

## INTRODUZINDO RESFRIAMENTO COM CONVECÇÃO NATURAL PARA INGRESSANTES AO CURSO DE ENGENHARIA DE ALIMENTOS: ESTUDO DE CASO ASSISTIDO POR SIMULAÇÃO NUMÉRICA

### José Antonio Rabi

Faculdade de Zootecnia e Engenharia de Alimentos, Universidade de São Paulo  
Av. Duque de Caxias Norte, 225, Pirassununga, SP, 13635-900, Brasil  
jrabi@fzea.usp.br

### Rodrigo Bueno Cordeiro

Faculdade de Zootecnia e Engenharia de Alimentos, Universidade de São Paulo  
Av. Duque de Caxias Norte, 225, Pirassununga, SP, 13635-900, Brasil  
rod.bueno@yahoo.com.br

### Alessandra Lopes de Oliveira

Faculdade de Zootecnia e Engenharia de Alimentos, Universidade de São Paulo  
Av. Duque de Caxias Norte, 225, Pirassununga, SP, 13635-900, Brasil  
alessandra@fzea.usp.br

**Resumo.** O presente trabalho relata uma atividade aplicada em sala de aula para alunos recém-ingressantes ao curso de Engenharia de Alimentos, da Faculdade de Zootecnia e Engenharia de Alimentos, Universidade de São Paulo, campus de Pirassununga. Dentre os objetivos, a atividade visou apresentar e discutir conceitos básicos de convecção natural e foi dividida em etapas. Primeiramente, foi feita breve exposição sobre modelagem e simulação de processos e equipamentos de interesse à indústria de alimentos. Em seguida, tendo em mente processos com convecção natural, foi proposta uma situação-problema de refrigeração de duas amostras de material poroso, inicialmente à temperatura mais elevada (identificadas como duas frutas), em uma pequena câmara (identificada como um compartimento de geladeira com freezer interno). Para a disposição das amostras, foram sugeridas três configurações distintas, sendo então solicitada a cada aluno, por meio de uma questão simples e direta, a ordenação destas configurações quanto à eficiência do processo de resfriamento, isto é, quanto à capacidade de resfriar mais rapidamente as amostras em conjunto. Coletadas as respostas por escrito dos alunos, a última etapa contou com um simulador numérico (para fenômenos de transporte em domínio total ou parcialmente preenchido por material poroso) para visualizar e discutir os resfriamentos obtidos segundo cada configuração. A distribuição das respostas, dentre as possíveis ordenações, é aqui apresentada e analisada em face do suposto conhecimento prévio dos ingressantes e de como foi apresentado o fenômeno de convecção natural.

**Palavras chave:** convecção natural, refrigeração, simulação numérica, engenharia de alimentos, ensino de engenharia.

### 1. Introdução

Dentre as competências ao longo da cadeia produtiva, o Engenheiro de Alimentos atua nas áreas de projeto, de desenvolvimento de produtos, de processos e de controle de qualidade, para citar alguns exemplos. Deste profissional demanda-se, pois, o conhecimento dos constituintes dos alimentos, das reações que podem ocorrer entre eles, de suas reações com o ambiente e das causas de sua deterioração de ordem microbiológica, bioquímica, química ou estrutural. Além disso, com base nas características das matérias-primas e dos produtos acabados, deseja-se igualmente que o Engenheiro de Alimentos conheça as técnicas e os processos de preservação.

Além de atender a critérios específicos de engenharia, ao projetar um dado equipamento ou processo o Engenheiro de Alimentos deve também ter em mente o que ocorre com a matéria-prima e suas transformações. Para tanto, tornam-se necessários não apenas sólidos conhecimentos de ciências básicas como Matemática, Física e Química, mas também de ciências da engenharia aplicadas à indústria de alimentos como Operações Unitárias, Biotecnologia, Bioengenharia e, de particular interesse ao presente trabalho, Fenômenos de Transporte e Refrigeração.

Em um cenário globalizado e competitivo como o atual, é essencial senão imprescindível que futuros engenheiros (seria o caso de também dizer engenheiros de futuro?) estejam minimamente aptos a enfrentar e resolver toda a sorte de problemas, não obstante sua especialização. Opinião similar é compartilhada por Arora (2004) enquanto que da Silva *et al.* (2005) apontam para a carência na iniciativa privada e no setor público por profissionais versáteis e qualificados, com formação bem ampla e sólida. Collis (1998) acrescenta outras habilidades à formação dos engenheiros modernos, conferindo atenção especial para a capacidade do mesmo em continuamente proporcionar renovações e melhorias.

No curso de graduação em Engenharia de Alimentos oferecido pela Faculdade de Zootecnia e Engenharia de Alimentos da Universidade de São Paulo – FZEA/USP, as disciplinas visam abranger as áreas cobertas pela profissão. No 1º semestre do curso, a disciplina “ZEA0164 Introdução à Engenharia de Alimentos” busca despertar o interesse do ingressante para as áreas de formação profissionalizante, apresentando noções básicas das tecnologias de conservação e processamento industrial de alimentos. A disciplina conta com a participação de diferentes docentes do Departamento de Engenharia de Alimentos, cada qual com formações acadêmicas distintas, podendo cada um, assim, contribuir com sua visão e experiência. De particular interesse a este trabalho, dentre os tópicos compoendo o conteúdo programático de ZEA0164, cabe destacar a conservação pelo frio, processo normalmente baseado em fenômenos de transporte.

## 2. Desafios ao ensino de Fenômenos de Transporte

Na solução de problemas, é comum o engenheiro se deparar com a transferência de quantidades de material, a obtenção de uma certa forma de energia ou a troca de dadas espécies químicas entre fases. Reconhecendo a relevância da ciência dos Fenômenos de Transporte, em 1974 o então Ministério de Educação e Cultura enquadrou-a entre as disciplinas de formação básica para todos os cursos de Engenharia do país (Brunello, 1978). Desde 2002, o Conselho Nacional de Educação, por meio da Câmara de Educação Superior, tem substituído a obrigatoriedade de disciplinas pela de conteúdos, estando mais uma vez Fenômenos de Transporte dentre os tópicos considerados básicos (Brasil, 2002).

Os processos de transporte ocorrem simultaneamente, mas por razões didáticas ou pela inerente complexidade, eles são apresentados de forma separada para efeitos de entendimento, formulação e solução. Tem sido, pois, tradicional o agrupamento em transporte de massa, quantidade de movimento (QDM) e energia, o que reflete no oferecimento de disciplinas como Fenômenos de Transporte I, II e III, correspondendo em geral a Mecânica dos Fluidos, Transferência de Calor e Transferência de Massa. Esta divisão é adotada pela grade curricular do curso de graduação em Engenharia de Alimentos oferecido pela FZEA/USP, onde a disciplina “ZEA0563 Fenômenos de Transporte I” é regularmente oferecida aos alunos de graduação no 5º semestre, sendo preparatória para disciplinas em semestres subsequentes, para as quais ela é pré-requisito, quais sejam: “ZEA0662 Fenômenos de Transporte II”, “ZEA0665 Operações Unitárias I” e “ZEA0675 Instalações e Instrumentação Industrial”.

Da Silva *et al.* (2005) atribuem um certo desafio ao ensino de Mecânica dos Fluidos em um curso de graduação em Engenharia Mecânica na medida que esta disciplina exige dos alunos familiaridade com vários fenômenos físicos, além do domínio de cálculo. Tal consideração pode ser igualmente estendida para a graduação em Engenharia de Alimentos, para cujos alunos conhecimentos de, por exemplo, Física, Cálculo Diferencial e Integral, Equações Diferenciais e da própria Mecânica dos Corpos Rígidos são também pré-requisitos desejáveis e bem-vindos.

Associada aos princípios de conservação, a modelagem de fenômenos de transferência leva a equações de razoável complexidade. Em práticas usuais, as soluções partem de hipóteses simplificadoras e/ou de geometrias regulares, o que tende a afastar o problema da realidade. O fato de a Mecânica dos Fluidos ser uma ciência de várias considerações e hipóteses também é apontado por da Silva *et al.* (2005). Por si só, esta é uma questão delicada, cabendo ao docente sua discussão junto aos alunos para que não recaiam no chavão de que “na prática, a teoria é outra” ou que invariavelmente (ou próximo disso) são introduzidos parâmetros de correção, a fim de trazer a solução idealizada para o mundo real.

Como já salientada por Gad-El-Hak (1997), a habilidade para corretamente recorrer a simplificações e fazer uso adequado de hipóteses requer uma maturidade científica que amiúde não está bem desenvolvida em um aluno típico de graduação. Vale, pois, questionar a possibilidade de se antecipar e/ou acelerar o desenvolvimento desta habilidade. Em particular, um aspecto a ser investigado refere-se à capacidade dos alunos em elaborar modelos para as situações-problema a que são expostos, sendo aqui fundamental a distinção entre a modelagem física e a modelagem matemática. Avançando um pouco mais, a questão pode ser aplicada com respeito aos ingressantes (calouros), ou seja, para aqueles alunos ainda imbuídos dos conceitos vistos e trabalhados no ensino médio e/ou fundamental.

Cabe aqui registrar o interessante trabalho conduzido pelo GREF – Grupo de Reelaboração do Ensino de Física, composto por professores da rede estadual de ensino de São Paulo, coordenados por docentes do IFUSP – Instituto de Física da USP. Dentre os objetivos, o GREF busca “elaborar uma proposta de ensino de Física para o ensino médio que esteja vinculada à experiência cotidiana dos alunos, procurando apresentar a eles a Física como um instrumento de melhor compreensão e atuação na realidade”. O GREF alerta para a confusão feita pelos alunos entre os princípios da Física e o instrumental matemático utilizado para expressá-lo, defendendo que “uma maneira de evitar esta distorção pedagógica é começar cada assunto da Física pelo desenvolvimento de uma temática e uma linguagem, comuns ao professor e a seu aluno, contida (*sic*) no universo de vivência de ambos” (GREF, 2001).

## 3. Modelagem matemática, simulação numérica e o ensino de Fenômenos de Transporte

Considerando o universo de especialidades, a sociedade espera e cobra de todo e qualquer profissional a solução de problemas trazidos por ela própria. Via de regra, para tais problemas são construídos modelos, isto é, com base na sua formação e habilidades, os profissionais buscam identificar as características destes problemas que permitam descrevê-los o mais fielmente possível. Em seguida, são estudadas e escolhidas as metodologias de solução mais adequadas para resolvê-los. No âmbito das chamadas ciências exatas, as etapas de identificação e descrição que compõem a modelagem correspondem à elaboração de modelos matemáticos.

Especificamente, para análise e solução de problemas envolvendo fenômenos de transporte são evocados princípios de conservação como os de massa, QDM e energia, além de relações adicionais (equações constitutivas) a fim fechar os problemas em que o número de incógnitas supera o de equações. Ainda que recorra a simplificações, a formulação integral destes princípios permite resolver muitos problemas com razoável acurácia, sendo conveniente e útil quando há interesse somente em comportamentos globais. Por sua vez, na formulação diferencial os princípios de conservação são expressos por equações diferenciais e conhecimento pormenorizado é obtido mediante a solução destas equações.

Para as soluções analíticas, tal vantagem tem seu preço: poucos são os casos em que é possível obter este tipo de solução para as equações diferenciais (em geral, acopladas entre si), sem contar a dificuldade associada ao correto estabelecimento de condições de contorno e/ou iniciais necessárias. Para viabilizar a obtenção de soluções analíticas, são muitas vezes introduzidas hipóteses simplificadoras que tendem a afastar demasiadamente o problema da realidade, o que pode comprometer a qualidade (fidelidade) da solução.

Visando a comparação com normas e padrões estabelecidos, medidas experimentais certamente são de grande valia para projetar e avaliar processos e/ou equipamentos, na medida que elas gozam da desejável propriedade de retratar o problema real. Entretanto, há situações em que a obtenção de dados de campo ou em laboratório fica comprometida por questões de segurança, impossibilidade tecnológica ou ainda questões financeiras (alto custo de recursos materiais e/ou humanos). Em tais circunstâncias, modelagem matemática e simulação numérica podem desempenhar papel relevante.

Inicialmente usada como ferramenta acadêmica, a simulação numérica tem evoluído expressivamente e há muito se firmado como metodologia de solução de problemas em engenharia (Maliska, 1995). O uso de técnicas numéricas em aplicações de interesse não só tem se intensificado como também avançado para diversas áreas graças à disponibilidade de computadores relativamente baratos de alto desempenho, aliada ao desenvolvimento de métodos numéricos cada vez mais eficientes e robustos. Assim, vários problemas envolvendo fenômenos de transporte têm sido numericamente resolvidos com exatidão e rapidez, recorrendo-se a um número cada vez menor de hipóteses simplificadoras. A Fig. 1 abaixo procura esquematizar as etapas de solução de problemas em ciências exatas, ou particularmente, em engenharia.

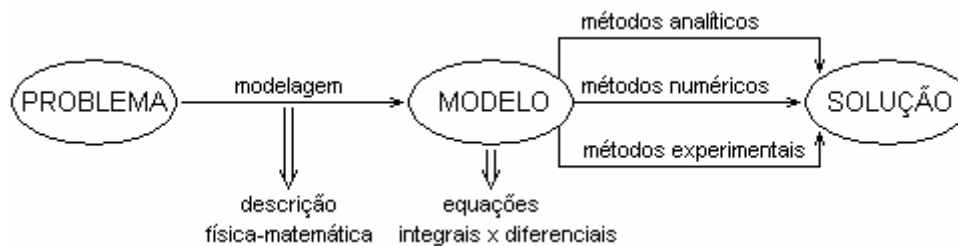


Figura 1. Rotina de solução de problemas em engenharia por meio de métodos analíticos, experimentais e numéricos.

Em sua grande maioria, os simuladores são elaborados a partir da implementação numérica (discretização) das equações governantes. Com o notável desenvolvimento da fluidodinâmica computacional (CFD – “computational fluid dynamics”), a viabilidade da solução das equações completas de Navier-Stokes permite não só ampliar como também modificar o ensino de Mecânica dos Fluidos em nível de graduação (Gad-El-Hak, 1998). O uso adequado de CFD pode ser interessante em conjunto com pós-processadores gráficos que propiciem a visualização de campos de velocidade, pressão e temperatura, além de outras grandezas intensivas associadas ao escoamento.

Mesmo assim, nunca é demais lembrar que, do mesmo modo que as raras soluções analíticas aliadas a resultados experimentais são de grande valia (senão cruciais) para validar as soluções obtidas por meio de simulação numérico-computacional, as aulas práticas em laboratório didático são indispensáveis ao ensino de Mecânica dos Fluidos. Esta questão, porém, foge ao escopo deste trabalho.

Tendo em mente a conservação de alimentos pelo frio e visando introduzir conceitos (físicos) básicos de convecção natural, o presente trabalho relata uma atividade conduzida em sala de aula junto aos alunos ingressantes matriculados na disciplina ZEA0164 supracitada, no 1º semestre de 2006. Ciente da pouca probabilidade que, desde o ensino médio e/ou fundamental, o calouro traga consigo conhecimentos (ainda que informais) de fenômenos de transporte, a atividade recorreu a uma situação supostamente cotidiana, qual seja, o resfriamento de alimentos no interior de uma câmara fria (geladeira). Tal atividade didática se desenvolveu nas etapas descritas a seguir.

#### 4. “Simulação de Processos” como tema de aula na disciplina “Introdução à Engenharia de Alimentos”

Conforme já citado, a disciplina “ZEA0164 Introdução à Engenharia de Alimentos” é oferecida aos calouros do curso de Engenharia de Alimentos da FZEA/USP, logo no 1º semestre letivo, contando com a participação de docentes de diferentes especialidades. Dentro do escopo da Engenharia de Alimentos, cada docente procura, ao trazer para a sala de aula um determinado assunto, contribuir com sua experiência e visão. Com respeito à atividade relatada no presente trabalho, “Simulação de Processos” foi o tema proposto para a aula, cujo desenvolvimento segue descrito.

#### 4.1. Conceituando e discutindo a importância de processos

Um aspecto que inspirou cuidados adicionais ao se desenvolver o tema foi o fato da aula ter sido uma das primeiras a serem ministradas na disciplina. Assim, inicialmente foi discutida com os alunos a distinção entre fases e estados da matéria, ressaltando serem as primeiras bem mais abrangentes do que os últimos. Em outras palavras, foi enfatizado que a matéria pode se apresentar sob a fase sólida, líquida ou gasosa (breve menção foi feita a plasmas), enquanto que em uma mesma fase há uma infinidade de estados, cada qual correspondendo a um conjunto bem definido de propriedades, sendo estas grandezas físicas mensuráveis ou calculáveis.

O conceito de processo foi então introduzido mediante a necessidade de e/ou interesse em se obter uma alteração de uma ou mais propriedades (isto é, promover mudança de estado e, eventualmente, de fase) de uma amostra material. Foi proposta a seguinte possível definição para processo: “operação ou conjunto de operações **coordenadas** que promovem a **transformação** física / química de um material, visando obter **produtos de interesse** a partir de **insumos** (matérias-primas / recursos energéticos) selecionados ou disponíveis”. Neste ponto, aproveitou-se para discutir o nítido papel do Engenheiro de Alimentos se fazendo necessário em relação às palavras aqui destacadas.

Visando a sensibilização quanto à importância de se processar alimentos, foram solicitados aos alunos exemplos de produtos que podem ser obtidos a partir da goiaba (incluindo a própria fruta *in natura*). A menos de um ou outro item, os alunos foram capazes de identificar os produtos de uma lista pré-elaborada pelo professor que continha: goiabada, geléia, suco pronto-para-beber (tradicional e “light”), suco concentrado, polpa congelada e fruta em conserva. Exceto a este último, foram solicitadas estimativas para os preços praticados ao consumidor para 1 kg de cada produto da lista. Outra vez, houve um grande índice de acerto por parte dos alunos. Os preços praticados (valores médios entre diferentes marcas) por uma loja de grande cadeia de supermercados no início de março de 2006 são comparados na Fig. 2.

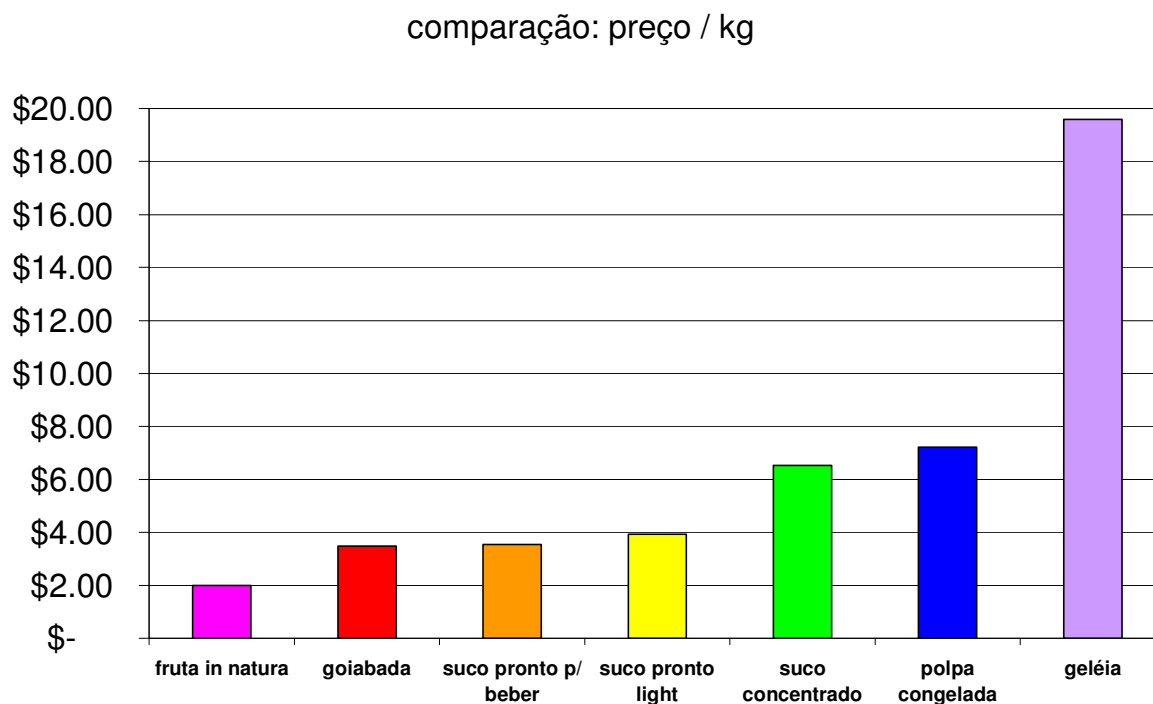


Figura 2. Preços em reais praticados ao consumidor para 1kg de diversos produtos derivados de goiaba (março/2006).

Tal comparação procurou mostrar que as várias tecnologias, desde o processamento industrial até a conservação de alimentos, em geral agregam valor ao produto final, ressaltando-se a importância não somente do “*know-how*” mas também do “*know-why*”, no tocante à otimização de processos. A modelagem de uma gama considerável de processos (usualmente enquadrados como químicos, térmicos ou mecânicos, além dos biológicos) implica em balanços acoplados de massa, energia e QDM. Destacou-se o papel dos métodos numéricos de solução que permitem obter informações detalhadas, que muitas vezes são imprescindíveis para projeto e otimização de processos e/ou equipamentos.

#### 4.2. Introduzindo e discutindo modelagem e simulação de processos / equipamentos

Na etapa seguinte, o esquema da Fig. 1 foi apresentado aos alunos a fim de abrir a discussão acerca da solução de problemas em engenharia. No ensejo, foram comparadas vantagens e desvantagens de cada método de solução, como anteriormente comentado no item 3. Também foi dada atenção especial à etapa de modelagem e, em especial, à própria definição de “modelo”. Levando a questão para o âmbito industrial, foram apontados três equipamentos relativamente

simples, sendo então solicitado o modo como poderiam ser matematicamente entendidas (e expressas) certas grandezas de interesse, associadas a cada um. A Tab. 1 apresenta os dispositivos apresentados e os respectivos modelos propostos pelos próprios alunos para as grandezas indicadas.

Tabela 1. Trabalhando com modelagem junto aos calouros: correspondência entre a situação real e o modelo sugerido.

Equipamento	Natureza	Grande física de interesse	Modelo proposto pelos alunos
Esteira transportadora	Mecânica	Velocidade da translação (da esteira)	Movimento retilíneo uniforme
Agitador / misturador	Mecânica	Velocidade de rotação (ex: da pá)	Movimento circular uniforme
Câmara de refrigeração	Térmica	Quantidade de calor (carga térmica)	Equação do calor sensível / latente

Em face das proposições adequadas, procurou-se enfatizar que tal exercício tratava-se de uma etapa de elaboração de modelos, qual seja, a identificação do processo (fenômeno) físico de interesse, acompanhada por sua representação matemática. Aproveitou-se para discutir que, além das leis (princípios) fundamentais, um modelo também é composto por equações que descrevem as propriedades relevantes de cada material (equações constitutivas) e pela descrição das condições de operação dos equipamentos (condições de contorno ou iniciais).

O conceito de simulação numérico-computacional de processos foi então introduzido com base na necessidade na obtenção de valores para condições de interesse. Dentre as vantagens de projetos e pesquisas assistidas por simulação, foram apresentadas e discutidas as seguintes:

- Menores custos humanos e/ou materiais a fim de se alcançar o projeto otimizado ou para se fazer “*scale-up*”;
- Predição da performance de novos produtos / processos / equipamentos;
- Previsão do comportamento do processo / equipamento em condições que possam causar acidentes, danos ao meio ou ainda trazer riscos aos operadores, usuários ou consumidores;
- Disponibilidade de informações que podem ser usadas para compreender fenômenos caracterizados por parâmetros cuja determinação (medição) é inviável ou difícil, assim como para melhor analisar dados coletados;
- Na medida que o simulador pode ser continuamente aprimorado com equações e/ou informações mais precisas, situações cada vez mais realistas podem ser investigadas.

Por sua vez, importantes restrições não foram olvidadas, sendo discutidas e apresentadas as seguintes:

- Necessidade de validação do simulador contra eventuais resultados analíticos e/ou contra dados experimentais ou de operação (real) disponíveis;
- Dificuldades em descrever matematicamente fenômenos complexos e/ou condições de contorno / iniciais, a fim de tornar o simulador mais abrangente.

Em linhas gerais, comentou-se sobre as metodologias existentes para elaborar simuladores numéricos como método de diferenças finitas, método de elementos finitos, método de volumes finitos, método de elementos de contorno e redes neurais. Também foi comentada a inegável expansão dos métodos numéricos, hoje presentes na solução de problemas envolvendo produção de energia, fenômenos ambientais, projeto de equipamentos, previsão climática, conforto térmico, engenharia aeronáutica e aeroespacial, reservatórios de petróleo, biotecnologia (Maliska, 1995) e, evidentemente, na engenharia de alimentos (Scott e Richardson, 1997; Wang e Sun, 2003). Ao leitor interessado em mais detalhes sobre modelagem e simulação de processos industriais recomenda-se consultar (Garcia, 2005), por exemplo.

## 5. Estudo de caso: refrigeração com convecção natural de duas “frutas” em compartimento de “geladeira”

Uma vez expostos e discutidos conceitos básicos de modelagem matemática e simulação numérica, a próxima etapa da atividade didática propôs aos alunos a solução de um problema relativamente simples de engenharia, qual seja, um estudo de caso de resfriamento. Ainda que antecipando a apresentação de importantes subsídios conceituais adicionais, a intenção foi a de já estabelecer o foco das análises e discussões, além de estimular os alunos a começarem a conjecturar acerca de possíveis soluções ou respostas.

### 5.1. Introduzindo convecção natural com auxílio de simulação numérica a calouros de Engenharia de Alimentos

O processo proposto envolvia o resfriamento de duas amostras de material de certa porosidade no interior de uma pequena câmara. Visando vincular o processo à experiência cotidiana dos calouros, as amostras foram identificadas como duas frutas enquanto que a câmara foi identificada como um compartimento de geladeira logo abaixo do freezer interno (foi considerado o modelo de geladeira em que o freezer superior não está separado do restante da câmara).

Primeiramente, a geometria da câmara foi definida como uma cavidade quadrada com  $L = 0.35$  m de lado. Foram feitas hipóteses referentes ao comportamento térmico das superfícies limitantes, sendo admitido que a base (superfície

horizontal inferior) e as paredes laterais (superfícies verticais) seriam adiabáticas, estando o topo (superfície horizontal superior) mantido a uma temperatura fria constante. Por simplicidade, as duas amostras foram tratadas como pequenos quadrados com  $L/5 = 0.07$  m de lado, estando inicialmente  $\Delta T = 10^\circ\text{C}$  acima da temperatura da superfície fria. A Figura 3 esquematiza a definição do caso proposto.

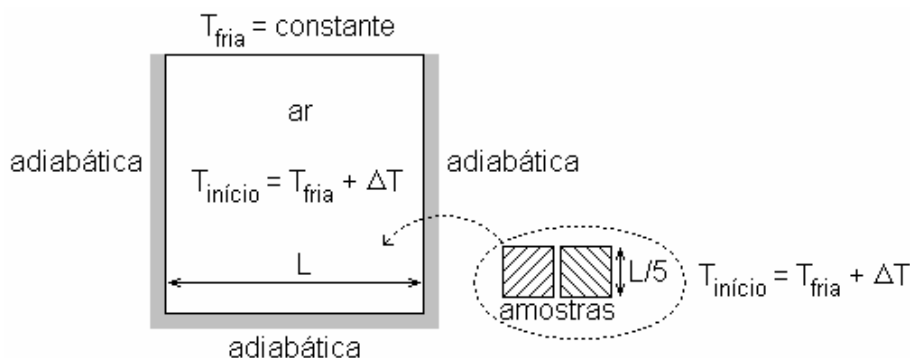


Figura 3. Geometria e condições físicas do problema de resfriamento proposto aos alunos.

Com o intuito de evidenciar o importante papel desempenhado pela convecção natural no processo, foi considerado que a câmara em si não estaria inicialmente fria (“a geladeira ainda não havia sido ligada”). Desse modo, a temperatura do ar interno no começo estaria maior que a temperatura da superfície fria superior. Especificamente e por simplicidade, foi admitida a mesma diferença inicial de temperatura  $\Delta T = 10^\circ\text{C}$  a ser apresentada pelas amostras (“frutas”) no instante de locação dentro da câmara. Cabia, pois, resfriar o ar interno em uma etapa preliminar a tal disposição das amostras.

Neste sentido, foi propositadamente simulada uma hipotética situação de resfriamento da câmara (sem as amostras) por um determinado intervalo de tempo, durante o qual o ar interno permaneceria *rigorosamente em repouso*. Em outras palavras, foi simulado um processo em regime transiente de transferência de calor por condução pura, recorrendo-se para tanto a um simulador numérico próprio para fenômenos de transporte em domínios bidimensionais preenchidos parcial ou totalmente por material poroso (Rabi e Mohamad, 2005). Elaborado em linguagem Fortran (padrão 95), tal simulador discretiza as equações governantes com base no método de volumes finitos, usando malhas computacionais desencontradas (*staggered grids*) e acoplamento pressão-velocidade pelo método SIMPLER (Patankar, 1980). Outras informações acerca do simulador podem ser encontradas em (Mohamad, 2003).

Conforme era esperado em função da baixa difusividade térmica do ar e da ausência de convecção, a “frente fria” acarretada pela presença do freezer (superfície superior fria) logrou pouca penetração ao interior da câmara no intervalo em questão, como mostra a distribuição final de temperatura na Fig. 4(a). Com ênfase ao caráter condutivo do processo de transferência de calor, este resultado foi amplamente explorado junto aos alunos, incluindo-se aí também o fato da propagação ter sido sempre paralela à superfície superior, em virtude de as paredes laterais serem adiabáticas. Para dar mais subsídios à discussão, foi exibido um breve vídeo ilustrando as correntes de convecção ascendentes, especialmente filmadas ao redor de uma pessoa (em perfil e supostamente mais quente que o ar circunvizinho).

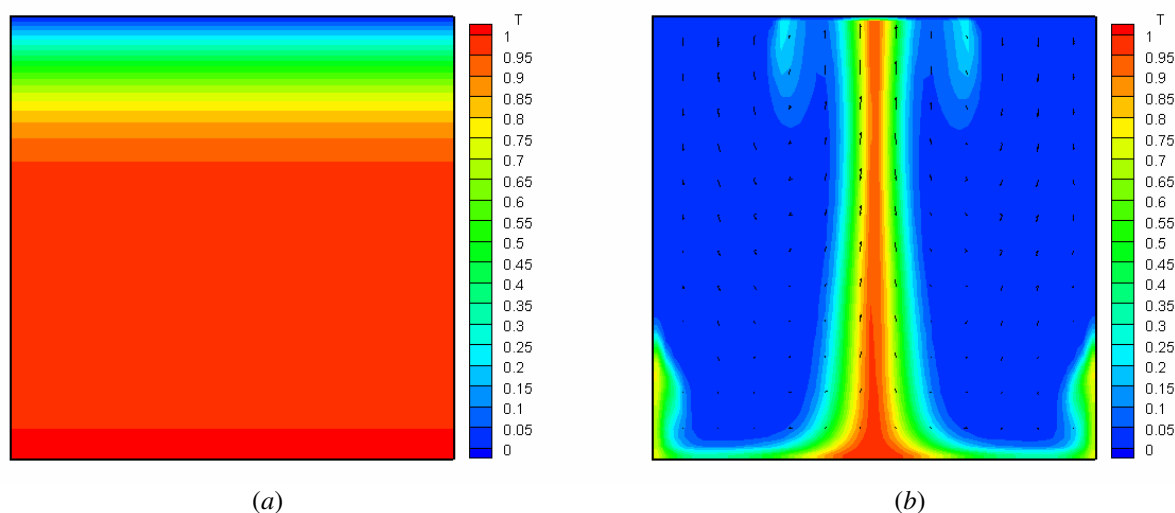


Figura 4. (a) Distribuição final de temperatura estabelecida no interior da câmara desprezando-se a convecção natural; (b) distribuição de temperatura na câmara, em dado instante intermediário, considerando-se a convecção natural.

Como contraponto, foi então simulado o resfriamento inicial da câmara, para o mesmo intervalo de tempo do caso anterior mas incluindo-se agora (no modelo e no simulador) a convecção natural, supondo regime laminar e escoamento incompressível. Conforme esperado, os resultados numericamente obtidos foram notavelmente diferentes a ponto de, ao final do intervalo, ter sido possível esfriar a câmara por completo, praticamente atingindo-se a temperatura da superfície superior fria em todos os pontos do domínio. Dentre os resultados decorrentes da incorporação da convecção natural, apresentados e discutidos junto aos alunos, vale destacar os seguintes:

- Ao contrário do que foi verificado para a transferência por condução, as correntes convectivas de ar implicaram em padrões irregulares de propagação da “frente fria”, como ilustrado na Fig. 4(b) para um instante intermediário; e
- Foram apresentadas e conceituadas as *linhas de corrente*, chamando-se a atenção durante as respectivas animações para o surgimento, tamanho, intensidade, orientação (sentido horário ou anti-horário), deslocamento e colapso de células de recirculação, como mostra a Fig. 5 no mesmo instante intermediário referente à Fig. 4(b).

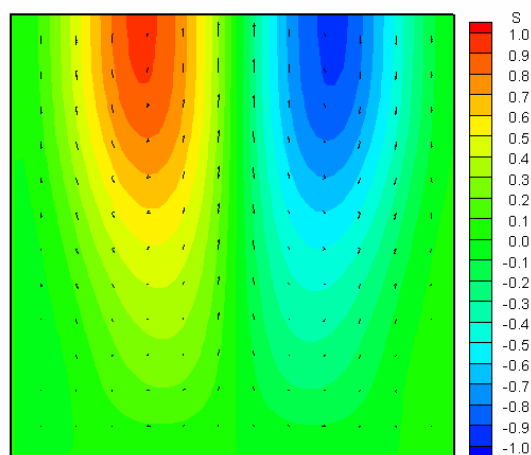


Figura 5. Linhas de correntes convectivas (com células de recirculação) na câmara, em dado instante intermediário.

Visando uma melhor compreensão e acompanhamento do processo, cabe ainda citar que tanto na apresentação das linhas de corrente como das distribuições de temperatura foi incluída a visualização do campo de velocidade, na forma dos respectivos vetores distribuídos em alguns pontos do domínio. Subsidiado pelos conceitos até aqui mencionados e discutidos, foi então proposto o problema de engenharia relacionado ao resfriamento das amostras, em particular, com relação ao posicionamento das mesmas no interior da câmara.

## 5.2. Aplicando simulação numérica para auxiliar a solução do problema proposto de resfriamento

No simulador numérico adaptado, as equações diferenciais governantes (continuidade, Navier-Stokes, energia) são implementadas e resolvidas sob a formulação adimensional, de modo que grupos adimensionais como os números de Reynolds, de Darcy, de Grashof e de Prandtl surgem naturalmente. A fim de simular o resfriamento transiente das amostras na câmara, foi adotado um modelo Darcy-Brinkmann-Boussinesq aplicado à convecção natural do ar, em regime laminar e escoamento incompressível. A exemplo do procedimento adotado em relação aos alunos, os detalhes referentes à modelagem matemática e ao método numérico serão aqui igualmente omitidos, recomendando-se ao leitor interessado consultar (Mohamad, 2003; Rabi e Mohamad, 2005).

Adicionalmente, no instante inicial admitiu-se que as amostras foram introduzidas na câmara com  $\Delta T = 10^\circ\text{C}$  acima da temperatura da superfície fria, encontrando-se o ar interior inicialmente estagnado e frio. Demais condições (também implementadas na forma adimensional) incluíram:

- Condição de aderência em todas as superfícies sólidas verticais e horizontais;
- Parede horizontal inferior e paredes verticais laterais adiabáticas (conforme já citado);
- Parede horizontal superior fria e isotérmica.

Admitindo-se que a câmara (“geladeira”) já se encontrava devidamente fria (à temperatura da superfície superior), foram propostas três configurações das amostras (“frutas”) em seu interior, como mostra a Fig. 6. Enfatizando-se que nas simulações seria considerado o mesmo intervalo de tempo, pediu-se aos alunos que classificassem as configurações quanto à eficiência no processo de resfriamento, definindo-se como mais eficiente a configuração que acarretasse na maior redução de temperatura das amostras ao final do período. Para tanto, foi entregue individualmente uma filipeta contendo tal questionamento, solicitando-se aos alunos que escrevessem “1” para mais eficiente, “2” para desempenho intermediário e “3” para pior desempenho (no espaço reservado entre parênteses ao lado de cada configuração).

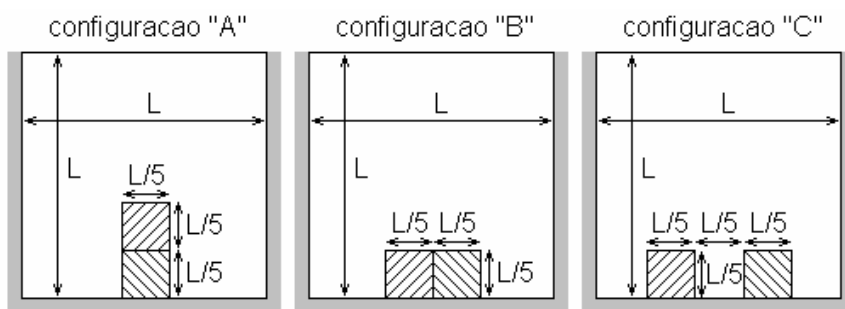


Figura 6. Três propostas para dispor as amostras no interior da câmara visando otimização de processo (em todos os casos, a disposição está horizontalmente centrada na base da câmara).

Após alguns minutos para reflexão (a troca de opiniões entre os calouros foi permitida, incentivada e, realmente, ocorreu), todas as filipetas com as respostas por escrito foram coletadas. A Tab. 2 apresenta a distribuição das respostas em função das possibilidades (arranjos). De imediato, é interessante notar a grande incidência sobre os dois arranjos (5 e 6) em que a configuração “C” possui melhor desempenho (total de  $39,5 + 48,8 = 88,3$  % das respostas recolhidas).

Tab. 2. Distribuição das respostas dadas por escrito pelos calouros ao problema proposto.

Arranjo	Desempenho de “A”	Desempenho de “B”	Desempenho de “C”	Nº de respostas	Percentual
# 1	melhor	intermediário	pior	1	2,3 %
# 2	melhor	pior	intermediário	1	2,3 %
# 3	intermediário	melhor	pior	2	4,7 %
# 4	pior	melhor	intermediário	0	0 %
# 5	intermediário	pior	melhor	17	39,5 %
# 6	pior	intermediário	melhor	21	48,8 %
Em branco				1	2,3 %
Total				43	100 %

Logo após a coleta das respostas, fez-se uma rápida apuração mediante manifestação espontânea (erguendo-se as mãos), quando realmente foi constatada a opção da grande maioria pelo melhor desempenho por parte da configuração “C”. Somente então foram apresentadas as animações resultantes da simulação numérica para cada configuração, tanto em termos de linhas de corrente com em termos de campos de temperatura. Para um mesmo período de resfriamento, a Fig. 7 mostra a distribuição de temperatura obtida ao final das simulações para cada configuração. Por inspeção visual, concordou-se entre os alunos que a configuração “C” foi a que de fato apresentou melhor desempenho (confirmando a expectativa da maioria), seguida pela configuração “A” e resultando a configuração “B” no pior resfriamento

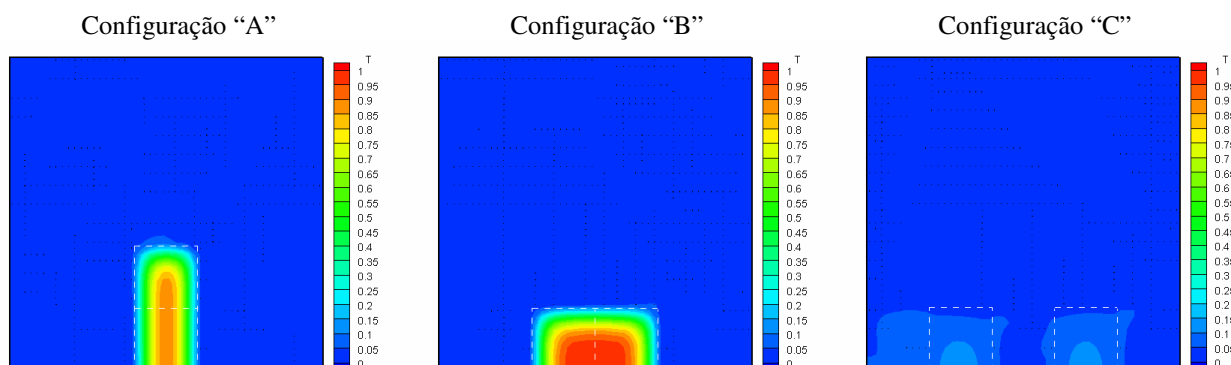


Figura 7. Distribuição de final de temperatura para cada uma das configurações (“A”, “B” e “C”) propostas.

Uma alegação consensual entre os alunos que responderam de acordo com os arranjos 5 ou 6 é a de que o melhor desempenho da configuração “C” se deveu a uma área exposta total maior, o que de fato é relevante para a transferência de calor. No entanto, cabe salientar que o arranjo 6 (configuração “B” com desempenho intermediário) teve um número



ligeiramente maior de apontamentos que o arranjo 5 (configuração “A” com desempenho intermediário). Uma possível explicação para tal divisão de opiniões quanto ao “2º colocado” pode estar relacionada com a negligência do próprio fato de que a configuração “A” possui maior área exposta além de sua maior proximidade à superfície superior fria.

## **6. Comentários finais**

Simulação numérica vem se tornando importante instrumento de projeto e otimização de processos e equipamentos. Na medida que são elaborados com base em modelos matemáticos abrangentes, os simuladores atuais têm sido capazes de tratar com rapidez e exatidão problemas de Engenharia realistas e, portanto, complexos. Uma recente tendência no desenvolvimento de tecnologia de ponta é a de conciliar de modo inteligente as metodologias diferentes de solução (analítica, experimental e numérica) na tentativa de se mais bem projetar e/ou otimizar projetos e equipamentos, o que tende a se configurar em vantagens em um mercado cada vez mais competitivo.

Oportunidades para familiarizar os graduandos com esta poderosa ferramenta (como foi permitido pela disciplina “ZEA0164 Introdução à Engenharia de Alimentos” do curso de Engenharia de Alimentos da FZEA/USP) são sempre bem-vindas e devem ser exploradas ao máximo. O uso de simulação numérica no ensino de Fenômenos de Transporte pode ser particularmente interessante na medida que os pós-processadores modernos permitem uma visualização ímpar dos campos de velocidade, temperatura, pressão, concentração ou de outra grandeza (intensiva) de interesse.

Atividades auxiliadas por simulação numérica podem complementar e beneficiar não apenas a teoria exposta tradicionalmente em salas de aula mas também as atividades práticas desenvolvidas em laboratório didático. Poder-se-ia ir além e propor que as atividades experimentais junto com aquelas realizadas em laboratório computacional didático poderiam compor uma dada disciplina (ou uma seqüência de disciplinas, conforme a quantidade e/ou afinidade), por exemplo, denominada “Laboratório de Fenômenos de Transporte”.

Por sua vez, se a teoria relacionada à Mecânica dos Fluidos (ou aos Fenômenos de Transporte de um modo geral) exige dos alunos uma certa maturidade acadêmica, por outro lado, compete ao professor sempre que possível reduzir este “abismo” que os separa dos conhecimentos físicos e matemáticos necessários. O trabalho aqui relatado aponta para uma possível rota neste sentido, qual seja, a de evocar e de trabalhar com fenômenos extraídos do cotidiano dos alunos, deixando-se para um momento (ou disciplina) posterior o estudo e aplicação técnica / tecnológica dos mesmos.

## **7. Agradecimentos**

O primeiro autor é grato ao Prof. Dr. Paulo José do Amaral Sobral, docente responsável pela disciplina “ZEA0164 Introdução à Engenharia de Alimentos”, pelo convite para ministrar a atividade didática aqui relatada, em colaboração à disciplina supracitada assim como pelo aceite do tema então sugerido (“Simulação de Processos”).

Na medida que a atividade relatada também colaborou para a familiarização do segundo autor ao simulador sob adaptação conforme projeto de pesquisa aprovado, o primeiro autor agradece à FAPESP – Fundação de Amparo à Pesquisa do Estado de São Paulo pelo apoio financeiro referente ao processo 2005/02538-1.

## **8. Referências**

- Arora, V. K., 2004, “Engineering a quality global organization: integration of business and engineering paradigms”, Proceedings of the WCETE 2004 – World Congress on Engineering and Technology Education, Santos, Brasil, pp. 325-329.
- Brasil, 2002, Resolução CNE/CES nº 11 de 11 de março de 2002, “Institui diretrizes curriculares nacionais do curso de graduação em engenharia”, Diário Oficial da União, Brasília, Brasil.
- Brunello, G., 1978, “Prefácio à edição brasileira”, In: Bennett, C. O. and Myers, J. E., “Fenômenos de transporte: quantidade de movimento, calor e massa”, Makron Books do Brasil Editora Ltda., São Paulo, Brasil.
- Collis, B., 1998, “New didactics for university instruction: why and how?”, Computers & Education, vol. 31, pp. 373-393.
- da Silva, C. R. I., Mansur, S. S., Vieira, E. D. R., 2005, “Flow around spheres: a didactic experiment”, Proceedings of the 18th International Congress of Mechanical Engineering, Ouro Preto, Brasil, paper COBEM2005-1269.
- Gad-El-Hak, M., 1997, “The last conundrum”, editorial precedente a George, W. K. and Castilho, L., “Zero-pressure-gradient turbulent boundary layer”, Applied Mechanics Reviews, vol. 50, n. 12, part 1, pp. 1-6.
- Gad-El-Hak, M., 1998, “Fluid mechanics from the beginning to the third millennium”, International Journal of Engineering Education, vol. 14, pp. 177-185.
- Garcia, C., 2005, “Modelagem e simulação de processos industriais e de sistemas eletromecânicos”, 2ª edição, EDUSP – Editora da Universidade de São Paulo, São Paulo, Brasil.
- GRAF – Grupo de Reelaboração do Ensino de Física, 2001, “Física 1 – Mecânica”, 7ª edição, EDUSP – Editora da Universidade de São Paulo, São Paulo, Brasil.
- Maliska, C. R., 1995, “Transferência de Calor e Mecânica dos Fluidos Computacional”, LTC – Livros Técnicos e Científicos Editora S.A., Rio de Janeiro, Brasil.

- Mohamad, A. A., 2003, "Heat transfer enhancements in heat exchangers fitted with porous media. Part I: constant wall temperature", *International Journal of Thermal Sciences*, vol. 42, pp. 385-395.
- Patankar, S.V., 1980, "Numerical Heat Transfer and Fluid Flow", Hemisphere Publishing Corp., New York, USA.
- Rabi, J. A., Mohamad, A. A., 2005, "Radon-222 exhalation rates from phosphogypsum-bearing embankment subjected to constant temperature and fixed activity concentration", *Journal of Porous Media*, vol. 8, pp. 175-191.
- Scott, G., Richardson, P., 1997, "The application of computational fluid dynamics in the food industry", *Trends in Food Science and Technology*, vol. 8, pp. 119-124.
- Wang, L., and Sun, D. W., 2003, "Recent developments in numerical modelling of heating and cooling processes in the food industry – a review", *Trends in Food Science and Technology*, vol. 14, pp. 408-423.

## **10. Direitos autorais**

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

### **INTRODUCING NATURAL-CONVECTION CHILLING TO FRESHMEN OF A FOOD ENGINEERING COURSE: CASE STUDY AIDED BY NUMERICAL SIMULATION**

José Antonio Rabi

Faculty of Animal Sciences and Food Engineering, University of São Paulo  
Av. Duque de Caxias Norte, 225, Pirassununga, SP, 13635-900, Brazil  
jrabi@fzea.usp.br

Rodrigo Bueno Cordeiro

Faculty of Animal Sciences and Food Engineering, University of São Paulo  
Av. Duque de Caxias Norte, 225, Pirassununga, SP, 13635-900, Brazil  
rod.bueno@yahoo.com.br

Alessandra Lopes de Oliveira

Faculty of Animal Sciences and Food Engineering, University of São Paulo  
Av. Duque de Caxias Norte, 225, Pirassununga, SP, 13635-900, Brazil  
alessandra@fzea.usp.br

#### **Abstract**

The present work reports an activity conducted in a freshmen classroom of the Food Engineering under-graduation course offered at the Faculty of Animal Sciences and Food Engineering, University of São Paulo, Pirassununga campus. Introduction and discussion of basic concepts of natural convection were among the goals of such activity, which was divided into steps. Initially, process and equipment modeling and simulation were briefly presented towards the food engineering industry. Bearing in mind natural-convective processes, a chilling situation involving two porous material samples was then proposed. Identified as two fruits, such samples were initially hot and placed inside a small chamber, which was in turn identified as a compartment inside a built-in-freezer refrigerator. In order to place the two samples, three different configurations were suggested so that each student was asked (by means of a simple direct question) to order those configurations with respect to the quenching efficiency, i.e., with regard to the ability to chill both samples as fast as possible. The student's written answers to the question were collected prior to the last activity step which invoked a numerical simulator for transport phenomena within domains fully or partially filled up with porous matrix. Such simulator was used to help visualize and discuss the chilling effects regarding each distinct configuration. Among all possible combinations, answer distribution is presented and analyzed in the light of freshmen's scholar background as well as based on the way natural convection concepts were introduced.

**Keywords:** natural convection, refrigeration, numerical simulation, food engineering, engineering education