

Engenharia de Construção Civil e Urbana

Franciele Braga Machado Tullio
(Organizadora)



Engenharia de Construção Civil e Urbana

Franciele Braga Machado Tullio
(Organizadora)



Atena
Editora

Ano 2019

2019 by Atena Editora
Copyright © Atena Editora
Copyright do Texto © 2019 Os Autores
Copyright da Edição © 2019 Atena Editora
Editora Chefe: Profª Drª Antonella Carvalho de Oliveira
Diagramação: Lorena Prestes
Edição de Arte: Lorena Prestes
Revisão: Os Autores



Todo o conteúdo deste livro está licenciado sob uma Licença de Atribuição Creative Commons. Atribuição 4.0 Internacional (CC BY 4.0).

O conteúdo dos artigos e seus dados em sua forma, correção e confiabilidade são de responsabilidade exclusiva dos autores. Permitido o download da obra e o compartilhamento desde que sejam atribuídos créditos aos autores, mas sem a possibilidade de alterá-la de nenhuma forma ou utilizá-la para fins comerciais.

Conselho Editorial

Ciências Humanas e Sociais Aplicadas

Profª Drª Adriana Demite Stephani – Universidade Federal do Tocantins
Prof. Dr. Álvaro Augusto de Borba Barreto – Universidade Federal de Pelotas
Prof. Dr. Alexandre Jose Schumacher – Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia de Mato Grosso
Prof. Dr. Antonio Carlos Frasson – Universidade Tecnológica Federal do Paraná
Prof. Dr. Antonio Gasparetto Júnior – Instituto Federal do Sudeste de Minas Gerais
Prof. Dr. Antonio Isidro-Filho – Universidade de Brasília
Prof. Dr. Constantino Ribeiro de Oliveira Junior – Universidade Estadual de Ponta Grossa
Profª Drª Cristina Gaio – Universidade de Lisboa
Prof. Dr. Deyvison de Lima Oliveira – Universidade Federal de Rondônia
Prof. Dr. Edvaldo Antunes de Faria – Universidade Estácio de Sá
Prof. Dr. Eloi Martins Senhora – Universidade Federal de Roraima
Prof. Dr. Fabiano Tadeu Grazioli – Universidade Regional Integrada do Alto Uruguai e das Missões
Prof. Dr. Gilmei Fleck – Universidade Estadual do Oeste do Paraná
Profª Drª Ivone Goulart Lopes – Istituto Internazionale delle Figlie di Maria Ausiliatrice
Prof. Dr. Julio Candido de Meirelles Junior – Universidade Federal Fluminense
Profª Drª Keyla Christina Almeida Portela – Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia de Mato Grosso
Profª Drª Lina Maria Gonçalves – Universidade Federal do Tocantins
Profª Drª Natiéli Piovesan – Instituto Federal do Rio Grande do Norte
Prof. Dr. Marcelo Pereira da Silva – Universidade Federal do Maranhão
Profª Drª Miranilde Oliveira Neves – Instituto de Educação, Ciência e Tecnologia do Pará
Profª Drª Paola Andressa Scortegagna – Universidade Estadual de Ponta Grossa
Profª Drª Rita de Cássia da Silva Oliveira – Universidade Estadual de Ponta Grossa
Profª Drª Sandra Regina Gardacho Pietrobom – Universidade Estadual do Centro-Oeste
Profª Drª Sheila Marta Carregosa Rocha – Universidade do Estado da Bahia
Prof. Dr. Rui Maia Diamantino – Universidade Salvador
Prof. Dr. Urandi João Rodrigues Junior – Universidade Federal do Oeste do Pará
Profª Drª Vanessa Bordin Viera – Universidade Federal de Campina Grande
Prof. Dr. Willian Douglas Guilherme – Universidade Federal do Tocantins

Ciências Agrárias e Multidisciplinar

Prof. Dr. Alexandre Igor Azevedo Pereira – Instituto Federal Goiano
Prof. Dr. Antonio Pasqualetto – Pontifícia Universidade Católica de Goiás
Profª Drª Daiane Garabeli Trojan – Universidade Norte do Paraná
Profª Drª Diocléa Almeida Seabra Silva – Universidade Federal Rural da Amazônia
Prof. Dr. Écio Souza Diniz – Universidade Federal de Viçosa
Prof. Dr. Fábio Steiner – Universidade Estadual de Mato Grosso do Sul
Profª Drª Girlene Santos de Souza – Universidade Federal do Recôncavo da Bahia
Prof. Dr. Jorge González Aguilera – Universidade Federal de Mato Grosso do Sul
Prof. Dr. Júlio César Ribeiro – Universidade Federal Rural do Rio de Janeiro
Profª Drª Raissa Rachel Salustriano da Silva Matos – Universidade Federal do Maranhão
Prof. Dr. Ronilson Freitas de Souza – Universidade do Estado do Pará
Prof. Dr. Valdemar Antonio Paffaro Junior – Universidade Federal de Alfenas

Ciências Biológicas e da Saúde

Prof. Dr. Benedito Rodrigues da Silva Neto – Universidade Federal de Goiás
Prof. Dr. Edson da Silva – Universidade Federal dos Vales do Jequitinhonha e Mucuri
Profª Drª Elane Schwinden Prudêncio – Universidade Federal de Santa Catarina
Prof. Dr. Gianfábio Pimentel Franco – Universidade Federal de Santa Maria
Prof. Dr. José Max Barbosa de Oliveira Junior – Universidade Federal do Oeste do Pará
Profª Drª Magnólia de Araújo Campos – Universidade Federal de Campina Grande
Profª Drª Natiéli Piovesan – Instituto Federal do Rio Grande do Norte
Profª Drª Vanessa Lima Gonçalves – Universidade Estadual de Ponta Grossa
Profª Drª Vanessa Bordin Viera – Universidade Federal de Campina Grande

Ciências Exatas e da Terra e Engenharias

Prof. Dr. Adélio Alcino Sampaio Castro Machado – Universidade do Porto
Prof. Dr. Alexandre Leite dos Santos Silva – Universidade Federal do Piauí
Profª Drª Carmen Lúcia Voigt – Universidade Norte do Paraná
Prof. Dr. Eloi Rufato Junior – Universidade Tecnológica Federal do Paraná
Prof. Dr. Fabrício Menezes Ramos – Instituto Federal do Pará
Prof. Dr. Juliano Carlo Rufino de Freitas – Universidade Federal de Campina Grande
Profª Drª Neiva Maria de Almeida – Universidade Federal da Paraíba
Profª Drª Natiéli Piovesan – Instituto Federal do Rio Grande do Norte
Prof. Dr. Takeshy Tachizawa – Faculdade de Campo Limpo Paulista

Dados Internacionais de Catalogação na Publicação (CIP) (eDOC BRASIL, Belo Horizonte/MG)	
E57	Engenharia de construção civil e urbana [recurso eletrônico] / Organizadora Franciele Braga Machado Tullio. – Ponta Grossa, PR: Atena Editora, 2019. Formato: PDF Requisitos de sistema: Adobe Acrobat Reader. Modo de acesso: World Wide Web. Inclui bibliografia ISBN 978-85-7247-852-6 DOI 10.22533/at.ed.526191912 1. Construção civil – Brasil. 2. Engenharia civil. I. Tullio, Franciele Braga Machado. CDD 624
Elaborado por Maurício Amormino Júnior – CRB6/2422	

Atena Editora
Ponta Grossa – Paraná - Brasil
www.atenaeditora.com.br
contato@atenaeditora.com.br

APRESENTAÇÃO

A obra “Engenharia de Construção Civil e Urbana” contempla dezoito capítulos com abordagens sobre as mais recentes pesquisas relacionadas a construção civil e modificação do ambiente urbano. A utilização de novas tecnologias, desenvolvimento de novos materiais promovem um avanço na construção civil, permitindo a execução de novas construções, promovendo a reutilização de diversos materiais que antes eram descartados. O uso de ferramentas computacionais permite um maior controle e gerenciamento de obras, proporcionando uma melhor compatibilização de projetos, e evitando diversos problemas na sua execução. Existem aplicativos que permitem realizar o dimensionamento de diversos elementos, contribuindo para a agilidade na execução de projetos. O estudo sobre o comportamento de materiais utilizados na construção civil permite o desenvolvimento de novas soluções, bem como o aprimoramento de sistemas construtivos existentes, proporcionando maior qualidade, eficiência e segurança às obras. A utilização de resíduos de construção e desenvolvimento de materiais, têm sido amplamente utilizados e além de gerar novas soluções, resulta em benefícios ao meio ambiente. Da mesma forma, o uso da eficiência energética também tem sido utilizado em busca de soluções sustentáveis. Ante ao exposto, esperamos que esta obra proporcione ao leitor uma leitura agradável e traga conhecimento técnico, contribuindo para uma reflexão sobre os impactos que as pesquisas geram na engenharia de construção civil e urbana, e que seu uso possa trazer benefícios a sociedade.

Franciele Braga Machado Tullio

SUMÁRIO

CAPÍTULO 1	1
DESENVOLVIMENTO DE UM ALGORITMO EM LINGUAGEM PYTHON PARA ANÁLISE DE ESTRUTURAS UTILIZANDO O MÉTODO DOS DESLOCAMENTOS	
Amanda Isabela de Campos	
DOI 10.22533/at.ed.5261919121	
CAPÍTULO 2	16
IMPLANTAÇÃO DO BIM EM UMA EMPRESA DE PEQUENO PORTE – ESTUDO DE CASO EM UMA EMPRESA JÚNIOR	
Rafael Braida Ribeiro	
Maurício Leonardo Aguilar. Molina	
DOI 10.22533/at.ed.5261919122	
CAPÍTULO 3	28
VARIAÇÃO DE CALOR EM UMA PLACA: ANÁLISE EXPERIMENTAL E SIMULAÇÕES COMPUTACIONAIS	
Fábio Gaspar Santos Júnior	
Ana Carolina Carius	
Mariana Anastácia de Oliveira	
DOI 10.22533/at.ed.5261919123	
CAPÍTULO 4	40
UTILIZAÇÃO DA METODOLOGIA BIM PARA ELABORAÇÃO E EXECUÇÃO DE PROJETOS NA CIDADE DE ALFENAS-MG	
Leonardo Avelar Pereira	
Laísa Cristina Carvalho	
Iago Bernardes dos Santos	
DOI 10.22533/at.ed.5261919124	
CAPÍTULO 5	56
APLICATIVOS DE SMARTPHONE COMO FERRAMENTA PARA O GERENCIAMENTO DE OBRAS	
Francisco Diego Bezerra Soares	
Guilherme Álvaro Rodrigues Maia Esmeraldo	
DOI 10.22533/at.ed.5261919125	
CAPÍTULO 6	69
A ABORDAGEM <i>DESIGN THINKING</i> NO CURSO DE ENGENHARIA: UMA EXPERIÊNCIA NO DESAFIO DE CRIAR E INOVAR NA COMPLEXIDADE DO ENSINO E APRENDIZAGEM DA DISCIPLINA DE CÁLCULO DIFERENCIAL E INTEGRAL	
Gilselene Garcia Guimarães	
DOI 10.22533/at.ed.5261919126	
CAPÍTULO 7	86
INFLUÊNCIA DA COLAGEM DE LAMINADOS DE POLÍMERO REFORÇADO COM FIBRA DE VIDRO (PRFV) NO REFORÇO DE LIGAÇÕES VIGA-PILAR DE ESTRUTURAS DE CONCRETO PRÉ-MOLDADO	
Juliana Penélope Caldeira Soares	
Nara Villanova Menon	
DOI 10.22533/at.ed.5261919127	

CAPÍTULO 8	101
MÓDULO DE ELASTICIDADE DO CONCRETO: UM ESTUDO SEMI PROBABILÍSTICO E SEUS DESDOBRAMENTOS	
Ana Carolina Carius	
Leonardo de Souza Corrêa	
Vinícius Costa Furtado da Rosa	
Alex Justen Teixeira	
DOI 10.22533/at.ed.5261919128	
CAPÍTULO 9	115
STUDY OF THE DURABILITY OF COMPOSITES OF EUCALYPTUS CELLULOSE FIBER STERIFIED FOR CEMENT MATRIX REINFORCEMENT	
Laís Fernanda dos Santos Marques	
Leila Aparecida de Castro Motta	
Rondinele Alberto dos Reis Ferreira	
DOI 10.22533/at.ed.5261919129	
CAPÍTULO 10	121
CONTROLE TECNOLÓGICO DA ARGAMASSA POR MEIO DE ENSAIOS DESTRUTIVOS E NÃO DESTRUTIVOS: UMA REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	
Amanda Regina de Souza Macedo	
David Edson Macedo Palhares	
Ariadne de Souza e Silva	
Rafael Alexandre Raimundo	
Cleber da Silva Lourenço	
Ruan da Silva Landolfo	
Uilame Umbelino Gomes	
DOI 10.22533/at.ed.52619191210	
CAPÍTULO 11	132
A IMPORTÂNCIA DO EMPREGO DE MATERIAIS RETARDANTES AO FOGO NAS GALERIAS COMERCIAIS DA CIDADE DE JUIZ DE FORA	
Jenifer Pungirum Quaglio	
Maria Teresa Barbosa	
Wendell Albuquerque	
DOI 10.22533/at.ed.52619191211	
CAPÍTULO 12	149
CONTRIBUIÇÕES PARA A UTILIZAÇÃO DE ENERGIA GEOTÉRMICA NO BRASIL	
Adriana Coelho Vieira	
Brunno Daibert Andrès	
Luis M. Ferreira Gomes	
Peter Kallberg	
DOI 10.22533/at.ed.52619191212	
CAPÍTULO 13	166
ANÁLISE DA RESISTÊNCIA DO CONCRETO SIMPLES COM ADIÇÃO DE CINZA DE CANA-DE-AÇÚCAR	
Ítalo Diego e silva morais	
Ariele Rebeca Martins ribeiro	
Francisco Willian Policarpo de Albuquerque	
Walber Alves Freitas	
Francisca Lucivania policarpo de Albuquerque	
DOI 10.22533/at.ed.52619191213	

CAPÍTULO 14	177
ANÁLISE DA VIABILIDADE ECONÔMICA DA IMPLANTAÇÃO DE USINA RECICLADORA DE RESÍDUOS DE CONCRETO NA INDÚSTRIA DE PRÉ-MOLDADOS: UM ESTUDO DE CASO NA CIDADE DE MOSSORÓ/RN	
Adeirton Gois de Lima	
Francisco Herikleptom Mariano da Costa	
Lucas Allan Saldanha dos Santos	
Hannah Lerissa Hydaradaya Moura Santos de Farias	
DOI 10.22533/at.ed.52619191214	
CAPÍTULO 15	188
COMPORTAMENTO DE BLOCOS DE TRANSIÇÃO COM PERFIL METÁLICO <i>Behavior of steel pile cap</i>	
Rodrigo Gustavo Delalibera	
Marcell Godoi Sivelli	
José Samuel Giongo	
DOI 10.22533/at.ed.52619191215	
CAPÍTULO 16	206
ESTUDO COMPARATIVO DA ASSOCIAÇÃO DE MEMBROS DE TRELIÇAS ISOSTÁTICAS	
Francisca Ires Vieira de Melo	
Leonardo Henrique Borges de Oliveira	
Layane Silva de Amorim	
Lourena Barbosa Cavalcante Paiva	
Sara Fernandes Rocha	
DOI 10.22533/at.ed.52619191216	
CAPÍTULO 17	225
FORÇAS DEVIDAS AO VENTO EM ESTRUTURAS DE EDIFÍCIOS ALTOS SEGUNDO DUAS VERSÕES: A SUGERIDA PELA NBR 6123/1988 E OUTRA SIMPLIFICADA	
Marcus Vinicius Paula de Lima	
Nara Villanova Menon	
Maicon de Freitas Arcine	
Juliana Penélope Caldeira Soares	
DOI 10.22533/at.ed.52619191217	
CAPÍTULO 18	240
COMPARAÇÃO ENTRE OS MÉTODOS DE DIMENSIONAMENTO DE PERFIS DE AÇO FORMADOS A FRIO SUBMETIDOS À COMPRESSÃO DE ACORDO COM A NBR 14762:2010	
Amanda Isabela de Campos	
DOI 10.22533/at.ed.52619191218	
SOBRE A ORGANIZADORA	260
ÍNDICE REMISSIVO	261

DESENVOLVIMENTO DE UM ALGORITMO EM LINGUAGEM PYTHON PARA ANÁLISE DE ESTRUTURAS UTILIZANDO O MÉTODO DOS DESLOCAMENTOS

Amanda Isabela de Campos

Universidade Federal do Rio de Janeiro

Programa de Engenharia Civil, COPPE, Rio de Janeiro - RJ

RESUMO: A análise estrutural é um conhecimento essencial para o engenheiro civil e é aplicada para diversos tipos de sistemas construtivos, constituindo uma etapa primordial de projeto, onde é necessário para definição da estrutura em questão o cálculo de esforços internos, deslocamentos, reações de apoio, etc. Na graduação em engenharia civil esses conceitos são desenvolvidos com o auxílio do método do deslocamentos que é a mesma formulação utilizada em programas comerciais de análise estrutural, de posse desse conhecimento foi desenvolvido um algoritmo simples e livre, implementado em linguagem PYTHON, que realiza análise estática linear de vigas e pórticos planos modelados com elementos de barra sob influência de carregamentos estáticos, para diferentes seções geométricas e módulos de elasticidade. Assim, o usuário tem contato com os resultados de matrizes de rigidez dos elementos, matrizes de rotação, matriz de rigidez da estrutura global, etc. Além de acompanhar o desenvolvimento do método, e não somente inserir dados de entrada e receber resultados como acontece

com programas fechados, dessa forma acredita-se que é de grande interesse para o aprendiz a utilização e compreensão dos passos seguidos de acordo com o método dos deslocamentos aplicados nesse algoritmo. Para validar o algoritmo proposto os resultados de esforços e reações de apoio obtidos são então comparados com resultados teóricos e uma modelagem no programa comercial já consolidado SAP2000, o trabalho proposto apresentou resultados exatamente iguais e se mostra uma ferramenta simples e precisa para aplicação e desenvolvimento dos conceitos aprendidos, sem a necessidade de programas robustos.

PALAVRAS-CHAVE: Análise estrutural, método dos deslocamentos, pórtico plano.

ABSTRACT: The structural analysis is an essential knowledge for the civil engineer and is applied to several types of construction systems, constituting a primordial stage of design, where it is necessary to define the structure in question the calculation of internal forces, displacements, support reactions, etc.. In the graduation in civil engineering these concepts are developed with the aid of the stiffness method, which is the same formulation used in commercial programs of structural analysis, with this knowledge was developed a simple and free algorithm, implemented in PYTHON

language, which performs static linear analysis of beams and plane frames modeled with bar elements under influence of static loads, for different geometric sections and elasticity modules. Thus, the user has contact with the results of stiffness matrices of the elements, rotation matrices, stiffness matrix of the global structure, etc. In addition to following the development of the method, and not only enter input data and receive results as it happens with closed programs, it is believed that it is of great interest for learning the use and understanding of the steps followed according to the method of displacements applied in this algorithm. To validate the proposed algorithm the results of efforts and support reactions obtained are then compared with theoretical results and a modeling in the already consolidated commercial program SAP2000, the proposed work presented exactly the same results and shows a simple and precise tool for application and development of the concepts learned, without the need for robust programs.

KEYWORDS: Structural analysis, Displacement method, Plane frame.

DEVELOPMENT OF AN ALGORITHM IN PYTHON LANGUAGE FOR STRUCTURAL ANALYSIS USING THE STIFFNESS METHOD

1 | INTRODUÇÃO

Segundo Martha (2010) a análise estrutural é a fase do projeto estrutural em que é feita a idealização do comportamento da estrutura. Esse comportamento pode ser descrito com a determinação pelos campos de tensões, deformações e deslocamentos na estrutura. De uma maneira geral, a análise estrutural tem como objetivo determinar esforços internos e externos (cargas e reações de apoio), e tensões, além dos deslocamentos e correspondentes deformações da estrutura que está sendo projetada. Ou seja, é de grande interesse do engenheiro determinar previamente quais serão as solicitações para um determinado carregamento e de posse desses resultados dimensionar corretamente a estrutura e os materiais a ser empregados na edificação.

A análise estrutural como outros tantos problemas de engenharia pode ser entendida como a procura por uma solução numérica de um problema matemático, e sabe-se que soluções numéricas, ou aproximadas, para problemas de natureza contínua descritos por modelos matemáticos através de equações representam uma classe de solução conveniente para a Engenharia (MILLMAN; AIVAZIS, 2011).

Grande parte das estruturas reais podem ser idealizadas por um esquema de pórticos planos chamados de modelos analíticos, com o intuito de facilitar o trabalho e gerar bons resultados, exemplos importantes relacionados a engenharia civil que são resolvidos dessa forma são edifícios, pontes e torres (Hibbeler, 1984). Define-se pórtico plano como um típico modelo estrutural reticulado formado por barras, interligadas por nós e sujeitas a cargas no mesmo plano. Como dito, o dimensionamento estrutural está interligado a determinação das tensões internas das barras. Sabe-se que a tensão interna resultante em uma seção transversal de um membro de pórtico plano

depende do momento fletor, esforço cortante e da força axial (Sussekind, 1981) então uma rápida e correta determinação dessas grandezas é de suma importância no dimensionamento de estruturas.

Nesse trabalho serão determinadas com o auxílio de um algoritmo todas essas grandezas de interesse para qualquer organização de barras em forma de pórtico plano, para qualquer carregamento, definindo assim uma ferramenta de fácil uso e aberta para eventuais alterações ou verificações de algum passo dos cálculos.

O método dos deslocamentos é um método clássico desenvolvido visando a implementação computacional, segundo Kassimali (2012) por ser sistemático ele pode ser convenientemente programável e é um método geral, ou seja, se aplica aos mais variados tipos de estruturas de pórticos planos.

Dessa forma, o método dos deslocamentos foi utilizado como ferramenta e validado como forma de algoritmo numérico resultando assim em um algoritmo que recebe os dados iniciais do pórtico plano, como propriedades geométricas e organização das barras e retorna como resultados as reações de apoio da estrutura, os esforços internos das barras (esforço normal, cortante e momento fletor) e os deslocamentos dos nós. Para isso, inicialmente, a matriz de rigidez de cada elemento de pórtico é montada em relação ao seu eixo local e, em seguida, é transformada em um sistema de coordenadas globais. Existem casos de pórticos formados por barras com as mais diversas inclinações, e como o algoritmo criado propõe resolver qualquer tipo de pórtico é preciso rotacionar todas as matrizes no referencial local da estrutura transformando com o auxílio da matriz de rotação os resultados de forças e deslocamentos para o sistema de coordenadas globais. O sistema de equações gerado é resolvido e as incógnitas, que nesse tipo de problema são os deslocamentos nodais, são então determinadas. Conhecidos os deslocamentos nos nós são calculadas as reações de apoio, e os esforços nas barras da estrutura, completando assim a análise estática linear.

2 | MÉTODOS

2.1 Fundamentação Teórica

A lei de Hooke (equação 1) garante que em um regime elástico linear as deformações (Δx) em uma barra serão diretamente proporcionais as forças aplicadas (ΔF), de acordo com um parâmetro de rigidez k , constante.

$$\Delta F = k * \Delta x \quad (1)$$

Como dito, as estruturas planas em estudo são formadas por elementos de barra no plano, esse tipo de elemento é constituído por dois nós com três graus de liberdade por nó e estão esquematizados na figura 2a. Esses, são: deslocamento

axial, deslocamento transversal e rotação.

A rigidez à flexão de uma barra é calculada por $E \cdot I$ (produto entre o módulo de elasticidade e a inércia) e a rigidez axial $E \cdot A$ (produto entre o módulo de elasticidade e a área), considerando a deformação axial da barra na análise. Os possíveis deslocamentos em cada nó da barra são: translação $u(x)$ e rotação em $v(x)$. Dessa forma, cada barra possui seis graus de liberdade, que estão apontados na figura 2b. A relação entre deslocamentos e forças é então determinada a seguir, resultando na matriz de rigidez para esse tipo de elemento.

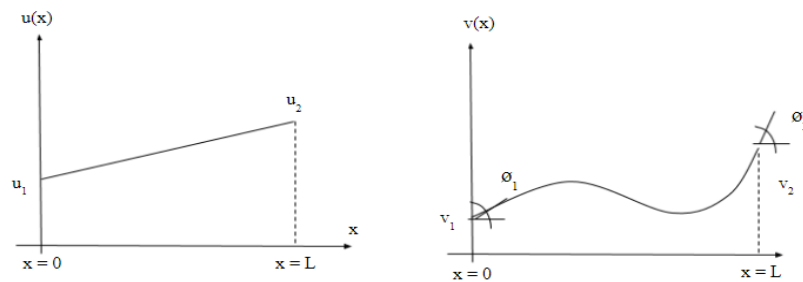


Figura 1 - Deslocamento axial e transversal de um elemento de barra

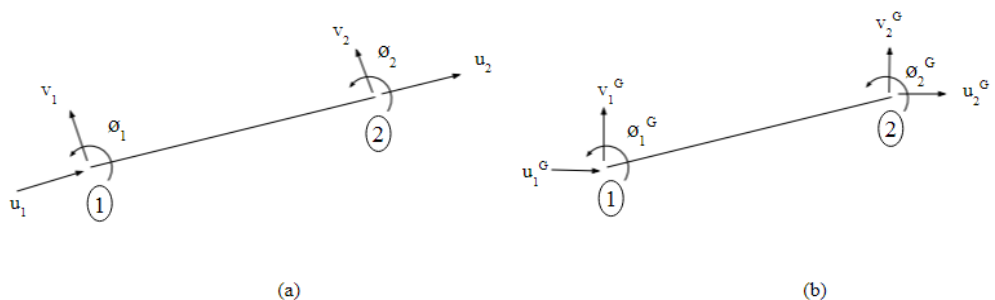


Figura 2- Graus de liberdade do elemento de barra no referencial local (a) e global (b)

É de interesse na análise estrutural o cálculo dos deslocamentos em todos os pontos ao longo do comprimento deste elemento, para isso são utilizadas as chamadas funções de interpolação que aproxima os deslocamentos em todo o comprimento quando conhecidos os deslocamentos nos nós de extremidade do elemento. Nesse trabalho como funções de interpolação foram utilizadas funções de primeiro grau para os deslocamentos axiais dos elementos e para os deslocamentos perpendiculares ao eixo longitudinal utilizaram-se funções de terceiro grau (Figura 1). De acordo com Dias (2014) a adoção de tais funções permite a obtenção de resultados exatos para situações de carregamentos concentrados e aproximados para elementos estruturais sujeitos a carregamentos distribuídos.

Para Clough & Penzien (1975) a formulação das equações de movimento é uma das fases mais importantes no procedimento de análise dinâmico-estrutural e, em

muitos casos, a mais difícil. Nesse trabalho foi aplicado o princípio da energia para determinação das equações de rigidez do elemento de barra.

A aproximação do deslocamento em qualquer distância x da barra então pode ser calculado com o auxílio das funções de interpolação adotadas da seguinte forma. Para o deslocamento axial (equação 1) e para o deslocamento transversal (equação 2).

$$\tilde{u}(x) \cong u_1 + \left(\frac{u_2 - u_1}{L} \right) x \quad (2)$$

$$\tilde{v}(x) \cong a_0 + a_1 x + a_2 x^2 + a_3 x^3 \quad (3)$$

As condições de contorno conhecidas (Figura 1) são então aplicadas.

$$\tilde{v}(x=0) \cong v_1 \Rightarrow a_0 = v_1 \quad (4)$$

$$\tilde{v}'(x=0) \cong \phi_1 \Rightarrow a_1 = \phi_1 \quad (5)$$

$$\tilde{v}(x=L) \cong v_2 \Rightarrow v_1 + \phi_1 L + a_2 L^2 + a_3 L^3 = v_2 \quad (6)$$

$$\tilde{v}'(x=L) \cong \phi_2 \Rightarrow \phi_1 + 2a_2 L + 3a_3 L^2 = \phi_2 \quad (7)$$

Resolvendo o sistema de equações (2x2), determina-se os coeficientes.

$$a_2 = \frac{3(v_2 - v_1)}{L^2} - \frac{(2\phi_1 + \phi_2)}{L} \quad (8)$$

$$a_3 = \frac{2(v_1 - v_2)}{L^3} + \frac{(\phi_1 + \phi_2)}{L^2} \quad (9)$$

Logo, as aproximações de deslocamentos transversais ao eixo do elemento são calculadas com a seguinte expressão.

$$\tilde{v}(x) \cong v_1 + \phi_1 x + \left[\frac{3(v_2 - v_1)}{L^2} - \frac{(2\phi_1 + \phi_2)}{L} \right] x^2 + \left[\frac{2(v_1 - v_2)}{L^3} + \frac{(\phi_1 + \phi_2)}{L^2} \right] x^3 \quad (10)$$

2.2 Matriz de Rigidez do Elemento

Sabe-se que a energia de deformação específica é calculada a partir das deformações com a seguinte expressão. Essa abordagem é conhecida como formulação por energia.

$$U = \int_0^L \int_A \frac{1}{2} E \varepsilon^2 dA dx \quad (11)$$

$$U = \int_0^L \frac{EA}{2} (\tilde{u}_{,x})^2 + \frac{EI}{2} (\tilde{v}_{,xx})^2 dx \quad (12)$$

Aplicando os deslocamentos calculados (2) e (10) em (12), obtém-se:

$$U = \frac{EA}{2L} (u_2 - u_1)^2 + \frac{2EI}{L^3} \left[L^2 (\phi_1^2 + \phi_1 \phi_2 + \phi_2^2) + 3(v_1 - v_2)^2 + 3L(v_1 - v_2)(\phi_1 + \phi_2) \right] \quad (13)$$

Com essa formulação qualquer coeficiente de rigidez associado a flexão de uma barra pode ser calculado com a expressão 14, obtida com a consideração de que a condição de equilíbrio para um sistema exige que a primeira variação de energia total do sistema seja igual a zero (Zienkiewicz, 1968).

$$K_{(i,j)}^e = \frac{\partial^2 U}{\partial \Delta u_i \partial \Delta u_j} \quad (14)$$

Então, aplicando a equação 13 na expressão 14 pode-se obter os coeficientes de rigidez que formam a matriz de rigidez do elemento escrita em um sistema de coordenadas locais que representa o referencial do elemento, e está indicada a seguir.

$$K_{(i,j)}^e = \begin{bmatrix} EA/L & 0 & 0 & -EA/L & 0 & 0 \\ 0 & 12EI/L^3 & 6EI/L^2 & 0 & -12EI/L^3 & 6EI/L^2 \\ 0 & 6EI/L^2 & 4EI/L & 0 & -6EI/L^2 & 2EI/L \\ -EA/L & 0 & 0 & EA/L & 0 & 0 \\ 0 & -12EI/L^3 & -6EI/L^2 & 0 & 12EI/L^3 & -6EI/L^2 \\ 0 & -6EI/L^2 & 2EI/L & 0 & -6EI/L^2 & 4EI/L \end{bmatrix} \quad (15)$$

2.3 Matriz de Rotação do Elemento

Para uma análise de pórticos planos em barras com inclinações quaisquer funcionar é necessário utilizar os conceitos de referencial local e global e as mudanças entre esses dois universos com a chamada matriz de rotação.

O referencial global da estrutura corresponde ao eixo cartesiano x, y (horizontal e vertical) normalmente utilizado e único para toda a estrutura. Já no referencial local o eixo x é o eixo ao longo do comprimento da barra e o eixo y perpendicular à barra. Então para uma barra horizontal com o nó inicial em zero e nó final no eixo x positivo, o referencial local coincide com o referencial global.

A transformação do referencial global para o local do elemento é feita a partir da multiplicação da matriz de rotação, que depende do ângulo entre os referenciais. Já a transformação do referencial local para o global é feita com a multiplicação da inversa da matriz de rotação. Esse artifício será necessário em alguns trechos do algoritmo.

A matriz de rotação para um elemento com seis graus de liberdade esta apresentada na equação 16, onde os termos não exibidos são todos nulos.

$$R = \begin{bmatrix} \cos\alpha & \sin\alpha & 0 & & & \\ -\sin\alpha & \cos\alpha & 0 & \ddots & & \\ 0 & 0 & 1 & & & \\ & & & \cos\alpha & \sin\alpha & 0 \\ & \ddots & & -\sin\alpha & \cos\alpha & 0 \\ & & & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (16)$$

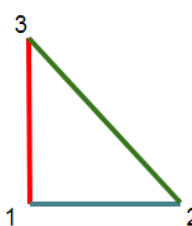
Em uma estrutura plana, após transformar a matriz de rigidez de membros individuais do sistema de coordenadas local para global é preciso de realizar a montagem da matriz de rigidez global de acordo com as conexões dos elementos.

Esse procedimento está descrito a seguir.

2.4 Matriz de Rotação do Elemento

De acordo com Kassimali (2012) um coeficiente de rigidez da estrutura de um determinado nó em uma dada direção é igual à soma algébrica dos coeficientes de rigidez do elemento, nessa direção, devido a todos os elementos com extremidades conectados a esse nó. Este fato indica que a matriz de rigidez da estrutura pode ser formulada diretamente pela adição dos elementos das matrizes de rigidez do elemento em suas posições apropriadas na matriz da estrutura. Esta técnica de formar diretamente uma matriz de rigidez estrutural através da montagem das matrizes de rigidez dos elementos formando assim a matriz global da estrutura é conhecida na literatura como *Assembly* e pode ser programada facilmente e implementada em um código computacional. Esse processo então, consiste em acoplar as informações contidas em cada uma das matrizes e inseri-la em uma matriz global, referente à toda a estrutura. Essa nova matriz contém todas as matrizes de rigidez de cada elemento em suas respectivas posições. O que determina essa posição são as conectividades dos elementos.

Para determinar as posições dos elementos de uma matriz de elemento na matriz de estrutura, identifica-se o número do grau de liberdade da estrutura, no referencial global da estrutura. Um elemento formado pelos nós 1 e 3, por exemplo será adicionado na matriz de rigidez da estrutura nos correspondentes graus de liberdade, e se outro elemento tem ligação no nó 3 esse coeficiente será somado e assim respectivamente para toda a estrutura. Esse procedimento pode ser observado na figura 3, onde cada x corresponde a um coeficiente de rigidez da matriz (15).



	1	2	3	4	5	6	7	8	9
1	xx	xx	xx	x	x	x	x	x	x
2	xx	xx	xx	x	x	x	x	x	x
3	xx	xx	xx	x	x	x	x	x	x
4	x	x	x	xx	xx	xx	x	x	x
5	x	x	x	xx	xx	xx	x	x	x
6	x	x	x	xx	xx	xx	x	x	x
7	x	x	x	x	x	x	xx	xx	xx
8	x	x	x	x	x	x	xx	xx	xx
9	x	x	x	x	x	x	x	x	x

2.5 Algoritmo

Este item tem como objetivo comentar toda a fase de implementações computacionais da análise estática linear de pórticos planos de forma que o leitor seja capaz de compreender a aplicação da teoria de método dos deslocamentos por meio dos mecanismos computacionais de programação. O código foi desenvolvido em linguagem PYTHON, uma linguagem de programação de sintaxe simples, gratuita e direta com ferramentas de cálculos e bibliotecas envolvendo matrizes muito eficientes.

O intuito é formular um algoritmo universal onde qualquer pórtico plano possa ser estudado, alterando as propriedades do material bem como a organização das barras de treliças e/ou barras de pórtico com as mais diversas inclinações sujeitas a cargas distribuídas ou concentradas em duas direções.

A figura 4 exibe o fluxograma da análise linear, apontando os passos seguidos na análise estrutural como método dos deslocamentos implementados no algoritmo.

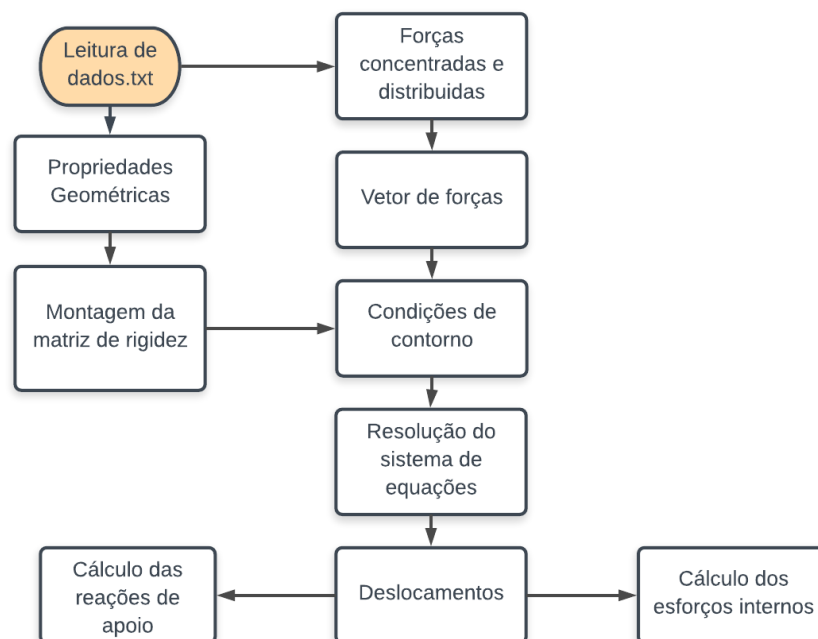


Figura 4 – Fluxograma de análise linear de estruturas

2.5.1 Estrutura Exemplo

A etapa de pré-processamento consiste no usuário informar ao algoritmo qual será a estrutura a ser analisada. Para facilitar esse processo foi criado uma leitura de dados a partir de um arquivo do tipo texto (com extensão .txt) chamado de arquivo de entrada. A leitura é feita por linhas e todas as linhas que iniciam com o caractere # não serão lidas, ou seja, são comentários que facilitam o entendimento. Na figura 5 em (a) está reproduzido o arquivo de entrada utilizado como exemplo, em (b) está esquematizada a estrutura que esse arquivo de entrada representa, onde os números

dentro de retângulos é a numeração de cada elemento e os números sem bordas é a numeração de cada nó e em (c) a estrutura exemplo modelada no programa FTOOL.

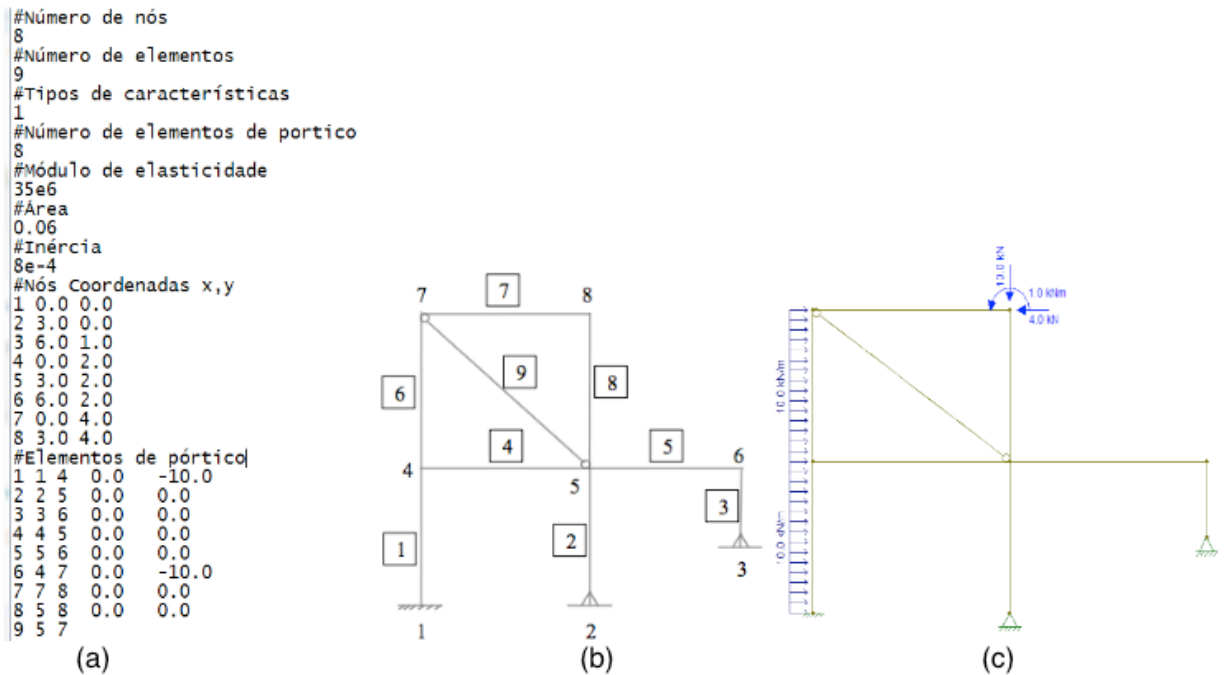


Figura 5 - Estrutura exemplo: Arquivo de entrada, numeração dos nós e modelagem no Ftool

Para o perfeito funcionamento do algoritmo o arquivo de entrada deve ser montado no padrão apresentado onde o primeiro número é o número de nós do pórtico a ser analisado, depois o número de elementos, tipo de características, número de elementos de pórticos, módulo de elasticidade, área e inércia da seção transversal, o número de cada nó e as coordenadas x, y, e por fim as informações de cada elemento na seguinte ordem: número do elemento, número do primeiro e do segundo nó (conectividades) e a carga distribuída. Para o caso de cargas concentradas a leitura da posição e da magnitude é feita dentro do próprio algoritmo e para o caso de elementos de treliça, como o último elemento do exemplo da Figura 5(a), só é necessário informar as conectividades.

A validação do algoritmo é feita com a comparação entre os resultados de esforços, reações de apoio e deslocamentos obtidos com resultados do Ftool e a seguir com o SAP2000.

3.1 Matriz de Rigidez do Elemento 5

Como dito a matriz de rigidez para qualquer elemento deve ter a forma da equação 15, para comprovar isso foi escolhido um elemento qualquer da estrutura exemplo, utilizamos aqui para exemplificar o elemento 5, mas qualquer outro elemento a equação da matriz de rigidez é mantida. O resultado do cálculo dessa matriz utilizando o algoritmo está exposto na figura 6.

$$E = 35 \cdot 10^6 \text{ kPa}, A = 0,06 \text{ m}^2, I = 8 \cdot 10^{-4} \text{ m}^4, L = 3 \text{ m}$$

	0	1	2	3	4	5
0	700000.000	0.000	0.000	-700000.000	0.000	0.000
1	0.000	12444.444	18666.667	0.000	-12444.444	18666.667
2	0.000	18666.667	37333.333	0.000	-18666.667	18666.667
3	-700000.000	0.000	0.000	700000.000	0.000	0.000
4	0.000	-12444.444	-18666.667	0.000	12444.444	-18666.667
5	0.000	18666.667	18666.667	0.000	-18666.667	37333.333

Figura 6 - Matriz de Rigidez do elemento 5

3.2 Matriz de Rotação do Elemento 7 e 9

Como dito a matriz de rotação para qualquer elemento deve ter a forma da equação 16, para comprovar isso foi retirado do algoritmo a matriz de rotação do elemento 7 e 9 e observa-se que os valores são coerentes.

	0	1	2	3	4	5
0	-0.832	0.555	0.000	0.000	0.000	0.000
1	-0.555	-0.832	0.000	0.000	0.000	0.000
2	0.000	0.000	1.000	0.000	0.000	0.000
3	0.000	0.000	0.000	-0.832	0.555	0.000
4	0.000	0.000	0.000	-0.555	-0.832	0.000
5	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	1.000

Figura 7 - Matriz de Rotação do Elemento 9

	0	1	2	3	4	5
0	1.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000
1	-0.000	1.000	0.000	0.000	0.000	0.000
2	0.000	0.000	1.000	0.000	0.000	0.000
3	0.000	0.000	0.000	1.000	0.000	0.000
4	0.000	0.000	0.000	-0.000	1.000	0.000
5	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	1.000

Figura 8 - Matriz de Rotação do Elemento 7

3.3 Reações de Apoio

A resposta para reações de apoio obtidas no algoritmo é apresentada na forma de um vetor com o número de linhas igual ao número de graus de liberdade da estrutura, onde cada valor de reação de apoio está na posição do grau de liberdade referente ao impedimento. Como por exemplo a primeira posição do vetor de reações de apoio corresponde ao grau de liberdade 1 (direção x) do nó 1. A comparação com os resultados do Ftool é apresentada a seguir na figura 9.

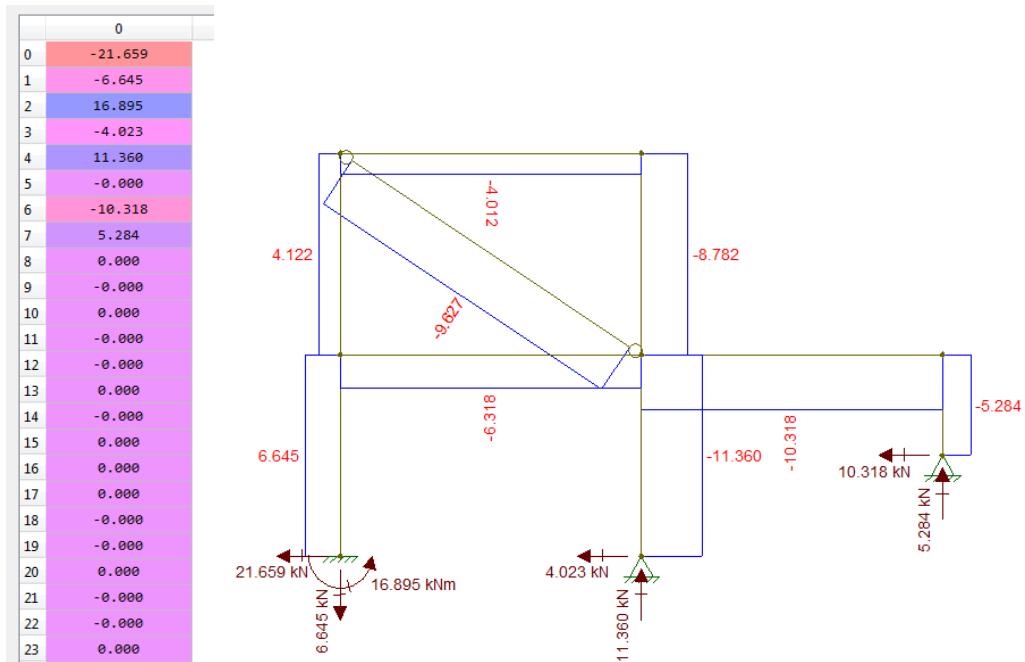


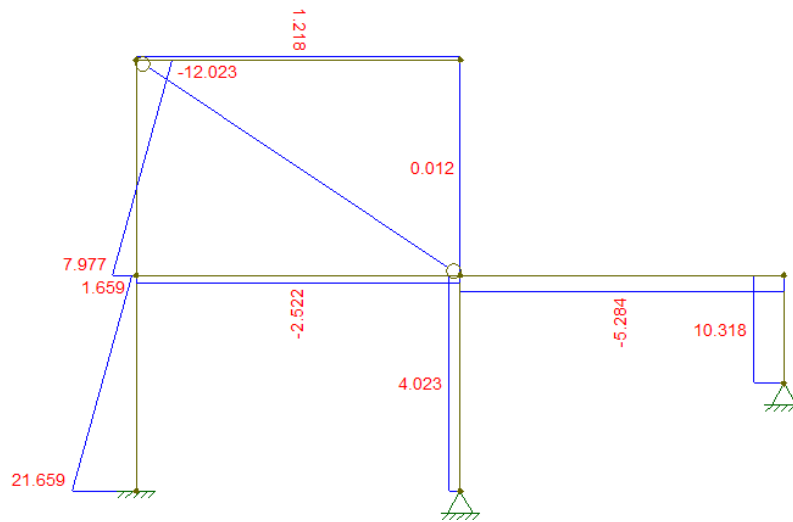
Figura 9 – Vetor com as Reações de Apoio e Diagrama de Esforço Normal

3.3 Esforços: Normal, Cortante e Momento Fletor

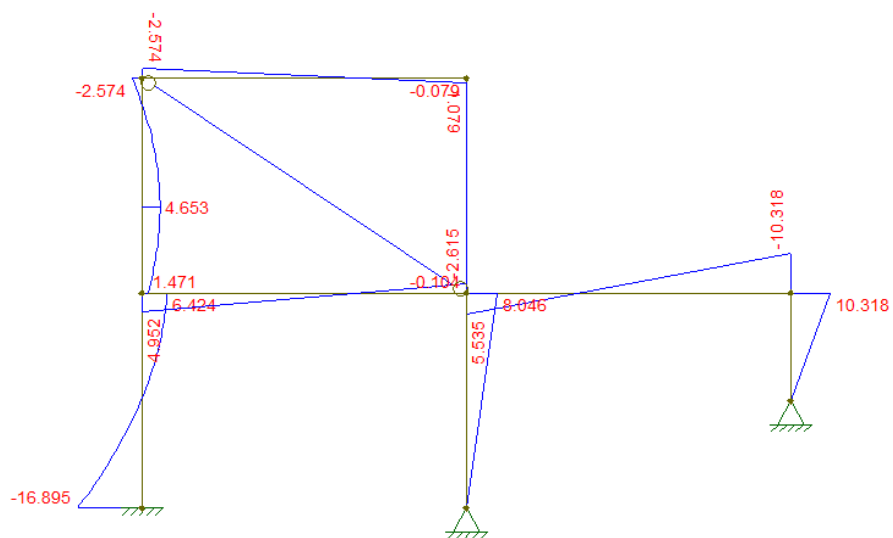
A resposta para esforços obtidas no algoritmo é apresentada na forma de uma matriz com seis linhas (número de graus de liberdade por elemento) e número de colunas igual ao número de elementos, ou seja para cada coluna representa um elemento, assim a primeira coluna retrata os esforços no elemento 1, e cada linha dessa coluna é um grau de liberdade. O esforço normal está sempre na primeira linha (para o primeiro nó) e na quarta linha (para o segundo nó) em cada elemento. O esforço cortante está sempre na segunda linha e na quinta e por fim o momento fletor estará na terceira linha e na última. Os resultados de esforços obtidos no Ftool estão apresentados na figuras 9 (Normal) e 11 (Cortante e momento fletor), esses valores podem ser comparados com a matriz de esforços obtida com o algoritmo na figura 10 a seguir.

	0	1	2	3	4	5	6	7	8
0	-6.645	11.360	5.284	6.318	10.318	-4.122	4.012	8.782	9.627
1	21.659	4.023	10.318	-2.522	-5.284	7.977	1.218	0.012	0.000
2	16.895	-0.000	0.000	-4.952	-5.535	-1.471	2.574	0.104	0.000
3	6.645	-11.360	-5.284	-6.318	-10.318	4.122	-4.012	-8.782	-9.627
4	-1.659	-4.023	-10.318	2.522	5.284	12.023	-1.218	-0.012	0.000
5	6.424	8.046	10.318	-2.615	-10.318	-2.574	1.079	-0.079	0.000

Figura 10 - Matriz de esforços obtida com o algoritmo



(a)



(b)

Figura 11 – (a) Diagrama de Esforços Cortantes e (b) Momentos Fletores

3.4 Deslocamentos

O resultado de deslocamentos obtidos no algoritmo é apresentado na forma de um vetor com número de linhas igual ao número de graus de liberdade, onde cada valor de deslocamento esta na posição do grau de liberdade de interesse. Os graus de liberdade com impedimento (apoios) apresentam deslocamentos nulos, ou praticamente nulo (alguns resíduos de erros numéricos irrelevantes podem aparecer). Dessa forma, o deslocamento horizontal (em metros) do nó 6 apresentado na tabela 1 é o deslocamento da posição 15. O número do grau de liberdade pode ser encontrado com a seguinte operação $(3 \cdot 6 - 2) - 1 = 15$ utilizando a lógica $(3 \cdot \text{NÓ} - 2) - 1$ para a direção x, e considerando que a contagem de posições em Python começa no zero. O valor calculado do deslocamento nesse grau de liberdade quando comparado com o Ftool e o programa SAP2000 mostram valores iguais, validando mais uma vez o algoritmo, a tabela 1 apresenta a comparação dos resultados.

	Deslocamentos no nó 6				Reações de apoio Nó 1		
	Ftool	Sap2000	Algoritmo		Ftool	Sap2000	Algoritmo
x (m)	3.897E-04	3.897E-04	3.897E-04	x (kN)	-21.659	-21.659	-21.659
y (m)	-2.516E-06	-2.516E-06	-2.516E-06	y (kN)	-6.645	-6.645	-6.645
z (rad)	-2.669E-04	-2.669E-04	-2.669E-04	z (kNm)	16.895	16.895	16.895

Tabela 1 – Comparação entre resultados utilizando três diferentes ferramentas

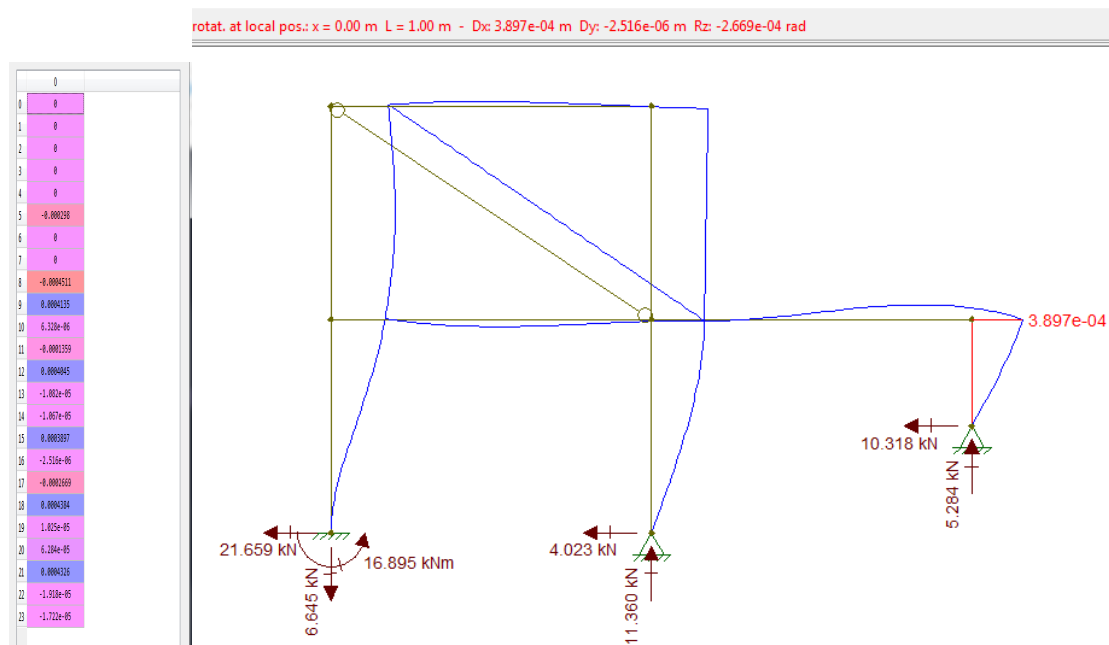


Figura 12 - Deslocamentos obtidos com o algoritmo e com o Ftool.

4 | DISCUSSÃO

A abordagem proposta para análise linear de estruturas planas possui vantagens quando comparada com outras ferramentas como compreensão e contato com todos as etapas de cálculo e possibilidade de estudo das mais diversas formas e tipos de pórticos planos, com elementos de barras ou treliças. Quando confrontado com os programas comerciais já consolidados possui desvantagens, como falta de visualização gráfica do modelo da estrutura e sua deformada, porém uma vez que o usuário conhece os passos do método dos deslocamentos o algoritmo garante uma aplicação poderosa, com resultados exatos além de exercitar a aplicação de toda a teoria envolvida, ao contrário dos programas comerciais onde só se insere dados e recebe resultados.

5 | CONCLUSÃO

O trabalho teve como objetivo aplicar computacionalmente a formulação do método dos deslocamentos em um algoritmo que realiza uma análise estrutural linear

em qualquer estrutura plana, calcular dessa forma os deslocamentos, esforços e reações de apoio de pórticos planos, treliças ou vigas. A obtenção da matriz de rigidez pela formulação de energia passando pela aproximação do campo de deslocamentos com funções de interpolação foi validada para aplicação no código. O intuito desse algoritmo era ter o contato com cada matriz de rigidez e vetor de forças, diferente de uma análise estrutural em programas fechados onde só se tem acesso ao resultado final.

Os passos do método dos deslocamentos foram aplicados no algoritmo como a criação da matriz de rigidez global, após a rotação e *assembly* das matrizes dos elementos, criação do vetor de forças nodais e por fim a resolução do sistema de equações, para qualquer estrutura plana que o usuário informar.

Como forma de validação foram comparados os resultados de um pórtico plano com diferentes tipos de características geométricas das barras, inclinações de elementos, carregamentos e tipos de vinculações ou apoios, calculados com o algoritmo implementado, o FTOOL e o SAP200. Como esperado as reações de apoio, deslocamentos nodais e esforços internos nos elementos foram praticamente idênticos comprovando a validade e precisão do código proposto e garantindo a validade do algoritmo para qualquer estrutura plana desejada.

Por fim pode-se afirmar que o uso de ferramentas desse tipo configura um importante aliado no processo de aprendizado de análise estrutural, uma vez que o usuário tem contato com todas as etapas de cálculo.

AGRADECIMENTOS

Ao CNPq pelo auxílio financeiro.

REFERÊNCIAS

- [1] CLOUGH, RAY W., PENZIEN, JOSEPH. **Structural dynamics**. New York: McGrawHill Inc, 1975.
- [2] DIAS, R. P. **Formulação do método dos elementos finitos para a análise elástica linear de pórticos planos**. Trabalho de Conclusão De Curso (Engenharia Civil) - Universidade Federal do Paraná, 2014.
- [3] HIBBELER, RUSSELL C., KIANG, TAN. **Structural analysis**. Prentice Hall, 1984.
- [4] KASSIMALI, ASLAM. **Matrix Analysis of Structures I** Version. Cengage Learning, 2012.
- [5] MARTHA, LUIZ. **Análise de estruturas: conceitos e métodos básicos**. Elsevier Brasil, 2010.
- [6] SUSSEKIND, J. C. **Curso de análise estrutural**. 6. ed. Porto Alegre-Rio de Janeiro: Editora Globo, 1981.
- [7] ZIENKIEWICZ, O. C.; CHEUNG, Y. K. **The finite element method in structural and continuum mechanics: numerical solution of problems in structural and continuum mechanics**. London: McGraw-Hill, 1968.

SOBRE O ORGANIZADORA

FRANCIELE BRAGA MACHADO TULLIO Engenheira Civil (Universidade Estadual de Ponta Grossa - UEPG/2006), Especialista em Engenharia de Segurança do Trabalho (Universidade Tecnológica Federal do Paraná – UTFPR/2009, Mestre em Ensino de Ciências e Tecnologia (Universidade Tecnológica federal do Paraná – UTFPR/2016). Trabalha como Engenheira Civil na administração pública, atuando na fiscalização e orçamento de obras públicas. Atua também como Perita Judicial em perícias de engenharia. E-mail para contato: francielebmachado@gmail.com

ÍNDICE REMISSIVO

A

Ação do vento 225, 226, 228, 229, 230, 235
Algoritmo 1, 3, 7, 9, 10, 11, 12, 13, 14, 15, 240, 251, 254, 258
Análise estrutural 1, 2, 4, 9, 14, 15, 90, 91, 93, 94, 95, 96, 98, 198, 224
Aplicativo 28, 56, 60, 61, 62, 63, 66
Aprendizagem 69, 70, 71, 72, 73, 76, 77, 78, 79, 80, 81, 82, 84
Argamassa 107, 121, 122, 123, 124, 125, 126, 127, 128, 130, 131
Armaduras 93, 95, 192, 196, 197, 199, 200, 202

B

BIM 16, 17, 18, 19, 20, 21, 22, 23, 24, 25, 26, 27, 40, 41, 42, 43, 53, 54, 55, 58
Blocos de concreto 190

C

Cálculo 1, 4, 10, 14, 15, 33, 38, 63, 66, 69, 75, 80, 84, 86, 90, 93, 98, 101, 104, 105, 106, 109, 112, 172, 181, 182, 183, 184, 185, 186, 188, 195, 205, 210, 211, 226, 227, 230, 233, 238, 240, 245, 247, 248, 249, 251, 254, 257
Compatibilização 23, 24, 25, 40, 41, 44, 46, 49, 53, 55
Concreto 45, 52, 54, 86, 87, 88, 89, 90, 92, 93, 98, 99, 100, 101, 102, 103, 104, 105, 106, 107, 108, 109, 110, 112, 113, 123, 130, 131, 166, 167, 168, 169, 170, 172, 173, 174, 175, 176, 177, 178, 179, 180, 181, 182, 186, 187, 188, 189, 190, 191, 195, 198, 205, 230, 231, 238, 239
Controle tecnológico 121, 122, 127, 130

D

Desenvolvimento 1, 16, 34, 41, 42, 43, 53, 56, 57, 58, 59, 63, 65, 66, 69, 70, 71, 74, 77, 84, 90, 131, 149, 151, 163, 167, 209, 230, 259
Dimensionamento 2, 3, 26, 46, 50, 88, 142, 188, 189, 190, 191, 192, 193, 197, 199, 204, 208, 212, 223, 238, 240, 241, 242, 246, 247, 249, 258, 259

E

Edificações 17, 41, 44, 54, 67, 87, 90, 99, 121, 122, 124, 130, 133, 135, 137, 140, 141, 142, 147, 148, 226, 229, 230, 233, 237, 238
Elementos finitos 15, 28, 33, 34, 38, 198, 199, 246
Eletricidade 149, 152, 153, 154, 156, 159, 160, 161, 163
Energia 5, 6, 15, 46, 59, 126, 149, 150, 151, 152, 153, 156, 158, 159, 161, 162, 163, 164, 166, 168, 170, 179, 183, 184, 186
Energia renovável 149
Ensaio 28, 101, 104, 108, 109, 110, 111, 112, 121, 122, 128, 129, 130, 169, 170, 191, 197, 205
Estabilidade 86, 87, 88, 92, 93, 98, 99, 115, 226, 238, 246, 249, 258
Estacas 157, 188, 189, 190, 205
Estruturas 1, 2, 3, 9, 14, 15, 28, 38, 41, 45, 54, 86, 87, 88, 89, 90, 92, 99, 100, 105, 113, 119, 167, 168, 169, 171, 176, 178, 179, 186, 205, 207, 208, 223, 224, 225, 238, 239, 241, 259

G

Gerenciamento de obras 56, 58, 60, 61, 66

Gerenciamento de projetos 16, 19, 27, 67

I

Inovação 41, 69, 70, 72, 73, 74, 85, 179

M

Materiais 2, 28, 30, 31, 35, 38, 44, 53, 60, 62, 63, 88, 99, 102, 103, 105, 109, 111, 113, 119, 120, 121, 122, 123, 126, 127, 129, 130, 131, 132, 133, 140, 143, 147, 148, 167, 168, 169, 172, 198, 199, 223, 228

Método dos deslocamentos 1, 3, 9, 14, 15

Modelagem estrutural 225

Módulo de elasticidade 4, 10, 101, 102, 103, 104, 105, 106, 107, 108, 109, 111, 112, 113, 115, 121, 122, 127, 128, 130, 131, 198, 199, 209, 231, 244

P

Perfis de aço 240, 241, 249, 258, 259

Pré-moldados 90, 177, 178, 179, 180, 181, 186, 187

Projeto 1, 2, 17, 19, 20, 21, 22, 23, 24, 25, 26, 40, 41, 42, 43, 44, 45, 46, 47, 48, 49, 50, 51, 52, 53, 54, 55, 57, 58, 68, 70, 72, 74, 82, 87, 88, 89, 90, 99, 104, 109, 112, 124, 132, 134, 135, 142, 147, 168, 178, 181, 184, 186, 205, 224, 235, 238, 259

Projeto arquitetônico 26, 44, 54

Propriedades geométricas 3, 209, 222, 242, 243, 245, 249, 251

R

Reciclagem 120, 177, 180, 181, 182, 186, 187

Reforço estrutural 86

Resíduos sólidos 167, 177, 179, 180, 186

Resistência 23, 26, 35, 45, 88, 89, 90, 101, 103, 104, 105, 107, 108, 109, 110, 111, 112, 113, 115, 121, 122, 124, 126, 127, 128, 129, 131, 142, 166, 168, 169, 170, 171, 173, 174, 175, 176, 177, 189, 195, 198, 199, 200, 231, 240, 242, 249, 251, 257, 258

S

Segurança 53, 132, 134, 135, 139, 140, 142, 143, 151, 179, 212, 226, 230, 233, 238, 260

Simulações 28, 30, 31, 33, 35, 98, 190, 225

Sustentabilidade 19, 20, 176, 177, 178, 179, 180, 181, 186

T

Tecnologia 27, 40, 41, 42, 53, 54, 57, 58, 59, 61, 67, 68, 121, 131, 152, 153, 157, 161, 163, 166, 260

Treliças 9, 14, 15, 206, 207, 208, 209, 211, 212, 213, 220, 223, 224

V

Viga 50, 86, 87, 88, 90, 91, 92, 93, 94, 95, 98, 99, 100, 102, 103, 112, 206, 209, 212, 221, 222, 223, 237, 246

