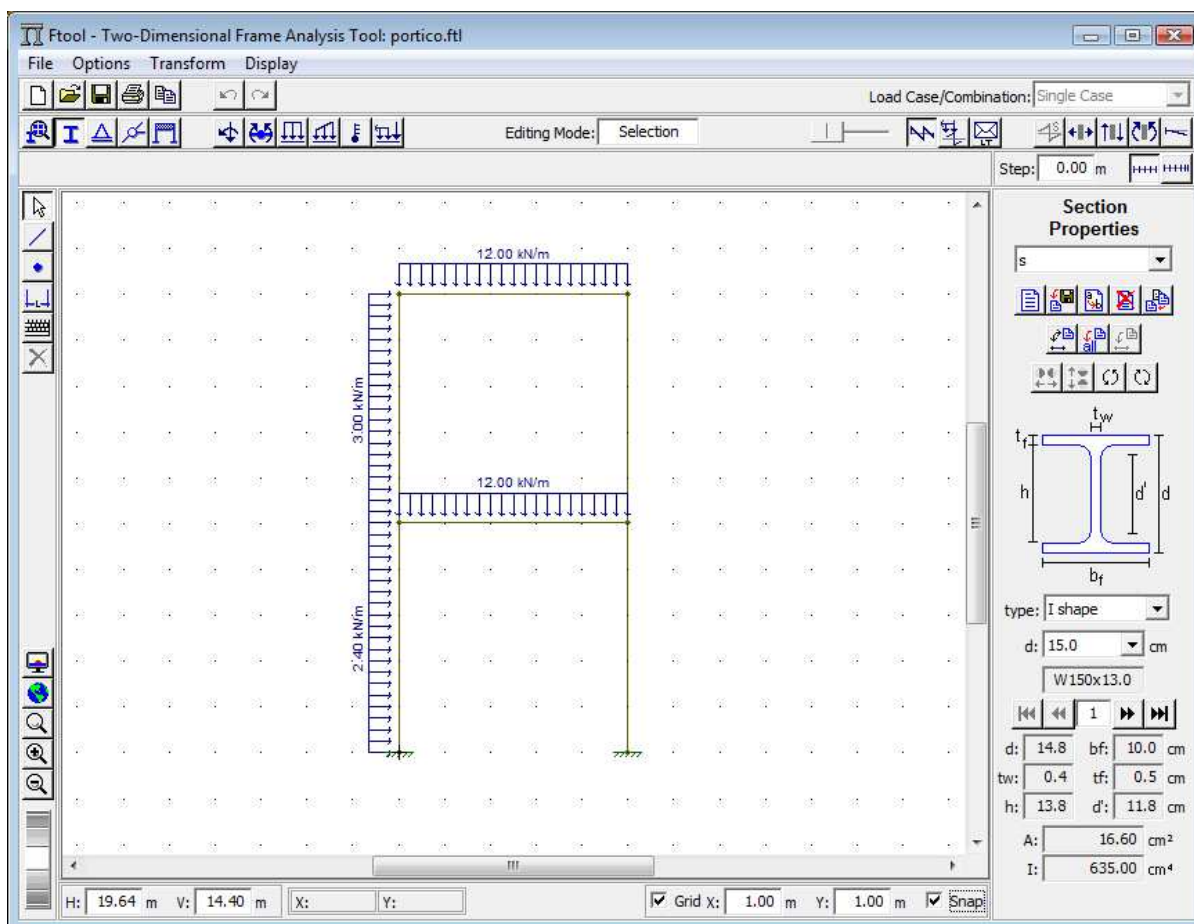
**Figura 3: Treliça isostática complexa analisada no FTOOL.**



A qualidade técnico-teórica do programa, facilidade de uso e aspectos de interatividade, fazem do Ftool uma referência dentro dos cursos de engenharia e explicam a fácil assimilação por parte dos alunos e professores.

Outro recurso dificilmente encontrado em softwares, disponibilizados gratuitamente na internet, são as ferramentas e bibliotecas de seções transversais utilizadas na análise. No caso do Ftool, estas ferramentas e bibliotecas são apresentadas em grande quantidade por meio de controles de fácil operação, conforme ilustrado na Figura 4. O manual escrito em português ajuda a superar a dificuldade inicial de compreensão dos comandos do programa, disponível apenas em inglês.

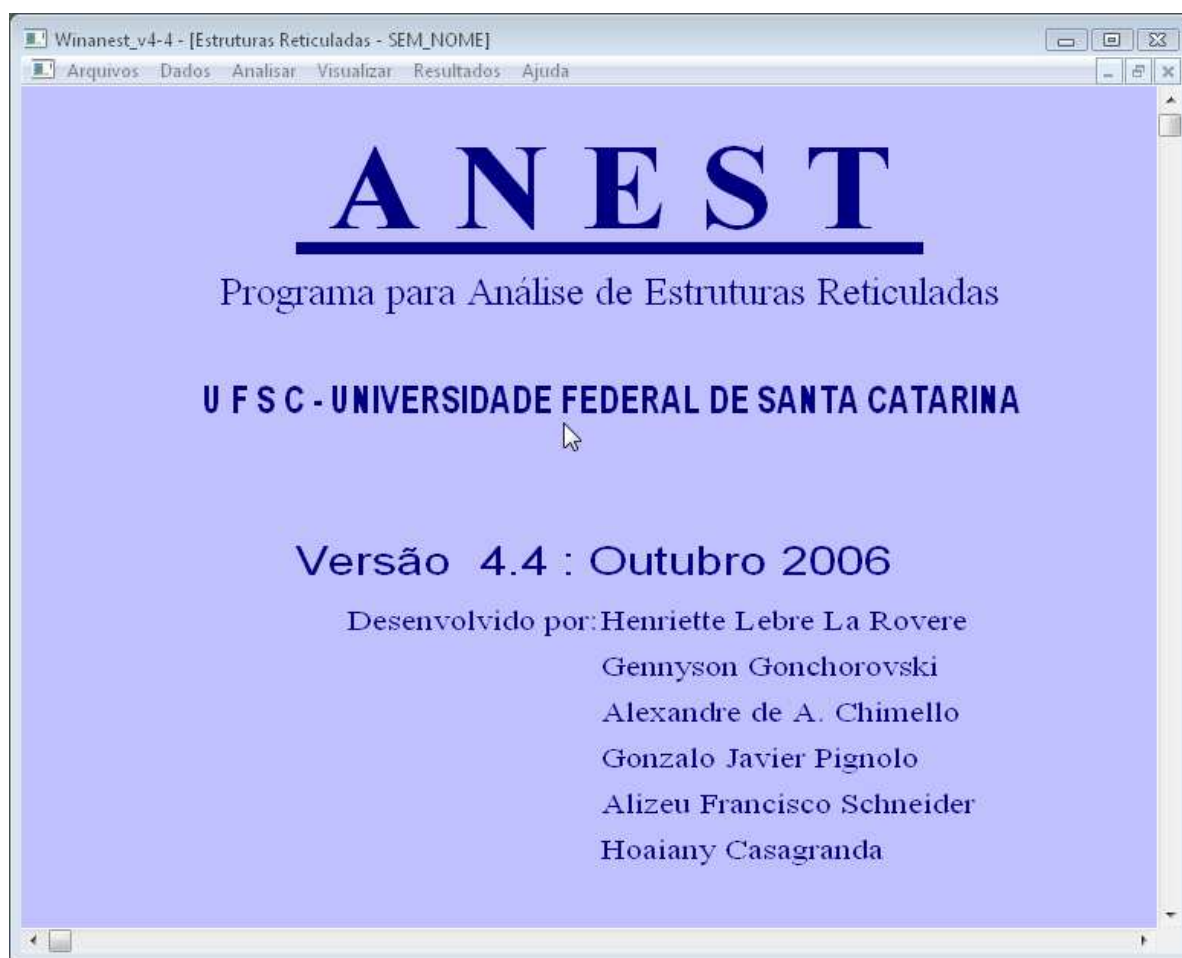
Figura 4: Gerenciador de seções transversais do FTOOL.



O ANEST<sup>13</sup>, programa para fins educacionais, cuja tela da última versão é apresentada na Figura 5, foi desenvolvido no Laboratório de Análise de Estruturas do Departamento de Engenharia Civil da Universidade Federal de Santa Catarina (UFSC).

<sup>13</sup> [www.ecv.ufsc.br/~ecv1h/r/ANEST](http://www.ecv.ufsc.br/~ecv1h/r/ANEST)

**Figura 5: Tela inicial do software ANEST.**



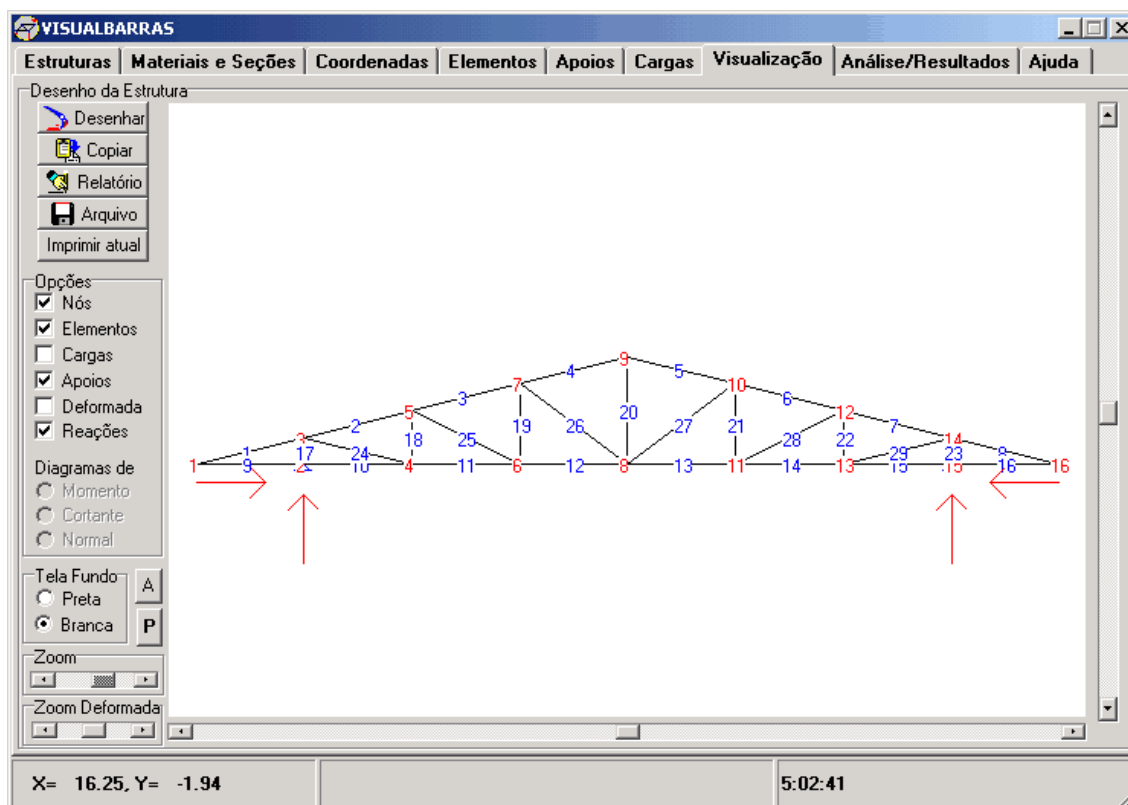
La Rovere e Schneider (2003) apresentam o ANEST como um programa educacional para a análise estática de estruturas reticuladas, planas e espaciais, que utiliza o método dos deslocamentos em sua abordagem matricial, desenvolvido inicialmente em linguagem FORTRAN 77 e depois em FORTRAN 90. O programa possui um sistema de janelas gráficas que possibilita a definição da estrutura por meio de dados numéricos. Os resultados das análises podem ser vistos graficamente, conforme apresentado na Figura 6, e por meio de relatórios.

La Rovere e Schneider (2003), concluem que a divisão do ANEST em módulos, simulando as etapas da formulação matricial do método dos deslocamentos, torna o programa mais didático em comparação aos sistemas comerciais. Apesar de não possuir uma interface gráfica interativa de pré-processamento como a do Ftool, o ANEST possibilita a criação de diferentes casos de carregamento e combinações de carregamento. Disponível



parte do usuário para a correta interpretação dos resultados. Na Figura 7 está representada a aba do programa de visualização da estrutura com numeração de nós, barras e reações de apoio.

**Figura 7: Módulo de visualização gráfica da geometria da estrutura do software VISUALBARRAS**



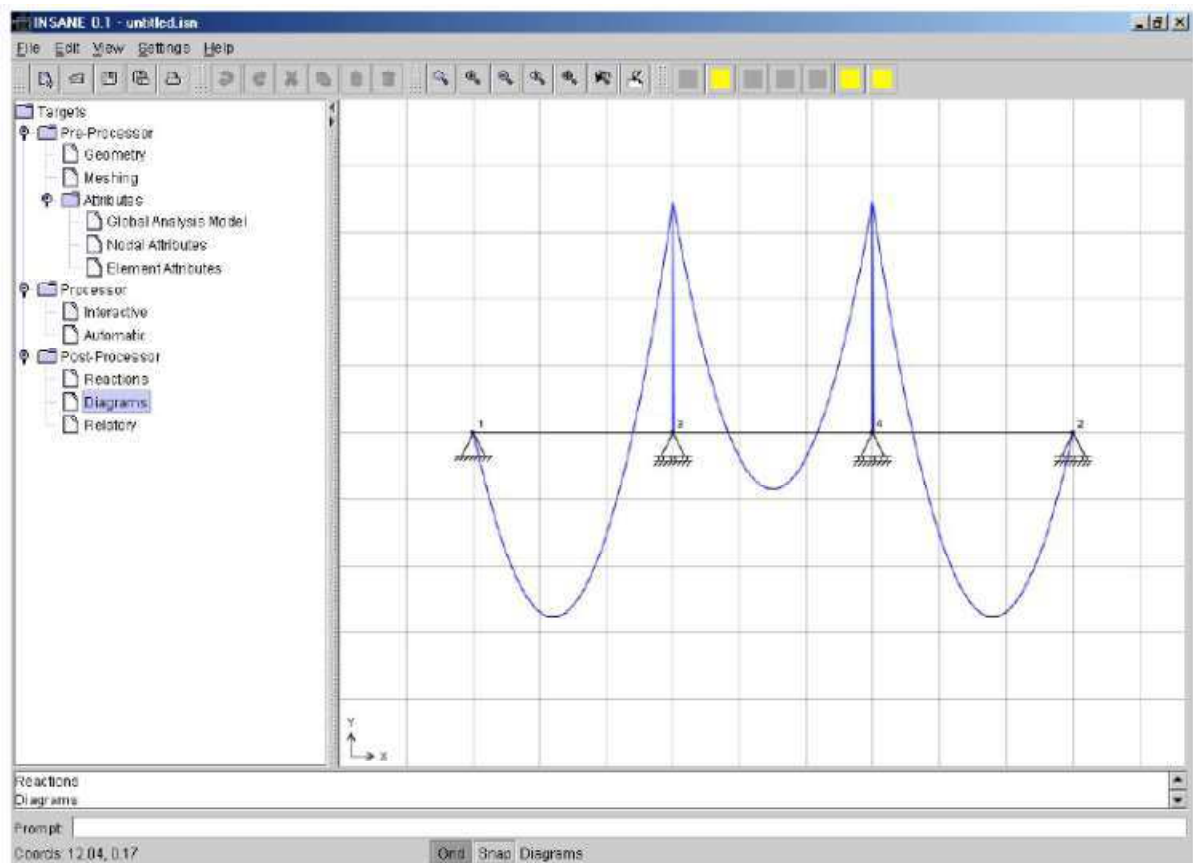
O projeto INSANE<sup>15</sup> (Interactive Structural Analysis Environment) propõe uma solução gráfica e interativa para análise de estruturas implementada na linguagem Java. Baseado em modelos estruturais de barras como um caso particular do Método dos Elementos Finitos, permite a análise estática linear de vigas, pórticos planos, treliças planas e grelhas. Uma característica interessante é a possibilidade de o usuário poder alternar o idioma do programa, português ou inglês, em qualquer instante. A interface gráfica do software possui uma grande gama de configurações de cores e escalas dos elementos de representação gráfica da estrutura e dos diagramas resultantes da análise, como pode ser observado na Figura 8. Ao contrário do Ftool, o INSANE não possui recursos para modificação da estrutura após definição da geometria, exigindo esforço adicional por parte

<sup>15</sup> [www.insane.dees.ufmg.br/insane](http://www.insane.dees.ufmg.br/insane)

do usuário no caso de alterações. Os resultados emitidos por meio de relatório devem ser interpretados em função do sistema de unidades dimensionado pelo usuário.

Fonseca e Pintangueira (2004) destacam como principais objetivos do programa INSANE, a diminuição das barreiras entre o desenvolvimento teórico e a aplicação dos modelos discretos de análise, a promoção de uma maior agilidade e criatividade da pesquisa na área sem retrabalho no processo de implantação. Sua utilização em disciplinas de análise estrutural e em pesquisas do Departamento de Engenharia de Estrutura (DEES) da Universidade Federal de Minas Gerais (UFMG), promove a constante ampliação do projeto INSANE, principalmente do seu núcleo numérico. Em termos de limitações, destaca-se a pouca documentação disponível sobre como utilizar o programa, apesar de intuitivo para aqueles que possuem experiência na análise de estruturas.

**Figura 8: Tela do software INSANE.**



Em se tratando de softwares educacionais integrados temos como um raro exemplo, o programa computacional AUTOMETAL<sup>16</sup>, desenvolvido por um grupo de alunos e professores do Departamento de Estruturas da Faculdade de Engenharia Civil da Universidade Estadual de Campinas (UNICAMP), e destinado a projeto de coberturas em treliças planas, incluindo a análise e dimensionamento de perfis laminados e formados a frio.

O programa está escrito em português, possui manual que explica todas suas funções, incluindo exemplos de aplicação que ajudam a entender as etapas de desenvolvimento do projeto. A entrada pode ser feita por meio de dados inseridos em janelas integradas com a interface do programa, pela importação de arquivos padrão DXF ou por meio de arquivos de dados. Ainda em termos de definição de geometria, é dada a opção de geração automática de coberturas com treliças em duas águas, treliças de banzos paralelos, arco circular, arco parabólico e em arco com inércia variável.

Como recursos de projeto, é possível definir grupos de barras, casos e combinações de carregamentos, contraventamentos, geração automática ou manual de carregamentos (incluindo a ação do vento para coberturas em duas águas e em arco), visualização de esforços e reações (em modo gráfico e por meio de relatórios), banco de dados de perfis (que permite a edição dos diferentes tipos de seções), critérios de dimensionamento otimizados (peso, altura ou espessura da alma da seção do perfil) e delimitação de grupos de perfis para dimensionamento (incluindo relatório com a relação de perfis e peso total da estrutura). Na Figura 9 são apresentadas algumas telas do programa.

Pode-se dizer que o AUTOMETAL é um programa dedicado a uma solução específica de projeto de coberturas metálicas de treliças planas, cujos encadeamentos das etapas de construção, análise e dimensionamento do modelo estrutural reproduzem as etapas naturais de projeto.

Por possuir algumas unidades de trabalho fixas e outras não explicitamente informadas, o AUTOMETAL exige do usuário um esforço adicional na adequação das grandezas dimensionais. Também na interpretação dos resultados de esforços e reações de apoio é necessária a consulta aos relatórios numéricos gerais ou individuais de cada barra. Em relação aos critérios de dimensionamento, o programa não apresenta os resultados do dimensionamento individual das barras relacionados aos esforços solicitantes obtidos na análise. Por não contar com uma plataforma para edição gráfica da geometria, alterações

---

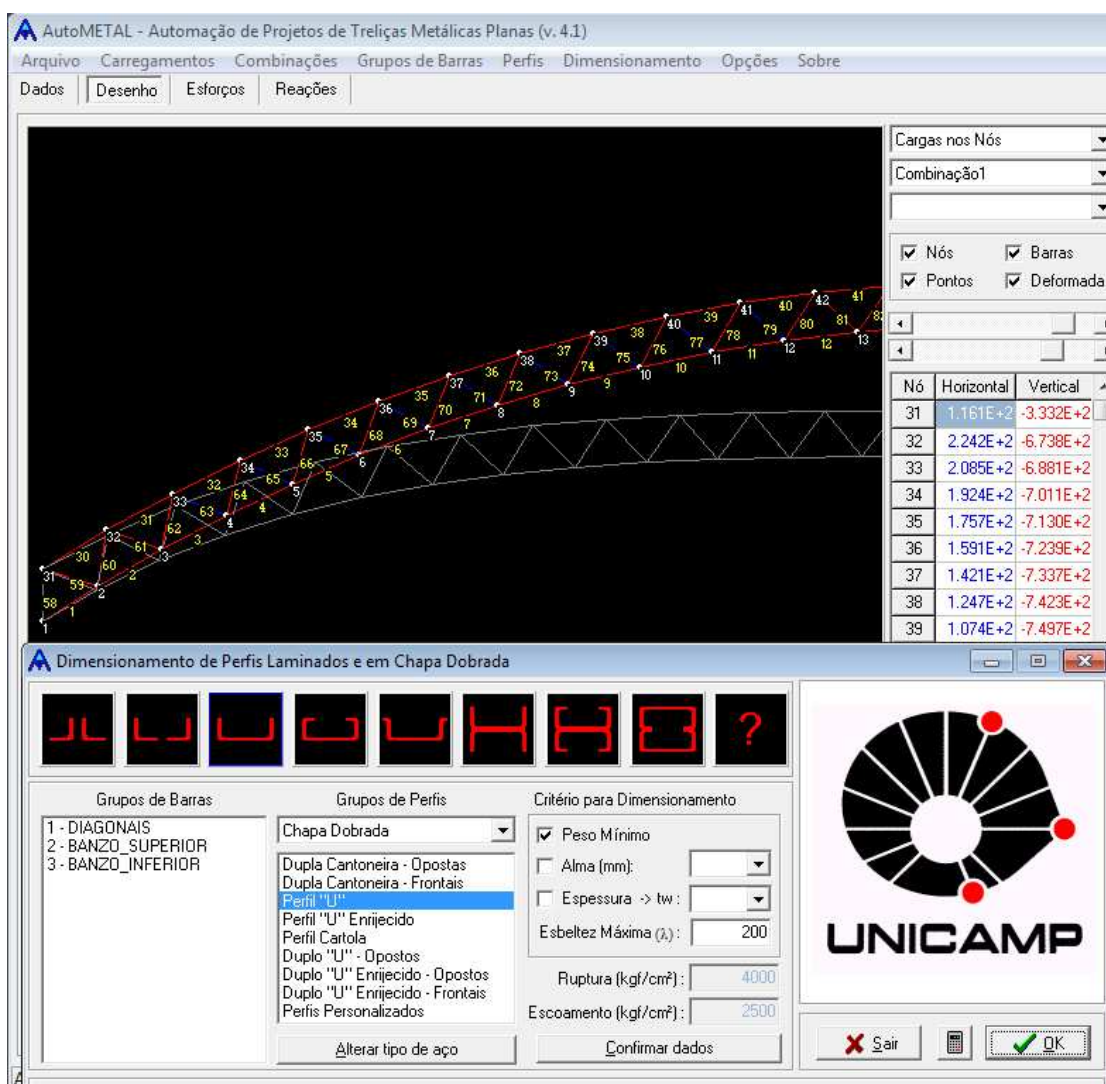
<sup>16</sup> [www.fec.unicamp.br/~autmetal/](http://www.fec.unicamp.br/~autmetal/)



podem ser feitas por um dos processos de lançamento e definição da geometria, o que pode gerar algum desconforto em função da magnitude destas alterações.

Assim como os demais programas aqui citados, o AUTOMETAL não possui informações sobre seu desenvolvimento nem seu código-fonte está disponível para uso público.

**Figura 9: Tela do software AUTOMETAL.**

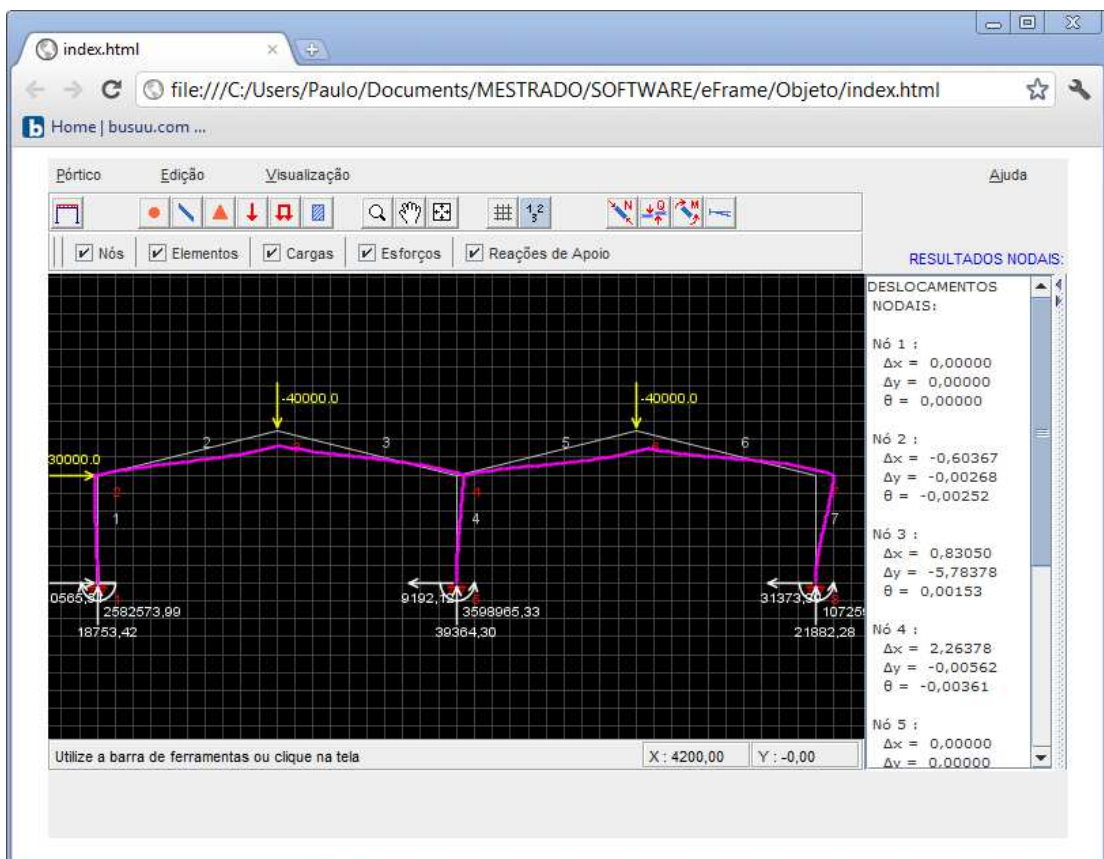


Os objetos educacionais e-Frame e e-Truss, disponibilizados no repositório OE3 (Objetos educacionais para engenharia, são exemplos de *applets* (pequenas aplicações escritas na linguagem de programação JAVA) para ensino em disciplinas de análise de estruturas, pórticos e treliças planas, respectivamente. Com poucos comandos e sem a possibilidade de armazenar os dados da estrutura em arquivos de dados, seu uso fica

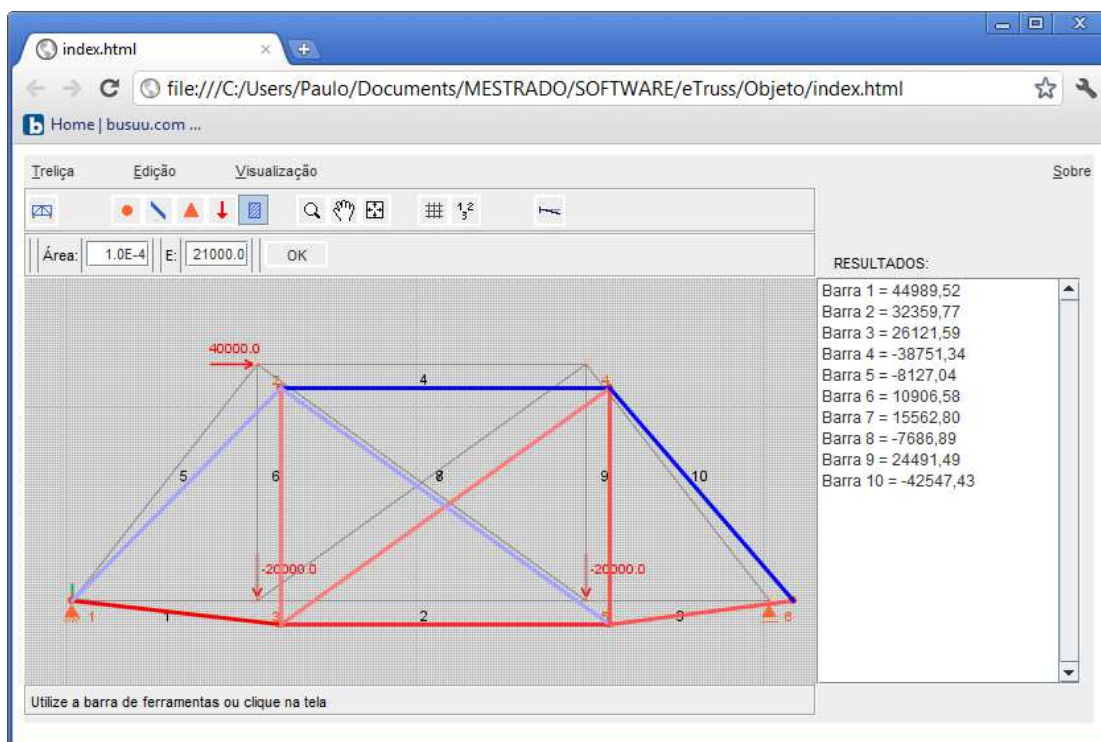
restrito a resolução de estruturas com poucas barras e geometrias menos complexas, uma vez que o usuário deve lançar a informação, nó a nó da estrutura, clicando sobre a área gráfica ou por meio dos valores absolutos das coordenadas do plano cartesiano.

Apesar de simples, interativo e da possibilidade de utilização por meio de acesso à internet, a falta de detalhes sobre seu desenvolvimento, sobre seu código fonte e uma documentação específica com exemplos de utilização, pode desestimular o uso destes programas em propostas educacionais. Na Figura 10 e na Figura 11 são apresentadas as telas dos programas e-Frame e e-Truss, respectivamente, sendo executados dentro de uma aplicação de navegação de internet, comumente conhecidos como navegadores.

**Figura 10: Objeto educacional e-Frame.**



**Figura 11: Objeto educacional e-Truss.**



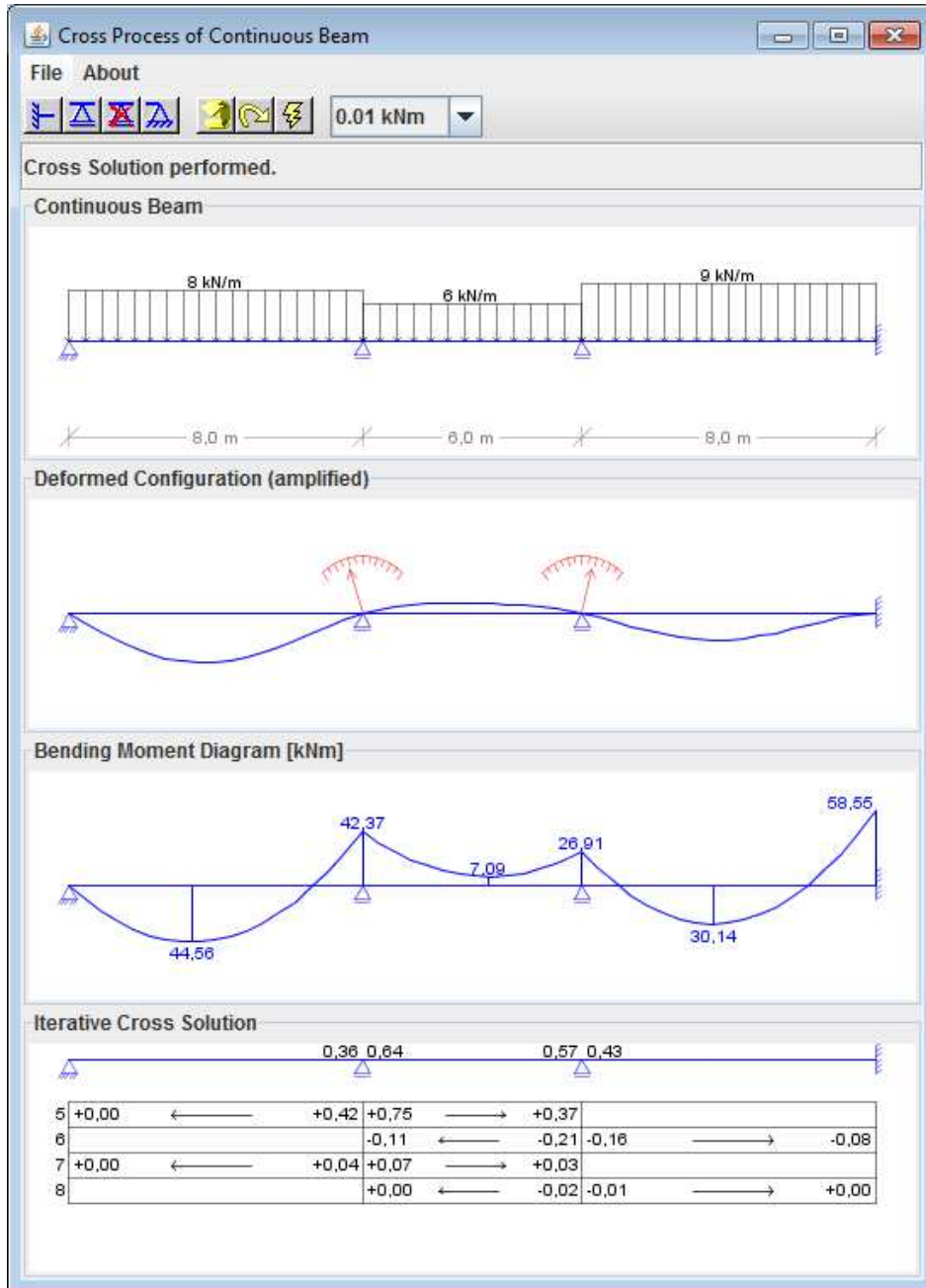
Outro objeto educacional que merece destaque por seu caráter educacional é o e-Cross<sup>17</sup> (Cross Process of Continuous Beam), um *applet* capaz de ser utilizado em modo on-line pela internet ou off-line em sistemas operacionais com suporte as aplicações JAVA. O programa cumpre a proposta de representar de forma interativa as etapas de resolução de vigas hiperestáticas por meio do Método da Distribuição de Momentos ou Processo de Cross, ainda muito utilizado como introdução ao Método dos Deslocamentos. Disponível na internet por meio de uma página própria associada ao Grupo de Tecnologia em Computação Gráfica (TecGraf/PUC-RIO) e no repositório OE3, o objeto conta com manual on-line que explica todos os seus comandos e recursos de interação com o usuário.

Diferentemente do e-Frame e do e-Truss, o e-Cross fornece ao usuário a possibilidade de salvar e recuperar os dados da estrutura lançada, recurso muito importante que também facilita a troca e correção dos exercícios realizados. Outro aspecto interessante está na opção de configuração da precisão desejada na compensação dos momentos fletores, simulando a problemática das resoluções manuais. Um dos grandes destaques do programa e-Cross é a representação gráfica das rotações dos nós

<sup>17</sup> [web.tecgraf.puc-rio.br/etools/cross](http://web.tecgraf.puc-rio.br/etools/cross)

equilibrados e do processo iterativo de compensação de momentos fletores, conforme apresentado na Figura 12.

**Figura 12: Tela do objeto educacional e-Cross.**



No âmbito das ferramentas com o recurso de análise não-linear geométrica exata, uma alternativa nacional para fins de ensino é o AcadFrame<sup>18</sup>, um software acadêmico para análise de pórticos e treliças planas por meio do Método dos Elementos Finitos, desenvolvido no Departamento de Engenharia de Estruturas da Escola de Engenharia de São Carlos. Dentro dos seus recursos destacam-se o processo de análise não-linear geométrica (por meio do chamado Elemento Finito Posicional), o efeito de temperatura e a combinação de carregamentos. Com uma interface gráfica para definição da geometria e lançamento dos carregamentos o AcadFrame se assemelha ao Ftool, porém com menos interatividade na modificação e visualização da estrutura, o que pode dificultar o trabalho com estruturas com muitos elementos de barras. Importantes recursos como o de importar a geometria da estrutura por meio de arquivos DXF e a possibilidade da combinação de ações, são um diferencial apresentado pelo AcadFrame em relação ao Ftool.

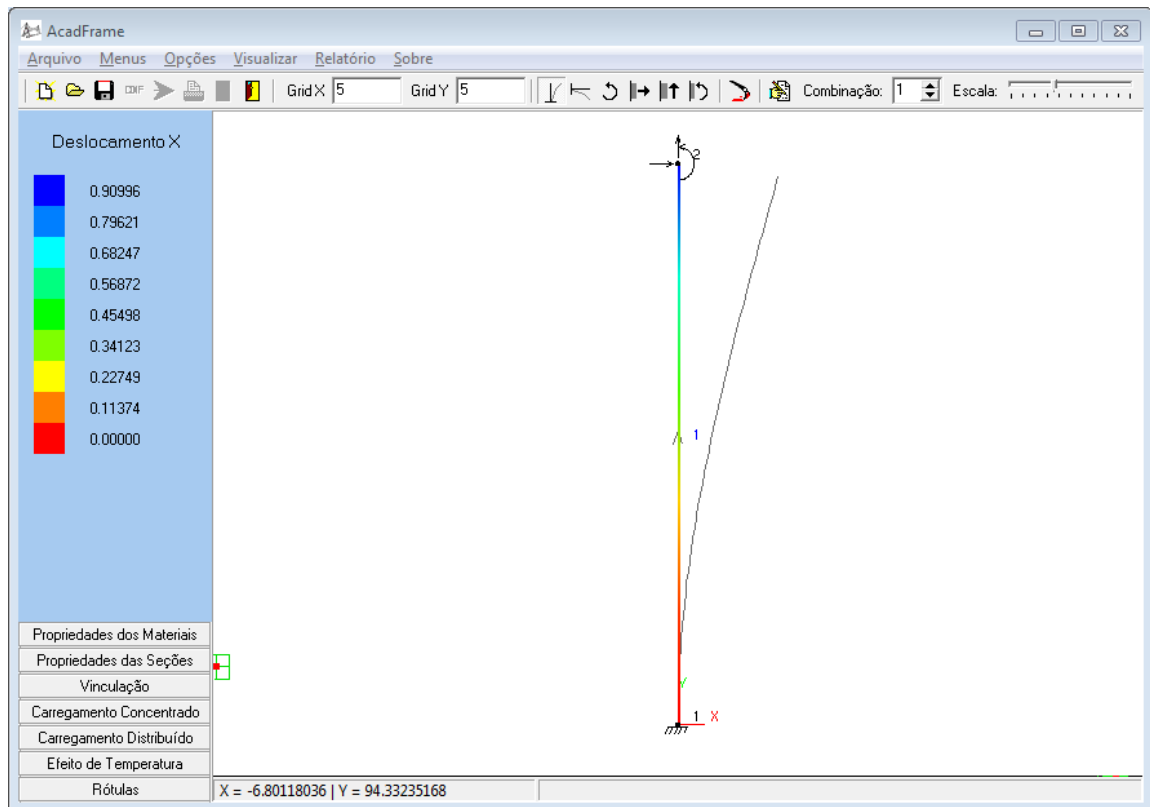
O sistema de unidades é arbitrado pelo usuário que deve verificar cuidadosamente o significado físico dos resultados. Os diagramas de esforços podem ser visualizados na área gráfica do programa (que possui um controle de escala) e os valores numéricos lidos no mapa de cores, apresentado na Figura 13. Um relatório em modo texto pode ser gerado após análise. A correta modelagem do problema lançado no programa permite aferir a sensibilidade da estrutura aos efeitos da não-linearidade geométrica.

Com módulo de processamento na linguagem de programação Fortran<sup>®</sup>, cujos códigos fontes não estão disponíveis no site do programa, e interface gráfica desenvolvida em Delphi<sup>®</sup>, o AcadFrame possui uma documentação básica que explica a utilização dos seus comandos, seguidos de exemplos de utilização e dois arquivos de modelos de pórticos (disponibilizados na sua pasta de instalação). No site do programa não foi possível identificar trabalhos acadêmicos diretamente relacionados ao desenvolvimento, teorias, conceitos ou aplicações com o uso do programa.

---

<sup>18</sup> [www.set.eesc.usp.br/acadframe](http://www.set.eesc.usp.br/acadframe)

**Figura 13: Tela do software AcadFrame.**



Dentro do conceito de análise avançada, onde se pode simular por meio de análise exata as não linearidades físicas, geométricas e demais efeitos que aproximam os modelos matemáticos do real da estrutura, o grande destaque é o software gratuito MASTAN2, desenvolvido com base na reconhecida aplicação comercial de computação e análise numérica MATLAB<sup>®19</sup>. O programa possui um sistema gráfico e interativo de pré-processamento, análise e pós-processamento integrados. Os recursos de pré-processamento possibilitam o lançamento, via coordenadas, de nós e de elementos de barras por meio da seleção dos nós previamente definidos. Os comandos para definição das restrições de apoio, deslocamentos prescritos, ligações semi-rígidas, propriedades das seções e materiais, carregamentos concentrados, distribuídos e de efeitos de temperatura, estão dispostos de forma muito organizada e com uma homogênea filosofia de criação, atribuição e edição destas definições. O módulo de análise permite solucionar problemas lineares e não-lineares (análise elástica e inelástica) para estruturas de pórticos e treliças (em modelos planos ou tridimensionais). Para as etapas de pós-processamento é possível

<sup>19</sup> [www.mathworks.com/products/matlab](http://www.mathworks.com/products/matlab)



avaliar os resultados por meio de diagramas, gráficos e relatórios de texto. Usuários do programa MATLAB podem ter acesso a doze funções de análise do MASTAN2 e utilizá-las em aplicações específicas. No site oficial do programa e no pacote de instalação há uma documentação básica dos comandos e um exemplo didático de aplicação. Os conceitos teóricos de análise podem ser encontrados no texto de MacGuire; Gallagher; Ziemian(2000). Na Figura 14 e na Figura 15, apresenta-se a tela inicial do programa e o diagrama carregamento-deslocamento para os diferentes tipos de análises realizadas pelo programa.

**Figura 14: Tela do software MASTAN2.**

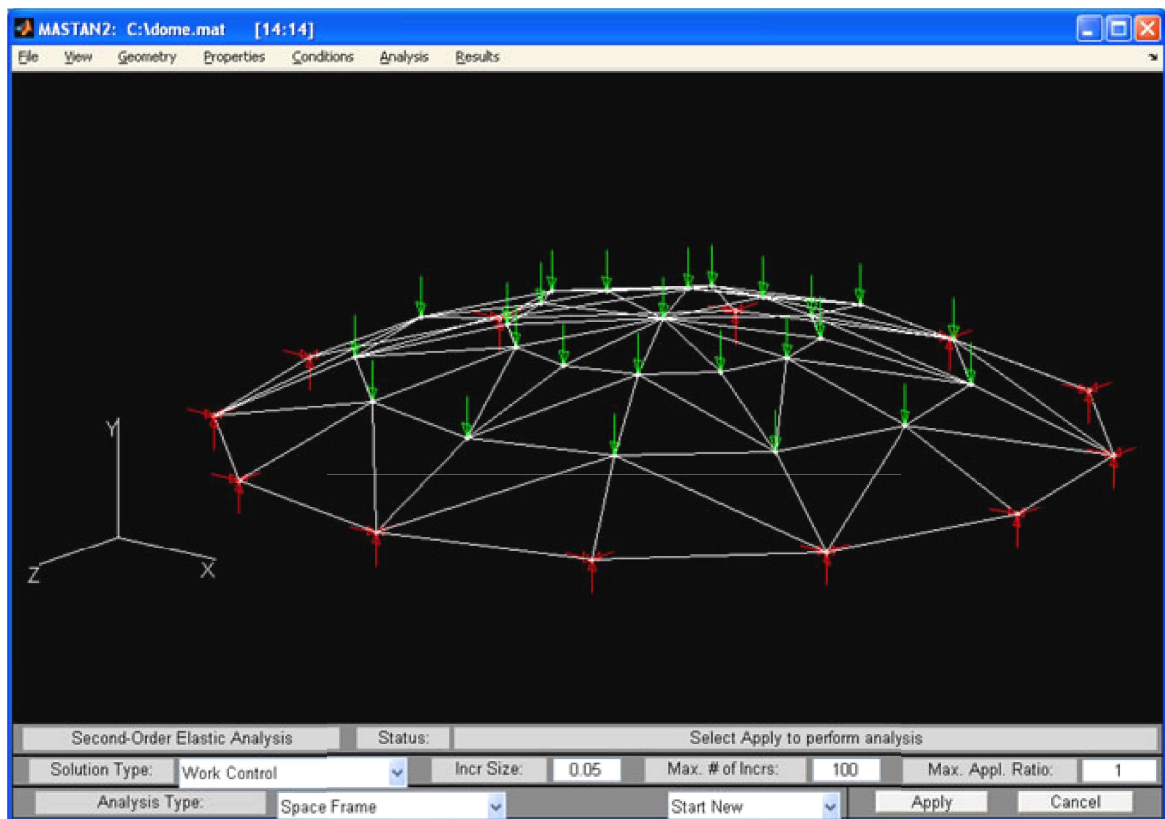
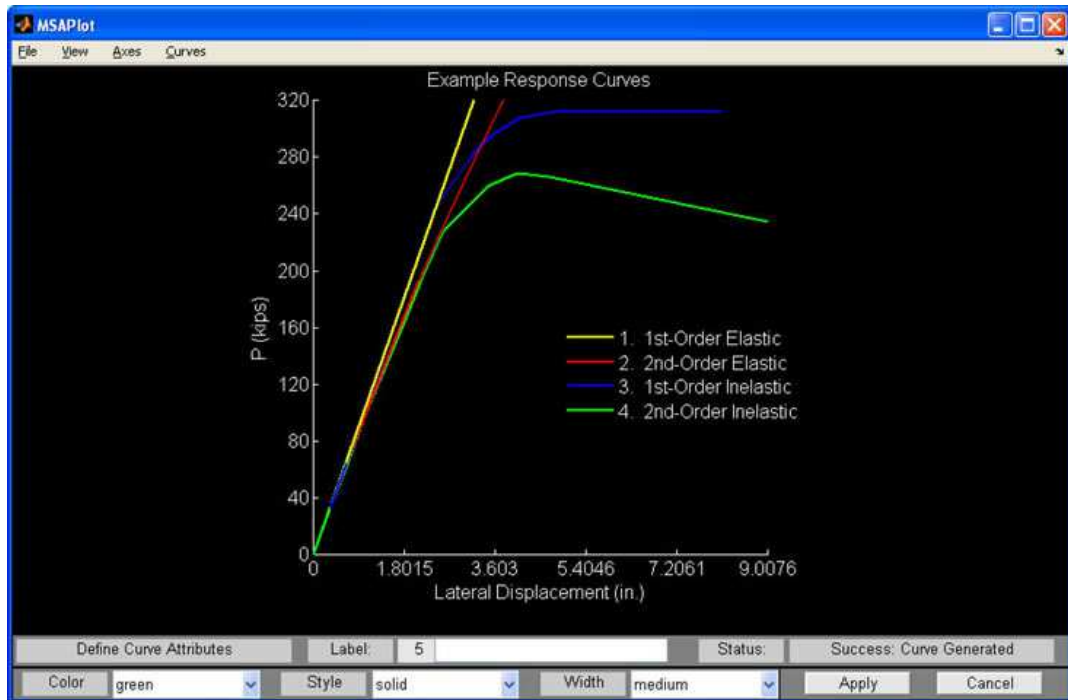


Figura 15: Diagrama Carreamento-deslocamento em função dos tipos de análise.



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



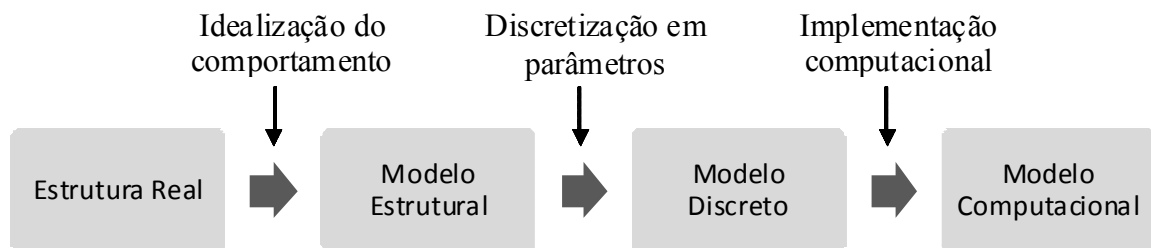
Tabela 1: Relação dos softwares para fins educacionais

Software	Classificação da estrutura em termos de deslocabilidade	Análise Não-Linear Geométrica	Código-fonte disponível	Pré-processamento Gráfico (comandos de desenho e edição de barras)	Dimensionamento de barras	Combinações de ações	Documentação
e-cross	Não	Não	Não	sim	Não	Não	Sim
AutoMetal 4.1	Não	Não	Não	Não	Sim	Sim	Sim
e-Frame	Não	Não	Não	sim	Não	Não	Não
e-Truss	Não	Não	Não	sim	Não	Não	Não
Trame 3.0	Não	Não	Não	Não	Não	Não	Sim
Anest 4.4	Não	Não	Não	Não	Não	Sim	Sim
Insane 1.1	Não	Não	Não	Sim	Não	Não	Sim
AcadFrame Beta	Não	Sim (Exata)	Não	Sim	Não	Sim	Sim
Ftool	Não	Não	Não	Sim	Não	Não	Sim
Visual Barras 1.6	Não	Não	Não	Não	Não	Não	Sim
Mastan2 3.3.1	Não	Sim (Exata)	Não	Não	Não		Sim
Trame 4.0	Sim	Sim (Simplificada)	Sim	Sim	Não	Sim	Sim

# 4. ANÁLISE NÃO LINEAR GEOMÉTRICA

Em resumo, a análise das estruturas trata da elaboração de modelos matemáticos e da sua transformação em modelos discretos que representem de forma adequada seu comportamento real, o mundo físico. Quanto mais próximo é o modelo matemático do modelo real, mais complexa é sua análise e interpretação. Os modelos estruturais ou matemáticos englobam todas as hipóteses e teorias físicas elaboradas sobre o comportamento real da estrutura. O modelo discreto estabelece os parâmetros a serem utilizados em função dos métodos de cálculo e análise adotados. A abordagem computacional destes métodos é o que chamamos de Modelo Computacional. Estas definições estão resumidas na Figura 16, e foram adaptadas de MARTHA (2010).

**Figura 16: Abstrações referentes a uma estrutura na análise estrutural**



Fonte: Adaptado de (MARTHA, 2010)

Para idealização de modelos estruturais contínuos, como é o caso das placas, cascas e blocos, cuja estrutura real não possui ligações discretas, os elementos planos (triangulares ou retangulares, etc.) ou tridimensionais (tetraedros) são conectados por nós, tendo forças e deslocamentos determinados pela compatibilização da energia de deformação. Quanto maior o número de elementos, mais próximos da solução exata estarão os resultados obtidos. Este modelo de discretização é parametrizado pelo Método dos Elementos Finitos.

As estruturas reticuladas, ou seja, formadas barras que sempre podem ser representadas por uma linha, ainda são classificadas em modelos caracterizados em função da geometria, do tipo de carregamento aplicado, das deslocabilidades consideradas, tipos de apoio, etc. Os modelos clássicos de estruturas reticuladas são:

- modelos de vigas;
- modelo de treliças planas;
- modelo de pórticos planos;
- modelo de grelhas;
- modelo de treliça tridimensional;
- modelo de pórtico tridimensional;
- cabos e arcos.

Diferentes tipos ou métodos de análise podem ser empregados numa mesma discretização de parâmetros, adicionando mais ou menos complexidade à análise em função dos efeitos que se deseja reproduzir para garantir a estabilidade da estrutura como um todo e de seus elementos isoladamente.

#### 4.1 TIPOS DE ANÁLISE DE ESTRUTURAS RETICULADAS

As estruturas reticuladas podem ser analisadas por meio de vários modelos representativos do comportamento da estrutura. Quando o equilíbrio de uma estrutura é estabelecido em sua posição indeformada, dizemos que a estrutura foi analisada em **Teoria Linear**.

Quando o equilíbrio da estrutura é estabelecido em sua posição deformada, em função da não-linearidade geométrica ocasionada pela ação dos carregamentos sobre os deslocamentos da análise linear, temos o que se denomina análise **Não-Linear Geométrica**.

Se o comportamento do material é considerado elástico (sem deformações residuais ao descarregar a estrutura) e linear, com proporcionalidade entre tensões e deformações, admite-se que o material trabalha em **regime elástico-linear**.

Sabe-se que o comportamento dos materiais é bem mais complexo, sendo o regime elástico-linear viável em hipóteses de pequenas deformações, linearizando as equações que

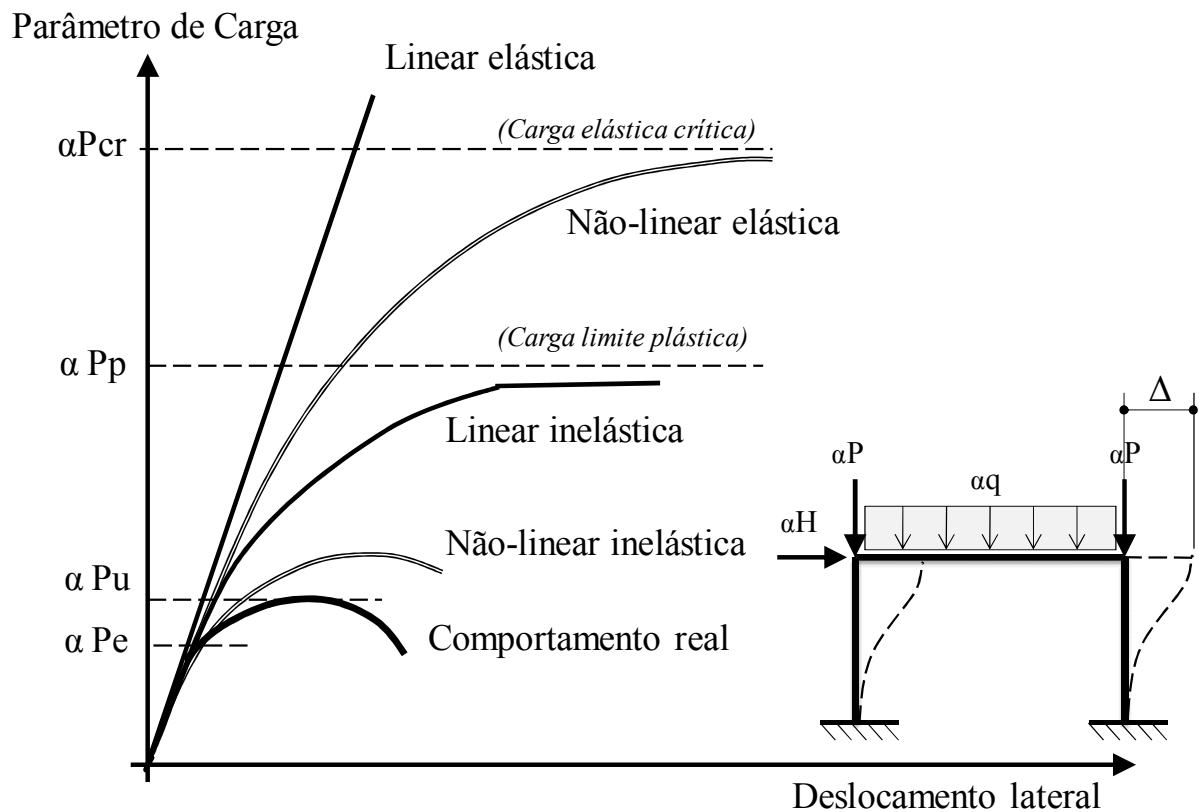
descrevem este comportamento. Considerando a não-linearidade física do material a análise é dita em **regime inelástico**.

Combinando as teorias de análise linear e não-linear com os regimes elásticos e inelásticos, resulta em quatro tipos de análise que podem ser empregadas na determinação dos esforços, deslocamentos e no estudo da estabilidade das estruturas.

Na

Figura 17 adaptada dos trabalhos de Silva (2004), Lavall (1988) e Galambos (1998), são apresentados os tipos de análise acima descritos em comparação com o comportamento real das estruturas, numa análise qualitativa por meio do diagrama de carga-deslocamento. É importante destacar que quanto maiores forem os deslocamentos da estrutura, a análise em 1ª ordem fica menos representativa do comportamento real da estrutura, sendo fundamental conhecer quando é necessária uma análise mais realista e por quais processos ela deve pode ser realizada. Os critérios aproximados de classificação e, quando for o caso, majoração de esforços propostos pelos **códigos de projeto**, visam suprir esta necessidade.

**Figura 17: Diagrama carga-deslocamento dos tipos de análise.**



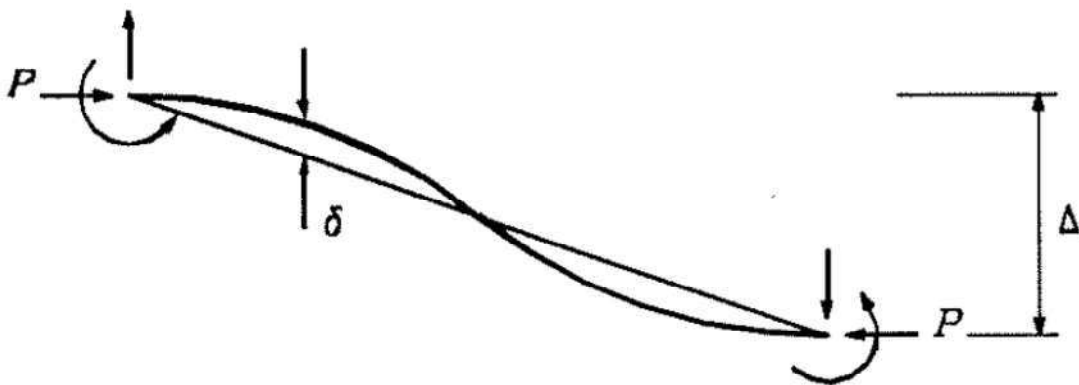
Numa breve descrição dos quatro tipos de análise, temos:

- linear Elástica: equilíbrio estabelecido a partir de sua posição indeformada, com linearidade física e geométrica;
- não-linear elástica: equilíbrio estabelecido a partir de sua posição deformada, com linearidade física e não-linearidade geométrica;
- linear inelástica: equilíbrio estabelecido a partir de sua posição indeformada, com linearidade geométrica e não-linearidade física (análise plástica);
- não-linear inelástica: equilíbrio estabelecido a partir de sua posição deformada, com não-linearidade geométrica e não-linearidade física;

#### 4.2 ANÁLISE NÃO-LINEAR ELÁSTICA

Considera-se nesta análise o comportamento do material em regime elástico linear e a formulação do equilíbrio da estrutura em sua posição deformada. Esta formulação deve considerar os efeitos relacionados a não-linearidade geométrica da estrutura, decorrente da ação dos carregamentos sobre deformações, deslocamentos e imperfeições iniciais construtivas. Em termos de não-linearidade geométrica de estruturas reticuladas, a consideração dos efeitos denominados  $P-\Delta$  e  $P\delta$ , global e local, respectivamente, são de fundamental importância nas análises em Teoria de Segunda Ordem, permitindo uma análise mais representativa do comportamento real da estrutura. Com base na Figura 18, pode-se demonstrar que o efeito  $P-\Delta$  está relacionado com a rotação da corda, enquanto o efeito  $P\delta$  pelas curvaturas da barra, ambos influenciados pela ação da força  $P$ , reduzindo a rigidez a flexão da barra na proporção que estes deslocamentos aumentam.

**Figura 18: Efeitos de segunda ordem  $P-\Delta$  e  $P\delta$ .**



Fonte: (Callejas, 1998)

Callejas (1998) destaca que as funções de rigidez, aplicadas ao Método dos Deslocamentos, conseguem modelar com precisão os efeitos  $P-\Delta$  e  $P\delta$ , ao contrário dos coeficientes obtidos por meio do Método dos elementos Finitos, que representam com precisão apenas o efeito  $P-\Delta$ , sendo o efeito  $P\delta$  simulado por meio da subdivisão das barras em mais elementos.

### **4.3 CLASSIFICAÇÃO DA ESTRUTURA QUANTO À DESLOCABILIDADE E DETERMINAÇÃO DE ESFORÇOS**

Tanto a NBR 8800:2008 quanto a NBR 6118:2003 possuem critérios e processos simplificados de classificação das estruturas quanto à deslocabilidade que definem o tipo de análise a ser adotada na determinação dos esforços para o adequado dimensionamento.

Pereira (2009) comparou os métodos de classificação e análise de estruturas quanto à deslocabilidade ou estabilidade por meio de análises não-lineares geométricas exatas de 11 modelos de pórticos. Os procedimentos da NBR8800:2008, AISC:2005, EUROCODE 2:2002 e NBR6118:2003 apresentaram uma boa relação com os esforços obtidos por meio das análises rigorosas, mantendo coerência mesmo quando os resultados se apresentaram divergentes em alguns casos analisados. A correlação entre as propostas das normas e as análises rigorosas melhora em função do aumento do número de pavimentos e tramos da estrutura.

Chamberlain Praiva e Stumpl (2008) demonstraram que para uma tipologia específica de galpão industrial em aço de um pavimento, com vãos entre 15 e 45 metros e pórticos a cada 5 metros, os resultados de classificação em termos de deslocabilidade segundo a NBR8800: 2008 e segundo o EUROCODE 3: 2005, resultam em todos os casos como estrutura de pequena deslocabilidade. Concluíram ser possível determinar os esforços e dimensionar esta tipologia de estrutura utilizando apenas a análise linear elástica.

#### **4.3.1 CLASSIFICAÇÃO QUANTO À DESLOCABILIDADE E A DETERMINAÇÃO DOS ESFORÇOS SOLICITANTES SEGUNDO A NBR 8800:2008**

A NBR 8800:2008 classifica as estruturas em pequena, média e grande deslocabilidade por meio da relação entre os deslocamentos laterais da estrutura, análise não-linear e linear elásticas, para as combinações últimas estipuladas. Quando esta relação

não ultrapassa o valor de 1,10, em todos os andares, a estrutura é classificada como de pequena deslocabilidade.

A estrutura será classificada como de média deslocabilidade quando essa relação estiver entre 1,10 e 1,40 em pelo menos um dos andares e, de grande deslocabilidade, quando maior que 1,40. A relação entre os deslocamentos da análise não-linear e linear elásticas pode ser obtida de forma aproximada pelo parâmetro  $B_2$ , calculado para cada um dos andares da estrutura.

Apenas para efeito de classificação quanto a sensibilidade aos deslocamentos laterais, as imperfeições iniciais de material não precisam ser consideradas na análise de primeira ordem.

$$B_2 = \frac{1}{1 - \frac{1}{R_m} \cdot \frac{\Delta_h}{h} \cdot \frac{\sum N_{Sd}}{\sum H_{Sd}}}$$

(4.1)

Onde:

$\sum N_{Sd}$  - Somatório da força normal de cálculo nos pilares do andar considerado;

$\sum H_{Sd}$  - Força cortante no andar considerado produzida pelas forças horizontais de cálculo;

$\Delta_h$  - Deslocamento relativo entre os níveis superior e inferior de cada andar obtido em análise linear elástica;

$h$  - Altura do pavimento;

$R_m$  - Coeficiente de ajuste. 0,85 para estruturas aporticadas e 1,00 para os demais casos.

Para estruturas de média deslocabilidade, as imperfeições iniciais de material devem ser consideradas na análise, reduzindo-se a rigidez flexional e axial das barras para 80% dos valores originais. Os esforços solicitantes devem ser obtidos considerando os efeitos globais (P- $\Delta$ ) e locais (P- $\delta$ ) de segunda ordem. A análise de 2ª ordem pode ser realizada de forma aproximada pelo método de amplificação dos esforços solicitantes  $B_1$  e  $B_2$ , conforme Equação 4.2. Ao se aplicar este método a estruturas de média deslocabilidade, os coeficientes  $B_1$  e  $B_2$  devem ser calculados considerando as imperfeições iniciais de material na análise. Os esforços solicitantes de cálculo finais, em cada andar da estrutura, segundo o método de amplificação  $B_1$  e  $B_2$ , são dados por:

$$\begin{aligned} M_{Sd} &= B_1 M_{nt} + B_2 M_{lt} \\ N_{Sd} &= N_{nt} + B_2 N_{lt} \end{aligned} \tag{4.2}$$

Onde:

$M_{nt}$  e  $N_{nt}$  são, respectivamente, o momento fletor e a força axial solicitantes de cálculo, obtidos por análise elástica de primeira ordem, com os nós da estrutura impedidos de se deslocar horizontalmente (usando-se, na análise, contenções horizontais fictícias em cada andar).

Os efeitos globais de não-linearidade geométrica (P- $\Delta$ ) podem ser desconsiderados em estruturas de pequena deslocabilidade, desde que:

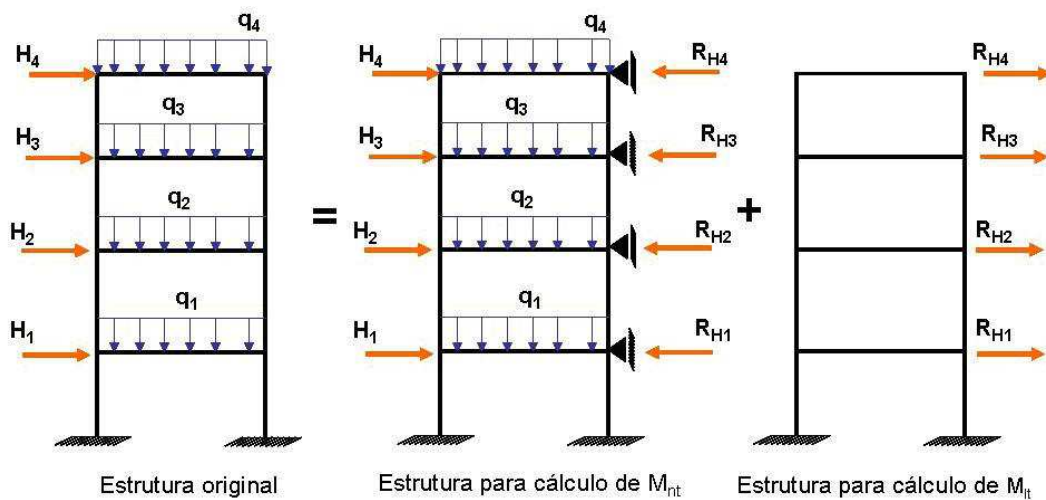
- limite-se a capacidade da força axial resistente das barras responsáveis pela estabilidade da estrutura a 50% da força axial correspondente ao escoamento da seção;
- as imperfeições geométricas iniciais sejam somadas as respectivas combinações de cálculo.

As imperfeições geométricas iniciais devem ser consideradas como um deslocamento relativo entre os pavimentos de  $h/333$ , sendo  $h$  a altura do andar. Outra forma



de consideração das imperfeições geométricas iniciais é por meio da aplicação de uma força horizontal equivalente (força nocional), no nível do pavimento, igual a 0,3% das cargas gravitacionais de cálculo aplicadas no pavimento. Entendido como um carregamento horizontal mínimo (exceto em estruturas de pequena deslocabilidade com análise de 1ª ordem), o efeito destas imperfeições deve ser considerado independentemente nas duas direções ortogonais em planta. Não é necessário somá-lo às reações horizontais de apoio nem às combinações de cálculo onde atuem as ações variáveis devidas ao vento.

**Figura 19 – Rigidez elástica e rigidez geométrica.**



Fonte: (Pereira, 2009)

Para estruturas de pequena deslocabilidade pode-se desconsiderar as imperfeições iniciais de material. Os efeitos locais de 2ª ordem devem ser considerados amplificando-se os momentos fletores por meio do coeficiente  $B_1$  (com valores obtidos da estrutura original) conforme Equação 4.3.

$$B_1 = \frac{C_m}{1 - \frac{N_{sd1}}{N_e}} \geq 1$$

(4.3)

Onde:

$N_{sd1}$  - Força axial de compressão solicitante de cálculo na barra considerada obtida em análise de 1ª ordem.

$N_e$  - Força axial de flambagem elástica com o comprimento real da barra; considerando se for o caso as imperfeições de material.

$C_m$  - Coeficientes de uniformização de momentos fletores dado por:

$C_m = 1$  Quando houver forças transversais entre as extremidades da barra no plano de flexão.

$C_m = 0,6 - 0,4 \frac{M_1}{M_2}$  Quando não houver forças transversais entre as extremidades da barra no plano de flexão.

$\frac{M_1}{M_2}$  É a relação entre o menor e o maior momento fletor nas extremidades da barra que deve ser tomado positivo quando os momentos provocarem curvatura reversa e negativo quando os momentos provocarem curvatura simples.

Se a força axial na barras for de tração deve ser considerado  $B_1=1$ .

A análise da estrutura levando em consideração os efeitos locais e globais de não-linearidade geométrica (P- $\Delta$  e P $\delta$ ) para estruturas de pequena e média deslocabilidade pode sempre ser utilizada, dispensando a amplificação dos esforços pelos coeficientes  $B_1$  e  $B_2$ , mas considerando as imperfeições iniciais de material das barras para o caso das estruturas de média deslocabilidade.

A análise de estruturas de grande deslocabilidade deve considerar de forma rigorosa as não-linearidades físicas e geométricas. Permite-se a critério do responsável técnico a

análise da estrutura por métodos aproximados levando em consideração os efeitos locais e globais (P- $\Delta$  e P $\delta$ ) com redução das rigidezes das barras, a exemplo das estruturas de média deslocabilidade, desde que somados os efeitos das imperfeições geométricas às combinações últimas em que atuem as ações variáveis devidas ao vento.

#### **4.3.2 CLASSIFICAÇÃO QUANTO À DESLOCABILIDADE E A DETERMINAÇÃO DOS ESFORÇOS SOLICITANTES SEGUNDO A NBR 6118:2003**

De uma forma simplificada, a NBR 6118:2003 considera significativos os efeitos da análise não-linear superam em 10% em aos da análise linear.

A NBR 6118:2003 classifica as estruturas quanto à deslocabilidade por meio do parâmetro Gama-z ( $\gamma_z$ ), obtido para cada combinação de cálculo em análise linear elástica, que mede a sensibilidade da estrutura quanto aos efeitos da não-linearidade geométrica global, dado por:

$$\gamma_z = \frac{1}{1 - \frac{\Delta M_{tot,d}}{M_{1,tot,d}}}$$

(4.4)

Onde:

$M_{1,tot,d}$  é o momento de tombamento. Somatório dos momentos de todas as forças horizontais de cálculo em relação à base;

$\Delta M_{tot,d}$  é a soma do produto das ações verticais de cálculo da combinação considerada pelos deslocamentos horizontais, dos seus respectivos pontos de aplicação, obtidos em análise de linear elástica.

Para valores de  $\gamma_z \leq 1,1$  classifica-se a estrutura como indeslocável ou de nós fixos; e para  $\gamma_z > 1,1$  como deslocável ou de nós móveis.

Nas estruturas classificadas como de nós fixos, os esforços podem ser determinados por meio de análise linear elástica (sem redução das rigidez flexional dos elementos), e os efeitos locais de não-linearidade geométrica considerados diretamente nos processos de dimensionamento.

Nas estruturas classificadas como de nós móveis, os esforços são determinados considerando os efeitos globais e locais de não-linearidade geométrica ( $P-\Delta$  e  $P\delta$ ). Para estruturas com Gama-z de até 1,3 ( $\gamma_z \leq 1,3$ ) e no mínimo 4 andares, os efeitos globais não-linearidade geométrica podem ser determinados de forma aproximada, majorando-se as ações horizontais das combinações de cálculo por  $0,95\gamma_z$ , em análise linear elástica. Para  $1,1 < \gamma_z \leq 1,3$ , a não-linearidade física pode ser considerada de forma aproximada por meio da redução da rigidez flexional com valores diferenciados para vigas, lajes e pilares. Para estruturas em que a estabilidade depende única e exclusivamente de pórticos formados por viga e pilares, a rigidez destes elementos deve ser reduzida para 70% da rigidez flexional original, e das lajes para 30%. Em estruturas com  $\gamma_z > 1,3$ , deve ser realizada uma análise não-linear geométrica exata.

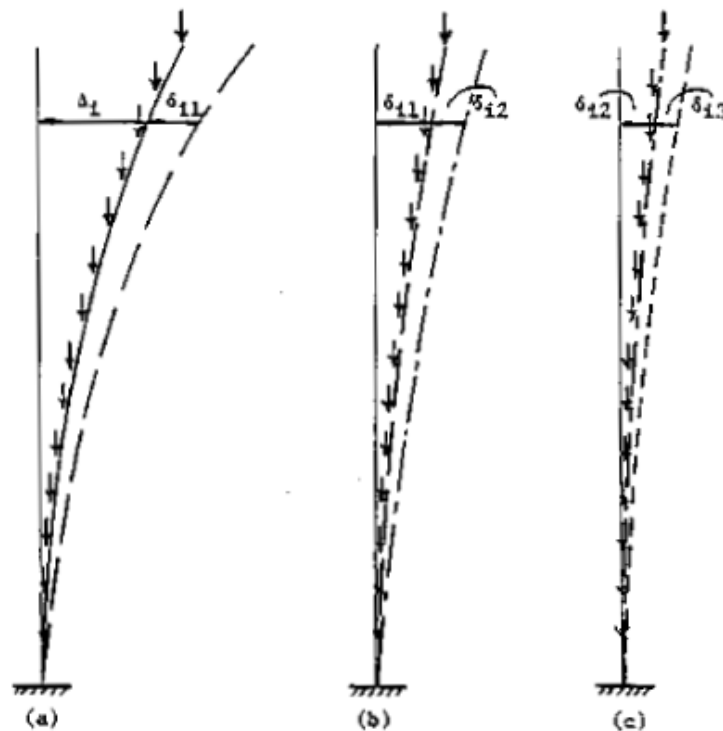
#### **4.4 MÉTODOS SIMPLIFICADOS PARA AVALIAÇÃO DOS EFEITOS GLOBAIS DE NÃO-LINEARIDADE GEOMÉTRICA**

Existem vários métodos simplificados para a consideração dos efeitos globais de não-linearidade geométrica, realizando de forma iterativa diversas análises lineares elásticas de forma a simular o efeito das cargas verticais ou gravitacionais sobre os deslocamentos e imperfeições iniciais da estrutura. Lopes et al (2005) apresenta alguns destes métodos como, por exemplo, o método de dois ciclos iterativos, método da carga lateral fictícia recomendado pela versão anterior da NBR8800: 2008, o método da carga de gravidade interativa e o método da rigidez negativa.

Segundo Chen e Lui apud Lopes et al (2005), o método da carga de gravidade interativa, apresentado por Smith e Gaiotti (1988), é mais rápido computacionalmente que o

método da carga lateral fictícia. Outra vantagem é a de não alterar o real valor dos esforços cortantes na estrutura e reações de apoio. O processo inicia-se com uma análise de primeira ordem com as cargas horizontais aplicadas na estrutura. Num segundo passo, aplicam-se as cargas gravitacionais sobre a estrutura na sua condição deslocada, obtendo-se os incrementos de deslocamento. Posteriormente realizam-se sucessivas análises sobre os incrementos de deslocamento das respectivas análises anteriores, até que os incrementos de deslocamento atinjam valores desprezíveis (convergência da análise). Os deslocamentos e esforços finais são obtidos pela simples soma dos deslocamentos e esforços da análise inicial com os deslocamentos e esforços das análises subsequentes. Na Figura 20 o processo é apresentado de forma esquemática.

**Figura 20: Cargas de gravidade aplicadas sobre a estrutura deformada.**



$$\Delta_1^* = \Delta_1 + \delta_{11} + \delta_{12} + \delta_{13} + \dots$$

Fonte: (Smith e Gaiotti, 1988).

# 5. METODOLOGIA

## 5.1 RECURSOS E CARACTERÍSTICAS EXISTENTES DO SOFTWARE TRAME 3.0

A atual versão do software disponibilizada na internet, o TRAME 3.0, possibilita a análise estática linear de treliças planas por meio da abordagem matricial do Método dos Deslocamentos. Diversas publicações no Brasil como Neto (1972), Neto (1973), Moreira (1977), Soriano (2005) Martha(2010) servem de base para o estudo do Método dos deslocamentos, na abordagem clássica e matricial.

A geometria da estrutura é importada de arquivos DXF e, por meio da interface gráfica do programa, são definidas as condições de apoio e carregamento. Por se tratar de treliças planas, o lançamento da carga distribuída serve apenas como um artifício de distribuição dos carregamentos para os nós da estrutura, sem gerar flexão nas barras.

O TRAME 3.0 possibilita trabalhar com apenas um caso de carregamento e, após realizada a análise da estrutura com ou sem a consideração automática do peso próprio, é possível exportar o arquivo da geometria e os valores de esforços nas barras no padrão DXF.

Em se tratando da análise de treliças planas, onde os dados de rigidez flexional das barras não são utilizados na matriz de rigidez, o gerenciador de propriedades de seção transversal das barras exige apenas a informação de área, módulo de elasticidade longitudinal e peso específico do material. Os resultados de esforços axiais, tração e compressão, a configuração deformada da estrutura, carregamentos, ações e reações de apoio podem ser visualizados graficamente e por meio de um relatório.

Para a determinação da matriz dos deslocamentos da estrutura, o TRAME 3.0 adota o método iterativo apresentado por **Carl Gustav Jacobi (1804-1851)** para sistemas lineares grandes, esparsos e com diagonal não-nula. (CUNHA, 2000) reescreve o sistema  $\mathbf{Ax} = \mathbf{b}$  para os métodos iterativos por meio da **Equação 5.1**. Em função método iterativo adotado, o programa permite definir a exatidão dos resultados e visualizar o tempo de processamento empenhado.

$$\begin{aligned}
 x_1 &= \frac{\left( b_1 - \sum_{j=2}^n a_{1j} \cdot x_j \right)}{a_{11}} \downarrow \\
 x_i &= \frac{\left( b_i - \sum_{j \neq i}^n a_{ij} \cdot x_j \right)}{a_{ii}} \downarrow \\
 x_n &= \frac{\left( b_n - \sum_{j=i}^{n-1} a_{nj} \cdot x_j \right)}{a_{nn}}
 \end{aligned}
 \tag{5.1}$$

## 5.2 CARACTERÍSTICAS E ETAPAS DE IMPLEMENTAÇÃO DO PROGRAMA COMPUTACIONAL

Neste trabalho, que se iniciou a partir dos recursos existente no TRAME 3.0 descritos anteriormente, foi utilizada como ferramenta de desenvolvimento o programa **Turbo Delphi 6** da empresa Borland, baseado na linguagem de programação Pascal orientada à objetos, conhecida como Object-Pascal e disponível também em outras ferramentas de desenvolvimento de código-livre. O programa, aqui denominado TRAME 4.0, foi inicialmente desenvolvido para computadores que utilizam o sistema operacional Windows XP e suas versões superiores. No TRAME 4.0 são disponibilizados recursos de pré-processamento, processamento e pós-processamento integrados em uma única interface. O número de barras é limitado apenas pela capacidade de processamento do computador.

### 5.2.1 SISTEMA DE PRÉ-PROCESSAMENTO

O sistema de pré-processamento é constituído da interface gráfica (tela do programa) associada aos seguintes aspectos fundamentais de interação com o usuário e o sistema de processamento:

- criação, edição e visualização do modelo estrutural;

- obtenção, gerenciamento e armazenamento dos dados do problema;
- organização e transmissão dos dados para o processador.

Para as etapas de pré-processamento foram aprimorados ou desenvolvidos os seguintes recursos:

1. comandos para desenho, edição e visualização de barras por meio de sistema CAD independente e interativo, podendo ser acessados por meio de mouse e comandos de texto;
2. comandos para criar, salvar e abrir arquivos em formato próprio (extensão TRP) que possibilite reutilizar todas as informações da estrutura e configurações definidas para a visualização do modelo;
3. onze (11) camadas de desenho para as quais se associa material e seção transversal das barras, que serão tratadas como grupos de elementos para análise e dimensionamento;
4. operações com diferentes unidades sendo três (3) unidades de comprimento (m, mm e cm), três (3) unidades de força (kN, kgf e tf) e três (3) unidades de tensão (kN/cm<sup>2</sup>, kgf/cm<sup>2</sup> e MPa);
5. capacidade de definição de até dez (10) diferentes casos de carregamento gerenciados diretamente na área gráfica do programa, sendo o primeiro reservado para o peso próprio da estrutura e calculado automaticamente;
6. gerenciador gráfico para definição de até 30 combinações de carregamentos;
7. gerenciador gráfico de materiais que permite a configuração das propriedades mecânicas do material a ser utilizado em cada uma das onze (11) camadas de desenho disponíveis, incluindo valores pré-configurados;
8. comandos gráficos para impor rótulas às extremidades das barras;



9. gerenciadores gráficos para aplicação de cargas concentradas e uniformemente distribuídas em nós e barras respectivamente, tanto no sistema global como no sistema local, para os 10 diferentes casos de carregamento;
10. comandos gráficos para definição das restrições aos deslocamentos da estrutura;
11. gerenciador gráfico de seções para os perfis mais utilizados em estruturas metálicas, possibilitando inserção ilimitada de seções, cálculo automático das propriedades geométricas e definição da orientação das seções em relação ao plano de flexão, geração de relatório e atribuição destas propriedades aos grupos de barras selecionados;
12. recurso para a importação de arquivos em formato DXF, formato padrão de transferência entre programas CAD, com recurso de associação das linhas importadas às camadas ou grupos de barras por meio da propriedade LAYER lida no arquivo DXF;
13. recurso de integração com outros programas que permita exportar, em forma de imagem, a representação gráfica da modelagem e diagramas de esforços da estrutura, contidas na área gráfica;
14. recurso para desenho modulado de barras por meio de grade de pontos de atração pré-configurada;
15. comandos para definição do comprimento de flambagem fora do plano de análise da estrutura, necessário ao dimensionamento e verificação dos perfis;
16. janela de configuração da análise, do dimensionamento e a geração de relatórios.

### 5.2.2 SISTEMA DE PROCESSAMENTO

O processador, ou funções de processamento, deverá ser responsável por analisar os dados do pré-processamento da estrutura e armazenar as informações dos resultados. É nesta etapa que são implementadas as teorias de classificação, análise e dimensionamento da estrutura metálica. Para as etapas de processamento serão implementados os recursos de análise estrutural e dimensionamento da estrutura constando da seguinte relação:

1. implementação do processo de análise linear elástica da estrutura, utilizando o Método dos Deslocamentos para pórticos planos, com combinação prévia dos carregamentos necessária à análises não-lineares , que permita rotular as extremidades das barras;
2. método simplificado para consideração dos efeitos globais de 2ª ordem com base no Método de Carga de Gravidade Iterativa de Smith e Gaiotti (1988), que considera o efeito da ação do carregamento vertical sobre a posição deformada da estrutura. A adoção deste método se justifica por ser mais rápido computacionalmente que o Método da Carga Lateral Fictícia e por não alterar de forma errônea os resultados de esforços cortantes;
3. processo aproximado da NBR8800:2008, conhecido como Método da Amplificação de Esforços (B1 e B2), que permite classificar as estruturas em termos de deslocabilidade e amplificar os esforços da análise da estrutura, em sua condição indeformada, para consideração aproximada dos efeitos globais de 2ª ordem no dimensionamento;
4. cálculo do coeficiente Gama-z ( $\gamma_z$ ), solução aproximada proposta pela NBR 6118: 2003 para classificação e determinação de esforços globais de 2ª ordem em estruturas de concreto armado.

A implementação do Gama-z permite a comparação com processo proposto pela NBR 8800:2008;

5. modalidades de dimensionamento, verificação e otimização, de perfis laminados de aço a partir das seções definidas conforme critérios da NBR 8800: 2008;

### **5.2.3 SISTEMA DE PÓS-PROCESSAMENTO**

O sistema de pós-processamento engloba todas as ferramentas e rotinas para a adequada verificação e validação dos resultados. Para as etapas de pós-processamento foram desenvolvidos os seguintes recursos:

1. visualização gráfica dos diagramas de esforços solicitantes, das reações de apoio e da condição deformada da estrutura para as combinações e casos de carregamento e para os resultados da análise  $P-\Delta$  das combinações de carregamento;
2. visualização, por meio de relatórios, de esforços solicitantes, das reações de apoio e das deslocabilidades da estrutura para as diferentes combinações e casos carregamento, incluindo o coeficiente Gama-z ( $\gamma_z$ ) e a classificação da estrutura por meio do coeficiente B2;
3. relatório do Método de Amplificação dos Esforços (B1 e B2);
4. relatórios dos resultados de dimensionamento;
5. listagem do peso total da estrutura, por grupo ou tipo de seção.

#### **5.2.4 VALIDAÇÃO INICIAL DOS RESULTADOS**

Para validação inicial do programa foram analisados modelos simples de pórticos planos, treliças planas e vigas, modelados nos softwares educacionais gratuitos Ftool, AcadFrame e MASTAN2.

Outros modelos foram analisados e comparados com base em referências bibliográficas relacionadas especificamente com os recursos implementados no software.

Os programas AcadFrame e MASTAN2, foram especialmente utilizados na validação da análise dos efeitos globais de segunda ordem realizada pelo TRAME 4.0 por meio do Método de Carga de Gravidade Interativa. Os resultados desta comparação servem de parâmetro para as respostas de classificação da estrutura em termos de deslocabilidade.

Adicionalmente, o software comercial STRAP<sup>20</sup> foi utilizado em um modelo com o objetivo de avaliar resultados de combinações de carregamentos.

### **5.3 ESTRATÉGIAS DE DIVULGAÇÃO, DOCUMENTAÇÃO E MANUTENÇÃO DO PROGRAMA**

É importante compreender como parte fundamental da metodologia, questões que vão além das etapas de desenvolvimento do programa. Os softwares, assim como todo e qualquer processo, nascem e morrem; diferentemente dos métodos que permanecem e se aperfeiçoam. Dentro desta definição, entende-se que o objetivo de longo prazo é de que o programa permaneça com seus processos atualizados face às novas realidades que virão. Para promover esta possibilidade, é necessário que algumas estratégias de divulgação, documentação e manutenção sejam estabelecidas.

A adequada divulgação e disponibilização do programa garantirão o acesso ao programa, podendo contar como estratégia inicial:

- criação de um site específico (blog) do programa para divulgação vídeos, tutoriais, informações sobre atualizações, projetos em desenvolvimento, colaboração entre usuários, dúvidas, reportagem de falhas, etc;

---

<sup>20</sup> Hardlock N°8616

- referenciar e inserir o programa em repositórios de objetos educacionais, bancos de softwares e páginas relacionados ao tema.

A completa documentação sobre a instalação e o uso do software, despertará o interesse, não só pelo uso, mas de projetos similares em contribuir para o processo iniciado. Dentre as estratégias de documentação destacamos:

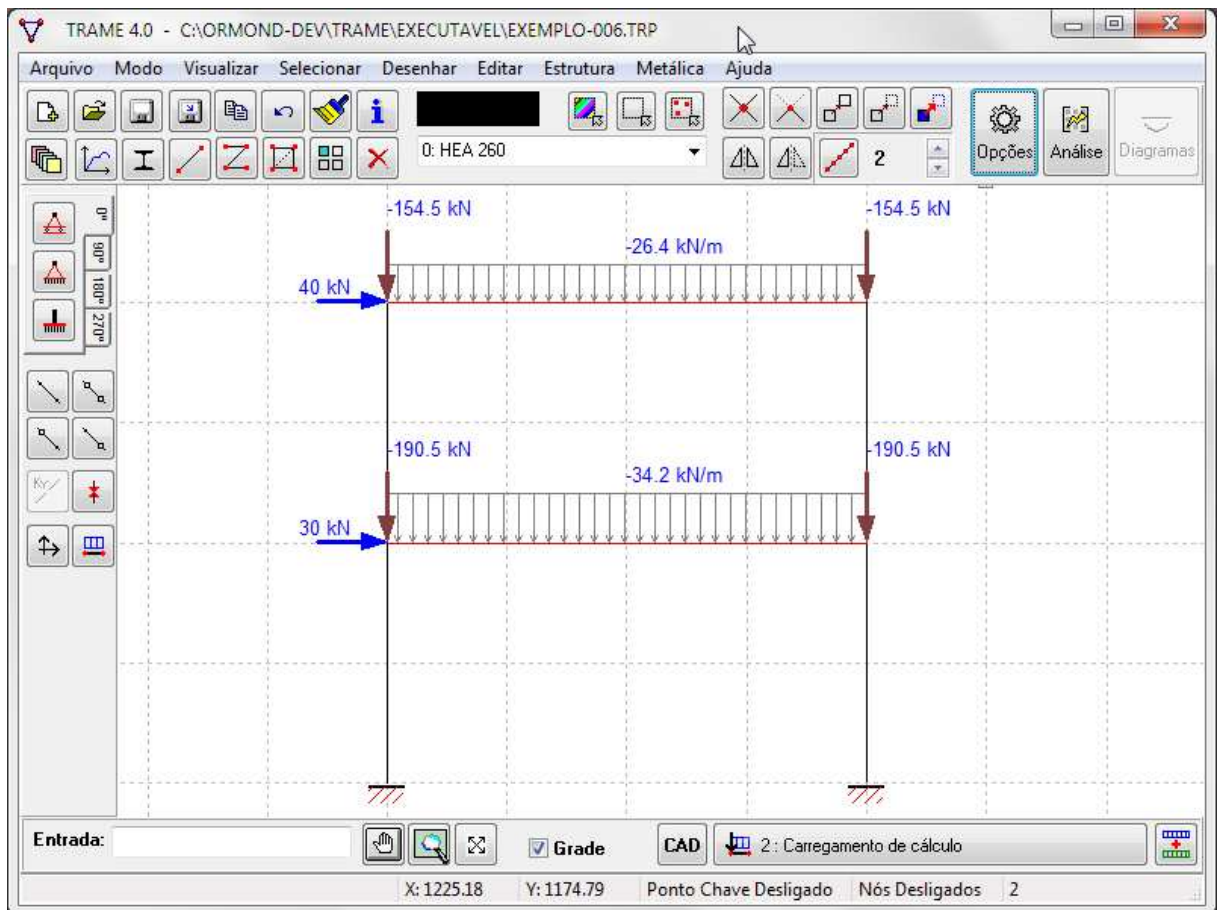
- manuais de uso;
- manual técnico das bases teóricas de análise e dimensionamento empregadas pelo programa;
- tutoriais em texto e vídeo publicados na internet com exemplos resolvidos passo a passo.

A garantia da manutenção do programa está associada à possibilidade de mais pessoas contribuírem para o seu aperfeiçoamento. O modelo de código-livre é condição primeira dessa possibilidade. Como proposta de atrair colaboradores ao projeto, se faz necessário a elaboração do manual do desenvolvedor, explicando a organização do código, como interagir com as funções pré-definidas e, principalmente, os requisitos educacionais, de interatividade e de qualidade definidos.

## 6. DESENVOLVIMENTO

O desenvolvimento na linguagem Object-Pascal do **Turbo Delphi 6**, permitiu a criação de uma interface gráfica interativa por meio dos recursos disponibilizados pelo programa, principalmente a classe de objetos conhecida como TCanvas, que permite o desenvolvimento de programas de desenho e imagem. Na Figura 21, apresenta-se a interface gráfica do programa em sua última revisão.

Figura 21: Tela do programa Trame 4.0



O programa Trame 4.0 pode ser dividido em grupos de comandos que podem ser descritos na seqüência natural de projeto de uma treliça ou pórtico plano:

- comandos para gerenciamento de arquivos;
- comandos de desenho e edição de barras (CAD);
- comandos para definição de restrições de deslocamentos (apoios);
- comandos para definição do material e seção transversal das barras;
- comandos de definição de cargas e casos de carregamento;
- comando para análise da estrutura e geração de relatórios;
- comandos para exibição de diagramas de esforços.

## 6.1 RECURSOS DE DESENHO E DEFINIÇÃO DA GEOMETRIA DAS ESTRUTURAS

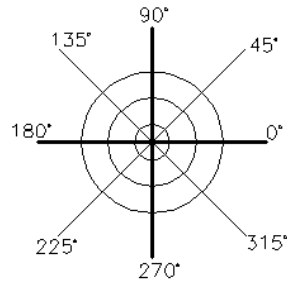
A área gráfica do TRAME 4.0, trata-se de um plano cartesiano onde é possível definir barras por meio de pontos obtidos na grade modulada, clicando diretamente com o mouse sobre a tela ou por meio de coordenadas (absolutas, relativas retangulares e relativas polares) digitadas no campo de entrada do programa. A Tabela 2 esclarece a forma de entrada de pontos, que neste caso representam os nós da estrutura.

**Tabela 2: Métodos de entrada de pontos**

<b>Métodos de entrada de pontos</b>	<b>Formato de entrada</b>
Coordenada Absolutas	<b>X , Y</b> (valores de x e y em relação à origem do sistema)
Coordenadas Relativas Retangulares	<b>@ X , Y</b> (valores de x e y em relação ao último ponto)
Coordenadas Relativas Polares	<b>@ distância &lt; ângulo</b> (valores de distância e ângulo em relação ao último ponto)

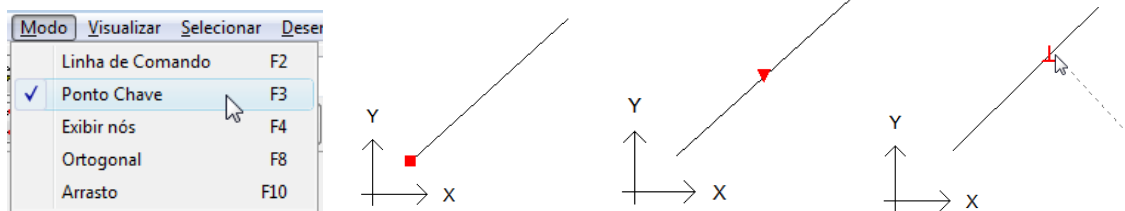
Por padrão, os ângulos no Trame 4.0 aumentam no sentido anti-horário e diminuem no sentido horário, conforme esquema da Figura 22.

**Figura 22: Sistema de leitura de ângulos**



Outra forma de capturar pontos é por meio da ativação do recurso de Ponto Chave (Tecla F3), que permite ler os pontos das extremidades da barras, o ponto médio e ponto perpendicular, conforme apresentado na Figura 23.

**Figura 23: Recurso de Ponto Chave**



O desenho das barras é realizado por meio dos comandos listados na Tabela 3 utilizando os métodos de entrada de pontos. Estes comandos podem ser acessados por meio de botões com imagem, por teclas de atalho, pelo campo de entrada ou pelo menu “DESENHAR”

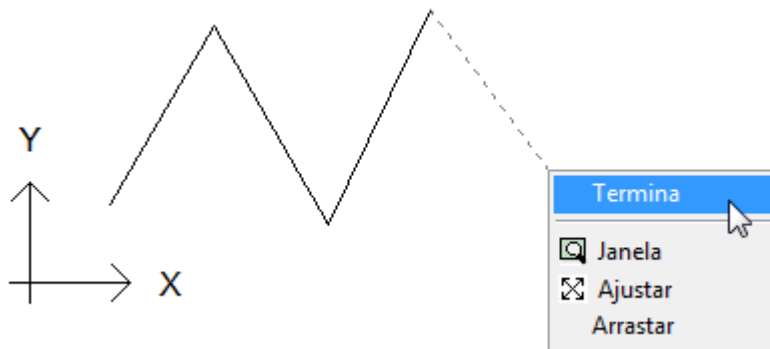
**Tabela 3: Comandos para desenho de barras**

Comando	Botão	Campo de Entrada	Tecla de atalho	Menu
Barra		barra ou b	Ctrl + L	
Múltiplas Barras		mbarra ou mb	Ctrl + M	
Quadro		quadro ou q	Ctrl + R	



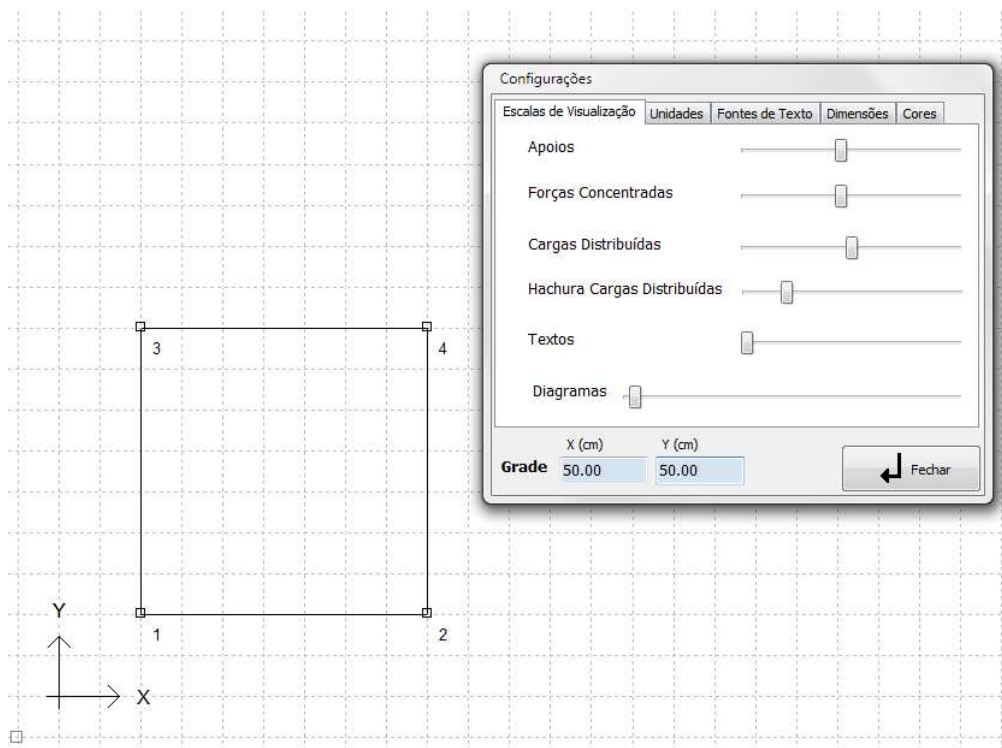
Para finalizar o comando de desenho de múltiplas barras, deve-se clicar no botão direito do mouse e acessar a opção “TERMINA”, conforme exibido na Figura 24. Os nós são criados automaticamente e visíveis por meio da tecla F4.

**Figura 24: Comando para finalizar desenho de múltiplas linhas**



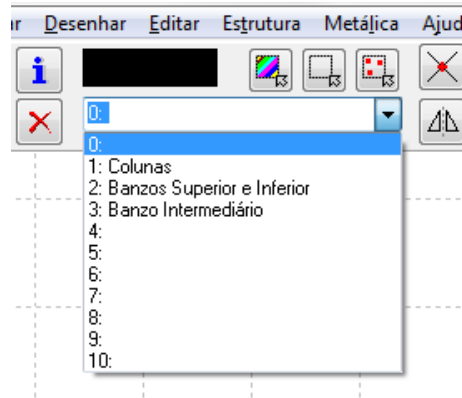
Um método prático para definição da geometria é o desenho de barras sobre a grade (Ctrl+G), configurando seus espaçamentos na janela de configurações (Ctrl+F).

**Figura 25: Configuração dos espaçamentos X e Y da grade de desenho**




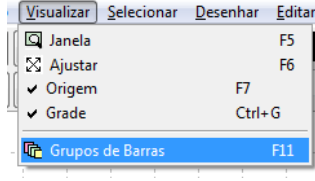
As linhas podem ser criadas em um dos onze grupos de barras disponíveis no programa. O objetivo dos grupos de barras é o de se definir grupos de linhas ou barras para a análise da estrutura. A definição da camada ativa pode ser realizada direto na interface da janela principal como indica a Figura 26.

**Figura 26: Definição da camada ativa**



O gerenciador de grupos de barras pode ser acessado por meio dos comandos descritos na Tabela 4.












**Tabela 4. Comandos de acesso ao gerenciador de grupos de barras**

Botão	Campo de entrada	Tecla de atalho	Menu
	grupo ou g	F11	

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 pelos comandos de seleção (opção de travar o grupo). Outro recurso importante do gerenciador é o de poder atribuir uma descrição para os grupos utilizados. As funções do gerenciador de grupos de barras estão sucintamente apresentadas na Figura 27.

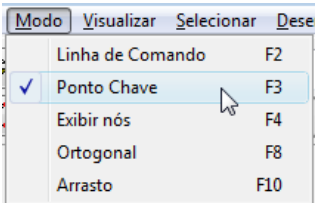
**Figura 27: Gerenciador de grupos de barras**

Grupos de Barras

Grupo Ativo	Ligar	Travar	Descrição dos grupos de barras
<input checked="" type="radio"/> 0 	<input checked="" type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	Vigas
<input type="radio"/> 1 	<input checked="" type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	Colunas
<input type="radio"/> 2 	<input checked="" type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	Banzos Superior e Inferior
<input type="radio"/> 3 	<input checked="" type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	Montantes
<input type="radio"/> 4 	<input checked="" type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	Diagonais
<input type="radio"/> 5 	<input checked="" type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	Escoras
<input type="radio"/> 6 	<input checked="" type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	
<input type="radio"/> 7 	<input checked="" type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	
<input type="radio"/> 8 	<input checked="" type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	
<input type="radio"/> 9 	<input checked="" type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	
<input type="radio"/> 10 	<input checked="" type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	

O usuário pode alternar a forma de trabalho e comportamento do programa durante a criação da geometria. Na Tabela 5 apresenta-se uma descrição resumida dos modos de operação do Trame 4.0. Os modos de operação ativos também são exibidos no rodapé da janela do programa.

Tabela 5: Modos de operação do programa

Comando	Descrição	Tecla de atalho	Menu
Linha de Comando	Torna o campo de entrada ativo.	F2	
Ponto Chave	Habilita a captura de pontos de relevância.	F3	
Exibir nós	Habilita e desabilita o modo de seleção de nós, alternando com o modo padrão de seleção de linhas.	F4	
Ortogonal	Habilita e desabilita o modo de desenho ortogonal, travando o cursor de desenho em ângulos de 0°, 180°, 90° e 270°.	F8	
Arrasto	Habilita e desabilita o modo de arrasto da área gráfica de visualização da geometria.	F10	

Todas as barras criadas por meio das ferramentas de desenho podem ser editadas por meio dos comandos de seleção e edição. Os comandos de seleção estão resumidamente descritos na Tabela 6. Os comandos de edição só funcionam após a seleção das barras, que pode ser realizada individualmente, em grupo (por meio de janela de seleção) ou por meio do grupo de barras ativo.

Tabela 6: Comandos de seleção




Comando	Botão	Campo de Entrada	Tecla de atalho	Descrição
Selecionar Grupo Ativo		sg		Seleciona as barras do grupo ativo. Só funciona no modo de seleção de barras.
Seleção por janela		selecao ou s		Seleciona a barra ou conjunto de barras que estão totalmente compreendidas na janela de seleção, colocando o programa em modo de seleção de barras.
Seleção de nós por janelas		selno ou sn		Seleciona o nó ou conjunto de nós que estão totalmente compreendidos na janela de seleção, colocando o programa em modo de seleção de nós.
Tudo			Ctrl+T	Seleciona todas as barras de todos o grupos ligados e não travados. Só funciona no modo de seleção de barras.

Tabela 7: Comandos de edição










Comando	Botão	Campo de Entrada	Descrição
Dividir		Dividir ou div	Divide a barra, ou as barras seleccionadas, de acordo com o número de segmentos configurados no contador contíguo ao botão do comando.
Quebrar		Quebrar ou qb	Secciona as barras em sua intersecção preservando as propriedades de cada barras.
Ajustar		-	Ajusta duas barras em intersecção removendo os segmentos de menor comprimento.
Copiar		Copiar ou c	Copia uma ou mais barras seleccionadas por meio de dois pontos, que podem ser definidos livremente ou com os métodos de entrada de pontos. Todas as propriedades e carregamentos e apoios definidos também são reproduzidos.
Mover		Mover ou m	Move uma ou mais barras seleccionadas por meio de dois pontos, que podem ser definidos livremente ou com os métodos de entrada de pontos. Todas as propriedades e carregamentos e apoios definidos são mantidos.
Mover nós		no	Move um ou mais nós seleccionados, no modo de seleção de nós, mantendo os dados das barras.
Cópia espelhada			Rebate uma cópia das barras seleccionadas por meio de um eixo de simetria definido por dois pontos. As informações das restrições de apoio não são mantidas na cópia espelhada.
Espelhar			Rebate as barras seleccionadas por meio de um eixo de simetria definido por dois pontos. Os dados das barras e restrições de apoio, são mantidos.

Tabela 8: Comandos de edição (continuação)

Comando	Botão	Campo de Entrada	Tecla de atalho	Descrição
Reproduzir		Reproduzir ou Re		<p>Reproduz uma ou mais barras por meio de coordenadas relativas retangulares, com base nas quantidades e espaçamentos definidos (via teclado) no campo de entrada, na seguinte ordem:</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>• N° de reproduções horizontais;</li> <li>• N° de reproduções verticais;</li> <li>• Espaçamento horizontal;</li> <li>• Espaçamento vertical.</li> </ul>
Apagar			DEL	Apaga barras selecionadas, remove restrições de apoio e carregamentos.
Desfazer				Desfaz a última ação sobre a geometria.
Atribuir camada			F9	Atribui a uma ou mais barras selecionadas as propriedades do grupo ativo.

O comando Apagar, é de múltipla função. No modo CAD ele remove as barras selecionadas ou as restrições de apoio do nó selecionado. Nos modos de carregamento, para barras e nós selecionados, ele remove as cargas distribuídas das barras selecionadas (sistemas local e global) e as cargas concentradas da seleção.

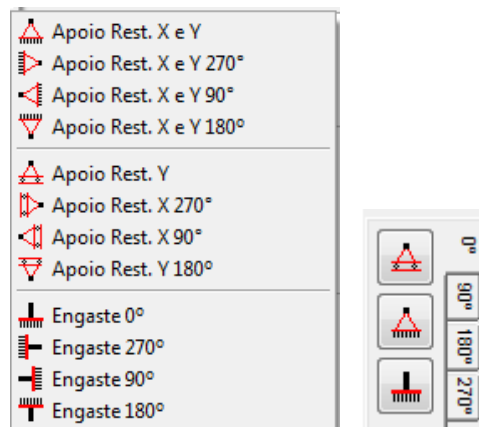
**Figura 28 – Comando Apagar**



## 6.2 RESTRIÇÕES DE APOIO

Basicamente, cada nó da estrutura pode ter até três restrições de apoio: horizontal, vertical e de rotação. Adicionalmente, o usuário pode escolher uma entre as doze opções de símbolos disponíveis para representar da maneira mais adequada possível o tipo de restrição ao deslocamento imposta ao nó. Para definir as restrições de apoio, é necessário selecionar um ou mais nós, no modo de seleção de nós (tecla F4), e clicar sobre o botão ou comando de menu correspondente ao apoio desejado. Os comandos das restrições de apoio, sua simbologia e breve descrição, estão ilustrados na Figura 29. Apoios inclinados, elásticos rotacionais e translacionais podem ser introduzidos nas análise por meio de barras equivalentes.

**Figura 29 – Restrições de apoio**

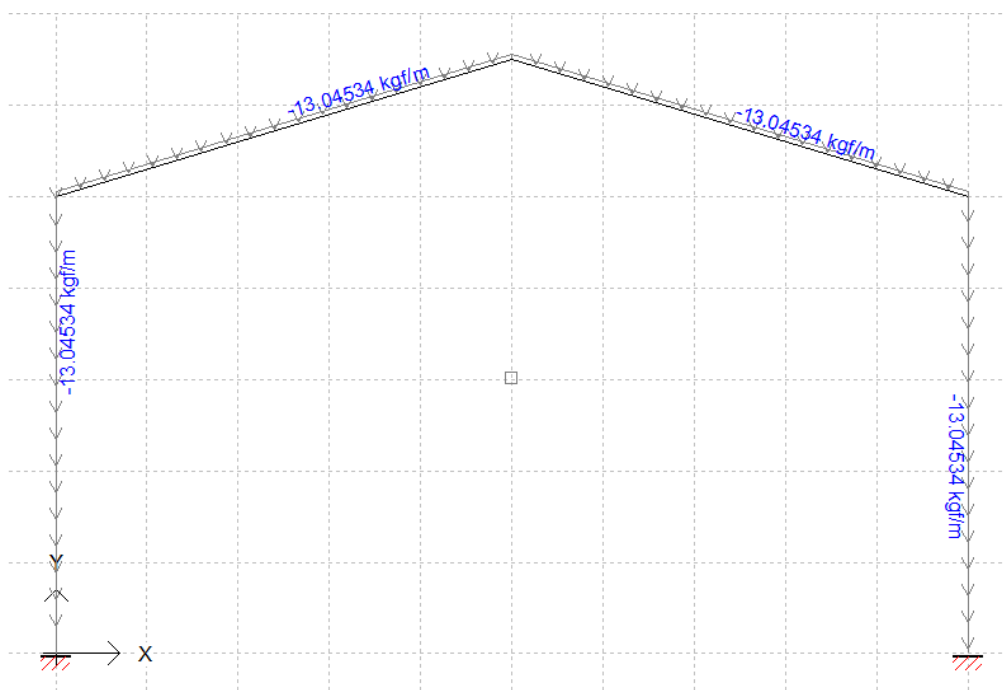




### 6.3 CASOS E COMBINAÇÕES DE CARREGAMENTO

O Trame 4.0 disponibiliza até dez casos de carregamentos (acessados no botão de rodapé do programa), sendo que um é destinado ao peso próprio da estrutura. Só é possível atribuir cargas concentradas ou distribuídas nos casos de carregamento que vão do número 2 ao número 10. O peso próprio é calculado automaticamente pelo programa e exibido na área gráfica ao selecionar o caso correspondente como indicado na Figura 30. O peso próprio é convertido numa carga gravitacional distribuída ao longo das barras.

**Figura 30: Caso de carregamento de peso próprio**



No gerenciador de casos de carregamentos, permite-se alternar entre o modo de trabalho denominado CAD (para definição da geometria) e um dos dez modos de carregamento disponíveis. Por meio do gerenciador de carregamentos é possível definir a descrição correspondente ao tipo de ação.

**Figura 31: Gerenciador de casos de carregamento**

Para cada uma dos nove casos de carregamento restantes é possível definir cargas distribuídas nas barras ou concentradas nos nós, bastando para isso, selecionar um ou mais elementos (nós ou barras) e acionar os gerenciadores de carregamento por meio dos comandos descritos na Tabela 9.

**Tabela 9. Comandos de carregamento**

Comando	Botão	Descrição	Menu
Carga Concentrada		Ativa o gerenciador de cargas concentradas somente se houver um ou mais nós selecionados.	
Carga Distribuída		Ativa o gerenciador de cargas distribuídas somente se houver uma ou mais barras selecionadas.	

No gerenciador de cargas concentradas aparecem os números dos nós selecionados e os valores de carga concentrada correspondentes. É possível definir para o nó selecionado da lista, ou para todos os nós listados, cargas nas direções horizontal e vertical. Estas cargas podem ser digitadas individualmente ou obtidas por meio da decomposição de uma força inclinada, como demonstrado na Figura 32. O somatório das forças apresentado é correspondente ao caso de carregamento como um todo, e não somente dos nós listados.

**Figura 32: Gerenciador de cargas concentradas**

Nó	FX (kN)	FY (kN)
3	0	-100
4	-70.71	-70.71

**FX**  
 -70.7107 kN

**FY**  
 -70.7107 kN

**Força Oblíqua**  
 -100.00 kN  
 45 Ângulo (Dec)

Somatório das Forças Aplicadas  
**FX total = -70.7107 kN**  
**FY total = -170.7107 kN**

Carregamento  
 3

No gerenciador de cargas distribuídas aparecem os números das barras selecionadas e os respectivos valores de carga e sistema de eixo. É possível definir para a barra selecionada da lista (ou para todas as barras listadas), cargas na direção horizontal e vertical, para os sistemas local e global de eixos, como demonstrado na Figura 33. O somatório das forças apresentado é correspondente ao caso de carregamento como um todo, e não somente das barras listadas.

**Figura 33: Gerenciador de cargas distribuídas**

**Carga Distribuída**

Barra Selecionadas

Barra	Qx(kN/m)	Qy(kN/m)	Eixo
2	0	-34.2	Global
4	0	0	Global
5	0	26.4	Local
6	0	0	Global

Qx  kN/m      Qy  kN/m

Global     Local

Carregamento

**2 : Carregamento de cálculo**

Somatório das Forças Aplicadas

**FX total = 0 kN**

**FY total = -606 kN**

No TRAME 4.0, é possível definir até trinta combinações de carregamentos. No gerenciador de combinações de carregamentos é possível definir para cada combinação, a descrição e os coeficientes de ponderação correspondentes aos casos de carregamento. Sempre que um coeficiente de ponderação for diferente de zero, seu campo correspondente apresentará uma cor amarelada que o diferenciará dos demais. Entende-se como fatores os valores dos fatores de ponderação multiplicados pelos fatores de simultaneidade ( $\psi$ ).

**Figura 34: Gerenciador de combinações de carregamentos**




**Combinações**

Lista de Combinações		Casos de Carregamento	Fatores
1	Combinação 1	1    Peso Próprio	1.25
2	Combinação 2	2    Sobrecarga	0.75
3	Combinação 3	3    Monovia	0.75
4		4    Vento 1 - Sucção	0.00
5		5    Vento 2 - Sobrepressão	1.40
6		6	0.00
7		7	0.00
8		8	0.00
9		9	0.00
10		10	0.00
11			
12			
13			
14			
15			

## 6.4 MATERIAL E SEÇÃO TRANSVERSAL DAS BARRAS

Para cada grupo de barras é possível definir o material e as propriedades geométricas da seção por meio dos gerenciadores. As formas de se acessar os gerenciadores de materiais e perfis estão resumidas na Tabela 10.

**Tabela 10: Acessando gerenciadores de material e seção transversal**

Comando	Botão	Descrição	Menu
Aços		Ativa o gerenciador de materiais, onde se pode selecionar um material existente ou definir um novo tipo de material para cada um dos onze grupos de barras.	
Perfis		Ativa o gerenciador de perfis, onde se pode selecionar o tipo, a orientação e as dimensões do perfil desejado para cada um dos onze grupos de barras.	
Listagem	---	Exibe em modo texto a relação de perfis por grupo de barras.	

Dentro do gerenciador de materiais, é possível selecionar um dos aços pré-configurados ou definir manualmente as propriedades de um aço ou material diferente para aplicar ao grupos de barras, que vão de 0 a 10, conforme ilustrado na Figura 35. Os dados configurados neste gerenciador ficarão gravados no arquivo de projeto. As unidades exibidas, são aquelas selecionadas pelo usuário nas configurações do programa. Caso você tenha fornecido uma descrição para as camadas, elas aparecerão no gerenciador de materiais.

Figura 35: Gerenciador de materiais

Camada	Descrição	fa (kN/cm <sup>2</sup> )	fb (kN/cm <sup>2</sup> )	E (kN/cm <sup>2</sup> )	Pe (kN/m <sup>3</sup> )	Descrição das Camadas	Material
0	DICOTILEDÔNEA C40	4.00	0.60	873.60	9.50	Vigas	Madeira
1	CONCRETO C30	3.00	0.29	2607.16	25.00	Colunas	Concreto
2	MR 250	25.00	40.00	20000.00	78.50	Banzos Superior e Inferior	Aço
3	MR 250	25.00	40.00	20000.00	78.50	Banzo Intermediário	Aço
4	A-572 GRAU 50	34.50	45.00	20000.00	78.50	Viga principal	Aço
5	ASTM A36	25.00	40.00	20000.00	78.50		Aço
6	ASTM A36	25.00	40.00	20000.00	78.50		Aço
7	ASTM A36	25.00	40.00	20000.00	78.50		Aço
8	ASTM A36	25.00	40.00	20000.00	78.50		Aço
9	ASTM A36	25.00	40.00	20000.00	78.50		Aço
10	ASTM A36	25.00	40.00	20000.00	78.50		Aço

Propriedades Mecânicas	
Descrição	MR 250
fa = fy Tensão de Escoamento	25.00 kN/cm <sup>2</sup>
fb = fu Tensão de Ruptura	40.00 kN/cm <sup>2</sup>
E - Módulo de Elasticidade	20000.00 kN/cm <sup>2</sup>
Pe - Peso Específico	78.50 kN/m <sup>3</sup>

AÇO ASTM	AÇO ABNT	Concreto	Madeira
MR250	AR 350	AR 415	AR 350 COR.
CG 26	G 30	G 35	CGR 400
CG 28	G 45	G 42	CGR 500
CF 26	CF 28	CF 30	CFR 400
			CFR 500

Atribuir a todos
Atribuir a Seleção
Fechar

Para os aços comumente utilizados, as propriedades mecânicas encontram-se pré-definidas no gerenciador e, como recurso de análise, algumas propriedades básicas para concreto e madeira.

As propriedades pré-definidas para estruturas de madeira, contam ainda com a calculadora do coeficiente de modificação  $K_{mod}$  da madeira de acordo com a NBR 7190:1997, para auxílio na determinação do módulo efetivo de elasticidade utilizado na análise da estrutura. Mesmo o programa não sendo focado nas disciplinas de estruturas de madeira e concreto, estes são recursos facilitadores para análises comparativas entre os materiais, ao mesmo tempo que torna TRAME 4.0 mais atrativo para uso nas escolas.

**Figura 36: Calculadora  $K_{mod}$**

Para cada grupo de barras deve ser definido um perfil necessário à análise da estrutura. São dezesseis tipos de perfis disponíveis nesta versão do programa, 10 tipos de perfis formados à frio e 6 tipos de perfis laminados. Ao selecionar um tipo de perfil o gerenciador exibe detalhes das variáveis dimensionais da seção e uma lista com as dimensões cadastradas. É possível adicionar para cada tipo de perfil um número ilimitado de bitolas, bastando informar as respectivas dimensões para inserção na lista. A lista com as dimensões dos perfis é salva num arquivo de texto independente (libsec.txt). É a partir da lista de perfis que se atribui o perfil ao grupo selecionado, conforme exemplificado na Figura 37 e na Figura 42. Apenas os perfis definidos aos grupos são gravados no arquivo de projeto, evitando o retrabalho de configuração no caso de algum perfil ser removido do arquivo de dados.

Figura 37: Gerenciador de perfis

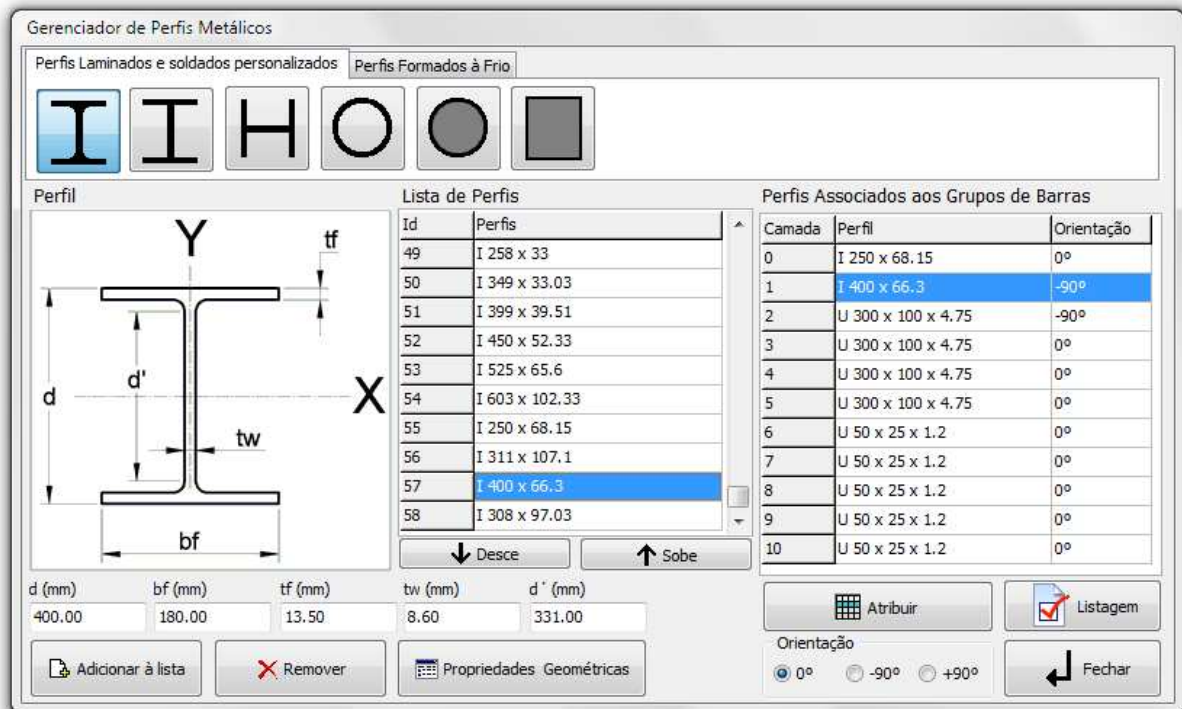
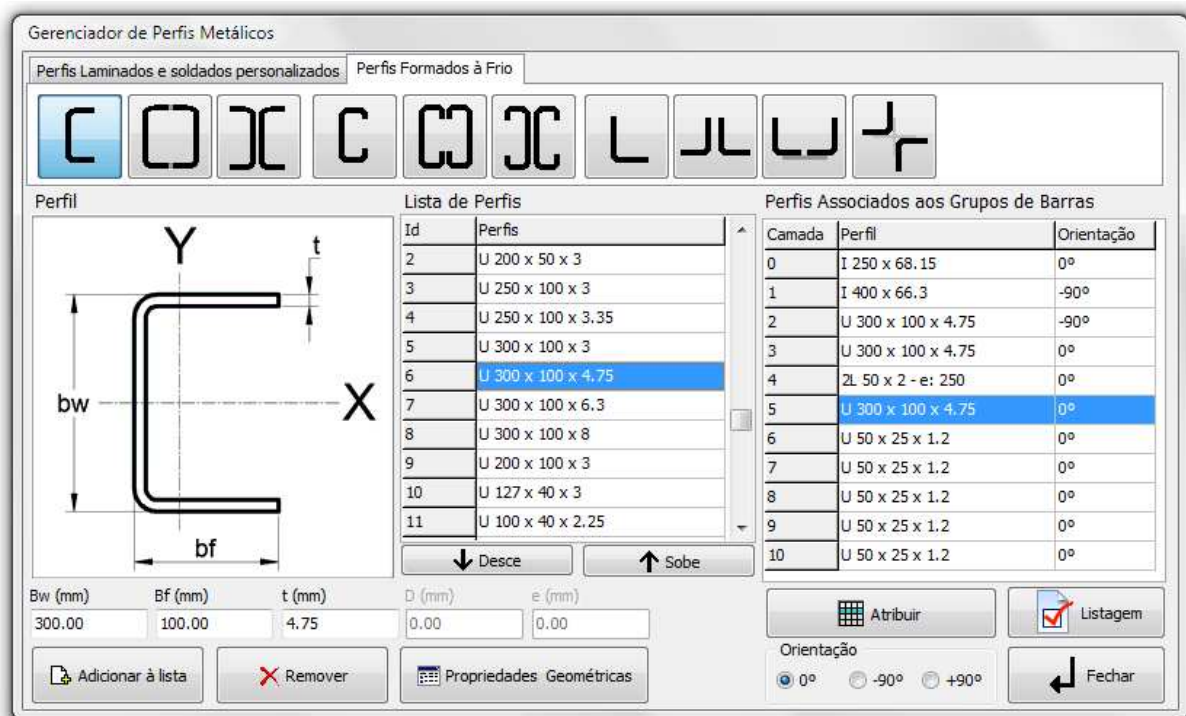


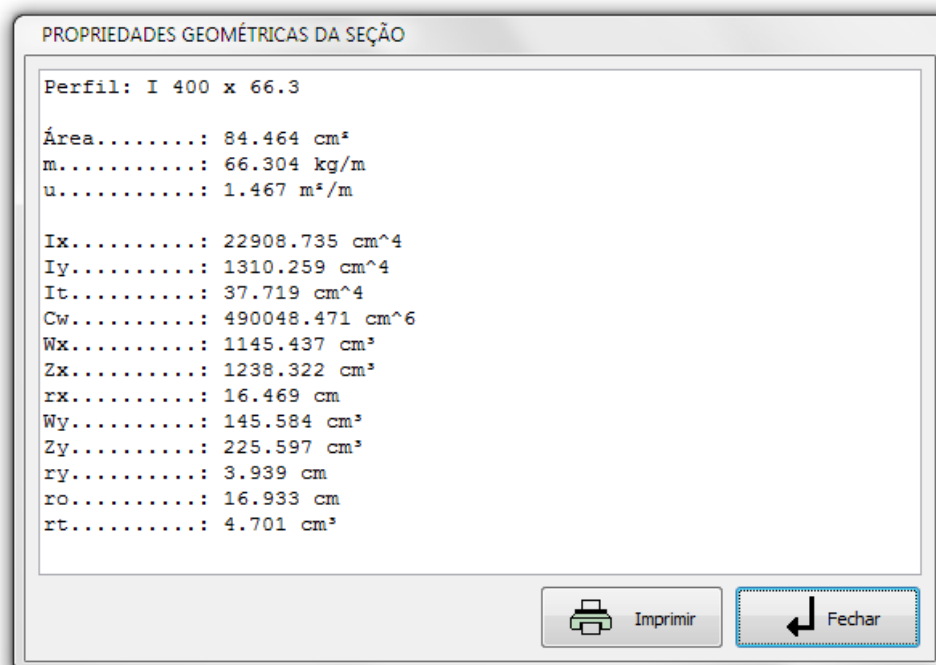
Figura 38: Gerenciador de perfis





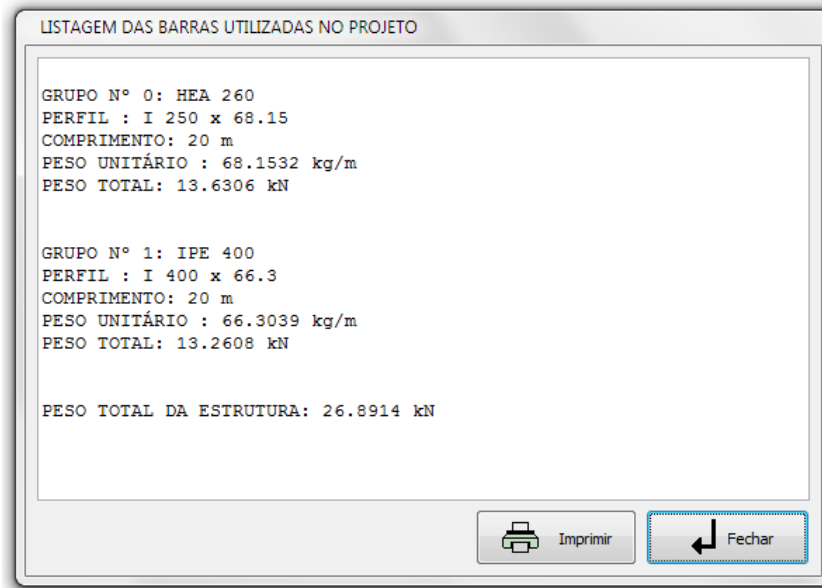
Para conhecer as propriedades geométricas dos perfis da “Lista de Perfis”, deve-se selecionar o perfil desejado e clicar no botão de propriedades geométricas do gerenciador de perfis. Com duplo do botão esquerdo do mouse na lista de perfis associados aos grupos de barras, as propriedades do perfil selecionado são igualmente exibidas. Para ambos os casos, deverá aparecer uma listagem como a da Figura 39. Adicionalmente, pelo comando de listagem, é possível conhecer o resumo do aço por grupo e para o conjunto da estrutura com base nos perfis atribuídos. As unidades da listagem também são sensíveis as configurações definidas pelo usuário, conforme exemplificado na Figura 40.

**Figura 39: Propriedades geométricas da seção**



Para os 16 diferentes tipos de perfis é possível definir novas dimensões, visualizar e imprimir o cálculo das propriedades geométricas necessárias ao dimensionamento.

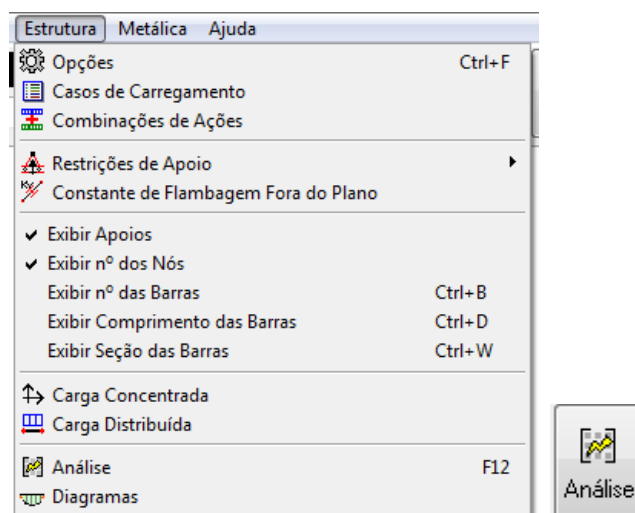
**Figura 40: Listagem das barras utilizadas em projeto**



## 6.5 ANÁLISE DA ESTRUTURA

Definida a geometria, esquema estático, carregamentos e combinações de carregamentos, materiais e seções transversais, pode-se processar a estrutura por meio do comando de análise, contido no menu “ESTRUTURA” ou pelo botão correspondente conforme Figura 41. No menu "ESTRUTURA", está disponível uma série de comandos que permitem visualizar na área gráfica, informações sobre as barras e nós da estrutura.

**Figura 41: Comando de análise**

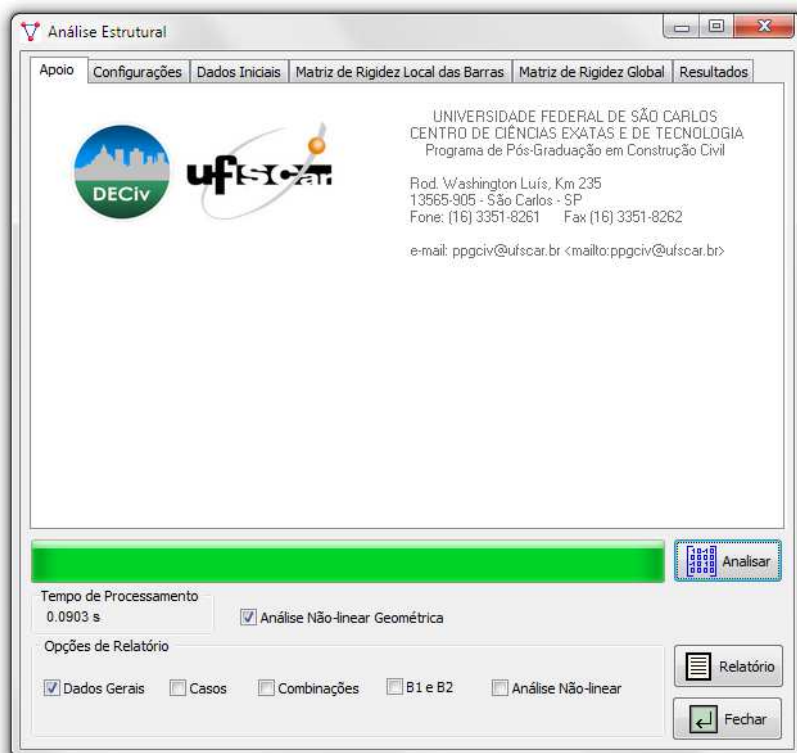


Na caixa de configuração da análise é possível:

- verificar 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  $B_2$ ;
- configurar o fator de redução das rigidezes axial e flexional;
- efetuar a análise de primeira ordem elástica para os casos e combinações de carregamento;
- incluir a análise em segunda ordem (não-linearidade geométrica global) para as combinações de carregamentos;
- gerar os relatórios de esforços e classificação das estrutura;
- gerar o relatório de esforços da análise não-linear e do método de amplificação de esforços ( $B_1$  e  $B_2$ ) para as combinações de carregamento;

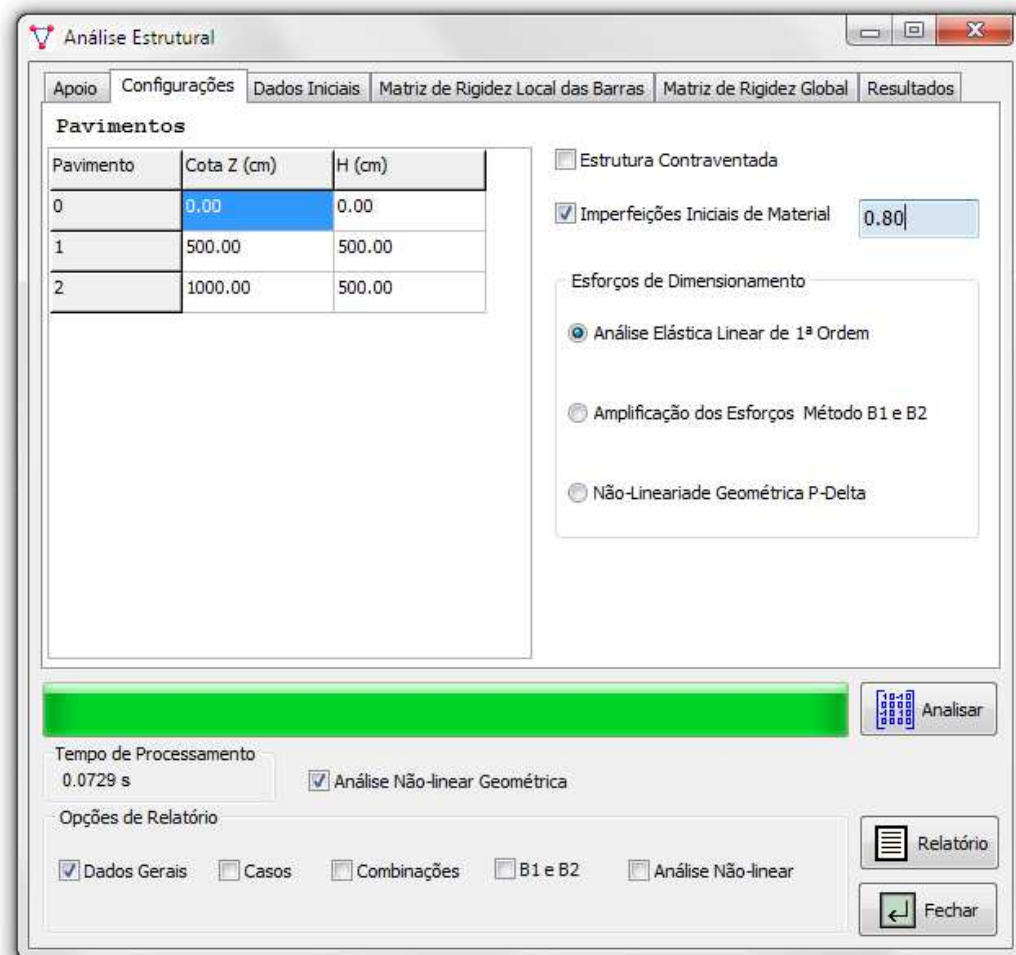
Na Figura 42 é a tela inicial da caixa de diálogo de análise do TRAME 4.0.

**Figura 42: Tela inicial da caixa de diálogo de análise da estrutura**



Na Figura 43, é apresentada a tela relacionada à identificação automática de pavimentos (para estruturas regulares) e às configurações de sistema de contraventamento e de imperfeições iniciais de materiais.

**Figura 43: Configurações de análise e dimensionamento**



Os recursos de visualização dos diagramas de esforços podem ser eficazmente avaliados no capítulo de validação dos resultados do programa.

# 7. VALIDAÇÃO DOS RESULTADOS

Na validação dos resultados, em função das características dos softwares utilizados e de questões computacionais, os números apresentados em todos os gráficos e tabelas correspondentes apresentam o ponto (.) como símbolo de separador decimal.

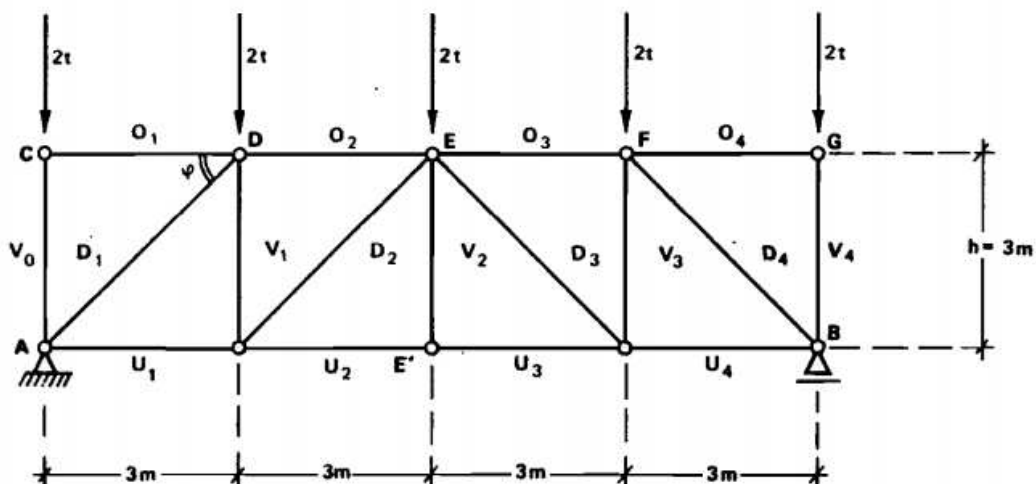
## 7.1 RESULTADOS PARA ANÁLISE DE TRELIÇAS PLANAS

Em termos de resultados apresenta-se 4 exemplos de treliças resolvidos no TRAME 4.0 e comparados com o programa Ftool, programa amplamente testado. Os dois primeiros casos, treliça simples e composta, foram obtidos de SÜSSEKIND (1975) e seus resultados comparados com os resultados de ambos os programas. No último caso apresenta-se uma treliça hiperestática, cuja geometria foi desenvolvida especificamente para teste do programa TRAME 4.0.

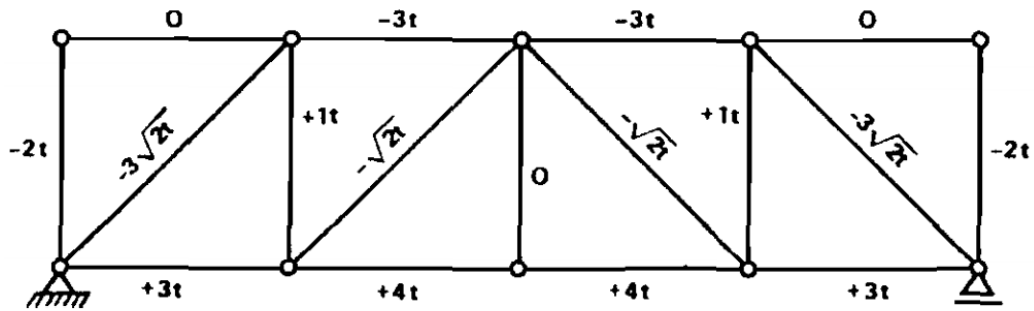
### 7.1.1 TRELIÇA ISOSTÁTICA SIMPLES

Na Figura 44 apresentam-se a geometria, o esquema estático e o carregamento. Na Figura 45 são apresentados os resultados de esforços normais nas barras da treliça isostática simples, analisada por SÜSSEKIND (1975) pelo Método de Ritter.

Figura 44: Treliça isostática simples analisada por SÜSSEKIND (1974)



**Figura 45: Resultados de esforços da treliça isostática simples**



Fonte: Süssekind (1974)

Na Figura 46 são apresentados os resultados da análise da treliça isostática simples desenhada e analisada no software Ftool. Na Figura 47 o resultado gráfico da análise produzida no software TRAME 4.0.

**Figura 46: Treliça isostática simples analisada no Ftool**

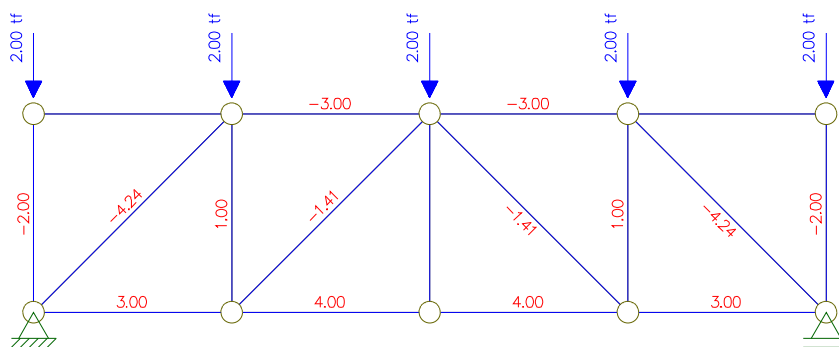
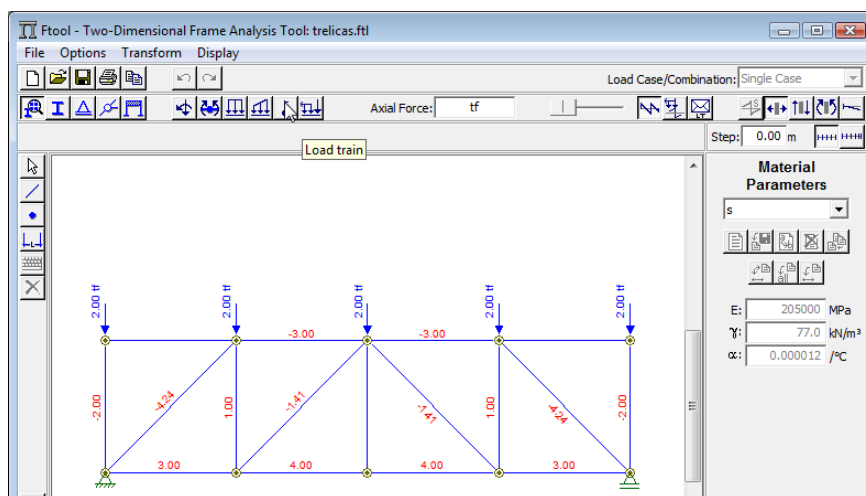
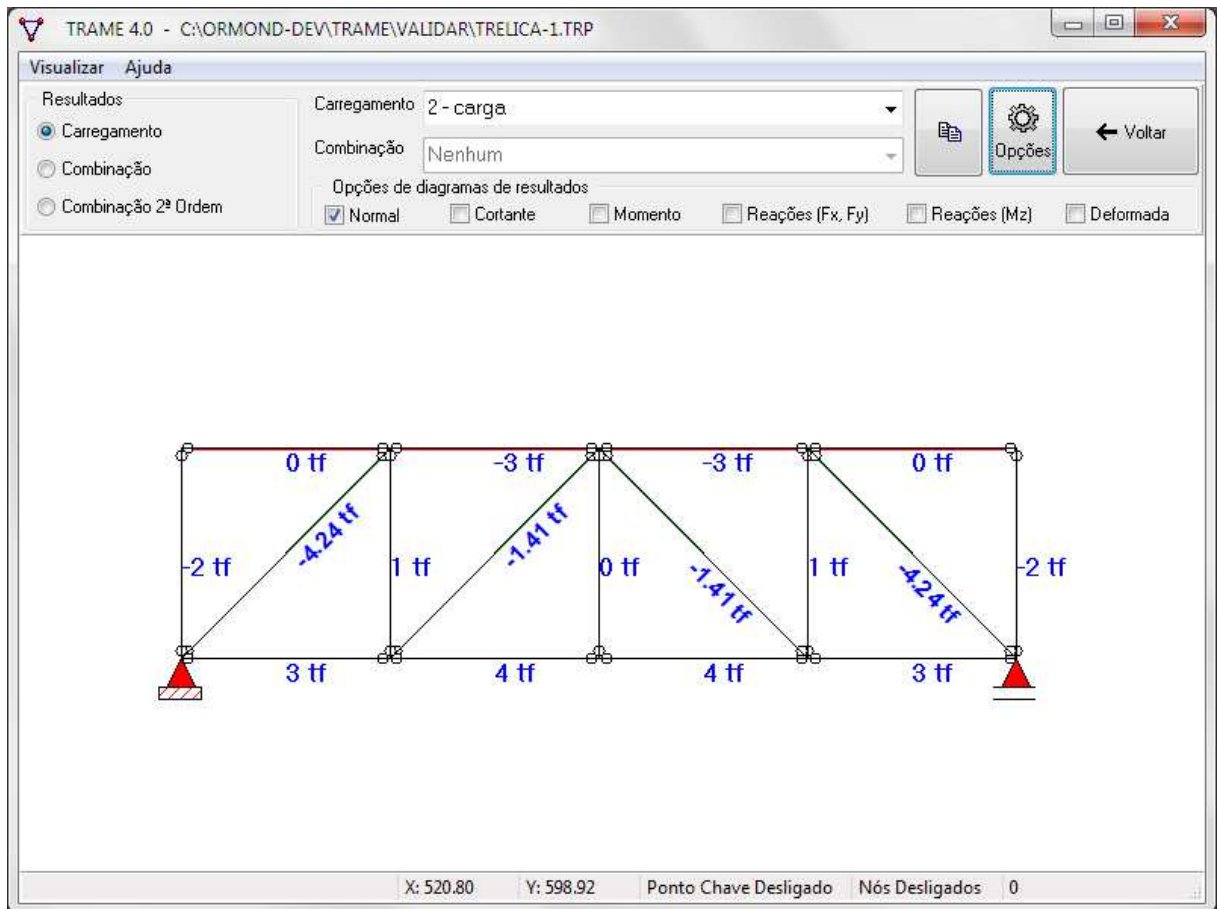


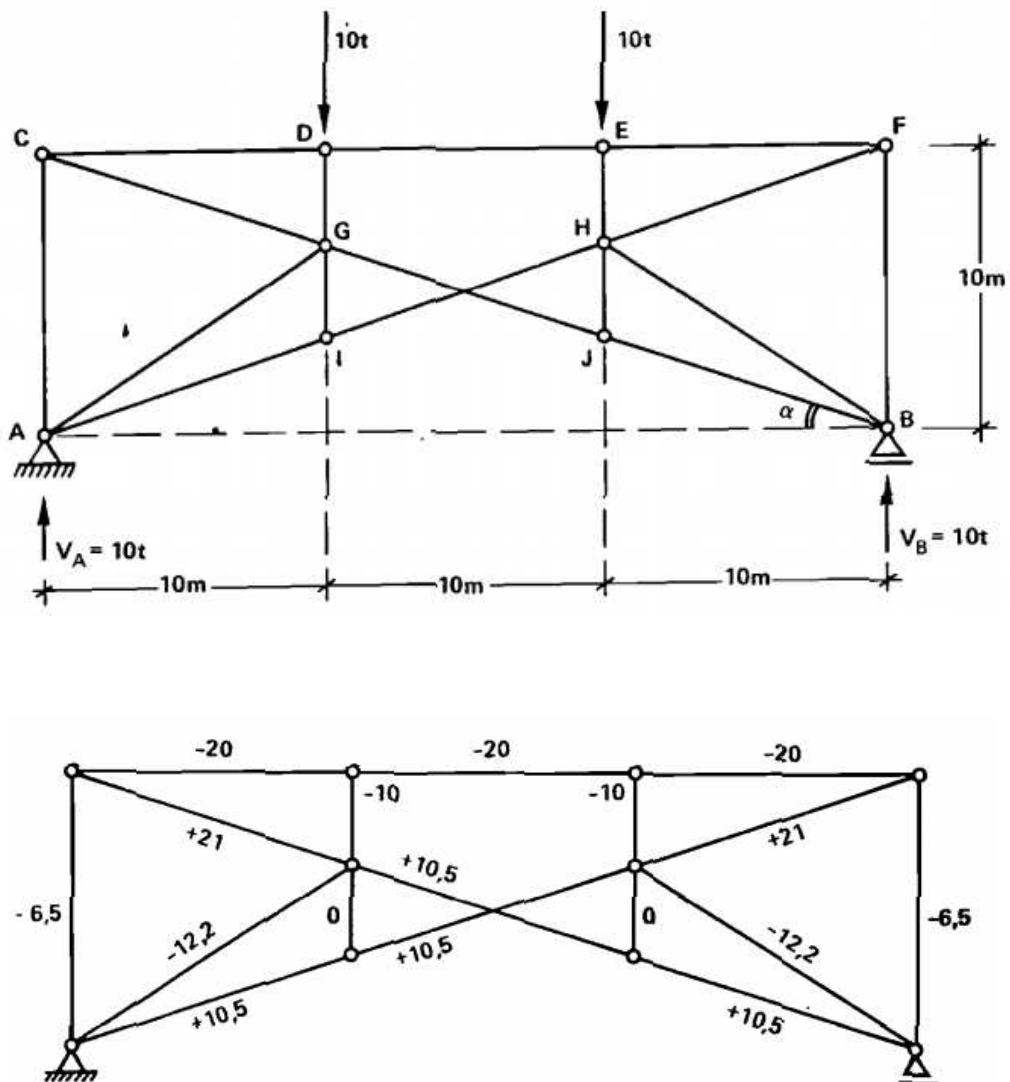
Figura 47: Treliça isostática simples analisada no Trame 4.0



### 7.1.2 TRELIÇA ISOSTÁTICA COMPOSTA

Na Figura 48 apresenta-se a geometria, o esquema estático, o carregamento e os resultados de esforços normais nas barras da treliça composta analisada por SÜSSEKIND (1975) pelo Método de Ritter. SÜSSEKIND (1975) define uma treliça composta como a aglutinação de treliças simples por um sistema de ligação isostático.

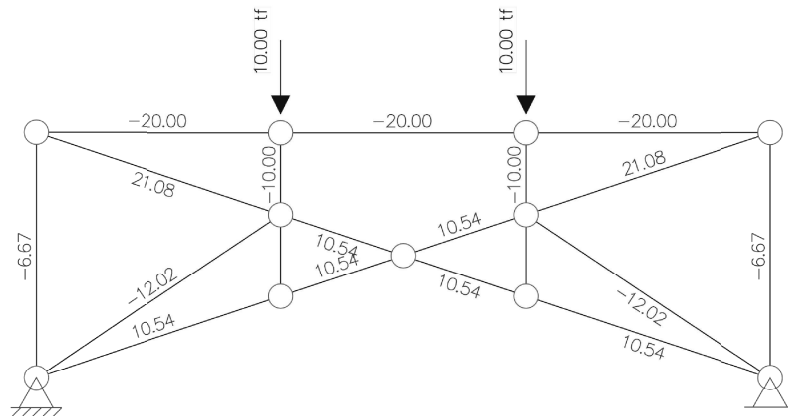
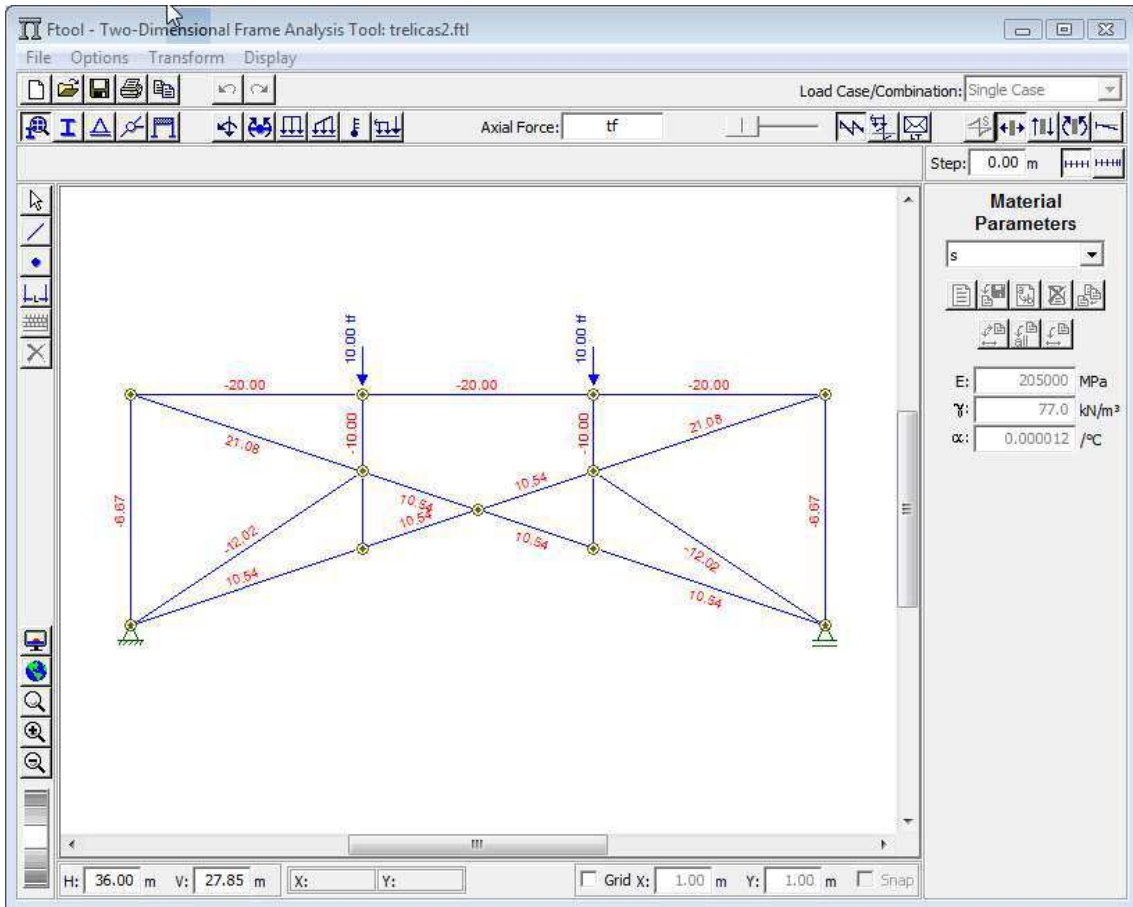
Figura 48: Treliça isostática composta



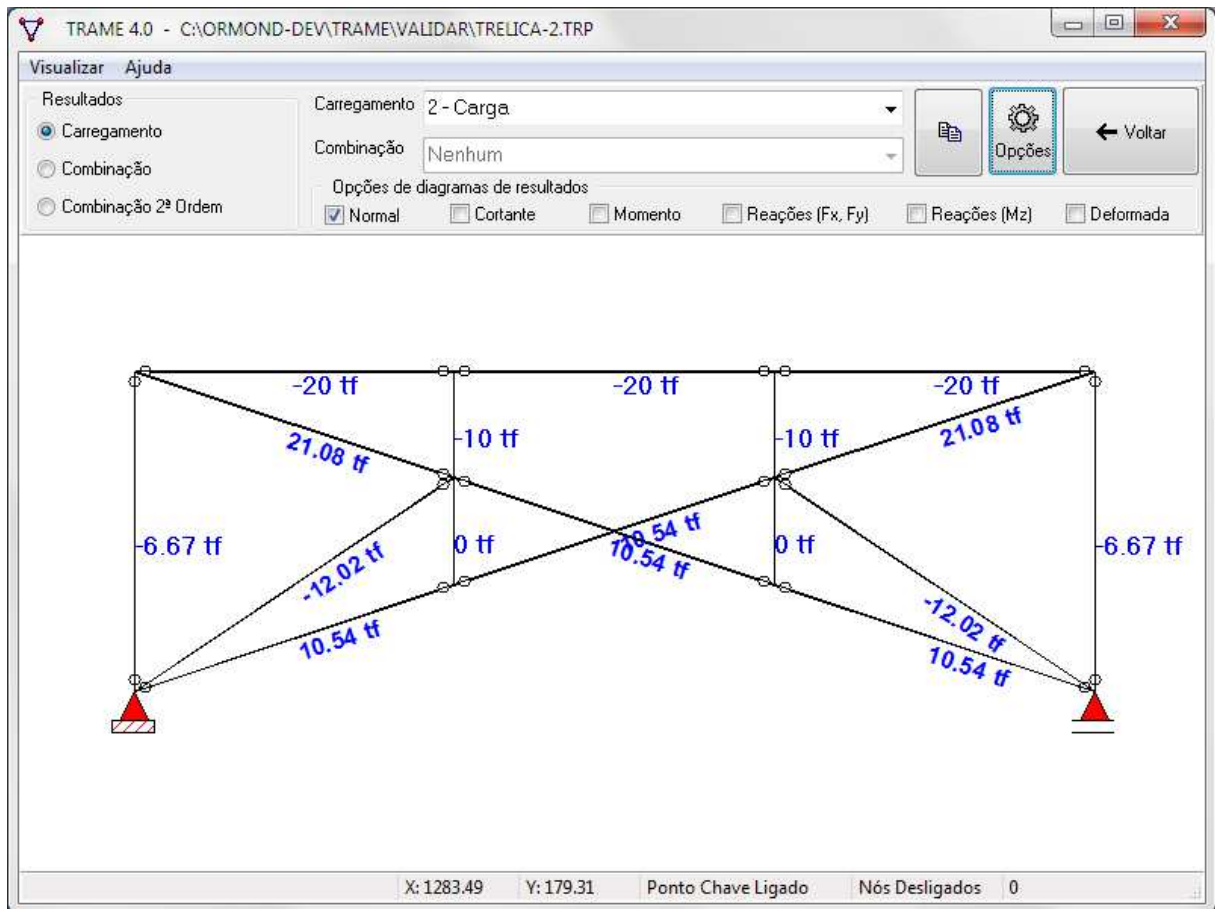
Fonte: Sússekind (1975)



Figura 49: Treliça isostática composta analisada no Ftool



**Figura 50: Treliça isostática composta analisada no Trame 4.0**



### 7.1.3 TRELIÇA HIPERESTÁTICA

No caso da treliça hiperestática foram adotados, tanto no Ftool como no TRAME 4.0, as seguintes configurações de seção transversal e material:

- área da seção transversal de 5,70 cm<sup>2</sup> (U 100x50x3);
- módulo de elasticidade de 20000 kN/cm<sup>2</sup>.

Os resultados apresentados são referentes apenas aos esforços providos do carregamento indicado, pois o Ftool não realiza a consideração do peso próprio automaticamente. Na Figura 51 estão representados o lançamento e os resultados obtidos por meio do programa Ftool.

Figura 51: Treliza hiperestática analisada no Ftool

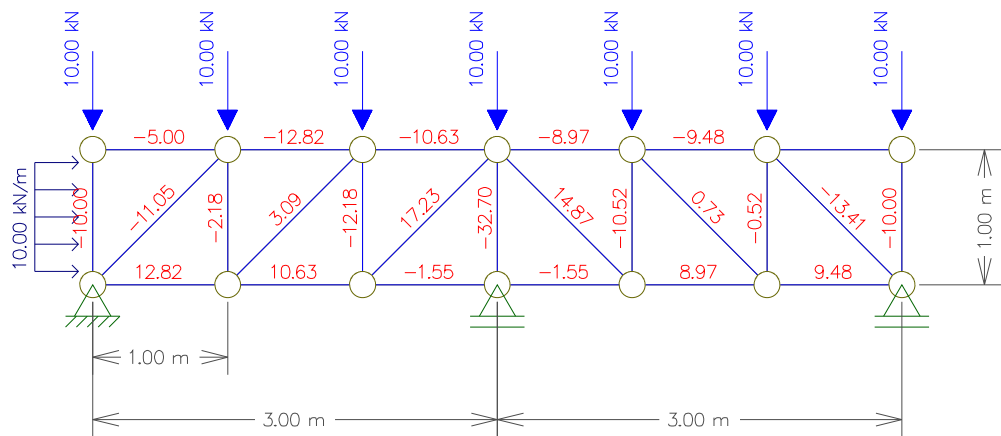
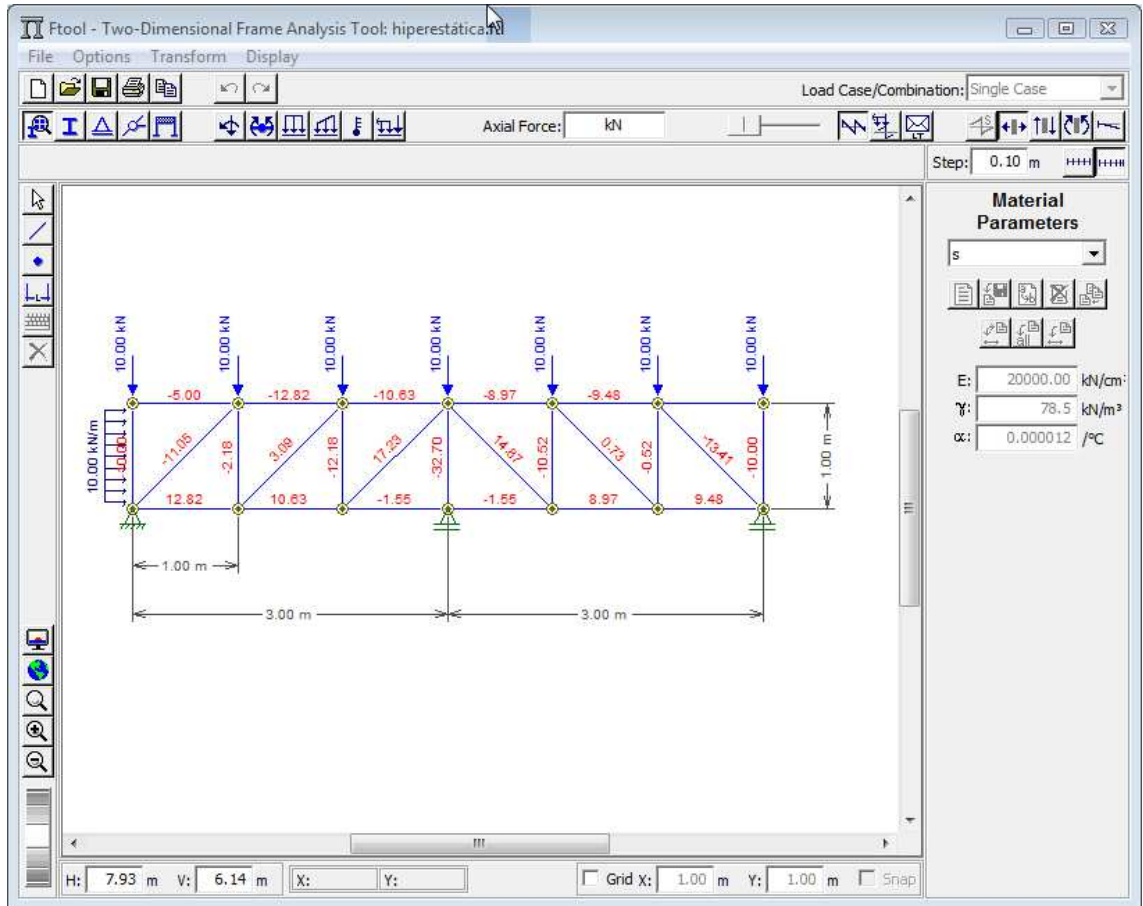
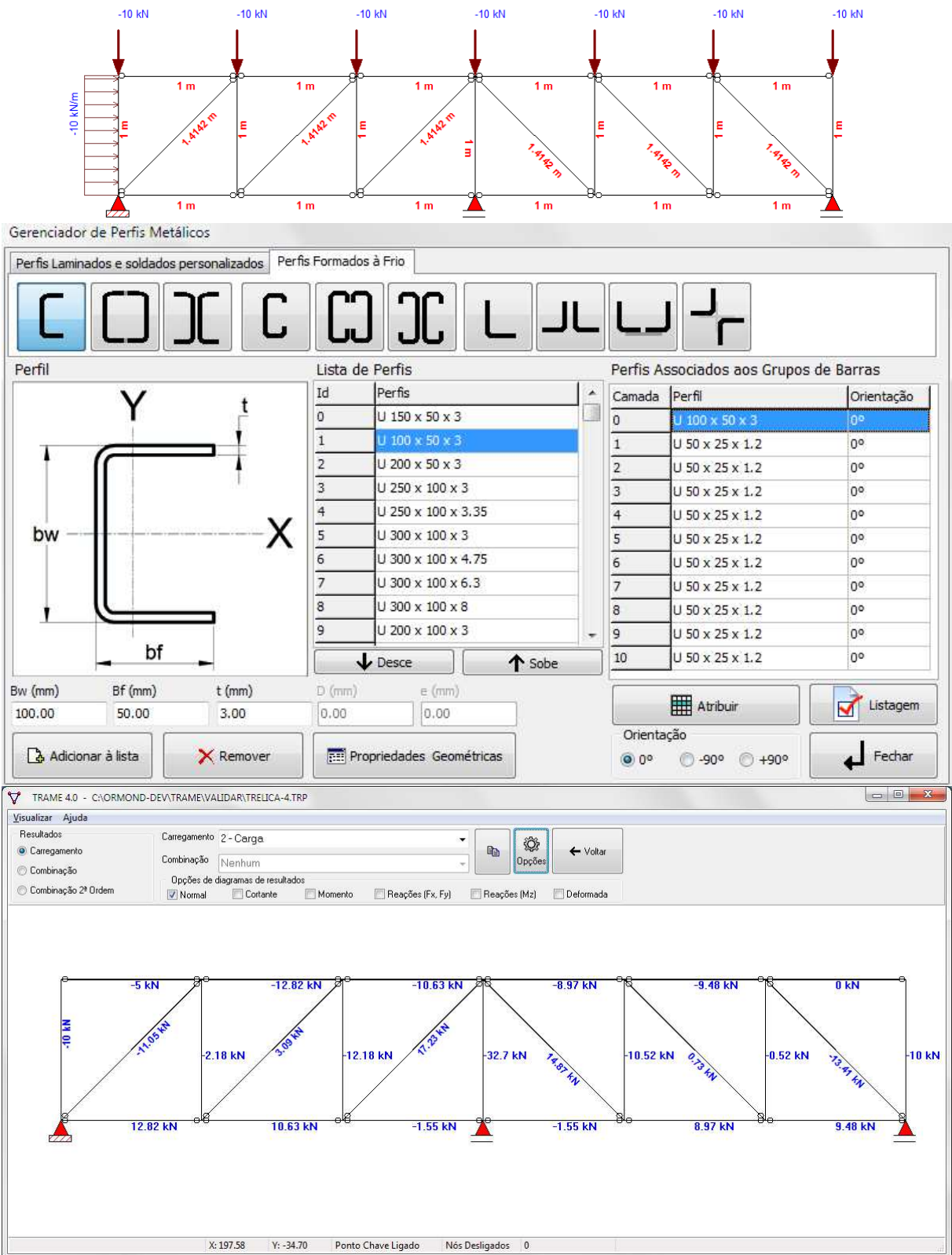


Figura 52 –Treliça hiperestática analisada no Trame 4.0



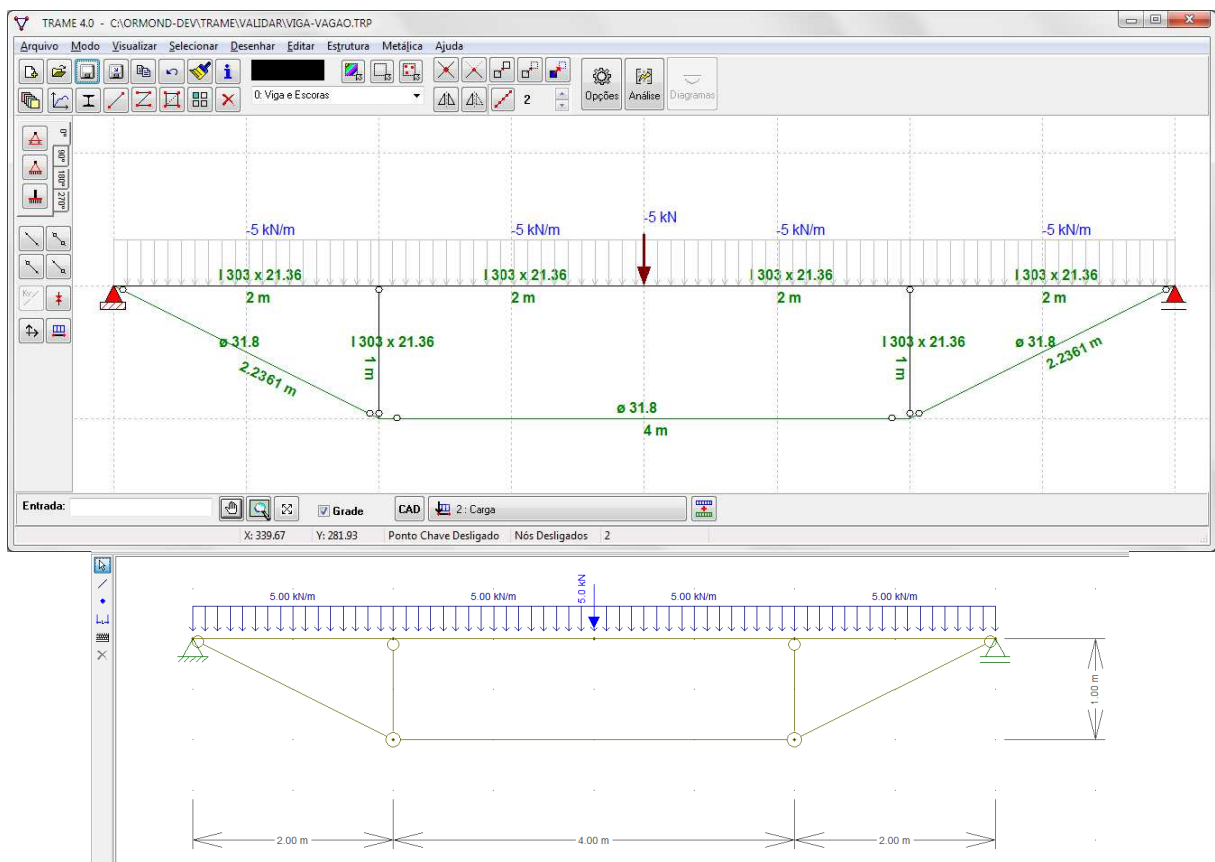
## 7.2 RESULTADOS PARA ANÁLISE DE VIGAS

Muitos modelos de vigas contínuas foram modelados no TRAME 4.0 durante o desenvolvimento dos recursos gráficos de representação dos diagramas de esforços. Não havendo necessidade de uma exposição exaustiva dos vários exemplos modelados, procurou-se demonstrar, por meio de um exemplo de viga-vagão, os resultados apresentados pelo TRAME 4.0 para este tipo de estrutura. A viga-vagão recebe este nome devido sua grande utilização em estruturas de trens. Nesta validação podemos verificar os resultados que mesclam o uso de barras com articulações e barras rigidamente conectadas.

Para a viga e as escoras verticais, foi adotado o perfil laminado W310x21, com área de  $27,21 \text{ cm}^2$  e momento de inércia de  $3750 \text{ cm}^4$ . Para os tirantes configurou-se uma barra com diâmetro de 31,8 mm, com área de seção transversal de  $7,942 \text{ cm}^2$ . O módulo de elasticidade do aço é de  $20.000 \text{ kN/cm}^2$ .

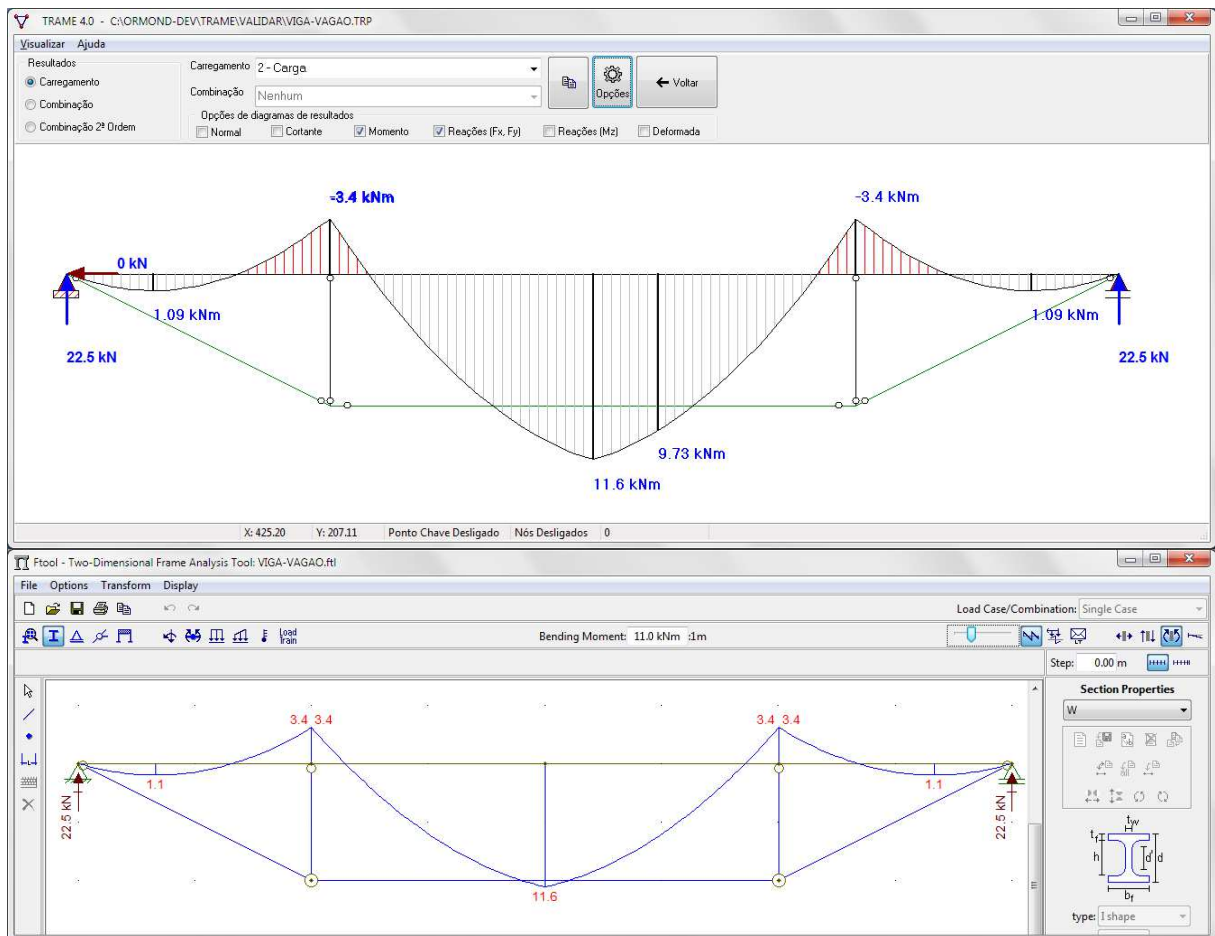
Na Figura 53 ilustra-se o esquema estático, o comprimento e perfis atribuídos às barras e os carregamentos lançados, tanto no TRAME 4.0 como no Ftool.

**Figura 53: Modelo de viga-vagão**



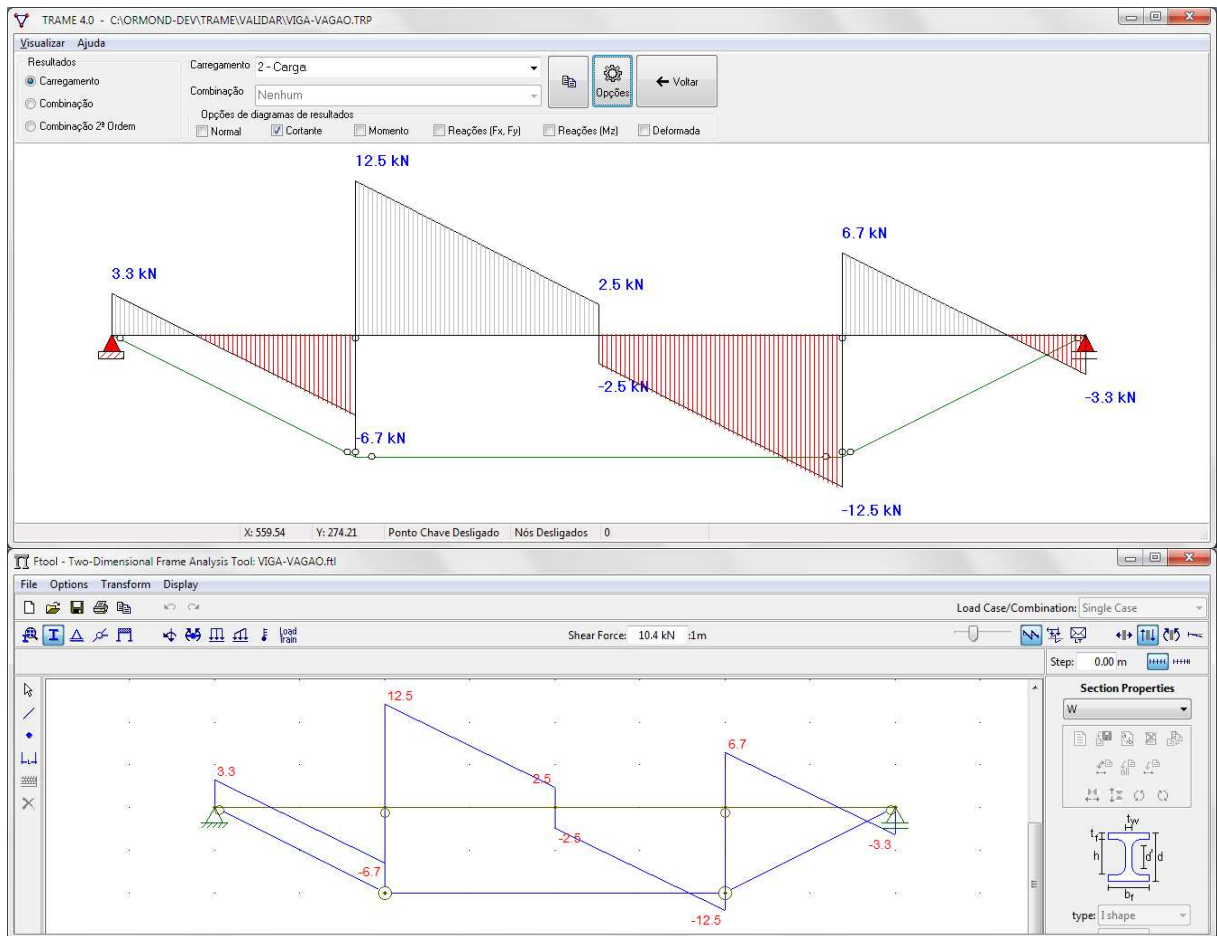
Pelo fato do Trame 4.0 não trabalhar com valores tabelados, e sim calculados das propriedades dos perfis, pequenas diferenças em relação aos valores comerciais tabelados poderão ser observados. Na Figura 54 demonstra-se a comparação de resultados de diagrama de esforços de momento fletor e as reações de apoio da viga para os dois programas.

**Figura 54: Diagrama de momento fletor e reações de apoio**



Na Figura 55 demonstra-se a comparação de resultados do diagrama de esforços cortantes.

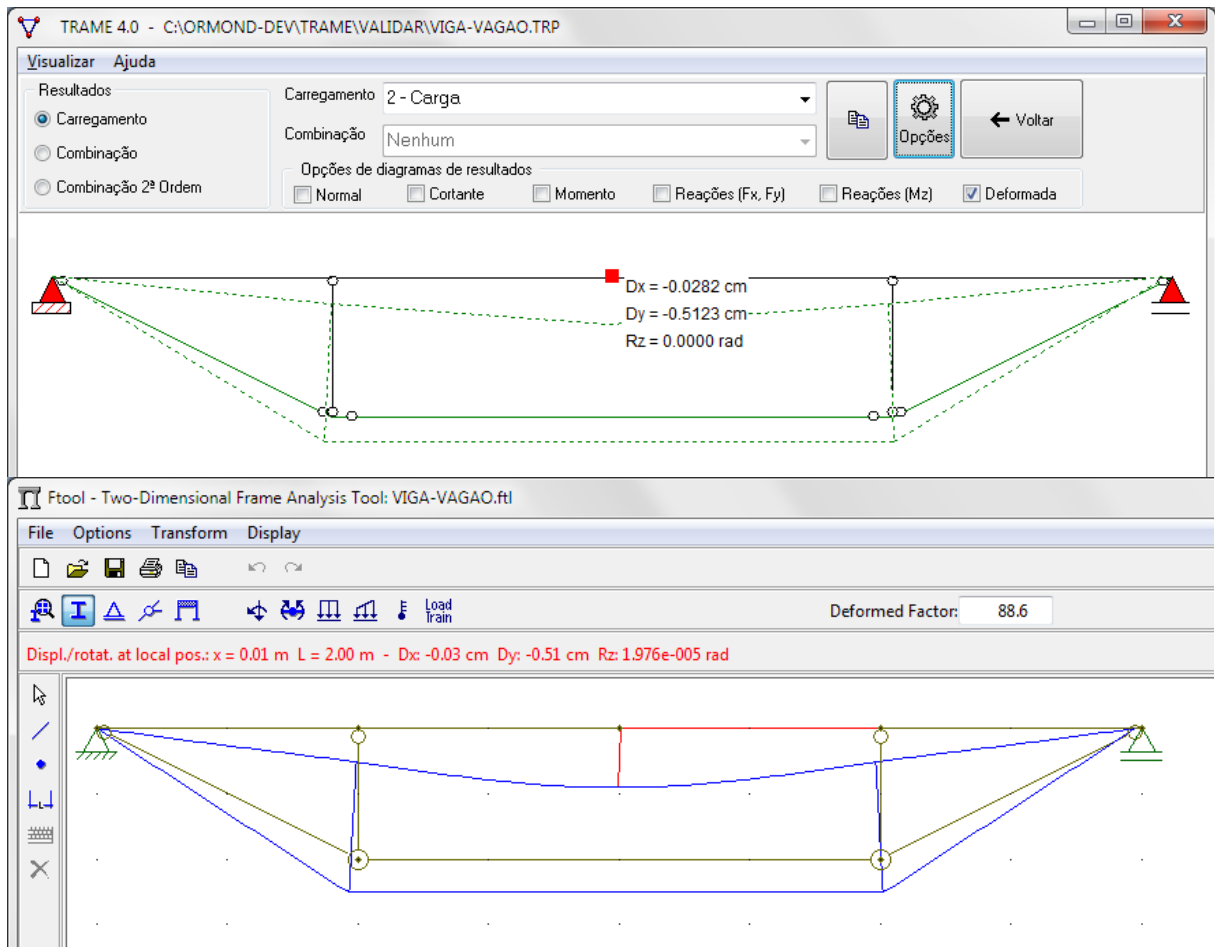
Figura 55: Diagrama de esforço cortante



A comparação dos deslocamentos para o nó central da viga, a partir do diagrama de deslocamentos, é apresentada na Figura 56. O máximo deslocamentos vertical obtido, foi exatamente igual para os dois programas (Ftool e TRAME 4.0), de -0,51 cm.



**Figura 56: Deslocamento do nó central da viga**



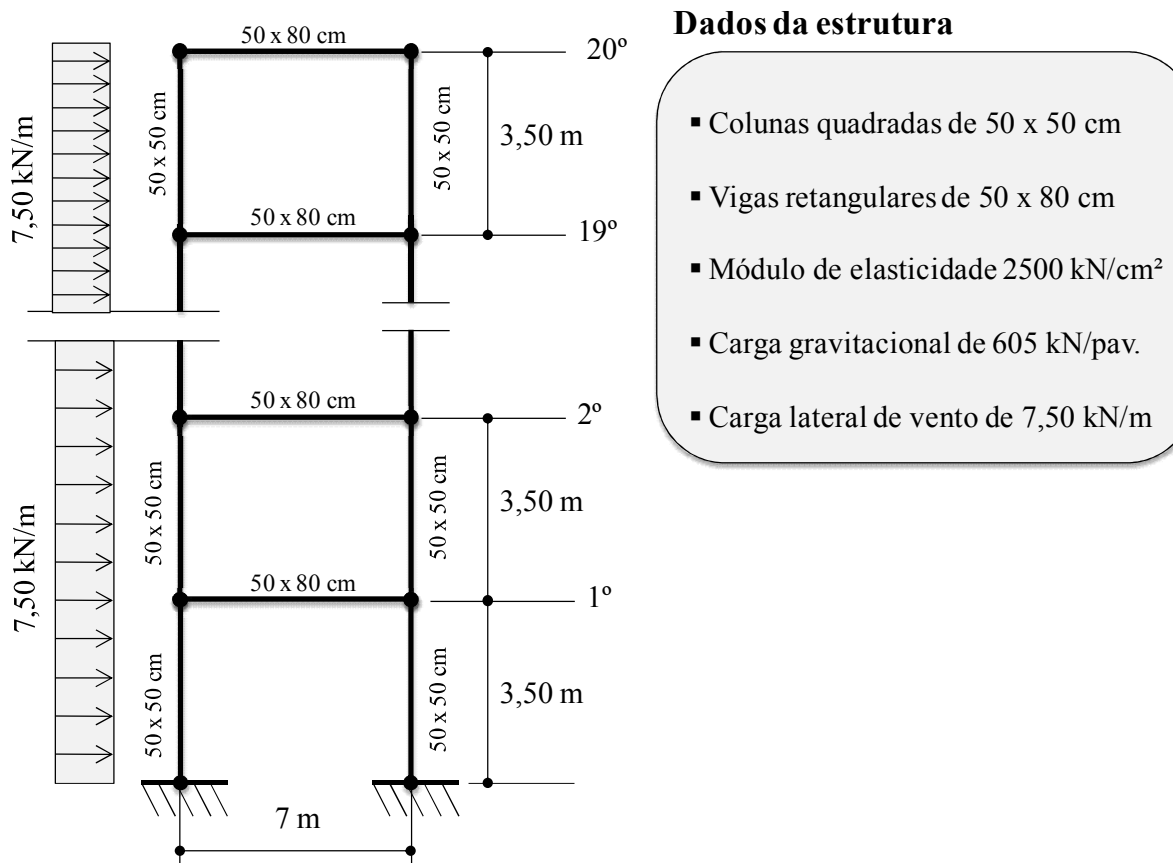


### 7.3 VALIDAÇÃO DO MÉTODO DE CARGA DE GRAVIDADE INTERATIVA E DA CLASSIFICAÇÃO DE DESLOCABILIDADE DAS ESTRUTURAS

#### 7.3.1 EXEMPLO NUMÉRICO DE PÓRTICO DE MÚLTIPLOS PAVIMENTOS

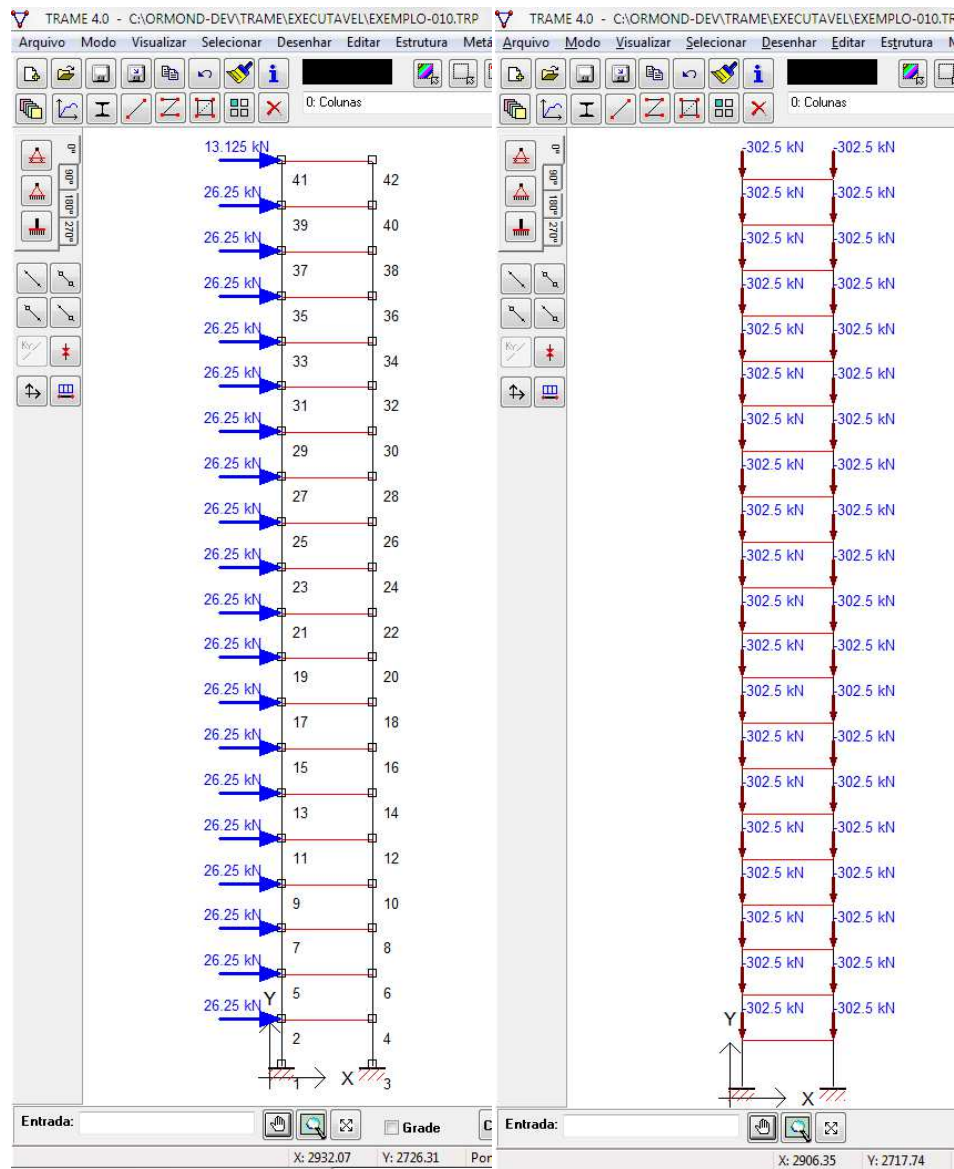
Na Figura 58 é apresentada a modelagem, no TRAME 4.0, do pórtico estudado no trabalho de Smith e Gaiotti (1988). As cargas horizontais e gravitacionais foram inseridas em dois casos de carregamento distintos. Trata-se de um pórtico com tramo de 7 metros e 20 pavimentos com altura padrão de 3,5 metros. As colunas possuem seção transversal quadrada de 50 cm de lado e, as vigas, dimensões de 50x80 cm. O módulo de elasticidade do material é de 2500 kN/cm<sup>2</sup>. A Figura 57 resume as informações para a correta modelagem do pórtico não contraventado e engastado na base.

**Figura 57 – Informações do modelo de pórtico de múltiplos pavimentos**



Adaptado de (SMITH E GAIOTTI, 1988).

**Figura 58: Modelagem do pórtico de múltiplos andares e carregamentos**



Na Figura 59 é demonstrada a combinação dos carregamentos gravitacionais com as cargas de vento para a análise não-linear geométrica global.

**Figura 59: Combinação de carregamentos**

Combinções

Lista de Combinações		Casos de Carregamento	Fatores	
Nº	Descrição			
1	Vento + Gravitacional	1	Peso Próprio	0.00
2		2	Carga Vento	1.00
3		3	Carga Gravitacional	1.00
4		4		0.00
5		5		0.00
6		6		0.00
7		7		0.00
8		8		0.00
9		9		0.00
10		10		0.00
11				
12				
13				
14				
15				

Na Tabela 11, extraída dos relatórios de análise do TRAME 4.0, são apresentados os resultados em termos de deslocamentos, das análises não-linear ( $Dx_2$ ) e Linear ( $Dx$ ) elásticas. Considerando a não-linearidade geométrica, por meio do método de carga de gravidade interativa, é determinada a relação entre os deslocamentos horizontais ( $Dx_2/Dx$ ) no nível de cada pavimento. Esta relação, também chamada de efeito  $P-\Delta$ , foi a mesma obtida por Smith e Gaiotti (1988).

**Tabela 11: Resultados das análises não-linear e linear elásticas em termos de deslocamentos**

Nó	Dx (cm)	Dx2 (cm)	Pavimento	Dx2/Dx
1	0.0000	0.0000	0	1.085
2	1.0809	1.1732		
3	0.0000	0.0000	1	1.085
4	1.0800	1.1722		
5	2.5717	2.8258	2	1.099
6	2.5708	2.8249		
7	4.1350	4.5709	3	1.105
8	4.1341	4.5699		
9	5.7352	6.3619	4	1.109
10	5.7343	6.3608		
11	7.3585	8.1811	5	1.112
12	7.3576	8.1800		
13	8.9935	10.0143	6	1.113
14	8.9926	10.0131		
15	10.6295	11.8487	7	1.115
16	10.6286	11.8474		
17	12.2566	13.6723	8	1.115
18	12.2557	13.6710		
19	13.8657	15.4743	9	1.116
20	13.8648	15.4730		
21	15.4483	17.2451	10	1.116
22	15.4473	17.2437		
23	16.9967	18.9757	11	1.116
24	16.9957	18.9743		
25	18.5039	20.6585	12	1.116
26	18.5030	20.6571		
27	19.9637	22.2867	13	1.116
28	19.9628	22.2853		
29	21.3706	23.8545	14	1.116
30	21.3697	23.8530		
31	22.7198	25.3569	15	1.116
32	22.7189	25.3554		
33	24.0074	26.7901	16	1.116
34	24.0065	26.7886		
35	25.2299	28.1510	17	1.116
36	25.2290	28.1495		
37	26.3848	29.4373	18	1.116
38	26.3839	29.4358		
39	27.4708	30.6482	19	1.116
40	27.4699	30.6467		
41	28.4913	31.7879	20	1.116
42	28.4909	31.7869		

Na Figura 60 é apresentada a tabela de resultados da análise realizada Smith e Gaiotti (1988) . Nesta tabela, os deslocamentos são apresentados em centímetros.

Figura 60: Deslocamentos por meio do método de carga de gravidade interativa

STORY I	DEFL. DUE TO WIND ONLY	EXTRA DEFL. DUE TO APPLIED G.L. (1st ITER.)	2nd ITERATION	3rd ITERATION	TOTAL DEFLECTION	DEVIATION FROM ITERATIVE METHOD	P-DELTA EFFECT
20	0.28491	0.029670	0.0031136	0.00032788	0.31802	-0.060%	11.62%
19	0.27470	0.028595	0.0030002	0.00031589	0.30661	-0.062	11.62
18	0.26385	0.027468	0.0028816	0.00030334	0.29450	-0.064	11.62
17	0.25230	0.026282	0.0027570	0.00029018	0.28163	-0.064	11.63
16	0.24007	0.025035	0.0026262	0.00027636	0.26901	-0.067	11.64
15	0.22720	0.023721	0.0024887	0.00026184	0.25367	-0.067	11.65
14	0.21370	0.022340	0.0023441	0.00024658	0.23863	-0.075	11.67
13	0.19963	0.020890	0.0021922	0.00023056	0.22294	-0.076	11.68
12	0.18504	0.019374	0.0020330	0.00021375	0.20866	-0.073	11.68
11	0.16996	0.017793	0.0018664	0.00019615	0.18982	-0.079	11.69
10	0.15448	0.016153	0.0016930	0.00017779	0.17250	-0.081	11.66
9	0.13865	0.014462	0.0015132	0.00015871	0.15478	-0.090	11.63
8	0.12256	0.012729	0.0013281	0.00013902	0.13676	-0.088	11.59
7	0.10629	0.010966	0.0011390	0.00011884	0.11851	-0.093	11.50
6	0.089931	0.0091871	0.00094759	0.000098376	0.10016	-0.100	11.37
5	0.073581	0.0074098	0.00075626	0.000077902	0.081825	-0.095	11.20
4	0.057348	0.0056539	0.00056775	0.000057764	0.063627	-0.097	10.95
3	0.041346	0.0039426	0.00038558	0.000038437	0.045713	-0.098	10.56
2	0.025713	0.0023084	0.00021527	0.000020704	0.028257	-0.103	9.89
1	0.010805	0.00084550	0.000071389	0.0000064147	0.011728	-0.102	8.54

Fonte: (SMITH E GAIOTTI, 1988).

Com base nos resultados apresentados na Tabela 12 pode-se observar que as classificações de deslocabilidade obtidas por meio do coeficiente  $B_2$  (para cada pavimento) e do coeficiente Gama-Z, coadunam com a relação do efeito P- $\Delta$  obtida por Smith e Gaiotti (1988), ou seja, onde os deslocamentos da análise não-linear (NLG global) superam em mais de 10% os deslocamentos obtidos na análise linear elástica.

**Tabela 12: Classificação do pórtico de múltiplos pavimentos em termos de deslocabilidade**

Pavimento	Altura (cm)	$Dx_{m\acute{a}x}$ (cm)	$Dx_{relativo}$ (cm)	$N_{Sd}$ (kN)	$F_{Sd}$ (kN)	B2	Deslocabilidade
20	350.0000	28.4913	1.0206	-605.00	13.13	1.188	Média
19	350.0000	27.4708	1.0859	-1210.00	39.38	1.126	Média
18	350.0000	26.3848	1.1550	-1815.00	65.63	1.120	Média
17	350.0000	25.2299	1.2225	-2420.00	91.88	1.121	Média
16	350.0000	24.0074	1.2875	-3025.00	118.13	1.125	Média
15	350.0000	22.7198	1.3492	-3630.00	144.38	1.129	Média
14	350.0000	21.3706	1.4069	-4235.00	170.63	1.133	Média
13	350.0000	19.9637	1.4598	-4840.00	196.88	1.137	Média
12	350.0000	18.5039	1.5072	-5445.00	223.13	1.141	Média
11	350.0000	16.9967	1.5484	-6050.00	249.38	1.145	Média
10	350.0000	15.4483	1.5826	-6655.00	275.63	1.147	Média
9	350.0000	13.8657	1.6091	-7260.00	301.88	1.150	Média
8	350.0000	12.2566	1.6271	-7865.00	328.13	1.151	Média
7	350.0000	10.6295	1.6360	-8470.00	354.38	1.151	Média
6	350.0000	8.9935	1.6350	-9075.00	380.63	1.151	Média
5	350.0000	7.3585	1.6233	-9680.00	406.88	1.149	Média
4	350.0000	5.7352	1.6002	-10285.00	433.13	1.146	Média
3	350.0000	4.1350	1.5633	-10890.00	459.38	1.142	Média
2	350.0000	2.5717	1.4908	-11495.00	485.63	1.135	Média
1	350.0000	1.0809	1.0809	-12100.00	511.88	1.094	Pequena
0	0.0000	0.0000	0.0000	-12100.00	511.88	0.000	---

**Gama Z: 1.118**<sup>21</sup>

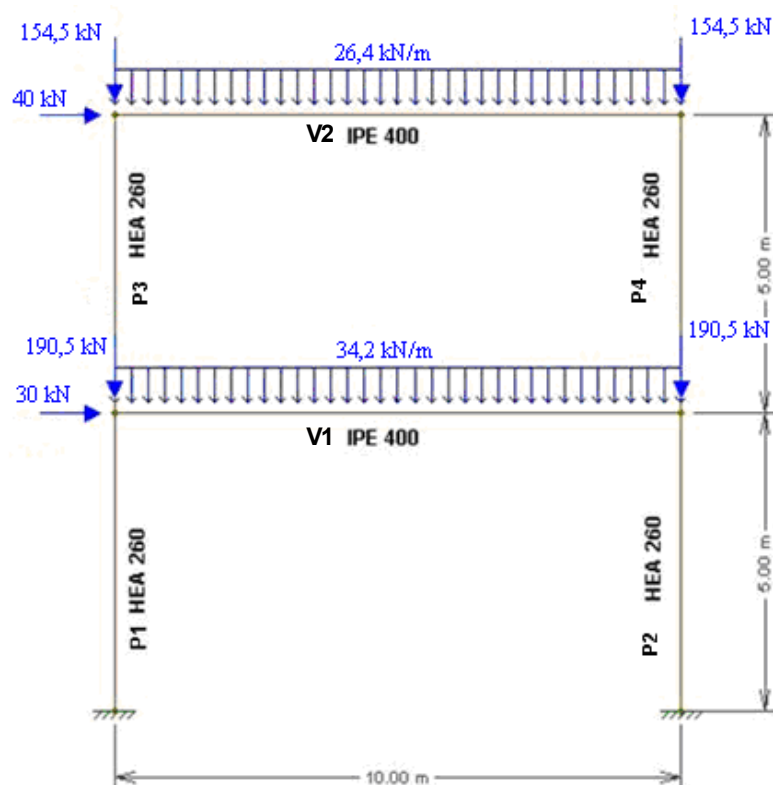
### 7.3.2 EXEMPLO NUMÉRICO DE PÓRTICO COM 2 PAVIMENTOS

Para classificação quanto à deslocabilidade, foi utilizado um modelo estudado e classificados por Pereira (2009), segundo as normas AISC: 2005, NBR 8800:2008, NBR 6118:2003 e EC-3:2002. Trata-se de um modelo de pórticos 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 apresenta-se a geometria e os carregamentos do pórtico

<sup>21</sup> Utilizando o símbolo do ponto (.) como separador decimal.

analisado pela autora. A área da seção transversal e o momento de inércia das vigas são de  $86,464 \text{ cm}^2$  e  $22908,73 \text{ cm}^4$ , respectivamente. A área da seção transversal dos pilares é  $86,819 \text{ cm}^2$  e o momento de inércia igual a  $10265,775 \text{ cm}^4$ . Para o aço foi utilizado o módulo de elasticidade adotado pela autora,  $E = 20500 \text{ kN/cm}^2$ .

**Figura 61: Geometria e carregamento do pórtico**



Fonte: Pereira (2009).

O primeiro passo é realizar uma análise linear da estrutura em regime elástico e sem imperfeições iniciais de material. Com os deslocamentos obtidos nesta análise calcula-se o parâmetro  $B_2$  para classificar a estrutura quanto à deslocabilidade. Na Tabela 13 os resultados de deslocamentos em primeira ordem e os parâmetros necessários para a classificação da estrutura são apresentados, conforme Pereira (2009). Na Figura 62 é apresentado o relatório de classificação gerado pelo software TRAME 4.0, incluindo o valor de Gama-Z. Os resultados calculados pelo programa, apresentam excelente relação com o cálculo manual e a classificação realizados por Pereira (2009).

**Tabela 13: Classificação da estrutura**

Cálculo de $B_2 = \frac{1}{1 - \frac{1}{R_m} \cdot \frac{\Delta_h}{h} \cdot \frac{\sum N_{Sd}}{\sum H_{Sd}}}$							
Pavimento	h (cm)	$\delta$ (cm)	$\Delta_{1h}$ (cm)	$S_{N_{Sd}}$ (kN)	$S_{H_{Sd}}$ (kN)	$B_2$	Classificação
1	500	2,82	2,82	1296	70	1,14	Média deslocabilidade
2	500	5,55	2,63	573	40	1,10	

Fonte: Pereira (2009).

**Figura 62: Relatório de classificação****Classificação da Estrutura**

Pavimento	Altura (cm)	$Dx_{\text{máximo}}$ (cm)	$Dx_{\text{relativo}}$ (cm)	$N_{Sd}$ (kN)	$F_{Sd}$ (kN)	$B_2$	Deslocabilidade
2	500.0000	5.2735	2.5328	-573.00	40.00	1.093	Pequena
1	500.0000	2.7407	2.7407	-1296.00	70.00	1.136	<b>Média</b>
0	0.0000	0.0000	0.0000	-1296.00	70.00	0.000	---

Gama Z: 1.096

Como  $1,1 < B_2 \leq 1,4$ , a estrutura é classificada como de média deslocabilidade e, portanto, devem ser consideradas as imperfeições iniciais de material, reduzindo as rigidezes axial e flexional das barras para 80% dos valores originais. Alterada as rigidezes, deve-se reprocessar a estrutura e recalculer o parâmetro  $B_2$  para determinação dos esforços finais. A Tabela 14 apresenta o cálculo de  $B_2$  incluindo dos efeitos dessas imperfeições de material. Na Figura 63 é apresentado o cálculo de  $B_2$  considerando a redução das rigidezes.

Na Figura 64 é apresentado o padrão de relatório de cálculo dos parâmetros  $B_1$  e  $B_2$ , os esforços finais de segunda ordem ponderados segundo o Método de Amplificação de Esforços da NBR 8800:2008 e a relação entre os esforços da análises linear e não-linear geométrica em regime elástico. Neste caso em específico o coeficiente  $B_1$  resultou igual a 1 para a quase totalidade as barras.



Tabela 14: Classificação da estrutura

Pavimento	h (cm)	$\delta$ (cm)	$\Delta_{1h}$ (cm)	$SN_{Sd}$ (kN)	$SH_{Sd}$ (kN)	B <sub>2</sub>
1	500	3,54	3,54	1296	70	1,18
2	500	6,77	3,20	573	30	1,12

Fonte: Pereira (2009).

Figura 63: Relatório de classificação

## Classificação da Estrutura

Pavimento	Altura (cm)	$Dx_{\text{máximo}}$ (cm)	$Dx_{\text{relativo}}$ (cm)	$N_{Sd}$ (kN)	$F_{Sd}$ (kN)	B <sub>2</sub>	Deslocabilidade
2	500.0000	6.5919	3.1660	-573.00	40.00	1.119	Média
1	500.0000	3.4259	3.4259	-1296.00	70.00	1.175	Média
0	0.0000	0.0000	0.0000	-1296.00	70.00	0.000	---

Gama Z: 1.123

Figura 64: Relatório B<sub>1</sub> e B<sub>2</sub>

TRAME 4.0		Relatório de Análise Estrutural	
Descrição da Estrutura:		Pórtico Plano	
Autor:		Trame 4.0	
Data:		29/04/2013	

## Esforços de 2º Ordem das Combinações de Carregamentos

Método da Amplificação de Esforços B<sub>1</sub> e B<sub>2</sub> da NBR 8800:2008

Combinação N°: 1 - Comb 1

+ 1.00 Carregamento de cálculo

## Esforços na Estrutura nt

Barra	Nó inicial	Normal (kN)	Cortante (kN)	Momento (kN.cm)	Nó final	Normal (kN)	Cortante (kN)	Momento (kN.cm)
1	1	-648.00	-26.83	4471.31	2	-648.00	26.83	-8942.61
2	3	0.00	-171.00	23511.00	2	0.00	-171.00	23511.00
3	3	-648.00	26.83	-8942.61	4	-648.00	-26.83	4471.31
4	5	-286.50	60.58	-15722.86	3	-286.50	-60.58	14568.39
5	5	0.00	-132.00	15722.86	6	0.00	-132.00	15722.86
6	2	-286.50	-60.58	14568.39	6	-286.50	60.58	-15722.86

## Esforços na Estrutura lt

Barra	Nó inicial	Normal (kN)	Cortante (kN)	Momento (kN.cm)	Nó final	Normal (kN)	Cortante (kN)	Momento (kN.cm)
1	1	34.12	34.80	-10397.17	2	34.12	-34.80	7004.97
2	3	18.32	-22.50	11234.76	2	18.32	22.50	-11267.80
3	3	-34.12	35.20	-7117.64	4	-34.12	-35.20	10948.22
4	5	-11.62	19.76	-5763.79	3	-11.62	-19.76	4117.12
5	5	-80.34	-11.62	5763.79	6	-80.34	11.62	-5856.25
6	2	11.62	20.24	-4262.83	6	11.62	-20.24	5856.25

## Resultados de B1

Barra	Normal (kN)	Ne (kN)	Cm	B <sub>1</sub>	B <sub>2</sub>
1	-613.88	6646.54	0.40	1.0000	1.1754
2	18.32	3708.04	1.00	1.0000	1.1754
3	-682.12	6646.54	0.40	1.0000	1.1754
4	-298.12	6646.54	0.23	1.0000	1.1195
5	-80.34	3708.04	1.00	1.0221	1.1195
6	-274.88	6646.54	0.23	1.0000	1.1195

## Esforços de 2º Ordem

$$M_{id} = B_1 M_{nt} + B_2 M_{lt}$$

$$N_{id} = N_{nt} + B_2 N_{lt}$$

Barra	Nó inicial	Normal (kN)	Cortante (kN)	Momento (kN.cm)	Nó final	Normal (kN)	Cortante (kN)	Momento (kN.cm)
1	1	-607.89	7.98	-7749.78	2	-607.89	-7.98	-708.80
2	3	21.53	-193.50	36716.61	2	21.53	-148.50	10266.55
3	3	-688.11	62.02	-17308.86	4	-688.11	-62.02	16790.02
4	5	-299.51	80.34	-22175.20	3	-299.51	-80.34	19177.34
5	5	-89.94	-143.62	23253.42	6	-89.94	-120.38	9515.23
6	2	-273.49	-40.34	9796.31	6	-273.49	40.34	-9167.01

## Relação entre os Esforços de 2º e 1º Ordem

Barra	Nó inicial	$N_{id2}/N_{id1}$	$M_{id2}/M_{id1}$	Nó final	$N_{id2}/N_{id1}$	$M_{id2}/M_{id1}$
1	1	0.99	1.31	2	0.99	0.37
2	3	1.18	1.06	2	1.18	0.84
3	3	1.01	1.08	4	1.01	1.12
4	5	1.00	1.03	3	1.00	1.03
5	5	1.12	1.05	6	1.12	0.96
6	2	0.99	0.95	6	0.99	0.93

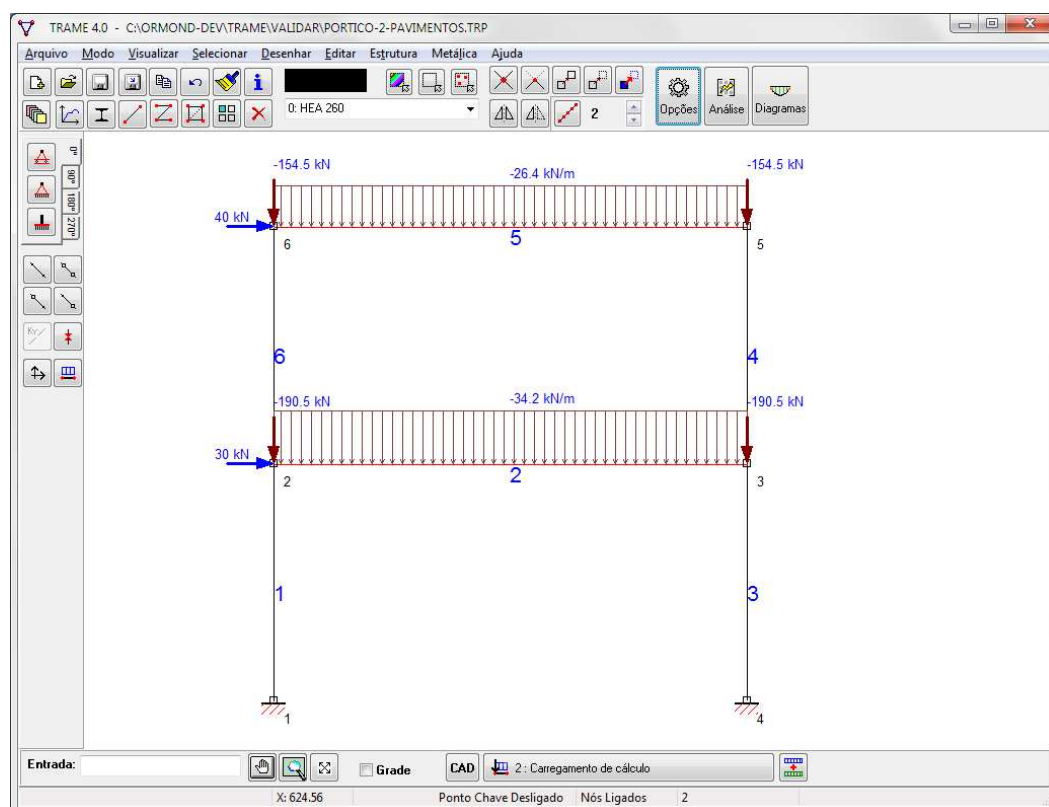
Na Figura 65 são apresentados os valores de B<sub>1</sub> e B<sub>2</sub> para todas as barras da estrutura. A numeração da barras e dos nós da estrutura pode ser observada na Figura 66, que reproduz os carregamentos anteriormente definidos.

**Figura 65: Resultados  $B_1$  e  $B_2$  para dimensionamento das barras**

**Resultados de B1**

Barra	Normal (kN)	Ne (kN)	Cm	B1	B2
1	-613.88	6646.54	0.40	1.0000	1.1754
2	18.32	3708.04	1.00	1.0000	1.1754
3	-682.12	6646.54	0.40	1.0000	1.1754
4	-298.12	6646.54	0.23	1.0000	1.1195
5	-80.34	3708.04	1.00	1.0221	1.1195
6	-274.88	6646.54	0.23	1.0000	1.1195

**Figura 66: Numeração de nós, barras da estrutura e combinação de carregamentos**



Completando a análise de classificação da estrutura e validação do Método de Carga de Gravidade Interativa, adotado pelo TRAME 4.0, realizou-se por meio dos softwares educacionais Mastan2 e AcadFrame, análises linear e não-linear geométrica exata em regime elástico. Por meio destas análises, podemos avaliar e comparar o efeito P- $\Delta$  calculado por cada programa.

Figura 67: Análise do pórtico de 2 pavimentos no software MASTAN2

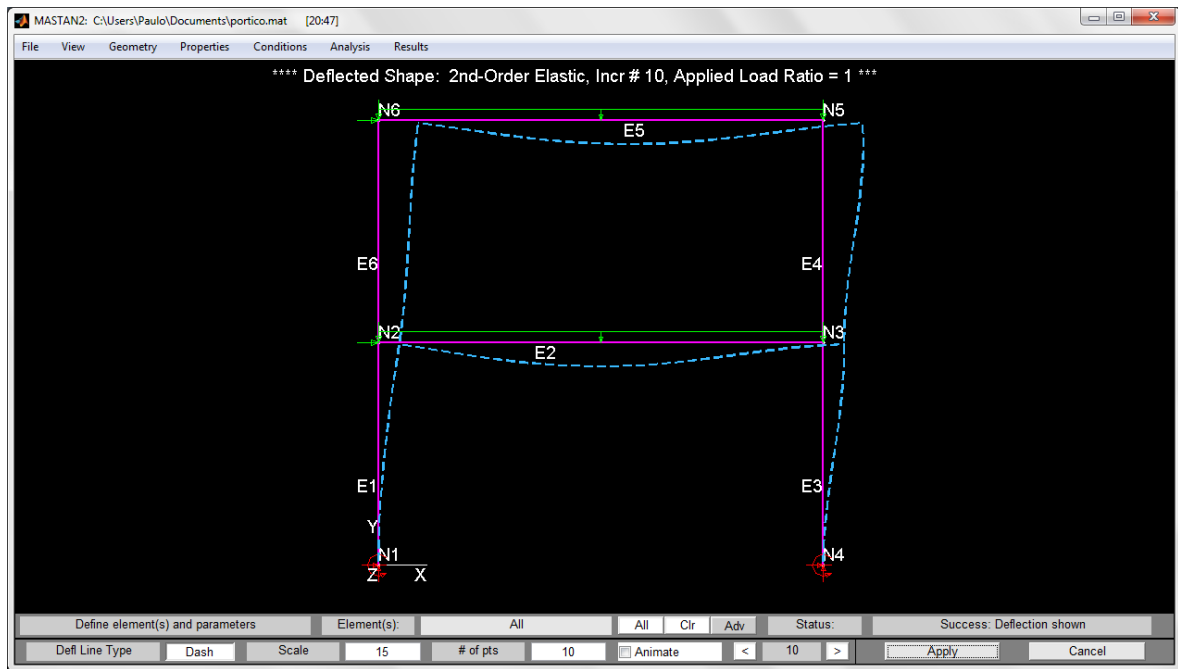
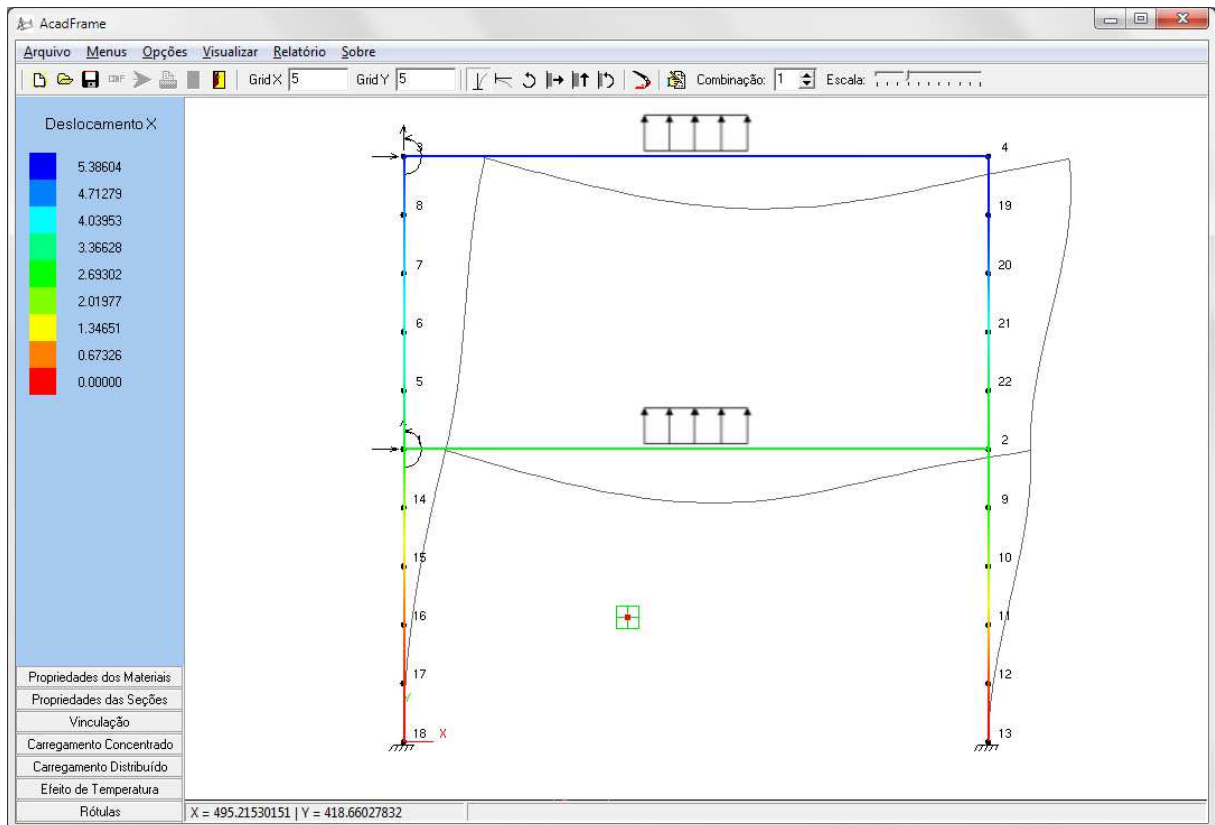


Figura 68: Análise do pórtico de 2 pavimentos no software AcadFrame



**Tabela 15: Máximo deslocamento horizontal no nível dos pavimentos**

Pavimento	Análise linear elástica			Análise não-Linear geométrica		
	Valores de $Dx_1$ (cm)			Valores de $Dx_2$ (cm)		
	TRAME 4.0	MASTAN2	AcadFrame	TRAME 4.0	MASTAN2	AcadFrame
1	2,741	2,741	2,755	3,033	3,052	3,111
2	5,273	5,273	5,318	5,785	5,812	5,919

**Tabela 16: Máximo deslocamento horizontal no nível dos pavimentos**

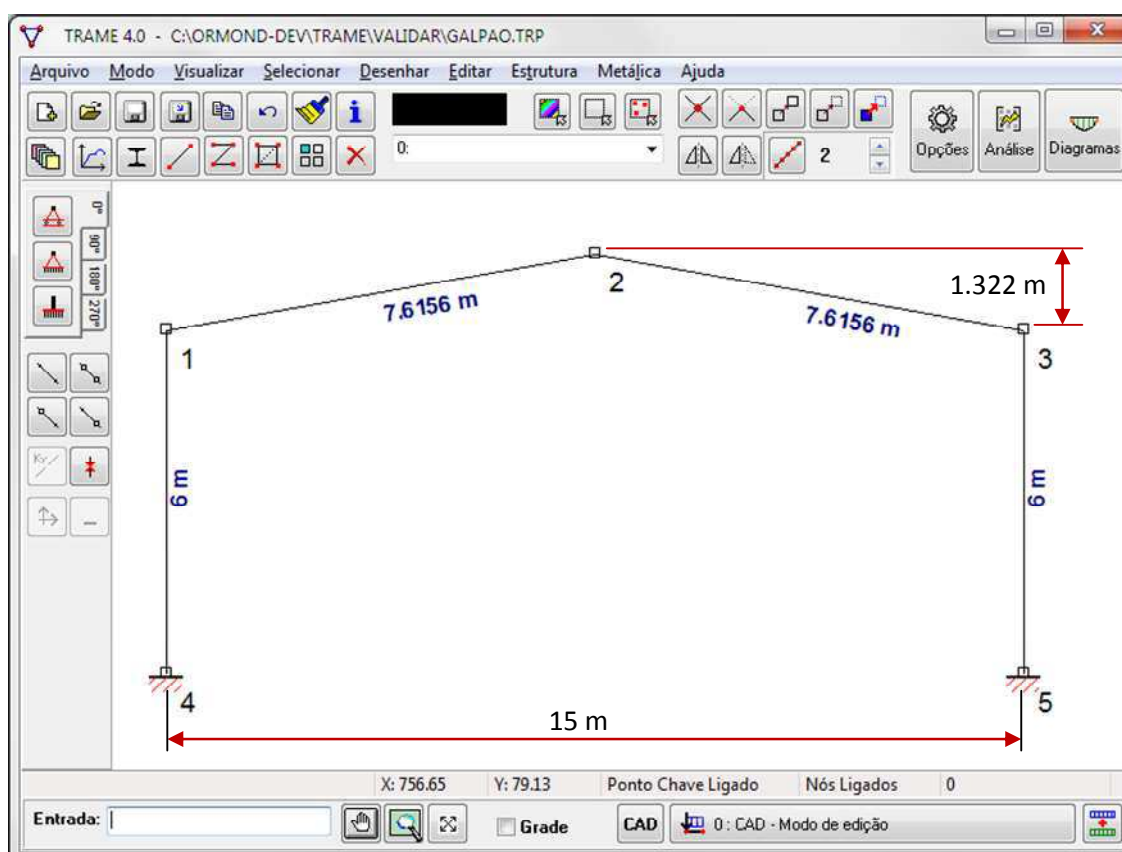
Pavimento	Efeito P- $\Delta$		
	$Dx_2 / Dx_1$		
	TRAME 4.0	MASTAN2	AcadFrame
1	1,106	1,113	1,129
2	1,097	1,102	1,113

Na Tabela 15 são apresentados os resultados de deslocamento horizontal dos pavimentos para a estrutura do pórtico de 2 pavimentos, analisada nos 3 diferentes programas (TRAME 4.0, AcadFrame e MASTAN2). 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 16, 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  $B_2$ , do método simplificado proposto pela NBR 8800:2008, classificando a estrutura como de média deslocabilidade. Os resultados obtidos com o AcadFrame, neste caso residualmente maiores, se justificam pelo fato do programa possuir os recursos de análise não-linear geométrica exata e deformações por cisalhamento.

## 7.4 VALIDAÇÃO DAS COMBINAÇÕES DE AÇÕES

No modelo de galpão de vigas de alma cheia, representado na Figura 69, foram definidos 4 casos de carregamentos, sendo o caso de peso próprio, calculado automaticamente pelo programa. Para vigas e colunas foi adotado o perfil comercial W310x44,5, com área de seção transversal de  $52,7 \text{ cm}^2$  e momento de inércia de  $9997 \text{ cm}^4$ . A validação dos resultados das combinações de ações foi estabelecida na comparação com o software comercial STRAP<sup>22</sup>. A equivalência de resultados pode ser observada por meio dos diagramas de esforços gerados pelos dois programas.

Figura 69: Modelo de galpão de vigas de alma cheia



<sup>22</sup> Hardlock Nº: 8616

Figura 70: Casos de carregamento

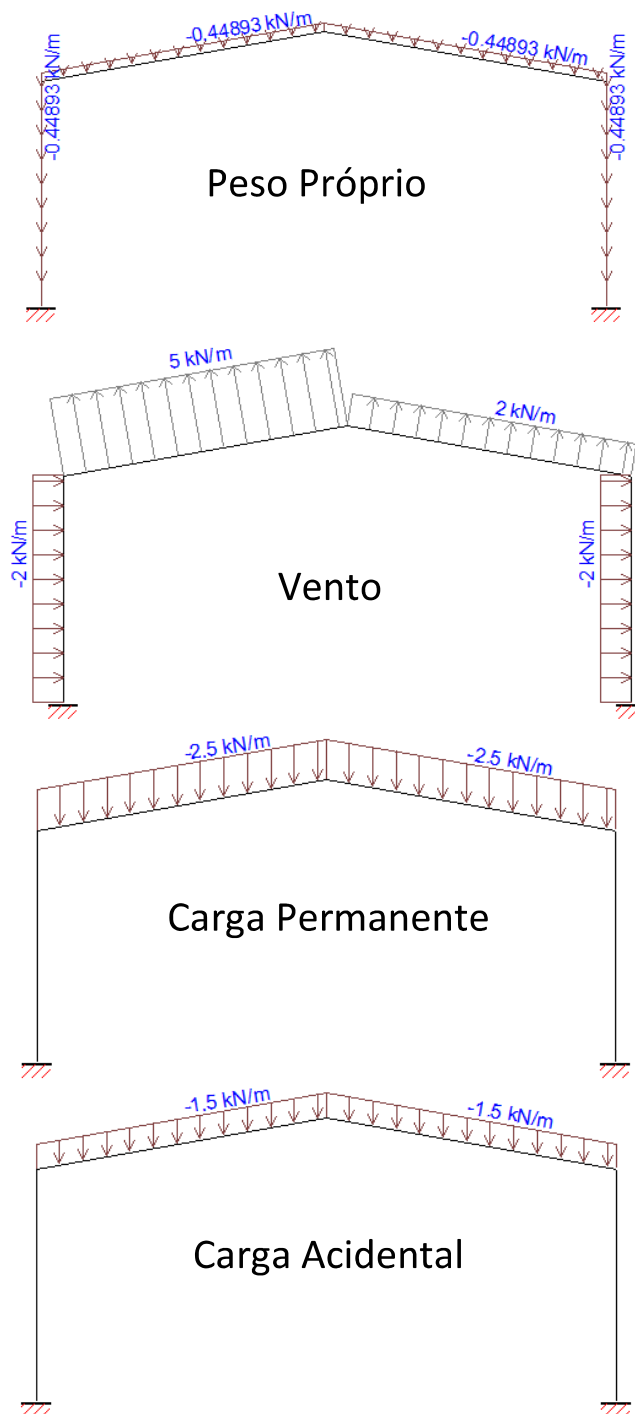


Figura 71: Combinações de ações

Combinções

Lista de Combinações		Casos de Carregamento	Fatores
1	ELU1	1 Peso Próprio	1.25
2	ELU2	2 Vento	0.00
3		3 Permanente	1.35
4		4 Acidental	1.50
5		5	1.50
6		6	0.00
7		7	0.00
8		8	0.00
9		9	0.00
10		10	0.00

Confirmar

Combinções

Lista de Combinações		Casos de Carregamento	Fatores
1	ELU1	1 Peso Próprio	1.00
2	ELU2	2 Vento	1.40
3		3 Permanente	0.00
4		4 Acidental	0.00
5		5	0.00
6		6	0.00
7		7	0.00
8		8	0.00
9		9	0.00
10		10	0.00

Confirmar

Figura 72: Pórtico com vigas de alma cheia modelado no software STRAP

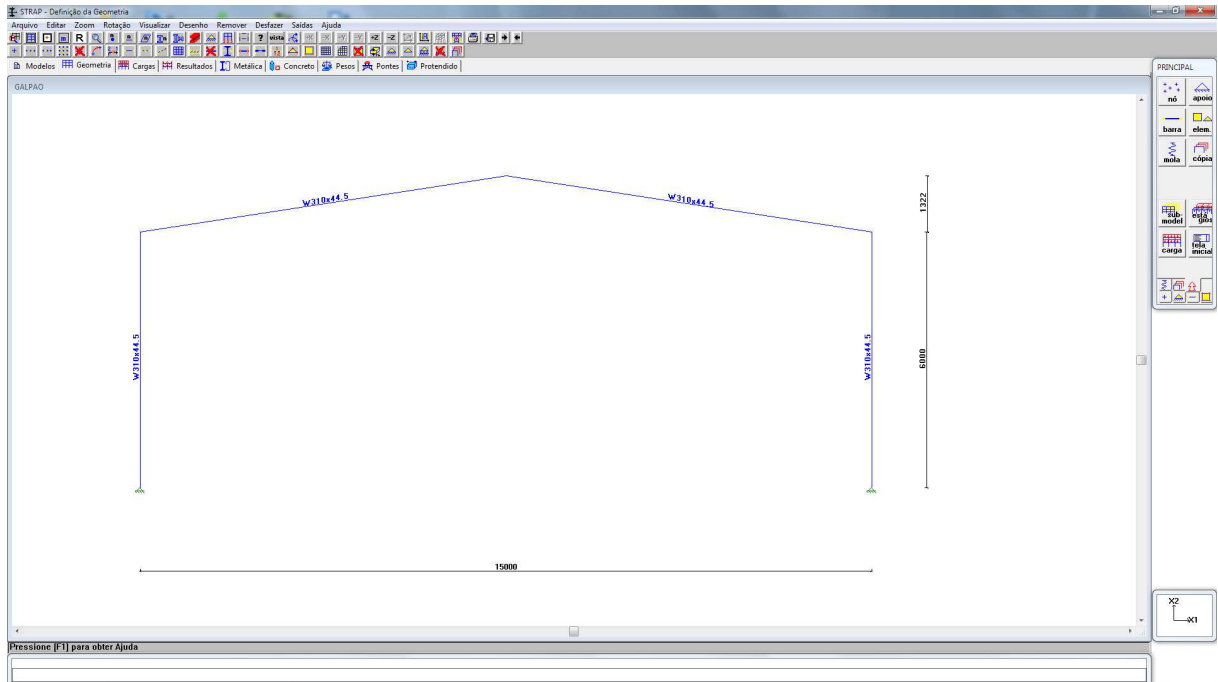




Figura 73: Comparação dos diagramas de momentos fletores ELU 1

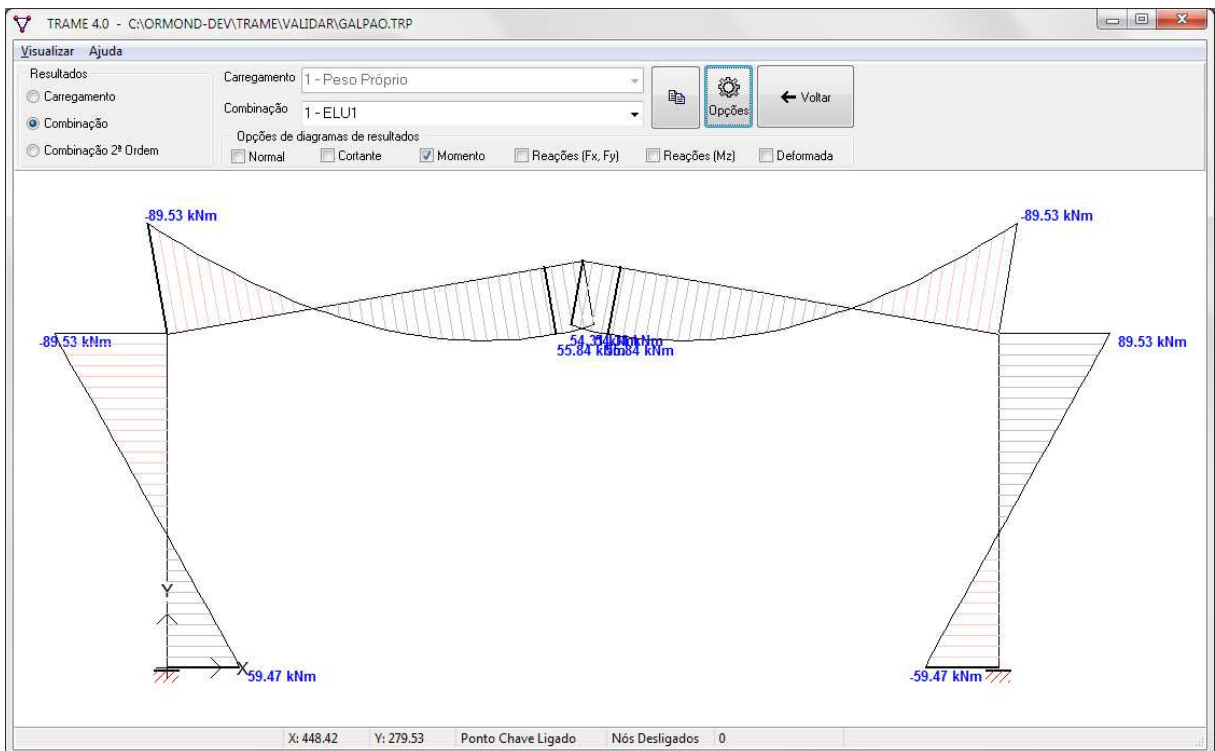
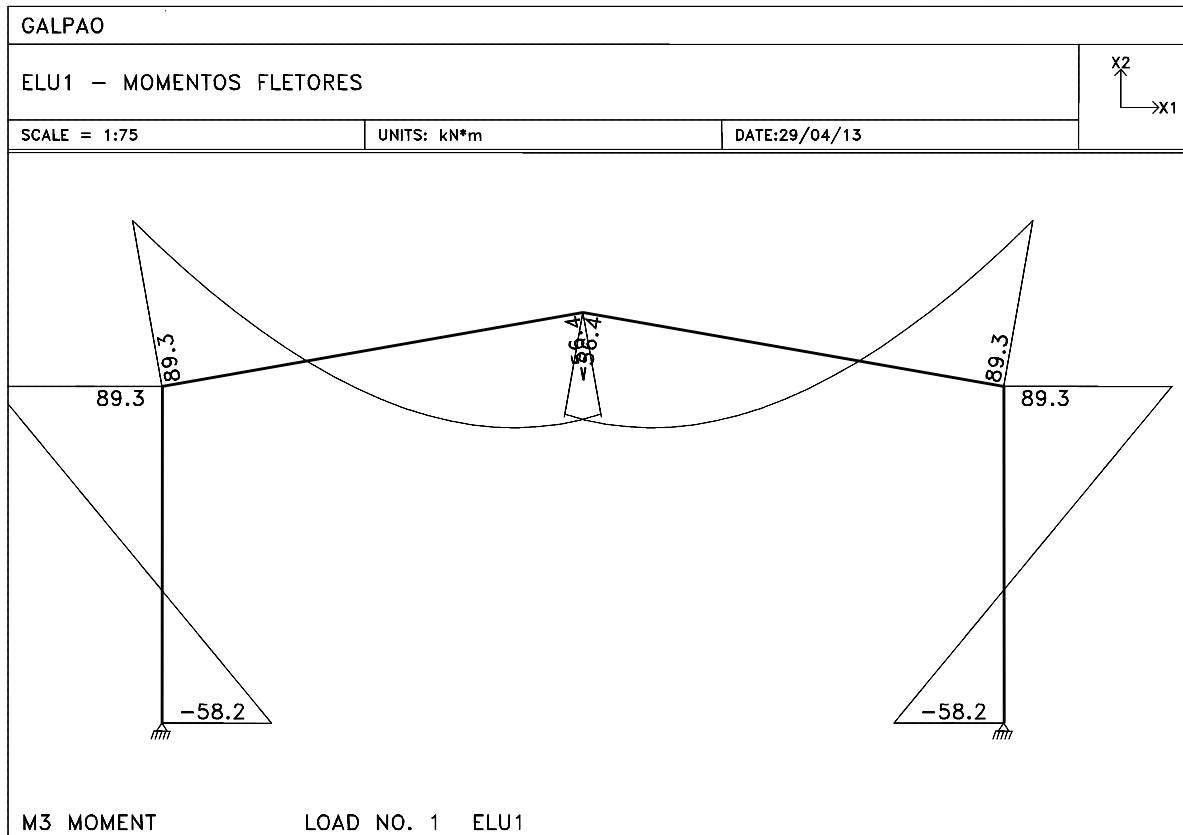
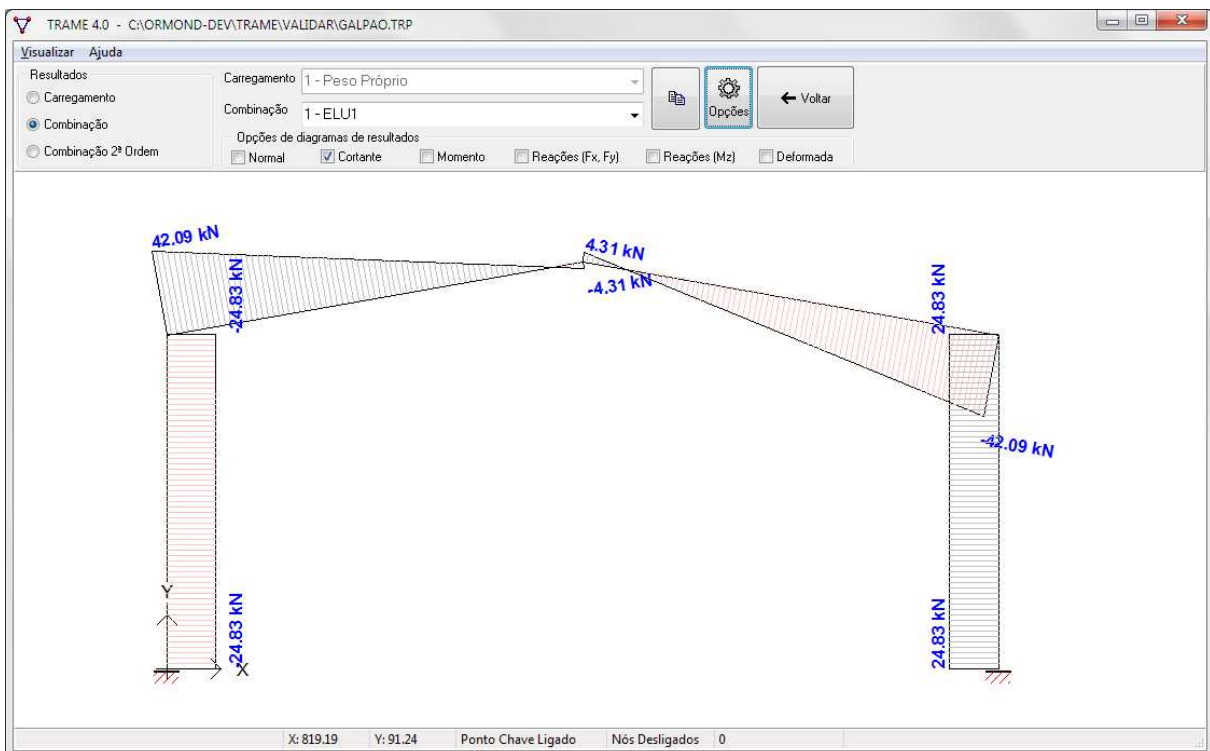
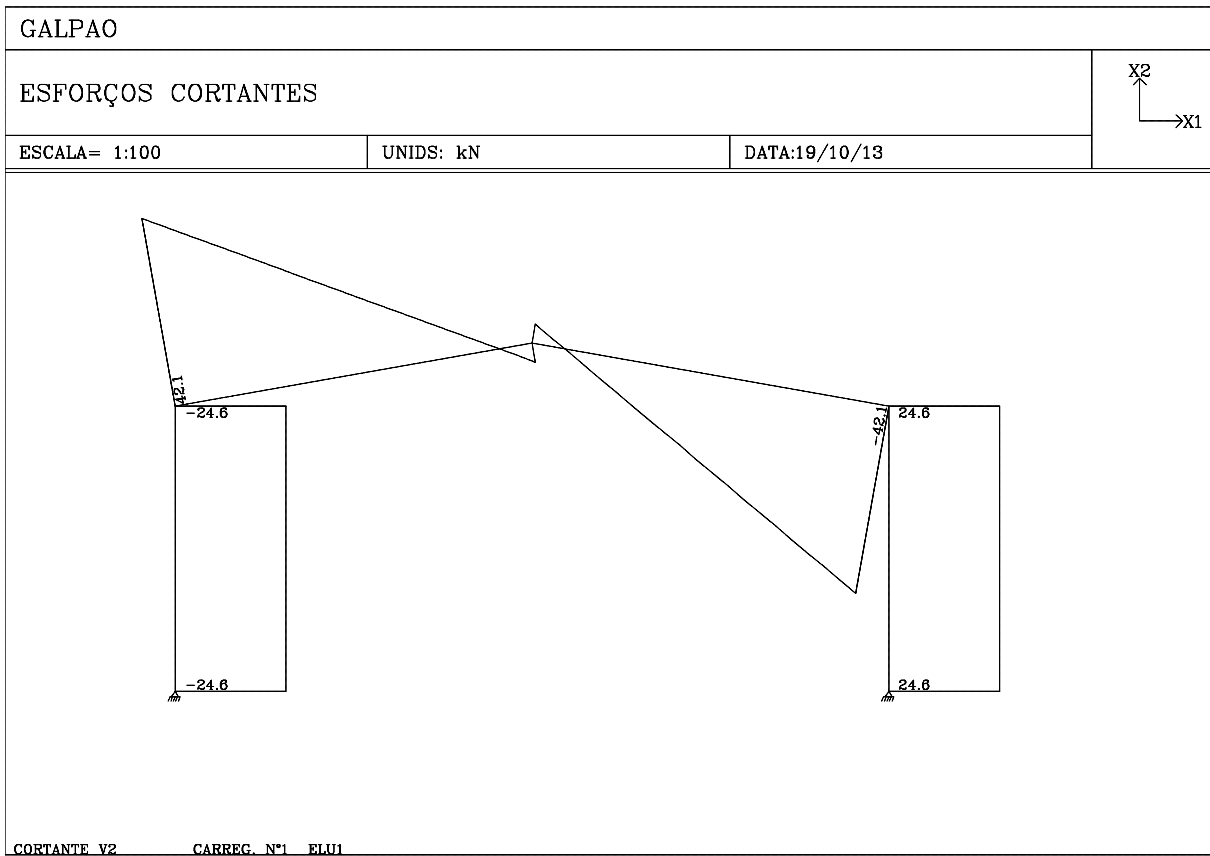
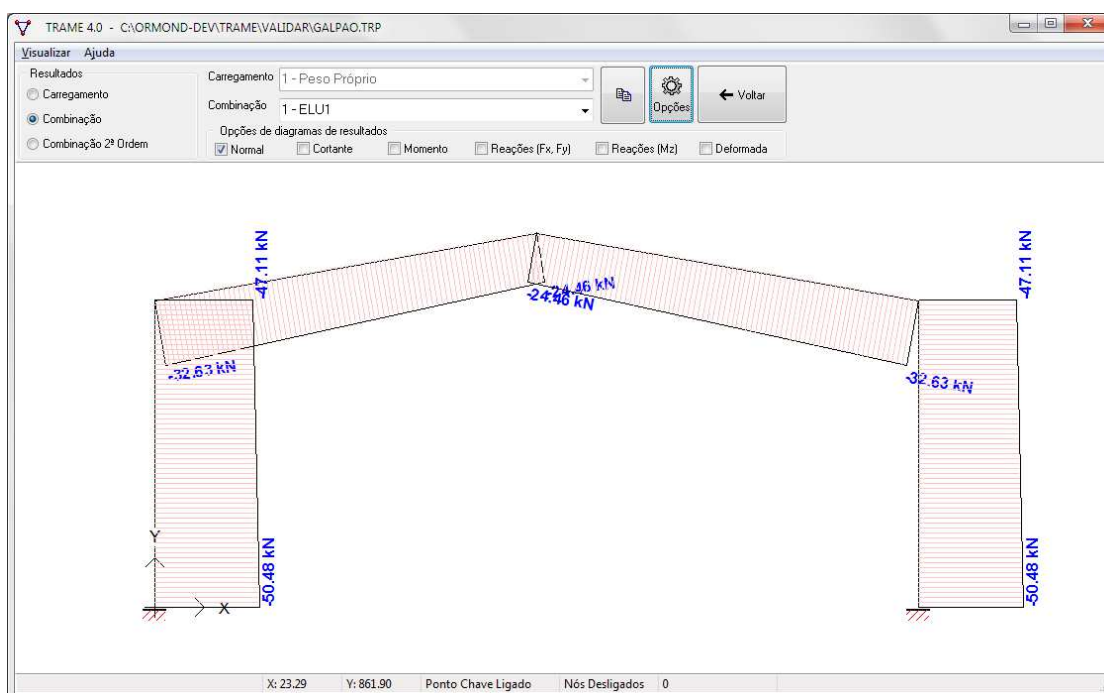
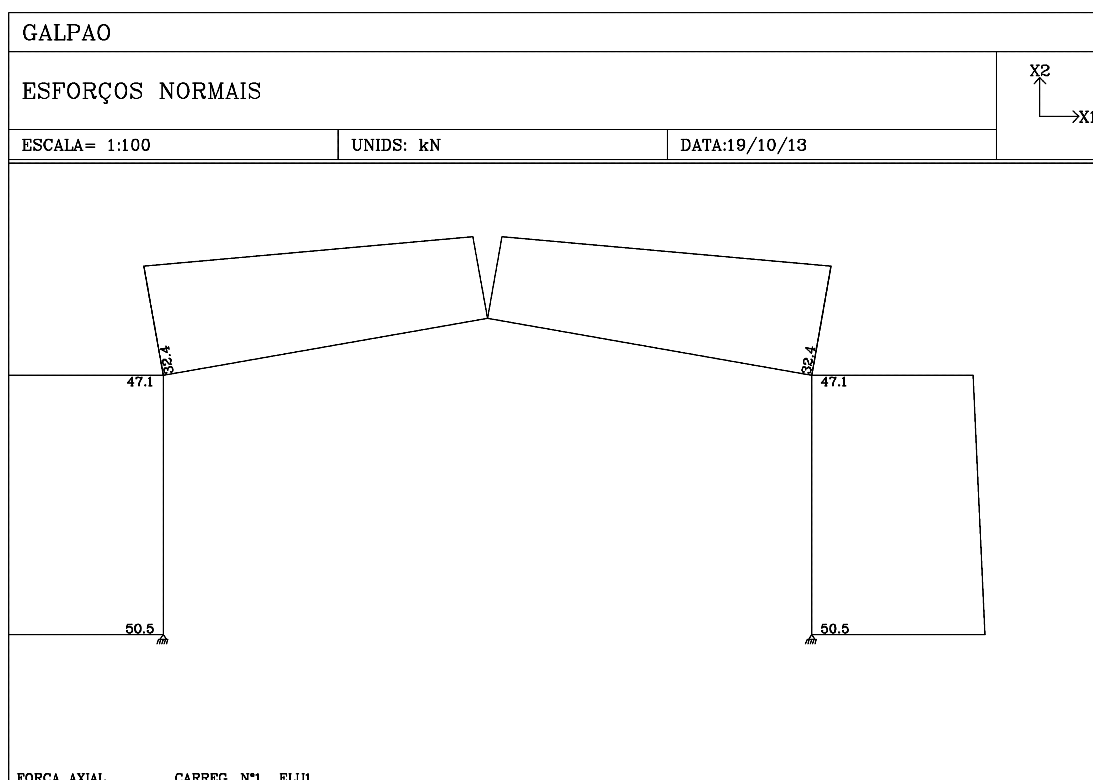


Figura 74: Comparação dos esforços cortantes ELU 1



**Figura 75: Comparação dos esforços normais ELU 1**



É válido ressaltar, que no STRAP, os esforços normais de compressão são representados com valor positivo, diferentemente do TRAME 4.0, que os representa com valores negativos.

Figura 76: Comparação dos esforços cortantes ELU 2

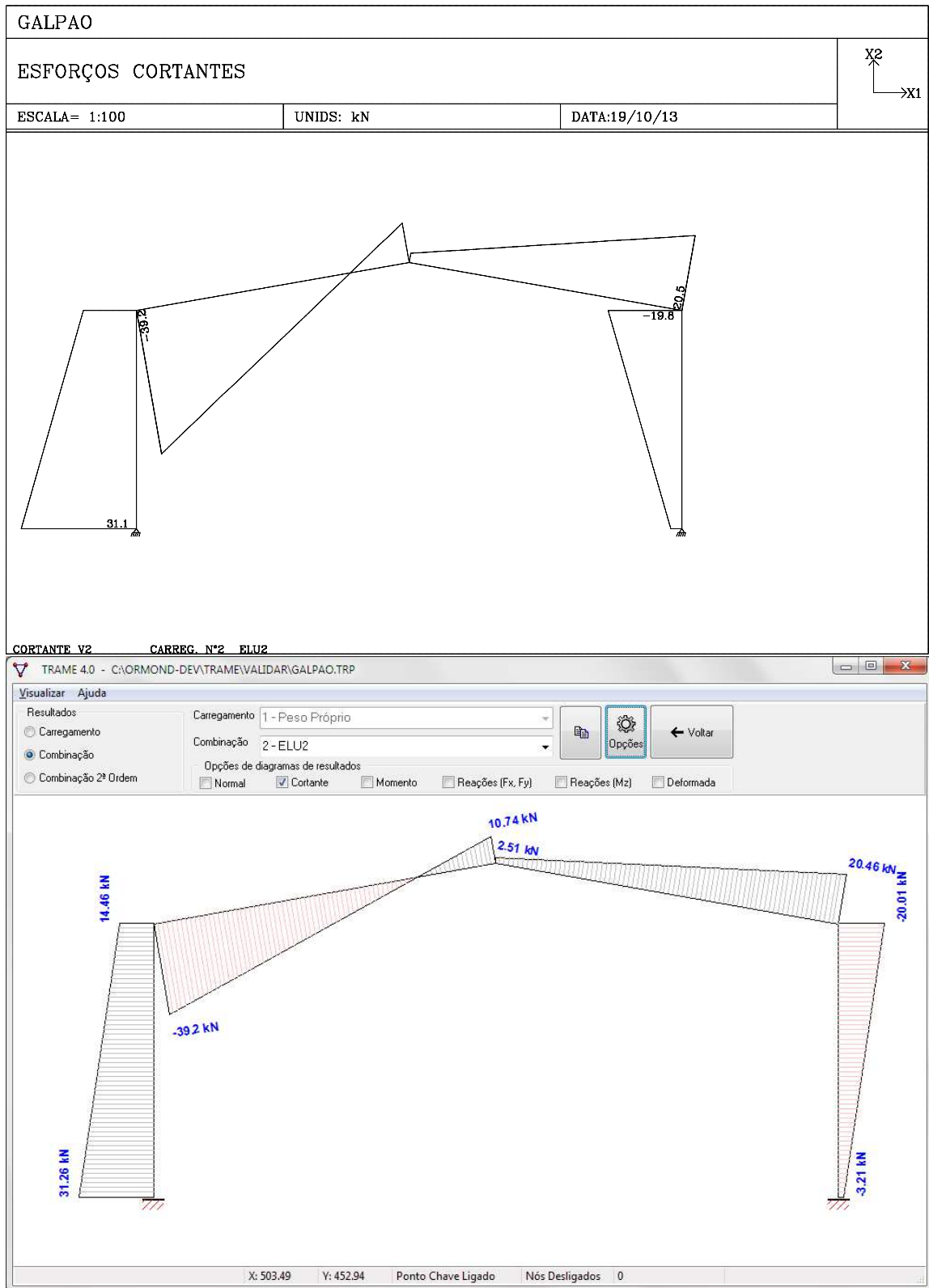
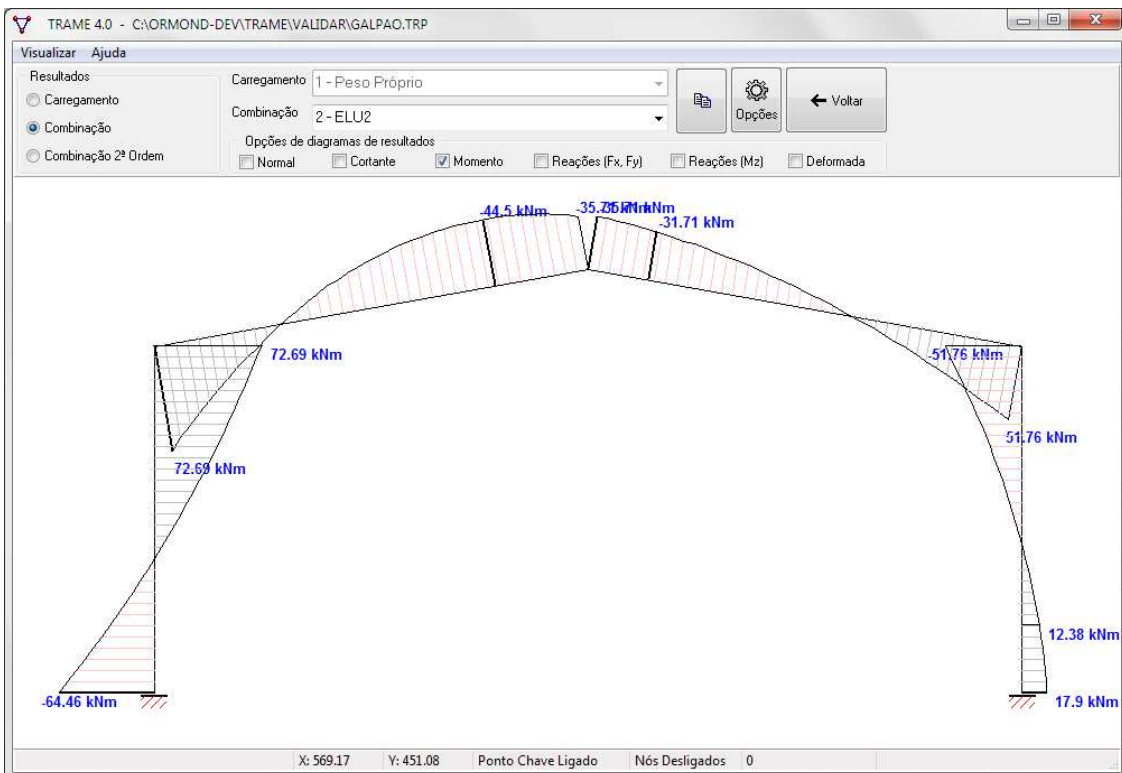
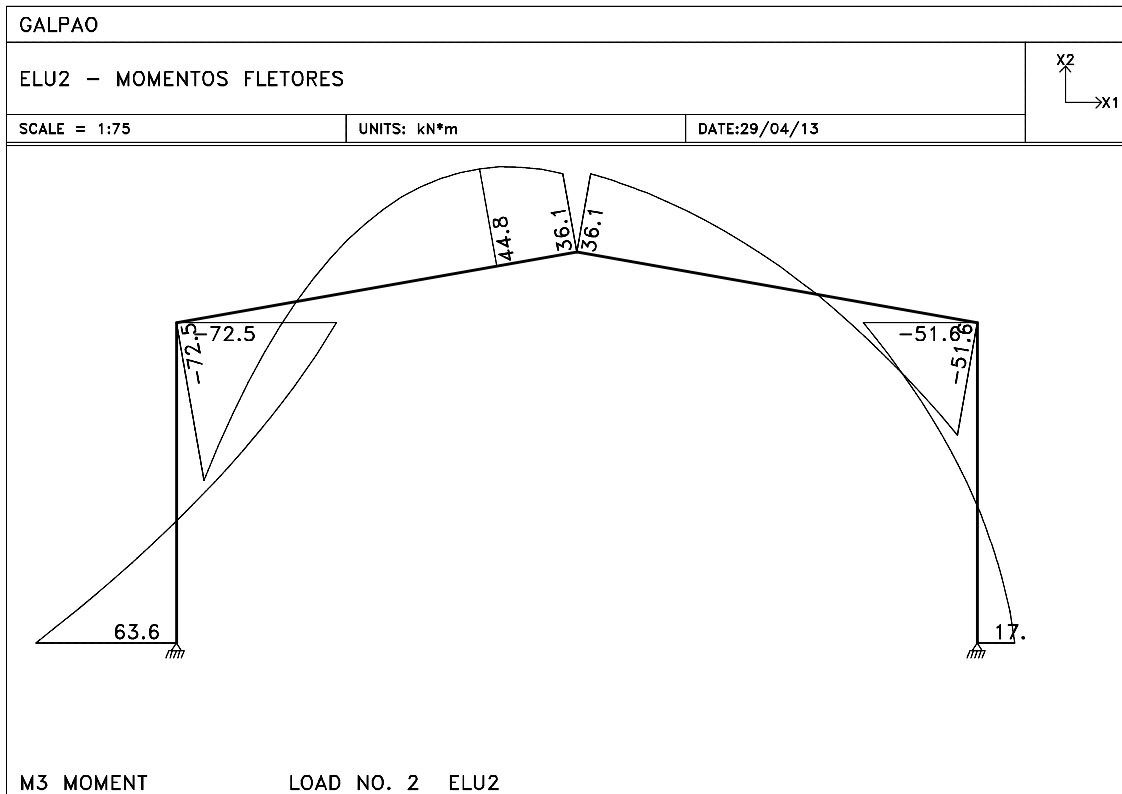
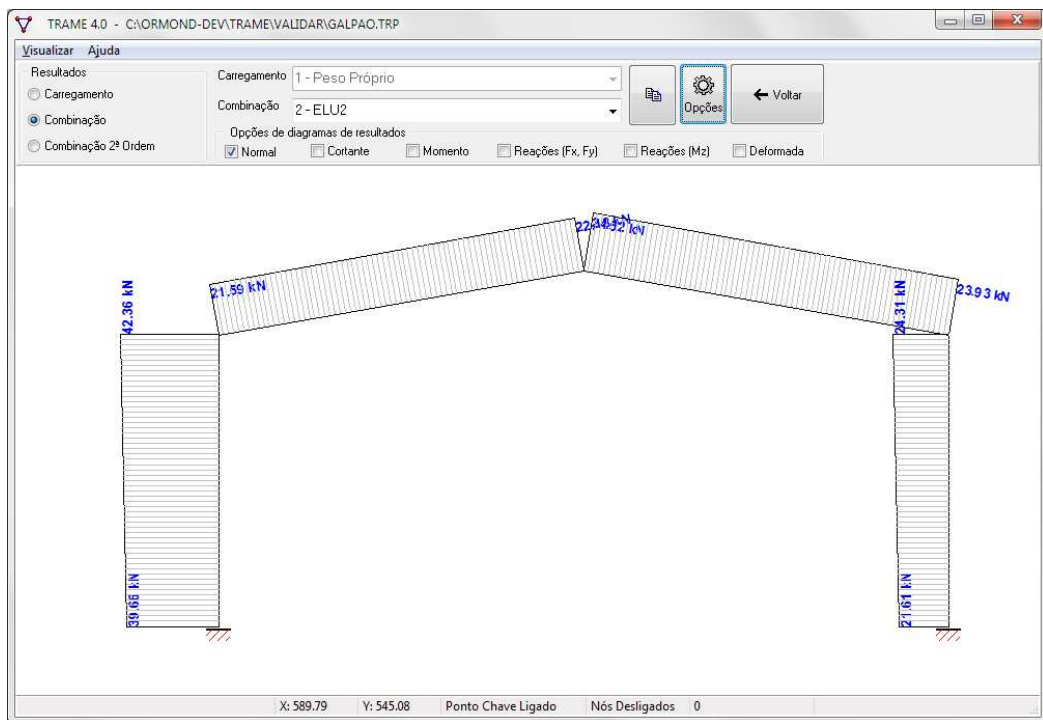
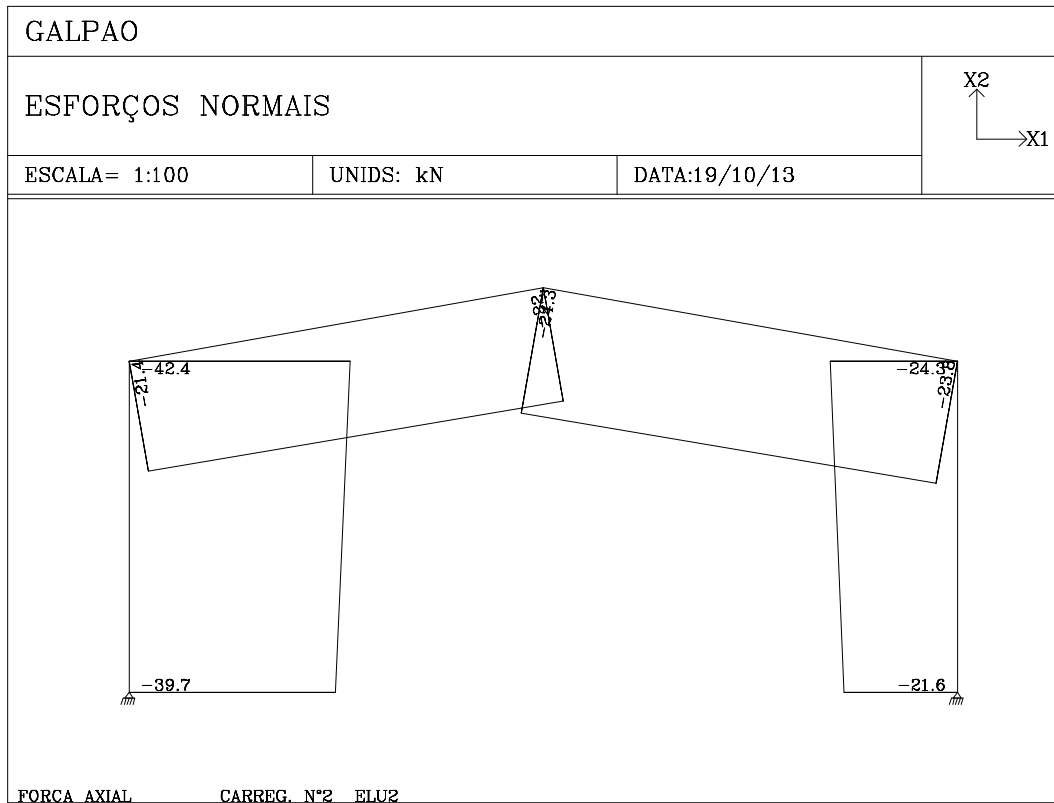


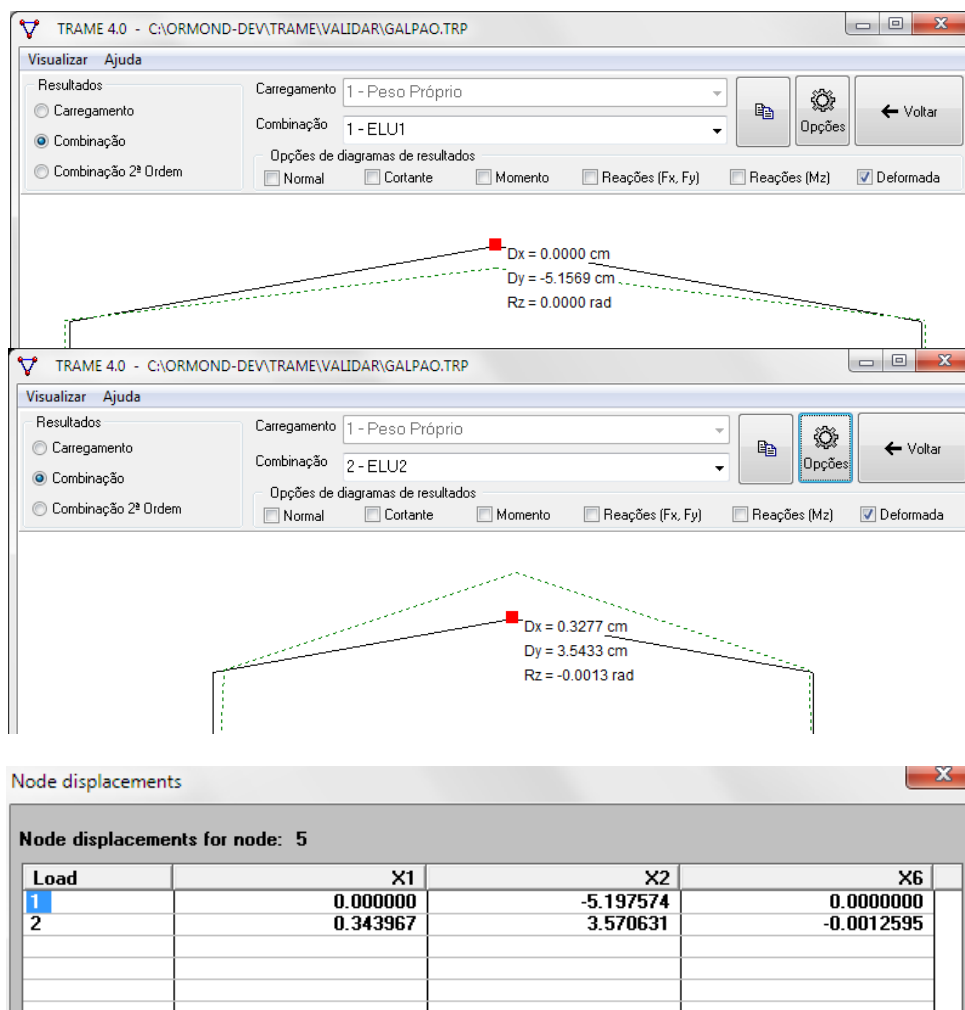
Figura 77: Comparação dos momentos fletores ELU 2



**Figura 78: Comparação dos esforços normais ELU 2**



**Figura 79: Comparação dos deslocamentos do nó central**



Apenas para comparação do valor numérico do deslocamento e validação do programa, utilizou-se os resultados das combinações de estados-limites últimos (ELU), utilizadas na obtenção dos esforços. Numa situação real de projeto, estes mesmos deslocamentos devem ser avaliados com base nas combinações de estados-limites de serviço (ELS).

**Tabela 17: Resultados de deslocamento do nó central do pórtico do galpão**

Programa	ELU 1			ELU 2		
	Dx (cm)	Dy (cm)	Rz (rad)	Dx (cm)	Dy (cm)	Rz (rad)
TRAME 4.0	0	-5,1569	0	0,3277	3,54	-0,0013
STRAP	0	-5,1975	0	0,3439	3,57	-0,00126

## 7.5 RESULTADOS DAS ESTRATÉGIAS DE DIVULGAÇÃO

Como estratégia de divulgação, foi criada uma página na internet, um Blog<sup>23</sup>, onde as atividades de desenvolvimento, tutoriais e vídeos são publicados. Desde sua criação, no dia 10 de agosto de 2012, a página conta com aproximadamente 5000 visualizações, 15 usuários cadastrados para receber as postagens por e-mail, e já atingiu picos de aproximadamente 500 visitas em um único dia. Obviamente que são números pequenos, porém a página é relativamente nova e são poucos os vídeos publicados. Apesar do pouco tempo de exposição, pode-se notar que os tutoriais em vídeo é o recurso que melhor aproxima as pessoas, estimulando-as a conhecer e experimentar o programa.

As publicações que descreviam e disponibilizavam novos recursos, foram as mais visitadas, o que denota a importância do desenvolvimento continuado. Postagens com exemplos de análise também atraem de forma significativa o interesse por parte de alunos e profissionais da área. O Blog também está associado a um canal de vídeos e a um banco de arquivos virtuais onde são disponibilizadas as atualizações do programa (incluindo código fonte, documentações, etc.). Este conjunto de ferramentas, disponibilizadas gratuitamente na Internet, tornam a divulgação uma atividade simples e dinâmica.

Figura 80: Blog do programa TRAME 4.0



<sup>23</sup> <http://trame4.blogspot.com.br/>



## 8. CONSIDERAÇÕES FINAIS

Neste trabalho foi desenvolvido um software educacional livre com recursos gráficos e interativos para o ensino da análise e dimensionamento de pórticos planos em estruturas metálicas.

Foi possível identificar aspectos relevantes que caracterizam um software como objeto educacional e as dificuldades em manter um desenvolvimento continuado. A integração de disciplinas em uma só proposta de software, é uma ferramenta educacional extremamente relevante e dificilmente encontrada nas aplicações disponibilizadas gratuitamente na internet.

Foram selecionados recursos iniciais de processamento para serem posteriormente melhorados, ampliados e adaptados para outras modalidades de projeto em trabalhos futuros.

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 ( $\gamma_z$ ).

O método de carga de gravidade interativa foi proposto, apresentando bons resultados para consideração simplificada dos efeitos globais de segunda ordem, P- $\Delta$ .

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.

Os principais diferenciais do programa TRAME 4.0 em relação as demais soluções educacionais pesquisadas, baseiam-se na implementação os 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;
- o gerenciamento de grupos de barras e comandos de seleção, à 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;
- o cálculo automático do peso próprio da estrutura com base no gerenciador de perfis e no gerenciador de materiais;
- a possibilidade de expansão dos seus recursos por meio de um código computacional livre e de fácil assimilação.

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. A linguagem de programação adotada, o Object-Pascal, permite a futura tradução do programa para diferentes sistemas operacionais (como o Linux e o OSX), possui vasta documentação e exemplos disponíveis gratuitamente na Internet e, principalmente, é de fácil aprendizado.

Espera-se, por meio das estratégias de documentação, distribuição e manutenção, que este projeto possa atrair colaboradores, principalmente do meio acadêmico, que desenvolvam a partir das ideias e ferramentas aqui lançadas, soluções ainda não imaginadas.

Em se tratando de software, o desenvolvimento é um processo sem fim, pois sempre poderão ser implementados novos recursos, correção de falhas, mudanças na interface gráfica, recursos de troca de informações com outros programas, etc. Mas dentro de um enfoque educacional, podemos sugerir alguns temas para futuras pesquisas futuras, as quais destacamos:

- inclusão de rotinas de dimensionamento de perfis metálicos e mistos;
- recursos para geração modelos parametrizados de pórtico, treliças e vigas, incluindo carregamentos de vento e combinações de carregamento pré-definidas;
- implementação de novos métodos de análise de não-linearidade geométrica (global e local);
- implementação de rotinas de métodos diretos para solução do sistema de equações do método dos deslocamentos;
- introdução de recursos de análise que englobem deslocamentos prescritos, apoios elásticos, apoios inclinados, carregamentos decorrentes de variação de temperatura, cargas móveis, ligações semirrígidas, etc.;

- criação de tutoriais em vídeo e documentação do código-fonte que permitam a assimilação dos conteúdos do programa para usuários e programadores;
- desenvolvimento de rotinas de dimensionamento otimizado de perfis e geração de desenhos para projeto em padrão DXF a partir do unifilar da estrutura;
- inclusão de diferentes disciplinas de projeto, como concreto e madeira;
- adequação do programa para diferentes sistemas operacionais.

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.

## 9. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ACADFRAME.< <http://www.set.eesc.usp.br/acadframe/>> , acesso em 30 de julho de 2011.

AMERICAN INSTITUTE OF STEEL CONSTRUCTIONS. **AISC-LRFD:** Specification for structural steel buildings. Chicago, 2005.

ANTUNES, Helena M. C. Carmo. **Instabilidade Elástica de Estruturas Lineares Planas Usuais**. Dissertação. Escola de Engenharia de São Carlos da Universidade de São Paulo. São Carlos, 1972.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR 14762/2001: Dimensionamento de Estruturas de Aço constituídas por perfis formados a frio- Procedimento. Rio de Janeiro, 2001. 53p.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 6118:** Projeto de estruturas de concreto: procedimentos. Rio de Janeiro, 2007.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR 6355/2003: **Perfis Estruturais de Aço Formados a Frio - Padronização**. Rio de Janeiro, 2003. 37p.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR 7190/97: **Projeto de Estruturas de Madeira**. Rio de Janeiro, 1997. 107p.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR 8800/2008: **Projeto de Estrutura de Aço e de Estrutura Mista de Aço e Concreto de Edifícios**. Rio de Janeiro, 2008. 237p.

AUTOMETAL. <<http://www.fec.unicamp.br/~autmetal/>>, acesso em 30 de julho de 2011.

AZEVEDO, Álvaro F. M. **A Utilização de Software Comercial no Ensino Universitário**. Artigo. VI Congresso Nacional de Mecânica Aplicada e Computacional. Universidade de Aveiro, 2000.

Borland Software Corporation. <<http://www.borland.com>>, 2006.

CALLEJAS, Ivan Julio Apolonio. **Análise e Dimensionamento de Estruturas Metálicas Planas Considerando a Não Linearidade Geométrica e Física**. Dissertação. Universidade Estadual de Campinas. Campinas, 1998.

CHAMBERLAIN PRAIVA, Zacarias Martin e KRIPKA, Moacir. **Proposta Metodológica para Uso e Desenvolvimento de Ferramentas Computacionais no Ensino de Estruturas**. Artigo. <<http://www.ertools.upf.br>>, acesso em 30 de julho de 2011.

CHAMBERLAIN PRAIVA, Zacarias Martin e PASQUETTI, Eduardo. **VisualBarras: Um programa para o ensino de análise matricial de estruturas**. Revista do CRICTE, CD-ROM, Rio Grande – RS, 2000.

CHAMBERLAIN PRAIVA, Zacarias Martin, GHELEN, Juliano, CORONETTI, Leandro, A. de MOURA, Marlon. **Análise numérico e experimental de um modelo de treliça mista aço-madeira**. VIII Encontro Brasileiro em madeiras e Estruturas de Madeira. Faculdade de Engenharia e Arquitetura, Universidade de Passo Fundo, Uberlândia/MG. 2002.

CHAMBERLAIN PRAIVA, Zacarias Martin; STUMPF, Dumoncel Duarte. **Avaliação dos Métodos de Análise de Segunda Ordem para Edifícios Industriais em Estruturas de Aço**. Artigo. Universidade de Passo Fundo. Rio Grande – RS, 2008.

CUNHA, M. Cristina C. **Métodos numéricos**. 2.ed. Campinas, SP : Editora da Unicamp, 2000.

FALCÃO, Joaquim; FERRAZ JUNIOR, Tercio Sampaio; LEMOS, Ronaldo; SOUSA, Carlo Affonso Pereira; SENNA Eduardo. **Estudo Sobre Software Livre**. Escola de Direito da Fundação Getúlio Vargas. Rio de Janeiro, 2005.

FONSECA, Flavio Torres da ; PITANGUEIRA, Roque Luiz da Silva . **Um Programa Gráfico Interativo para Modelos Estruturais de Barras**. Artigo. Iberian Latin American Congress on Computational Methods in Engineering, 2004, Recife. XXV CILAMCE. Recife: Universidade Federal de Pernambuco, 2004. v. CD-ROM. p. 1-15.

GALAMBOS, T. V. **Guide to Stability Design Criteria for Metal Structures**. 5th Edition.

New York: John Willey & Sons, 1998.

GAMA, Carmem Lúcia Graboski da; SCHEER, Sérgio; SANTOS, Marcelo Corrêa. **Desenvolvimento de Objetos Educacionais Para Ensino e Aprendizagem em Engenharia**. Artigo. Revista de Ensino de Engenharia, v. 27, n. 1, p. 17-23, 2008.

KAEFER, Luis Fernando. **Desenvolvimento de uma ferramenta gráfica para a análise de pórticos de concreto armado**. Dissertação. Escola Politécnica da Universidade de São Paulo. São Paulo, 2000.

LA ROVERE, Henriette Lebre e SCHNEIDER, Alizeu Francisco. **ANEST- Programa Educacional para Análise de Estruturas Reticuladas**. Artigo. XIV Simpósio Brasileiro de Informática na Educação - NCE - IM/UFRJ. Rio de Janeiro, 2003.

LOPES, Arlindo Pires; SANTOS Glaucy de Oliveira; SOUZA, André Luiz A. C. **Estudo Sobre Diferentes Métodos de Análise P-Delta**. Revista. Teoria e Prática na Engenharia Civil, n.7, p.9-19, Setembro, 2005.

MACGUIRE, Willian; GALLAGHER, Richard H.; ZIEMIAN, Ronald D. **Matrix Structural Analysis**. 2nd ed., New York: Jonh Wiley & Sons, 2000. 460p.

MARTHA, Luiz Fernando. **Análise de Estruturas: conceitos e métodos Básicos**. Rio de Janeiro: Elsevier Editora Ltda., 2010. 524p.

MOREIRA, Domicio Falcão. **Análise Matricial de Estruturas**. Rio de Janeiro: Livros Técnicos e Científicos Editora S.A., 1977. 404p.

NETO, José Almeida Freitas e VIEIRA, Inaldo Ayres Vieira. **Análise Matricial de Estruturas**. Volume I. Curitiba, PR: Editora UFPR, 1972.

NETO, José Almeida Freitas e VIEIRA, Inaldo Ayres Vieira. **Análise Matricial de Estruturas**. Volume II. Curitiba, PR: Editora UFPR, 1973.

ORMOND, Paulo Cavalcante. **TRAME 3.0 – Análise de treliças planas**. <<http://www.ormond.com.br>>, Acesso em 12/04/2011.

PEREIRA, Margot F. **Análise dos Efeitos de Segunda Ordem em Pórticos Planos de Aço**. Artigo. Congresso de Iniciação Científica, 17. São Carlos – SP, 2009.

PINSARENKO, G.S.; Yákovlev, A.P.; Matvéev, V.V. **Manual de Resistencia de Materiales**. Moscou: Mir, 1979.

SILVA, Renata Gomes Lanna da. **Avaliação dos Efeitos de 2ª Ordem em Edifícios de Aço Utilizando Métodos Aproximados e Análise Rigorosa**. Dissertação. Universidade Federal de Minas Gerais. Belo Horizonte, 2004.

SORIANO, Humberto Lima. **Análise de estruturas – Formulação matricial e implementação computacional**. Rio de Janeiro : Editora Ciência Moderna Ltda., 2005.

SÜSSEKIND, José Carlos. **Curso de Análise Estrutural**. Volume 1. Porto Alegre, RS: Editora Globo; São Paulo,SP: Ed. Da Universidade de São Paulo, 1975. 328p.

VERÍSSIMO, Gustavo de Souza; PAES, José Luiz Rangel. **Software e Ensino de Estruturas Metálicas: Um problema ou uma Realidade**. Artigo. III Seminário Internacional: O Uso de Estruturas Metálicas na Construção Civil. Belo Horizonte - MG, 2000.

VIEIRA, F. M. S. **Avaliação de Software Educativo: Reflexões para uma Análise Criteriosa**. Artigo. < <http://edutec.net/Textos/Alia/MISC/edmagali2.htm> >, acesso em 26 de março de 2011.

YOUNG, Warren Clarence. **Roark's Formulas for Stress and Strain**. 6<sup>th</sup> ed. Singapore: MacGraw-Hill Book Company, 1989.

Universidade Federal de Viçosa. <<http://www.ufv.br/dec/EngCivil/Softs/>>, Acesso em 24/05/2011.



# 10. ANEXO

Em anexo estão gravados, numa mídia digital (CDR), os arquivos e programas educacionais utilizados neste trabalho. A nome das pastas e conteúdos são descritos a seguir.

[ **CÓDIGO-FONTE** ] - Pasta com o código fonte do programa TRAME 4.0.

[ **IMAGENS** ] - Pasta com as imagens utilizadas na interface do programa.

[ **EXECUTAVEL** ] - Pasta com os arquivos de exemplo e de validação modelados no TRAME 4.0, incluindo o executável do programa em sua última revisão.

[ **FTOOL** ] - Programa Ftool e arquivo da viga-vagão.

[ **MASTAN2** ] - Arquivo de instalação do MASTAN2 e o arquivo do pórtico de 2 pavimentos.

[ **ACADFRAME** ] - Programa AcadFrame e o arquivo do pórtico de 2 pavimentos.

[ **VIDEOS-TRAME** ] - Vídeos de utilização do programa feitos pelo autor e por usuários.