

Propagação de Calor

Caio Augusto - [Projeto Olímpicos](#)

1. Introdução

Salve, nesse folheto eu vou falar um pouco sobre a definição de calor, trabalho e suas distinções, depois eu vou falar sobre as formas de propagação de calor e seguirei daí. Uma coisa que eu preciso destacar é que: eu posso até entender bem algumas coisas sobre esses assuntos, mas de maneira alguma eu sou a pessoa mais qualificada pra explicar todo o conceito de trabalho, calor entre outros: esse conteúdo é tão vasto e tem tantos adendos que precisam ser feitos, com tantas definições únicas, que é impossível um mero estudante explicar tudo de maneira efetiva a todos entenderem. O único jeito de aprender tudo é através de incansáveis horas de leitura de diversos livros, fazendo uma grande quantidade de exercícios e tendo um repertório muito grande de problemas de modo que seu cérebro consegue efetivamente saber distinguir as coisas. No entanto, você de maneira alguma precisa fazer 50 livros de termo pra fazer a OBF, OBC ou OPF, porque você não precisa saber toda a física que rege o universo pra resolver exercícios de condução de calor. Então eu vou dar uma explicação que eu considero fazer sentido mas ao mesmo tempo simplificada, então se você estiver estudando pra seletiva e se deparar com conceitos mais avançados, não fique preocupado dos conteúdos serem discrepantes do que eu apresento aqui: estou apenas dando uma explicação simplificada o suficiente para não estar fisicamente errada, fazer sentido mas não ser geral em todo o contexto físico. Até onde eu imagino, o que eu apresentar aqui é mais do que o suficiente pra questões em contextos padrões de vestibulares e OBF, pois muitas vezes é um quesito de reconhecer o que está acontecendo e o que é preciso fazer na questão e quais formulas precisam ser aplicadas. (Se tem algo que ficou mal explicado nesse folheto ou você acha que tem um assunto que eu não tratei que você acha razoável eu explicar, sinta-se livre pra me mandar mensagem no discord falando sobre isso)

Sem mais papo coach, vamos ao assunto do folheto.

2. Trabalho e calor

A energia de um corpo pode sempre mudar quando posto a determinadas transformações: a temperatura de um gás pode aumentar ou diminuir (aumentando sua energia térmica), um objeto pode adquirir uma velocidade (aumentando sua energia cinética), pode ser levado a uma altura maior (aumentando sua energia potencial gravitacional), um capacitor pode ser carregado (aumentando sua energia elétrica), entre trilhadas de outros métodos. Mas a dúvida fica então, como essa energia chega ao objeto? Como energia é transmitida de algum lugar para outro?

Os estudos do século 19 mostraram que na maioria dos casos (eu não vou afirmar que isso ta



sempre certo porque se não pode chegar um físico quântico ultra pika e falar que eu to errado e não sei nada) há duas formas que energia pode ser passada a um sistema: Por Trabalho ou por propagação de calor.

Trabalho é uma forma mais conhecida de dar energia: Quando você exerce uma força pra levantar uma caixa, você exerce um trabalho na caixa que aumenta sua energia potencial; quando você da um chute numa bola de futebol e ela sai com uma velocidade muito grande, você exerceu um trabalho na bola pra lhe dar uma energia cinética. Quase sempre quando tem trabalho envolvido, tem alguma forma de força generalizada e um deslocamento generalizado envolvidos, isso é, se uma força generalizada constante \vec{F} é exercida em um objeto e este sofre um deslocamento generalizado $\Delta\vec{x}$, o trabalho que foi exercido nesse objeto é dado por:

$$W = \vec{F} \cdot \Delta\vec{x}$$

Transferência de energia por calor é comum quando eu tenho um corpo aquecendo ou resfriando outro pelo contato entre eles: Quando eu coloco um cubo de gelo em uma banheira quente, o mesmo recebe calor pra derreter. Ao colocar água em uma chaleira ligada a um fogão, a mesma recebe calor do fogo e aumenta sua energia térmica. Embora não seja uma regra geral, um jeito que eu uso pra identificar propagação por calor é: eu sempre tenho em mente que se a energia esta chegando ao sistema devido a uma diferença de temperatura e não por causa de uma força, temos troca de energia por forma de calor.

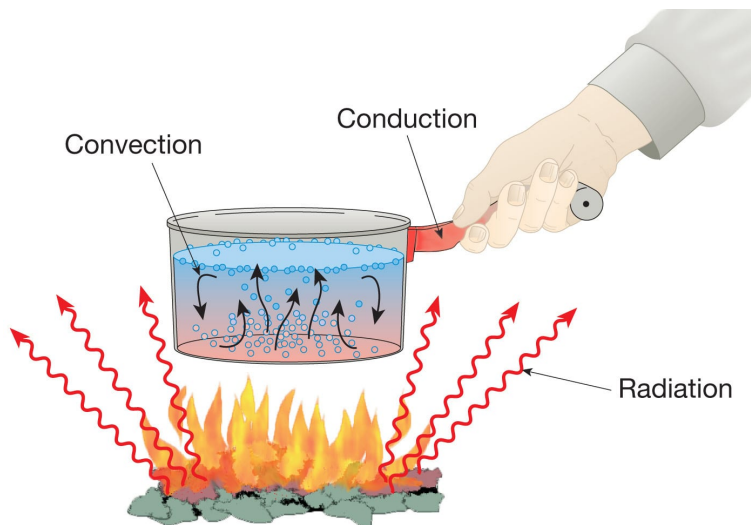
Nesse folheto, nosso foco é em como calor é propagado de um corpo para outro devido a essa diferença de temperatura.

3. Propagação de calor

Sabemos que um corpo pode ter sua energia interna aumentada ao receber energia por meio de calor, mas como isso ocorre exatamente? Quais são os métodos ao qual energia é transmitida de um corpo pra outro? É isso que vamos discutir aqui, os métodos no qual há propagação de calor. E é importante saber essas distinções entre cada um porque as leis que regem cada propagação são beem diferentes um dos outros, e pra prever a configuração final que um sistema vai ter é importante saber quais métodos de propagação de calor estão envolvidos com o mesmo.

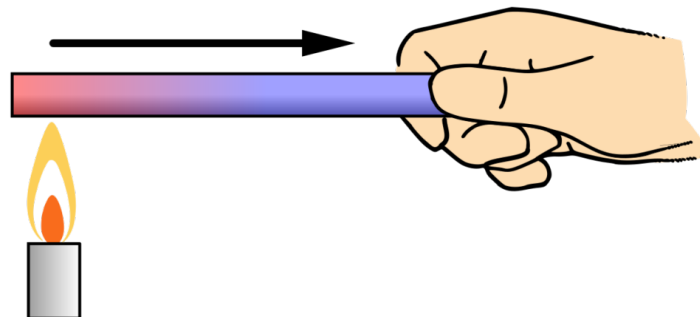
Fisicamente, há 3 métodos de propagação de calor (até onde eu vi na Wikipédia, tem bem mais que isso, só que é tipo quando alguém fala que tem 27 estados da matéria, não é mentira, mas pra gente não importa os outros 24 que não são os 3 padrão ensinado na escola): Condução, convecção e radiação, vamos discutir cada um nas seções abaixo.





4. Condução

Definitivamente o que mais aparece em exercícios. Pra entender do que se trata a condução de calor, imagina que você vai em um acampamento com seus amigos e na noite vocês vão comer marshmallows esquentados na fogueira, mas você é um cara limpo e traz uma barra de metal pra colocar o marshmallow no extremo mas você não ta afim de ficar segundo a barra, então você deixa ela ali e enquanto isso fica varzeando. Depois de uns 5min esquentando o marshmallow, você coloca a mão na barra de metal cuja extremidade estava longe do fogo achando q tudo estaria bem, mas derrepente você percebe que esse extremo esta absurdamente quente e não é capaz de pegar seu marshmallow, lhe restando apenas ver o delicioso petisco sendo queimado na fogueira, incapaz de salva-lo. Mas você também é uma pessoa questionadora e se pergunta: eu não peguei na ponta que estava na fogueira, como essa parte estava quente também? Como a energia de um ponto do sistema aumentou? Nesse caso o que fez a outra extremidade esquentar é a propagação de calor por meio de condução: quando um material possui um gradiente de temperatura em seu interior, calor irá se propagar por meio de condução.

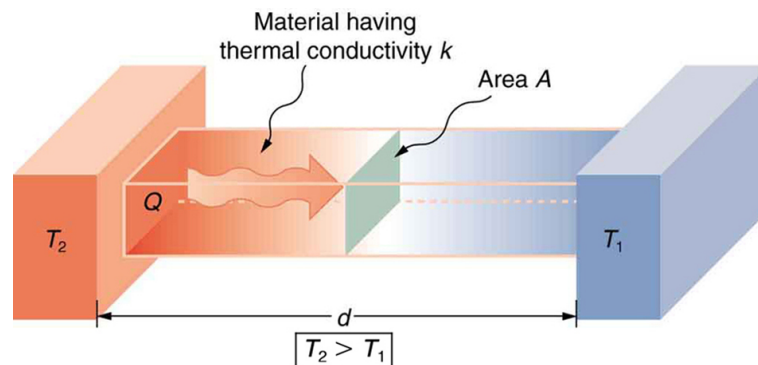


4.1 Fórmula de Fourier

A formulação matemática da condução é introduzida com o seguinte pensamento: Suponha que eu pegue uma barra de um material X, que tem comprimento d e uma área transversal A , conecto



um dos seus extremos a um reservatório muito grande a uma temperatura T_1 (Por um reservatório grande, quero dizer que não importa o quanto de energia é retirada na forma de calor dele, a temperatura continua sendo T_1) e conecto o outro extremo a um outro reservatório muito grande a uma temperatura T_2 , e eu quero saber dados essas configurações, quanto de energia esta sendo transmitida na forma de calor de um objeto pro outro por unidade de tempo quando o equilíbrio estacionário é atingido (entende-se por equilíbrio estacionário quando essa energia não é absorvida pela barra, mas apenas transmitida por ela, isso significa que o quanto sai de um reservatório é o quanto chegara ao outro, nada sendo entregue a barra).



Os estudos feitos sobre o assunto levaram a conhecida Formula de Fourier:

$$\Phi = \frac{kA(T_2 - T_1)}{d}$$

Onde Q é a quantidade de energia por unidade de tempo que sai de 2 em direção a 1 e k é definido como a condutividade térmica do objeto, característica do material X utilizado.

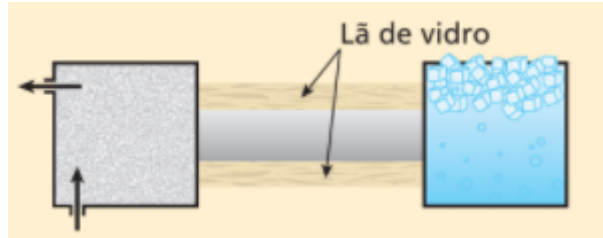
Eu não consigo conceber em palavras o quanto essa formula é pika, da uma olhada nela, interpreta o que ta rolando, tenta imaginar o que da pra tirar disso (eu vo fazer isso daqui a pouco, mas da uma olhada boa noq ta rolando por conta própria) Essa formula nos da diversas conclusões interessantes: A quantidade de calor que é passado de um corpo a outro é proporcional a diferença de temperatura entre eles, o que esta de acordo com a ideia que calor quase sempre esta relacionado a uma diferença de temperatura entre corpos. Outra conclusão é: aumentando a área a energia que é passada aumenta proporcionalmente, mas aumentar o comprimento diminui de maneira inversamente proporcional a energia que é passada.

A condutividade termica diz respeito a facilidade que um objeto tem de transmitir calor por ele, quanto maior a condutividade, mais facilidade tem o material. Isso já é de certo modo conhecido: Um metal na maioria dos casos tem um k maior do que materiais como madeira ou lã, e não é atoa que quando você esta em um lugar com uma temperatura baixa, tocar um objeto de metal da uma sensação de "gelado" muito maior do que ao tocar um objeto de madeira ou de lã: os 3 materiais estariam na mesma temperatura que o ambiente, mas a diferença de temperatura do seu corpo com esses materiais teria uma passagem de calor maior pro metal do que pros outros dois, o que é responsável pela sensação de "frio" ou "gelado". Só tendo essa formula vamos tentar resolver umas questões pra sacar como ela vem:



4.2 Exercícios resolvidos com a formula de fourier

Problema 1. Supõe que em um reservatório 1 há água e vapor de água à pressão atmosférica em equilíbrio, e em um reservatório 2 há gelo e água em equilíbrio também a pressão atmosférica. Planeja-se tirar energia do reservatório 1 e envia-lo para o 2, usando para isso uma barra de alumínio de comprimento $L = 50\text{cm}$ com uma area de seção transversal $A = 5\text{cm}^2$ enrolada em uma lâ de vidro, sabendo que a condutividade térmica do alumínio é $k = 0.5 \frac{\text{cal}}{\text{s}\cdot\text{cm}\cdot^\circ\text{C}}$, queremos saber:



- Qual a corrente térmica que esta sendo passada pela barra em direção ao reservatório 2(ou seja, quanto de energia por unidade de tempo esta chegando ao reservatório 2)
- Em 10 segundos, quanto de gelo terá derretido?

-A primeira coisa que tem que ser analisado é que, por termos água e vapor de água em equilíbrio à pressão atmosférica, a temperatura do reservatório 1 é de 100°C (água à pressão atmosférica ebulli a 100°C e é nessa temperatura que água e vapor coexistem), e pelo mesmo motivo, o reservatório 2 esta à 0°C . A segunda coisa é perceber a presença da lâ de vidro: ele também ira conduzir calor para o exterior seguindo a lei de fourier (de uma maneira um pouco mais aloprada matematicamente), mas essa quantia é negligenciável devido a baixa condutividade da lâ, então ela esta ali pra facilitar nossa vida e negligenciar a perda de energia para o exterior.

Com isso em mente, temos que , para a pergunta a), aplicar a formula de fourier, então:

$$\Phi = \frac{kA\Delta T}{L}$$

$k = 0.5 \frac{\text{cal}}{\text{s}\cdot\text{cm}\cdot^\circ\text{C}}$, $A = 5\text{cm}^2$, $L = 50\text{cm}$ $\Delta T = 100^\circ\text{C}$, então

$$\Phi = 5\text{cal/s}$$

Para a pergunta b), temos que perceber que o calor que está indo para o reservatório 2 não pode aumentar a temperatura do sistema enquanto todo o gelo não for derretido, então essa energia sera usada pelo sistema para derreter gelo, e em 10 segundos

$$Q = t \cdot \Phi = 50\text{cal}$$

e como o calor latente de liquidificação da água é $L \approx 80\text{cal/g}$,

$$Q = L\Delta m$$

$$\Delta m = \frac{Q}{L} = 0.625\text{g}$$



4.3 Equilíbrio estacionário e generalização da fórmula de Fourier

(Dou um aviso prévio sobre essa parte, enquanto escrevia, percebi que tinha muita coisa nova pra ser introduzida e tinha muitas ideias pra exercícios, mas do que eu procurei, por algum motivo isso é muito pouco falado na internet, o que problemático pra eu poder dar exemplos, então não se preocupe se essa parte ficar um pouco confusa, relei-a e se mesmo assim ficar estranho, pd perguntar no discord esse tipo de coisa)

A primeira coisa que é necessário ser dito é que: foi dita que a formula de fourier é valida quando estamos no equilibrio estacionario da barra, mas o que isso significa exatamente? Eu não vou dar a definição exata dele, mas sim uma ideia de o que seria e como identifica-la: O equilibrio estacionario seria quando as quantias não mudam mais com o tempo. Pensa no caso da barra colocada entre os dois reservatórios com duas temperaturas diferentes: A barra antes de ser colocada entre os dois reservatórios podia ter qualquer temperatura, distribuida de qualquer maneira, e ao coloca-la, essa vai mudar de temperatura com o tempo, mas é sabido que depois de muito tempo entre os reservatórios, o seu perfil de temperatura(A temperatura em cada ponto da barra) não muda mais com o tempo e é independente da sua condição inicial, quando isso é atingido é dito que a mesma se encontra no estado estacionário, sendo valido então a formula de Fourier.

Ademais, formula de Fourier é algo bem conhecido por ai, sendo uma das leis que regem a condução de calor, mas do jeito que ela esta ai não parece que tem muito que pode ser abstraído dela: Foi colocado uma barra em condições ultra especificas, a priori parece uma formula que descreve um caso bem específico na natureza, mas veremos agora que esse não é o caso:

Há algumas coisas que não foram tão bem especificadas no desenvolvimento dessa formula: Nos dois extremos nós temos tal chamados "reservatórios grandes", mas e se esse não fosse o caso? A formula não parece depender do que a barra esta conectada em seus extremos.

E isso de fato é verdade, a generalização seria que quando o estado estacionário é atingido e nós temos em um extremo da barra a uma temperatura T_1 e outro a uma temperatura T_2 , essa quantia Q estará sendo passada pela barra em direção de um extremo a outro, não importa se ela esta conectada a um reservatório ou não.

Mas isso também leva a outra duvida: o que define "os extremos da barra"? Pois até ai os tais chamados de extremos poderiam estar conectados a uma outra barra idêntica do mesmo material e fisicamente esses limites não teriam nada de especial. Essa conclusão também esta correta, e leva a um outro fato da generalização: definindo quaisquer extremos, essa formula continua valendo(considerando que estamos no caso estacionário, onde os padrões de temperatura não mudam com o tempo). Quando voltamos ao caso de uma barra em estado estacionario com uma diferença de temperatura entre dois pontos, é possível calcular o fluxo que passa por ela definindo qualquer extremo que nos convém, mas nesse caso deve se usar as temperaturas nesses dois extremos escolhidos, podemos então falar que se pegássemos dois extremos quaisquer na barra separados por uma distancia Δx com uma diferença de temperatura ΔT entre os extremos , o fluxo de energia que passa nessa região analisada é dado por

$$\Phi = \frac{kA\Delta T}{\Delta x}$$



Sabemos que no caso estacionário, essa quantidade não depende dos limites analisados: a quantidade de calor que está passando pela barra é constante por toda a barra, isso só é possível se $\frac{\Delta T}{\Delta x} = \text{Constante}$, isto é: quando o caso estacionário é atingido na barra, pegando duas seções transversais arbitrárias, a diferença de temperatura entre elas é proporcional à distância que as separa.

Vamos usar o que temos até aqui para chegar em algo muito interessante sobre o caso mais simples: quando temos a barra de condutividade k , comprimento L e área transversal A colocada em contato com dois reservatórios térmicos com temperaturas T_1 e T_2 , a barra terá essas temperaturas nos seus extremos e em seu interior ocorre uma mudança linear indo de uma para outra.

Disso tudo o que deve ser lembrado é que: Quando uma barra possui uma diferença de temperatura ΔT entre seus extremos, um fluxo vai fluir sobre ela de forma a seguir a Lei de Fourier, que pode ser aplicada entre quaisquer duas seções transversais escolhidas e o padrão de temperatura em seu interior é linear indo de um extremo a outro.

Há mais generalizações sobre a lei de Fourier, tanto para quando não estamos no estado estacionário quanto para quando a forma do objeto ou a forma como é feita a diferença de temperatura não é tão simples, mas para o que é exigido em provas no quesito OBC, OBF, OPF e analogos, isso não cai nem a pau, então dá para ficar de boas sabendo o que foi mostrado aqui.

4.4 Barras Conectadas

Um caso não tão comum mas conhecido de exercício sobre convecção é quando ao invés de uma barra entre dois reservatórios, é colocado duas barras diferentes com comprimentos, seções transversais e condutividade térmica diferente entre os dois reservatórios, de forma que a temperatura na região de contato entre as barras não é algo dado no exercício e é preciso saber o fluxo total que passa de um reservatório à outro. Eu deixarei um exercício no folheto que trata disso, mas em si é algo não complicado: A temperatura na região de contato das barras é uma incógnita do sistema e o fluxo de calor que passa por elas também, porém é sabido que essa temperatura é a mesma para as duas barras (isto é, se a temperatura no final de uma barra é T_i , a temperatura no começo da outra barra que à toca é T_i também) e que o fluxo que passa por uma barra tem que ser igual ao fluxo que passa pela outra, então escreve a equação de Fourier para cada uma das barras (usando a temperatura incógnita) e estabelece que o fluxo que passa por uma tem que ser igual ao fluxo que passa pela outra, e a quantidade de equações obtidas é suficiente para achar tanto o fluxo efetivo quanto a temperatura na região de contato, resolvendo assim o problema. O mesmo pode ser expandido para um caso onde há diversas barras conectadas ao invés de 2, nesse caso as equações continuam as mesmas (embora as contas possam ficar um pouco mais chatas de serem resolvidas) e é possível achar todas as quantias de interesse.

5. Convecção

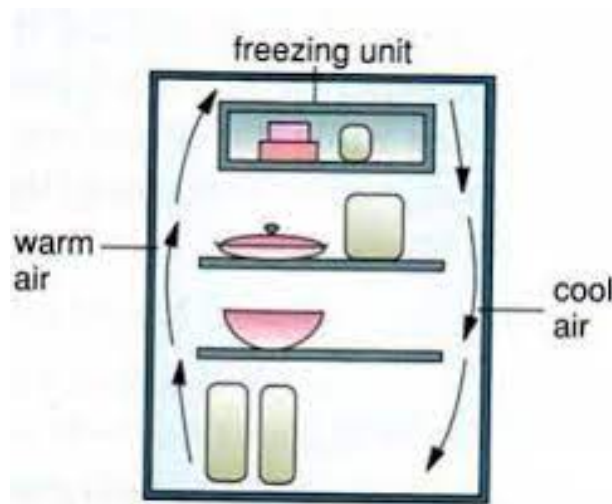
Convecção é algo que se é cobrado na OBF e afins, é no máximo qualitativo, então eu vou dar uma explicação qualitativa do que ela é e o que há de diferença da condução.



5.1 Explicação qualitativa e exemplos

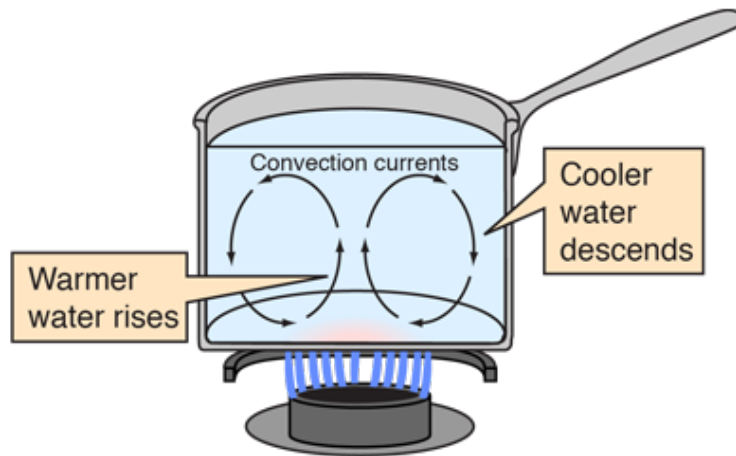
O mais comum de se ouvir falar por ai é que convecção ocorre quando a movimentação de alguma coisa no interior do meio, os exemplos mais comuns são:

1- O resfriamento feito em uma geladeira: Uma geladeira essencialmente é uma caixa com um resfriador no seu topo e ar em seu interior: o resfriador faz com que o ar no topo da caixa fique frio, porém ar frio é mais denso que ar quente, e portanto tende a cair do topo e ir para a base, analogamente o ar quente tende a subir e ir ao topo onde há o resfriador. O ar frio que foi à base, ganha energia térmica dos objetos ao seu redor e fica quente, o ar quente que foi ao topo perde energia pelo resfriador e fica frio, e então o ciclo se repete, com ar frio descendo e ficando quente e o ar quente subindo e ficando frio, essencialmente o que esta transmitindo energia para os objetos dentro da geladeira é devido ao movimento do ar em seu interior, e é dito que essa forma de passagem de calor é por convecção



2-Aquecimento de água na panela: Ao colocar uma panela no fogão ligado, a base da panela irá receber calor e passar para a água, a água na base fica quente, porém a densidade de água quente é menor que a da fria (é sabido que a densidade da água tem um máximo nas proximidades 4°C , mas depois disso qualquer aumento de temperatura tem uma diminuição na densidade, então o que eu disse só é válido se estamos longe dos 4°C , o que é fato para a maioria das vezes que você esquenta água na panela), e por isso o líquido quente tende a subir ao topo e o frio tende a descer à base, o frio recebe calor da base e fica mais quente que o do topo, e então tende a subir enquanto o que estava no topo tende a descer à base, de modo que um fluxo de calor é transmitido efetivamente pelo movimento da água dentro da panela, é dito então que o calor está sendo transmitido por convecção





Com esses exemplos, dá pra se ter uma ideia geral de o que seria a convecção e como energia é transmitida por meio desse processo, agora eu vou dar uma explicada melhor em o que define-a e qual a diferença crucial dela pra condução.

5.2 Diferença entre condução e convecção

Eu já aviso previamente aqui: o que eu falar aqui não é algo totalmente difundido pelos livros por aí, esse assunto é meio jogado por aí e eu nunca vi um livro destinado especificamente a convecção, a minha interpretação sobre a diferença entre os dois foi feita com base em exercícios de olimpíadas em que era necessário tratar de convecção matematicamente, mas por ser algo meio solto, se você chegar ao seu professor do 9º ano e falar que o que eu disse aqui tá certo, tem altas chances de ele falar que você tá louco e tá ouvindo balela, isso porque exercícios de convecção no nível tratado aqui (tanto OBF e afins quanto vestibulares) deveria ser algo do tipo: "Qual a forma de transmissão de calor que está sendo tratada aqui?" aí você veria algo sobre "ar se movendo" ou "água se movendo no interior da panela" e falaria que é convecção, acertaria e iria varzear depois. O meu intuito ao falar disso é tentar deixar mais claro o que define convecção.

Dito isso, pode ser gerado a dúvida: mas porque seria necessário diferenciar a convecção da condução? Não é óbvio que um não tem nada haver com o outro? Um tem literalmente uma barra metálica com diferença de temperatura e outra tem um líquido fazendo movimentos de "subir" e "descer", mas não é tão fechado assim, o caso mais simples de se imaginar é quando estamos esquentando água com uma temperatura máxima menor que 4°C: para água entre 0°C e 4°C, a densidade aumenta com o aumento da temperatura, então a água quente da base ficaria com densidade maior que a da água do topo e ela não tenderia a subir ao topo, não sendo criada às tais correntes de convecção.

Nesse caso o calor não pode ser transmitido por convecção, sendo passado então por condução dentro da água, da mesma maneira que foi tratada a condução pra outros sistemas, como o da barra entre dois reservatórios. Com um mesmo material podendo transmitir calor das duas maneiras, o jeito que eu uso pra diferenciar quando condução e quando convecção estão em ação em um sistema, é analisar se existe uma camada de equilíbrio térmico do sistema analisado com os seus arredores.

Pensa no caso da barra entre dois reservatórios, transmitindo calor por condução: é automática-



mente assumido que a temperatura da região do reservatório que toca a barra é igual a temperatura da região da barra que toca o reservatório, ou seja, é assumido a existência de uma camada infinitesimal do sistema analisado(nesse caso, a barra) que esta em equilíbrio térmico com os seus arredores(nesse caso, os reservatórios). Para problemas de condução, isto é valido e não tem com o que se preocupar, quando é chegado o estado estacionario o sistema possui seus contornos em equilíbrio termico com os arredores que o tocam. No entanto, isso não é valido quando temos um processo de convecção: No caso da agua na panela, quando a camada logo acima da panela é esquentada, ela se move e uma agua fria entra em contato com a base, de forma que a temperatura na base da panela que toca a agua não é igual a temperatura da agua que toca a base da panela, e isso fica assim porque sempre que é tentado obter-se um equilíbrio termico entre os dois, a agua se move e o equilíbrio não consegue ser obtido, e o calor que é retirado da panela é devido a essa incapacidade de formação de um equilíbrio dos contornos do sistema com seus arredores.

Se então há um processo de transmissão de calor, é necessario pensar: é possivel que por algum motivo fisico o sistema tratado possui um movimento intrinseco de modo que os contornos não consegue ficar em equilíbrio térmico com os arredors? Se a resposta é sim, então convecção está em ação, se a resposta é não então você se preocupa apenas com condução no sistema. Os casos mais comuns que causam esse movimento intrinseco é quando os arredores ou o sistema possui um fluido que muda de densidade com a temperatura, de modo que quando esse equilíbrio tende a ser atingido, há movimento desse fluido e é impossível o equilíbrio chegar.

Gostaria de deixar claro que, do que eu entendo, a convecção esta relacionada apenas a retirada de calor do sistema pelo seus arredores devido a essa diferença de temperatura na região de contato, e não com o movimento do fluido em si, isto é: calor é passado da panela para a água pois a região de contato com os dois não esta em equilíbrio térmico, e essa passagem da panela para à agua é chamada de convecção, a convecção não é esse movimento da agua devido a diferença de temperatura, mas sim a passagem de energia da panela à agua devido a diferença de temperatura entre os dois na região de contato. Isso vai de acordo com a lei mais comum pra descrever passagem de calor por convecção:

$$\Phi = h \cdot A \cdot \Delta T$$

Onde h é chamada de constante de convecção, A é a area de contato entre o sistema e seus arredores e ΔT , a diferença de temperatura entre esses dois.(Mas não se preocupa com essa formula, quando ela é valida ou porque ela é valida, porque a probabilidade de ela cair num vestibular ou na OBF é zero, o intuito é você perceber que a formula que diz respeito ao calor passado por convecção relaciona a diferença de temperatura de um sistema com seu arredor. Como pode ser visto também, se o equilíbrio é atingido, a diferença de temperatura é zero e o calor transmitido por convecção é nulo).

