



Segundo Exercício Computacional – PTC 3213 - 2020

(Entrega em 25/11/2020)

CÁLCULO DE CAPACITÂNCIAS PARCIAIS PELO MÉTODO DOS ELEMENTOS FINITOS

O objetivo deste trabalho é a determinação computacional de grandezas eletrostáticas pelo Método dos Elementos Finitos, em especial as capacitâncias parciais num sistema constituído por tubos cilíndricos metálicos na presença de dielétricos. Quando indicado, os resultados numéricos deverão ser confrontados com valores calculados analiticamente, seguindo os procedimentos descritos.

O programa a ser utilizado nas simulações, **FEMM** © [1], é de distribuição livre e deve ser baixado e instalado previamente a partir do *link* fornecido no eDisciplinasUSP ou ao final deste documento. Os arquivos de projeto para os casos de estudo estão disponíveis no link desta atividade no eDisciplinasUSP.

Antes de realizar as simulações a partir dos arquivos de projeto fornecidos, será necessário efetuar pequenas alterações nos dados desses arquivos, que envolvem propriedades de materiais e algumas dimensões.

O exercício poderá ser realizado em grupos de até três alunos, todos de uma mesma turma de PTC3213 (os mesmos do EC1). As modificações necessárias no arquivo de dados dependerão unicamente dos valores mostrados na tabela fornecida mais adiante, e serão função de sua turma de PTC3213 (1 - Viviane, 2 - Leb ou 3 - Juan) e do último algarismo do número USP (*nuspU*) do primeiro aluno do grupo em ordem alfabética.

A partir dos resultados das simulações, cada grupo deverá gerar um relatório com os resultados, de acordo com modelo do *Google Docs* fornecido (*Modelo de relatório EC2 – PTC3213*). Um arquivo em formato PDF deve ser gerado a partir desse documento e submetido em link apropriado no eDisciplinasUSP.

Ao final deste documento é fornecido um breve tutorial com comandos básicos do **FEMM**, que serão necessários para efetuar as modificações e simulações solicitadas.

Caso 1 - Tubos não concêntricos

No primeiro problema a ser estudado, tem-se dois tubos cilíndricos metálicos não concêntricos de 100 m de comprimento, cuja seção transversal é ilustrada na Fig. 1. O cilindro externo, denominado *Condutor 2*, tem potencial nulo e o condutor interno, denominado *Condutor 1*, está sob tensão de 10 V. O arquivo de dados para esse problema, **Tubo.FEE**, deve ser baixado do link desta atividade no eDisciplinas, e devidamente modificado de acordo com os dados da Tabela I, que fornece vários dielétricos. O dielétrico original do projeto **Tubo.FEE** (ar), deve ser substituído por um dos dielétricos dessa tabela, conforme sua turma e *nUSP*.

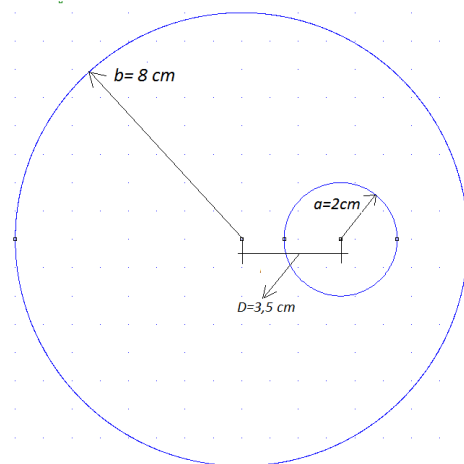


Fig. 1 Caso 1 - tubos metálicos cilíndricos não concêntricos.

Tabela I - DIELÉTRICOS PARA OS CASOS 1 E 2

nuspU	Turma		
	Viviane	Leb	Juan
0, 1, 2	Delrin	Marble	Nylon
3, 4, 5, 6	Porcelain	Mica	Polyamide
7, 8 e 9	Lexan	Mylar	Polypropylene

Após efetuar as alterações, pode-se então gerar a malha de elementos finitos (malhar) e lançar a resolução. Cada grupo deverá, então, apresentar os seguintes cálculos no seu trabalho final:

- a) **[1,0]** Imagem com as Linhas Equipotenciais do problema (sobreposta ao mapa de cores).
- b) **[1,0]** Cálculo analítico da Capacitância entre os dois tubos cilíndricos. A resolução analítica deve utilizar os mesmos dados de entrada utilizados na simulação. As propriedades dos materiais da Tabela I devem ser aquelas utilizadas pelo FEMM. Apresentar os dados utilizados nos cálculos e desenvolvimento; só o valor final não será considerado.
- c) **[2,0]** Cálculo numérico da Capacitância entre os dois tubos e Tabela Comparativa, contendo os valores analítico e numérico da capacitância, além do erro relativo porcentual ($100 * |1 - C_{\text{num}}/C_{\text{teo}}|$) entre eles. Analisar e comentar o resultado (seja claro e sucinto). Apresentar uma imagem com a janela *pop-up* do programa com o valor numérico.
- d) **[1,0]** Movimentar o tubo cilíndrico interno para a direita de $d = (\text{nusp}U+1)/10$ cm. Determinar numericamente o novo valor de capacitância. (Instruções de como mover um ponto são fornecidas no tutorial ao final). Incluir esse dado na tabela do item b), bem como o valor teórico e o erro porcentual.

Caso 2 - Tubos paralelos

O segundo caso a ser simulado através do **FEMM** consiste de dois tubos metálicos cilíndricos de 10 cm de comprimento, dispostos paralelamente no interior de um terceiro tubo metálico de mesmo comprimento, conforme ilustrado na Fig. 2. Os tubos internos foram denominados *Condutor 1* e *Condutor 2* e o tubo externo, que envolve os anteriores, denominado *Referência*. Cada tubo interno situa-se à mesma distância da linha diametral que separa o tubo externo em dois. O arquivo de dados para esse caso teste é denominado **parciais.FEE**.

O espaço entre o tubo externo e os condutores internos é preenchido por dois dielétricos distintos, cuja interface coincide com a linha diametral do tubo externo, de modo que cada tubo interno é envolvido por apenas um dos dielétricos. O *Condutor 1* está contido no dielétrico *TransformerOil* e o *Condutor 2*, no dielétrico *Porcelain*. O *Condutor 1* é mantido em um potencial de 1 V, enquanto que o *Condutor 2* está com potencial nulo. O condutor externo (*Referência*) está aterrado.

Antes de efetuar a simulação, deve-se alterar um dos materiais dielétricos no projeto **parciais.FEE**. O dielétrico *Porcelain* deve ser trocado por outro, conforme especificado na Tabela I, com base na turma e $\text{nusp}U$.

Após efetuar as alterações, malhar e resolver, cada grupo deverá apresentar os seguintes resultados no seu trabalho final:

- a) **[1,0]** Imagem com as Linhas Equipotenciais do problema (sobreposta ao mapa de cores), na situação em que o *Condutor 1* está com 1 V, o *Condutor 2* com potencial nulo e o *Referência* está aterrado.
- b) **[1,0]** Cálculo numérico da Capacitância Parcial do *Condutor 1* e da capacitância parcial entre o *Condutor 1* e o *Condutor 2*, ambas nas condições do item a).
- c) **[1,0]** O modelo de Circuito Equivalente do sistema da Fig. 2 possui um elemento C_{10} , a capacitância entre o *Condutor 1* e a *Referência*. Obter numericamente esse valor e determinar a carga no condutor *Referência*. Há uma relação entre esses dois valores. Justificá-la fisicamente.
- d) **[1,0]** Modificar as condições de contorno do problema de forma que o *Condutor 1* tenha agora potencial nulo e o *Condutor 2*, potencial de 1V. Após resolver, calcular numericamente a capacitância parcial do *Condutor 2* e a capacitância parcial entre *Condutor 2* e *Condutor 1*. Analisar e comentar os valores obtidos.

Para efetuar as mudanças de condições de contorno no **FEMM**, executar os comandos:

- *Properties >> Conductors >> Condutor 1 >> Modify Property >> Prescribed Voltage >> 0.*
- *Properties >> Conductors >> Condutor 2 >> Modify Property >> Prescribed Voltage >> 1.*

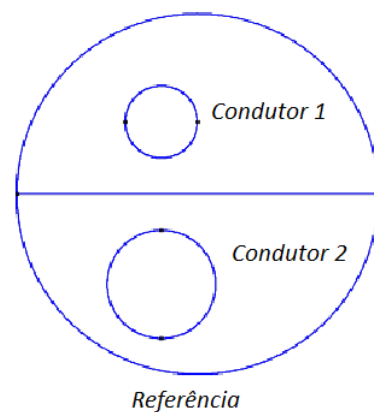


Fig. 2 Caso 2 - tubos metálicos cilíndricos paralelos no interior de um terceiro.

e) [1,0] Nas condições do item d), determinar numericamente a distribuição da densidade superficial de carga ao longo da interface entre os dois dielétricos, bem como a distribuição do potencial ao longo dessa interface. Apresentar esses resultados em forma de gráficos.

REFERÊNCIAS

[1] **FEMM**© - *Finite Element Method Magnetics*, D. Meeker, <http://www.femm.info/wiki/Download>.

TUTORIAL RÁPIDO DE UTILIZAÇÃO DO FEMM

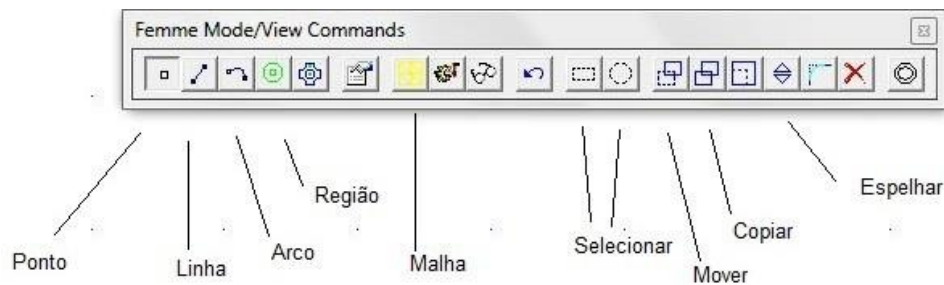







Fig. 3 - Ícones de comandos básicos do FEMM.

Selecionar um ponto: clicar no botão de ponto (Fig. 3). Usar um dos botões “Selecionar” para escolher um ponto da geometria. Ele deverá ficar na cor vermelha. Para movê-lo, usar o botão “Mover” e fornecer o deslocamento.

Selecionar uma reta ou arco: usar os botões “Selecionar” para escolher os pontos que definem a reta ou arco. Eles deverão ficar na cor vermelha. Para movê-los, usar o botão “Mover” e fornecer o deslocamento.

Movimentar condutores: clicar sobre o ícone arco  (Fig. 3). Selecionar um condutor com o ícone . Eles devem se tornar vermelhos. Clicar sobre o ícone Mover . Fornecer o deslocamento solicitado.

Selecionar uma região (para atribuir material): clicar inicialmente sobre o botão . Escolher uma das regiões de estudo e inserir um ponto nessa região. Usar um dos botão “Selecionar”  para selecionar esse ponto. Ele deverá ficar na cor vermelha. Para atribuir alguma propriedade a ele, clicar na sequência de menus:

Operation → *Open selected* → *Block type* (para especificar o tipo de material)

Operation → *Open selected* → *<NoMesh>* (para especificar região sem malha, p. ex., um furo).

Modificar condições de contorno - Selecionar as seguintes opções no menu principal:

Properties >> *Conductors* >> *Condutor 1* >> *Modify Property* >> *Prescribed Voltage* >> “novo valor”.

Properties >> *Conductors* >> *Condutor 2* >> *Modify Property* >> *Prescribed Voltage* >> “novo valor”.

Gerar a malha de elementos finitos: clicar sobre o botão com quadradinho amarelo. Caso o projeto ainda não esteja salvo, será solicitado.

Resolução (execução da simulação): clicar no botão da engrenagem (*Run Analysis*).

Importante: ao se realizar uma modificação, deve-se sempre fazer uma **nova malha** e uma nova **resolução**, pois o FEMM preserva a solução anterior.

Traçado de linhas equipotenciais: concluída a resolução, clicar em *View Results* (botão “óculos”). Abre-se nova janela (p.ex. *Tubo.ans*). A barra de botões desta nova janela é similar à mostrada na Fig. 4. Clicar sobre o botão com quadradinho hachurado em preto e branco (linhas equipotenciais) e sobre o quadradinho colorido (equipotenciais em *ColorMap*).

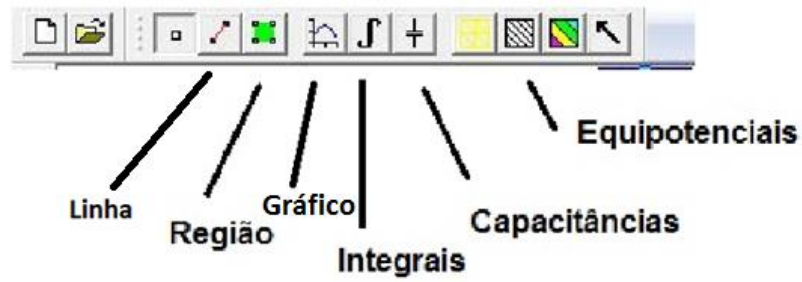


Fig. 4 – Ícones dos comandos da Janela de Visualização de Resultados.

Cálculo de Capacitância: usar o botão “Capacitância” da Janela de Resultados (Fig. 4).

Gráficos: (i) primeiro deve-se clicar sobre o botão com o ícone de “Linha” para selecionar a linha desejada para traçado do gráfico. A linha escolhida deve então ficar vermelha. (ii) em seguida, clicar no botão “Gráfico”, e depois selecionar a grandeza a traçar.

Captura de imagens: primeiramente, ajustar convenientemente o tamanho da janela (pode demorar a atualizar!) e a posição/tamanho dos objetos (Zoom in e Out e ícones de setas amarelas do menu vertical à esquerda). No menu, clicar em **Edit >> Copy as Bitmap**. Colar a imagem copiada num aplicativo de imagens (p.ex., *Paintbrush*) e salvar no formato *.PNG.