



ESCOLA POLITÉCNICA DA UNIVERSIDADE DE SÃO PAULO  
PME3330 - TRANSFERÊNCIA DE CALOR E MASSA  
PROJETO I - AVALIAÇÃO DE PROCESSO DE COLAGEM POR  
LASER

**Grupo 7**

Marcos Pires Matubara 13749420

Fabiano Meneguzzi de Souza Ramos 13680139

Gabriel Barral Fonseca Civali 13680702

Marco Lipszyc Kuzniec 13682295

Michel Brik 12552176

São Paulo

2024

## Sumário

Sumário . . . . .	2
1      Introdução . . . . .	3
2      Hipóteses e Premissas . . . . .	4
3      Desenvolvimento e soluções . . . . .	5
4      Análise dos resultados . . . . .	6
5      Ajustes nos parâmetros . . . . .	7
6      Conclusões . . . . .	9
A      Apêndice . . . . .	10

## 1 Introdução

O processo de colagem de uma película sobre uma placa de metal é uma operação de grande importância em diversos setores industriais, como na fabricação de dispositivos eletrônicos, componentes automotivos e outros produtos de alta precisão. Nesse tipo de processo, a aplicação controlada de calor é essencial para garantir a aderência adequada entre a película e o substrato metálico. O fornecimento de calor pode ser realizado de diferentes maneiras, e, no presente estudo, será utilizado um feixe de laser, com um fluxo de calor constante em um intervalo dado. Deseja-se, no presente trabalho, analisar o comportamento da distribuição de temperaturas ao longo do comprimento da faixa de metal durante o intervalo de incidência do feixe de laser, verificar se essa grandeza está devidamente controlada na faixa estipulada entre 90 e 200 graus celsius, em todos os pontos e em todos os instantes. Por fim, caso não estiver dentro desse intervalo, buscar soluções para que isso seja corrigido. Consta na imagem 1 o modelo utilizado para a solução analítica e numérica do problema.

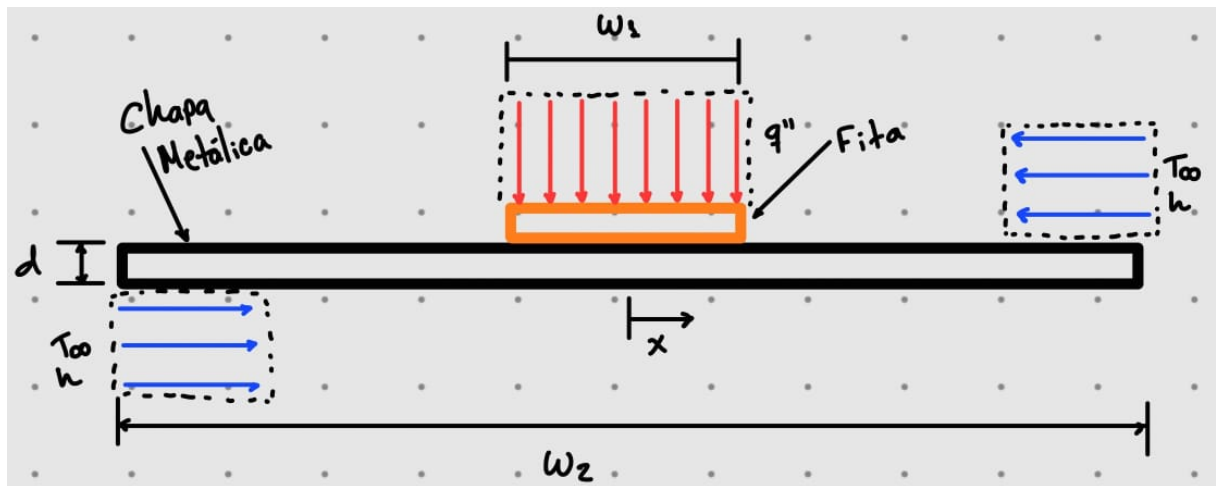


Figura 1 – Modelo utilizado para a solução

## 2 Hipóteses e Premissas

Para o modelo em questão, existem algumas hipóteses e premissas a serem consideradas que definem os limites do modelo. São consideradas 4 hipóteses:

- Largura ortogonal ao plano é de 1 metro;
- O modelo é perfeitamente simétrico em relação ao eixo central (portanto, a solução é também);
- Critério de Dirichlet: temperatura nas pontas da placa é  $T_\infty$ ;
- Variação vertical de temperatura é desprezível, tornando o problema unidimensional;

Além dessas hipóteses, utilizaremos dos seguintes valores para a solução numérica:

- Parâmetros para o grupo 15B:
  - $T_\infty = 25^\circ\text{C}$ , temperatura ao longe;
  - $h = 100\text{W}/\text{m}^2\text{K}$ , coeficiente de transferência de calor convectivo;
  - $q'' = 8 \times 10^4\text{W}/\text{m}^2$ , fluxo de calor injetado;
- Parâmetros gerais:
  - $t_h = 10\text{s}$ , duração do aquecimento;
  - $w_1 = 44\text{mm}$ , comprimento da fita;
  - $w_2 = 132\text{mm}$ , comprimento da placa;
  - $d = 1.25\text{mm}$ , espessura da placa;
  - $k = 60\text{W}/\text{mK}$ , condutividade da fita;
  - $\rho = 7850\text{kg}/\text{m}^3$ , densidade da fita;
  - $C_p = 435\text{J}/\text{kgK}$ , calor específico da fita;

### 3 Desenvolvimento e soluções

Tendo o desenvolvimento e a análise do problema já previamente apresentados pelo Prof. Ernani, apenas nos restou implementar uma solução numérica e realizar a análise dos resultados. Assim como o material sugere, foi realizada uma integração a elementos finitos em *Python*. Para isso, foram utilizados alguns parâmetros auxiliares:

- $L = \frac{w_2}{2}$ , metade do comprimento da placa;
- $Bi = \frac{hL^2}{kd}$ , número de Biot;
- $\alpha = \frac{k}{\rho C_p}$ , difusividade térmica da placa;
- $p = \frac{w_2}{w_1}$ , comprimento relativo entre a placa e a fita
- $q_0 = q'' \frac{L^2}{kdT_\infty}$ , calor introduzido nos primeiros instantes.

Para a implementação, foi utilizado um passo de integração de 0.01, para ambos o tempo e distância, e a integração foi realizada do meio da placa até a ponta, e do instante inicial até 40 segundos após.

Mais detalhes da solução constam no próprio código que se encontra no repositório do *GitHub* citado no apêndice desse documento. Nesse repositório, o arquivo principal das simulações é chamado *plot.py*.

Utilizando esse passo de integração não demora para a simulação completar, maiores passos requerem um tempo exponencialmente maior (a máxima resolução obtida foi com uma resolução de 10 mil, e levou cerca de 5 minutos enquanto o caso de 100 passos é computado instantaneamente). Das simulações, tiramos os resultados apresentados nas figuras 2a e 2b.

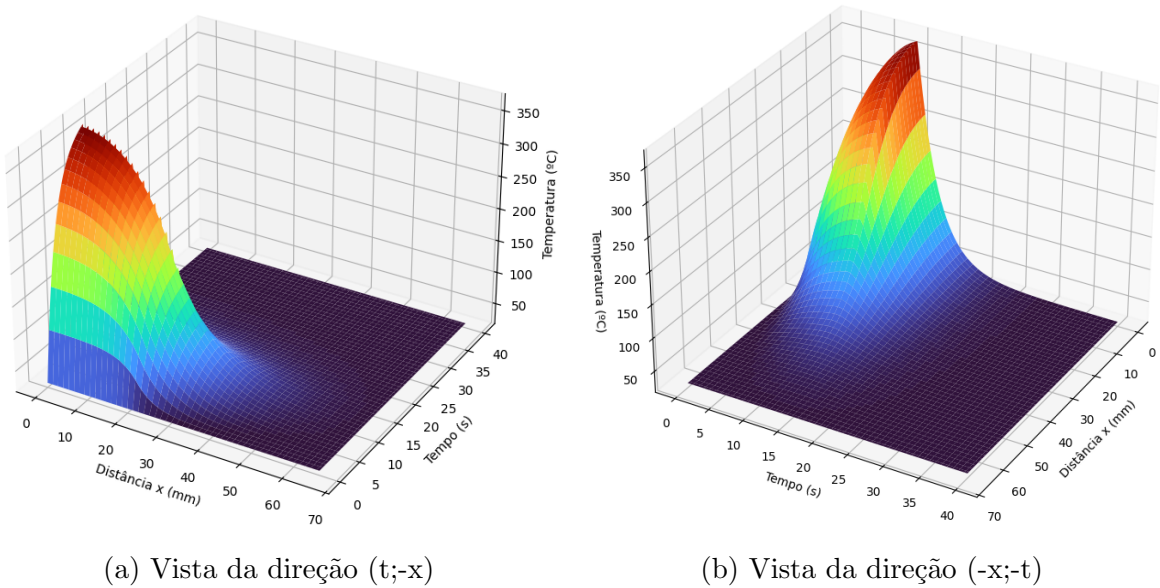


Figura 2 – Resultados da simulação

## 4 Análise dos resultados

As soluções foram como o esperado: a temperatura próxima de  $x = 0$  rapidamente sobe com o tempo, e após o final do período de aquecimento, rapidamente decai!

Além disso, é importante notar que a condição de Dirichlet se confirma, mostrando que a simulação converge da maneira que imaginávamos.

Apesar do resultados condizendo com o esperado, como pode-se ver na superfície computada, a temperatura de pico passou não só de 200°C, mas chega até cerca de 350°C! Ou seja, será necessário realizar algumas mudanças para que o sistema do modelo opere dentro dos limites propostos.

## 5 Ajustes nos parâmetros

Assim como na maioria dos problemas de transferência de calor, uma pequena alteração nos parâmetros e/ou condições de contorno podem afetar drasticamente os resultados, e é isso que é necessário ser feito para aderir aos limites impostos pelo enunciado. Começaremos reduzindo  $T_\infty$  para  $5^\circ\text{C}$ :

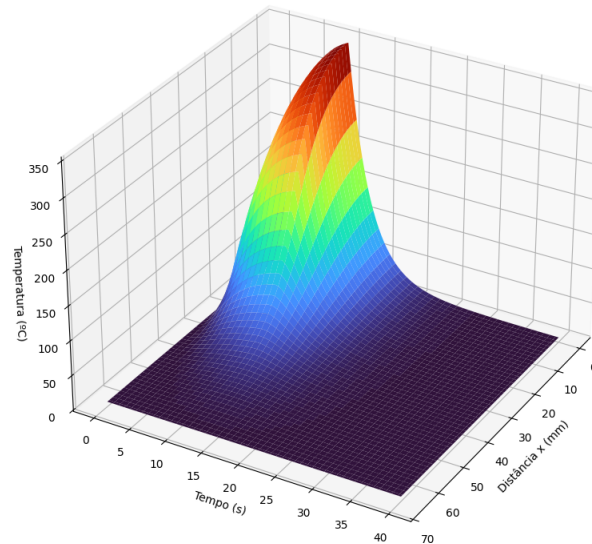


Figura 3 – Solução utilizando  $T_\infty = 5^\circ\text{C}$

Pode-se ver que pouco muda, o que faz sentido, levando em conta que o aquecimento da porção central domina facilmente o resfriamento convectivo da placa (esse que depende da temperatura externa). Então, vamos tentar alterar isso na próxima tentativa, elevando  $k$  de  $60\text{W/mK}$  para  $120\text{W/mK}$ :

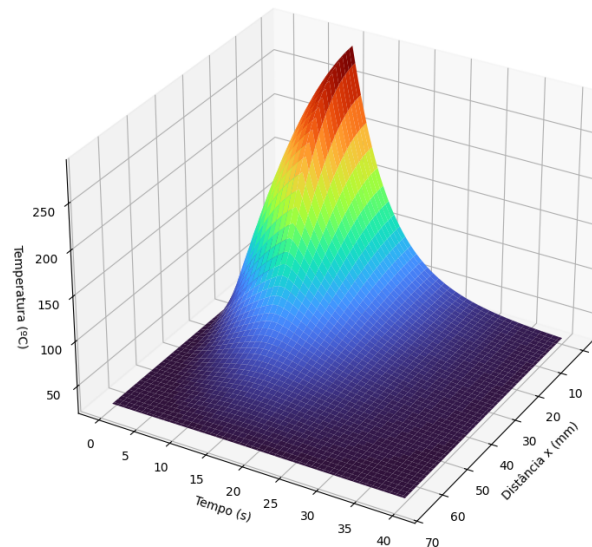


Figura 4 – Solução utilizando  $k = 120\text{W/mK}$

Agora ficou melhor, cerca de  $275^{\circ}\text{C}$  no pico, mas ainda são necessários ajustes. Tentaremos modificar o  $h$ , este sendo o mais facilmente manipulado tendo as ferramentas adequadas (aumentar a velocidade do fluxo de ar em volta da placa facilmente altera  $h$ ). Para não correr risco de supor um número absurdo, vamos elevar  $h$  de  $100\text{W}/\text{m}^2\text{K}$  para  $170\text{W}/\text{m}^2\text{K}$ :

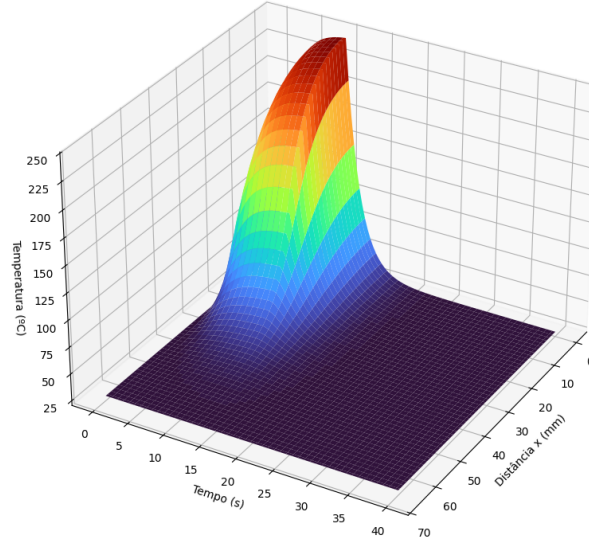


Figura 5 – Solução utilizando  $h = 170\text{W}/\text{m}^2\text{K}$

Até agora, essa foi a melhor tentativa, um ajuste não exagerado que reduziu a temperatura de pico em  $125^{\circ}\text{C}$ ! Vamos, então, combinar todos os últimos ajustes, considerando um  $T_{\infty}$  de  $15^{\circ}\text{C}$ , que para manter os números próximos da realidade:

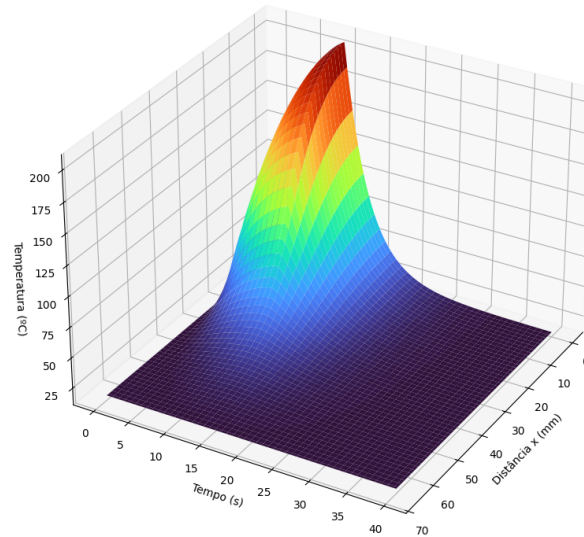


Figura 6 – Solução utilizando  $T_{\infty} = 15^{\circ}\text{C}$ ,  $k = 120\text{W}/\text{mK}$  e  $170\text{W}/\text{m}^2\text{K}$



## 6 Conclusões

A solução gerada pela simulação se provou apta à análise primária do modelo, e intuitivamente aparenta representar de forma realística o modelo, e também foi muito interessante notar como as premissas afetam os resultados em alguns aspectos mas não tanto em outros. Por exemplo, apesar da temperatura de pico ter sido ajustada segundo os parâmetros alterados, o tempo que a placa leva para atingir a marca dos 90°C não apresentou mudança significativa, aproximadamente 1.5s para ambos os casos!

Vale ressaltar que, apesar de possível segundo nosso modelo, não foi utilizado como parâmetro de ajuste o tempo de aquecimento para levar em conta possíveis motivos operacionais deste modelo, e também à fim de demonstrar a alta volatilidade dos resultados perante pequenas mudanças em parâmetros de fácil ajuste.

## A Apêndice

Link do repositório no *GitHub*: [https://github.com/uJFalkez/projeto\\_transcal](https://github.com/uJFalkez/projeto_transcal).  
Neste link, encontram-se:

- Licença MIT para o *software* escrito pelos alunos;
- Código principal do projeto, nomeado *plot.py*;
- Pasta com as imagens geradas pelo código em diferentes premissas;
- Solução analítica desenvolvida pelo Prof. Dr. Ernani V. Volpe; usada como referência;
- O arquivo *.pdf* desse mesmo documento, para *download*;
- Diversos itens de repositório; ignorar.