



## **Simulador Bidimensional de Condução Transiente de Calor em Meios Porosos – CCMP-2D**

G. R. Lima<sup>1\*</sup>, A. D. Bueno<sup>2</sup>

<sup>1</sup>Universidade Federal do Espírito Santo – UFES/Alegre

<sup>2</sup>Universidade Estadual do Norte Fluminense – UENF/LENEP

\*guilherme.r.lima@ufes.br

### **Resumo**

Neste trabalho, foi desenvolvido um simulador bidimensional de condução de calor em meios porosos, o CCMP-2D. Foram implementados dois métodos numéricos: o método explícito FTCS (*Forward Time Centered Space*) e o método implícito BTCS (*Backward Time Centered Space*), além de duas condições de contorno, conhecidas como condições de *Dirichlet* e de *Neumann*. Nenhuma falha foi detectada durante os testes e os resultados foram consistentes com os fundamentos físicos. O programa é multiplataforma, de código aberto, possui interface gráfica amigável com múltiplas janelas e foi desenvolvido em linguagem C++ com o paradigma de orientação a objeto. Essas características permitem que os alunos, além usuários, se tornem desenvolvedores, implementando novas funcionalidades ao programa. Neste cenário, o CCMP-2D pode estimular a criação de uma biblioteca de *softwares* educacionais gratuita e de código aberto, desenvolvida por docentes e discentes, com o objetivo de favorecer o processo de ensino-aprendizagem nas disciplinas dos cursos de Engenharia.

**Palavras-chave:** Condução de Calor, Diferenças Finitas, C++, Orientação à Objeto, *Qt Creator*.

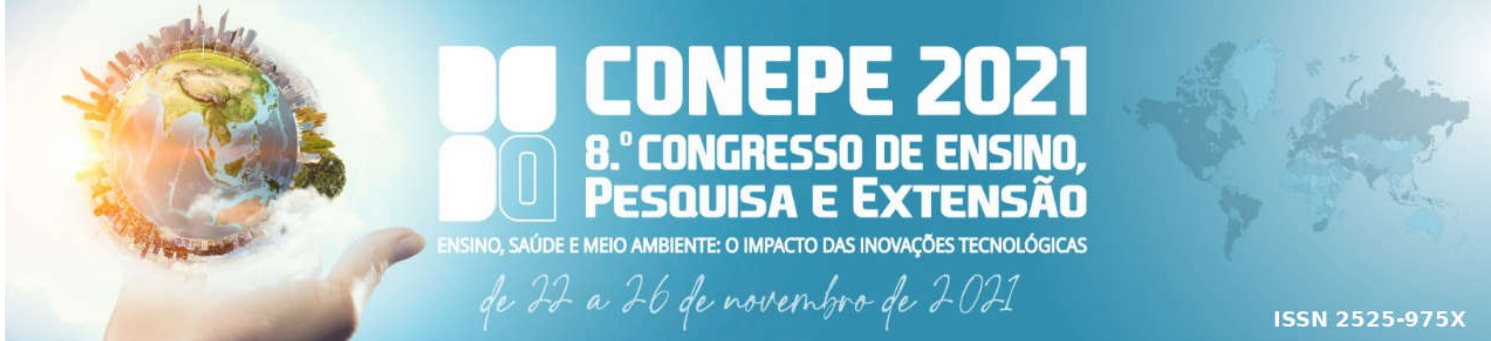
### **1. Introdução**

O fenômeno de transferência de calor é uma das áreas clássicas de fenomenologia da física, com diversas aplicações no ramo da ciência e da tecnologia. Na indústria do petróleo, particularmente, no estudo de reservatórios de petróleo, o complexo acoplamento existente entre os processos térmicos, hidráulicos, mecânicos e químicos (*Thermo-Hydro-Mechano-Chemical* - THMC) que ocorrem no interior do meio poroso, regula o surgimento de zonas de compactação, fraturas e falhas que influenciam tanto na porosidade quanto na permeabilidade do meio poroso <sup>[1]</sup>. Tais propriedades definem a quantidade de fluido que pode ser extraído, permitindo prever o comportamento do reservatório ao longo do tempo <sup>[2]</sup>.

Desta forma, o estudo do fenômeno de transferência de calor, com o objetivo de determinar a distribuição de temperatura em meios porosos, é fundamental para entender o comportamento físico das rochas e seus impactos na fluidodinâmica do escoamento do fluido.

Em diversas aplicações, a geometria e/ou as condições de contorno inviabilizam a obtenção de soluções analíticas para a condução de calor, tornando-se necessária a utilização de métodos numéricos para obter a solução do problema. Portanto, para um profissional de engenharia, inserido neste contexto, um conhecimento sólido em linguagens de programação, métodos numéricos e transferência de calor é indispensável. Estes conhecimentos são adquiridos, nos cursos de graduação, durante a fase inicial de formação acadêmica do engenheiro, por meio dos processos de ensino-aprendizagem nas diversas componentes curriculares do curso.

A implementação de aulas práticas de modelagem computacional nos cursos de graduação permite abordar problemas de engenharia de forma mais realista, criando independência no desenvolvimento dos estudantes <sup>[3]</sup>.



O objetivo deste trabalho foi desenvolver o *software* CCPP-2D, um programa com interface gráfica e desenvolvido em linguagem C++ com paradigma de orientação a objeto. Portanto, utiliza o conceito de criação de objetos a partir de classes contendo atributos e métodos característicos. De forma geral, o CCMP-2D possui duas janelas, a principal e a de resultados, além disso permite salvar os dados (.txt), além de gerar um relatório (.pdf) da simulação, contendo os parâmetros de entrada, as configurações e os resultados gráficos obtidos.

## 2. Materiais e Métodos

### 2.1. Materiais

O único material necessário para o desenvolvimento deste trabalho foi um computador Intel(R) Core-i3-830000, 3,70 GHz e 12 GB de RAM com sistema operacional Windows 10.

### 2.2. Metodologia

A estrutura do *software* foi modelada utilizando o paradigma de orientação a objeto com a linguagem C++. Neste sentido, foram definidas as classes necessárias para a criação do programa, bem como suas dependências.

A equação da difusão de calor foi discretizada utilizando dois métodos numéricos baseados em diferenças finitas: o método explícito FTCS (*Forward Time Centered Space*) e o método implícito BTCS (*Backward Time Centered Space*). Além de uma condição inicial, duas condições de contorno foram utilizadas, as chamadas condições de *Dirichlet* e de *Neumann*.

A interface gráfica do programa foi desenvolvida usando o *Qt Creator*, um *software* multiplataforma que disponibiliza um ambiente de desenvolvimento que suporta a linguagem C++. O programa possui uma janela principal onde o usuário insere os dados e uma janela de resultados onde os gráficos são exibidos.

## 3. Resultados e Discussão

A Fig. (1) mostra parte de uma das janelas do programa, a janela principal.

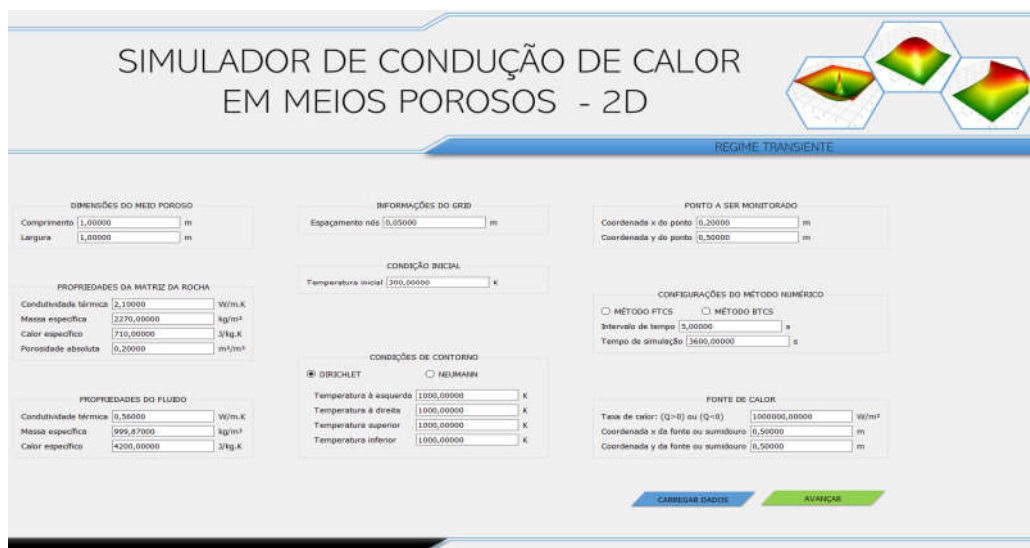


Figura 1. Parte da janela principal.

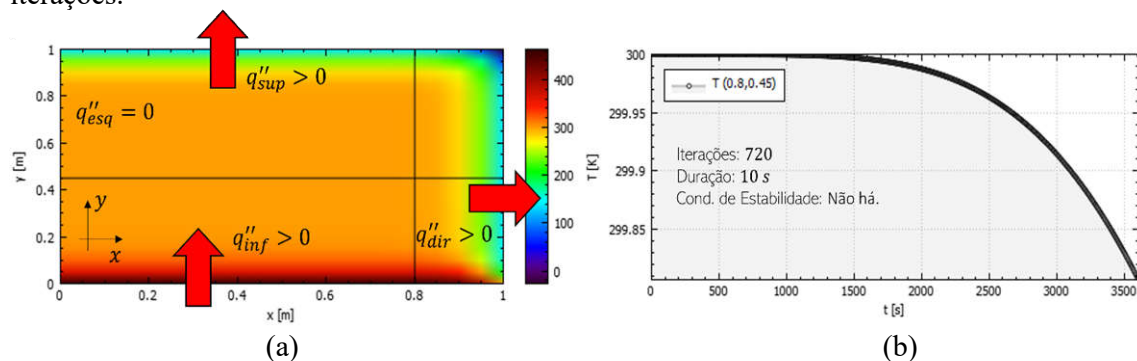
Nesta janela o usuário pode inserir os valores das propriedades do meio poroso (dimensões), da matriz da rocha (condutividade térmica, massa específica, calor específico e porosidade absoluta), do fluido que satura a rocha (condutividade térmica, massa específica, calor específico), da malha (espaçamento entre os nós), da condição inicial (temperatura inicial), das condições de contorno (*Dirichlet*: temperaturas nos contornos, *Neumann*: fluxo de calor nos contornos), do ponto a ser monitorado (coordenadas), do método numérico (BTCS ou FTCS, intervalo ou passo de tempo e tempo total da simulação) e da fonte ou sumidouro de calor (taxa de calor, coordenadas).

Para ilustrar parte das funcionalidades do programa, foi realizado um teste com o método BTCS e a condição de contorno de *Neumann*. A Tab. 1 mostra as configurações do teste realizado. Nesta simulação, a fonte de calor não foi utilizada. Além disso, a fronteira esquerda foi definida como adiabática, portanto, sem fluxo de calor ( $q''_{esq} = 0$ ).

**Tabela 1.** Configurações do teste usando o método BTCS e as condições de *Neumann*.

Condições de contorno	Valores	Outros parâmetros	Valores
Fluxo à esquerda [ $W/m^2$ ]	0	Ponto monitorado [m]	(0,8;0,45)
Fluxo à direita [ $W/m^2$ ]	5000	Passo de tempo [s]	5
Fluxo superior [ $W/m^2$ ]	5000	Tempo de simulação [s]	3600
Fluxo inferior [ $W/m^2$ ]	5000	Fonte de calor [ $W/m^3$ ]	0

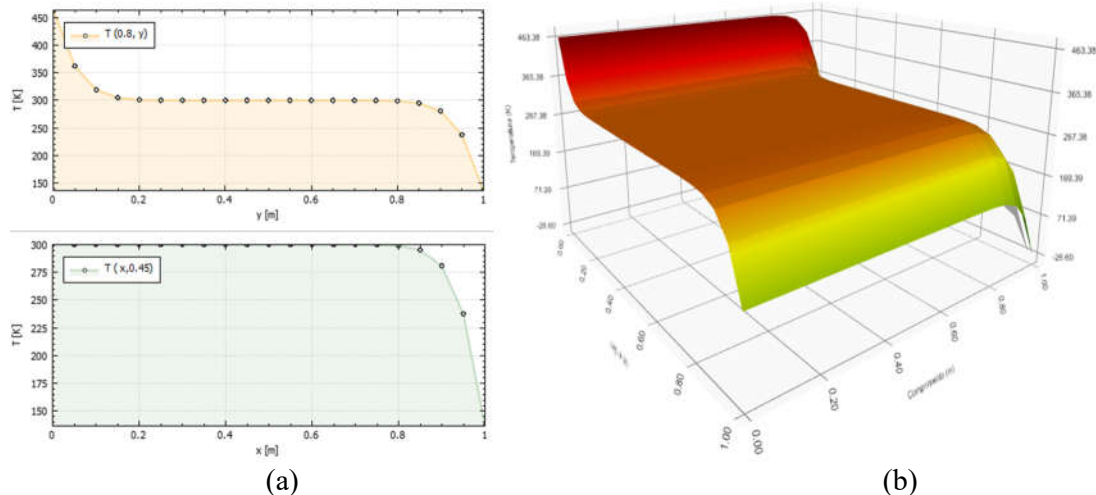
A Fig. (2) mostra os resultados obtidos para a distribuição de temperatura e evolução temporal em um ponto específico. A simulação teve duração de 10 s e um total de 720 iterações.



**Figura 2.** (a) Distribuição de temperatura ao final da simulação (3600 s) e (b) a evolução temporal da temperatura em um ponto específico do meio poroso de coordenadas (0,8 e 0,45).

A Fig. (2a) mostra que o fluxo térmico entra na fronteira inferior e sai do meio poroso através das fronteiras direita e superior. Como a fronteira esquerda é adiabática, não há troca de calor com o meio externo e sua temperatura é definida pelas trocas de calor internas do meio poroso. Já a Fig. (2b) mostra a evolução temporal de temperatura em um ponto específico indicado pela interseção das linhas pretas mostradas na Fig. (2a). A temperatura deste ponto diminui com o tempo e se justifica pela maior proximidade com a fronteira direita, cujo fluxo de calor implica na redução da temperatura nas proximidades da fronteira.

A Fig. (3) mostra a distribuição da temperatura ao longo do corte vertical e horizontal, linhas pretas na Fig. (2). Além disso, mostra um gráfico tridimensional da distribuição da temperatura no meio poroso.



**Figura 3.** (a) Distribuição de T, no corte vertical e horizontal e (b) a distribuição de T em 3D.

Os resultados da Fig. (3a) (superior) mostram uma transição com temperatura mais elevada na parte superior, uniforme na região central (0,2 m a 0,8 m) e mais baixa na região inferior. De forma similar, a Fig. (3a) (inferior) mostra um perfil de temperaturas da fronteira esquerda para a direita. Os resultados mostram que a temperatura se mantém uniforme em 300 K até as proximidades da fronteira direita onde a temperatura diminui. Esses resultados assim como a distribuição tridimensional, Fig (3b), estão de acordo com as condições de contorno definidas.

#### 4. Conclusões

Nenhuma inconsistência física foi observada durante os testes. Neste sentido, o programa atendeu de forma satisfatória a todos os objetivos inicialmente propostos. Com a ferramenta computacional desenvolvida, os alunos podem estudar o fenômeno de condução térmica em meios porosos no regime transiente. Além disso, por ser de código aberto e utilizar o paradigma de orientação a objeto, os próprios alunos podem implementar novas funcionalidades ao programa.

Neste cenário de futuras implementações, o CCMP-2D pode ser um instrumento estimulante para a criação de uma futura biblioteca de *softwares* educacionais gratuita e de código aberto, desenvolvida por docentes e discentes, com o objetivo central de favorecer o processo de ensino-aprendizagem relativo às disciplinas do curso de Engenharia.

#### Referências

- [1] YASUHARA, H. **Thermo-hydro-mechano-chemical couplings that define the evolution of permeability in rock fractures**. The Pennsylvania State University, 2005.
- [2] ROSA, A. J.; DE SOUZA C. R.; XAVIER, J. A. **Engenharia de reservatórios de petróleo**. Interciência, 2006.
- [3] BATISTA, R. C.; DAS NEVES G. M. Modelagem computacional aplicada como uma tecnologia no currículo de engenharia mecânica. **Revista Mundi Engenharia, Tecnologia e Gestão**, v. 5, n. 3, 2020.