

## **Análise das propriedades elétricas do Grafeno para utilização em próteses Biônicas com intuito de melhorar o tempo de resposta**

---

**Matheus Marques Assis**

*Faculdade Estácio de Sá*

**Thais Firmino Campos**

*Faculdade Estácio de Sá*

DOI: 10.47573/aya.5379.2.84.9

## RESUMO

Embora as próteses datem de muitos séculos, e mesmo com tantas descobertas e inovações de materiais e tecnologias, é um campo pouco explorado. A recuperação de um membro perdido sempre foi essencial para realocação social, assim como bem-estar próprio, tendo a independência para realizar os movimentos comuns de um ser humano saudável sem precisar de auxílio. Tendo em vista essa prerrogativa, este estudo tem como objetivo aplicar as características do grafeno em próteses biônicas avançadas, com intuito de recuperar um tempo resposta reflexiva e sensação tátil mais próximos possíveis do comum. Utilizando um software de simulação de elementos finitos, aplicamos as características do grafeno que possui qualidades singulares, afim de simular o comportamento do grafeno à um determinado esforço, para determinar se o grafeno consegue replicar o tempo de resposta próximo ou igual ao de uma ação comum.

**Palavras-chave:** grafeno. próteses. simulação numérica. recuperação tátil. método de elementos finitos.

## INTRODUÇÃO

As próteses datam e são referenciadas desde períodos muito antigos, seja em um poema hindu escrito entre 3500 a.C. e 1800 a.C. que conta a história de uma rainha guerreira que perdeu a perna no campo de batalha e colocou uma prótese de ferro para voltar à guerra, ou as próteses ortopédicas descobertas nas múmias no Cairo, que têm a forma de dedão do pé e datam de aproximadamente 600 a.C. (BRASKEM, 2015). E em meio à tantas inovações e descobertas, tais como impressão 3D, nanotecnologia, estudos de materiais, comandos elétricos e softwares mais avançados, o público com deficiências motoras parece estar vislumbrando dias melhores.

Segundo a Sociedade Internacional de Próteses e Órteses, em conjunto com a Organização Mundial da Saúde, estima-se que as pessoas que necessitam de próteses, órteses ou serviços afins representam 0,5% da população de países desenvolvidos, e que 30 milhões de pessoas na África, Ásia e América Latina necessitam um número estimado em 180.000 profissionais de reabilitação (OMS, 2012).

De acordo com a Cartilha do Censo, disponibilizada em 2010, 45.606.048 de pessoas no Brasil, ou seja, 23,9% da população total, apresentam algum tipo de deficiência. O percentual de pessoas com deficiência motora (7%) é o segundo maior (S.N.P.D.P.D., 2012).

As próteses totais de membros inferiores são utilizadas no caso de amputações na dearticulação no quadril decorrentes de acidentes automobilísticos ou do trabalho, doenças vasculares, desordem congênita e desastres naturais (APLEY, 1998), visando a independência do usuário ao substituir a função do membro perdido (LIANZA, 1995), pois esta perda implica em uma mudança radical nas atividades cotidianas e no estado psicológico do amputado (PAVON, 1975; PAVANI, 2015).

Essas próteses são constituídas por componentes, como encaixe e articulação de quadril, articulação de joelho e pé, que devem suportar o peso do usuário e absorver a energia cinética decorrente do movimento (BOCOLIN, 2000), devendo ser construídas com materiais leves e

resistentes para evitar seu abandono pelo usuário (PAVANI, 2015).

A amputação, ou seja, a remoção cirúrgica, parcial ou total, de um membro, busca manter o máximo comprimento possível do coto, pois quanto mais distal for a remoção do membro, menor será o gasto energético do amputado ao efetuar suas tarefas, facilitando o seu retorno ao convívio social e profissional (CARVALHO, 2003; PAVANI, 2015).

Apesar de tais notícias, pesquisas recentes mostram um grande avanço no rumo das próteses. Conforme a professora da Universidade ETH de Zurique, Stanisa Raspopovic, destaca, em comunicado, “Desenvolvemos a primeira perna com alta sensibilidade para amputados acima do joelho que são altamente incapacitados” (SOARES, 2019).

Simultaneamente, tem-se um dos acidentes mais bem vindos da história da humanidade: o grafeno. Descoberto acidentalmente, na sua forma estável e bidimensional (pois sua existência já era conhecida desde 1930), em 2004 pelos físicos André Geim e Konstantin Novoselov, o alótropo do carbono, grafeno, é uma maravilha da humanidade. O material dos sonhos, além de extremamente leve, tem ótima condutividade elétrica e térmica, bem como alta resistência mecânica e excelentes propriedades ópticas.

O campo de estudo ganhou bastantes avanços, visto que atualmente as próteses conseguem interpretar impulsos elétricos promovidos pelos músculos, proporcionando uma experiência mais aproximada, às pessoas amputadas, de ter os movimentos recuperados. Porém, é uma área ainda pouco explorada, que teve atenção apenas das últimas duas décadas para cá e que precisa de muitos avanços, visto que a maioria das próteses comerciais ainda são simples e apenas auxiliam a movimentação.

Tão somente em 2008 começou a busca pela recuperação do tato, como mostram os estudos dos professores Jeremy Fishel e Nicholas Wetzel, da Universidade do Sul da Califórnia, os quais apresenta o projeto de um sensor que permite que a mão robótica tenha uma resposta quanto à pressão que deve exercer para que o objeto não caia (SITE INOVAÇÃO TECNOLÓGICA, 2008).

Tal como o neurologista do Hospital Santa Helena, em Brasília, Cláudio Carneiro, fala que deram atenção à uma área pouco explorada, e diz:

“É algo que geralmente não é pensado, que, ao ter a amputação, essa mobilidade do membro novo pode ser um problema devido à falta de sensibilidade. E isso tem muita lógica, pois precisamos saber onde estamos pisando para ter a força e a segurança de caminhar, como no caso dos pacientes testados” (SCIENCE TRANSLATIONAL MEDICINE, 2019).

Este estudo tem como justificativa, tendo em vista a prerrogativa de um campo de estudos ainda pouco explorado e um material com propriedades extraordinárias, “unir o útil ao agradável”, explorando os aspectos do grafeno e sua aplicação em próteses biônicas, afim de obter resultados quanto à recuperação de tempo ágil e sensibilidade de um membro perdido.

## OBJETIVOS

Este estudo tem como objetivo geral analisar as propriedades mecânicas, térmicas e elétricas do grafeno com intenção de aplicá-lo em próteses biônicas, e verificar a possibilidade

de recuperar a sensibilidade completa ou mais aproximada possível do natural.

Como objetivos específicos tem-se:

- Utilizar o grafeno para diminuir o tempo de resposta da tradução dos comandos entre o cérebro e o software da prótese.
- Aplicar o grafeno para melhorar as propriedades mecânicas e térmicas em próteses biônicas.
- Empregar o grafeno para recuperar sensibilidade através de sensores instalados na prótese, bem como sensações térmicas, de texturas e de pressão.

## GRAFENO

Considerado o material mais fino do mundo, o grafeno é um material que consiste de uma folha plana de átomos de carbono, formando uma camada monoatômica bidimensional organizados em estruturas hexagonais, cuja altura é equivalente à de um átomo. Esse material pode ser produzido por meio da extração de camadas superficiais do grafite, um mineral abundante na Terra e um dos mais comuns alótropos do carbono

Sua estrutura eletrônica resulta em propriedades que traduzem uma resistência mecânica maior que a do aço, mobilidade eletrônica mais elevada que o silício, condutividade térmica mais alta que o cobre, área superficial maior que a observada para o grafite e ainda um material mais leve que tantos outros (J. E. D. 2016).

### Propriedades mecânicas

O grafeno é o material mais resistente já conhecido, tendo a maior resistência intrínseca, sendo capaz de suportar pressões de até 130 gigapascal ( $130 \times 10^9$  Pa), e ainda conta com um módulo de Young extremamente elevado (1 TPa), indicando que, além de resistente, esse material é bastante elástico e, por isso, retorna ao seu tamanho original com relativa facilidade. Tamanha resistência decorre das fortes ligações químicas formadas entre seus átomos de carbono, pois, os elétrons em uma única camada de grafeno comportam-se como partículas sem massa, deslocando-se a uma velocidade de aproximadamente  $10^6$  m/s. É o material mais fino já conhecido e o mais forte já medido. Materiais largamente utilizados na construção civil, como o aço, suportam apenas um terço dessa pressão (J. E. D. 2016; WEI, 2013; CHEN, 2010).

As pequenas áreas de cada hexágono de carbono são responsáveis pela alta impermeabilidade do grafeno, que pode ser usado como uma pequena rede capaz de segurar gases que vazam muito facilmente de seus recipientes, como o gás hidrogênio. Além de extremamente resistente, o grafeno é muito leve: sua densidade é de  $0,77$  g/m<sup>2</sup>, cerca de mil vezes mais leve que uma folha de papel.

### Propriedades térmicas

A condutividade térmica do grafeno, em temperatura ambiente, pode atingir entre 4840~5300 W/m.K (para comparação, a do cobre é 400 W/m.K), o que sugere usos potenciais para gerenciamento térmico em uma variedade de aplicações. Apresenta área superficial muito

elevada ( $2600 \text{ g/m}^2$ ), muito maior do que as áreas superficiais do grafite ( $10 \text{ g/m}^2$ ) e nanotubos de carbono ( $1300 \text{ g/m}^2$ ) (J. E. D. 2016).

Em virtude das suas propriedades eletrônicas, o grafeno é um excelente condutor térmico. Esse material é capaz de dissipar calor mais rápido que qualquer outro conhecido. Além disso, alguns estudos sugerem que sua temperatura de fusão seja de  $4125 \text{ K}$ , cerca de  $3851^\circ \text{ C}$ .

## Propriedades elétricas

Os elétrons conseguem propagar-se no grafeno quase livremente sem sofrerem desvios ou colisões. Em virtude da estrutura hexagonal das ligações de carbono, os elétrons deslocam-se no interior dessas finas camadas em velocidades relativísticas, próximas à velocidade da luz.

A condutividade elétrica (até  $2 \times 10^4 \text{ S/cm}$ ) e a mobilidade eletrônica ( $2 \times 10^5 \text{ cm}^2/\text{V.s}$ , o que é mais de 100 vezes superior à do silício) elevadas na monocamada de grafeno resultam de uma pequena massa efetiva. Em temperatura ambiente, a resistividade elétrica do grafeno é a mais baixa conhecida (cerca de  $10^{-6} \Omega.m$ ), menor que a resistividade da prata, o melhor condutor metálico conhecido (J. E. D. 2016).

## PRÓTESES

A prótese (do grego antigo “prósthesis” que significa “acessório, adição, aplicação”), é um elemento que tem como finalidade restituir a mobilidade ou compensar a perda funcional de uma pessoa que teve a perda parcial ou integral de um membro, afim de garantir adaptação e autonomização no seu retorno ao convívio social e profissional (KANG *et al*, 2016).

### Prótese objeto do estudo

Próteses endosqueléticas ou modulares são construídas por tubos e componentes modulares com acabamento cosmético, conforme as medidas do membro contralateral, sendo utilizadas em todos os níveis de amputação, com exceção das amputações parciais de pé e tornozelo. Os joelhos modulares são facilmente encontrados no mercado, inclusive com unidades hidráulicas e pneumáticas.

Nas próteses robóticas (biônicas), a marcha do amputado se aproxima de uma pessoa com ambas as pernas, pois a velocidade e a força de propulsão de cada passada podem ser programadas. Apesar de serem um bom exemplo de integração humano-máquina, essas próteses não são distribuídas a população em geral devido ao seu alto custo.

### Materiais comumente utilizados

Os materiais utilizados em próteses externas podem ser caracterizados pela sua resistência a corrosão, resistência mecânica e leveza. Os materiais mais comumente utilizados na confecção das próteses mecânicas são o titânio, a liga cobalto-cromo-molibdênio, o aço inoxidável e a fibra de carbono, entre os quais destacam-se:

- Metais como aços inoxidáveis (alta resistência a corrosão, alta resistência mecânica e alto peso), ligas de titânio (alta resistência a corrosão, alta resistência mecânica e baixo

peso) e ligas de alumínio (resistência a corrosão, resistência mecânica e baixo peso) (SMITH, 2008);

- Polímeros como o polietileno que são compostos orgânicos, formados por grandes estruturas moleculares baseadas em carbono e hidrogênio, geralmente, apresentando baixa densidade e grande flexibilidade (CALLISTER, 1991).

## TEMPO DE REAÇÃO

Tempo de reação é o tempo decorrido entre uma pessoa que está sendo apresentada com um estímulo e a pessoa que inicia uma resposta motora ao estímulo. Geralmente é da ordem de 200 ms (WONG, 2014). Os processos que ocorrem durante esse breve período permitem ao cérebro perceber o ambiente circundante, identificar um objeto de interesse, decidir uma ação em resposta ao objeto e emitir um comando motor para executar o movimento. Esses processos abrangem os domínios da percepção e do movimento e envolvem tomada de decisão perceptiva e planejamento motor (JENSEN, 2006).

Um exemplo rápido é nossa reação ao sentir ou ver uma mosca pousando em nosso braço. A reação se dá em relação à capacidade do cérebro de detectar, processar e responder a esse estímulo.

O tempo de reação depende de vários fatores:

- Percepção: Ver, ouvir ou sentir um estímulo com a certeza de que é essencial para ter um tempo de reação adequado. Quando a mosca pousa no braço, os olhos capturam a imagem da mosca ou a pele sente a mosca pousando, percebendo o estímulo.

- Processamento: Para ter um tempo de resposta adequado, é necessário prestar atenção e entender bem a informação. Seguindo o exemplo anterior, a pessoa será capaz de distinguir o que está vendo ou sentindo, e saber que deve agir de alguma forma, portanto, processando o estímulo.

- Resposta: A agilidade motora é necessária para agir e ter um tempo de resposta adequado. Quando a pessoa percebe e processa corretamente o estímulo, ela espanta a mosca com as mãos ou simplesmente mexe seu braço, respondendo ao estímulo.

Se alguma parte desses processos é alterada, o tempo de reação será afetado em consequência. Portanto, se uma pessoa tem alguma dessas etapas alterada, o tempo de reação será deficiente.

Pesquisadores americanos revelaram que nosso cérebro é capaz de interpretar imagens captadas pelos olhos em apenas 13 milissegundos. Essa velocidade se mostrou quase 8 vezes superior aos 100 milissegundos que haviam sido determinados em um estudo anterior (TRAF-TON, 2013).

## ANÁLISE NUMÉRICA

O estudo e simulação baseou-se em quatro trabalhos científicos que explanam acerca

do Método de Elementos Finitos (MEF) aplicado em biomecânica, e um que aborda a análise numérica em engenharia mecânica e de materiais (ROESLER *et al*, 2004; ARAÚJO, 2002; RODRIGUES, 2017).

Um dos estudos, utiliza como ferramenta o elemento finito tetraédrico, para estudar a biomecânica da mão por aplicação do MEF (GASPAR, 2010).

Outro trabalho reúne informações acerca de dimensões, tecidos e partes do corpo humano para serem inseridos em um software de MEF e posteriormente, utilizam um software de impressão 3D, afim de obter bioimpressões para utilizar como próteses (KANG *et al*, 2016).

Em suma, os trabalhos acerca da biomecânica reúnem os dados necessários para o estudo e os inserem em softwares que utilizam MEF, para realizar os cálculos de forma hábil e precisa, e conseguir de forma mais segura os resultados do estudo.

## METODOLOGIA

A análise pelo Método de Elementos Finitos deve seguir uma ordem operacional que é dividida em três etapas: pré-processamento, processamento e pós-processamento. O pré-processamento é a etapa em que se dá a geração e modelagem da geometria tridimensional (3D) por um software de Desenho Assistido por Computador (CAD). Em seguida o modelo de elementos finitos é criado com as definições das condições e propriedades das estruturas, e com a geração de uma malha de elementos finitos.

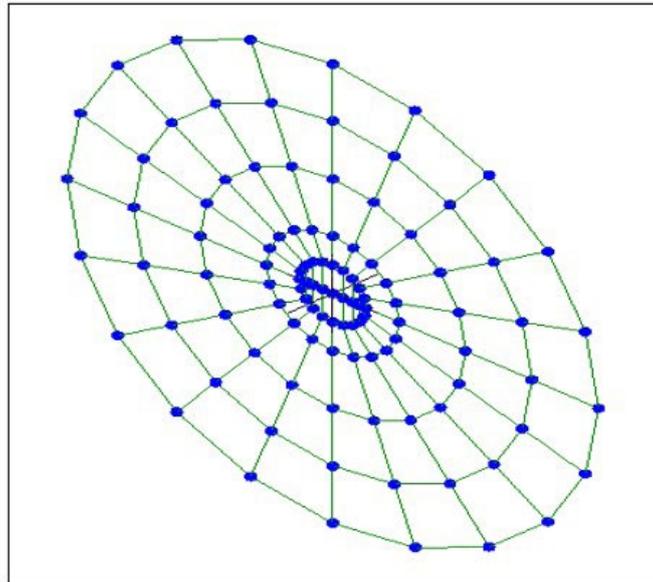
Após a criação do modelo de elementos finitos, um software específico de simulação computacional realiza cálculos das condições de simulação desejadas, etapa chamada de processamento. Tais cálculos convergem para a solução de uma simulação que envolve: propriedades dos materiais, condições de contorno, forças, apoios, e diversas outras possibilidades.

Finalmente, os resultados da simulação são analisados na etapa chamada de pós-processamento. Os resultados são trabalhados e expressos em gráficos e tabelas, e analisados quantitativamente.

O protótipo, e fase de pré-processamento é feito com uma modelagem 3D de um fio de grafeno utilizando o software de elementos finitos *Lisa Fea – Finite Element Technologies 2013* (figuras 1,2,3 e 4).

Usando medidas próprias, desenhou-se um fio de grafeno de 100 cm de comprimento (simulando um comprimento na hipótese de a prótese ser projetada para o braço inteiro, e ter uma ligação com a rede neural ou tendões, afim de fazer testes de resposta e reflexo) e 2 cm de diâmetro (essa medida foi utilizada para facilitar os cálculos e visualização da modelagem).

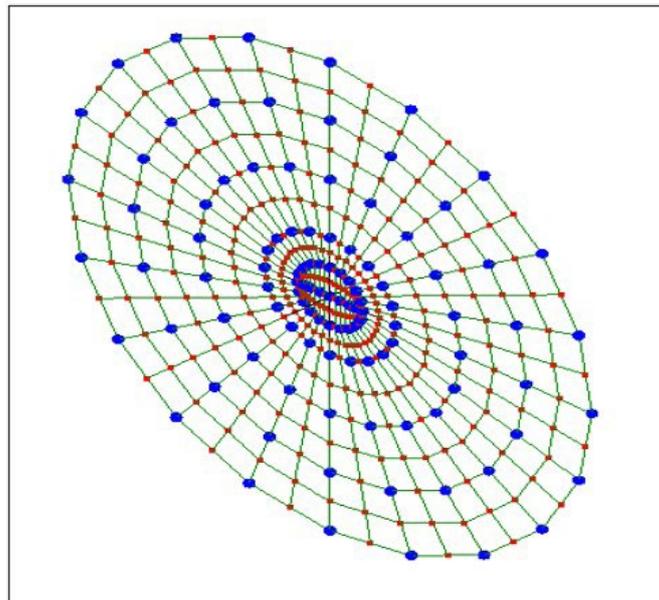
**Figura 1 - Modelagem do fio de grafeno**



**Fonte: Acervo próprio.**

As malhas de elementos finitos precisam ser refinadas para que os resultados não tenham discrepâncias além de um pequeno valor percentual (LISA, 2013). Assim, foi feito um refinamento de malha para seguridade nos resultados (figura 2).

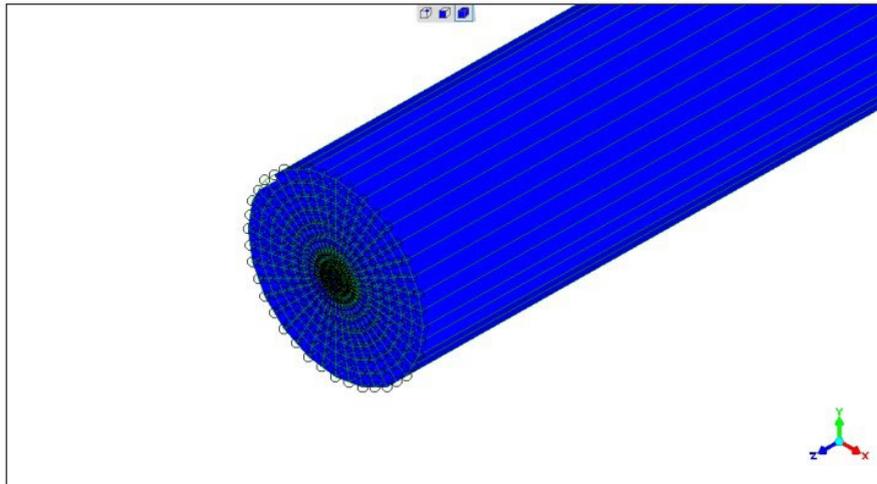
**Figura 2 - Refinamento de malha.**



Os pontos vermelhos são os novos nós advindos do refinamento de malha, enquanto os pontos azuis são os que já haviam na modelagem.

**Fonte: Acervo próprio.**

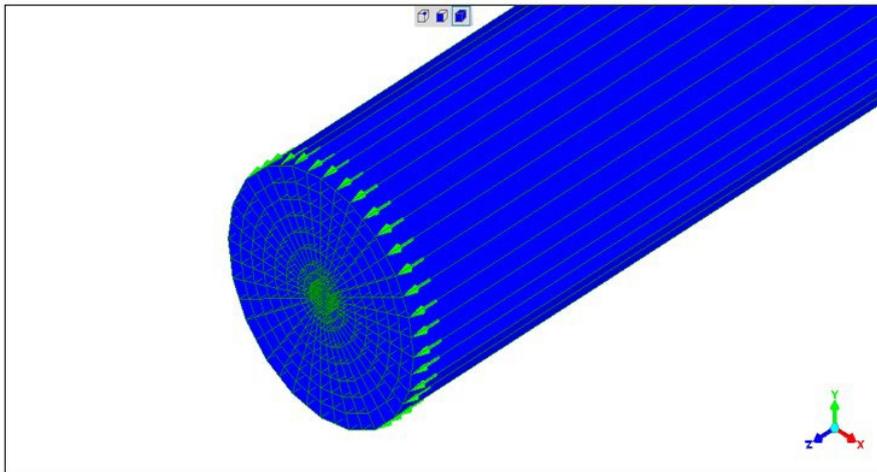
**Figura 3 - Modelagem do fio de grafeno, etapa da resposta elétrica.**



Os círculos pretos são os "nós" onde foi-se colocado a voltagem que percorre o corpo humano.

Fonte: Acervo próprio.

**Figura 4 - Modelagem do fio de grafeno, etapa da resposta dinâmica.**



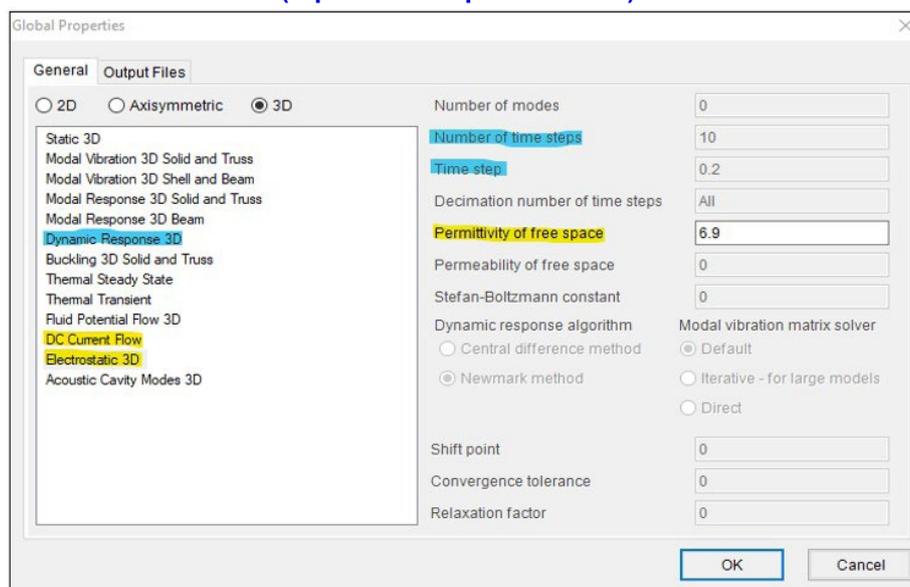
As setas verdes representam a força aplicada durante um aperto de mão.

Fonte: Acervo próprio.

Optou-se por deixar o valor de 10 no "number of time steps" para melhor visualização e 0,2 em "time step", referente ao tempo de reação (LISA, 2013).

A permissividade dielétrica do grafeno é cerca de  $6,9\epsilon$  (com margem de erro de  $\pm 0,1$ ), valor esse necessário e utilizado para calcular a etapa da resposta eletrostática na simulação (FANG, 2016).

**Figura 5 - Configurações da etapa dinâmica (representada pela cor amarela) e da etapa elétrica (representada pela cor azul).**

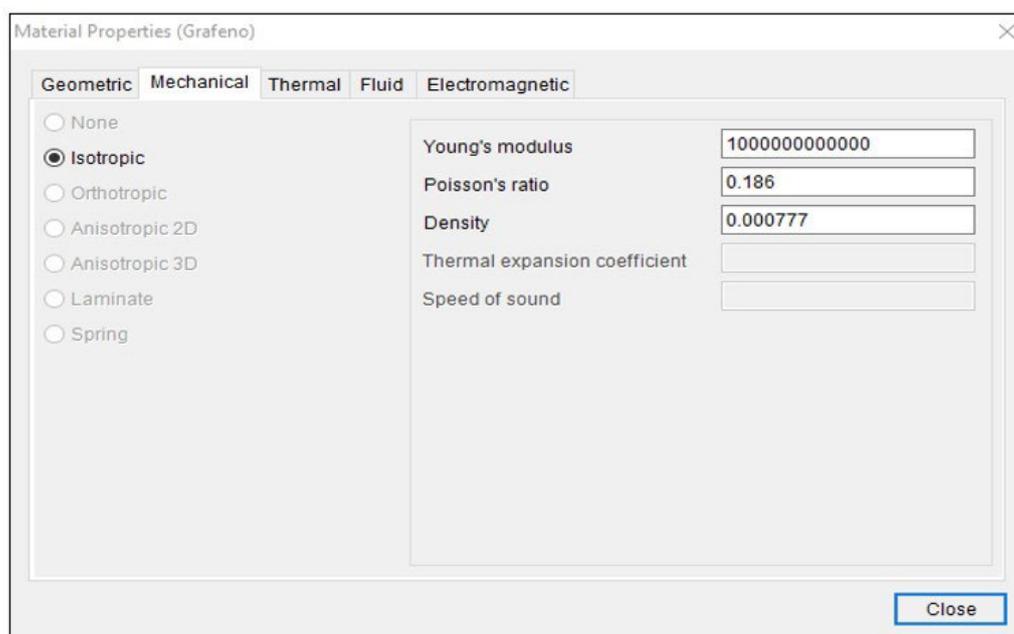


Na aba “Global Properties” é colocado o valor da permissividade, citada anteriormente.

Fonte: Acervo próprio.

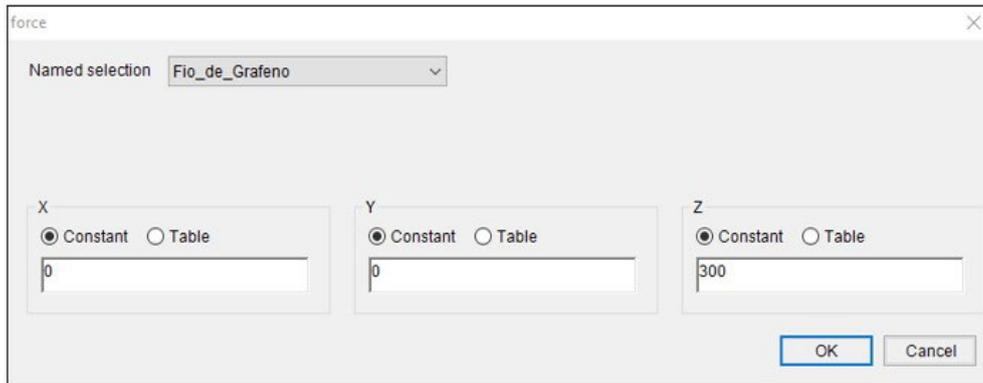
Posteriormente, aplicando os dados obtidos por meio da pesquisa acerca do grafeno e tempo de resposta entre o estímulo, cérebro e reação. Acerca do grafeno, tem-se o módulo de Young com valor de 1 TPa ( $1 \times 10^{12}$ ) (figura 6), coeficiente de Poisson de 0,186 (figura 6) (LIU, 2007) e densidade de  $0,77 \text{ g/m}^2$  ( $0,000777 \text{ kg/m}^2$  pois o software utiliza essa medida) (figura 6); A condutividade elétrica é de  $2 \times 10^4 \left(\frac{\text{S}}{\text{cm}}\right)$  (figura 8). A respeito da permissividade, tem-se o valor de 6,9 (figura 8). Sobre a força utilizada, usou-se o exemplo de um aperto de mão, de  $\pm 30 \text{ Kg}$  ( $300 \text{ N}$ ) (figura 7).

**Figura 6 – Configuração das características do grafeno na etapa da resposta dinâmica (Módulo de Young, coeficiente de Poisson e densidade).**



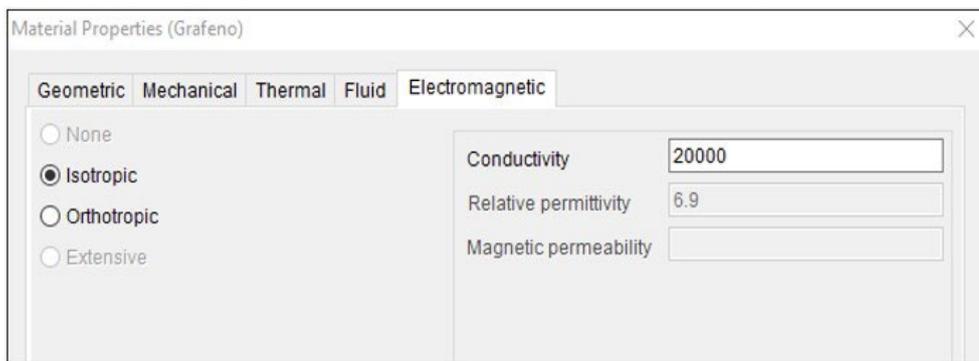
Fonte: Acervo próprio.

**Figura 7 - Configuração da força aplicada (a força de um aperto de mão).**



Fonte: Acervo próprio.

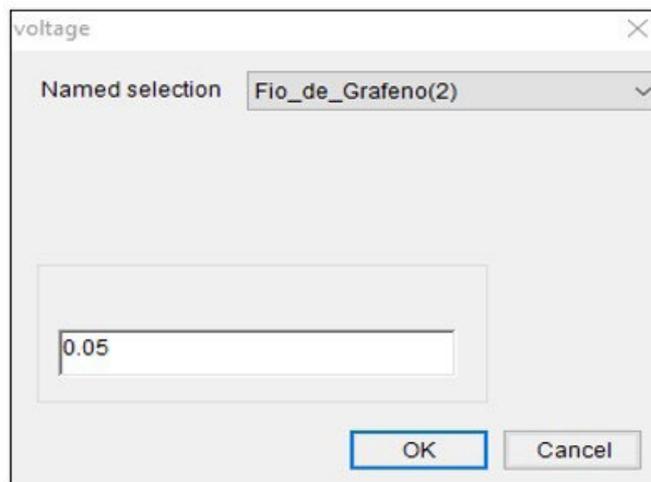
**Figura 8 - Configuração das características do grafeno na etapa da resposta elétrica (Condutividade e Permissividade relativa).**



Fonte: Acervo próprio.

Em relação à voltagem/tensão elétrica (ou ainda bioeletricidade) do corpo humano, o valor que corre nas células, é cerca de *50 milivolts* ( $50 \times 10^{-3}$  ou  $0,05V$ ) (ROBINSON, 2016). Tal informação é configurada no software (figura 9).

**Figura 9 - Configuração da voltagem/tensão elétrica/bioeletricidade**



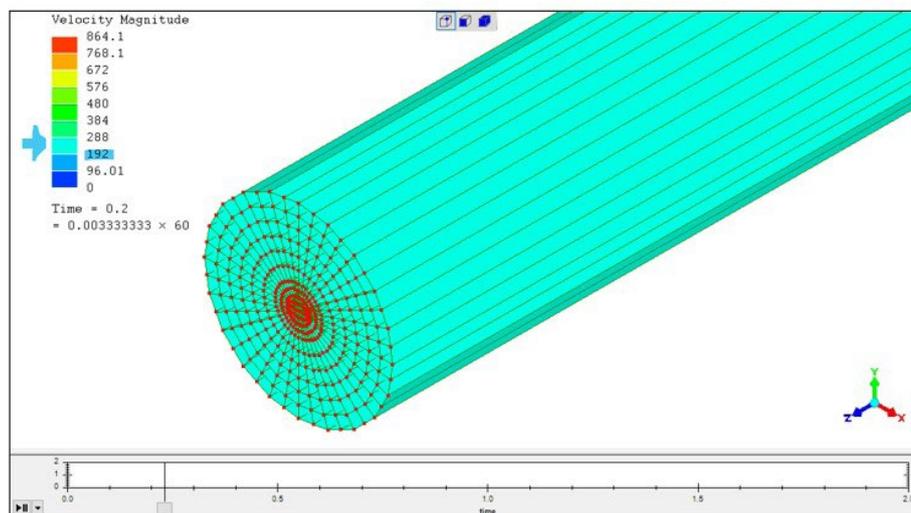
Fonte: Acervo próprio.

## RESULTADOS

Os resultados foram além do esperado, com o grafeno se comportando de forma satisfa-

tória, não tendo deformações ou anomalias. O tempo de reação médio é aproximadamente 200 milissegundos ( $200 \times 10^{-3} \text{ ms}$  ou ainda 0,2 segundos) em cerca de 200 cm de comprimento (considerando o tempo do estímulo até o cérebro (100 cm) e o retorno para reação (mais 100 cm)), e durante a simulação, o grafeno se mostrou extremamente eficaz alcançando valores como 192 m (19200 cm) em 0,2 segundos (figura 10). Sendo assim, valor esse melhor que o tempo de reação humano, cerca de 96 vezes mais rápido (tabela 1).

**Figura 10 - Velocidade do grafeno (marcado em azul) na marca de 0,2 segundos.**



**Fonte: Acervo próprio.**

**Tabela 1 - Relação de cm/s entre o cérebro e o grafeno.**

	Comprimento	Tempo
Cérebro	200 cm	0,2 segundos
Grafeno	19200 cm	0,2 segundos

## CONSIDERAÇÕES FINAIS

O grafeno se mostrou extremamente eficaz, podendo, com a programação, equipamentos e software adequados, criar uma prótese de ponta, capaz de restaurar o tempo de resposta igual ao normal. Infelizmente, por conta do alto preço e alta complexidade da produção de grafeno, não seria possível a produção em massa de próteses assim, sendo focada para um público restrito.

Para estudos futuros, podem ser feitas simulações para recuperação da sensação de temperatura, pressão e textura, vista as demais características do grafeno.

## REFERÊNCIAS

1. APLEY, A. G. Ortopedia e Fraturas em Medicina e Reabilitação. 6 ed, Atheneu: São Paulo. 1998.
2. ARAÚJO, Adérito Luís Martins. Análise Numérica. Engenharias mecânica e de materiais. Faculdade de Ciências e Tecnologia da Universidade de Coimbra, Portugal, 2002
3. BRASKEM. As próteses. SA. Online. Disponível em: <https://www.braskem.com.br/paratletismo->

- infografico. Acesso em: 16 mai. 2020.
4. BOCOLIN, F. Reabilitação - Amputados, Amputações e Próteses. 2 ed, Robe: São Paulo. 2000.
  5. CALLISTER, William D. Jr. Materials Science and Engineering An Introduction. John Wiley & Sons, USA. 1991.
  6. CARVALHO, J. A. Amputacoes de Membros Inferiores. 2 ed, Manole: Sao Paulo. 2003.
  7. CHEN, Da; TANG, Longhua; LI, Jinghong. Graphene-based materials in electrochemistry. Chemical Society Reviews, 2010.
  8. COGNIFIT. Tempo de reação. SA. Online. Disponível em: <https://www.cognifit.com/br/habilidade-cognitiva/tempo-de-resposta>. Acesso em: 05 jun. 2020.
  9. DAVIDSON, C.; SANTORELLI, M. The impact of broad band on people with disabilities. Washington: United States Chamber of Commerce, 2009.
  10. GASPAS, Hélia Maria da Silva. Estudo da biomecânica da mão por aplicação do Métodos de Elementos Finitos. Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto, Portugal, 2010.
  11. HELERBROCK, Rafael. GRAFENO. SA. Online. Disponível em: <https://mundoeducacao.uol.com.br/fisica/grafeno.htm>. Acesso em: 15 abr. 2020.
  12. IBGE. Atlas do Censo Demografico. Rio de Janeiro, 2010. Disponível em: <https://biblioteca.ibge.gov.br/index.php/bibliotecacatalogo?view=detalhes&id=264529>. Acesso em: 14 mar. 2020.
  13. J. E. D.Vieira Segundo; E. O. Vilar. Grafeno: Uma revisão sobre propriedades, mecanismos de produção e potenciais aplicações em sistemas. Revista Eletrônica de Materiais e Processos / ISSN 1809-8797 / v. 11, n. 2. 2016.
  14. JENSEN, A. R. Clocking the mind: Mental chronometry and individual differences. Amsterdam: Elsevier, 2006.
  15. JUNIOR, Reinaldo Batista; MIRLISENA, Giuseppe; RAIA, Fábio. Próteses mecânicas para amputados de membros inferiores com ênfase no pé. Universidade Vale do Paraíba.
  16. KANG, Hyun-Wook; LEE, Jing Sang; KO, In Kap; KENGLA, Carlos; YOO, James J.; ATALA, Anthony. A 3D bioprinting system to produce human-scale tissue constructs with structural integrity. Nature Biotechnology, 2016.
  17. LIANZA, S. Medicina de Reabilitação. 2 ed, Guanabara Koogan: Rio de Janeiro. 1995.
  18. LISA Finite Elements Analysis. Tutorials and Reference Guide. 2013.
  19. LIU, Fang; MING, Pingbing; LI, Ju. Ab initio calculation of ideal strength and phonon instability of graphene under tension. Physical Review, 2007.
  20. ORGANIZAÇÃO MUNDIAL DE SAÚDE. Relatório mundial sobre a deficiência. São Paulo: SEDPCD, 2012. p. 334.
  21. PAVANI, Gilberto; PAVANI, Ricardo; RIBEIRO, Jerry. Ressignificando o uso de materiais em

- próteses totais de membros inferiores. Minas Gerais: ENEBI – Encontro Nacional de Engenharia Biomecânica. 2015.
22. PAVON, Salvador J. Implantes em Ortopedia y Traumatologia. Editorial Médica Panamericana. 1975.
  23. POLIS, E. J. Projeto e construção de parte estrutural de prótese de mão humana com movimentos. Campinas: Universidade Estadual de Campinas. 2009.
  24. POLITANO, Antonio; CHIARELLO, Gennaro; Probing the Young's modulus and Poisson's ratio in graphene/metal interfaces and graphite: a comparative study. Nano Research, 2015.
  25. PRENTICE, William E.; VOIGHT, Michael L. Techniques of Musculoskeletal Rehabilitation. McGraw-Hill, USA. 2001.
  26. ROBINSON, Frank Neville H.; SUCKLING, Eustace E.; KASHY, Edwin. Electricity – Photoelectric Conductivity. Corporate Encyclopædia Britannica, 2016.
  27. ROESLER, C. R. M.; BENTO, D. A.; FANCELLO, E. A.; DA ROSA, E.; Algumas aplicações de simulação numérica em biomecânica óssea. IV Workshop de Informática aplicada à Saúde – CBCComp, 2004.
  28. RODRIGUES, Yriu Lourenço. Análise biomecânica de diferentes dimensões de próteses temporomandibulares personalizadas: um estudo de elementos finitos. Natal, Rio Grande do Norte, 2017.
  29. SCIENCE TRANSLATIONAL MEDICINE. Enhancing functional abilities and cognitive integration of the lower limb prosthesis. Vol. 11. 02 Oct 2019. Online. Disponível em <https://stm.sciencemag.org/content/11/512/eaav8939>. Acesso em: 16 mai. 2020.
  30. SECRETARIA NACIONAL DE PROMOÇÃO DOS DIREITOS DA PESSOA COM DEFICIÊNCIA. Cartilha do censo 2010. Brasília: SDH-PR/SNPD, 2012. p. 32.
  31. SENSORIAL SPORTS. Dentro do cérebro – O tempo para reagir. Online. Disponível em: <https://sensorialsports.com/dentro-do-cerebro-o-tempo-para-reagir/>. Acesso em: 05 jun. 2020.
  32. SITE INOVAÇÃO TECNOLÓGICA. Mãos biônicas ganham tato e um toque de sensibilidade. 09 out. 2008. Online. Disponível em: [www.inovacaotecnologica.com.br/noticias/noticia.php?artigo=maos-bionicas-ganham-tato-e-um-toque-de-sensibilidade](http://www.inovacaotecnologica.com.br/noticias/noticia.php?artigo=maos-bionicas-ganham-tato-e-um-toque-de-sensibilidade). Acesso em: 17 mai. 2020.
  33. SME - Society of Manufacturing Engineers. Fundamentals of Composites Manufacturing. 2 ed, USA. 2008.
  34. SMITH, William; HASHEMI, Javad. Foundations of Materials Science and Engineering. 5 ed, McGraw-Hill, USA. 2008.
  35. SOARES, Vilhena. Ajuda da tecnologia: pesquisa permite maior sensibilidade em perna biônica. 03 out. 2019. Online. Disponível em: [https://www.correiobraziliense.com.br/app/noticia/ciencia-e-saude/2019/10/03/interna\\_ciencia\\_saude,794324/ajuda-tecnologia-pesquisa-permite-maior-sensibilidade-perna-bionica.shtml](https://www.correiobraziliense.com.br/app/noticia/ciencia-e-saude/2019/10/03/interna_ciencia_saude,794324/ajuda-tecnologia-pesquisa-permite-maior-sensibilidade-perna-bionica.shtml). Acesso em: 16 mai. 2020.
  36. TRAFTON, Anne. In the blink of an eye: MIT neuroscientists find the brain can identify images seen for as little as 13 milliseconds. MIT news office, 2014.

37. WEI, Di; KIVIOJA, J. Graphene for energy solutions and its industrialization. DOI: 10.1039/C3NR03312K. *Nanoscale*, 2013.
38. WONG, Aaron L.; HAITH, Adrian M.; KRAKAUER, John W. Motor planning. *The Neuroscientist*, 2014.