

ANÁLISE NUMÉRICA DA DISTRIBUIÇÃO DE TEMPERATURA NO GLOBO OCULAR HUMANO

Aline Lopes Telles Lino, Universidade Federal de Uberlândia, lopeslino@hotmail.com

Nanci Aparecida da Silveira Fujimori, Universidade Federal de Uberlândia, nancifujimori@hotmail.com

Fábio Garcia Temístocles Ferreira, Universidade Federal de Uberlândia, fgarciamcc@gmail.com

Alisson Augusto Azevedo Figueiredo, Universidade Federal de Uberlândia, alissonfigueiredo@hotmail.com.br

Resumo: O presente trabalho tem como propósito a análise da distribuição de temperatura no globo ocular humano em condições ambiente e regime estacionário. Primeiramente, gerou-se a geometria e foram impostas as condições de contorno tendo como base a literatura. Após ajustar todos os parâmetros, realizou-se o estudo de malha variando da grosseira até a mais refinada. Definida a malha de estudo, verificou-se o trabalho referência em duas regiões: eixo de simetria horizontal e ao longo da córnea.

Palavras-chave: olho, transferência de calor, globo ocular.

1. INTRODUÇÃO

Na tentativa de restaurar o sistema visual de pessoas que se tornaram deficientes visuais ao longo dos anos devido a doenças degenerativas, procedimentos que geram o aquecimento do olho, seja pela utilização de laser, em casos de cirurgias refrativas, ou por qualquer tipo de dispositivo implantado no olho, como nos casos de implantes oculares, têm sido aplicados, restaurando parcialmente a visão desses indivíduos, Silva et al. (2004). Estudos devem ser realizados a fim compreender como podem ocorrer distúrbios devido a altas temperaturas no globo ocular humano.

Sendo assim, este trabalho tem por finalidade desenvolver um problema com condições de contorno simples, no regime estacionário e bidimensional de transferência de calor em um modelo de um globo ocular humano baseado no artigo de Ooi et al. (2006). Após a simulação, serão analisadas as temperaturas que o modelo do olho humano está sujeito, utilizando as condições impostas no trabalho referência, para então comparar os resultados obtidos com os apresentados no artigo.

2. METODOLOGIA

Para a realização da análise das temperaturas no globo ocular humano, é necessário seguir os seguintes passos usando o software comercial *COMSOL Multiphysics 4.3*: obtenção da geometria do globo ocular, identificação das propriedades térmicas e condições de contorno, estudo de malha, estudo em regime estacionário, análise dos resultados de temperatura.

2.1. Propriedades

A Tabela (1) e Tabela (2) indicam as propriedades intensivas que foram utilizadas para a simulação do globo ocular. Tais propriedades foram obtidas de Ooi et al. (2006). Os parâmetros utilizados são idênticos aos do artigo referência para que assim seja possível a comparação adequada dos resultados.

Tabela 1: Propriedades utilizadas para a simulação no globo ocular.

Controle de Parâmetro	Valor
Temperatura do sangue T_{sangue} (°C)	37
Temperatura ambiente T_{ambiente} (°C)	25
Emissividade da córnea ϵ	0,975
Coeficiente de convecção do sangue h_{sangue} ($\text{Wm}^{-2}(\text{°C})^{-1}$)	65
Coeficiente de convecção ambiente h_{ambiente} ($\text{Wm}^{-2}(\text{°C})^{-1}$)	10
Perda de fluxo de calor devido a evaporação da lágrima E (Wm^{-2})	40
Constante de Stefan-Boltzmann τ ($\text{Wm}^{-2}(\text{°C})^{-4}$)	$5,67 \times 10^{-8}$

Tabela 2: Coeficientes de condutividade térmica para a simulação no globo ocular.

Subdomínio	Condutividade Térmica ($Wm^{-2}(^{\circ}C)^{-1}$)
Córnea	0,58
Humor aquoso	0,58
Íris	1,0042
Esclera	1,0042
Lente	0,4
Humor vítreo	0,603

2.2. Geometria e Condições de Contorno

A Figura (1) apresenta a geometria do globo ocular com suas dimensões e composição usadas nas simulações realizadas neste trabalho.

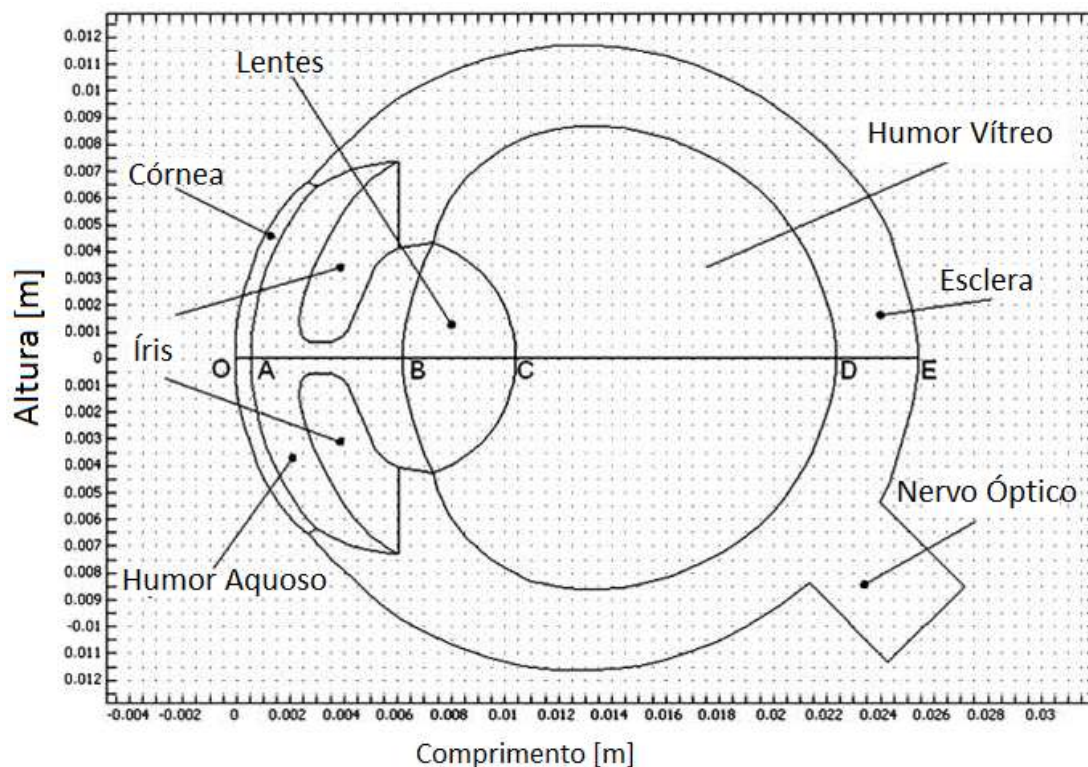


Figura 1: Modelo do globo ocular utilizado para a simulação de Ooi et al. (2006).

Na Figura (2) observam-se as condições de contorno que o olho humano é submetido. A córnea (camada mais externa) e o humor aquoso, por serem camadas muito próximas e por possuírem a mesma condutividade térmica, foram agrupadas em uma única região denominada R1. De forma análoga, a íris, o nervo óptico e a esclera formam a região homogenea R2. A região R3 foi composta pela lente e a R4 pelo humor vítreo. Entre a esclera e o humor vítreo há duas camadas, a retina e a coróide. Como as mesmas são consideradas relativamente finas, e para simplificar o modelo desenvolvido, ambas foram modeladas juntas com a esclera e o nervo óptico como uma região única e homogênea.

A única área em contato com o ambiente é a córnea. Como a temperatura do ambiente é menor do que a temperatura da superfície da córnea, o calor é retirado devido a convecção e radiação. Além disso, há uma camada de lágrima a qual lubrifica e retira calor da região através da evaporação da mesma.

A perda de calor provoca um fluxo de calor das regiões com maior temperatura, interior do globo ocular, para a região de menor temperatura, a córnea.

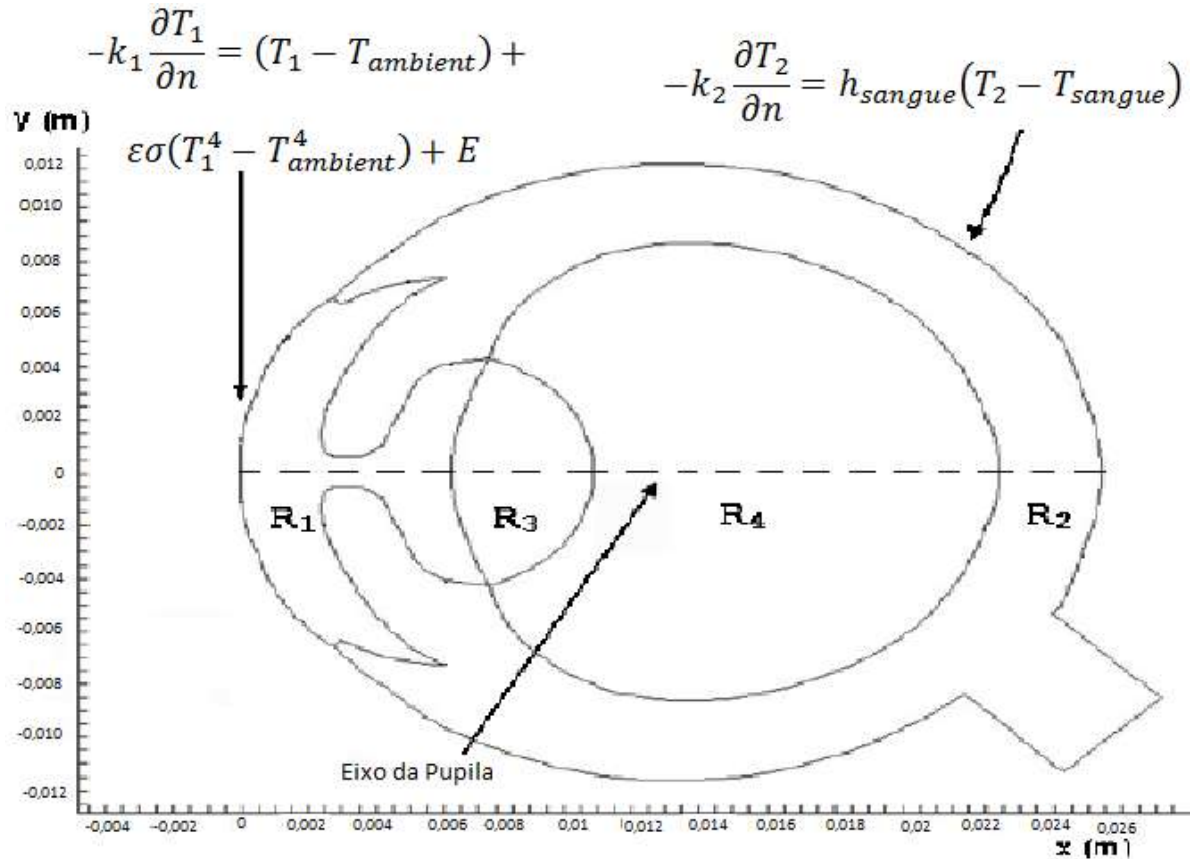


Figura 2: Condições de contorno utilizadas no trabalho Ooi E. H., et al. 2006.

2.3. Análise das Malhas

O programa *Inkscape 0.91* foi utilizado para a criação da geometria do globo ocular humano, a qual foi posteriormente importada para o *COMSOL Multiphysics 4.3*. É importante lembrar que a escala foi alterada para que o modelo gerado em software gráfico ficasse com as mesmas dimensões do modelo do trabalho de referência de Ooi et al. (2006).

Após importar a geometria e inserir as condições de contorno, o estudo da malha foi realizado em dois pontos distintos: na córnea e em uma linha que divide simetricamente o globo ocular no eixo horizontal. Foram analisadas quatro malhas: grosseira, normal, fina e extrafina.

A Figura (3) apresenta os resultados de temperatura na superfície externa da córnea usando quatro tipos de malhas diferentes:

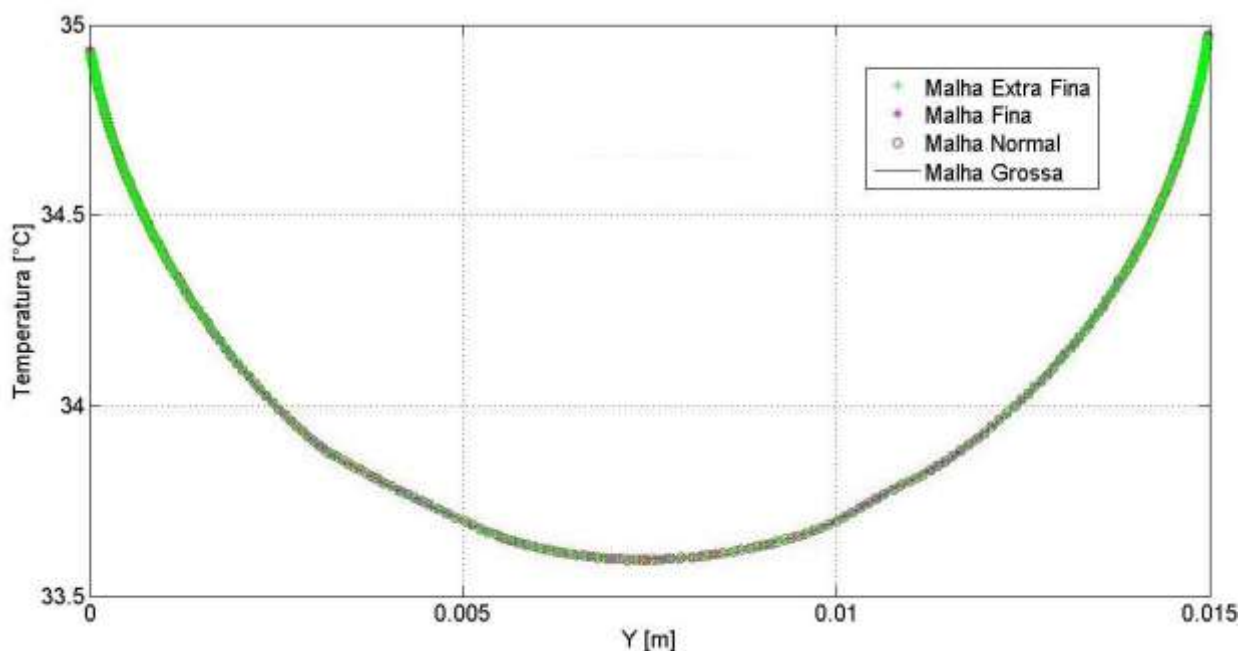


Figura 3: Linhas de temperatura na córnea para diferentes malhas.

Observa-se que a diferença entre os resultados obtidos pelas malhas é muito pequena (aproximadamente 0,001°C). Portanto a malha grossa é a opção mais correta para as análises de temperatura.

Quanto menos refinada a malha for, menor será o custo computacional e menor será o tempo gasto para a simulação, o que irá agilizar o processo de simulação, justificando a importância deste estudo. A Tabela (3) indica o tempo computacional gasto para a simulação de cada malha, assim como o número de elementos que as compõem.

Vale ressaltar que o estudo da malha foi realizado no computador contendo Windows 7, 2009, Processador Intel Core i5.

Tabela 3: Tempo computacional gasto para gerar cada malha e o número de elementos que as compõem.

	Grosseira	Malha Normal	Malha Fina	Malha Extra Fina
Tempo Computacional (s)	3	3	4	5
Número de Elementos da Malha	6942	7891	8962	37927

A Figura (4) apresenta os resultados de temperatura ao longo do eixo de simetria usando os quatro tipos diferentes de malha.

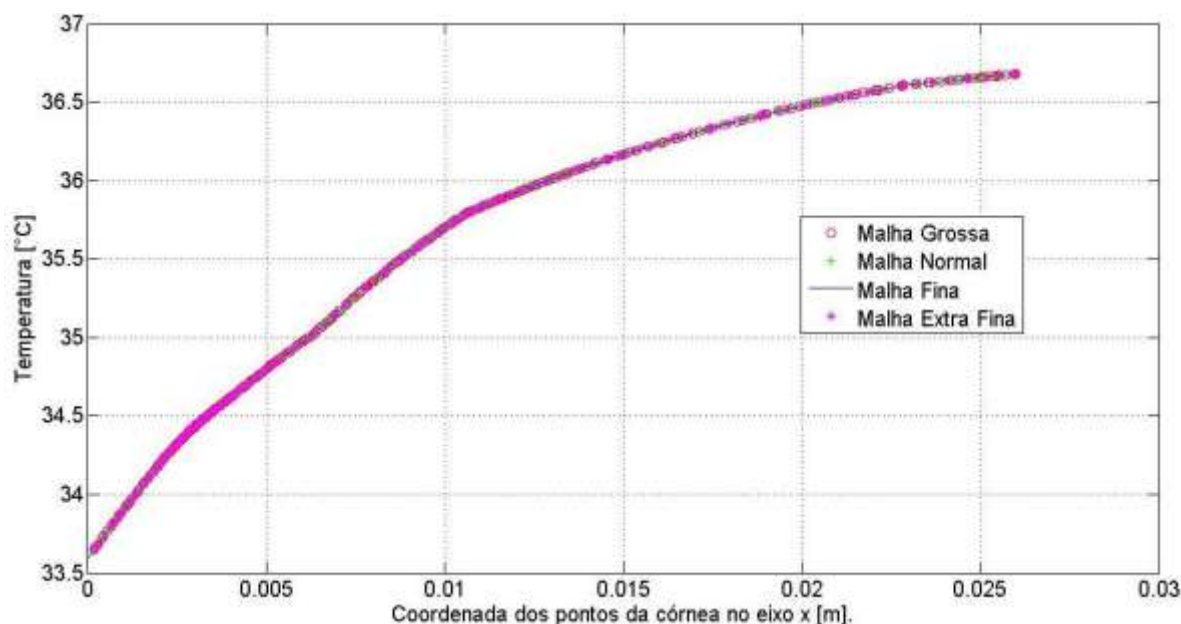


Figura 4: Linhas de temperatura na linha de simetria para diferentes malhas.

Assim como no caso anterior, as temperaturas obtidas de cada malha estudada apresentaram diferenças muito pequenas, o que confirma a utilização da malha grosseira.

3. ANÁLISE E DISCUSSÃO

A Figura (5) apresenta a distribuição de temperatura ao longo do eixo horizontal que divide o globo ocular de forma simétrica.

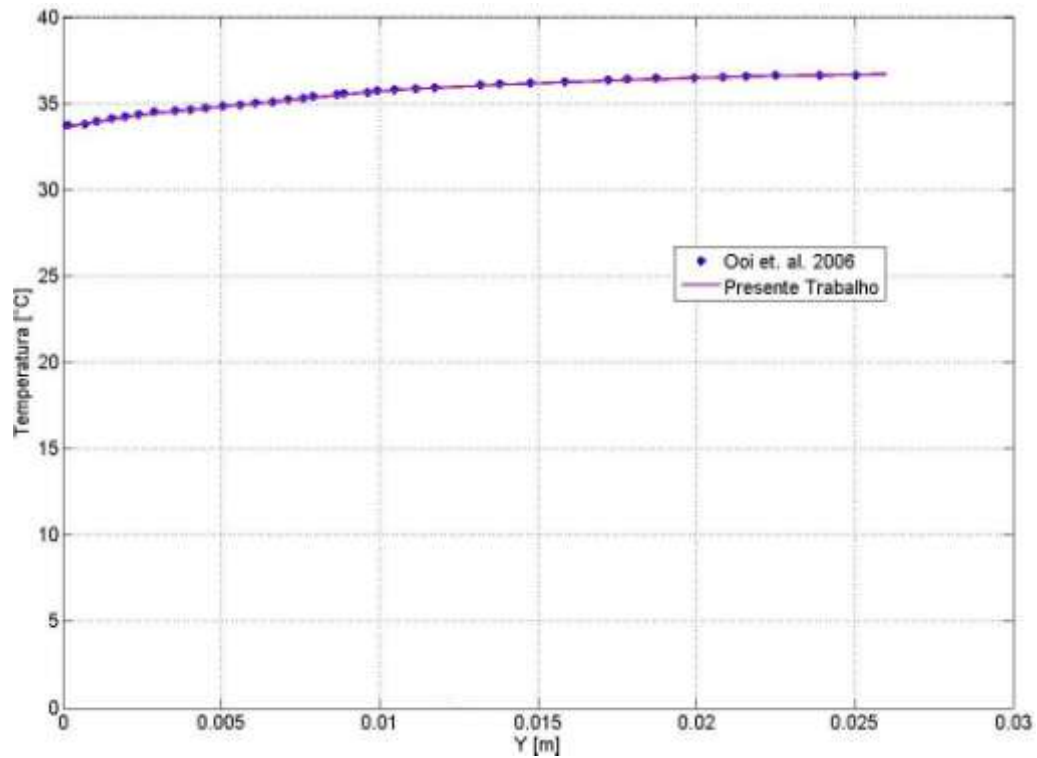


Figura 5: Comparação dos dados gerados no eixo simétrico com os dados apresentados por Ooi et al 2006.

Observa-se que os resultados obtidos neste trabalho foram condizentes, pois convergiram com os resultados apresentados por Ooi et al. (2006).

A Figura (6) apresenta a distribuição de temperatura ao longo da superfície externa da córnea.

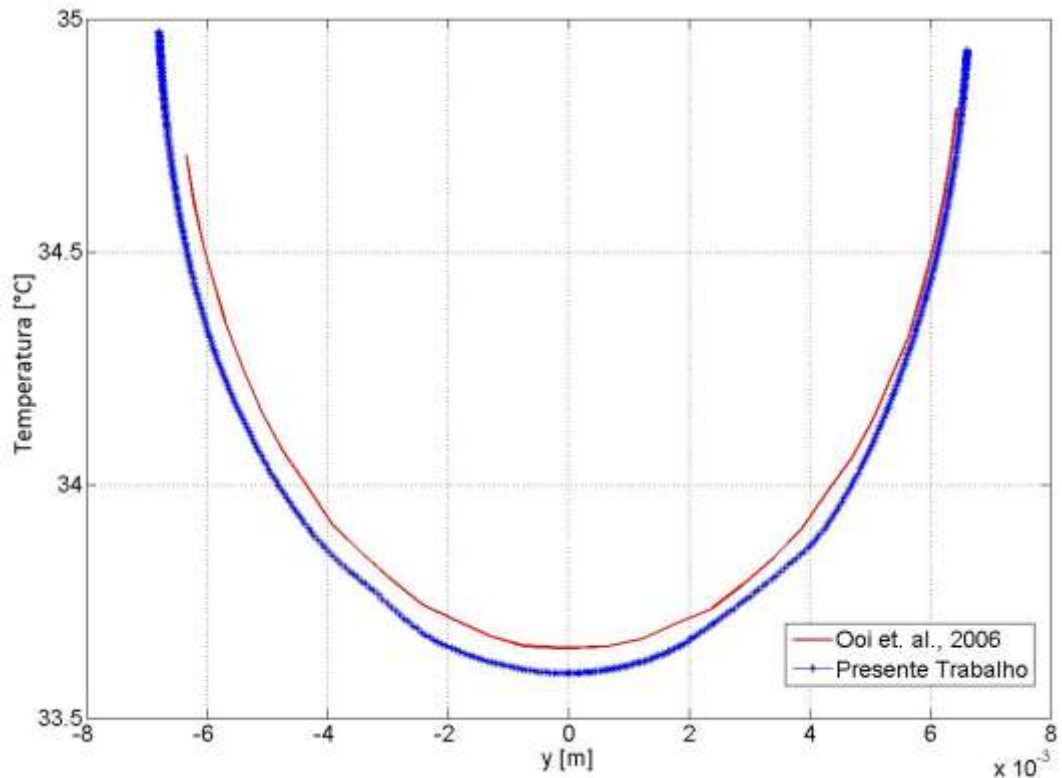


Figura 6: Comparação dos dados gerados na córnea com os dados apresentados por Ooi et al. (2006).

Observa-se que os resultados encontrados aproximam-se da literatura utilizada, porém divergem aproximadamente $0,05^{\circ}\text{C}$. Essa diferença deve-se principalmente ao erro obtido na imprecisão da coleta dos dados da literatura e na importação da geometria devido a limitações dos softwares.

Para gerar a geometria no *Inkscape 0.91*, importou-se a imagem da literatura e desenhou-se em cima da mesma, desta forma obteve-se um erro de 0,5 mm. No entanto o ajuste das curvas e o encontro de linhas geraram cantos vivos os quais são responsáveis pelos pontos de concentração de malha, como pode ser observado na Fig. (7).

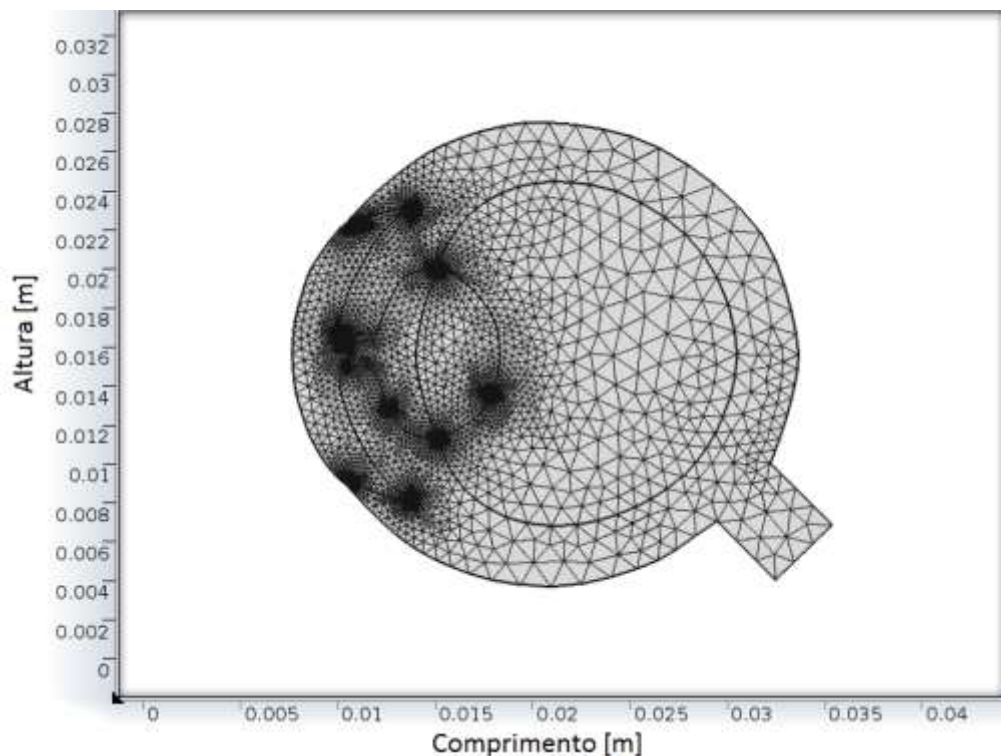


Figura 7: Malha grosseira aplicada na geometria do globo ocular.

Além disso, a coleta dos dados do gráfico do artigo de referência gera erro sistemático, pois o usuário que impõe o ponto do qual deseja-se obter as coordenadas, ou seja, o usuário importa a imagem do artigo o qual deseja-se obter os dados para o programa *Engauge Digitizer* coloca os eixos de referência manualmente e por fim escolhe-se os pontos do gráfico o qual deseja-se obter as coordenadas, as quais são armazenadas e plotadas utilizando o *Matlab*. A magnitude do erro resultante nessa coleta de dados é de cerca de $0,10\text{ }^{\circ}\text{C}$. Ao analisar a Fig. (6) observa-se a presença de um erro sistemático, uma vez que há um erro quase constante de aproximadamente $0,05^{\circ}\text{C}$. Desta forma, o resultado obtido encontra-se dentro da incerteza da coleta dos dados.

Portanto, conclui-se que o presente trabalho apresenta boa convergência de resultados se comparado com o artigo de referência.

A Figura (8) apresenta a distribuição de temperatura em todo o domínio do globo ocular. Observa-se que a menor temperatura localiza-se na superfície externa da córnea, a qual é a região exposta ao meio ambiente. Já a maior temperatura é localizada na esclera, que é o extremo do globo ocular tendo como base a linha de simetria horizontal, o que também é condizente com o esperado, posto que nessa região há somente o contato com fluxo sanguíneo, o qual possui a maior temperatura do problema térmico.

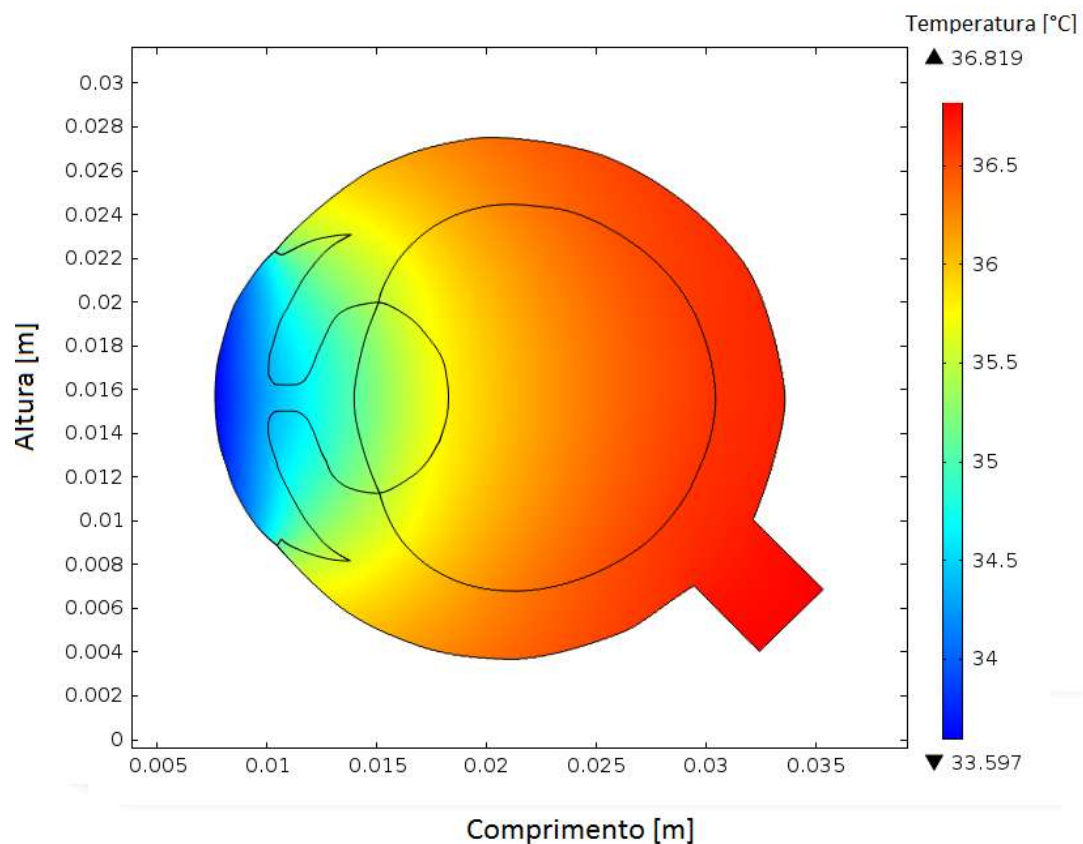


Figura 8: Distribuição de temperatura ao longo do globo ocular.

4. AGRADECIMENTOS

Agradecemos ao Laboratório de Transferência de Calor e Massa, e aos órgãos de fomento FAPEMIG, CNPQ e CAPES.

5. REFERÊNCIAS

- Silva, G.M.L.L. “Análise da Biotransferência de calor nos tecidos oculares devido à presença de implantes retinianos através da utilização do método dos volumes finitos em malhas não-estruturadas”. Dissertação de Mestrado, Universidade Federal de Pernambuco, 2004.
- Ooi. E.H. , Ang W.T. e Ng E.Y.K. “Bioheat transfer in the human eye: A boundary element approach”- Engineering Analysis with Boundary Elements, Vol. 31, Issue 6, June 2007, pp 494–500.

6. DIREITOS AUTORAIS

Os autores são os únicos responsáveis pelo conteúdo do material impresso incluído no seu trabalho.