

ANÁLISE DA INFLUÊNCIA DO REGIME TRANSIENTE EM ESTRUTURAS DE FLUXO ATRAVÉS DO PROJETO DE CAMINHOS CONDUTIVOS

ANALYSIS OF THE INFLUENCE OF THE TRANSIENT REGIME ON FLOW STRUCTURES THROUGH THE DESIGN OF CONDUCTIVE PATHWAYS

Thiago Alves Teixeira¹ 

Emanuel da Silva Diaz Estrada² 

Jeferson Avila Souza³ 

RESUMO. O presente artigo investiga aspectos fenomenológicos relacionados à formação ou evolução das configurações das estruturas de fluxos dos sistemas naturais, com bases nos conceitos e fundamentos da Teoria Constructal. Em outras palavras, o objetivo principal deste estudo é investigar se há diferenças entre estruturas que são construídas e evoluem considerando o regime transiente no modelo físico-matemático e estruturas que evoluem considerando somente o regime permanente. Para demonstrar essas diferenças, neste trabalho foi desenvolvido um algoritmo que implementa uma heurística de tomada de decisão que se baseia na Teoria Constructal para criar caminhos condutivos em ambos os regimes, permanente e transiente. Os resultados obtidos mostraram que a consideração do regime transiente no modelo físico-matemático é relevante, pois o passo de tempo de construção influencia diretamente a eficiência térmica dos caminhos condutivos e tem um papel significativo na formação das suas estruturas de fluxo.

Palavras-chave: Teoria Constructal; Sistemas de fluxo; Caminhos Condutivos.

ABSTRACT. In the present article, based on the concepts and principles of Constructal Theory, we investigated the phenomenological aspects related to the formation/evolution of the flow structures design in natural systems. In other words, the main objective of this study is to investigate whether there are differences between structures that are built and evolve considering the transient regime in the physical-mathematical model and structures that evolve considering only the steady-state condition. To demonstrate these differences, an algorithm has been developed on which it is implemented a decision-making heuristic, based on Constructal Theory, to create conductive paths in both steady-state and transient regimes. Results obtained showed that it is relevant to consider the transient regime in the physical-mathematical model. The time step directly influences the thermal efficiency of the conductive paths and plays a significant role in the formation of their flow structures.

Keywords: Constructal Theory; Flow Systems; Conductive Pathways.

¹Mestrando em Modelagem Computacional, FURG, Rio Grande, RS.

²Doutor, Professor de Engenharia de Computação, FURG, Rio Grande, RS.

³Doutor, Professor de Engenharia de Mecânica, FURG, Rio Grande, RS.

1 INTRODUÇÃO

Em meados da década de 1990, o professor Adrian Bejan, da *Duke University*, nos Estados Unidos, propôs a Teoria Constructal, uma nova teoria universal da física, visando explicar a origem dos diversos padrões de organização que observamos na natureza. Dentre esses padrões, destacam-se principalmente os típicos padrões de ramificação encontrados em uma ampla variedade de sistemas, abrangendo tanto os sistemas animados quanto os sistemas inanimados (i.e., biológicos e não biológicos), em dimensões que vão desde às grandes circulações planetárias, até às menores escalas. Exemplos desses padrões podem ser observados em sistemas geofísicos, como nas correntes oceânicas, nas descargas elétricas que ocorrem na atmosfera, nas bacias hidrográficas, em cristais dendríticos de gelo, etc. Assim como, também podem ser observados em sistemas biológicos, como nas nervuras de uma folha, nas copas e nas raízes de uma árvore, nos sistemas cardiovascular, respiratório e nervoso dos animais, e em uma grande diversidade de outros sistemas vivos e não vivos que possam ser imaginados (BEJAN 1996, 1997, 2020).

A Teoria Constructal trouxe uma nova perspectiva determinística para a compreensão da evolução dos sistemas naturais. No contexto da Teoria Constructal, as estruturas que vemos na natureza não são resultados do acaso ou da aleatoriedade, mas sim de um fenômeno universal da física. Um exemplo que ajuda a compreender melhor essa ideia é o comportamento dos raios, ou descargas elétricas atmosféricas. É perceptível que um raio se manifesta em uma estrutura ramificada que começa com um formato simples — com apenas um único ramo — que aumenta em complexidade à medida que se propaga — adquirindo diversos outros ramos. A Teoria Constructal explica que isso ocorre porque as descargas elétricas dos raios se movem seguindo um princípio de busca pelos “caminhos mais fáceis”, formando estruturas que facilitam seus escoamentos, ou, nesse caso, suas propagações, de modo a evitar as resistências locais impostas pela atmosfera (BEJAN 1996, 1997, 2020).

Devido ao seu caráter interdisciplinar, a Teoria Constructal tem propiciado aplicações em diversas áreas de conhecimento, abrangendo as ciências naturais, médicas, as diversas engenharias, as ciências sociais, econômicas e

muitas outras. Assim como, também tem se mostrado ser uma ponte com potencial de unir a biologia à física. Na literatura científica, os pesquisadores têm usado a capacidade preditiva da Teoria Constructal para buscar sistemas de engenharia eficientes e, principalmente, para compreender melhor e aprofundar o conhecimento sobre os vários processos de formação das diversas estruturas observadas na natureza (BEJAN 2020; CHEN 2012).

ERRERA e BEJAN (1998) publicaram um estudo pioneiro dentro deste contexto, no qual reproduziram o padrão observado em bacias hidrográficas. O modelo desenvolvido neste estudo consiste em uma área porosa e homogênea dividida em quadrados de mesmo tamanho, que formam uma “grade” de elementos de área. Um pequeno sumidouro é adicionado em uma das extremidades dessa área, criando uma diferença de pressão que causa um escoamento até esse sumidouro. Para construir canais de baixa resistência que direcionam o escoamento, os autores aplicaram um algoritmo que implementa uma heurística de decisão baseada na Teoria Constructal. O “algoritmo heurístico” consiste em selecionar o elemento de área com o maior gradiente de pressão e aumentar sua permeabilidade diminuindo sua resistência ao escoamento. Esse processo de seleção e troca ocorre um determinado número de vezes, formando os canais de baixa resistência, cujas estruturas lembram padrões ramificados semelhantes aos padrões observados em sedimentos. Esse resultado mostrou que os padrões dendríticos formados por canais de baixa resistência em bacias de drenagem fluvial são reproduzíveis, e podem ser deduzidos como base em um princípio de minimização da resistência global imposta aos seus fluxos de água, conforme prevê a Teoria Constructal.

XU et al. (2007) desenvolveram um modelo semelhante ao modelo do estudo mencionado anteriormente. No entanto, neste estudo, o algoritmo heurístico foi utilizado para construir caminhos condutivos — um modelo teórico de um dispositivo que pode ser usado no arrefecimento de pacotes eletrônicos miniaturizados. Assim como no estudo anterior, as estruturas dos caminhos condutivos obtidas pelos pesquisadores também apresentaram um padrão ramificado típico, quando aplicado um princípio de maximização do acesso aos fluxos de calor na heurística de construção.

VIANNA et al. (2018) também publicaram um estudo semelhante em que um algoritmo heurístico foi utilizado para construir cavidades isotérmicas — um modelo teórico que representa a cavidade entre as aletas de dispositivos de arrefecimento. Assim como nos estudos anteriores, as estruturas obtidas para as cavidades isotérmicas apresentaram igualmente padrões de ramificação, que se assemelham a árvores.

Na literatura científica, ainda são encontrados diversos outros estudos que desenvolvem modelos semelhantes aos citados anteriormente. Esses estudos também aplicam diferentes algoritmos heurísticos que se baseiam no conceito de minimização das resistências globais impostas, para maximizar o acesso de fluxos de matéria, energia ou informação de um sistema específico. Em muitos casos, as estruturas resultantes também apresentam configurações ramificadas semelhantes às encontradas na natureza, o que sugere que a nova perspectiva determinística proposta pela Teoria Constructal pode estar correta e reforça a importância de estudar a formação/evolução das estruturas de fluxo presentes em sistemas naturais e de engenharia (CHEN 2012).

Neste estudo, assim como nos estudos anteriores mencionados, também são buscadas estruturas ótimas para sistemas de engenharia e uma melhor compressão dos processos de formação dessas estruturas de um ponto de vista puramente fenomenológico. No entanto, o algoritmo heurístico desenvolvido — que será aplicado ao modelo teórico dos caminhos condutivos — tem como diferencial a consideração do tempo em seu processo de formação das estruturas dos fluxos de calor. O objetivo principal deste estudo é avaliar se existem diferenças entre as estruturas construídas em regime permanente e as estruturas construídas em regime transiente. Em outras palavras, o objetivo é investigar se o ritmo de formação/evolução dos sistemas tem influência, ou não, na configuração das suas estruturas de fluxo. Esse é um aspecto importante previsto pela Teoria Constructal que ainda não foi investigado em nenhum estudo na literatura científica, até o presente trabalho (BEJAN 1996, 1997, 2020).

2 DETALHAMENTO DO MODELO

O modelo dos caminhos condutivos é uma abordagem teórica desenvolvida para solucionar o problema de arrefecimento em pacotes

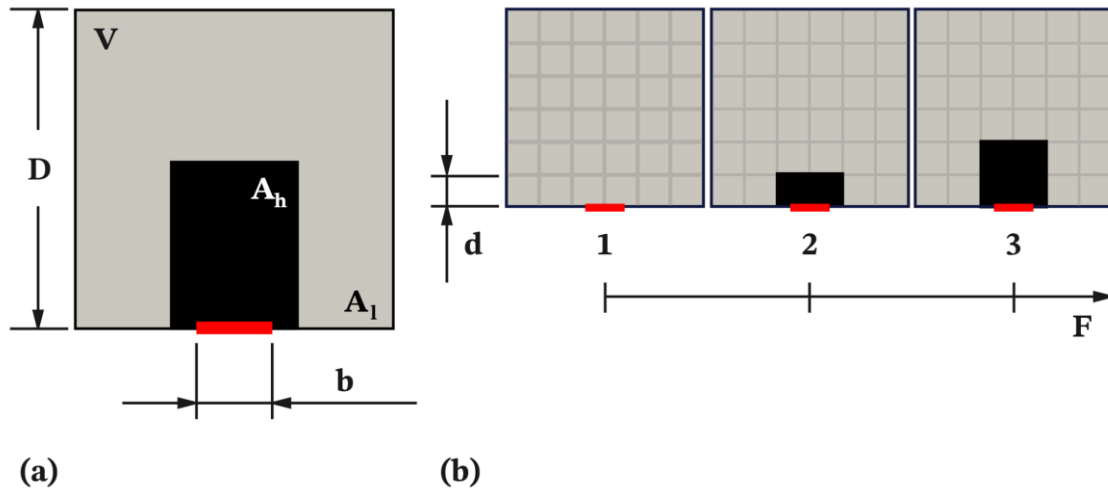
eletrônicos miniaturizados. O aumento expressivo da densidade desses micro dispositivos, tem gerado quantidades cada vez maiores de calor no seu interior, tornando ineficazes os métodos tradicionais de resfriamento baseados somente na convecção forçada. O presente modelo dos caminhos condutivos busca resolver esse problema através de uma técnica que se baseia puramente na condução térmica, com caminhos condutores feitos de materiais de alta condutividade térmica, como diamante ou grafeno, cujo objetivo é direcionar para fora o calor gerado pelos diversos componentes internos dos pacotes eletrônicos miniaturizados para um ponto dissipador (XU et al. 2007).

A escolha da configuração e da quantidade de material condutor usada para construir um caminho de alta condutividade é, sem dúvida, um desafio de otimização. Esse desafio fica ainda mais evidente quando consideramos que a quantidade de material condutor inserido em dispositivos miniaturizados é limitada devido aos seus tamanhos reduzidos e aos altos custos dos materiais. Por esse motivo que, a avaliação das formas dos caminhos condutivos é crucial e é uma área de estudo explorada em Teoria Constructal (XU et al. 2007).

No entanto, o objetivo deste trabalho não se concentra em avaliar todas as diferentes configurações possíveis para caminhos condutivos e suas formas ótimas. Em vez disso, o objetivo é utilizar esse problema, muito explorado na literatura científica, como uma ferramenta para investigar o comportamento evolutivo das estruturas de um sistema de fluxo termodinâmico em regime transiente, considerando o efeito do tempo.

Diante disso, considere o modelo de caminhos condutivos, adaptado ao problema deste estudo, esquematizado na Fig. 1a.

Figura 1 – Descrição do problema: a) domínio computacional e b) esquema de construção dos caminhos condutivos.



Na Figura 1a, o sólido quadrado de volume V , em m^3 , representa o volume de um pacote eletrônico miniaturizado, com largura e altura D , em m . Para simplificar, sua espessura é considerada como $W = 1m$, tornando o modelo bidimensional. A área total A , em m^2 , é dividida em duas áreas isotrópicas, A_l e A_h , que representam os materiais de baixa e alta condutividade térmica (*low* e *high*, respectivamente). O modelo é isolado termicamente, com exceção do dissipador térmico colocado na extremidade do volume que tem dimensão $d = 0,2D$ e uma temperatura isotérmica constante. O problema é descrito pela equação do calor, resolvida para ambos os materiais.

As Eqs. 1 e 2 referem-se, respectivamente, ao material de baixa condutividade térmica e ao material de alta condutividade térmica,

$$\frac{\partial T}{\partial t} = \alpha_l \left(\frac{\partial^2 T}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial y^2} \right) + \frac{Q}{\rho_l c_l (A - A_h) W} \quad (1)$$

e

$$\frac{\partial T}{\partial t} = \alpha_h \left(\frac{\partial^2 T}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial y^2} \right) \quad (2)$$

onde as variáveis α , ρ e c representam as propriedades termofísicas dos materiais, que correspondem, respectivamente, à difusividade térmica, à massa específica e ao calor específico, em unidades de m^2/s , kg/m^3 e J/kgK , para cada

material. É importante observar que as variáveis com índice l se referem ao material de baixa condutividade térmica, enquanto as variáveis com índice h são associadas ao material de alta condutividade térmica, assim como A_l e A_h . Além disso, nessas equações, a variável $T = T(x, y, t)$ representa a temperatura, em K , a variável t o tempo, em s , e as variáveis x e y , apresentam as Coordenadas Cartesianas, em m . A geração de calor interna do pacote eletrônico é representado por Q , em W , e é considerada apenas na região do material de baixa condutividade térmica, como normalmente reportado na literatura.

Ademais, é comum na literatura científica os pesquisadores abordarem problemas desse tipo por meio de modelos adimensionais. Diante disso, neste estudo, também será adotada uma adimensionalização para o modelo, utilizando as Eqs. 3 e 4, que correspondem às duas equações anteriores, Eqs. 1 e 2, respectivamente,

$$\frac{\partial \mathcal{T}}{\partial F} = \left(\frac{\partial^2 \mathcal{T}}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 \mathcal{T}}{\partial y^2} \right) \quad (3)$$

e

$$\frac{\partial \mathcal{T}}{\partial F} = \eta \left(\frac{\partial^2 \mathcal{T}}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 \mathcal{T}}{\partial y^2} \right) + \frac{1}{1 - \phi}. \quad (4)$$

As Eqs. 1 e 2 resultaram nas Eqs. 3 e 4 após a utilização de algumas variáveis adimensionais: $\mathcal{T} = k_l W (T - T_0) / Q$ para a temperatura, onde T_0 representa a temperatura inicial e mínima do volume; $F = \alpha_l t / A$ para o tempo (Número de Fourier); e, $(x, y) = (x, y) / \sqrt{A}$ para as Coordenadas Cartesianas. Além disso, as variáveis $\phi = A_h / A$ e $\eta = \alpha_l / \alpha_h$ representam as razões entre as áreas e as difusividades térmicas dos materiais, respectivamente. Em outras palavras, ϕ é a proporção de material condutor contida no volume e η relação de proporção entre as difusividades dos dois materiais.

É necessário também definir as condições iniciais e de contorno para o modelo. A condição inicial é a temperatura mínima em todo o domínio computacional ($\mathcal{T}_0 = 0$ para $F = 0$, i.e. tempo adimensional zero). Em relação às condições de contorno, há duas: a condição de Dirichlet para o dissipador (destacado em cor vermelha nas Figs. 1a e 1b), que mantém temperatura

constante igual à temperatura inicial ($T_d = 0$); e a condição de Neumann para todo o sólido mostrado na Fig. 1a, que é sempre adiabático. É importante ressaltar que o modelo é simétrico, o que significa que a construção dos caminhos condutivos será a mesma em ambos os lados.

O domínio é dividido em vários elementos de área que representam os materiais de baixa e alta condutividade térmica, como mostrado no exemplo de construção da Fig. 1b. A resolução é definida pelo número de divisões $R \times R$ do domínio. Inicialmente, todos os elementos são de baixa condutividade térmica e, a cada incremento de tempo $\Delta F'$, um elemento de baixa condutividade é substituído por um de alta condutividade para construir o caminho condutivo em ambos os lados da simetria, conforme mostra a Fig. 1b. O incremento $\Delta F'$ é um múltiplo do passo de tempo de ΔF . A relação entre as áreas é variável e é considerada importante para o cálculo do termo de geração de calor. Neste trabalho, o valor da razão entre as áreas é $\phi = 0,1$ (valor máximo), que é um valor comumente utilizado em outros estudos relacionados sobre caminhos condutivos.

O critério de troca dos materiais de alta e baixa condutividade é baseado no trabalho dos pesquisadores SOUZA e ORDONEZ (2013), e consiste em escolher um dos elementos vizinhos que estão na direção ortogonal aos elementos já inseridos. O elemento escolhido é sempre aquele com o maior gradiente de temperatura em x ou em y (i.e., o maior $\partial T / \partial x$ ou o maior $\partial T / \partial y$). A Fig. 1b mostra através de um exemplo de construção com a adição desses elementos (1, 2 e 3). Um detalhe é que quando não há nenhum elemento de alta condutividade, o primeiro elemento é sempre colocado adjacente ao dissipador. O algoritmo heurístico é executado sequencialmente até que o valor máximo de ϕ seja alcançado, ou seja, até que todos os elementos sejam adicionados e a estrutura do caminho condutor esteja totalmente construída.

O modelo deste estudo é muito semelhante aos modelos desenvolvidos pelos pesquisadores LEDEZMA et al. (1997), SOUZA e ORDONEZ (2013), e também pelos pesquisadores XU et al. (2007), HAJMOHAMMADI e REZAEI (2019) e diversos outros. No entanto, a principal diferença deste estudo reside na inclusão do tempo, representado pelo Número de Fourier. Essa adição permite considerar a variação temporal (ritmo), proporcionando uma

compreensão mais abrangente da formação/evolução da estrutura do sistema termodinâmico definido por um caminho condutivo.

3 MODELO NUMÉRICO

A solução do modelo físico-matemático foi realizada com a ajuda do *framework* para CFD (do inglês, *Computational Fluid Dynamics*) OpenFOAM⁴, na versão 7, através de um solucionador programado em C++. No solucionador há a implementação do algoritmo, sendo resolvido o problema matemático via a aplicação do método dos volumes finitos, implementado nas várias rotinas da biblioteca do OpenFOAM.

No entanto, para isso foi necessário construir a geometria do modelo, realizar sua discretização em volumes finitos e exportar a malha computacional considerada no momento da solução, o que foi feito com o auxílio do *software* Gmsh⁵, na versão 4.

Como a resolução define o tamanho da malha computacional, que é dividida em $R \times R$ elementos de área para formar os caminhos condutivos, a discretização é feita em função da resolução. Por exemplo, se a resolução for $R = 10$, a malha terá 10×10 elementos de área. Considerando que cada elemento de área tenha 16×16 volumes finitos, então, multiplicando, a malha computacional terá um total de 25600 volumes finitos.

A validação do modelo numérico foi realizada por meio da reprodução do estudo dos pesquisadores HORBACH CS et al. (2014). As diferenças percentuais obtidas para as temperaturas adimensionais máximas e médias foram inferiores a 0,1%, o que indica uma concordância bastante próxima dos resultados. Essa diferença entre os valores é aceitável, e confirma a validação do modelo desenvolvido neste estudo.

⁴The OpenFOAM Foundation, <https://openfoam.org>.

⁵Gmsh – A three-dimensional finite element mesh generator with built-in pre- and post-processing facilities, <https://gmsh.info>.

Acessos em 2023.

4 RESULTADOS DE DISCUSSÕES

Neste estudo, foi investigada a formação/evolução das estruturas de fluxo em sistemas naturais no contexto da Teoria Constructal, focando no regime transiente. Foi utilizado o projeto de caminhos condutivos para compreender como essas estruturas se desenvolvem ao longo do tempo. As análises feitas envolveram a identificação de padrões e de outras características relevantes que ajudam a compreender esses processos fenomenológicos.

Antes de apresentar os resultados, é importante ressaltar que foram feitas algumas simplificações para favorecer as análises deste estudo.

Primeiramente, dado que o foco é avaliar a formação/evolução dos caminhos condutivos em regime transiente, optou-se por não considerar as diversas variações e combinações possíveis para as relações entre as áreas e as difusividades. Essa decisão foi tomada devido à necessidade de se realizar um grande número de simulações numéricas para fazer tais avaliações, o que fugiria muito ao escopo deste estudo. Portanto, em vez disso, foram escolhidos valores pré-definidos para essas variáveis, sendo $\phi = 0,1$ e $\eta = 10$. Tais valores são amplamente empregados por pesquisadores em diversos estudos sobre otimização caminhos condutivos (SOUZA e ORDONEZ 2013).

Além disso, foi necessário definir a resolução utilizada para a largura e altura da área do modelo físico-matemático. Como este estudo é uma análise preliminar, foi escolhido um único valor de resolução $R = 40$, ou seja, 40×40 elementos de área. Cada elemento de área foi dividido em 8×8 volumes finitos, o que resultou em uma malha computacional com um total de 102.400 volumes finitos. Essas escolhas foram fundamentais para viabilizar a análise proposta e desenvolvida no presente trabalho.

Também foi necessário definir os valores a serem utilizados para o intervalo de tempo de construção $\Delta F'$. Neste estudo, optou-se por escolher valores que fossem múltiplos do intervalo de tempo de integração ΔF (passo de tempo), sendo incrementados de dez em dez unidades. Foram realizados vários testes para determinar o valor adequado para o passo de tempo ΔF , que foi escolhido como $\Delta F = 0,00001$. Este valor é independente do modelo computacional, ou seja, não influencia nos resultados e independe do tamanho dos volumes finitos.

É importante ressaltar que, devido à natureza da modelagem numérica, não é possível avaliar o modelo em um intervalo de tempo infinito ($\Delta F' \rightarrow \infty$). Na prática, para obter os resultados em regime permanente e fazer as comparações com o regime transiente, foi realizada a avaliação até um valor máximo para o intervalo de construção, cujo resultado é equivalente ao regime permanente. Após analisar os resultados de várias simulações, foi determinado que o valor de $\Delta F'$ que produz um resultado igual ao resultado do modelo em regime permanente é $\Delta F' = 0,1$, para $\phi = 0,1$ e $\eta = 10$.

Definidas todas as considerações necessárias, na Tab. 1 são apresentados os resultados das temperaturas máximas e médias ($T_{máx}$ e $T_{méd}$) em função dos intervalos de formação ($\Delta F'$) dos caminhos condutivos. Além disso, são mostrados nas Figs. 2 e 3, gráficos que relacionam os resultados presentes na Tab. 1, e também as diferentes estruturas que foram construídas durante as simulações numéricas, respectivamente.

Em relação aos intervalos de $\Delta F'$ mostrados na Tab. 1, estes são os intervalos em que há mudanças na configuração das estruturas dos caminhos condutivos. O primeiro valor, que é sempre $\Delta F' = \Delta F$, concebe uma estrutura, e está se mantém inalterada até o valor subsequente 0,00010, que se mantém até o próximo valor 0,00020, e assim sucessivamente. O último valor mostrado é o valor em que a estrutura não muda mais, ou seja, é a estrutura formada na condição de regime permanente.

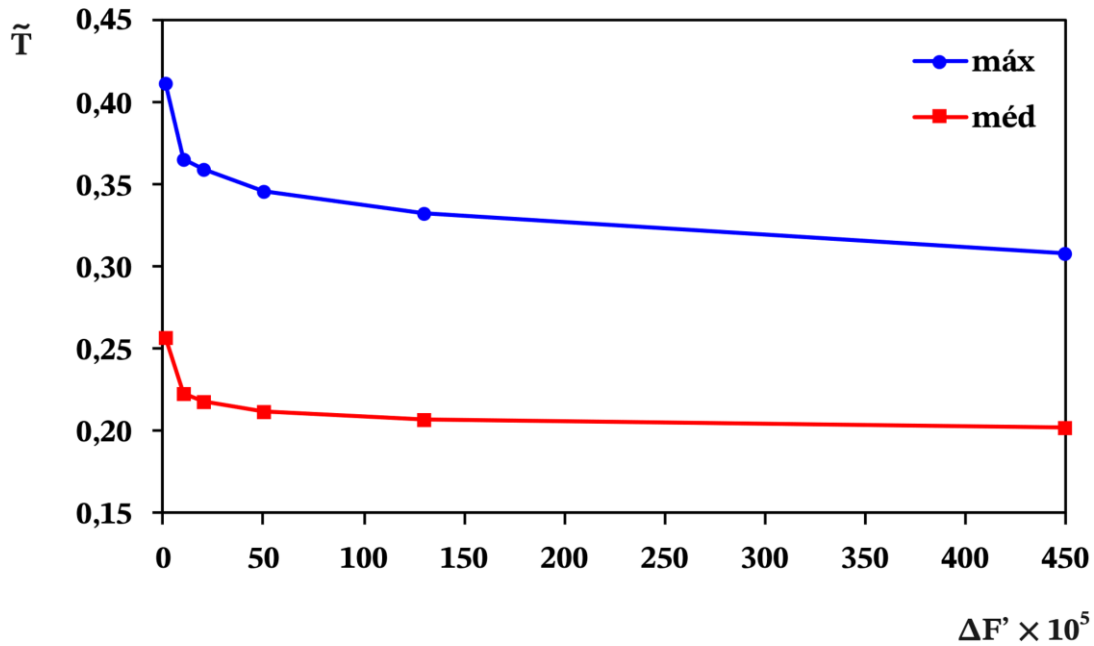
Tabela 1. Resultados das temperaturas máximas e médias ($T_{máx}$ e $T_{méd}$) em função dos intervalos de formação ($\Delta F'$) dos caminhos condutivos construídos.

$\Delta F'$	$T_{máx}$	$T_{méd}$
0,00001	0,41186	0,25734
0,00010	0,36550	0,22225
0,00020	0,35962	0,21848
0,00050	0,34625	0,21148
0,00130	0,33183	0,20665
0,00450	0,30765	0,20259

Através da compilação dos resultados mostrada na Fig. 3, nota-se como as estruturas se modificam no tempo. Nesta figura, são mostradas as estruturas

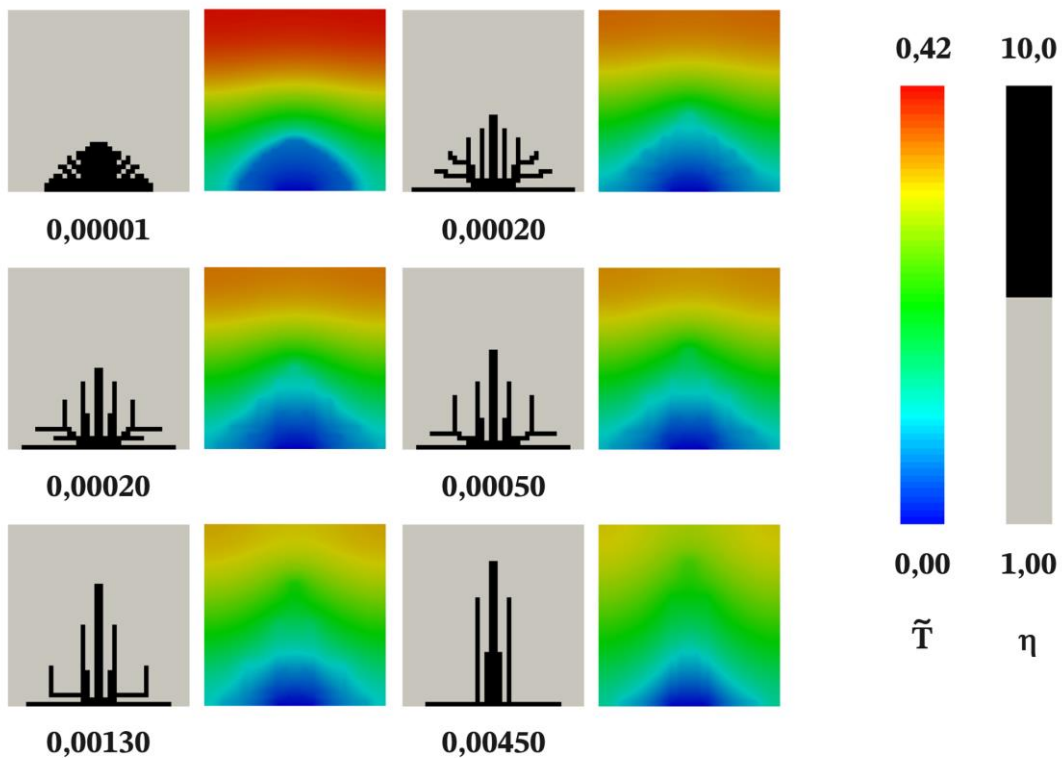
construídas e os campos de temperatura, da esquerda para a direita, sempre que há uma mudança ou variação em sua configuração. Neste caso, podemos perceber que há seis variações de forma até o $\Delta F'$ alcance o regime permanente, sendo a sexta forma associada ao regime permanente.

Figura 2. Gráfico das temperaturas máximas e médias ($\bar{T}_{máx}$ e $\bar{T}_{méd}$) em função dos intervalos de formação ($\Delta F'$) dos caminhos condutivos.



A análise da Fig. 3 mostra que o passo de tempo de construção influencia diretamente a formação das estruturas dos caminhos condutivos, bem como nas temperaturas finais alcançadas. À medida que o valor de $\Delta F'$ aumentava, as estruturas tendiam a se ramificar menos e se aproximar mais das estruturas observadas em regime permanente. Observa-se que estruturas formadas com passos de construção maiores ocuparam uma área maior no sentido vertical, assumindo uma forma semelhante a um “I”, tendo uma maior eficiência em termos de temperaturas máximas e médias, conforme pode ser constatado no gráfico da Fig. 2. No entanto, por outro lado, passos de construção menores conduzem a estruturas com mais imperfeições e mais ramificadas, com pouca eficiência térmica, que se espalharam melhor pelo volume.

Figura 3. Estruturas construídas para os caminhos condutivos.



Em resumo, os resultados sugerem que os intervalos de construção ($\Delta F'$) influenciam significativamente as características e a eficiência dos caminhos condutivos formados. Passo de construção maiores resultam em estruturas mais eficientes em termos de temperaturas máximas e médias, enquanto passos de construção menores resultam em estruturas mais distribuídas e também mais ramificadas, que se assemelham mais ao que observamos na natureza.

5 CONCLUSÕES

Em conclusão, as simulações realizadas mostraram que o regime transiente influencia diretamente na evolução das estruturas dos caminhos condutivos, e conseqüentemente nos resultados das suas temperaturas máximas e médias.

Do ponto de vista do fenômeno evolutivo, percebe-se que a ramificação se intensifica quando temos uma maior velocidade de formação das estruturas (i.e., quanto temos um $\Delta F'$ menor). É possível que o motivo disso ocorrer, esteja relacionado à velocidade de mudança do sistema físico. Em outras palavras, quanto mais rápido o sistema muda no tempo, mais suas estruturas se ramificam

para se tornarem eficientes e aumentarem o acesso dos seus fluxos. Por outro lado, em uma situação em que os sistemas estão em regime permanente, ou com um passo de construção muito perto do regime permanente, as estruturas tendem a se ramificar de uma maneira menos evidente, e conseqüentemente, também tendem a apresentar menos imperfeições locais.

Em relação à otimização, estruturas construídas em regime permanente são melhores que construídas em regime transiente. Neste caso, é possível que isso esteja relacionado com as imperfeições locais das estruturas ou também com o seu espalhamento no volume.

A conclusão e recomendação principal deste trabalho é que, quando um estudo qualquer busca compreender melhor o fenômeno de formação de uma estrutura de fluxo, o regime transiente deve ser sempre considerado no modelo, e também no algoritmo heurístico de construção. O regime transiente tende a conceber estruturas ramificadas similares às estruturas que comumente são observadas na natureza. No entanto, do ponto de vista da engenharia e da otimização, é importante fazer a ressalva se é realmente viável criar sistemas artificiais que imitam a natureza em sua totalidade, levando em consideração até mesmo suas imperfeições. Em sistemas de engenharia, como recomendação, talvez seja mais interessante encontrar o ponto de equilíbrio onde existe otimização do sistema, mas com uma configuração para sua estrutura que se mantenha simples e fácil de ser construída/empregada em um sistema real, tendo um baixo custo de produção.

AGRADECIMENTOS

O presente trabalho foi realizado com o apoio da CAPES (Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior), Código de Financiamento 001; e do CNPq (Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico), Processo: 305994/2022-0.

NOMENCLATURA

- A Área
- b Tamanho do dissipador, m
- c Calor específico, J/kgK

D	Tamanho do sólido, largura e altura, m^2
F	Tempo adimensional, Número de Fourier
ΔF	Intervalo de tempo
$\Delta F'$	Intervalo de tempo de construção
Q	Geração de calor interna, W
R	Número de divisões do sólido em elementos de área, resolução
t	Tempo, s
U	Temperatura, K
V	Volume do sólido, m^3
W	Espessura do sólido, m
x	Coordenada Cartesiana no eixo das abscissas, m
y	Coordenada Cartesiana no eixo das ordenadas, m

Símbolos Gregos

α	Difusividade térmica, m^2/s
η	Relação entre as difusividades
ρ	Massa específica, kg/m^3
ϕ	Relação entre as áreas

Índices

\sim	Valor adimensional
$máx$	Valor máximo
$méd$	Valor médio
l	Baixa condutividade — <i>low</i>
h	Alta condutividade — <i>high</i>

REFERÊNCIAS

BEJAN A, 1996. Street network theory of organization in nature. Journal of Advanced Transportation 30, 85–107.

<https://doi.org/10.1002/atr.5670300207>

BEJAN A, 1997. Constructal-theory network of conducting paths for cooling a heat generating volume. *International Journal of Heat and Mass Transfer* 40, 799–816.

[https://doi.org/10.1016/0017-9310\(96\)00175-5](https://doi.org/10.1016/0017-9310(96)00175-5)

BEJAN A, 2020. *Freedom and evolution: hierarchy in nature, society and science*, 1st ed. Springer Nature.

CHEN L, 2012. Progress in study on constructal theory and its applications. *Science China Technological Sciences* 55, 802–820.

<https://doi.org/10.1007/s11431-011-4701-9>

ERRERA MR, BEJAN A., 1998. Deterministic Tree Networks for River Drainage Basins. *Fractals* 06, 245–261.

<https://doi.org/10.1142/S0218348X98000298>

LEDEZMA GA et al., 1997. Constructal tree networks for heat transfer. *Journal of Applied Physics* 82, 89–100.

<https://doi.org/10.1063/1.365853>

SOUZA JA, ORDONEZ JC. Constructal design of high-conductivity inserts. *Constructal Law and the Unifying Principle of Design*, 91–111.

https://doi.org/10.1007/978-1-4614-5049-8_6

VIANNA JCB et al., 2018. A new Constructal Theory based algorithm applied to thermal problems. *International Journal of Thermal Sciences* 126, 118–124.

<https://doi.org/10.1016/j.ijthermalsci.2017.12.023>

HAJMOHAMMADI MR, REZAEI E, 2019. Proposing a new algorithm for the optimization of conduction pathways based on a recursive localization. *Applied Thermal Engineering* 151, 146–153.

<https://doi.org/10.1016/j.applthermaleng.2019.01.109>

HORBACH CS et al., 2014. Constructal Design of Y-Shaped Conductive Pathways for Cooling a Heat-Generating Body. *Defect and Diffusion Forum* 348, 245–260.

<https://doi.org/10.4028/www.scientific.net/DDF.348.245>

XU X et al., 2007. Optimization of heat conduction using combinatorial optimization algorithms. *International Journal of Heat and Mass Transfer* 50, 1675–1682.

<https://doi.org/10.1016/j.ijheatmasstransfer.2006.10.037>