

UNIVERSIDADE DO ESTADO DE SANTA CATARINA – UDESC
CENTRO DE CIÊNCIAS TECNOLÓGICAS – CCT
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA MECÂNICA – DEM

LUCAS BUBLITZ

**PHILLIPO: APLICAÇÃO DO MÉTODO DE ELEMENTOS FINITOS NA ANÁLISE
ESTÁTICA DE ESTRUTURAS SÓLIDAS UTILIZANDO ALGUNS ASPECTOS DE
PROGRAMAÇÃO FUNCIONAL, PROCESSAMENTO PARALELO E
EMPACOTAMENTO**

JOINVILLE

2023

LUCAS BUBLITZ

**PHILLIPO: APLICAÇÃO DO MÉTODO DE ELEMENTOS FINITOS NA ANÁLISE
ESTÁTICA DE ESTRUTURAS SÓLIDAS UTILIZANDO ALGUNS ASPECTOS DE
PROGRAMAÇÃO FUNCIONAL, PROCESSAMENTO PARALELO E
EMPACOTAMENTO**

Dissertação apresentada ao Programa de graduação em Engenharia Mecânica do Centro de Ciências Tecnológicas da Universidade do Estado de Santa Catarina, como requisito parcial para a obtenção do grau de Bacharel em Engenharia Mecânica.

Orientador: Pablo Muñoz

JOINVILLE

2023

Para gerar a ficha catalográfica de teses e
dissertações acessar o link:
<https://www.udesc.br/bu/manuais/ficha>

Bublitz, Lucas

PHILLIPO: aplicação do método de elementos finitos na análise estática de estruturas sólidas utilizando alguns aspectos de programação funcional, processamento paralelo e empacotamento / Lucas Bublitz. - Joinville, 2023.

100 p. : il. ; 30 cm.

Orientador: Pablo Muñoz.

.
Dissertação - Universidade do Estado de Santa Catarina, Centro de Ciências Tecnológicas, Bacharelado em Engenharia Mecânica, Joinville, 2023.

1. Palavra-chave. 2. Palavra-chave. 3. Palavra-chave. 4. Palavra-chave. 5. Palavra-chave. I. Muñoz, Pablo . II. , . III. Universidade do Estado de Santa Catarina, Centro de Ciências Tecnológicas, Bacharelado em Engenharia Mecânica. IV. Título.

ERRATA

Elemento opcional.

Exemplo:

SOBRENOME, Prenome do Autor. Título de obra: subtítulo (se houver). Ano de depósito.
Tipo do trabalho (grau e curso) - Vinculação acadêmica, local de apresentação/defesa, data.

Folha	Linha	Onde se lê	Leia-se
1	10	auto-conclavo	autoconclavo

LUCAS BUBLITZ

**PHILLIPO: APLICAÇÃO DO MÉTODO DE ELEMENTOS FINITOS NA ANÁLISE
ESTÁTICA DE ESTRUTURAS SÓLIDAS UTILIZANDO ALGUNS ASPECTOS DE
PROGRAMAÇÃO FUNCIONAL, PROCESSAMENTO PARALELO E
EMPACOTAMENTO**

Dissertação apresentada ao Programa de graduação em Engenharia Mecânica do Centro de Ciências Tecnológicas da Universidade do Estado de Santa Catarina, como requisito parcial para a obtenção do grau de Bacharel em Engenharia Mecânica.

Orientador: Pablo Muñoz

BANCA EXAMINADORA:

Nome do Orientador e Titulação
Nome da Instituição

Membros:

Nome do Orientador e Titulação
Nome da Instituição

Nome do Orientador e Titulação
Nome da Instituição

Nome do Orientador e Titulação
Nome da Instituição

Joinville, 01 de maio de 2023

Dedico este trabalho à Norma Kaizer Streit (*in
memoriam*).

AGRADECIMENTOS

Agradeço, primeiramente, aos meus pais, Gerson e Klissia, e à minha vó, Norma, pelo suporte. Agradeço aos meus amigos, Ana, Gabriel, Willian, Lucas, Wesley (e o outro também!), Filipe e Gustavo, por estarem presente nessa longa caminhada da graduação.

“Mas o contraste não me esmaga liberta-me; e a ironia que há nele é sangue meu. O que deveria humilhar-me é a minha bandeira, que desfraldo; e o riso com que deveria rir de mim, é um clarim com que saúdo e gero uma alvorada em que me faço.” (Fernando Pessoa em Livro do Desassossego – *com uma pequena alteração minha*)

RESUMO

Elemento obrigatório que contém a apresentação concisa dos pontos relevantes do trabalho, fornecendo uma visão rápida e clara do conteúdo e das conclusões do mesmo. A apresentação e a redação do resumo devem seguir os requisitos estipulados pela NBR 6028 (ABNT, 2003). Deve descrever de forma clara e sintética a natureza do trabalho, o objetivo, o método, os resultados e as conclusões, visando fornecer elementos para o leitor decidir sobre a consulta do trabalho no todo.

Palavras-chave: Palavra 1. Palavra 2. Palavra 3. Palavra 4. Palavra 5.

ABSTRACT

Elemento obrigatório para todos os trabalhos de conclusão de curso. Opcional para os demais trabalhos acadêmicos, inclusive para artigo científico. Constitui a versão do resumo em português para um idioma de divulgação internacional. Deve aparecer em página distinta e seguindo a mesma formatação do resumo em português.

Keywords: Keyword 1. Keyword 2. Keyword 3. Keyword 4. Keyword 5.

LISTA DE ILUSTRAÇÕES

Figura 1 – Forças internas: seção em um sólido qualquer	22
Figura 2 – Estado de tensão	23
Figura 3 – Função de deslocamento sobre a região de um sólido	26
Figura 4 – Deformação de um elemento quadrado infinitesimal	27
Figura 5 – quadrilátero deformado	30
Figura 6 – Domínio discretizado em elementos triangulares.	38
Figura 7 – Um triângulo de deformações constantes (CST).	39
Figura 8 – Um triângulo de deformações constantes sob carregamentos (CST) sob carregamentos uniformes.	44
Figura 9 – Uma estrutura discretizada em elementos CST.	46
Figura 10 – Elemento tetraédrico	54
Figura 11 – Logo estilizada de PHILLIPO.jl	57
Figura 12 – Fluxograma de execução: GID	59
Figura 13 – Fluxograma de execução: PHILLIPO.jl	60
Figura 14 – Parte do arquivo de condições de contorno: PHILLIPO.cnd	63
Figura 15 – Parte do arquivo de condições de contorno: PHILLIPO.cnd	64
Figura 16 – Arquivo de dados gerais: PHILLIPO.prb	64
Figura 17 – Arquivo de materiais: PHILLIPO.mat	64
Figura 18 – Arquivo de saída do quarto caso de verificação: 4 verification case.dat . . .	66
Figura 19 – Arquivo de execução: PHILLIPO.bat	67
Figura 20 – Arquivo de execução: link.jl	67
Figura 21 – Parte do arquivo principal do módulo: PHILLIPO.jl	68
Figura 22 – Logo da linguagem Julia	69
Figura 23 – O cubo unitário.	73
Figura 24 – Condições de contorno para os casos tridimensionais.	74
Figura 25 – O quadrado unitário.	77
Figura 26 – Condições de contorno para os casos bidimensionais.	78
Figura 27 – Uma viga longa.	80
Figura 28 – Comparação dos deslocamentos da linha elástica da viga longa com elementos tetraédricos.	81
Figura 29 – Comparação dos deslocamentos da linha elástica da viga longa com elementos CST.	81

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 – Descrição dos nós para a malha do cubo unitário.	73
Tabela 2 – conectividade dos elementos na malha do cubo unitário.	73
Tabela 3 – Deslocamentos nodais para o primeiro caso tridimensional.	74
Tabela 4 – Tensões sobre os elementos para o primeiro caso tridimensional.	75
Tabela 5 – Deslocamentos nodais para o segundo caso tridimensional.	75
Tabela 6 – Tensões sobre os elementos para o segundo caso tridimensional.	75
Tabela 7 – Deslocamentos nodais para o terceiro caso tridimensional.	76
Tabela 8 – Tensões sobre os elementos para o terceiro caso tridimensional.	76
Tabela 9 – Descrição dos nós para a malha do quadrado unitário.	77
Tabela 10 – conectividade dos elementos na malha do quadrado unitário.	77
Tabela 11 – Deslocamentos nodais para o primeiro caso bidimensionais.	77
Tabela 12 – Tensões sobre os elementos para o primeiro caso tridimensional.	78
Tabela 13 – Deslocamentos nodais para o segundo caso bidimensionais.	78
Tabela 14 – Tensões sobre os elementos para o segundo caso tridimensional.	79
Tabela 15 – Deslocamentos nodais para o terceiro caso bidimensionais.	79
Tabela 16 – Tensões sobre os elementos para o terceiro caso tridimensional.	79

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

MEF	Método dos Elementos Finitos
FEM	Finite Element Method
MVF	Método dos volumes finitos
SI	Sistema Internacional de Unidades

LISTA DE SÍMBOLOS

σ	tensor de tensões
ε	tensor de deformações
\mathcal{B}	um corpo sólido, elástico, homogêneo e isotrópico, em equilíbrio
σ_{ij}	tensão na direção i e sentido j
ε_{ij}	deformação na direção i e sentido j
Ω	região que compreende os pontos de um sólido
\hat{n}	um versor

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	16
1.1	MOTIVAÇÃO	17
1.2	OBJETIVO	18
1.2.1	Objetivos propostos	18
1.3	ORGANIZAÇÃO DO DOCUMENTO	18
2	A MECÂNICA DOS SÓLIDOS: TENSÃO, DEFORMAÇÃO E DESLO- CAMENTO	20
2.1	TENSÃO	20
2.1.1	Equações diferenciais governantes do equilíbrio estático	23
2.2	DESLOCAMENTO E DEFORMAÇÃO	25
2.3	A LEI DE HOOKE	29
2.3.1	A Lei de Hooke Uniaxial	29
2.3.2	A Lei de Hooke em Cisalhamento	30
2.3.3	O Coeficiente de Poisson	31
2.3.4	O Princípio da Sobreposição & A Lei de Hooke Generalizada	31
2.3.5	Estado Plano de Deformação e de Tensão	33
2.4	TEORIA DA ENERGIA DE DISTORÇÃO MÁXIMA: A TENSÃO EQUI- VALENTE DE VON MISES	34
3	O MÉTODO DOS ELEMENTOS FINITOS	37
3.1	AS FUNÇÕES DE INTERPOLAÇÃO	38
3.2	AS RELAÇÕES DE TENSÃO-DEFORMAÇÃO-DESLOCAMENTO . . .	41
3.3	A MATRIZ DE RIGIDEZ LOCAL	42
3.4	MATRIZ DE RIGIDEZ GLOBAL E CONDIÇÕES DE CONTORNO . . .	45
3.4.1	Solução direta do sistema global	50
3.5	EXPRESSÕES PARA O TETRAEDRO LINEAR	53
3.5.1	As funções de interpolação	53
3.5.2	As Relações de Tensão-Deformação-Deslocamento	55
3.5.3	As condições de contorno	56
4	PHILLIPO	57
4.1	DISTRIBUIÇÃO PELO PKG.JL E IMPORTAÇÃO DOS <i>PROBLEMS TY- PES</i> NO GID	58
4.2	FLUXO DE EXECUÇÃO	58
4.2.1	Pré-processamento	60
4.2.2	Processamento	61
4.3	INTEGRAÇÃO COM GID	62

4.3.1	PHILLIPO.gid	62
4.4	ESTRUTURA DO MÓDULO PHILLIPO.JL	67
4.4.1	PHILLIPO.jl	68
5	JULIA & SEUS MÓDULOS	69
5.1	O ESCOPO DE JULIA	70
6	VALIDAÇÃO & VERIFICAÇÃO	71
6.1	VERIFICAÇÃO	71
6.1.1	Casos tridimensionais (elemento tetraédrico)	72
6.1.2	Casos bidimensionais (elemento triangular)	76
6.2	VALIDAÇÃO	79
	REFERÊNCIAS	82
	ANEXO A – CÓDIGO FONTE DE PHILLIPO.JL	84

1 INTRODUÇÃO

I think of myself as an engineer, not as a visionary or 'big thinker.' I don't have any lofty goals. (Linus Torvalds)

A limitação do ser humano em captar integralmente os fenômenos ao seu redor é evidente, a ponto de não conseguir compreender como eles se dão. Analisar um fenômeno, portanto, separando-o em pequenas partes (ou elementos) cujo comportamento é mais facilmente determinado, e a partir da justaposição delas reconstruir o funcionamento do próprio fenômeno, é um modo intuitivo que engenheiros e cientistas procedem em seus estudos (ZIENKIEWICZ, 2000, p. 2).

O Método dos Elementos Finitos consiste, basicamente, na ideia apresentada de análise, em que o domínio contínuo de uma equação diferencial é subdividido em elementos discretos, descritos por um conjunto de nós formando uma malha. Os elementos têm suas propriedades herdadas do domínio (características, condições de contorno etc.), porém, a descrição do fenômeno físico é simplificada por meio de funções de interpolação, que interpolam os valores os valores do campo. A equação diferencial então é aplicada sobre essas funções, gerando um conjunto de equações algébricas, que são, por fim, justapostas sobre os nós da malha, de modo a garantir continuidade, formando um sistema, cuja solução é uma aproximação da solução da própria equação diferencial. (QUEK; LIU, 2003, pág. 1 e 2)

Esse procedimento é custoso em termos de cálculo, visto que para cada elemento é necessário calcular suas funções de interpolação, e depois justapor todos em um grande sistema de equações algébricas, cuja solução também é custosa. É evidente, então, que o Método dos Elementos Finitos, ou os métodos numéricos em geral, acompanham o desenvolvimento da programação, impulsionado pelo avanço do processamento computacional (OñATE, 2009, pág. 2). O poder computacional permite que se trabalhe com um volume inconcebível para a capacidade humana.

Os algoritmos e a estrutura de dados implementados passam a ser tão relevantes quanto a própria equação diferencial. Então, é de se esperar que uma aplicação desse método seja acompanhada de aspectos de estruturação de código, cujo objetivo não seja só a otimização computacional, mas a legibilidade e empacotamento, que são características úteis quando se espera a reutilização, aprimoramento continuado e, acima de tudo, a comunicação e distribuição do código-fonte.

A escolha da linguagem de programação para uma aplicação do MEF, é o passo fundamental para se planejar a estrutura do código, pois, são as ferramentas de sintaxe e processamento que a linguagem e seu compilador/interpretador oferecem que vão ditar, em parte, a forma como os algoritmos são implementados, além de outros aspectos de execução, como otimização e estrutura de dados. Comumente, programas comerciais de análise por elementos finitos, como Abaqus e Ansys, são escritos em linguagens compiladas, basicamente, C e FORTRAN, que são sinônimos de robustez e desempenho. Entretanto, também são conhecidas pela sua prolixidade,

complexidade de sintaxe de distribuição de bibliotecas, empacotamento etc

Entretanto, linguagens compiladas não se mostram mais atrativas para se desenvolver, com praticidade, não só aplicações do MEF, como também a maioria das aplicações práticas na vida dos engenheiros e cientistas (automatização de tarefas, análise de dados e até computação algébrica simbólica). Linguagens como Python e suas bibliotecas, como Pandas e NumPy, utilizando-se de sua sintaxe simplificada, tipagem dinâmica e popularidade (ocupando o TIOBE Index três vezes nos últimos cinco anos), oferecem uma praticidade maior, e possibilitam uma produtividade maior na construção de programas. A conveniência dessas linguagens, porém, é acompanhada de um preço: o desempenho.

A performance de linguagens interpretadas é notavelmente inferior a linguagens compiladas, quando são implementadas em problemas grandes e complexos, envolvendo muito cálculos e um grande volume de variáveis. Esse dilema, entre performance (de linguagens como C e FORTRAN) e produtividade (de linguagens como Python) é conhecido como *The Two language Problem*, em tradução livre, O Problema de Duas Linguagens.

Visando unificar esses dois mundos, e diminuir a distância entre as linguagens, engenheiros do MIT desenvolveram Julia, "a programming language for the scientific community that combines features of productivity languages, such as Python or MATLAB, with characteristics of performance-oriented languages, such as C++ or Fortran." (BEZANSON et al., 2018, tradução livre) Por conta do sucesso de Julia, e de sua comunidade engajada, a linguagem vem sendo adotada mais e mais no âmbito acadêmico, incluindo na área de elementos finitos, o que motivou a escolha dela para o desenvolvimento deste trabalho.

O Método dos Elementos Finitos é uma ferramenta numérica poderosa para a análise em sólidos, e o seu desenvolvimento em linguagens como Julia oferece uma porta de entrada muito convidativa para novos engenheiros, assim como impulsiona novas pesquisas no campo. Esta monografia aborda o desenvolvimento de um desses programas: PHILLIPO.jl, cujo o objetivo do desenvolvendo é expor e aplicar o MEF, com alguns aspectos de programação funcional, programação paralela e empacotamento.

1.1 MOTIVAÇÃO

O tema surgiu quando o autor se encontrou na tarefa de adicionar uma funcionalidade em um software já existente de elementos finitos, e, já visto uma introdução ao assunto na graduação, teve o interesse de se aprofundar. Então resolveu por criar seu próprio programa, em Julia, aplicando seus conhecimento prévios de projeto de software, desenvolvendo mais o seu entendimento sobre o Método dos Elementos Finitos, assim como de aspectos numéricos computacionais.

1.2 OBJETIVO

O objetivo geral deste trabalho foi desenvolver uma aplicação de MEF para a análise de tensão e deformação em estruturas sólidas sob carregamentos estáticos em regime elástico linear, utilizando para tanto, aspectos de programação funcional, processamento paralelo, focando em algumas características empacotamento de implementação e de legibilidade, com o intuito secundário de expor as facilidades e vantagens da linguagem Julia, como também servir de exemplo menor.

1.2.1 Objetivos propostos

Foram propostos os seguintes objetivos específicos:

1. estudar o MEF aplicado na determinação de deformações de estruturas sólidas em regime elástico e linear, sob carregamentos estáticos (implementando os elementos triangulares e tetraédricos, de deformações constantes);
2. programar os algoritmos de MEF em Julia;
3. desenvolver um módulo que seja distribuível pelo gerenciador de pacotes Pkg.jl, em um repositório público hospedado no GitHub;
4. aplicar processamento paralelo em determinadas partes do programa em que as funções nativas não o fazem, a fim de utilizar mais da capacidade de processamento do computador que um código feito sobre o paradigma estruturado;
5. estudar as características da linguagem Julia, e como ela pode ser uma alternativa viável para C e FORTRAN em programação científica de alta performance.

1.3 ORGANIZAÇÃO DO DOCUMENTO

Este documento aborda o desenvolvimento de um módulo em Julia, denominado PHILLIPO.jl, que aplica o Método de Elementos Finitos, integrado à ferramenta de pré e pós-processamento GiD, para realizar a análise das tensões em estruturas sólidas e elásticas sob carregamentos estáticos, e está organizado em capítulos que abordam:

1. A mecânica dos sólidos: tensão e deformação no regime elástico;
2. O método de elementos finitos aplicado no equilíbrio estático de estruturas sólidas;
3. A linguagem de programação Julia: o processamento paralelo acessível;
4. PHILLIPO.jl;
5. Validação e verificação de resultados;

6. Objetivos alcançados e melhorias em projetos futuros;
7. Conclusão.

O código fonte de PHILLIPO.jl, sob a licença LGPL, assim como o das interfaces de integração com o GiD, estão impressas em anexos, cujos arquivos, incluindo o \LaTeX deste documento, podem ser acessados no repositório: <https://github.com/lucas-bublitz/PHILLIPO.jl>.

Todas as figuras foram criadas pelo próprio autor.

2 A MECÂNICA DOS SÓLIDOS: TENSÃO, DEFORMAÇÃO E DESLOCAMENTO

A Mecânica dos Sólidos estuda o comportamento de objetos sólidos sob carregamentos externos, aplicando métodos analíticos para determinar características de resistência, rigidez e estabilidade. Sua aplicação é voltada ao projeto de estruturas a fim de que cumpram determinadas exigências, tais como deformação máxima, capacidade de carga e peso, ou economia de materiais. E, por meio de ferramentas matemáticas, estuda os efeitos de tensão e deformação no interior de corpos sólidos (POPOV, 1990, pág. 2).

Um corpo sólido por ser descrito como um conjunto de pontos materiais que resistem a forças cisalhantes, ou seja, que resistem a trações tangenciais às suas superfícies. Neste trabalho são considerados corpos sólido elásticos, homogêneos e isotrópicos. Aqui, um corpo com essas características é denominado \mathcal{B} .

Corpos sólidos elásticos são aqueles que, quando submetidos a carregamentos, deformam-se, mas quando o carregamento é retirado, retornam à sua forma original. Corpos sólidos homogêneos são aqueles que possuem as mesmas propriedades físicas em todos os pontos materiais (tais como massa específica, rigidez etc.), de modo que uma porção do corpo seja indistinta do restante. Corpos sólidos isotrópicos são aqueles que possuem as mesmas propriedades físicas em todas direções do espaço.

Este capítulo aborda os seguintes temas de Mecânica dos Sólidos, relevantes para o desenvolvimento inicial do módulo PHILLIPO.jl voltado à análise de estruturas elásticas sob carregamentos constantes:

1. conceito de tensão;
2. conceito de deslocamento e deformação;
3. comportamento dos materiais: a lei de Hooke generalizada;

2.1 TENSÃO

Um corpo sólido se deforma quando submetido a carregamentos externos¹ sobre sua geometria, de modo que qualquer seção plana arbitrária do corpo revele forças internas que estejam em equilíbrio entre si, e que sejam balanceadas pelos carregamentos externos. Essas forças geralmente variam ao longo do corpo, como também dependem da orientação do plano dessa seção. Tensão define a intensidade da força interna agindo sobre uma área infinitesimal do plano de seção (POPOV, 1990, págs. 4 e 5).

Seja um corpo \mathcal{B} , sólido, em equilíbrio e de geometria qualquer, descrito sobre um sistema de referência (xyz) com origem em o , submetido a forças externas na forma do carregamento F . Sejam também as seções $S_{1,2,3}$, planos de corte através desse corpo (normais aos

¹ Expressão que se refere tanto a carregamentos térmicos, quanto mecânicos, embora o primeiro não seja assunto deste texto.

versores do sistema de referência), em que atuam as forças internas P , conforme a figura 1a. ΔP é a resultante de forças que atuam sobre uma área ΔA (centrada em um certo ponto p), pertencente a S . O limite da razão entre cada componente de ΔP (tangenciais e normais) e a área ΔA , quando $\Delta A \rightarrow 0$, define o vetor tração, cuja decomposição nos eixos x , y e z , define as componentes do tensor tensão sobre o ponto p , de forma que

$$\tau_{xx} = \lim_{\Delta A_x \rightarrow 0} \frac{\Delta P_x}{\Delta A_x}, \quad \tau_{xy} = \lim_{\Delta A_x \rightarrow 0} \frac{\Delta P_y}{\Delta A_x}, \quad \tau_{xz} = \lim_{\Delta A_x \rightarrow 0} \frac{\Delta P_z}{\Delta A_x}, \quad (1)$$

em que os índices de τ indicam, o primeiro, a normal do plano infinitesimal em que a tensão atua, e, o segundo, sua direção. Por conveniência, as tensões normais (aquelas que atuam perpendicularmente ao plano) são representadas por σ , ao invés de se utilizar τ com índices repetidos ($\tau_{xx} \equiv \sigma_x$). O símbolo *tau*, então, é reservado às tensões de cisalhamento, que atuam tangencialmente ao plano infinitesimal. No SI, a tensão é mensurada em Pascal ([Pa] = [N/m²]) (POPOV, 1990, pág. 5).

Se o mesmo procedimento for realizado para cada face do elemento cúbico, formado por mais três seções paralelas a $S_{1,2,3}$ da figura 1c, teremos a configuração da tração em três planos perpendiculares entre si para um certo ponto p em \mathcal{B} , conforme a figura 2, o que descreve o estado de tensão para aquele ponto. As componentes do estado de tensão podem ser dispostas na forma de uma matriz representativa do tensor de segunda ordem, denominado tensor de tensões, e, de acordo com Popov (1990), é

$$\boldsymbol{\sigma} = \begin{bmatrix} \sigma_x & \tau_{yx} & \tau_{zx} \\ \tau_{xy} & \sigma_y & \tau_{zy} \\ \tau_{xz} & \tau_{yz} & \sigma_z \end{bmatrix}, \quad (2)$$

em que a linha indica o plano em que a componente age, e a coluna, sua direção.

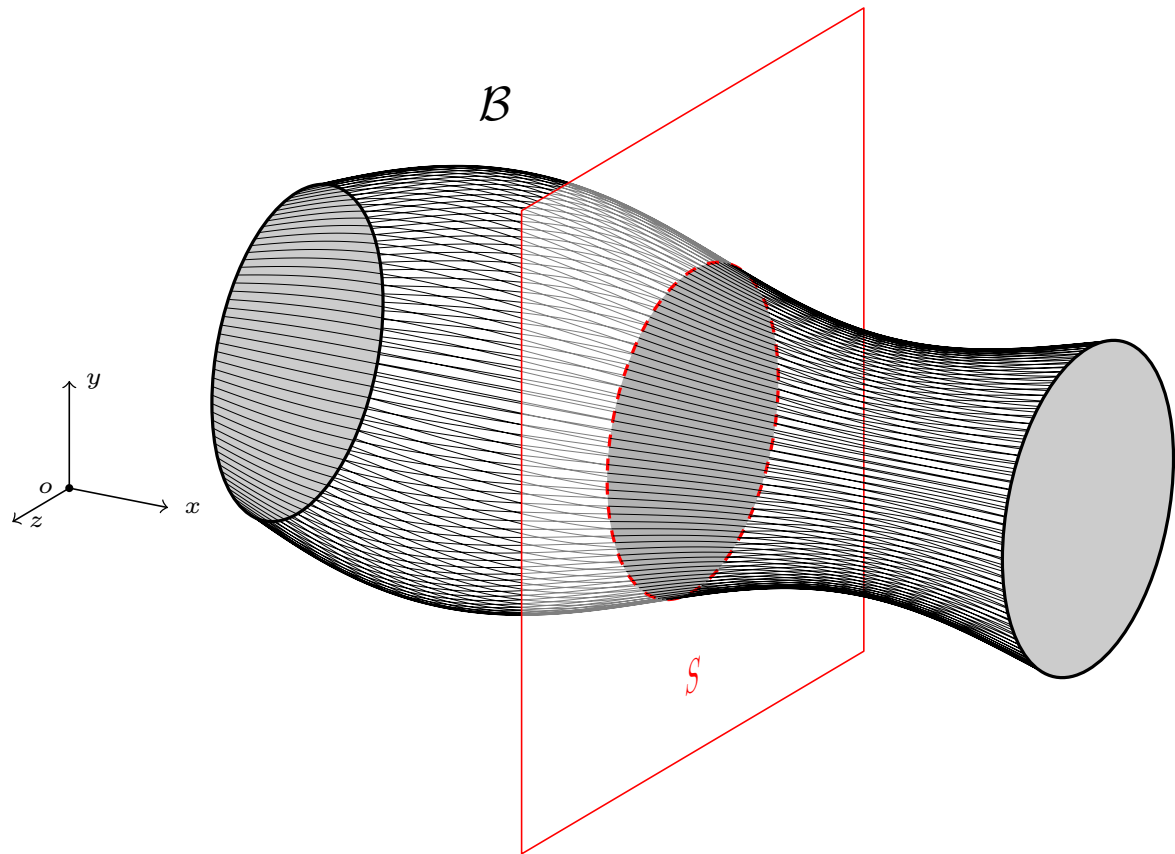
O tensor de tensões é simétrico, o que pode ser demonstrado realizando o somatório de momentos sobre o elemento infinitesimal de tensão, de modo que esteja em equilíbrio. Oportunamente, escolhendo o ponto central para a análise do equilíbrio angular, podemos descrever as seguintes relações (POPOV, 1990, pág. 8):

$$\begin{cases} \vec{i}: \tau_{zy}(dxdy)\frac{dz}{2} - \tau_{yz}(dxdz)\frac{dy}{2} - \tau_{zy}(dydx)\frac{dz}{2} + \tau_{yz}(dxdy)\frac{dy}{2} = 0 \\ \vec{j}: \tau_{xz}(dydz)\frac{dx}{2} - \tau_{zx}(dxdy)\frac{dz}{2} - \tau_{zx}(dxdy)\frac{dz}{2} + \tau_{xz}(dydz)\frac{dx}{2} = 0 \\ \vec{k}: \tau_{yx}(dxdz)\frac{dy}{2} - \tau_{xy}(dydz)\frac{dx}{2} - \tau_{xy}(dydz)\frac{dx}{2} + \tau_{yx}(dxdz)\frac{dy}{2} = 0 \end{cases} \implies \begin{cases} \tau_{zy} = \tau_{yz} \\ \tau_{xz} = \tau_{zx} \\ \tau_{yx} = \tau_{xy} \end{cases}. \quad (3)$$

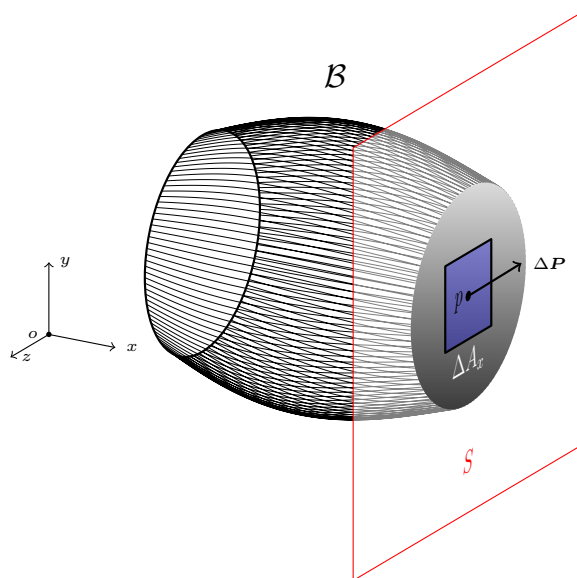
Portanto,

$$\tau_{ij} = \tau_{ji} \iff \boldsymbol{\sigma} = \boldsymbol{\sigma}^t. \quad (4)$$

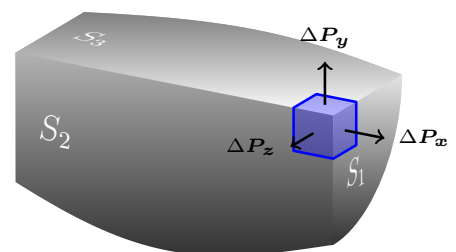
Figura 1 – Forças internas: seção em um sólido qualquer



(a)

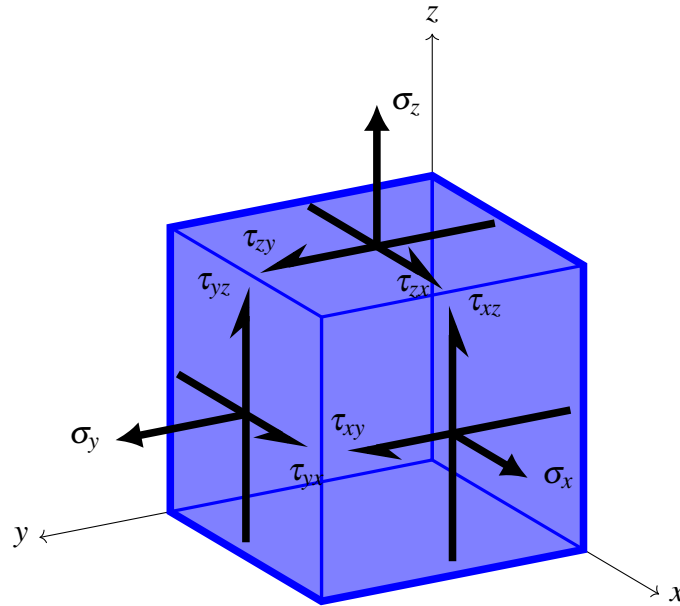


(b)



(c)

Figura 2 – Estado de tensão



Essa propriedade implica em que o tensor de tensões possua apenas seis componentes independentes, ao invés de nove. Aproveitando-se disso, a notação de Voigt reduz a ordem do tensor, distribuindo as componentes em uma matriz coluna de seis elementos, tal que, de acordo com Roylance (1995),

$$\{\boldsymbol{\sigma}\} = \begin{bmatrix} \sigma_x & \sigma_y & \sigma_z & \tau_{xy} & \tau_{xz} & \tau_{yz} \end{bmatrix}^t. \quad (5)$$

2.1.1 Equações diferenciais governantes do equilíbrio estático

Outro fato importante sobre o estado de tensão vem do equilíbrio de forças. Assumindo que a distribuição de tensão $\boldsymbol{\sigma}(x, y, z)$ é contínua e diferenciável ao longo do domínio Ω do sólido \mathcal{B} , podemos analisar sua variação sobre um elemento cúbico infinitesimal, de modo que a força resultante sobre ele seja nula. Como o tensor de tensões representa a decomposição das forças internas agindo sobre as faces de um cubo infinitesimal, o somatório de forças é a própria integral da tensão ao longo dessas superfícies, ou seja,

$$\oint_A \boldsymbol{\sigma} \cdot d\mathbf{A} = 0. \quad (6)$$

São desconsideradas, aqui, as forças de campo, como gravidade ou eletromagnética. (ROY-LANCE, 1995, pág. 4, The Equilibrium Equations)

A integração é realizada sobre uma região fechada, fronteira de um subdomínio de Ω , e portanto, como a tensão foi assumida contínua e diferenciável em todo Ω , podemos aplicar o

teorema da divergência² à equação 6, obtendo que

$$\int_V \nabla \cdot \boldsymbol{\sigma} dV = 0. \quad (7)$$

Essa relação é válida para qualquer volume infinitesimal no sólido, independente de sua orientação (ou seja, independente da escolha do sistema de referência), portanto o domínio de integração V é um volume arbitrário. Deste modo, como a integração deve ser nula independentemente do subdomínio de Ω escolhido para compor V , a função integrada deve ser nula em todo domínio, ou seja,

$$\nabla \cdot \boldsymbol{\sigma} = 0. \quad (8)$$

Esse resultado é o sistema de equações diferenciais parciais de equilíbrio, que governa o estado de tensão. A partir dele, é possível obter a distribuição de tensão sobre o sólido, desde que sejam conhecidas as condições de contorno. Comumente esta distribuição é solucionada por métodos numéricos, como o MEF, devido à dificuldade em encontrar soluções analíticas para geometrias muito complicadas.

Explicitamente, para três dimensões, o sistema de equações diferenciais de equilíbrio é

$$\frac{\partial \sigma_x}{\partial x} + \frac{\partial \tau_{yx}}{\partial y} + \frac{\partial \tau_{zx}}{\partial z} = 0, \quad (9)$$

$$\frac{\partial \tau_{xy}}{\partial x} + \frac{\partial \sigma_y}{\partial y} + \frac{\partial \tau_{zy}}{\partial z} = 0, \quad (10)$$

$$\frac{\partial \tau_{xz}}{\partial x} + \frac{\partial \tau_{yz}}{\partial y} + \frac{\partial \sigma_z}{\partial z} = 0. \quad (11)$$

A direção em que o elemento infinitesimal é orientado altera as componentes do seu estado de tensão, de modo que sua rotação evidencia direções nas quais as tensões não tem componentes tangenciais, ou seja, têm cisalhamento nulo. Essas tensões são chamadas, então, tensões principais.

O tensor de tensões é uma transformação linear que recebe um vetor unitário \hat{n} e retorna o vetor da tração resultante, t , agindo sobre um plano normal a \hat{n} .³ Caso exista um vetor tração resultante que tenha a mesma direção de \hat{n} , a tensão não terá componentes tangenciais, uma vez que, sendo colinear ao vetor unitário, é normal ao plano definido por ele. Em termos matemáticos, é o mesmo que $t = \sigma \hat{n}$ ⁴, ou, aplicando a transformação linear $\boldsymbol{\sigma}$,

$$\boldsymbol{\sigma} \hat{n} = \sigma \hat{n}. \quad (12)$$

² O teorema da divergência, também conhecido como teorema de Gauss, afirma que, dada uma função vetorial contínua e diferenciável sobre uma região fechada: $\oint_{\partial\Omega} f dA = \iiint_{\Omega} \nabla \cdot f dV$, em que $\partial\Omega$ representa a fronteira da região Ω .

³ Aplicando um vetor \hat{n} trivial ($\hat{i}, \hat{j}, \hat{k}$) à transformação $\boldsymbol{\sigma}$, obtém-se as próprias tensões mostradas na figura 2, como já era de se esperar.

⁴ $|\sigma|$, nesse sentido, seria a norma da tração resultante, uma vez que \hat{n} é unitário e adimensional. $|t| = |\sigma \hat{n}| = |\sigma| |\hat{n}| = |\sigma|$

Observando a forma dessa equação, é evidente que \hat{n} é um autovetor de $\boldsymbol{\sigma}$, e σ é o autovalor correspondente, portanto, determiná-los é equivalente a encontrar as tensões principais, ou seja, as raízes do polinômio característica do tensor de tensões:

$$\det(\boldsymbol{\sigma} - \sigma \mathbf{I}) = 0, \quad \text{ou} \quad \begin{vmatrix} \sigma_x - \sigma & \tau_{yx} & \tau_{zx} \\ \tau_{xy} & \sigma_y - \sigma & \tau_{zy} \\ \tau_{xz} & \tau_{yz} & \sigma_z - \sigma \end{vmatrix} = 0. \quad (13)$$

Para o caso bidimensional, a solução desse sistema é bem conhecida, sendo dado por:

$$\sigma_{1,2} = \frac{\sigma_x + \sigma_y}{2} \pm \sqrt{\left(\frac{\sigma_x - \sigma_y}{2}\right)^2 + \tau_{xy}^2}. \quad (14)$$

2.2 DESLOCAMENTO E DEFORMAÇÃO

O deslocamento de um sólido é uma função vetorial que mapeia a cada ponto do seu domínio à variação entre sua posição original e a deslocada, de modo que se possa descrever sua posição final sofre em termos do deslocamento e de sua posição original.

Seja um corpo \mathcal{B} definido sobre uma região Ω , e a função $\boldsymbol{\varphi}(x)$, a representação de seu deslocamento, a transformação que mapeia a posição original na posição deformada de cada ponto, mapeando Ω para Ω' , é dada por

$$T(x) = x + \boldsymbol{\varphi}(x), \quad U(x, y, z) = \begin{Bmatrix} u(x, y, z) \\ v(x, y, z) \\ w(x, y, z) \end{Bmatrix}. \quad (15)$$

em que u, v, w são as componentes do deslocamento nas direções de x, y, z , respectivamente, $x = (x, y, z)$ é o vetor posição do ponto (ver figura 3).

Quando um sólido passa por uma transformação de deslocamentos, pode sofrer translações e deformações, ambas caracterizadas pelas distâncias entre pontos do corpo antes e após a transformação. A figura 3 exibe a transformação sobre um corpo \mathcal{B} , e como o segmento de reta AB é mapeado para sua nova configuração sobre Ω' .

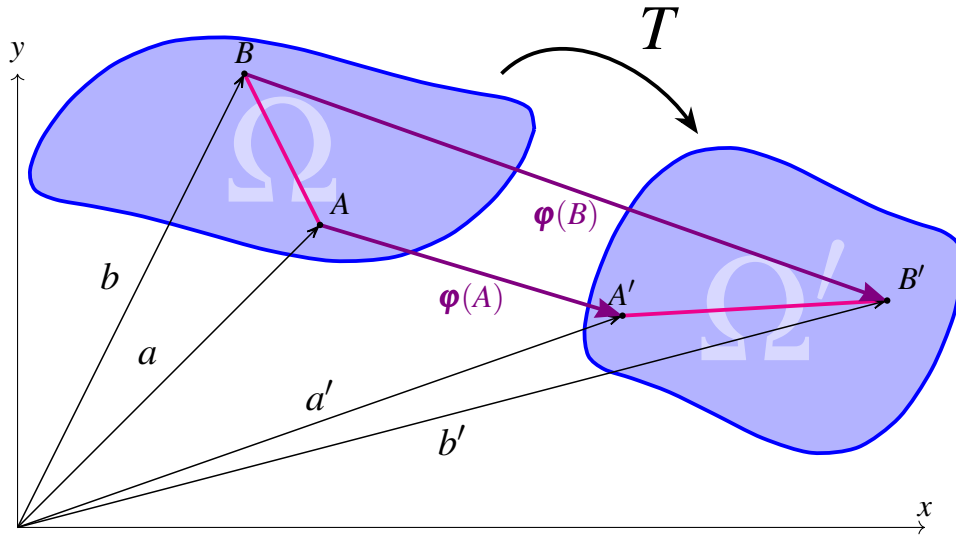
Nesse sentido, são duas as possibilidades:

1. As distâncias entre os pontos permanecem a mesmas. Nesse caso, podemos dizer que a transformação é uma translação⁵, e que o corpo não sofreu de deformação, pois sua geometria foi conservada. Em termos matemáticos,

$$\|T(a) - T(b)\| = \|a - b\|, \quad \forall a, b \in \Omega. \quad (16)$$

⁵ Essa transformação também é uma isomeria, pois preserva a métrica do espaço, ou seja, o produto interno, de forma que $T(a \cdot b) = T(a) \cdot T(b)$.

Figura 3 – Função de deslocamento sobre a região de um sólido



2. As distâncias entre os pontos não se conservam. Quando isso ocorre, a geometria do corpo é alterada, e podemos dizer que houve deformação ⁶. Em termos matemáticos, podemos dizer que

$$\exists a, b \in \Omega : \|T(a) - T(b)\| \neq \|a - b\|. \quad (17)$$

A deformação normal é o alongamento ou encurtamento sofrido pelas linhas entre os pontos do corpo, de forma que é descrita entre a variação do comprimento dos segmentos e o comprimento original, ou seja, a variação relativa do comprimento. Como deformação geralmente varia ao longo do sólido, podemos descrevê-la observando seus efeitos sobre um elemento infinitesimal, e, similarmente à tensão, descrevendo um tensor de segunda ordem, com componentes normais e cisalhantes. (figura 4) (POPOV, 1990, pág. 143).

A figura 4a mostra um elemento infinitesimal ($dx \times dy$), em que o segmento AD sofreu tanto uma translação quanto uma deformação, dados pelo campo de deslocamento ϕ , de modo a se tornar $A'D'$. A deformação normal desse segmento é dado por

$$\epsilon_x = \frac{\|A'D'\| - \|AD\|}{\|AD\|}. \quad (18)$$

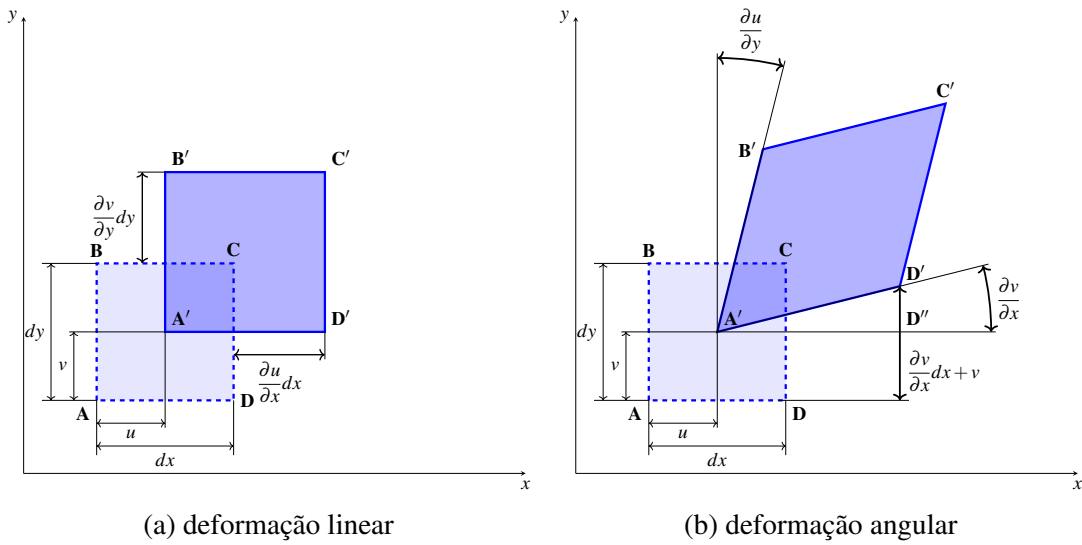
O comprimento do segmento antes da deformação AD é o próprio infinitesimal dx , já o deformado, é dado pela diferença das posições dos pontos deslocados $\|A'D'\|$, em termos do campo de deslocamento, é o mesmo que

$$\|A'D'\| = (D_x + u(D_x)) - (A_x + u(A_x)), \quad (19)$$

em que o subscrito x denota a respectiva componente da posição do ponto.

⁶ Deformação e translação não são excludentes. Um corpo pode deformar e também transladar.

Figura 4 – Deformação de um elemento quadrado infinitesimal



Como $D_x = A_x + dx$, podemos expandir a função u ao redor de A_x , obtendo que⁷

$$u(D_x) = u(A_x + dx) = u + \frac{\partial u}{\partial x} dx, \quad (20)$$

Portanto,

$$||A'D'|| - ||AD|| = (D_x + u + \frac{\partial u}{\partial x} dx - u - A_x) - (D_x - A_x) = \frac{\partial u}{\partial x} dx \quad (21)$$

em que A_x representa a projeção do ponto A em x . Agora, substituindo essa expressão na equação 18, temos a definição da deformação normal na direção de x , em que

$$\epsilon_x = \frac{\partial u}{\partial x}. \quad (22)$$

O mesmo procedimento pode ser feito tanto na direção de y , com o segmento AB , quanto na direção de z , assumindo um elemento infinitesimal cúbico, tal qual a figura 2 do estado de tensão, obtendo-se, assim, todas as definições básicas de deformação normal (POPOV, 1990):

$$\epsilon_x = \frac{\partial u}{\partial x}, \quad \epsilon_y = \frac{\partial v}{\partial y}, \quad \epsilon_z = \frac{\partial w}{\partial z}. \quad (23)$$

Na figura 4b, ocorre a deformação por cisalhamento, em que os segmentos AD e AB são, além de transladados, rotacionados em torno de A' , de modo a distorcer a geometria do elemento. Agora, a deformação ocorre tanto na direção em x , quanto em y , e é definida pela alteração do ângulo reto $\angle BAD$, determinada, em termos do campo de deslocamentos (tal como na deformação normal) analisando o triângulo $A'D'D''$.

⁷ Os termos $O(3)$ da expansão são desprezados pois a diferença entre os pontos é infinitesimal, logo $dx \gg dx^2$.

A função v , quando variada em x da posição de A até D , descreve o deslocamento dos pontos da face inferior do elemento infinitesimal na direção de y , ou seja, a hipotenusa do triângulo $A'D'D''$. A inclinação, portanto, dessa reta é própria derivada de v na direção x , ou seja,

$$\angle D'A'D'' = \tan \frac{\partial v}{\partial x} \approx \frac{\partial v}{\partial x}.^8 \quad (24)$$

Outro modo de se obter a mesma expressão é aplicar a definição trigonométrica da tangente sobre o triângulo $A'D'D''$, de forma que, em suma,

$$|A'D''| = \sqrt{dx^2 - \left(\frac{\partial v}{\partial x}dx\right)^2}, \text{ Teorema de Pitágoras} \quad (25)$$

$$= \sqrt{dx^2}, \left(\frac{\partial v}{\partial x}dx\right)^2 \ll dx, \quad (26)$$

$$|A'D''| = dx, \quad (27)$$

$$\tan \angle D'A'D'' = \frac{|D'D''|}{|A'D''|}, \quad (28)$$

$$= \frac{\partial v}{\partial x}dx \frac{1}{dx}, \quad (29)$$

$$= \frac{\partial v}{\partial x}. \quad (30)$$

$$(31)$$

O mesmo pode ser feito na direção de y , para encontrar a inclinação do segmento $A'B'$, como também para z , considerando um elemento infinitesimal cúbico.

Portanto, a deformação cisalhante do elemento infinitesimal é dada, em termos do deslocamento, por

$$\gamma_{xy} = \gamma_{yx} = \frac{\partial u}{\partial y} + \frac{\partial v}{\partial x} \quad (32)$$

$$\gamma_{xz} = \gamma_{zx} = \frac{\partial w}{\partial x} + \frac{\partial u}{\partial z} \quad (33)$$

$$\gamma_{yz} = \gamma_{zy} = \frac{\partial w}{\partial y} + \frac{\partial v}{\partial z} \quad (34)$$

$$(35)$$

Por convenção⁹, $\gamma_{ij} = 2\epsilon_{ij}$, $i \neq j$. (ROYLANCE, 1995)

⁸ É essa aproximação é devida pois para ângulos suficientemente pequenos: $\tan \theta = \theta$, o que pode ser verificado expandindo a série de Taylor ao redor de $x = 0$.

⁹ Essa convenção não é mero simbolismo, mas faz com que o tensor de deformações tenha propriedades interessantes; é possível, porém, intuir uma razão para tanto, observado que, para um mesmo elemento, a deformação por cisalhamento em x já tem a parcela da deformação na direção de y , e por conta disso, são divididas. (POPOV, 1990)

O tensor de deformações é

$$[\varepsilon] = \begin{bmatrix} \varepsilon_{xx} & \varepsilon_{xy} & \varepsilon_{xz} \\ \varepsilon_{yx} & \varepsilon_{yy} & \varepsilon_{yz} \\ \varepsilon_{zx} & \varepsilon_{zy} & \varepsilon_{zz} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \frac{\partial u}{\partial x} & \frac{1}{2} \left(\frac{\partial u}{\partial y} + \frac{\partial v}{\partial x} \right) & \frac{1}{2} \left(\frac{\partial u}{\partial z} + \frac{\partial w}{\partial x} \right) \\ \frac{1}{2} \left(\frac{\partial v}{\partial x} + \frac{\partial u}{\partial y} \right) & \frac{\partial v}{\partial y} & \frac{1}{2} \left(\frac{\partial v}{\partial z} + \frac{\partial w}{\partial y} \right) \\ \frac{1}{2} \left(\frac{\partial w}{\partial x} + \frac{\partial u}{\partial z} \right) & \frac{1}{2} \left(\frac{\partial w}{\partial y} + \frac{\partial v}{\partial z} \right) & \frac{\partial w}{\partial z} \end{bmatrix}. \quad (36)$$

Tal como o tensor de tensões, o tensor de deformações é simétrico, e, portanto, só possui seis componentes independentes. Na notação de Voigt, de acordo com Roylance (1995),

$$\{\varepsilon\} = \begin{bmatrix} \varepsilon_x & \varepsilon_y & \varepsilon_z & \gamma_{xy} & \gamma_{xz} & \gamma_{yz} \end{bmatrix}^t \quad (37)$$

2.3 A LEI DE HOOKE

Em corpos sólidos, a deformação está relacionada diretamente com a tensão em seu interior, de modo que se possa, dentro de certas condições, descrever uma transformação linear entre elas. Essa transformação é nomeada *Lei de Hooke*, e, utilizando a notação de Voigt, é descrita por

$$\{\sigma\} = [C]\{\varepsilon\}. \quad (38)$$

em que $[C]$ é denominada *matriz constitutiva*¹⁰, e é definida em termos das características do material do corpo, tais como Módulo de Elasticidade e Coeficiente de Poisson.

2.3.1 A Lei de Hooke Uniaxial

Sejam o quadrilátero \mathcal{B} , um corpo sólido, homogêneo, em equilíbrio, de comprimento L , engastado em sua face esquerda, e de seção transversal A . Seja também F , uma força constante que atua sobre a face direita de \mathcal{B} , na direção de x , que a deforma em \mathcal{B}' até um comprimento $L + \Delta L$, tal como na figura 5a.

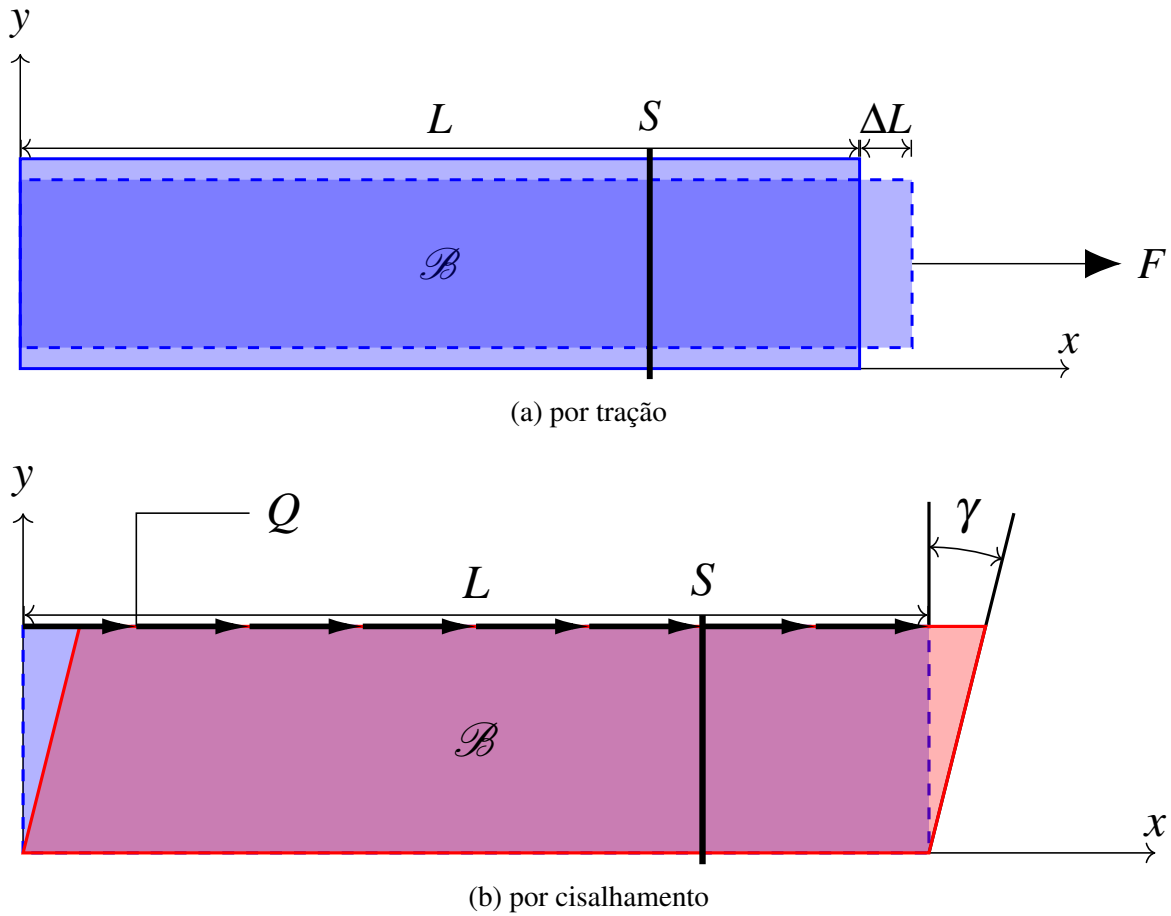
A tensão desenvolvida em um ponto de uma seção transversal S de \mathcal{B} , perpendicular à força \vec{F} , pode ser descrita em termos do módulo de elasticidade, E (também denominado Módulo de Young), que é uma característica intrínseca do material de \mathcal{B} , e da deformação, ε_x , atuando na mesma direção da força. Essa relação, denominada *Lei de Hooke Uniaxial*, é linear da forma

$$\sigma_x = E\varepsilon_x. \quad (39)$$

A unidade de E é a mesma de σ_x , o que é coerente, pois ε_x é adimensional, ou seja, o módulo de elasticidade é medido, no SI, em Pascal.

¹⁰ A matriz constitutiva é uma forma de notação abreviada para descrever essa relação. Da mesma forma que o tensor de tensões é abreviado por um vetor na notação de Voigt, devido sua simetria, a matriz constitutiva é a abreviação de do tensor de elasticidade, um tensor de quarta ordem que mapeia o espaço das deformações no das tensões.

Figura 5 – quadrilátero deformado



Essa relação desconsidera outros efeitos de deformação no interior do sólido, como a deformação transversal, ϵ_y (que pode ser observada como o encurtamento da altura da barra na figura 5a), e a por cisalhamento, γ_{xy} .¹¹

2.3.2 A Lei de Hooke em Cisalhamento

Seja um quadrilátero \mathcal{B} , um corpo sólido, homogêneo, em equilíbrio, de comprimento L , engastado em sua face inferior, e de seção transversal S , e seja Q , uma carregamento constante que atua sobre a face superior de \mathcal{B} , tangencialmente, na direção de x , que a deforma em \mathcal{B}' , inclinando-a, até um ângulo γ , tal como na figura 5b.

A tensão desenvolvida em uma seção S de \mathcal{B} , paralela ao carregamento de Q , pode ser descrita em termos do módulo de cisalhamento, G , que é uma característica intrínseca do material de \mathcal{B} , e da deformação angular, γ , atuando na inclinação das seções verticais. Essa relação, denominada *Lei de Hooke em Cisalhamento*, é linear da forma

¹¹ O limite de elasticidade do material é determinado experimentalmente, observando como se deforma sobre carregamentos controlados, determinando a região de deformações em que o material preserva-se na Lei de Hooke, ou seja, mantém uma relação linear entre deformação e tensão, e ao ser aliviado dos carregamentos externos, volta à geometria original.

$$\tau_{xy} = G\gamma_{xy} \implies \tau_{xy} = 2G\epsilon_{xy}. \quad (40)$$

O módulo de cisalhamento tem a mesma unidade de tensão, e, assim como o módulo de Young (G é adimensional), não depende da geometria do corpo, mas do material de que é feito.

2.3.3 O Coeficiente de Poisson

Na deformação uniaxial de um corpo sólido, tal como na figura 5a, é razoável que o corpo também se deforme nas direções transversais, de forma que existe, dentro de determinados limites do regime elástico, uma relação entre essas deformações. Observa-se, por meio da experiência prática, que a deformação transversal geralmente é negativa, o corpo tende a se contrair quando submetido a uma deformação axial positiva. Se o corpo se deforma ao longo de x um $\epsilon_x > 0$, ele se contrai em y , ou seja, desenvolve uma deformação $\epsilon_y < 0$, de forma que, de acordo com Lubliner (2017), para deformação axial

$$\nu = -\frac{\epsilon_y}{\epsilon_x}, \quad (41)$$

em que ν representa o coeficiente de Poisson, a razão entre a deformação transversal e a deformação axial.

O coeficiente de Poisson é uma característica intrínseca do material, e, assim como os módulos de Young e de cisalhamento, não depende da geometria do corpo, mas do material de que é feito (dentre outras condições mais específicas), entretanto, pode variar conforme a direção da deformação, para materiais que não são isotrópicos, diferentemente, de \mathcal{B} . Aqui ν é tratado como constante.

2.3.4 O Princípio da Sobreposição & A Lei de Hooke Generalizada

O princípio da sobreposição permite a aditividade de efeitos (leia-se, deformações) na presença de múltiplas causas (leia-se, tensões). Invocando esse princípio, nós podemos expressar o total de deformação percebida pelo corpo como a soma de todas as deformações devidas aos componentes individuais de tensão presentes no corpo. (LUBLINER, 2017, pág. 252, tradução livre)

Esse princípio é válido quando, de acordo com (LUBLINER, 2017):

1. as equações de equilíbrio são lineares nas tensões;

Observando a equação 11, é possível notar que, dado dois conjuntos de tensões que satisfazem as equações de equilíbrio, a soma desses dois conjuntos também o faz, ou seja, as equações de equilíbrio são lineares nas tensões. Em termos matemáticos, é o mesmo que demonstrar a linearidade do operador divergência ($\nabla \cdot (*)$).

2. as relações entre deformação e deslocamento são lineares;

Tal como no item anterior, é possível demonstrar essa propriedade tomando dos conjuntos de deslocamentos arbitrários, que, quando somados, levam um conjunto de deformações que equivale ao somatório das deformações de cada conjunto de deslocamentos individualmente.

3. as relações entre tensão e deformação são lineares.

Observando as relações definidas para o módulo de Young, o módulo de cisalhamento e o coeficiente de Poisson, fica evidente que todas são lineares.

Assumindo agora que sobre um elemento infinitesimal cúbico, tal qual a figura 2, atuam todas as componentes do tensor de tensões, de modo que, utilizando as relações entre deformação e tensão, das equações 39 e 40, como também a relação entre deformações, equação 41, é possível determinar o efeito de deformação causado por cada componente de tensão, tal que, devido à tensão σ_x , o elemento infinitesimal percebe as deformações

$$\varepsilon_x = \frac{\sigma_x}{E}, \quad \varepsilon_y = -\nu \frac{\sigma_x}{E}, \quad \varepsilon_z = -\nu \frac{\sigma_x}{E}. \quad (42)$$

As outras tensões, σ_y e σ_z , se comportam de forma análoga, de modo que

$$\varepsilon_x = -\nu \frac{\sigma_y}{E}, \quad \varepsilon_y = \frac{\sigma_y}{E}, \quad \varepsilon_z = -\nu \frac{\sigma_y}{E}, \quad (43)$$

$$\varepsilon_x = -\nu \frac{\sigma_z}{E}, \quad \varepsilon_y = -\nu \frac{\sigma_z}{E}, \quad \varepsilon_z = \frac{\sigma_z}{E}. \quad (44)$$

As tensões de cisalhamento, τ_{xy} , τ_{xz} e τ_{yz} , por sua vez, causam as deformações angulares,

$$\gamma_{xy} = \frac{\tau_{xy}}{G}, \quad \gamma_{xz} = \frac{\tau_{xz}}{G}, \quad \gamma_{yz} = \frac{\tau_{yz}}{G}. \quad (45)$$

Sobrepondo as deformações axiais para cada eixo, e as deformações angulares, é possível determinar as relações entre todas as tensões e todas as deformações, denominada *lei de Hooke generalizada*:

$$\varepsilon_x = \frac{\sigma_x}{E} - \nu \frac{\sigma_y}{E} - \nu \frac{\sigma_z}{E}, \quad (46)$$

$$\varepsilon_y = -\nu \frac{\sigma_x}{E} + \frac{\sigma_y}{E} - \nu \frac{\sigma_z}{E}, \quad (47)$$

$$\varepsilon_z = -\nu \frac{\sigma_x}{E} - \nu \frac{\sigma_y}{E} + \frac{\sigma_z}{E}, \quad (48)$$

$$\gamma_{xy} = \frac{\tau_{xy}}{G}, \quad (49)$$

$$\gamma_{xz} = \frac{\tau_{xz}}{G}, \quad (50)$$

$$\gamma_{yz} = \frac{\tau_{yz}}{G}. \quad (51)$$

O módulo de cisalhamento pode ser determinado em termos da razão de Poisson e do módulo de Young, de modo que¹²

$$G = \frac{E}{2(1 + \nu)}. \quad (52)$$

Utilizando a notação de Voigt, a Lei de Hooke generalizada pode ser em forma compacta como

$$\begin{Bmatrix} \varepsilon_x \\ \varepsilon_y \\ \varepsilon_z \\ \gamma_{xy} \\ \gamma_{xz} \\ \gamma_{yz} \end{Bmatrix} = \frac{1}{E} \begin{bmatrix} 1 & -\nu & -\nu & 0 & 0 & 0 \\ -\nu & 1 & -\nu & 0 & 0 & 0 \\ -\nu & -\nu & 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 2(1+\nu) & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 2(1+\nu) & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 2(1+\nu) \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} \sigma_x \\ \sigma_y \\ \sigma_z \\ \tau_{xy} \\ \tau_{xz} \\ \tau_{yz} \end{Bmatrix}, \quad (53)$$

Invertendo esse sistema, obtemos a matriz constitutiva da equação 38,

$$\{\sigma\} = \frac{E}{(1+\nu)(1-2\nu)} \underbrace{\begin{bmatrix} 1-\nu & \nu & \nu & 0 & 0 & 0 \\ \nu & 1-\nu & \nu & 0 & 0 & 0 \\ \nu & \nu & 1-\nu & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & \frac{1-2\nu}{2} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & \frac{1-2\nu}{2} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & \frac{1-2\nu}{2} \end{bmatrix}}_{[C]} \{\varepsilon\} \quad (54)$$

Para que essa matriz exista, é necessário que $-1 < \nu < \frac{1}{2}$.¹³

2.3.5 Estado Plano de Deformação e de Tensão

Quando se analisa um problema plano, é possível simplificar as relações descritas pela matriz $[C]$ em dois casos, observando a rigidez do corpo nas direção transversal ao plano de análise.

O Estado Plano de Tensão (EPT) ocorre quando a rigidez do corpo na direção transversal é muito baixa (como uma chapa ou uma placa), fazendo com que a tensão nessa direção possa ser negligenciada, ou seja, $\sigma_z = \tau_{xz} = \tau_{yz} = 0$. Nesse caso, a lei de Hooke generalizada se reduz a,¹⁴

¹² A demonstração dessa relação se utiliza das fórmulas de rotação dos tensores de deformações e de tensores, que não são tratadas aqui.

¹³ Materiais com $\nu = 0.5$ são chamados de incompressíveis, pois não sofrem deformações volumétricas.

¹⁴ Tanto a matriz constitutiva do EPT e quando do EPD são facilmente deduzidas da lei de Hooke generalizada, apenas atribuindo os valores nulos e trabalhando com as inversas da matriz $[C]$.

$$\begin{Bmatrix} \varepsilon_x \\ \varepsilon_y \\ \gamma_{xy} \end{Bmatrix} = \frac{1}{E} \begin{bmatrix} 1 & -\nu & 0 \\ -\nu & 1 & 0 \\ 0 & 0 & (1+\nu) \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} \sigma_x \\ \sigma_y \\ \tau_{xy} \end{Bmatrix}, \quad (55)$$

$$\varepsilon_z = -\nu \frac{\sigma_x}{E} - \nu \frac{\sigma_y}{E}. \quad (56)$$

ε_z passou a ser uma variável dependente, pois é determinada, totalmente, pelas outras deformações. (ZIENKIEWICZ, 2000, pág. 90)

As Relações que definem a matriz constitutiva para o estado plano de tensão:

$$\begin{Bmatrix} \sigma_x \\ \sigma_y \\ \tau_{xy} \end{Bmatrix} = \frac{E}{1-\nu^2} \underbrace{\begin{bmatrix} 1 & \nu & 0 \\ \nu & 1 & 0 \\ 0 & 0 & \frac{1-\nu}{2} \end{bmatrix}}_{[C]} \begin{Bmatrix} \varepsilon_x \\ \varepsilon_y \\ \varepsilon_{xy} \end{Bmatrix}. \quad (57)$$

O Estado de Plano de Deformação (EPD), por sua vez, ocorre quando o corpo é muito rígido na direção transversal (como uma barragem ou um muro), fazendo com que a deformação nessa direção possa ser negligenciada, ou seja, $\varepsilon_z = \gamma_{xz} = \gamma_{yz} = 0$. Nesse caso, a lei de Hooke generalizada se reduz a

$$\begin{Bmatrix} \sigma_x \\ \sigma_y \\ \tau_{xy} \end{Bmatrix} = \frac{E}{(1+\nu)(1-2\nu)} \underbrace{\begin{bmatrix} 1-\nu & \nu & 0 \\ \nu & 1-\nu & 0 \\ 0 & 0 & \frac{1-2\nu}{2} \end{bmatrix}}_{[C]} \begin{Bmatrix} \varepsilon_x \\ \varepsilon_y \\ \gamma_{xy} \end{Bmatrix}, \quad (58)$$

$$\sigma_z = \nu(\sigma_x + \sigma_y) \quad (59)$$

γ_{xz} passou a ser uma variável dependente, pois é determinada, totalmente, pelas outras deformações. (ZIENKIEWICZ, 2000, pág. 91)

2.4 TEORIA DA ENERGIA DE DISTORÇÃO MÁXIMA: A TENSÃO EQUIVALENTE DE VON MISES

A Teoria da Energia de Distorção máxima propõe que:

o escoamento em um material dúctil ocorre quando a energia de distorção por unidade de volume do material ultrapassa a energia de distorção por unidade de volume do mesmo material quando submetido a escoamento em um ensaio de tração simples. (HIBBELER, 2010)

Essa proposição surge da observação que materiais dúcteis sob carregamentos hidrostáticos exibem uma resistência muito maior que em simples ensaios de tração uniaxial, e que,

portanto, o escoamento não é um fenômeno compreendido, simplesmente, pela tração ou compressão, mas, majoritariamente, pela distorção do material. (HIBBELER, 2010)

A energia por unidade de volume, devida à deformação do material, é definida por um produto da tensão pela deformação. Em um elemento orientado sob tensões principais, de acordo com (HIBBELER, 2010)

$$\mathcal{U} = \frac{1}{2}(\sigma_1 \varepsilon_1 + \sigma_2 \varepsilon_2 + \sigma_3 \varepsilon_3), \quad (60)$$

em que \mathcal{U} denota a energia por unidade de volume, σ_i as tensões principais.

Substituindo as deformações pelas tensões, utilizando a lei de Hooke generalizada, equação 51, temos que

$$\mathcal{U} = \frac{1}{2E} [\sigma_1^2 + \sigma_2^2 + \sigma_3^2 - 2\nu(\sigma_1 \sigma_2 + \sigma_1 \sigma_3 + \sigma_2 \sigma_3)]. \quad (61)$$

Essa energia pode ser compreendida como a soma de duas parcelas: a energia de deformação volumétrica, u_v , e a energia de deformação por cisalhamento, u_d . A energia de deformação volumétrica é a energia de deformação que tende a alterar o volume do elemento, sem distorcer sua geometria, ou seja, a energia de deformação devido à tensão média das tensões principais. Substituindo, então, as tensões principais pela tensão média na equação anterior, temos que

$$\mathcal{U}_v = \frac{3\bar{\sigma}^2}{2E}(1 - 2\nu), \quad (62)$$

em que $\bar{\sigma} = \frac{1}{3}(\sigma_1 + \sigma_2 + \sigma_3)$ é a tensão média.

A energia de distorção, portanto, é a diferença entre a energia total e a energia volumétrica, de modo que

$$\mathcal{U}_d = \mathcal{U} - \mathcal{U}_v = \frac{1 + \nu}{3E} \left[\frac{(\sigma_1 - \sigma_2)^2 + (\sigma_2 - \sigma_3)^2 + (\sigma_3 - \sigma_1)^2}{2} \right]. \quad (63)$$

Fazendo $\sigma_2 = \sigma_3 = 0$, temos a energia de deformação para o caso de tração uniaxial, de modo que

$$\mathcal{U} = \frac{1 + \nu}{3} \sigma_e^2, \quad (64)$$

em que σ_e é a tensão admissível do material num ensaio de tração. (HIBBELER, 2010)

Portanto, de acordo com o princípio da energia de distorção máxima, o escoamento ocorre quando a energia de distorção ultrapassa a energia de distorção de um ensaio de tração simples, ou seja, quando (HIBBELER, 2010)

$$\sigma_e \leq \left[\frac{(\sigma_1 - \sigma_2)^2 + (\sigma_2 - \sigma_3)^2 + (\sigma_3 - \sigma_1)^2}{2} \right]^{1/2}. \quad (65)$$

O lado direito dessa inequação pode ser interpretado como uma tensão equivalente ou efetiva do estado de tensão dado pelas tensões principais. De acordo com (HIBBELER, 2010), essa tensão é denominada *tensão equivalente de von Mises*, definida por

$$\sigma_{eq} = \left[\frac{(\sigma_1 - \sigma_2)^2 + (\sigma_2 - \sigma_3)^2 + (\sigma_3 - \sigma_1)^2}{2} \right]^{1/2}. \quad (66)$$

Em termos de um sistema xyz , e utilizando todas as componentes do tensor de tensões, a tensão equivalente de von Mises pode ser expressa por

$$\sigma_{eq} = \frac{1}{\sqrt{2}} \left[(\sigma_x - \sigma_y)^2 + (\sigma_y - \sigma_z)^2 + (\sigma_z - \sigma_x)^2 + 6(\tau_{xy}^2 + \tau_{yz}^2 + \tau_{zx}^2) \right]. \quad (67)$$

3 O MÉTODO DOS ELEMENTOS FINITOS

"As far as the laws of mathematics refer to reality, they are not certain; and as far as they are certain, they do not refer to reality."(Albert Einstein)

O método dos elementos finitos (MEF) é um procedimento numérico utilizada para encontrar soluções de equações que modelam a natureza. É amplamente utilizado na simulação de fenômenos físicos, como mecânica dos sólidos, transferência de calor, eletromagnetismo e muitos outros. (OñATE, 2009)

A abordagem do MEF envolve a subdivisão de uma estrutura ou domínio contínuo em pequenos elementos geométricos finitos, definidos por nós, caracterizados por suas propriedades físicas e geométricas, em que são aplicadas as equações governantes do problema, cujo campo é aproximado, dentro de cada um, por meio de funções de interpolação, que vão discretizar o campo sobre os valores nodais. Em seguida, essas equações aproximadas são montadas, justapondo os elementos, em um sistema global, levando em consideração as condições de contorno e as restrições do problema. (QUEK; LIU, 2003)

Em suma, o método de elementos finitos segue o seguinte procedimento, de acordo com Oñate (2009):

1. definição do domínio, e das condições de contorno;
2. discretização do domínio em uma malha formada por nós que constituem os elemento;
3. aplicação das equações de governo sobre cada elemento, formando um sistema local de rigidez;
4. montagem dessas equações em um único grande sistema global;
5. resolução do sistema, encontrando os valores nodais do campo.

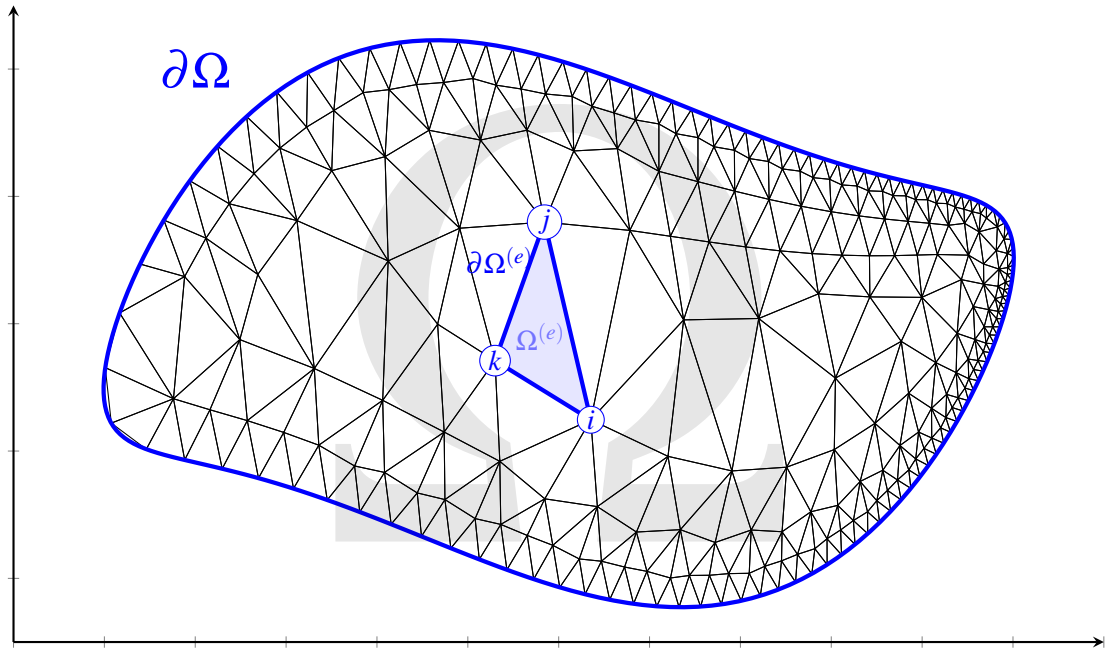
Na análise estrutural aqui abordada, o objetivo da aplicação do MEF é determinar o deslocamento de um sólido em equilíbrio sujeito a carregamentos e restrições, dentro do regime elástico modelado pela Lei de Hooke, utilizando funções de interpolações lineares em elementos triangulares (na análise 2D: EPT ou EPD) e tetraédricos (na análise 3D). Para tanto, resolver um sistema da forma

$$KU = F, \tag{68}$$

em que K é a matriz de rigidez global, U é o vetor de deslocamentos nodais, e F é o vetor de forças nodais.

Deste modo, convém definir os termos e símbolos dessas entidades matemáticas. Seja um corpo \mathcal{B} , definido por uma geometria sobre o domínio Ω , que é repartido em pequenos

Figura 6 – Domínio discretizado em elementos triangulares.



Fonte: Elaborado pelo autor (2022).

elementos, de domínio $\Omega^{(e)}$, cuja fronteira se denomina $\partial\Omega^{(e)}$. A figura 6 mostra um domínio bidimensional Ω discretizado em elementos triangulares, cujos nós são representados por i, j e k . Quando uma entidade é definida sobre um elemento, ela é representada por um superescrito (e) , como por exemplo o deslocamento $\varphi^{(e)}$ sobre o elemento e .

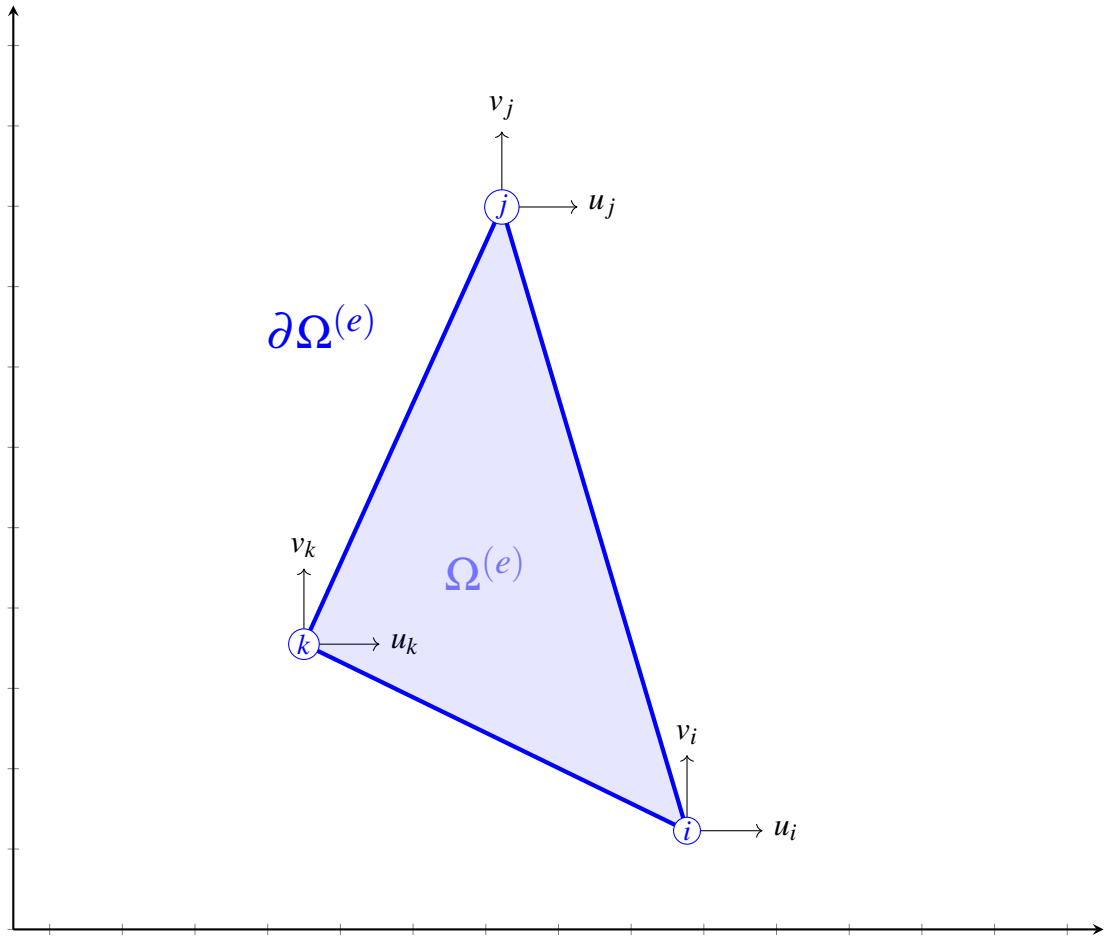
Segundo Logan (2022), neste capítulo aborda-se como

1. selecionar as funções de interpolação;
2. definir as relações de tensão-deformação-deslocamento;
3. derivar a forma da matriz de rigidez;
4. montar o sistema global e introduzir as condições de contorno.

3.1 AS FUNÇÕES DE INTERPOLAÇÃO

As funções de interpolação são funções matemáticas que aproximam o campo de interesse, neste caso o deslocamento, dentro de um elemento, por meio de uma combinação linear de funções conhecidas, definidas sobre os nós do elemento. Essas funções são definidas, e depois justapostas, de modo que o campo seja contínuo. O objetivo dessa ferramenta é alterar os valores incógnitos do campo de contínuos para discretos, para que o deslocamento seja bem definido pelo seu valor sobre a posição cada nó, e que, por sobre o domínio de cada elemento, o campo seja interpolado. Esses valores discretos desconhecidos do campo nos nós, em que o campo tem "liberdade" pra variar, denominam-se *graus de liberdade*. (LOGAN, 2022)

Figura 7 – Um triângulo de deformações constantes (CST).



Fonte: Elaborado pelo autor (2022).

O CST, por exemplo, tem seis graus de liberdade, uma vez que para cada nó, o vetor de deslocamento têm três componentes. Os problemas abordados aqui têm sempre três graus de liberdade por nó.

Define-se, então, a função de deslocamento sobre um elemento, representado pela figura 7, assim como a proposta linear de interpolação,

$$\boldsymbol{\varphi}^{(e)} = \begin{Bmatrix} u(x,y) \\ v(x,y) \end{Bmatrix}^{(e)} = \begin{Bmatrix} a_1 + a_2x + a_3y \\ b_1 + b_2x + b_3y \end{Bmatrix}^{(e)}. \quad (69)$$

Nesse sentido, bidimensional, $\boldsymbol{\varphi}$ é uma função vetorial de campo que mapeia cada ponto do sólido para seu respectivo deslocamento nos eixos do sistema xy (u e v respectivamente).

Para determinar as constantes a e b , e termos dos deslocamentos nodais basta aplicar a condição de que em cada nó a função deve assumir o valor do deslocamento respectivo. Isto é, analisando somente a componente x , ou seja, $u(x,y)$, temos que

$$u(x_i, y_i) = u_i = a_1 + a_2 x_i + a_3 y_i, \quad (70)$$

$$u(x_j, y_j) = u_j = a_1 + a_2 x_j + a_3 y_j, \quad (71)$$

$$u(x_k, y_k) = u_k = a_1 + a_2 x_k + a_3 y_k, \quad (72)$$

em que u_i é o valor do deslocamento nodais i , assim como x_i e y_i é sua posição sobre o domínio Ω .

Reescrevendo esse sistema na forma matricial, temos que

$$\begin{bmatrix} 1 & x_i & y_i \\ 1 & x_j & y_j \\ 1 & x_k & y_k \end{bmatrix} \begin{bmatrix} a_1 \\ a_2 \\ a_3 \end{bmatrix} = \begin{Bmatrix} u_i \\ u_j \\ u_k \end{Bmatrix} \Rightarrow \begin{Bmatrix} a_1 \\ a_2 \\ a_3 \end{Bmatrix} = \frac{1}{2A} \begin{bmatrix} \alpha_i & \alpha_j & \alpha_k \\ \beta_i & \beta_j & \beta_k \\ \gamma_i & \gamma_j & \gamma_k \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} u_i \\ u_j \\ u_k \end{Bmatrix}, \quad (73)$$

sendo que¹

$$\frac{1}{2A} \begin{bmatrix} \alpha_i & \alpha_j & \alpha_k \\ \beta_i & \beta_j & \beta_k \\ \gamma_i & \gamma_j & \gamma_k \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & x_i & y_i \\ 1 & x_j & y_j \\ 1 & x_k & y_k \end{bmatrix}^{-1} = X^{-1}, \quad (74)$$

em que A é área do elemento triangular.²

Deste modo, a função de interpolação para $u(x, y)$ pode ser descrita em termos dos deslocamentos nodais na forma, utilizando o sistema 73,

$$u(x, y) = \begin{bmatrix} 1 & x & y \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} a_1 \\ a_2 \\ a_3 \end{Bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & x & y \end{bmatrix} \frac{1}{2A} \begin{bmatrix} \alpha_i & \alpha_j & \alpha_k \\ \beta_i & \beta_j & \beta_k \\ \gamma_i & \gamma_j & \gamma_k \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} u_i \\ u_j \\ u_k \end{Bmatrix}. \quad (75)$$

Expandido essas expressões, multiplicando as matrizes e rearranjado os termos, temos que

$$u(x, y) = \frac{1}{2A} [\alpha_i + \beta_i x + \gamma_i y] u_i + \frac{1}{2A} [\alpha_j + \beta_j x + \gamma_j y] u_j + \frac{1}{2A} [\alpha_k + \beta_k x + \gamma_k y] u_k. \quad (76)$$

É possível, também, definir a função de interpolação para a componente $v(x, y)$, de modo análogo, obtendo, apenas substituindo a função u por v nas equações anteriores, que as mesmas relações de interpolações são válidas também para a outra componente de $\boldsymbol{\varphi}$. Então,

$$v(x, y) = \frac{1}{2A} [\alpha_i + \beta_i x + \gamma_i y] v_i + \frac{1}{2A} [\alpha_j + \beta_j x + \gamma_j y] v_j + \frac{1}{2A} [\alpha_k + \beta_k x + \gamma_k y] v_k. \quad (77)$$

¹ É fácil demonstrar que esse sistema sempre é possível e determinado apenas observando o fato de que as posições dos nós são distintas e não colineares, a final, os elementos são triangulares.

² Essa forma de escrever a inversa de X é interessante pois simplifica os termos α , β e γ pelo determinante $2A$.

Para simplificar a notação das equações 76 e 77, define-se funções N da forma

$$N_i = \frac{1}{2A} [\alpha_i + \beta_i x + \gamma_i y], \quad (78)$$

$$N_j = \frac{1}{2A} [\alpha_j + \beta_j x + \gamma_j y], \quad (79)$$

$$N_k = \frac{1}{2A} [\alpha_k + \beta_k x + \gamma_k y]. \quad (80)$$

Por fim, $\boldsymbol{\varphi}$ pode ser reescrito na forma matricial, em termos dessas funções N e dos deslocamentos nodais u e v , como

$$\boldsymbol{\varphi}^{(e)} = \begin{Bmatrix} u(x,y) \\ v(x,y) \end{Bmatrix}^{(e)} = \begin{bmatrix} N_i & 0 & N_j & 0 & N_k & 0 \\ 0 & N_i & 0 & N_j & 0 & N_k \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} u_i \\ v_i \\ u_j \\ v_j \\ u_k \\ v_k \end{Bmatrix} = \mathbf{N} \mathbf{U}^{(e)}, \quad (81)$$

em que \mathbf{N} é a matrix de funções de interpolação, e $\mathbf{U}^{(e)}$ é o vetor de deslocamentos nodais do elemento.

3.2 AS RELAÇÕES DE TENSÃO-DEFORMAÇÃO-DESLOCAMENTO

No caso bidimensional, o vetor de deformação, na notação de Voigt, é dado por, conforme definido no capítulo anterior,

$$\{\boldsymbol{\varepsilon}\} = \begin{Bmatrix} \varepsilon_{xx} \\ \varepsilon_{yy} \\ \gamma_{xy} \end{Bmatrix} = \begin{Bmatrix} \frac{\partial u}{\partial x} \\ \frac{\partial v}{\partial y} \\ \frac{\partial u}{\partial y} + \frac{\partial v}{\partial x} \end{Bmatrix} \quad (82)$$

Aplicando nessas derivadas parciais as funções de interpolação de $\boldsymbol{\varphi}$, das equações 76 e 77, temos que, conforme Logan (2022),

$$\frac{\partial u}{\partial x} = \frac{1}{2A} [\beta_i u_i + \beta_j u_j + \beta_k u_k], \quad (83)$$

$$\frac{\partial v}{\partial y} = \frac{1}{2A} [\gamma_i v_i + \gamma_j v_j + \gamma_k v_k], \quad (84)$$

$$\frac{\partial u}{\partial y} + \frac{\partial v}{\partial x} = \frac{1}{2A} [\gamma_i u_i + \gamma_j u_j + \gamma_k u_k + \beta_i v_i + \beta_j v_j + \beta_k v_k]. \quad (85)$$

Utilizando essas equações, é possível reescrever o vetor de deformação $\{\boldsymbol{\varepsilon}\}$ em termos dos coeficientes β e γ , como também do vetor de deslocamentos nodais do elemento $\{\mathbf{U}\}^{(e)}$, na forma

$$\{\varepsilon\} = \frac{1}{2A} \begin{bmatrix} \beta_i & 0 & \beta_j & 0 & \beta_k & 0 \\ 0 & \gamma_i & 0 & \gamma_j & 0 & \gamma_k \\ \gamma_i & \beta_i & \gamma_j & \beta_j & \gamma_k & \beta_k \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} u_i \\ v_i \\ u_j \\ v_j \\ u_k \\ v_k \end{Bmatrix} = \frac{1}{2A} B U^{(e)}. \quad (86)$$

A matrix B é uma função das coordenadas dos nós do elemento, e relaciona o vetor de deslocamentos nodais do elemento $U^{(e)}$ com o vetor de deformações $\{\varepsilon\}$, assim como é constante ao longo de todo o elemento, o que é devido pela escolha de funções lineares de interpolação. Por causa dessa propriedade, esse elemento é denominado triângulo de deformações constantes, ou CST (*Constant Strain Triangle*).

Por fim, ao passo que a relação entre deformação e tensão é dada pela Lei de Hooke generalizada, na forma da matriz constitutiva C (por conveniência, a matriz constitutiva será expressa sem a notação usual $[C]$), expressar a relação entre tensão e deslocamento, ou tensão-Deformação-Deslocamento, é simplesmente uma questão de multiplicar a matriz constitutiva pela matriz B , obtendo assim a relação

$$\{\sigma\} = C B U^{(e)}. \quad (87)$$

3.3 A MATRIZ DE RIGIDEZ LOCAL

A matriz de rigidez local é uma matriz quadrada, simétrica, que relaciona o vetor de forças nodais $F^{(e)}$ com o vetor de deslocamentos nodais $U^{(e)}$, na forma

$$F^{(e)} = K^{(e)} U^{(e)}, \quad (88)$$

cujas derivação é feita aplicando a equação de governo, o equilíbrio estático nesse caso, sobre o elemento, utilizando as funções de interpolação para o campo de deslocamentos. (LOGAN, 2022)

$F^{(e)}$ é um vetor que armazena as forças aplicadas sobre os nós do elemento, analogamente a $U^{(e)}$ que armazena os deslocamentos nodais, e tem a forma

$$F^{(e)} = \begin{Bmatrix} f_{x_i} \\ f_{y_j} \\ f_{x_j} \\ f_{y_j} \\ f_{x_k} \\ f_{y_k} \end{Bmatrix}. \quad (89)$$

Um dos métodos para derivar essa matriz é utilizar o *Princípio dos Trabalhos Virtuais*, que pode ser enunciado como:

Se um corpo deformável em equilíbrio é submetido a deslocamentos virtuais arbitrários (imaginários) associados a uma deformação compatível do corpo, o trabalho virtual das forças externas no corpo é igual à energia virtual de deformação das tensões internas. (LOGAN, 2022, pág. 876, tradução livre)

Nesse contexto, o trabalho virtual interno é causado por uma deformação do próprio corpo, denotada $\delta \boldsymbol{\varepsilon}$, enquanto o trabalho virtual externo, por sua vez, é causado diretamente por um deslocamento virtual das forças que atuam sobre as fronteiras do corpo, denotado δu . Em um corpo elástico, modelado pela Lei de Hooke, o trabalho virtual interno pode ser descrito em termos do deslocamento, como a energia armazenada na forma elástica, a fim de desenvolver as equações de equilíbrio estático apresentadas a seguir.³

Seja um elemento triangular, como da figura 8, que sofre um deslocamento virtual $\delta U^{(e)}$. De acordo com Zienkiewicz (2000), o trabalho interno do elemento é dado por⁴

$$\mathcal{U} = \int_{\Omega^{(e)}} \delta \{\boldsymbol{\varepsilon}\}^t \{\boldsymbol{\sigma}\} dV, \quad (90)$$

Utilizando as relações de tensão-deformação-deslocamento, descritas nas equações 86 e 87, temos que⁵

$$\mathcal{U} = \int_{\Omega^{(e)}} (B \delta U^{(e)})^t C B U^{(e)} dV \implies \mathcal{U} = \delta (U^{(e)})^t \int_{\Omega^{(e)}} B^t C B dV U^{(e)}. \quad (91)$$

O trabalho desenvolvido pelas forças externas é dado, também de acordo com Zienkiewicz (2000), pelo produto dos deslocamento nodais e das forças nodais, na forma

$$\mathcal{W} = \delta (U^{(e)})^t F^{(e)}. \quad (92)$$

Igualando as duas parcelas de trabalho, temos que

$$\mathcal{U} = \mathcal{W} \implies \delta (U^{(e)})^t \int_{\Omega^{(e)}} B^t C B dV U^{(e)} = \delta (U^{(e)})^t F^{(e)}. \quad (93)$$

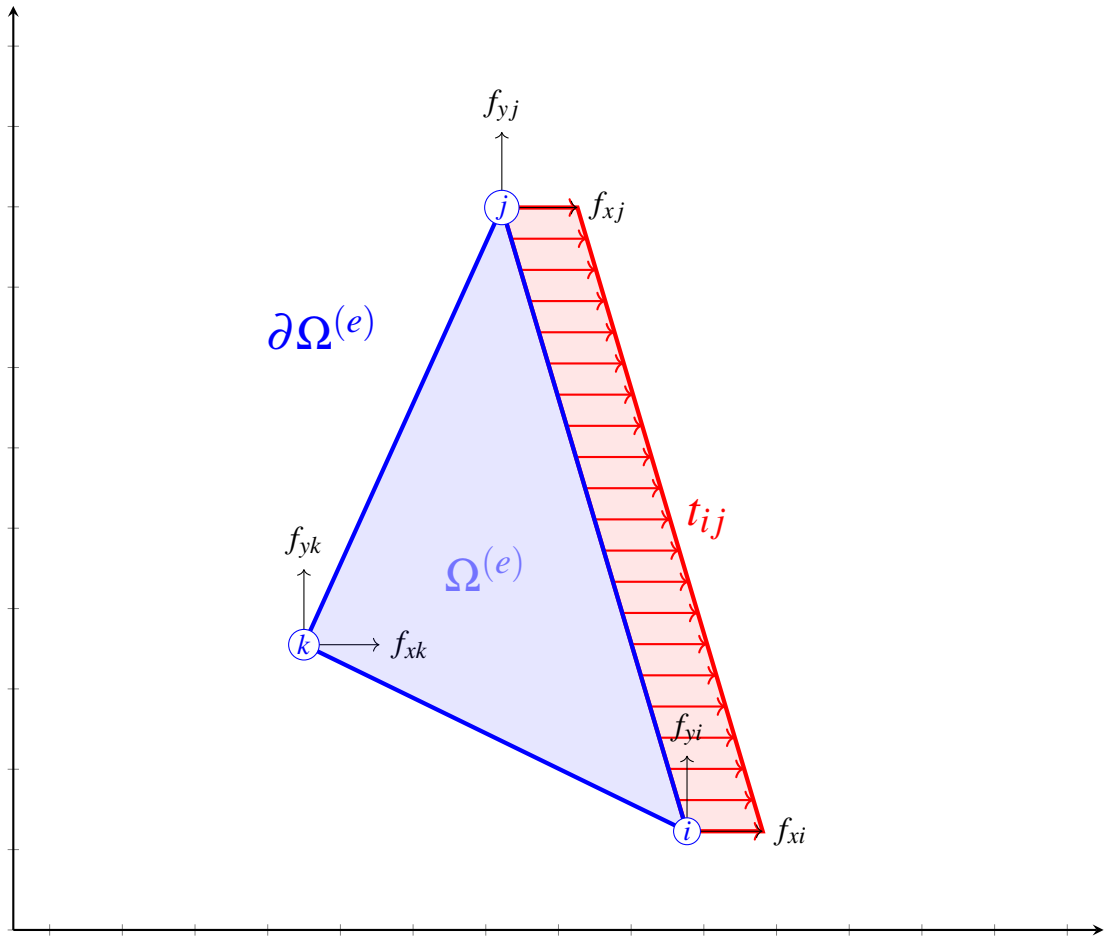
Portanto,

³ A notação δ se refere a um variacional, que representa uma variação infinitesimal sobre o todo o contínuo da função, de modo que seja nulo na região em que são aplicadas as condições de contorno. O cálculo variacional, entretanto, não é abordado diretamente nesta monografia.

⁴ Poder escrever a energia interna desta forma simples é devido à escolha de que, na notação de Voigt do tensor de deformação, foi utilizado a convenção de $\boldsymbol{\gamma} = 2\boldsymbol{\varepsilon}$.

⁵ Utilizando também a propriedade de transposição do produto de matrizes, $(AB)^t = B^t A^t$.

Figura 8 – Um triângulo de deformações constantes sob carregamentos (CST) sob carregamentos uniformes.



Fonte: Elaborado pelo autor (2022).

$$F^{(e)} = \int_{\Omega^{(e)}} B^t C B dV U^{(e)}. \quad (94)$$

Comparando com a forma da equação 68, fica evidente que a matriz de rigidez local é dada por

$$K^{(e)} = \int_{\Omega^{(e)}} B^t C B dV. \quad (95)$$

O elemento tratado aqui é o CST, portanto, a matriz B é constante em todo o domínio $\Omega^{(e)}$, como também é constante a matriz constitutiva C . A integral, portanto, não precisa ser computada em um sistema local, pois todos os termos que a compõe são constantes. Logo, a matriz de rigidez local pode ser simplificada ainda mais, tornando-se, de acordo com Logan (2022)

$$K^{(e)} = B^t C B \int_{\Omega^{(e)}} dV = B^t C B V, \quad (96)$$

em que V é o volume do elemento, definido, no caso bidimensional, por $V = Ad$, em que d é a espessura.

Essa matriz pode ser lida como uma lista de causa e efeito. Enquanto a linha da matriz representa onde que o efeito do deslocamento é aplicado, a força no caso, a coluna informa qual é o deslocamento, o grau de liberdade, que o causa. (LOGAN, 2022)

Outra forma de derivar essa relação diretamente da equação de equilíbrio estático é por meio do método de Galerkin, em que as bases da função de interpolação são as mesmas da função de ponderação, utilizando a chamada formulação fraca da equação de governo. Esse método leva à mesma formulação mostrada acima.

Vale ressaltar que não foi preciso definir um sistema local de coordenadas para derivar essas relações, uma vez que o elemento tratado aqui, como também o tetraedro (tratado mais adiante), tem funções de interpolação simples o suficiente que um sistema orientado a cada elemento não é necessário. Elementos mais sofisticados necessitam, por uma questão de manipulação algébrica, de um sistema de referência local. Esses elementos não são tratados aqui.

3.4 MATRIZ DE RIGIDEZ GLOBAL E CONDIÇÕES DE CONTORNO

Para cada elemento do domínio é realizado o procedimento descrito na seção anterior, de encontrar a matriz de rigidez local que descreve o equilíbrio do elemento em termos das forças externas e do campo de deslocamento sobre os nós. Para resolver o problema, encontrar os deslocamentos de todos os nós, é necessário justapor essas matrizes locais em uma matriz global, ou seja,

$$K = \sum_e K^{(e)}. \quad (97)$$

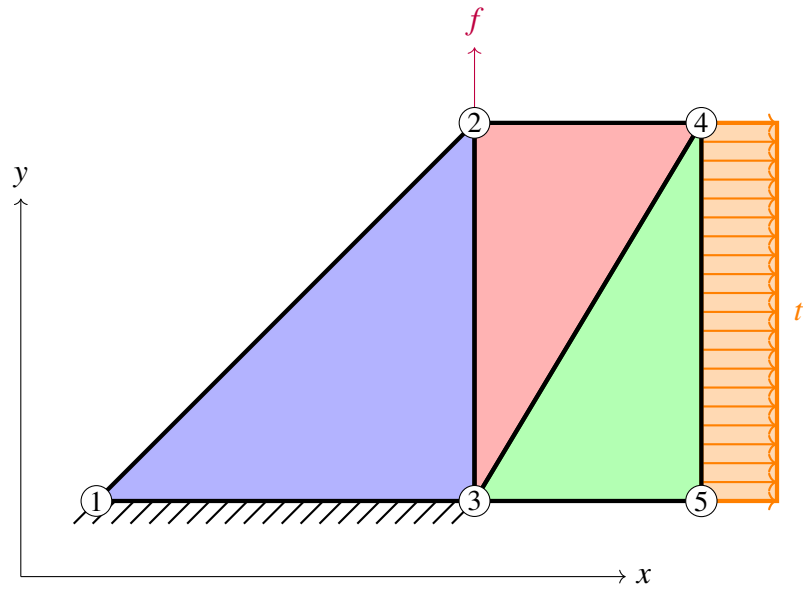
Nesse contexto, Σ representa, não uma soma ordinária, mas sim a sobreposição dos efeitos de rigidez sobre os nós. (LOGAN, 2022)

Em cada elemento, a matriz local de rigidez $K^{(e)}$ define a interação de forças e deslocamentos entre os graus de liberdade dos nós. Analisando a estrutura como um todo, cada nó pode pertencer a vários elementos, pois é assim que a malha é constituída. O efeito de rigidez, então, sobre cada nó é a soma dos efeitos de todos os elementos que o contém. Isso vale para os deslocamentos nodais, como para as forças nodais. O procedimento, portanto, de montagem da matriz global de rigidez é a soma das matrizes locais de rigidez sobre as posições dos graus de liberdade respectivos das matrizes locais (mapeamento local-global).

Seja um sólido \mathcal{B} discretizado por uma malha composta de cinco nós, formando três elementos, conforme a figura 9, engastado na superfície inferior do elemento azulado e sujeito a uma força f concentrada no nó 2, como também um carregamento distribuído t na superfície entre os nós 4 e 5.

As matrizes locais de rigidez desses elementos são quadradas 6×6 , pois no CST existem três graus de liberdade, dois para cada nó, referente ao deslocamento nas direções de x e y . Os

Figura 9 – Uma estrutura discretizada em elementos CST.



Fonte: Elaborado pelo autor (2022).

sistemas locais, então, para elemento da figura 9, têm a forma

$$\begin{bmatrix} k_{11} & k_{12} & k_{13} & k_{14} & k_{15} & k_{16} \\ k_{21} & k_{22} & k_{23} & k_{24} & k_{25} & k_{26} \\ k_{31} & k_{32} & k_{33} & k_{34} & k_{35} & k_{36} \\ k_{41} & k_{42} & k_{43} & k_{44} & k_{45} & k_{46} \\ k_{51} & k_{52} & k_{53} & k_{54} & k_{55} & k_{56} \\ k_{61} & k_{62} & k_{63} & k_{64} & k_{65} & k_{66} \end{bmatrix}^{(1)} \begin{Bmatrix} u_1 \\ v_1 \\ u_2 \\ v_2 \\ u_3 \\ v_3 \end{Bmatrix} = \begin{Bmatrix} f_{x1} \\ f_{y1} \\ f_{x2} \\ f_{y2} \\ f_{x3} \\ f_{y3} \end{Bmatrix} \iff K^{(e)}U^{(e)} = F^{(e)}, \quad (98)$$

$$\begin{bmatrix} k_{11} & k_{12} & k_{13} & k_{14} & k_{15} & k_{16} \\ k_{21} & k_{22} & k_{23} & k_{24} & k_{25} & k_{26} \\ k_{31} & k_{32} & k_{33} & k_{34} & k_{35} & k_{36} \\ k_{41} & k_{42} & k_{43} & k_{44} & k_{45} & k_{46} \\ k_{51} & k_{52} & k_{53} & k_{54} & k_{55} & k_{56} \\ k_{61} & k_{62} & k_{63} & k_{64} & k_{65} & k_{66} \end{bmatrix}^{(2)} \begin{Bmatrix} u_2 \\ v_2 \\ u_3 \\ v_3 \\ u_4 \\ v_4 \end{Bmatrix} = \begin{Bmatrix} f_{x2} \\ f_{y2} \\ f_{x3} \\ f_{y3} \\ f_{x4} \\ f_{y4} \end{Bmatrix} \iff K^{(e)}U^{(e)} = F^{(e)}, \quad (99)$$

$$\begin{bmatrix} k_{11} & k_{12} & k_{13} & k_{14} & k_{15} & k_{16} \\ k_{21} & k_{22} & k_{23} & k_{24} & k_{25} & k_{26} \\ k_{31} & k_{32} & k_{33} & k_{34} & k_{35} & k_{36} \\ k_{41} & k_{42} & k_{43} & k_{44} & k_{45} & k_{46} \\ k_{51} & k_{52} & k_{53} & k_{54} & k_{55} & k_{56} \\ k_{61} & k_{62} & k_{63} & k_{64} & k_{65} & k_{66} \end{bmatrix}^{(3)} \begin{Bmatrix} u_3 \\ v_3 \\ u_5 \\ v_5 \\ u_4 \\ v_4 \end{Bmatrix} = \begin{Bmatrix} f_{x3} \\ f_{y3} \\ f_{x5} \\ f_{y5} \\ f_{x4} \\ f_{y4} \end{Bmatrix} \iff K^{(e)}U^{(e)} = F^{(e)}. \quad (100)$$

A montagem do sistema global é somar essas matrizes de rigidez sobre os graus de liberdade. Observemos que o primeiro nó só faz parte de um elemento, o azul, portanto sua

rigidez só tem contribuição desse elemento; o nó 3, por sua vez, pertence aos três elementos (azul, vermelho e verde), e, portanto, seu termo de rigidez tem contribuição de todos eles. Realizando esse procedimento, é possível montar a matriz global de rigidez, utilizando, para tanto, a notação dos vetores de deslocamentos nodais U e de forças nodais F .

A matriz de rigidez global é quadrada 10×10 , pois existem cinco nós, com dois graus de liberdade cada, e é dada por

$$\begin{bmatrix} k_{11} & k_{12} & k_{13} & k_{14} & k_{15} & k_{16} & 0 & 0 & 0 & 0 \\ k_{21} & k_{22} & k_{23} & k_{24} & k_{25} & k_{26} & 0 & 0 & 0 & 0 \\ k_{31} & k_{32} & k_{33} + k_{11} & k_{34} + k_{12} & k_{35} + k_{13} & k_{36} + k_{14} & k_{15} & k_{16} & 0 & 0 \\ k_{41} & k_{42} & k_{43} + k_{21} & k_{44} + k_{22} & k_{45} + k_{23} & k_{46} + k_{24} & k_{25} & k_{26} & 0 & 0 \\ k_{51} & k_{52} & k_{53} + k_{31} & k_{54} + k_{32} & k_{55} + k_{33} + k_{11} & k_{56} + k_{34} + k_{12} & k_{35} + k_{13} & k_{36} + k_{14} & k_{15} & k_{16} \\ k_{61} & k_{62} & k_{63} + k_{41} & k_{64} + k_{42} & k_{65} + k_{43} + k_{21} & k_{66} + k_{44} + k_{22} & k_{45} + k_{23} & k_{46} + k_{24} & k_{25} & k_{26} \\ 0 & 0 & k_{51} & k_{52} & k_{53} + k_{31} & k_{54} + k_{32} & k_{55} + k_{33} & k_{56} + k_{34} & k_{35} & k_{36} \\ 0 & 0 & k_{61} & k_{62} & k_{63} + k_{41} & k_{64} + k_{42} & k_{65} + k_{43} & k_{66} + k_{44} & k_{45} & k_{46} \\ 0 & 0 & 0 & 0 & k_{51} & k_{52} & k_{53} & k_{54} & k_{55} & k_{56} \\ 0 & 0 & 0 & 0 & k_{61} & k_{62} & k_{63} & k_{64} & k_{65} & k_{66} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ u_2 \\ v_2 \\ 0 \\ 0 \\ u_4 \\ v_4 \\ u_5 \\ v_5 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} R_{x1} \\ R_{y1} \\ 0 \\ f \\ R_{x3} \\ R_{y3} \\ \frac{1}{2}\ell_{4-5}t \\ 0 \\ \frac{1}{2}\ell_{4-5}t \\ 0 \end{bmatrix}.$$

(101)

Nas duas primeiras linhas do sistema, que representam as forças nodais sobre o primeiro nó, é possível notar que somente os deslocamentos do elemento azulado que impactam diretamente. Nos graus de u_3 e u_v , fica evidente que todos os elementos contribuem para as forças nodais do nó 3, conforme descrito anteriormente.

Um outro passo nessa montagem do sistema global é a aplicação das condições de contorno. As condições de contorno, tradas aqui, podem ser divididas em dois tipos:

1. de Dirichlet, ou de primeiro tipo, e
2. de Neumann, ou de segundo tipo.

As condições de Dirichlet são aquelas que definem valores da variável incógnita na fronteira do domínio. Já as de Neumann, são aquelas que definem valores de contorno sobre a derivada da variável incógnita nas fronteiras do domínio (MUFTU, 2022). Aqui, as condições de contorno de Dirichlet são restrições de deslocamento, enquanto as condições de Neumann são carregamentos aplicados sobre a estrutura.

As condições de contorno sobre os deslocamentos, então, dividem os graus de liberdade entre

1. livre; Quando não há informação prévia de seus valores, isto é, o campo pode variar livremente.
2. prescritos; prescritos quando há informação prévia de seus valores, e portanto, não podem variar. (LOGAN, 2022)

Um engaste, por exemplo, gera uma condições de contorno de Dirichlet, definindo graus de liberdade prescritos, pois impõe que o deslocamento naquela região do sólido é nulo. Um deslocamento conhecido, também o faz, determinando que os graus correspondentes recebam o valor deslocado.

O vetor de forças F é nulo em regra sobre os graus de liberdade livres, pois essa entidade representa as forças externas sobre o elemento. Entretanto, como no MEF os deslocamentos são discretizados nos nós, o mesmo é feito com os carregamentos. Quando se aplicam condições de contorno de Neumann, os graus correspondentes devem receber forças nodais equivalentes, de forma que representem os carregamentos por forças externas concentradas nos nó. Pode-se encontrar as forças nodais equivalentes utilizando o mesmo método da seção anterior: o princípio dos trabalhos virtuais, fazendo com que o trabalho de carregamentos sobre a fronteira de um elemento $\partial\Omega^{(e)}$, causado por um deslocamento virtual $\delta U^{(e)}$, seja igual ao trabalho da forças nodais equivalentes. Em termos matemáticos, de acordo com Zienkiewicz (2000),

$$\delta(U^{(e)})^t F^{(e)} = \int_{\partial\Omega^{(e)}} (NU^{(e)})^t t d\ell, \quad (102)$$

em que t é o vetor do carregamento sobre a fronteira do elemento, na forma

$$t = \begin{Bmatrix} t_x(x, y) \\ t_y(x, y) \end{Bmatrix}. \quad (103)$$

e $d\ell$ é o infinitesimal de área da fronteira do elemento.

Aqui os carregamentos são constantes sobre as fronteiras dos elementos, isto é, são carregamentos distribuídos e uniformes. Deste modo, a equação anterior pode ser simplificada para

$$\delta(U^{(e)})^t F^{(e)} = \delta U^{(e)} \int_{\partial\Omega^{(e)}} N^t d\ell. \quad (104)$$

Portanto, as forças nodais equivalentes, devidas a carregamentos uniformes sobre a fronteira do elemento, é dada por

$$F^{(e)} = \int_{\partial\Omega^{(e)}} N^t d\ell. \quad (105)$$

No elemento CST, pela simplicidade das funções de interpolação, é possível realizar essa integração analiticamente. A solução mostra que o carregamento uniforme sobre a fronteira do elemento é equivalente à distribuição dessa carga duas forças nodais iguais, agindo nas extremidades da face em que atua o carregamento, ou seja, de acordo com (OñATE, 2009),

$$F_t^{(e)} = \frac{1}{2} l^{(e)} t \quad (106)$$

em que $F_t^{(e)}$ são as forças equivalentes que compreendem a fronteira em que o carregamento t é aplicado, $l^{(e)}$ é o comprimento da fronteira do elemento, e d é a espessura do elemento.

Na equação 101, em que foi montado o sistema global, já foram aplicada essas condições de contorno. Pode-se notar que os deslocamentos vinculados à fronteira compostas pelos nós 1 e 3 são nulos, pois ali se faz um engaste. A força roxeada f , agindo sobre o nó 2, faz-se presente diretamente no vetor de forças nodais, pois já é uma força concentrada em um nó. O carregamento alaranjado t , por sua vez, foi decomposto em duas parcelas, para os nós 5 e 4, seguindo a expressão da equação anterior.

Vale ressaltar que nos graus de liberdade prescritos as forças nodais desconhecidas são as reações das estruturas, isto é, as forças de reação que as restrições fazem sobre o corpo que se mantenha em equilíbrio. Por conta disso, na equação 101, as forças sobre os graus prescritos foram denominadas R , de reação.

3.4.1 Solução direta do sistema global

Com a determinação da matriz de rigidez global, as condições de contorno devidamente expressas em graus prescritos e livres (sejam deslocamento ou carregamentos), é possível reescrever o sistema geral da equação 68 na forma, de acordo com Rao (2018),

$$\begin{bmatrix} K_{LL} & K_{LP} \\ K_{PL} & K_{PP} \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} U_L \\ U_P \end{Bmatrix} = \begin{Bmatrix} F_L \\ F_P \end{Bmatrix}, \quad (107)$$

Nessa expressão, os graus de liberdade subdividem os vetores U e F em dois cada um, em prescritos (U_P e F_P), e livres (U_L e F_L). A matriz de rigidez, então, é subdividida em quatro, que relacionam os graus de liberdade prescritos e livres dos deslocamentos e das forças nodais, respectivamente.

Portanto, o sistema global pode ser reescrito mais uma vez em termos dessas submatrizes, como

$$K_{LL}U_L + K_{LP}U_P = F_L \quad (108)$$

$$K_{PL}U_L + K_{PP}U_P = F_P. \quad (109)$$

Os valores conhecidos desse sistema são os deslocamentos sobre os graus prescritos U_P , e as forças externas sobre o graus livres F_L , a final, são as próprias condições de contorno definidas matematicamente pelo MEF. Logo, como o objetivo de resolver o sistema é encontrar os deslocamentos nodais, é possível isolar U_L na primeira equação, ou seja,

$$U_L = K_{LL}^{-1}(F_L - K_{LP}U_P), \quad (110)$$

$$F_P = K_{PL}U_L + K_{PP}U_P. \quad (111)$$

a matriz K_{LL} é quadrada, simétrica e sempre possui inversa quando o problema está estaticamente determinado. (RAO, 2018)

Aplicando essas expressões à equação 101, referente ao exemplo da figura 9, temos que

$$\begin{aligned}
& \begin{bmatrix} k_{33} + k_{11} & k_{34} + k_s 12 & k_{15} & k_{16} & 0 & 0 \\ k_{43} + k_{21} & k_{44} + k_{22} & k_{25} & k_{26} & 0 & 0 \\ k_{51} & k_{52} & k_{55} + k_{33} & k_{56} + k_{34} & k_{35} & k_{36} \\ k_{61} & k_{62} & k_{65} + k_{43} & k_{66} + k_{44} & k_{45} & k_{46} \\ 0 & 0 & k_{53} & k_{54} & k_{55} & k_{56} \\ 0 & 0 & k_{63} & k_{64} & k_{65} & k_{66} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} u_2 \\ v_2 \\ u_4 \\ v_4 \\ u_5 \\ v_5 \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} k_{31} & k_{32} & k_{35} + k_{13} & k_{36} + k_{14} \\ k_{41} & k_{42} & k_{45} + k_{23} & k_{46} + k_{24} \\ 0 & 0 & k_{53} + k_{31} & k_{54} + k_{32} \\ 0 & 0 & k_{63} + k_{41} & k_{64} + k_{42} \\ 0 & 0 & k_{51} & k_{52} \\ 0 & 0 & k_{61} & k_{62} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 \\ f \\ \frac{1}{2}\ell_{4-5}t \\ 0 \\ \frac{1}{2}\ell_{4-5}t \\ 0 \end{bmatrix} \\
\\
& \begin{bmatrix} k_{13} & k_{14} & 0 & 0 & 0 & 0 \\ k_{23} & k_{24} & 0 & 0 & 0 & 0 \\ k_{53} + k_{31} & k_{54} + k_{32} & k_{35} + k_{13} & k_{36} + k_{14} & k_{15} & k_{16} \\ k_{63} + k_{41} & k_{64} + k_{42} & k_{45} + k_{23} & k_{46} + k_{24} & k_{25} & k_{26} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} u_2 \\ v_2 \\ u_4 \\ v_4 \\ u_5 \\ v_5 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} R_{x1} \\ R_{y1} \\ R_{x3} \\ R_{y3} \end{bmatrix}
\end{aligned}$$

3.5 EXPRESSÕES PARA O TETRAEDRO LINEAR

As mesmas relações gerais da seção anterior podem ser utilizadas para derivar as expressões para o elemento tetraédrico linear (figura 10). A grande diferença é a passagem de uma modelagem bidimensional para uma tridimensional, o que implica em um aumento do número de graus de liberdade, e o abandono de EPT e EPD, como também a introdução de uma nova condição de contorno sobre superfícies propriamente. De modo similar ao CST, o tetraedro é definido por três nós, nomeados i, j, k e m , sobre os quais tanto o deslocamento é discretizado.

3.5.1 As funções de interpolação

A primeira grande diferença é que agora a função de deslocamento $\boldsymbol{\varphi}^{(e)}$, tem três componentes, na forma

$$\boldsymbol{\varphi}^{(e)} = \begin{Bmatrix} u(x,y,z) \\ v(x,y,z) \\ w(x,y,z) \end{Bmatrix}^{(e)} = \begin{Bmatrix} a_1 + a_2x + a_3y + a_4z \\ b_1 + b_2x + b_3y + b_4z \\ c_1 + c_2x + c_3y + c_4z \end{Bmatrix}^{(e)}. \quad (112)$$

em que u, v e w são as componentes do deslocamento nos eixos x, y e z , respectivamente.

A proposta de interpolação desses valores continua sendo linear, isto é, a função de deslocamento é interpolada por um polinômio de primeiro grau, que é definido pelos valores do campo nos nós do elemento. No caso do tetraedro linear, há quatro nós, e portanto, quatro valores de deslocamento. Para descrever esses coeficientes em termos do deslocamento discretizado nos nós, basta seguir o mesmo procedimento da seção anterior, e montar um sistema de equações, na forma

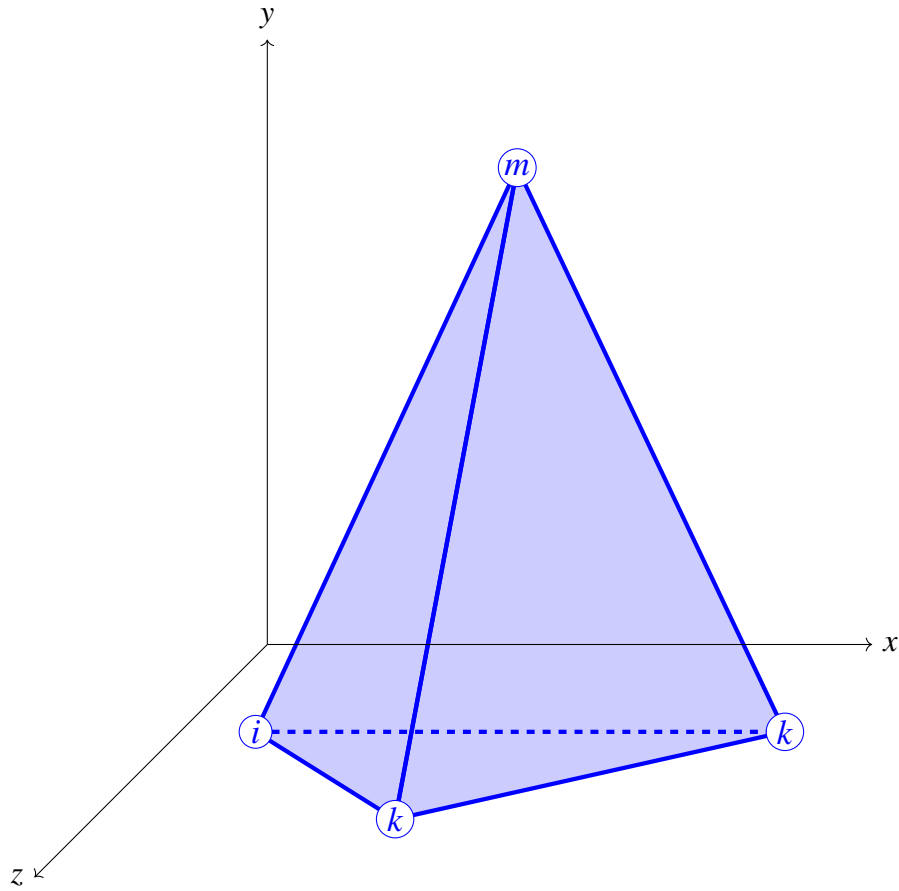
$$\begin{bmatrix} 1 & x_1 & y_1 & z_1 \\ 1 & x_2 & y_2 & z_2 \\ 1 & x_3 & y_3 & z_3 \\ 1 & x_4 & y_4 & z_4 \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} a_1 \\ a_2 \\ a_3 \\ a_4 \end{Bmatrix} = \begin{Bmatrix} u_1 \\ u_2 \\ u_3 \\ u_4 \end{Bmatrix}. \quad (113)$$

Logo, os coeficientes são expressos por

$$\begin{Bmatrix} a_1 \\ a_2 \\ a_3 \\ a_4 \end{Bmatrix} = \begin{bmatrix} \alpha_1 & \alpha_2 & \alpha_3 & \alpha_4 \\ \beta_1 & \beta_2 & \beta_3 & \beta_4 \\ \gamma_1 & \gamma_2 & \gamma_3 & \gamma_4 \\ \delta_1 & \delta_2 & \delta_3 & \delta_4 \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} u_1 \\ u_2 \\ u_3 \\ u_4 \end{Bmatrix}. \quad (114)$$

Portanto,

Figura 10 – Elemento tetraédrico



Fonte: Elaborado pelo autor (()).2022)

$$u(x, y, z) = \begin{bmatrix} 1 & x & y & z \end{bmatrix} \frac{1}{6V} \begin{bmatrix} \alpha_1 & \alpha_2 & \alpha_3 & \alpha_4 \\ \beta_1 & \beta_2 & \beta_3 & \beta_4 \\ \gamma_1 & \gamma_2 & \gamma_3 & \gamma_4 \\ \delta_1 & \delta_2 & \delta_3 & \delta_4 \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} u_1 \\ u_2 \\ u_3 \\ u_4 \end{Bmatrix}. \quad (115)$$

em que V é o volume do tetraedro.

Expandindo os termos, temos que

$$u(x, y, z) = \frac{1}{6V} (\alpha_1 + \beta_1 x + \gamma_1 y + \delta_1 z) u_1 + (\alpha_2 + \beta_2 x + \gamma_2 y + \delta_2 z) u_2 + (\alpha_3 + \beta_3 x + \gamma_3 y + \delta_3 z) u_3 + (\alpha_4 + \beta_4 x + \gamma_4 y + \delta_4 z) u_4 \quad (116)$$

Desta forma, as funções de interpolação N têm a forma

$$N_i = \frac{1}{6V} (\alpha_1 + \beta_1 x + \gamma_1 y + \delta_1 z). \quad (117)$$

Por fim, a forma discretizada da função de deslocamento $\boldsymbol{\varphi}^{(e)}$, em termos dos deslocamentos nodais, é

$$\boldsymbol{\varphi}^{(e)} = \begin{Bmatrix} u(x,y,z) \\ v(x,y,z) \\ w(x,y,z) \end{Bmatrix}^{(e)} = \begin{bmatrix} N_i & 0 & 0 & N_j & 0 & 0 & N_k & 0 & 0 & N_m & 0 & 0 \\ 0 & N_i & 0 & 0 & N_j & 0 & 0 & N_k & 0 & 0 & N_m & 0 \\ 0 & 0 & N_i & 0 & 0 & N_j & 0 & 0 & N_k & 0 & 0 & N_m \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} u_i \\ v_i \\ w_i \\ u_j \\ v_j \\ w_j \\ u_k \\ v_k \\ w_k \\ u_m \\ v_m \\ w_m \end{Bmatrix}. \quad (118)$$

3.5.2 As Relações de Tensão-Deformação-Deslocamento

Aplicando as definições do tensor de deformações na notação de Voigt, temos que

$$\varepsilon_{xx} = \frac{\partial u}{\partial x} = \frac{1}{6V} [\beta_i u_i + \beta_j u_j + \beta_k u_k + \beta_m u_m] \quad (119)$$

$$\varepsilon_{yy} = \frac{\partial v}{\partial y} = \frac{1}{6V} [\gamma_i v_i + \gamma_j v_j + \gamma_k v_k + \gamma_m v_m] \quad (120)$$

$$\varepsilon_{zz} = \frac{\partial w}{\partial z} = \frac{1}{6V} [\delta_i w_i + \delta_j w_j + \delta_k w_k + \delta_m w_m] \quad (121)$$

$$\gamma_{xy} = \frac{\partial u}{\partial y} + \frac{\partial v}{\partial x} = \frac{1}{6V} [\beta_i v_i + \beta_j v_j + \beta_k v_k + \beta_m v_m + \gamma_i u_i + \gamma_j u_j + \gamma_k u_k + \gamma_m u_m] \quad (122)$$

$$\gamma_{xz} = \frac{\partial u}{\partial z} + \frac{\partial w}{\partial x} = \frac{1}{6V} [\delta_i u_i + \delta_j u_j + \delta_k u_k + \delta_m u_m + \beta_i w_i + \beta_j w_j + \beta_k w_k + \beta_m w_m] \quad (123)$$

$$\gamma_{yz} = \frac{\partial v}{\partial z} + \frac{\partial w}{\partial y} = \frac{1}{6V} [\gamma_i w_i + \gamma_j w_j + \gamma_k w_k + \gamma_m w_m + \delta_i v_i + \delta_j v_j + \delta_k v_k + \delta_m v_m]. \quad (124)$$

Portanto, a relação entre deformação e deslocamento é dada por

$$\begin{Bmatrix} \varepsilon_{xx} \\ \varepsilon_{yy} \\ \varepsilon_{zz} \\ \gamma_{xy} \\ \gamma_{xz} \\ \gamma_{yz} \end{Bmatrix} = \frac{1}{6V} \begin{bmatrix} \beta_i & 0 & 0 & \beta_j & 0 & 0 & \beta_k & 0 & 0 & \beta_m & 0 & 0 \\ 0 & \gamma_i & 0 & 0 & \gamma_j & 0 & 0 & \gamma_k & 0 & 0 & \gamma_m & 0 \\ 0 & 0 & \delta_i & 0 & 0 & \delta_j & 0 & 0 & \delta_k & 0 & 0 & \delta_m \\ \gamma_i & \beta_i & 0 & \gamma_j & \beta_j & 0 & \gamma_k & \beta_k & 0 & \gamma_m & \beta_m & 0 \\ \delta_i & 0 & \beta_i & \delta_j & 0 & \beta_j & \delta_k & 0 & \beta_k & \delta_m & 0 & \beta_m \\ 0 & \delta_i & \gamma_i & 0 & \delta_j & \gamma_j & 0 & \delta_k & \gamma_k & 0 & \delta_m & \gamma_m \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} u_i \\ v_i \\ w_i \\ u_j \\ v_j \\ w_j \\ u_k \\ v_k \\ w_k \\ u_m \\ v_m \\ w_m \end{Bmatrix}. \quad (125)$$

A relação entre tensão e deformação é dada pela lei de Hooke generalizada (equação 38). Logo,

$$\{\sigma\} = C\{\varepsilon\} \implies \{\sigma\} = CBU^{(e)}. \quad (126)$$

3.5.3 As condições de contorno

Tal qual o CST, os carregamentos aplicados sobre as fronteiras dos elementos devem ser decompostos em forças nodais equivalentes. O mesmo procedimento descrito na seção anterior é aplicando o PTV. A integração da equação 94 então deve ser feita sobre o tetraedro o que, similar ao CST, tem uma forma algébrica, devido ao fato da simplicidade das funções de interpolação, como também é a mera distribuição uniforme do carregamento sobre os nós que compõe a superfície sobre a qual é aplicado. De acordo com Oñate (2009), a força nodal equivalente sobre os nós de um carregamento uniforme na superfície de um elemento tetraédrico linear é dado por

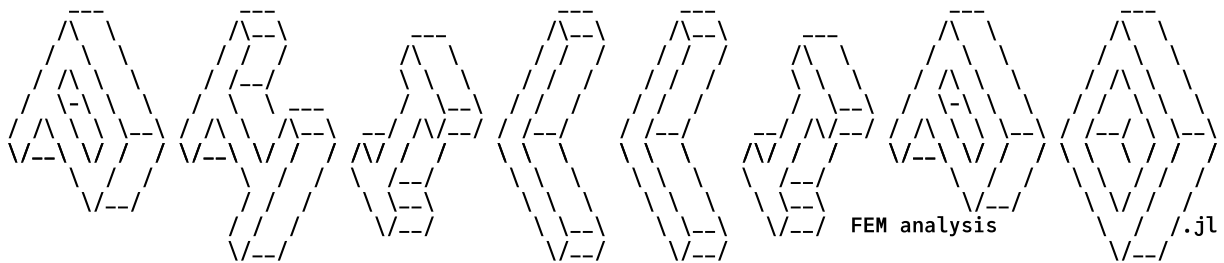
$$F_t^{(e)} = \frac{1}{3}A^{(e)}t, \quad (127)$$

em que $A^{(e)}$ é a área da superfície do elemento em que atua o carregamento uniforme t .

4 PHILLIPO

PHILLIPO é um *solver* para análise de em estruturas discretizadas por elementos finitos, com algumas otimizações computacionais relacionadas a paralelismo e matrizes esparsas, e que visa constituir-se como exemplo didático na implementação legível e concisa dos algoritmos de elementos finitos em Julia no âmbito acadêmico do campus CCT, da UDESC. PHILLIPO é um programa de código aberto, que é distribuído em um repositório público¹ sob a licença LGPL². Portanto, sua utilização é gratuita e livre para fins acadêmicos e comerciais, que incluem a modificação, implementação e venda de qualquer parte do programa, como também da documentação que o acompanha; só se resguarda, entretanto, a devida citação deste documento. A logo de PHILLIPO é mostrada na figura 11.

Figura 11 – Logo estilizada de PHILLIPO.jl



Um *solver*, ou em melhor português, um solucionador em MEF não é uma novidade no mundo acadêmico, nem no comercial. Softwares como Calculix (que é distribuído integrado com o FreeCAD) e o FreeFEM, que já conta com 7 mil commits em seu repositório, são continuamente produzidos e aprimorados desde antes da virada do milênio, um trabalho que demanda tempo e uma comunidade bem ativa. Deste modo, a pretensão de PHILLIPO não é fornecer uma alternativa a esses softwares, muito menos servir de módulo ou biblioteca para agregar algum deles, além do mais, a elaboração de programas robustos e confiáveis é um trabalho demorado e de muitas pessoas.

A pretensão de PHILLIPO é construir uma aplicação simples utilizando o MEF, que possa aproveitar algumas ferramentas de construção de código em Julia, como paralelismo e despachos múltiplos, para apresentar mais uma referência de programação em engenharia no campus CCT, da UDESC, e, deste modo, evidenciar que é possível construir aplicações do MEF de forma simples e legível, e por meio de uma linguagem de programação moderna, como Julia.

Neste capítulo é apresentado como é feita a distribuição, instalação e como se dá o funcionamento de PHILLIPO, dividido em duas partes. A primeira, descrevendo o fluxo de execução normal do programa, isto é, utilizando o GiD como interface de pré e pós-processamento, e, a

¹ O repositório é mantido no GitHub, assim como o presente documento em formato Latex: <<https://github.com/lucas-bublitz/PHILLIPO>>

² O GiD, interface de pré e pós-processamento, é um software distribuído comercialmente, e não está sujeito à mesma licença que PHILLIPO.

segunda, esmiuçando o código, tanto do módulo PHILLIPO, quanto dos arquivos de integração com o GID.

4.1 DISTRIBUIÇÃO PELO PKG.JL E IMPORTAÇÃO DOS *PROBLEMS TYPES* NO GID

O Pkg.jl é o gerenciador de pacotes anexado à Julia, tal como PIP é anexado ao Python. Ele é responsável por distribuir, gerir e empacotar os módulos da linguagem, permitindo relacionar dependências e controlar versionamento. PHILLIPO é distribuído por meio do Pkg.jl, porém, não pelo repositório oficial¹, mas pelo próprio repositório deste trabalho, que pode ser utilizado para o mesmo fim, pela função *add*. A utilização do Pkg.jl determinou a estrutura de a estrutura dos arquivos de código-fonte de PHILLIPO, conforme o próprio manual do pacote².

Como PHILLIPO foi encapsulado em um módulo, pode ser facilmente distribuído iniciando uma sessão Julia e executando:

```
1 add https://github.com/lucas-bublitz/PHILLIPO.jl
```

O Pkg.jl então trata de buscar as dependências do módulo, isto é, os módulos que são importados para uso interno de PHILLIPO: o *SparseArrays*, que fornece as estruturas e funções para alocar e manipular eficientemente matrizes esparsas, o *LinearAlgebra*, implementação do LAPACK em Julia, e o *JSON*, um parser de objetos em JSON para dicionários. No arquivo *Projecy.toml* é possível encontrar tanto essa lista de dependência, e no *Manifest.toml*, são listadas as dependências das dependências, isto é, quais módulos cada módulo importado por PHILLIPO importa para si.³

PHILLIPO utiliza a interface GID para gerar as malhas e definir as condições de contorno. A integração desses programas é feita pelo conjunto de arquivos presente presentes na pasta *\GID connections: PHILLIPO.gid* e *PHILLIPO3D.gid*, que são os *Problem types* do GID para PHILLIPO, e *link.jl*, que é o arquivo que é chamado pelo *script* de execução do GID, e que importa o módulo PHILLIPO.jl e o executa. O conteúdo dessa pasta deve ser copiado para a pasta *... \GiD 16.1.6d \ProblemTypes*, localizada onde o próprio GID está instalado⁴, para que sejam automaticamente carregados durante a inicialização do GID⁵.

4.2 FLUXO DE EXECUÇÃO

O fluxo de execução é uma ferramenta de projeto que tem como objetivo descrever a ordem e as condições que determinadas seções do código são executadas. A utilização de

¹ Há uma série de critérios para que um módulo seja adicionado ao repositório oficial do Pkg.jl, além disso, não é objetivo de PHILLIPO ser distribuído massivamente.

² Acessível em <<https://pkgdocs.julialang.org/v1/>>

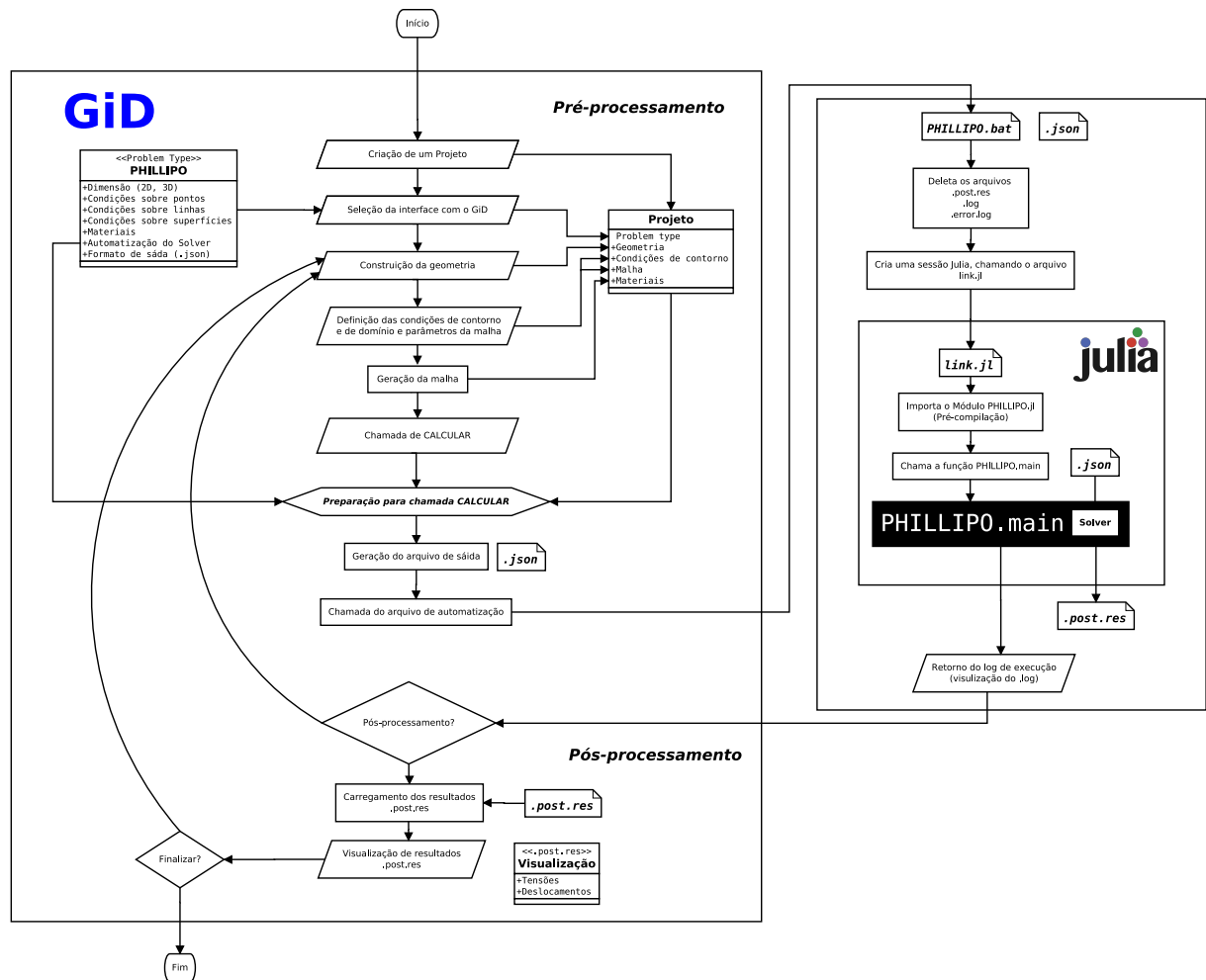
³ O versionamento é importante pois permite que a compilação do pacote seja feita utilizando exatamente os códigos dos módulos de quando foi desenvolvido, assim baixando o risco de resultados inesperados devido a uma alteração no funcionamento de um módulo exterior ao que se trabalha.

⁴ O caminho para a pasta *ProblemTypes* pode variar de acordo com a versão do GID, e com o sistema operacional.

⁵ Também é possível importar *Problem types* dentro da interface do GID, entretanto, desse modo, a importação não é permanente.

PHILLIPO.jl segue os diagramas das figuras 12 e 13. Esses diagramas não representam simplificados e parciais, e não utilizam um padrão ou simbologia formal que é própria desses diagramas.

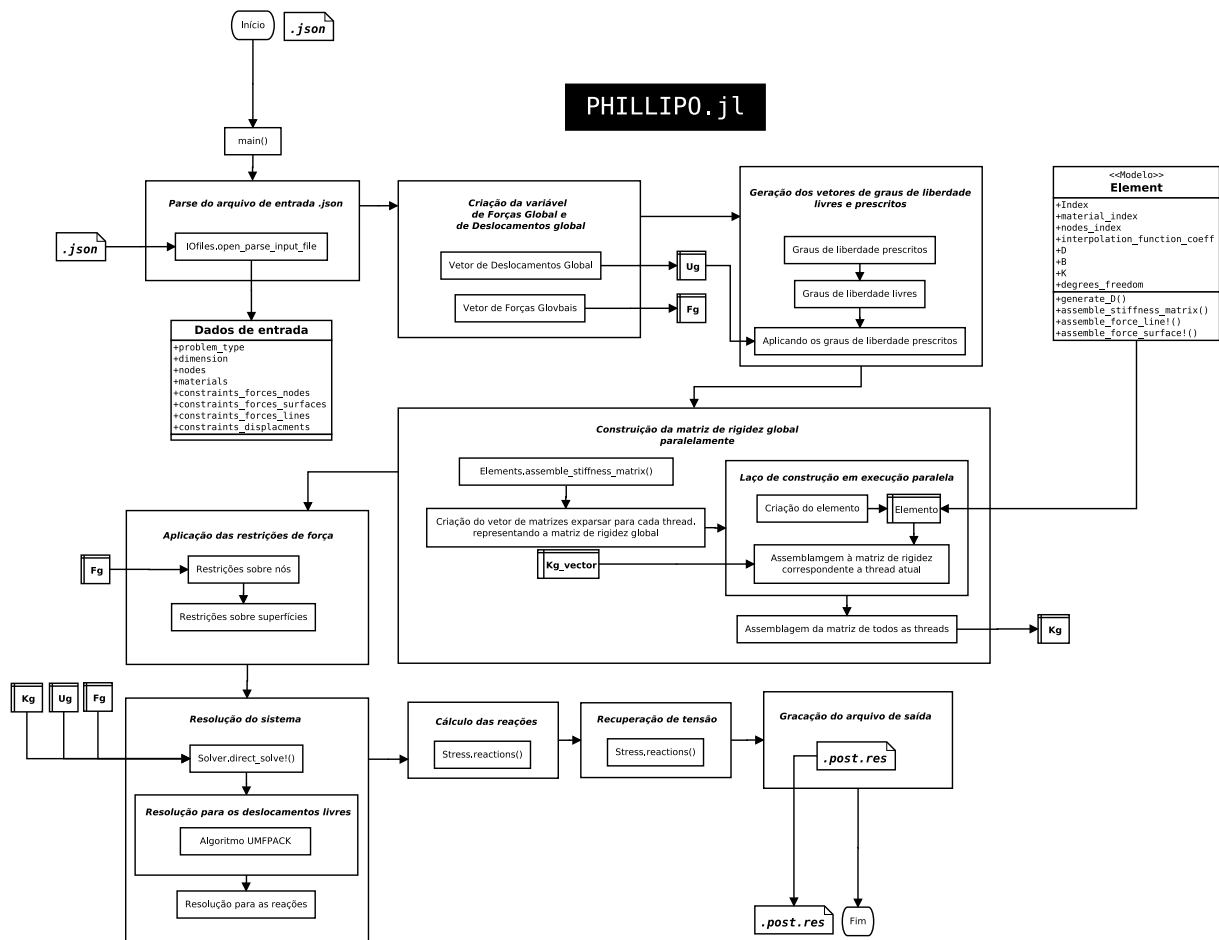
Figura 12 – Fluxograma de execução: GID



Nesses diagramas, é possível separar a execução de uma utilização normal do software em três partes principais:

1. Pré-processamento; Parte em que ocorre a criação da geometria, a definição das propriedades dos materiais, das condições de contorno e das cargas aplicadas, assim como a geração da malha e elementos.
2. Processamento; Parte em que é chamada uma sessão Julia para carregar o módulo PHILLIPO.jl, que é responsável por ler os arquivos de entrada, e executar o algoritmo de elementos finitos, gerando os arquivos de saída para o GID.
3. Pós-processamento; Parte em que o GID lê os arquivos de saída, e gera os gráficos de resultados.

Figura 13 – Fluxograma de execução: PHILLIPO.jl



4.2.1 Pré-processamento

O pré-processamento é realizado totalmente pelo GID (figura 12), e consiste na definição da geometria, das condições de contorno, do material e na geração de malha, e segue:

1. Definição do *Problem type*. Caso o problema físico seja modelado em duas dimensões, deve-se escolher o *Problem type PHILLIPO*, caso seja modelado em três dimensões, deve-se escolher o *Problem type PHILLIPO3D*. Essa escolha define quais arquivos serão utilizados para a definição das condições de contorno, dos materiais, e como será a geração da malha. O GID cria então uma pasta onde os arquivos do problema serão salvos.
2. **Definição da geometria do problema**, que pode ser tanto construída utilizando as ferramentas CAE do próprio GID, como também, importada de um arquivo externo de algum outro software CAD cujo formato seja reconhecido pelo GID ⁶.
3. **Definição das características do material**, como também as condições de contorno: sejam

⁶ O GID reconhece uma grande variedade de arquivo de entrada (sejam de geometria, malhas, condições de contorno), inclusive arquivos próprios de programas comerciais, como ANSYS e Abaqus;

elas deslocamentos sobre pontos, linhas e superfícies, ou carregamentos concentrados sobre pontos, ou carregamentos distribuídos sobre linhas e superfícies.⁷

4. **Geração da malha**, que pode ser amplamente configurada pelas ferramentas oferecidas pelo GID para gerar malhas estruturadas ou não estruturadas, com refinamentos em determinadas regiões, e com a possibilidade de se definir o tipo de elemento a ser utilizado.

5. Chamamento da função de CALCULAR.

A função de CALCULAR do GID, executa o arquivo *.bat* do *problem type*: deleta possíveis arquivos de saída anteriores, e gera os arquivos de saída *.dat*⁸, assim como os arquivos de *log*, e cria a sessão Julia, chamando para ser executado nela o arquivo *link.jl*.

Na sessão Julia, o módulo PHILLIPO.jl é importado, momento em que ocorre a pré-compilação do código, e, em seguida, o chamamento da função principal do módulo *PHILLIPO.main*, passando como parâmetros os caminhos para o arquivo *.json* e o caminho de saída do resultado da análise, assim iniciando o processamento.

4.2.2 Processamento

O processamento é realizado dentro da sessão Julia, executando a função principal de *PHILLIPO.main* (figura 13), e consiste nas seguintes etapas:

1. **Leitura do arquivo de entrada.** O arquivo *.json* é lido e convertido em um dicionário pelo *parser* JSON, cujos dados são distribuídos nas variáveis do problema.
2. **Definição dos graus de liberdade livres e prescritos.** Conforme são as restrições de deslocamento, o programa calcula a numeração dos graus de liberdade prescritos, e os armazena em um vetor.
3. **Construção da matriz global de rigidez paralelamente.** Nessa etapa, o programa chama as funções de construção de elemento paralelamente, utilizando uma macro do módulo *Threads*, para construir a matriz global de rigidez, que é salva no formato COO (um formato de matriz esparsa que armazena os valores em um vetor único cuja ordem não importa para a interpretação da matriz, o que facilita a execução paralela). Após a construção da matriz global de rigidez, é feita a conversão para o formato CSR.
4. **Aplicação das restrições de forças.** As restrições de forças são aplicadas sobre o vetor de forças prescritas. Dependendo do tipo (sobre linhas ou superfícies), são calculadas as forças nodais equivalentes.

⁷ Carregamentos sobre linha só estão disponíveis para o *Problem type* PHILLIPO.

⁸ Embora o arquivo esteja nomeado no formato *dat* ele, na verdade, é um *.json*, pois esse é o padrão de entrada para PHILLIPO.

5. **Resolução do sistema.** Com a matriz global de rigidez e o vetores de deslocamentos e forças nodais, o programa decompõe o sistema pelos graus de liberdade livres e prescritos, e o resolve diretamente, utilizando o método mais apropriado, determinado pelo módulo *LinearAlgebra*, levando em consideração as características da matriz de rigidez global.
6. **Cálculo das reações e recuperação de tensão.** O programa calcula as reações de apoio, utilizando os graus de liberdade prescritos, e, em seguida, calcula as tensões, chamando, novamente, as funções de construção de elementos para resgatar as matrizes de rigidez locais.
7. **Geração do arquivo de saída.** O programa gera o arquivo de saída, no formato *.dat*, que é lido pelo GID para gerar os gráficos de resultados.

Com o fim da execução da função principal, é encerrada a sessão Julia e, e é chamado o programa Notepad para a abrir o arquivo *.log*, onde algumas informações de debug foram impressas durante o processamento.

4.3 INTEGRAÇÃO COM GID

O GID é um software utilizado como pré e pós-processamento. Com ele é possível criar a geometria do problema, definir as propriedades dos materiais, as condições de contorno, as cargas aplicadas, e, principalmente, gerar a malha de elementos. Além de se ser possível a integração com um *solver* qualquer, por meio de um conjunto de arquivos de entrada e saída (ambos configurados de forma a permitir uma certa flexibilidade nessa integração), cuja execução é controlada por um *script* em Batch, o que possibilita a automatização do processo de simulação. Nesta seção é abordado como é feita a integração entre o GID e PHILLIPO, por meio das pastas *PHILLIPO.gid* e *PHILLIPO3D.gid*, sendo que, como a nomeação dos arquivos sugere, a primeira é utilizada para problemas bidimensionais, e a segunda para problemas tridimensionais.

4.3.1 PHILLIPO.gid

O GID pode ser configurado para operar como pré e pós-processamentos de diversos programas, como o Abaqus, o Ansys, o Calculix..., por meio de um *Problem type*, que é como o GID chama o conjunto de arquivos que configuram o formato de saída dos dados, a criação de determinadas propriedades para as condições de contorno e materiais, como também automatizar a execução da simulação, chamando o programa. Pode-se dizer que o *Problem type* é uma interface para que as informações contidas nos arquivos gerados pelo GID (geometria, malha, condições de contorno etc.) sejam salvas em um formato que o programa, o *solver*, possa interpretar, ao passo que o *script* de execução automatiza o chamamento desse, e a simulação seja iniciada.

Na pasta *PHILLIPO.gid* é possível encontrar os seguinte arquivos:

1. *PHILLIPO.cnd*: define as condições de contorno e como são aplicadas;
2. *PHILLIPO.prb*: define as entradas de informações gerais;
3. *PHILLIPO.mat*: define as características dos materiais utilizados para os elementos;
4. *PHILLIPO.bas*: configura o arquivo de saída do GID para ser interpretado por PHILLIPO.jl;
5. *PHILLIPO.bat*: *script* para chamar uma sessão Julia, chamando *link.jl*;
6. *link.jl*: importa o módulo PHILLIPO e o executa.

O primeiro arquivo do *Problem type* de PHILLIPO é *PHILLIPO.cnd*, que define as condições de contorno e sobre quais entidades, leia-se nós, elementos ou geometrias (superfícies, volumes, linhas etc.), são aplicadas, por meio de uma sintaxe específica ⁹, uma forma de marcação de texto, que é interpretada pelo GID.

Figura 14 – Parte do arquivo de condições de contorno: PHILLIPO.cnd

```

1 CONDITION: Constraint_displacement_point
2 CONDTYPE: over points
3 CONDMESHTYPE: over nodes
4 QUESTION: X
5 VALUE: 0.0
6 QUESTION: Y
7 VALUE: 0.0
8 QUESTION: Z
9 value: 0.0
10 END CONDITION

```

Em sua representação parcial, da figura 14, é possível notar a construção de uma condição de contorno por meio de um bloco que inicia na linha 1, com a expressão *CONDITION: Constraint_displacement_point*, que também nomeia esta condição, referente a restrição de deslocamento em pontos (entidade geométrica discretizada por um nó), e que acaba com *END CONDITION*. Dentre essas linhas, são definidas as formas e os valores que essa condição vai aplicar sobre a geometria selecionada, neste caso, os pontos. Na linha 2, é definido, justamente, sobre qual entidade geométrica se aplica essa condição: pontos. Na próxima linha, é definido como que essa informação, que foi associada à entidade geométrica se traduz na malha: essa condição é aplicada sobre os nós que cujo ponto foi discretizado. ¹⁰ As linhas seguintes, 4 a 9, se referem aos valores da condição, neste caso, aos deslocamentos prescritos sobre os nós nas direções de X, Y e Z.

⁹ No manual do usuário do GID, acessível em <<https://gidsimulation.atlassian.net/wiki/spaces/GUM/overview>>, é possível encontrar a descrição o funcionamento de toda essa sintaxe, que compreende desde esse arquivo de condições de contorno, como também, dos outros que compõem a construção do *problem type*.

¹⁰ Isso se deve porque a malha é criada sobre a geometria, posteriormente à aplicação das condições de contorno sobre aquela.

Na condição *Constraint_force_line* (figura 15), o processo é análogo. A restrição de carregamento uniforme é aplicada sobre uma linha (o tipo de geometria), e, diferentemente da anterior, é traduzida sobre as faces. Nesse caso bidimensional, é o segmento de reta determinado pelos nós nas extremidades. Os campos *X*, *Y* e *Z*, referem-se ao vetor dessa carregamento uniformeS.

Figura 15 – Parte do arquivo de condições de contorno: PHILLIPO.cnd

```

1 CONDITION: Constraint_force_line
2 CONDTYPE: over lines
3 CONDMESHTYPE: over face elements
4 QUESTION: X
5 VALUE: 0.0
6 QUESTION: Y
7 VALUE: 0.0
8 QUESTION: Z
9 value: 0.0
10 END CONDITION

```

O arquivo *PHILLIPO.prb* (figura 16) define as entrada de informações gerais ao problema, ou seja, que não são aplicados diretamente sobre a geometria. Somente um campo foi utilizado e se refere ao tipo do estado plano (EPD ou EPT). A sintaxe da linha 3 é indica que esse campo só possa ser preenchido por essas duas opções, no formato *drop-down list*.

Figura 16 – Arquivo de dados gerais: PHILLIPO.prb

```

1 PROBLEM DATA
2
3 QUESTION: type#CB#(plane_stress,plane_strain)
4 value: plane_strain
5 QUESTION: thickness
6 VALUE: 1.0
7
8 END GENERAL DATA

```

O arquivo *PHILLIPO.mat* (figura 17) define as características dos materiais implementados. Somente um material foi definido, o aço AISI 4340, com os campos de módulo de elasticidade, coeficiente de Poisson e massa específica.

Figura 17 – Arquivo de materiais: PHILLIPO.mat

```

1 MATERIAL: AISI_4340_Steel
2 QUESTION: Young_Modulus
3 VALUE: 210E+9
4 QUESTION: Poisson_Ratio
5 VALUE: 0.3
6 QUESTION: Density
7 VALUE: 0.785
8 END MATERIAL

```

O arquivo *PHILLIPO.bas* configura o arquivo de saída do GID. Esse arquivo intercala o conteúdo explícito do arquivo de saída (as partes invariáveis), com trechos de programação, responsáveis por imprimir os valores dinâmicos, aqueles referentes ao problema em si, como as coordenadas dos nós, a conectividade dos elementos etc.¹¹ A separação entre texto e programa se dá pelo caractere `*` no início da linha, indicando que toda ela é uma instrução para ser executada.

O arquivo gerado é do formato *.json*, o que pode ser não usual para aplicações do MEF. Entretanto, esse formato é amplamente utilizado para troca de dados entre aplicações, e, por isso, pode ser facilmente lido por um módulo já consolidado em Julia, o *JSON.jl*¹².

Para gerar as listas de elementos triangulares, foi escrito o seguinte código, dentro do arquivo *emphPHILLIPO.bas*:

```

1      "nodes": [
2 *loop nodes
3 *format "%e,%e"
4      [*NodesCoord],
5 *end
6      null
7  ],

```

Na linha 1 é definido o nome do campo *"nodes"*, separado pelo caractéristicas `:` inicia a declaração do valor daquele campo: uma lista l ¹³. Na linha 2, é iniciado um laço de repetição, que percorre todos os nós, e, para cada um, é adicionado um elemento à lista, que é composto por um par de coordenadas, separadas por vírgula, e envolvidas por colchetes, pois cada nó é apresentando por um vetor que contém suas coordenadas. Na linha 5, é fechado o laço de repetição, e, na linha 6, é fechado o campo `]`.

Esse padrão se repete para o elementos também, com a diferença que estes, dependendo do seu tipo (CST ou tetraedro), são listas dentro da tupla que representa dos os elementos. Na figura 18, é possível nota essa hierarquia dos dados na estrutura de entrada de PHILLIPO.

No exemplo da figura

O arquivo *PHILLIPO.bat* (figura 19) é um *script* que é chamado pela função CALCULAR do GID, para iniciar a análise do problema. É um arquivo de linhas de comando (ou arquivo de lote)¹⁴ para o sistema operacional Windows¹⁵.

Nas linhas 1 a 3, são feitas as exclusões de possíveis arquivos restantes de análises passadas. Na linha 4, é chamada a sessão Julia, passando como parâmetro o arquivo *link.jl*, o caminho absoluto do arquivo de entrada *.dat* e o local em que o arquivo de saída deve ser gravado. No final da linha, os operadores `right-shift` » redirecionam o debug da execução de PHILLIPO

¹¹ Esse modo de compor os arquivo, misturando textos estáticos e programação é similar aos arquivos em PHP. Isso numa utilização mais clássica.

¹² JSON se refere a *JavaScript Object Notation*, um formato de texto para representar objetos na linguagem JavaScript, que se tornou padrão na implementação de APIs.

¹³ Essa sintaxe de listas e *literals* é próprio do JavaScript.

¹⁴ Comandos utilizados dentro do terminal do sistema: o CMD.

¹⁵ Por conta disso, o *PHILLIPO.gid* só funciona em sistemas Windows.

Figura 18 – Arquivo de saída do quarto caso de verificação: 4 verification case.dat

```

1
2 {
3   "title": "PHILLIPO: arquivo de entrada",
4   "type": "plane_stress",
5   "materials": [
6     ["AISI_4340_Steel", 210E+9, 0.3],
7     null
8   ],
9   "nodes": [
10    [0.000000e+00,0.000000e+00],
11    [1.000000e+00,0.000000e+00],
12    [0.000000e+00,1.000000e+00],
13    [1.000000e+00,1.000000e+00],
14    null
15  ],
16  "elements": {
17    "linear": {
18      "triangles": [
19        [1, 1, 1,2,4],
20        [2, 1, 4,3,1],
21        null
22      ]
23    }
24  },
25  "constraints": {
26    "displacements": [
27      [1, 0.0, 0.0, 0.0],
28      [3, 0.0, 0.0, 0.0],
29      null
30    ],
31    "forces_nodes": [
32      null
33    ],
34    "forces_lines": [
35      [2, 4,3, 0.000000e+00, -1.000000e+06, 0.000000e+00],
36      null
37    ],
38    "forces_surfaces": [
39      null
40    ]
41  }
42 }

```

para o arquivos *.log* e *.error.log*. Na linha 5, o arquivo log de erro é aglutinado ao arquivo de log para que, quando a linha 5 for executada, o aplicativo Notepad exiba os dois conteúdos juntos¹⁶.

A flag *-t* com o parâmetro *auto* na linha 4, indica que a sessão Julia deve ser iniciado utilizando um número de threads disponibilizados pelo sistema¹⁷. Isso é importante para que ocorra a montagem da matriz global de rigidez paralelamente.

Figura 19 – Arquivo de execução: PHILLIPO.bat

```
1 del %1.post.res
2 del %1.log
3 del %1.error.log
4 call julia -t auto %3\link.jl "%1.dat" "%1.post.res" >> %1.log 2>> %1.
  error.log
5 type %1.error.log >> %1.log
6 notepad %1.log
```

O arquivo *link.jl* (figura 20) é o arquivo que executado dentro da sessão Julia. Ele recebe esse nome porque é o arquivo que faz a ligação entre a execução do GID e o módulo PHILLIPO.jl, e, por não estar previsto dentro da estrutura de um *problem type*, recebe um nome diferenciado. Nele é apenas importado o módulo PHILLIPO.jl (linha 1) e chamado a função principal do módulo (linha 2), passando como parâmetros o caminho para o arquivo de entrada e o caminho para a gravação do arquivo de saída¹⁸. A última linha é responsável por garantir o encerramento da sessão Julia.

A macro *@time* é responsável por fornecer algumas informações sobre o tempo de execuções do módulo (como também memória alocada e tempo dedicado à compilação ao *Garbage Collector*). É uma ferramenta de debug, e seu retorno é impresso no arquivo *.log*.

Figura 20 – Arquivo de execução: link.jl

```
1 import PHILLIPO
2 Base.compilecache(Base.PkgId(PHILLIPO))
3 @time PHILLIPO.main(ARGS[1], ARGS[2])
4 exit(0)
```

4.4 ESTRUTURA DO MÓDULO PHILLIPO.JL

O código-fonte de PHILLIPO foi organizado em seis módulos, ao longo de sete arquivos *.jl*, agrupando as funções em categorias conforme sua aplicação. O início da definição do módulo de PHILLIPO é o arquivo homônimo, localizado na raiz da pasta *src* do repositório. São os arquivos:

¹⁶ Assim foi implementado porque se o mesmo arquivo receber o fluxo de texto, o conteúdo dos erros sobrescrevem aos normais

¹⁷ O parâmetro pode ser alterado para forçar a sessão Júlia a usar mais threads.

¹⁸ ARGS é um vetor presente em toda a sessão Julia, que recebe os parâmetros passados para o executável que a iniciou.

1. *PHILLIPO.jl*: define o módulo PHILLIPO e a função principal;
2. *includes.jl*: juntas as importações dos módulos internos;
3. *IOfiles.jl*: define as funções de leitura e escrita de arquivos;
4. *Elements.jl*: define as estruturas dos elementos e suas funções;
5. *Matrices.jl*: define a estrutura das matrizes COO;
6. *Solver.jl*: resolução do sistema;
7. *Stress.jl*: recuperação de tensões.

4.4.1 PHILLIPO.jl

O arquivo *PHILLIPO.jl* é o que define o próprio módulo, e por conta disso é homônimo. Nele é se encontra a função principal *main*, que vai conduzir toda a parte do processamento da análise ¹⁹.

Figura 21 – Parte do arquivo principal do módulo: PHILLIPO.jl

```

1      # Módulo do escopo principal
2      include("./modules/includes.jl") # Módulos internos
3      # MÓDULOS EXTERNOS
4      import LinearAlgebra
5      import SparseArrays
6
7      # MÓDULOS INTERNOS
8      import .IOfiles
9      import .Elements
10     import .Solver
11     import .Matrices
12     import .Stress
13
14     # PONTO DE PARTIDA (aqui inicia a execução)
15     function main(
16         input_path::String, # Arquivo de entrada (.json)
17         output_path::String # Arquivo de saída (.post.res, formato
18     do GiD)
19     )

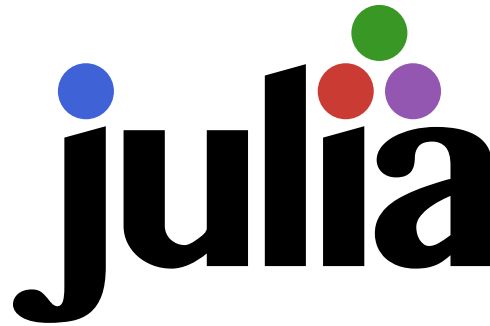
```

¹⁹ Pode-se pensar na função principal como um ponto de partida do software, um *int main()* como em C.

5 JULIA & SEUS MÓDULOS

A programming language to heal the planet together. (Alan Edelman)

Figura 22 – Logo da linguagem Julia



Julia é uma linguagem de programação dinâmica, opcionalmente tipada, pré-compilada, generalista, de código livre¹ e de alto nível, criada por Jeff Bezanson, Stefan Karpinski, Viral B. Shah e Alan Edelman, em 2012, com o objetivo de minimizar o problema das duas linguagens (*the two language problem*). É voltada para a programação científica, com capacidades de alta performance e sintaxe simples, similar à notação matemática usual. (SHERRINGTON; BALBEART; SENGUPTA, 2015)

Na aplicação do MEF, a linguagem se destaca por sua sintaxe próxima à linguagem matemática, principalmente na manipulação de matrizes e vetores, que permite a implementação de algoritmos de forma simples e rápida, e por sua capacidade de processamento paralelo, que permite a otimização na construção e resolução de sistemas algébricos grandes. Além disso, o empacotamento oferecido pela linguagem, por meio do *Pkg.jl*, fornece ferramentas de controle e versionamento, como também, a criação de pacotes, que são facilmente compartilhadas e instaladas.

Este capítulo aborda os seguintes tópicos que são relevantes para a aplicação do MEF em Julia, e que foram explorados no desenvolvimento de PHILLIPO:

1. sintaxe;
2. empacotamento com *Pkg.jl*;
3. processamento paralelo com *Threads.jl*;
4. matrizes esparsas com *SparseArrays.jl*;
5. performance de Julia;

¹ A Linguagem Julia, é distribuída, quase integralmente, sob a MIT License, que permite a modificação, utilização e distribuição, seja comercial ou não, de qualquer parte do código, assim como das documentações associadas. Os componentes do módulo Base e as bibliotecas e ferramentas externas, que têm licença diferente, assim como a da própria Julia, podem ser consultados diretamente no repositório da linguagem: <<https://github.com/JuliaLang/julia>>.

5.1 O ESCOPO DE JULIA

"In short, because we are greedy."(Jeff Bezanson, Stefan Karpinski, Viral B. Shah e Alan Edelman, em *Why We Created Julia*)

A linguagem Julia é rápida. Tão rápida (BEZANSON et al., 2014)

6 VALIDAÇÃO & VERIFICAÇÃO

O desenvolvimento de softwares de simulação, seja utilizando o MEF ou não, é sempre acompanhado de uma bateria de testes, além de um procedimento de validação e verificação (V & V), que garante, dentro de uma margem de abrangência do que se propõe, sua capacidade de reproduzir resultados concisos, sendo, então, um espelho da realidade.

Verificação, dentro desse contexto, é o procedimento pelo qual se evidencia a exata implementação do modelo matemático no próprio software, ou seja, a verificação que a modelagem programada é equivalente ao algoritmo matemático, dentro dos limites impostos pela aritmética computacional em relação às operações em ponto flutuante¹. Já a validação, por sua vez, é o processo para determinar a acurácia que um modelo computacional possui de apresentar a realidade, dentro dos limites que se propõe. Essas definições estão de acordo com o documento *An Overview of the Guide for Verification and Validation in Computational Solid Mechanics*, referente a norma ASME respectiva.

Por questões de simplificação, a verificação foi realizada por comparação com outro programa que realiza a mesma análise, o Abaqus, e a validação, por comparação com resultados analíticos, já consolidados experimentalmente.

6.1 VERIFICAÇÃO

Para verificar os resultados foram utilizados seis sequências de comparação (três com o elemento tetraédrico, e três triangulares), nas quais aplicaram-se todas as condições de contorno (deslocamentos prescritos, carregamentos pontuais, em linhas e superficiais). Os resultados foram comparados com os obtidos no Abaqus, nas mesmas condições de contorno e geometrias, para deslocamentos nodais e tensões sobre os elementos. As geometrias empregadas foram simples, com malhas pouco refinadas, a fim de facilitar a comparação sobre todos os nós e elementos.

Os arquivos de verificação estão disponíveis no repositório do projeto, no pasta *verification*, na qual constam os arquivos de entrada do Abaqus (*.cae*) e do GID (*.gid*), além dos arquivos respectivos arquivos de saída, (*.rpt* e *.post.res*)

Em todos os casos, definiu-se o aço ASIS 4340 como material, cujas características físicas empregadas aqui foram: $E = 210\text{GPa}$ (módulo de elasticidade) e $\nu = 0.3$ (coeficiente de Poisson).

Primeiramente, o problema é definido no Abaqus, para depois ser exportado para o GID, a fim de se manter tanto a geometria como a malha e, principalmente, as identificações dos nós e elementos, o que facilitada a comparação dos resultados. O procedimento empregado em todos os casos foi o seguinte:

1. Definição do problema no Abaqus (*.cae*);

¹ No computador, os números ditos Reais (\mathbb{R}) são representados por um ponto flutuante, que é uma forma discreta, pois os computadores são desenvolvidos em lógica booleana

- a) Construção da geometria;
 - b) Definição do material (AISI 4340 STEEL);
 - c) Construção da malha;
 - d) Definição das condições de contorno;
2. Execução da análise;
 3. Exportação dos resultados para um arquivo de texto (*.rpt*);
 - a) utilização da ferramenta *probe* sobre os nós (deslocamentos nodais);
 - b) utilização da ferramenta *probe* sobre os elementos (componentes das tensões e tensão de von Mises);
 4. Importação do arquivo de *input* no GID (*.inp*);
 5. Definição do problema no GID;
 - a) Definição do material (AISI 4340 STEEL);
 - b) Definição das condições de contorno;
 6. Execução da análise;
 7. Exportação do arquivo de resultados (*.post.res*);
 8. Comparação dos resultados.

As análises podem ser repetidas diretamente utilizando os arquivos *.inp*, para dar entrada com dados do problema no Abaqus, e os arquivos *.dat* (dentro da pasta *.gid*), para dar entrada com dados do problema em PHILLIPO. No Abaqus é necessário importar o modelo, e no PHILLIPO é necessário chamar a função principal do módulo indicando a localização do arquivo *.dat*, para que não seja preciso utilizar a interface do GID. A numeração dos casos de verificação segue a mesma sequência de apresentação deste capítulo.

6.1.1 Casos tridimensionais (elemento tetraédrico)

Nos casos tridimensionais foi empregado a geometria de um cubo unitário, conforme a figura 23a, com a malha descrita na tabela 1 (figura 23b) e conectividade na tabela 2. A face formada pelos nós 3, 4, 7 e 6 foi engastada, e as demais condições de contorno foram aplicadas nas seguintes sequências:

1. Carregamento superficial (figura 24a), resultados nas tabelas 3 e 4;
2. Carregamento pontual (figura 24b), resultados nas tabelas 5 e 6;

Figura 23 – O cubo unitário.

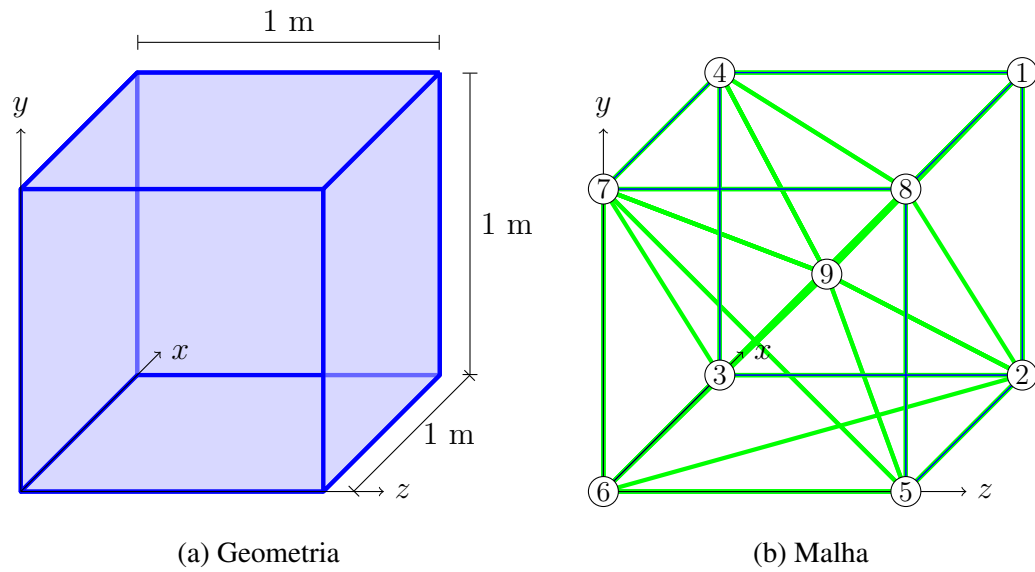


Tabela 1 – Descrição dos nós para a malha do cubo unitário.

Nó	x [m]	y [m]	z [m]
1	1.00	1.00	1.00
2	1.00	0.00	1.00
3	1.00	0.00	0.00
4	1.00	1.00	0.00
5	0.00	0.00	1.00
6	0.00	0.00	0.00
7	0.00	1.00	0.00
8	0.00	1.00	1.00
9	4.929074e-01	5.337674e-01	5.471772e-01

Tabela 2 – conectividade dos elementos na malha do cubo unitário.

Elemento	Nó 1	Nó 2	Nó 3	Nó 4
1	2	6	5	9
2	9	6	5	7
3	7	9	8	5
4	6	7	9	3
5	4	9	1	8
6	3	4	9	1
7	3	7	9	4
8	3	9	2	1
9	5	9	8	2
10	9	2	1	8
11	6	9	2	3
12	7	9	4	8

Figura 24 – Condições de contorno para os casos tridimensionais.

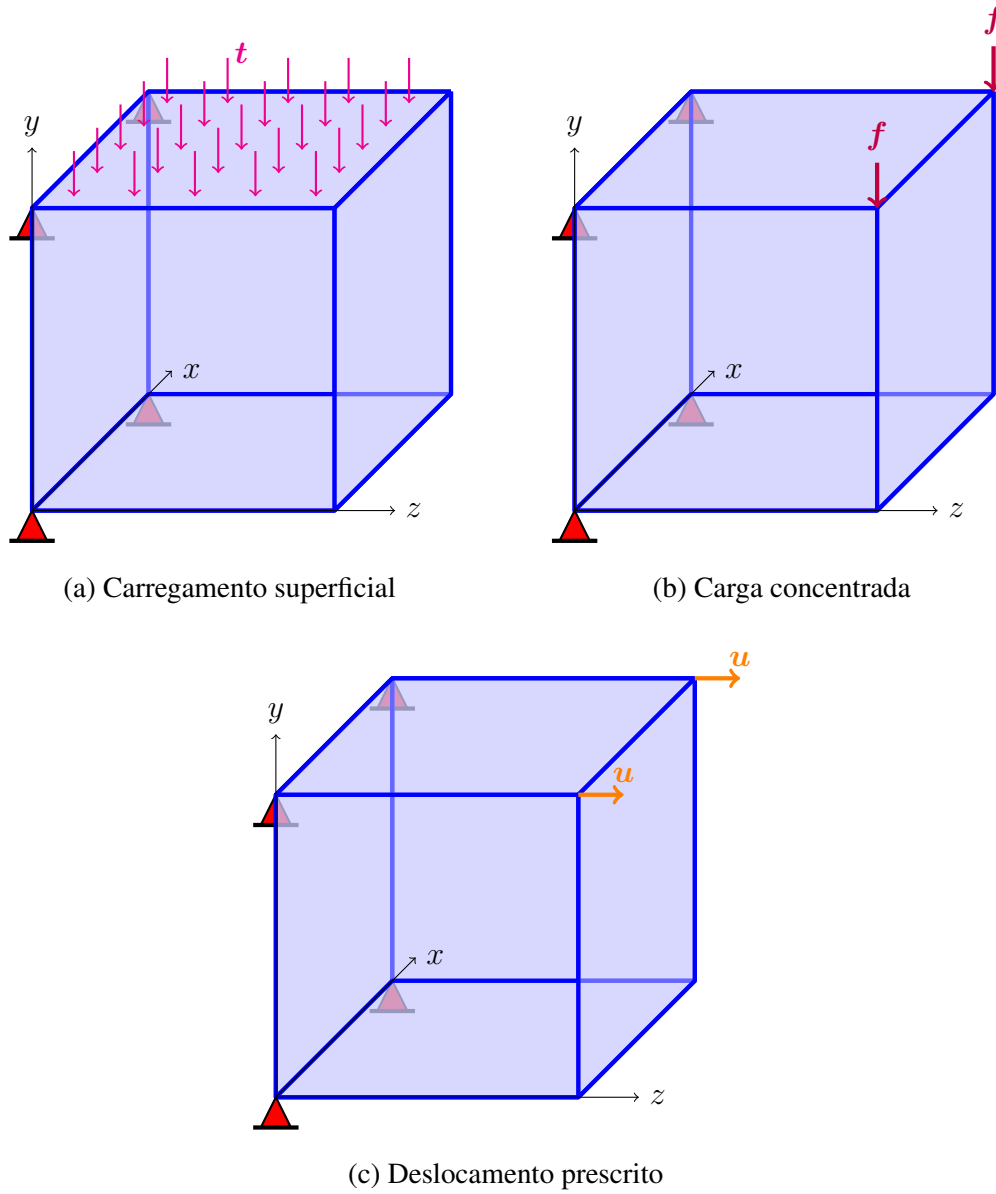


Tabela 3 – Deslocamentos nodais para o primeiro caso tridimensional.

Nó	PHILLIPO.jl		
	x [m]	y [m]	z [m]
1	8.65925×10^{-8}	-8.92024×10^{-6}	1.71092×10^{-6}
2	2.34872×10^{-7}	-7.50586×10^{-6}	-2.45344×10^{-6}
3	0.0	0.0	0.0
4	0.0	0.0	0.0
5	-4.97641×10^{-7}	-7.52208×10^{-6}	-1.51181×10^{-6}
6	0.0	0.0	0.0
7	0.0	0.0	0.0
8	-2.34375×10^{-7}	-1.04911×10^{-5}	3.58197×10^{-6}
9	-1.43153×10^{-7}	-4.38813×10^{-6}	1.65793×10^{-7}

Tabela 4 – Tensões sobre os elementos para o primeiro caso tridimensional.

ID	PHILLIPO.jl [Pa]					
	σ_x	σ_y	σ_z	σ_{xy}	σ_{xz}	σ_{zy}
1	-3.96885×10^4	-2.42821×10^5	-4.02234×10^5	-3.37838×10^4	-3.87057×10^5	-1.16248×10^5
2	-1.09096×10^5	-1.51419×10^5	-3.95636×10^5	-4.46066×10^4	-6.07553×10^5	1.22526×10^5
3	1.36097×10^5	-3.78867×10^5	6.79384×10^5	1.60388×10^4	-4.35943×10^5	7.62264×10^4
4	3.67093×10^4	3.67093×10^4	8.56550×10^4	0.00000	-6.47735×10^5	-2.11311×10^4
5	-3.70490×10^4	-5.35656×10^5	1.87482×10^5	1.31695×10^5	-4.22653×10^5	-1.44130×10^5
6	3.13504×10^5	2.52807×10^5	5.29187×10^5	-7.84963×10^4	-7.20481×10^5	1.29700×10^5
7	3.67093×10^4	3.67093×10^4	8.56550×10^4	0.00000	-6.47735×10^5	-2.11311×10^4
8	-3.61274×10^5	-6.51080×10^5	-8.18929×10^5	-8.74518×10^4	-2.69891×10^5	1.32782×10^5
9	1.77784×10^3	-5.96175×10^5	8.93419×10^4	2.25736×10^4	-4.28830×10^5	-4.98169×10^4
10	6.71645×10^4	-2.13160×10^5	2.12365×10^5	1.14907×10^5	-4.96502×10^5	-1.26844×10^5
11	-3.61046×10^5	-4.46115×10^5	-7.57371×10^5	-4.11090×10^4	-3.78014×10^5	1.89704×10^4
12	8.25382×10^4	-3.86038×10^5	6.61165×10^5	2.58282×10^3	-5.36544×10^5	-1.89303×10^4

Tabela 5 – Deslocamentos nodais para o segundo caso tridimensional.

Nó	PHILLIPO.jl		
	x [m]	y [m]	z [m]
1	1.02738×10^{-6}	-2.02588×10^{-5}	3.00251×10^{-6}
2	-4.34358×10^{-7}	-1.56996×10^{-5}	-4.85199×10^{-6}
3	0.0	0.0	0.0
4	0.0	0.0	0.0
5	-1.19159×10^{-6}	-1.38869×10^{-5}	-2.90123×10^{-6}
6	0.0	0.0	0.0
7	0.0	0.0	0.0
8	4.4546×10^{-7}	-1.89878×10^{-5}	6.81349×10^{-6}
9	-3.03331×10^{-7}	-8.53913×10^{-6}	1.49066×10^{-7}

Tabela 6 – Tensões sobre os elementos para o segundo caso tridimensional.

ID	PHILLIPO.jl [Pa]					
	σ_x	σ_y	σ_z	σ_{xy}	σ_{xz}	σ_{zy}
1	-1.48107×10^5	-2.84665×10^5	-7.39090×10^5	-1.50128×10^5	-7.13362×10^5	-2.53806×10^5
2	-1.51519×10^5	-2.65791×10^5	-7.34452×10^5	-1.54118×10^5	-1.12164×10^6	1.88313×10^5
3	3.31474×10^5	-5.63353×10^5	1.36127×10^6	4.57622×10^4	-7.48975×10^5	1.91682×10^5
4	3.30055×10^4	3.30055×10^4	7.70128×10^4	0.0	-1.26047×10^6	-4.47749×10^4
5	3.41582×10^4	-7.18663×10^5	4.25177×10^5	-3.84442×10^3	-1.04271×10^6	-2.24829×10^5
6	8.46258×10^5	5.70548×10^5	1.05557×10^6	-4.05526×10^5	-1.63629×10^6	3.20919×10^5
7	3.30055×10^4	3.30055×10^4	7.70128×10^4	0.0	-1.26047×10^6	-4.47749×10^4
8	-6.68634×10^5	-1.67458×10^6	-1.72188×10^6	-2.77724×10^5	-6.33643×10^5	1.86079×10^5
9	-8.99318×10^4	-1.03624×10^6	2.06398×10^5	-1.41868×10^4	-8.14231×10^5	-9.35646×10^4
10	-8.71417×10^4	-9.17625×10^5	2.19806×10^5	1.54039×10^4	-9.61902×10^5	-2.44647×10^5
11	-5.76185×10^5	-5.60648×10^5	-1.35997×10^6	-9.93562×10^3	-8.43752×10^5	-3.50827×10^4
12	3.44607×10^5	-2.96558×10^5	1.44525×10^6	9.47744×10^4	-9.13586×10^5	3.59795×10^4

Tabela 7 – Deslocamentos nodais para o terceiro caso tridimensional.

Nó	PHILLIPO.jl		
	x [m]	y [m]	z [m]
1	0.00000×10^0	0.00000×10^0	0.10000×10^0
2	-5.32004×10^{-3}	-1.33670×10^{-3}	-1.85191×10^{-3}
3	0.00000×10^0	0.00000×10^0	0.00000×10^0
4	0.00000×10^0	0.00000×10^0	0.00000×10^0
5	1.45540×10^{-2}	1.22280×10^{-2}	2.39641×10^{-2}
6	0.00000×10^0	0.00000×10^0	0.00000×10^0
7	0.00000×10^0	0.00000×10^0	0.00000×10^0
8	0.00000×10^0	0.00000×10^0	0.10000×10^0
9	1.19228×10^{-3}	1.15650×10^{-2}	2.80404×10^{-2}

Tabela 8 – Tensões sobre os elementos para o terceiro caso tridimensional.

ID	PHILLIPO.jl [Pa]					
	σ_x	σ_y	σ_z	σ_{xy}	σ_{xz}	σ_{zy}
1	-9.09572×10^7	6.61804×10^9	6.99059×10^9	-6.37915×10^8	5.17203×10^9	-9.09626×10^8
2	-9.80149×10^8	1.239×10^9	5.11012×10^9	7.98683×10^8	9.87649×10^8	3.62163×10^9
3	7.42606×10^9	7.28382×10^9	2.5413×10^{10}	-2.14641×10^8	6.14136×10^9	1.43759×10^9
4	6.2086×10^9	6.2086×10^9	1.44867×10^{10}	0.0	1.70712×10^9	1.75993×10^8
5	9.11014×10^9	5.10314×10^9	2.5264×10^{10}	-2.06548×10^8	4.62152×10^9	0.0
6	1.14507×10^{10}	1.18305×10^{10}	2.79844×10^{10}	-1.84206×10^9	0.0	4.24913×10^9
7	6.2086×10^9	6.2086×10^9	1.44867×10^{10}	0.0	1.70712×10^9	1.75993×10^8
8	-7.66859×10^8	-1.48395×10^8	-6.63477×10^8	-1.41522×10^9	8.11854×10^9	3.60189×10^9
9	-7.36171×10^8	4.98949×10^8	1.0959×10^{10}	-2.27113×10^9	3.90283×10^9	-2.83479×10^9
10	6.70973×10^9	6.92566×10^9	1.54401×10^{10}	4.29695×10^8	6.05251×10^9	-6.55085×10^8
11	2.56666×10^9	6.28802×10^9	2.2675×10^9	6.20905×10^8	4.28842×10^9	-4.29695×10^8
12	9.11014×10^9	5.10314×10^9	2.5264×10^{10}	-2.06548×10^8	4.62152×10^9	0.0

3. Deslocamento prescrito (figura 24c), resultados nas tabelas 7 e 8.

Em todas as sequências de comparação para o caso tridimensionais, os resultados exportados do Abaqus convergiram com os produzidos por PHILLIPO, com exceção dos deslocamentos prescritos, que não são definidos exatamente zero nos engastes, o que pode ser devido ao procedimento de solução do sistema no Abaqus, por algum método iterativo ou de penalização, porém essa diferença é desprezível.

Destes modo, fica demonstrado que algoritmo matemático do ME foi implementado corretamente nessas condições.

6.1.2 Casos bidimensionais (elemento triangular)

Nos casos bidimensionais foi empregado a geometria de um quadrado unitário, conforme a figura 25a, com a malha descrita na tabela 9 (figura 23b) e conectividade na tabela 10. A fronteira formada pelos nós 1 e 3, foi engastada, e as demais condições de contorno foram aplicadas nas seguintes sequências, dentro da análise do EPT:

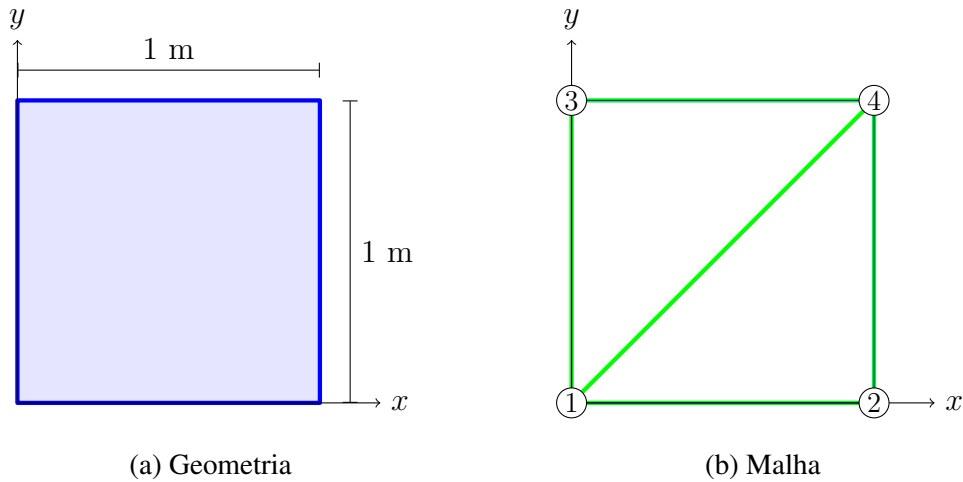
Tabela 9 – Descrição dos nós para a malha do quadrado unitário.

Nó	x [m]	y [m]
1	0.000000e+00	0.000000e+00
2	1.000000e+00	0.000000e+00
3	0.000000e+00	1.000000e+00
4	1.000000e+00	1.000000e+00

Tabela 10 – conectividade dos elementos na malha do quadrado unitário.

Elemento	Nó 1	Nó 2	Nó 3
1	1	2	4
2	4	3	1

Figura 25 – O quadrado unitário.



1. Carregamento em linha (figura 26a), resultados nas tabelas 11 e 12;
2. Carregamento pontual (figura 26b), resultados nas tabelas 13 e ??;
3. Deslocamento prescrito (figura 24c) resultados nas tabelas 15 e ??.

Em todas as sequências de comparação para o caso bidimensionais, os resultados exportados do Abaqus convergiram com os produzidos por PHILLIPO, com exceção, tal qual nos

Tabela 11 – Deslocamentos nodais para o primeiro caso bidimensionais.

Nó	PHILLIPO.jl	
	x [m]	y [m]
1	0.0	0.0
2	-1.15402×10^{-6}	-6.94059×10^{-6}
3	0.0	0.0
4	1.50022×10^{-6}	-8.09460×10^{-6}

Figura 26 – Condições de contorno para os casos bidimensionais.

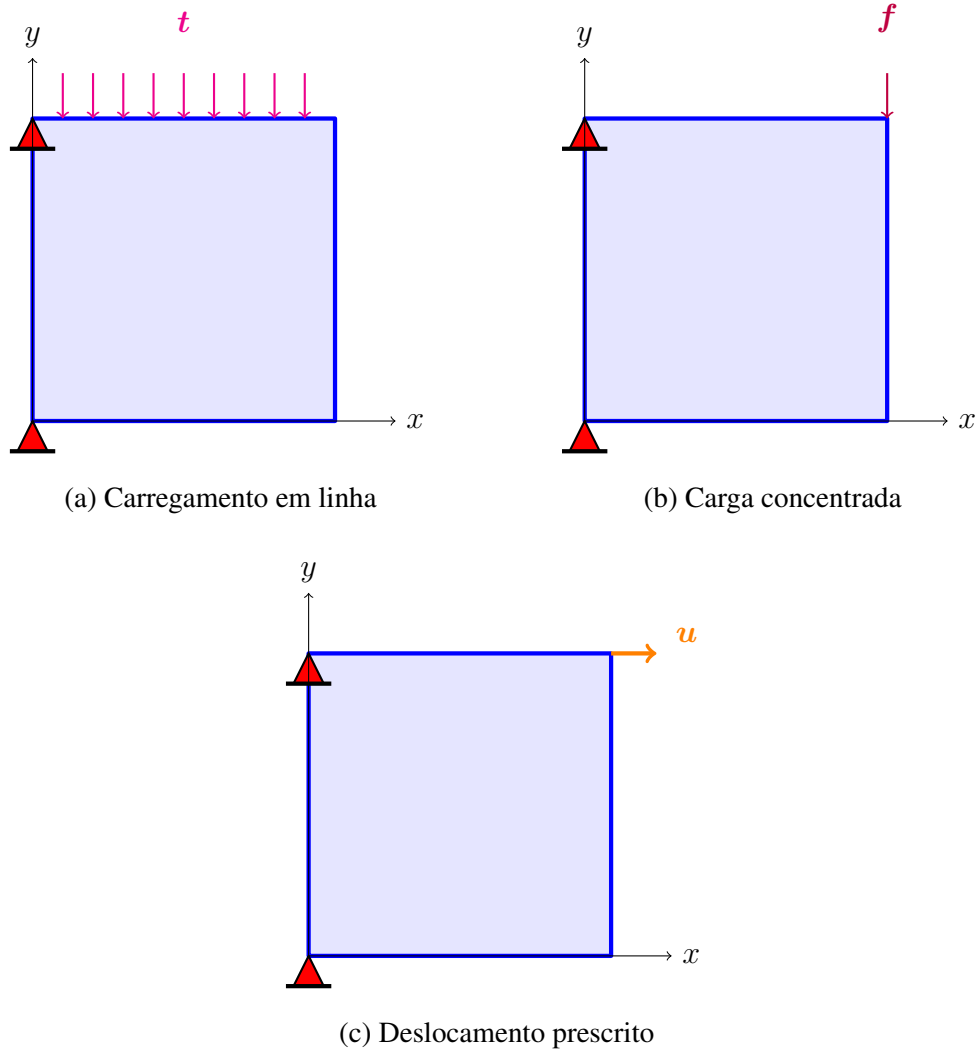


Tabela 12 – Tensões sobre os elementos para o primeiro caso tridimensional.

ID	PHILLIPO.jl [Pa]		
	σ_x	σ_y	σ_{xy}
1	-3.46205×10^5	-3.46205×10^5	-3.46205×10^5
2	3.46205×10^5	1.03862×10^5	-6.53794×10^5

Tabela 13 – Deslocamentos nodais para o segundo caso bidimensionais.

Nó	PHILLIPO.jl	
	x [m]	y [m]
1	0.0	0.0
2	-1.15402×10^{-6}	-6.94059×10^{-6}
3	0.0	0.0
4	1.50022×10^{-6}	-8.09460×10^{-6}

Tabela 14 – Tensões sobre os elementos para o segundo caso tridimensional.

ID	PHILLIPO.jl [Pa]		
	σ_x	σ_y	σ_{xy}
1	-3.46205×10^5	-3.46205×10^5	-3.46205×10^5
2	3.46205×10^5	1.03862×10^5	-6.53794×10^5

Tabela 15 – Deslocamentos nodais para o terceiro caso bidimensionais.

Nó	PHILLIPO.jl	
	x [m]	y [m]
1	0.0	0.0
2	1.75000×10^{-2}	-1.75000×10^{-2}
3	0.0	0.0
4	1.00000×10^{-1}	0.0

Tabela 16 – Tensões sobre os elementos para o terceiro caso tridimensional.

ID	PHILLIPO.jl [Pa]		
	σ_x	σ_y	σ_{xy}
1	5.25000×10^9	5.25000×10^9	5.25000×10^9
2	2.30769×10^{10}	6.92308×10^9	0.0

casos tridimensionais, dos deslocamentos prescritos, que não são definidos exatamente zero nos engastes, e, da mesma forma, essa diferença é desprezível.

Destes modo, fica demonstrado que algoritmo matemático do ME foi implementado corretamente nessas condições.

6.2 VALIDAÇÃO

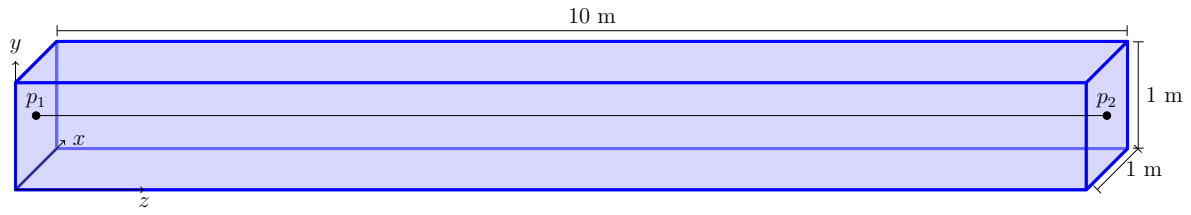
Para validar os resultados obtidos pelo PHILLIPO.jl, foi utilizado a comparação com a solução analítica um problema de viga longa, na teoria de Euler-Bernoulli, analisando o deslocamento vertical sobre a linha elástica, que passa no centro da viga.

A viga longa é um problema clássico, que consiste em simplificações da teoria da elasticidade aplicada diretamente sobre vigas. Nesse contexto, os deslocamentos da linha elástica da viga é modelado pela equação diferencial de Euler-Bernoulli, dada por:

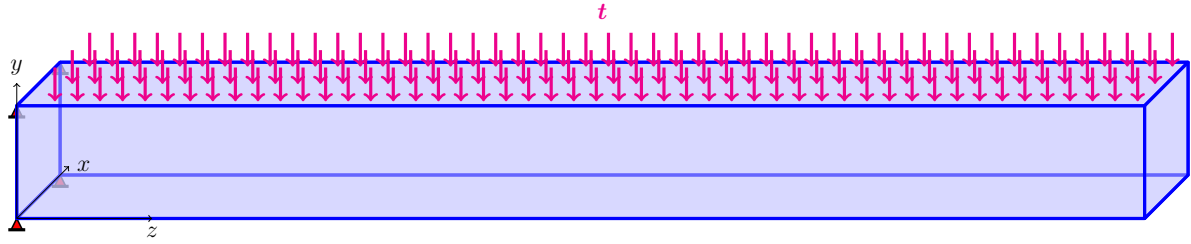
$$EIv^{(4)}(x) = q(x), \quad (128)$$

em que E é o módulo de elasticidade do material, I é o momento de inércia da seção transversal da viga, $v(x)$ é o deslocamento vertical da linha elástica, $q(x)$ é a carga normal a sua superfície, x é a posição ao longo da viga. Para determinar a distribuição $v(x)$ é necessário conhecer as condições de contorno que descrevem a liberdade da viga. (HIBBELER, 2010)

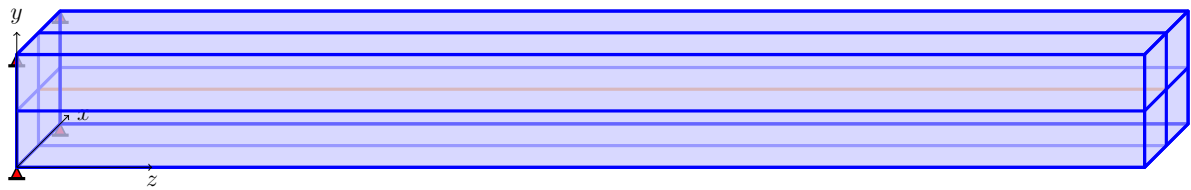
Figura 27 – Uma viga longa.



(a) Geometria



(b) Condições de contorno



(c) Geometria no GID

Seja uma viga \mathcal{B} , como na figura 27a, composta pelo aço AISI, de $E = 210\text{GPa}$ (módulo de elasticidade) e $\nu = 0.3$, e que está engastada em uma extremidade e livre na outra, e sujeita a um carregamento distribuído $t = -100\text{ kPa } \hat{y}$, conforme a figura 27b. A viga possui uma seção transversal quadrada, logo seu momento de inércia é dado por $I = \frac{b^4}{12}$, em que b é a largura da seção transversal da viga.

Para essas condições de contorno, a solução analítica para o deslocamento vertical $v(x)$ é dada por, de acordo com Hibbeler (2010):

$$v(x) = -\frac{t_0 x^2}{24EI} (x^2 - 4Lx + L^2), \quad (129)$$

em que L é o comprimento da viga.

No GID, a geometria da viga foi construída utilizando quatro paralelepípedos idênticos, conforme a figura 27c, para que fosse possível extrair o deslocamento sobre a linha elástica de forma direta. Foram geradas malhas não estruturas com quantidade de nós diferentes. Os resultados de deslocamento da linha elástico foram plotados na figura 28, como também a solução analítica.

É possível notar que os resultados obtidos pelo PHILLIPO.jl, no caso tridimensional, convergem para a solução analítica, conforme a malha é refinada, o que demonstra que o

Figura 28 – Comparação dos deslocamentos da linha elástica da viga longa com elementos tetraédricos.

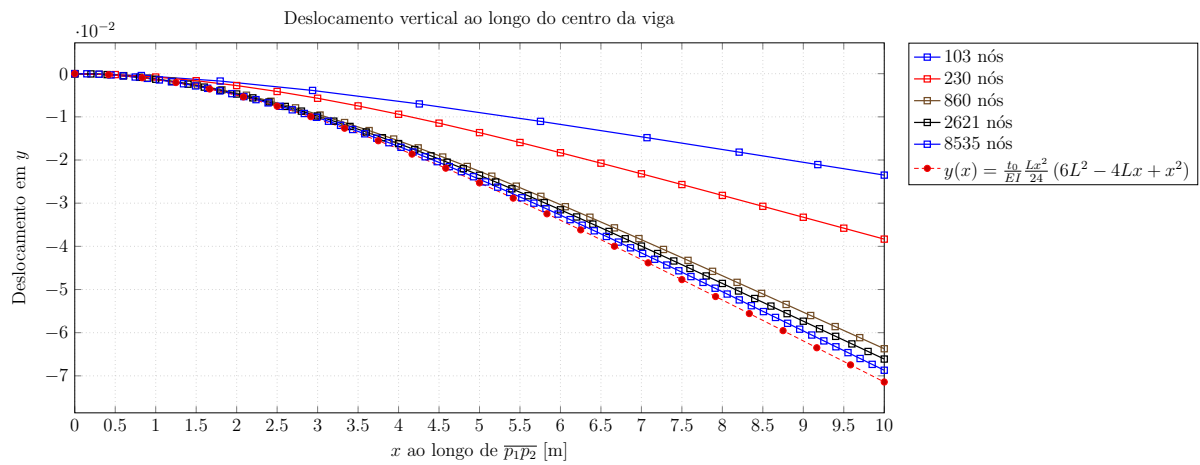
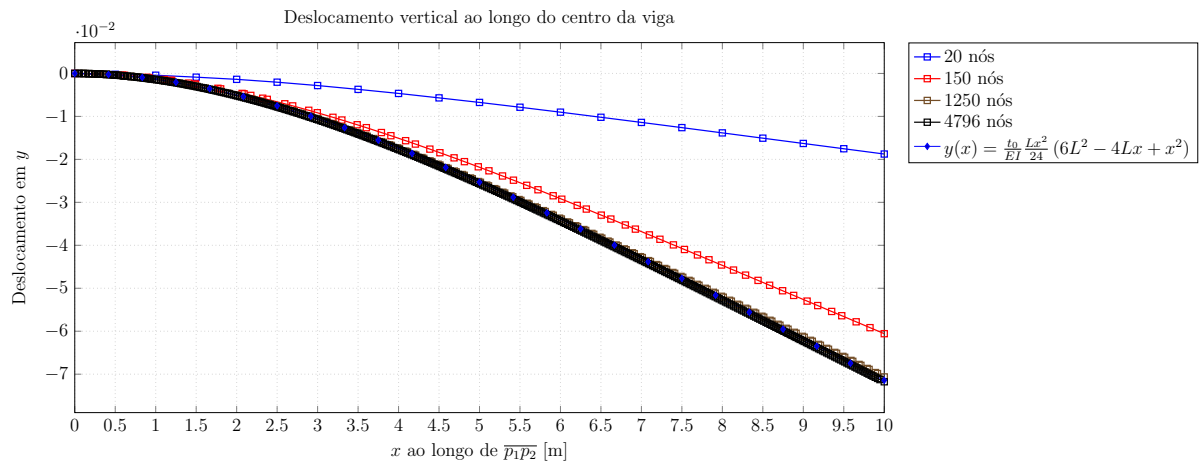


Figura 29 – Comparação dos deslocamentos da linha elástica da viga longa com elementos CST.



algoritmo matemático implementado é válido para representar o problema físico.

A mesma análise foi realizada utilizando elementos CST, modelando a viga por um EPT, cujo resultado consta na figura 29.

É possível notar que a modelagem por CST converge mais rápido, para o total de nós utilizado em cada análise, que a feita por elementos tetraédricos. Isso é devido porque no caso tridimensional os nós são postos sobre toda a geometria da viga, e no caso bidimensional, os nós são postos apenas sobre um plano e os efeitos transversais são definidos pelo EPT.

REFERÊNCIAS

BEZANSON, Jeff; CHEN, Jiahao; CHUNG, Benjamin; KARPINSKI, Stefan; SHAH, Viral B.; VITEK, Jan; ZOUBRITZKY, Lionel. Julia: Dynamism and performance reconciled by design. **Proc. ACM Program. Lang.**, Association for Computing Machinery, New York, NY, USA, v. 2, n. OOPSLA, oct 2018. Disponível em: <<https://doi.org/10.1145/3276490>>. Citado na página 17.

BEZANSON, Jeff; EDELMAN, Alan; KARPINSKI, Stefan; SHAH, Viral B. Julia: A fresh approach to numerical computing. **CoRR**, abs/1411.1607, 2014. Disponível em: <<http://arxiv.org/abs/1411.1607>>. Citado na página 70.

HIBBELER, Russell Charles. **Resistências dos Materiais**. São Paulo: Pearson Prentice Hall, 2010. Citado 5 vezes nas páginas 34, 35, 36, 79 e 80.

LOGAN, Daryl L. **A First Course in the Finite Element Method, Enhanced Edition, SI Version**. 6. ed. Cengage Learning, 2022. ISBN 0357676432,9780357676431. Disponível em: <<http://gen.lib.rus.ec/book/index.php?md5=C987600444DEED4576ED20233CC49A72>>. Citado 7 vezes nas páginas 38, 41, 42, 43, 44, 45 e 49.

LUBLINER, Panayiotis Papadopoulos (auth.) Jacob. **Introduction to Solid Mechanics: An Integrated Approach**. Springer International Publishing, 2017. ISBN 978-3-319-18878-2,978-3-319-18877-5. Disponível em: <<http://gen.lib.rus.ec/book/index.php?md5=43b5224440ffc99f4b40d894dcbb2bdc>>. Citado na página 31.

MUFTU, Sinan. **Finite Element Method: Physics and Solution Methods**. 1. ed. Academic Press, 2022. ISBN 012821127X,9780128211274. Disponível em: <<http://gen.lib.rus.ec/book/index.php?md5=19BB81D50D51BD23CC315B2F8E43F4C0>>. Citado na página 49.

OñATE, Eugenio. **Structural Analysis with the Finite Element Method. Linear Statics: Volume 1: Basis and Solids (Lecture Notes on Numerical Methods in Engineering and Sciences) (v. 1)**. 1. ed. [s.n.], 2009. ISBN 1402087322,9781402087325. Disponível em: <<http://gen.lib.rus.ec/book/index.php?md5=589bba29f786a93857f01ff9d12136cc>>. Citado 4 vezes nas páginas 16, 37, 50 e 56.

POPOV, Egor P. **Engineering Mechanics of Solids**. Prentice Hall, 1990. (Prentice-Hall International Series in Civil Engineering and Engineering Mechanics). ISBN 0-13-279258-3,9780132792585. Disponível em: <<http://gen.lib.rus.ec/book/index.php?md5=dab102c9ca4bd8e45556ebcd62b53b57>>. Citado 5 vezes nas páginas 20, 21, 26, 27 e 28.

QUEK, S. S.; LIU, G.R. **The Finite Element Method: A Practical Course**. Butterworth-Heinemann, 2003. ISBN 9780750658669,9781417505593,0750658665. Disponível em: <<http://gen.lib.rus.ec/book/index.php?md5=85760afdc4189ab75d846ee5fd53d6aa>>. Citado 2 vezes nas páginas 16 e 37.

RAO, Singiresu S. **The finite element method in engineering**. 6. ed. ed. Elsevier, 2018. ISBN 978-0-12-811768-2,0128117680. Disponível em: <<http://gen.lib.rus.ec/book/index.php?md5=e7ef3750d9f7ed6b4cb908c1215ba393>>. Citado 2 vezes nas páginas 50 e 51.

ROYLANCE, D. **Mechanics of Materials: Introduction to Elasticity**. Massachusetts Institute of Technology, 1995. Disponível em: <<https://books.google.com.br/books?id=nP54tAEACAAJ>>. Citado 3 vezes nas páginas 23, 28 e 29.

SHERRINGTON, Malcolm; BALBEART, Ivo; SENGUPTA, Avik. **Mastering Julia: Develop your analytical and programming skills further in Julia to solve complex data processing problems**. Packt Publishing, 2015. ISBN 978-1-78355-331-0. Disponível em: <<http://gen.lib.rus.ec/book/index.php?md5=de5338c3a3b90bba52c20f544bd71456>>. Citado na página 69.

ZIENKIEWICZ, O.C. **the Finite Element Method**: Volume 1: The basis. [S.l.]: Butterworth-Heinemann, 2000. Citado 4 vezes nas páginas 16, 34, 43 e 49.

ANEXO A – CÓDIGO FONTE DE PHILLIPO.JL

```

./src/PHILLIPO.jl

1  # MÓDULOS EXTERNOS
2  import LinearAlgebra
3  import SparseArrays
4
5  # MÓDULOS INTERNOS
6  import .IOfiles
7  import .Elements
8  import .Solver
9  import .Matrices
10 import .Stress
11
12 # PONTO DE PARTIDA (aqui inicia a execução)
13 function main(
14     input_path::String, # Arquivo de entrada (.json)
15     output_path::String # Arquivo de saída (.post.res, formato
do GiD)
16 )
17     IOfiles.header_prompt()
18     println("Número de threads: $(Threads.nthreads())")
19     print("Lendo arquivo JSON...
        ")
20
21     @time input_dict = string(input_path) |> IOfiles.
open_parse_input_file
22
23     problem_type = input_dict["type"]
24     nodes = input_dict["nodes"]
25     materials = input_dict["materials"]
26     constraints_forces_nodes = input_dict["constraints"]["
forces_nodes"]
27     constraints_forces_lines = input_dict["constraints"]["
forces_lines"]
28     constraints_forces_surfaces = input_dict["constraints"]["
forces_surfaces"]
29     constraints_displacements = input_dict["constraints"]["
displacements"]
30
31     println("Tipo de problema: $(problem_type)")
32
33     # REMOVENDO ELEMENTOS NÃO UTILIZADOS
34     # esses elementos nulos são gerados pelo modo que o arquivo JSON
é criado pelo GiD
35     # É uma falha que deve ser corrigida, mas que não é urgente.
36     pop!(nodes)

```

```

37     pop!(materials)
38     pop!(constraints_forces_nodes)
39     pop!(constraints_forces_lines)
40     pop!(constraints_forces_surfaces)
41     pop!(constraints_displacements)
42
43     if isempty(materials) error("Não há nenhum material definido!")
44 end
45
46 # VARIÁVEIS do PROBLEMA
47 dimensions = input_dict["type"] == "3D" ? 3 : 2
48 nodes_length = length(nodes)
49 Fg = zeros(Float64, dimensions * nodes_length)
50 Ug = zeros(Float64, dimensions * nodes_length)
51
52 # GRAUS DE LIBERDADE: LIVRES E PRESCRITOS
53 if problem_type == "3D"
54     dof_prescribe = reduce(vcat, map(
55         (x) -> [3 * x[1] - 2, 3 * x[1] - 1, 3 * x[1]],
56         constraints_displacements
57     ))
58     dof_free = filter(x -> x dof_prescribe, 1:dimensions*
59 nodes_length)
60     # RESTRIÇÃO DE DESLOCAMENTO
61     Ug[dof_prescribe] = reduce(vcat, map((x) -> [x[2], x[3], x
62 [4]], constraints_displacements))
63 else
64     dof_prescribe = reduce(vcat, map((x) -> [2 * x[1] - 1, 2 * x
65 [1]], constraints_displacements))
66     dof_free = filter(x -> x dof_prescribe, 1:dimensions*
67 nodes_length)
68     # RESTRIÇÃO DE DESLOCAMENTO
69     Ug[dof_prescribe] = reduce(vcat, map((x) -> [x[2], x[3]],
70 constraints_displacements))
71 end
72
73 # CONSTRUÇÃO DOS ELEMENTOS
74 print("Construindo os elementos e a matrix de rigidez global
75 paralelamente...")
76 @time Kg = Elements.assemble_stiffness_matrix(input_dict["
77 elements"]["linear"], materials, nodes, problem_type)
78
79 print("Aplicando as restrições de força...
80 ")
81 @time if problem_type == "3D"
82     # RESTRIÇÕES DE FORÇA SOBRE NÓS

```

```

75         if !isempty(constraints_forces_nodes)
76             dof_constraints_forces_nodes = reduce(vcat, map((x) ->
[3 * x[1] - 2, 3 * x[1] - 1, 3 * x[1]], constraints_forces_nodes))
77             Fg[dof_constraints_forces_nodes] = reduce(vcat, map((x)
-> [x[2], x[3], x[4]], constraints_forces_nodes))
78         end
79         # RESTRIÇÃO DE FORÇAS SOBRE SUPERFÍCIES (somente
TetrahedronLinear)
80         if !isempty(constraints_forces_surfaces)
81             Elements.assemble_force_surface!(Fg, nodes,
constraints_forces_surfaces)
82         end
83     else
84         # RESTRIÇÕES DE FORÇA SOBRE NÓS
85         if !isempty(constraints_forces_nodes)
86             dof_constraints_forces_nodes = reduce(vcat, map((x) ->
[2 * x[1] - 1, 2 * x[1]], constraints_forces_nodes))
87             Fg[dof_constraints_forces_nodes] = reduce(vcat, map((x)
-> [x[2], x[3]], constraints_forces_nodes))
88         end
89         # RESTRIÇÃO DE FORÇAS SOBRE LINHAS (somente TriangleLinear)
90         if !isempty(constraints_forces_lines)
91             Elements.assemble_force_line!(Fg, nodes,
constraints_forces_lines)
92         end
93     end
94
95
96     println("Resolvendo o sistema de $(size(Kg)) ")
97     @time Solver.direct_solve!(Kg, Ug, Fg, dof_free, dof_prescribe)
98
99     print("Calculando as reações...
")
100     @time Re, Re_sum = Stress.reactions(Kg, Ug, dimensions)
101
102     println("Somatório das reações: $(Re_sum)")
103
104     print("Recuperando as tensões...
")
105     @time , vm = Stress.recovery(input_dict["elements"]["linear"],
Ug, materials, nodes, problem_type)
106
107     print("Imprimindo o arquivo de saída...
")
108     @time begin
109         output_file = open(string(output_path), "w")
110         IOfiles.write_header(output_file)

```

```

111
112     # Pontos gaussianos
113     if "tetrahedrons" in keys(input_dict["elements"]["linear"])
114         write(output_file,
115             "GaussPoints \"gpoints\" ElemType Tetrahedra \"n\",
116             " Number Of Gauss Points: 1 \"n\",
117             " Natural Coordinates: internal \"n\",
118             "end gausspoints \"n\",
119         )
120     end
121     if "triangles" in keys(input_dict["elements"]["linear"])
122         write(output_file,
123             "GaussPoints \"gpoints\" ElemType Triangle \"n\",
124             " Number Of Gauss Points: 1 \"n\",
125             " Natural Coordinates: internal \"n\",
126             "end gausspoints \"n\",
127         )
128     end
129
130     # DESLOCAMENTOS
131     IOfiles.write_result_nodes(output_file,
132         "Result \"Displacements\" \"Load Analysis\" 0 Vector
OnNodes",
133         dimensions, Ug
134     )
135
136     # ESTADO TENSÃO
137     IOfiles.write_result_gauss_center(output_file,
138         "Result \"Stress\" \"Load Analysis\" 0 $( problem_type
== "3D" ? "matrix" : "PlainDeformationMatrix") OnGaussPoints \"
gpoints\"",
139
140     )
141
142     # REAÇÕES
143     IOfiles.write_result_nodes(output_file,
144         "Result \"Reactions\" \"Load Analysis\" 0 Vector OnNodes
",
145         dimensions, Re
146     )
147     # VON MISSES
148     IOfiles.write_result_gauss_center(output_file,
149         "Result \"Von Misses\" \"Load Analysis\" 0 scalar
OnGaussPoints \"gpoints\"",
150         vm
151     )
152

```



```

153         close(output_file)
154
155     end
156     print("Tempo total de execução: ")
157 end
158 end

```

./src/modules/includes.jl

```

1
2 # PHILLIP
3 # Script para adicionar todos os arquivos que contêm os módulos locais
4
5 include("IOfiles.jl")
6 include("Matrices.jl")
7 include("Elements.jl")
8 include("Solver.jl")
9 include("Stress.jl")

```

./src/modules/IOfiles.jl

```

1
2 # PHILLIPO
3 # Módulo: controle de entradas e saídas
4
5
6 module IOfiles
7
8     # MÓDULOS EXTERNOS
9     import JSON
10
11     # texto de cabeçalho (salvando durante a compilação)
12     header_msg_file = open(string(@__DIR__, "/header_msg.txt"), "r")
13     header_msg_text = read(header_msg_file, String)
14
15     function open_parse_input_file(file_name::String)::Dict
16         # Carrega e interpreta o arquivo de entrada
17         # Retorna um dicionário
18         JSON.parsefile(file_name, dicttype=Dict, use_mmap = true)
19     end
20
21     function header_prompt()
22         # Imprime o cabeçalho do prompt de execução do programa
23         # header_msg_file = open(string(@__DIR__, "header_msg.txt"), "r")
24         # header_msg_text::String = read(header_msg_file, String)
25         println(header_msg_text)
26     end
27
28     function write_header(file::IOStream)

```

```

29     write(file, "GiD Post Results File 1.0", "\n")
30 end
31
32 function write_result_nodes(
33     file::IOStream,
34     header::String,
35     d::Integer,
36     vector::Vector{<:Real}
37 )
38     write(file, header, "\n")
39     vector_length = length(vector) ÷ d
40
41     write(file, "Values", "\n")
42     for i = 1:vector_length
43         write(file, " $(i)", " ",
44             join((vector[d * i - j] for j = (d - 1):-1:0), " "),
45             "\n"
46         )
47     end
48     write(file, "End Values", "\n")
49 end
50
51 function write_result_gauss_center(
52     file::IOStream,
53     header::String,
54     vector::Vector
55 )
56     write(file, header, "\n")
57     vector_length = length(vector)
58
59     write(file, "Values", "\n")
60     for i = 1:vector_length
61         write(file, " $(i)", " ",
62             join(vector[i], " "),
63             "\n"
64         )
65     end
66     write(file, "End Values", "\n")
67 end
68
69 end

```

./src/modules/Elements.jl

```

1
2 # PHILLIPO
3 # Módulo: definição dos elementos e funções relacionadas
4

```

```

5 module Elements
6
7     #MÓDULOS EXTERNOS
8     import LinearAlgebra
9     using SparseArrays
10    import ..Matrices
11
12    abstract type Element end
13
14    struct TriangleLinear <: Element
15
16        index::Integer
17        material_index::Integer
18        nodes_index::Vector{Integer}
19        interpolation_function_coeff::Matrix{Real}
20        D::Matrix{Real}
21        B::Matrix{Real}
22        K::Matrix{Real}
23        degrees_freedom::Vector{Integer}
24
25        function TriangleLinear(triangle_element_vector::Vector{Any},
174 materials::Vector{Any}, nodes::Vector{Any}, problem_type::String)
26
27            index          = Integer(triangle_element_vector[1])
28            material_index = Integer(triangle_element_vector[2])
29            nodes_index    = Vector{Integer}(triangle_element_vector
175 [3:5])
30
31
32            i = Vector{Real}(nodes[nodes_index[1]])
33            j = Vector{Real}(nodes[nodes_index[2]])
34            m = Vector{Real}(nodes[nodes_index[3]])
35
36            position_nodes_matrix = [
37                1  i[1]  i[2];
38                1  j[1]  j[2];
39                1  m[1]  m[2]
40            ]
41
42            interpolation_function_coeff = LinearAlgebra.inv(
176 position_nodes_matrix)
43
44            = 1/2 * LinearAlgebra.det(position_nodes_matrix)
45
46            a = interpolation_function_coeff[1,:]
47            b = interpolation_function_coeff[2,:]
48            c = interpolation_function_coeff[3,:]

```

```

49
50
51     B = [
52         b[1] 0      b[2] 0      b[3] 0      ;
53         0      c[1] 0      c[2] 0      c[3];
54         c[1] b[1] c[2] b[2] c[3] b[3]
55     ]
56
57     try
58         materials[material_index]
59     catch
60         error("Material não definido no elemento de índice: $(
index)")
61     end
62
63     D = generate_D(problem_type, materials[material_index])
64
65     K = B' * D * B * * 1
66
67     degrees_freedom = reduce(vcat, map((x) -> [2 * x - 1, 2 * x
], nodes_index))
68
69     new(index, material_index, nodes_index,
interpolation_function_coeff, D, B, K, degrees_freedom)
70     end
71     end
72
73     struct TetrahedronLinear <: Element
74         index::Integer
75         material_index::Integer
76         nodes_index::Vector{<:Integer}
77         interpolation_function_coeff::Matrix{<:Real}
78         D::Matrix{<:Real}
79         B::Matrix{<:Real}
80         K::Matrix{<:Real}
81         degrees_freedom::Vector{<:Integer}
82         function TetrahedronLinear(tetrahedron_element_vector::Vector{<:
Any}, materials::Vector{<:Any}, nodes::Vector{<:Any})
83
84             index          = Integer(tetrahedron_element_vector[1])
85             material_index = Integer(tetrahedron_element_vector[2])
86             nodes_index    = Vector{Integer}(tetrahedron_element_vector
[3:6])
87
88
89             i = Vector{Real}(nodes[nodes_index[1]])
90             j = Vector{Real}(nodes[nodes_index[2]])

```

```

91     m = Vector{Real}(nodes[nodes_index[3]])
92     p = Vector{Real}(nodes[nodes_index[4]])
93
94     position_nodes_matrix = [
95         1 i[1] i[2] i[3];
96         1 j[1] j[2] j[3];
97         1 m[1] m[2] m[3];
98         1 p[1] p[2] p[3]
99     ]
100     interpolation_function_coeff = LinearAlgebra.inv(
101 position_nodes_matrix)
102     V = 1/6 * LinearAlgebra.det(position_nodes_matrix)
103
104     a = interpolation_function_coeff[1,:]
105     b = interpolation_function_coeff[2,:]
106     c = interpolation_function_coeff[3,:]
107     d = interpolation_function_coeff[4,:]
108
109     B = [
110         b[1] 0 0 b[2] 0 0 b[3] 0 0 b
111 [4] 0 0 ;
112         0 c[1] 0 0 c[2] 0 0 c[3] 0 0
113 c[4] 0 ;
114         0 0 d[1] 0 0 d[2] 0 0 d[3] 0
115 0 d[4];
116         c[1] b[1] 0 c[2] b[2] 0 c[3] b[3] 0 c
117 [4] b[4] 0 ;
118         0 d[1] c[1] 0 d[2] c[2] 0 d[3] c[3] 0
119 d[4] c[4];
120         d[1] 0 b[1] d[2] 0 b[2] d[3] 0 b[3] d
121 [4] 0 b[4]
122     ]
123
124     try
125         materials[material_index]
126     catch
127         error("Material não definido no elemento de índice: $(
128 index)")
129     end
130
131     D = generate_D("3D", materials[material_index])
132
133     K = B' * D * B * V
134
135     degrees_freedom = Vector{Integer}(reduce(vcat, map((x) -> [3
136 * x - 2, 3 * x - 1, 3 * x], nodes_index)))

```

```

129         new(index, material_index, nodes_index,
interpolation_function_coeff, D, B, K, degrees_freedom)
130     end
131 end
132
133
134 function generate_D(problem_type, material)::Matrix{<:Real}
135     # Gera a matrix constitutiva
136     E::Float64 = material[2] # Módulo de young
137     ν::Float64 = material[3] # Coeficiente de Poisson
138
139     if problem_type == "plane_strain"
140         return E / ((1 + ν) * (1 - 2ν)) * [
141             (1 - ν)      0      ;
142             (1 - ν) 0      ;
143             0      0      (1 - 2ν) / 2
144         ]
145     end
146
147     if problem_type == "plane_stress"
148         return E / (1 - ν^2) * [
149             1      0      ;
150             ν      1      0      ;
151             0      0      (1 - ν) / 2
152         ]
153     end
154
155     if problem_type == "3D"
156         return E / ((1 + ν) * (1 - 2ν)) * [
157             (1 - ν)      0      0      0
158             ;
159             (1 - ν)      0      0      0
160             ;
161             (1 - ν) 0      0      0
162             ;
163             0      0      0      (1 - 2ν) / 2 0      0
164             ;
165             0      0      0      0      (1 - 2ν) / 2 0
166             ;
167             0      0      0      0      0      (1 -
2) / 2
168         ]
169     end
170
171     error("PHILLIP0: Tipo de problema desconhecido!")
172 end

```

```

169
170 function assemble_stiffness_matrix(input_elements, materials, nodes,
171     problem_type)
172     # Realiza a criação dos elementos e já aplica os valores de
173     rigidez sobre a matriz global
174
175     # O paralelismo é realizado reservando para cada thread uma
176     matriz separada
177     Kg_vector = [Matrices.SparseMatrixCOO() for i = 1:Threads.
178     nthreads()]
179
180     if problem_type == "3D"
181         if "tetrahedrons" in keys(input_elements)
182             pop!(input_elements["tetrahedrons"])
183             elements_length = length(input_elements["tetrahedrons"])
184             Threads.@threads for j in 1:elements_length
185                 element = TetrahedronLinear(input_elements["
186 tetrahedrons"][j], materials, nodes)
187                 Matrices.add!(
188                     Kg_vector[Threads.threadid()],
189                     element.degrees_freedom,
190                     element.K
191                 )
192             end
193         end
194     else
195         if "triangles" in keys(input_elements)
196             pop!(input_elements["triangles"])
197             elements_length = length(input_elements["triangles"])
198             Threads.@threads for j in 1:elements_length
199                 element = TriangleLinear(input_elements["triangles
200 "][j], materials, nodes, problem_type)
201                 Matrices.add!(
202                     Kg_vector[Threads.threadid()],
203                     element.degrees_freedom,
204                     element.K
205                 )
206             end
207         end
208     end
209
210     # A matriz global de rigidez é a soma das matrizes globais
211     calculadas em cada thread
212     Kg = Matrices.sum(Kg_vector)
213
214     return Kg
215 end

```

```

209
210     function assemble_force_line!(
211         Fg::Vector{<:Real},
212         nodes::Vector,
213         forces::Vector,
214     )
215         # Aplica a força equivalente nos nós de linha que sofre um
carregamento constante.
216         # Por enquanto, só funciona para problemas com elementos do tipo
TriangleLinear
217         for force in forces
218             elements_index = force[1]
219             nodes_index     = force[2:3]
220             forces_vector   = force[4:5]
221
222             dof_i = mapreduce(el -> [2 * el - i for i in 1:-1:0], vcat,
nodes_index[1])
223             dof_j = mapreduce(el -> [2 * el - i for i in 1:-1:0], vcat,
nodes_index[2])
224
225             node_i = nodes[nodes_index[1]]
226             node_j = nodes[nodes_index[2]]
227
228             = LinearAlgebra.norm(node_i .- node_j)
229             F = 1/2 * .* forces_vector
230
231             Fg[dof_i] += F
232             Fg[dof_j] += F
233         end
234     end
235
236     function assemble_force_surface!(
237         Fg::Vector{<:Real},
238         nodes::Vector,
239         forces::Vector
240     )
241         # Aplica a força equivalente nos nós de superfícies que sofre um
carregamento constante.
242         # Por enquanto, só funciona para problemas com elementos do tipo
TetrahedronLinear
243         for force in forces
244             elements_index = force[1]
245             nodes_index     = force[2:4]
246             forces_vector   = force[5:7]
247
248             dof_i = mapreduce(el -> [3 * el - i for i in 2:-1:0], vcat,
nodes_index[1])

```



```

249         dof_j = mapreduce(el -> [3 * el - i for i in 2:-1:0], vcat,
nodes_index[2])
250         dof_k = mapreduce(el -> [3 * el - i for i in 2:-1:0], vcat,
nodes_index[3])
251
252         node_i = nodes[nodes_index[1]]
253         node_j = nodes[nodes_index[2]]
254         node_k = nodes[nodes_index[3]]
255
256         vector_ij = node_j .- node_i
257         vector_ik = node_k .- node_i
258
259         = 1/2 * LinearAlgebra.norm(LinearAlgebra.cross(vector_ij,
vector_ik))
260         F = 1/3 * .* forces_vector
261
262         Fg[dof_i] += F
263         Fg[dof_j] += F
264         Fg[dof_k] += F
265     end
266 end
267
268 end

```

./src/modules/Matrices.jl

```

1
2 # PHILLIPO
3 # Módulo: construção de matrizes esparsas baseada em coordenadas
4 # Este arquivo é construído com fork indireto o FEMSparse.jl (módulo
utilizado no JuliaFEM.jl)
5
6 module Matrices
7
8     using SparseArrays
9     import Base.sum
10    export SparseMatrixC00, spC00, sum, add!
11
12    mutable struct SparseMatrixC00{Tv,Ti<:Integer} <:
AbstractSparseMatrix{Tv,Ti}
13        I :: Vector{Ti}
14        J :: Vector{Ti}
15        V :: Vector{Tv}
16    end
17
18    spC00(A::Matrix{<:Number}) = SparseMatrixC00(A)
19    SparseMatrixC00() = SparseMatrixC00{Int[], Int[], Float64[]}
20    SparseMatrixC00(A::SparseMatrixCSC{Tv,Ti}) where {Tv, Ti<:Integer} =

```

```

SparseMatrixC00(findnz(A)...)
21 SparseMatrixC00(A::Matrix{<:Real}) = SparseMatrixC00(sparse(A))
22 SparseArrays.SparseMatrixCSC(A::SparseMatrixC00) = sparse(A.I, A.J,
A.V)
23 Base.isempty(A::SparseMatrixC00) = isempty(A.I) && isempty(A.J) &&
isempty(A.V)
24 Base.size(A::SparseMatrixC00) = isempty(A) ? (0, 0) : (maximum(A.I),
maximum(A.J))
25 Base.size(A::SparseMatrixC00, idx::Int) = size(A)[idx]
26 Base.Matrix(A::SparseMatrixC00) = Matrix(SparseMatrixCSC(A))
27
28 get_nonzero_rows(A::SparseMatrixC00) = unique(A.I[findall(!iszero, A
.V)])
29 get_nonzero_columns(A::SparseMatrixC00) = unique(A.J[findall(!iszero
, A.V)])
30
31 function Base.getindex(A::SparseMatrixC00{Tv, Ti}, i::Ti, j::Ti)
where {Tv, Ti}
32     if length(A.V) > 1_000_000
33         @warn("Performance warning: indexing of C00 sparse matrix is
slow.")
34     end
35     p = (A.I .== i) .& (A.J .== j)
36     return sum(A.V[p])
37 end
38
39 """
40     add!(A, i, j, v)
41     Add new value to sparse matrix 'A' to location ('i','j').
42 """
43 function add!(A::SparseMatrixC00, i, j, v)
44     push!(A.I, i)
45     push!(A.J, j)
46     push!(A.V, v)
47     return nothing
48 end
49
50 function Base.empty!(A::SparseMatrixC00)
51     empty!(A.I)
52     empty!(A.J)
53     empty!(A.V)
54     return nothing
55 end
56
57 function assemble_local_matrix!(A::SparseMatrixC00, dofs1::Vector{<:
Integer}, dofs2::Vector{<:Integer}, data)
58     n, m = length(dofs1), length(dofs2)

```

```

59     @assert length(data) == n*m
60     k = 1
61     for j=1:m
62         for i=1:n
63             add!(A, dofs1[i], dofs2[j], data[k])
64             k += 1
65         end
66     end
67     return nothing
68 end
69
70 function add!(A::SparseMatrixC00, dof1::Vector{<:Integer}, dof2::
Vector{<:Integer}, data)
71     assemble_local_matrix!(A, dof1, dof2, data)
72 end
73
74 function sum(A::Vector{<:SparseMatrixC00})::SparseMatrixCSC
75     # Retorna uma matriz em CSC a partir de um vetor formado por
matrizes em C00
76     I = reduce(vcat, getfield.(A, :I))
77     J = reduce(vcat, getfield.(A, :J))
78     V = reduce(vcat, getfield.(A, :V))
79     sparse(I,J,V)
80 end
81
82 function add!(A::SparseMatrixC00, dof::Vector{<:Integer}, data)
83     assemble_local_matrix!(A, dof, dof, data)
84 end
85
86 end

```

./src/modules/Solver.jl

```

1 # PHILLIPO
2 # Módulos: funções para executar o método de solução
3
4 module Solver
5
6     using SparseArrays
7     using LinearAlgebra
8
9     function direct_solve!(
10         Kg::SparseMatrixCSC,
11         Ug::Vector{<:Real},
12         Fg::Vector{<:Real},
13         dof_free::Vector{<:Integer},
14         dof_prescribe::Vector{<:Integer}
15     )

```

```

16     # Realiza a solução direta para o sistema
17
18     Ug[dof_free]      = Kg[dof_free, dof_free] \ (Fg[dof_free] -
Kg[dof_free, dof_prescribe] * Ug[dof_prescribe])
19     Fg[dof_prescribe] = Kg[dof_prescribe, dof_free] * Ug[dof_free]
+ Kg[dof_prescribe, dof_prescribe] * Ug[dof_prescribe]
20     end
21
22 end

```

./src/modules/Stress.jl

```

1 # PHILLIPO
2 # Módulo: recuperação de tensão
3
4 module Stress
5
6     import ..Elements
7     using SparseArrays
8
9     function recovery(input_elements, Ug::Vector{<:Real}, materials::
Vector{Any}, nodes::Vector{Any}, problem_type)
10         map_function = e -> nothing
11         if problem_type == "3D"
12             if "tetrahedrons" in keys(input_elements)
13                 type = "tetrahedrons"
14                 map_function = e -> begin
15                     el = Elements.TetrahedronLinear(e, materials, nodes)
16                     el.D * el.B * Ug[el.degrees_freedom]
17                 end
18             end
19         else
20             if "triangles" in keys(input_elements)
21                 type = "triangles"
22                 map_function = e -> begin
23                     el = Elements.TriangleLinear(e, materials, nodes,
problem_type)
24                     el.D * el.B * Ug[el.degrees_freedom]
25                 end
26             end
27         end
28         println("TESTE: ", size(input_elements[type]))
29         = Vector{Vector{Float64}}(map(
30             map_function,
31             input_elements[type]
32         ))
33         vm = von_miseses.(
34             , vm

```

```

35     end
36
37     von_misses(::Vector{<:Real}) = length() == 3 ? von_misses_2D() :
von_misses_3D()
38
39     function von_misses_2D(::Vector{<:Real})
40         ([1]^2 - [1] * [2] + [2]^2 + 3 * [3]^2)
41     end
42
43     function von_misses_3D(::Vector{<:Real})
44         ((([1] - [2])^2 + ([2] - [3])^2 + ([3] - [1])^2 + 6 * ([4]^2 +
[5]^2 + [6]^2)) / 2)
45     end
46
47     function reactions(Kg::SparseMatrixCSC, Ug::Vector{<:Real}, d::
Integer)
48         nodes_length = length(Ug)
49         Re = Kg * Ug
50         Re_sum = sum.([Re[i:d:nodes_length] for i in 1:d])
51         return Re, Re_sum
52     end
53
54 end

```