



INTEGRAÇÃO DE SIMULAÇÃO COMPUTACIONAL EM UM CURSO DE ENGENHARIA MECÂNICA

DOI: 10.37702/2175-957X.COBENGE.2022.3801

João de Sá Brasil Lima - joao.brasil@maua.br
Instituto Mauá de Tecnologia

Joseph Youssif Saab Junior - saab@MAUA.BR
Instituto Mauá de Tecnologia

Marcelo Otávio dos Santos - marcelo.santos@maua.br
Instituto Mauá de Tecnologia

Bruno Galelli Chieriegatti - bruno.chieriegatti@maua.br
IMT Instituto Mauá de Tecnologia

Resumo: Com a facilidade de acesso a hardwares com grande capacidade de processamento, a utilização de ferramentas CAE para a resolução de problemas de engenharia vem se tornando corriqueira e com demanda crescente no mercado. Logo, os alunos de graduação devem ser capacitados de maneira adequada para estarem preparados para essa evolução. Assim, os docentes do Instituto Mauá de Tecnologia (IMT) propuseram uma inserção da utilização desses softwares na base curricular do curso, integrando diversas disciplinas da área de Estruturas, Mecânica Vibratória, Energia e Fluídos. Definiu-se uma sequência de aprendizado a partir do quarto ano do curso, onde ao longo dos meses um tema era apresentado com algum exemplo de simulação computacional, utilizando como base o software ANSYS. Os resultados imediatos dessa implementação foram um aumento no número de interessados em se aprofundar na ferramenta, bem como a melhoria na qualidade dos temas propostos em trabalhos de conclusão do curso, que utilizam esses recursos no seu desenvolvimento.

Palavras-chave: CAE, Simulação Numérica, Ensino em Engenharia Mecânica



INTEGRAÇÃO DE SIMULAÇÃO COMPUTACIONAL EM UM CURSO DE ENGENHARIA MECÂNICA

1 INTRODUÇÃO

De modo a manter um curso atualizado e em linha com o que o mercado demanda, o ensino de engenharia deve abordar as tecnologias empregadas na indústria, sendo este um dos maiores desafios contemporâneos na montagem de um curso de graduação em engenharia (BARBOSA, 2014). Uma tecnologia altamente empregada é a Engenharia Assistida por Computador, ou *Computer Aided Engineering* (CAE). Em linhas gerais, essa tecnologia engloba diversos sistemas que são utilizados para análise e resolução de problemas de engenharia, dos mais simples ao mais complexos e com os mais distintos fenômenos físicos. Uma vantagem desse tipo de análise é que, embora ela não descarte a necessidade de ensaios experimentais, pode reduzir a quantidade destes e ampliar significativamente o conhecimento sobre os fenômenos envolvidos, o que acarreta melhores produtos, redução de custos e encurtamento significativo do ciclo de desenvolvimento de produtos, objetivos sempre almejados na indústria. Tradicionalmente, no entanto, dada a complexidade das técnicas de simulação de maior ordem, a Indústria que utiliza CAE tem tido que investir na preparação de engenheiros recém-formados por bastante tempo até que eles possam empregar a técnica de forma apropriada e sejam capazes de produzir resultados práticos e confiáveis. Com o intuito de diferenciar seu currículo de Engenharia Mecânica e aumentar a empregabilidade do engenheiro(a) recém-formado(a) no Curso, o NDE optou por integrar o ensino de simulação computacional nas bases do seu curso. Como trata-se de uma ferramenta transdisciplinar e os fenômenos estudados envolvem, geralmente, mais de um tipo de análise física, a integração da simulação computacional de forma sistêmica em um curso torna-se um projeto desafiador. Este trabalho tem como objetivo apresentar a integração do ensino de simulação computacional implementada no curso de Engenharia Mecânica do Instituto Mauá de Tecnologia (IMT) que abarcou diferentes disciplinas de forma coordenada e sequencial. Como resultado dessa ação, observou-se um aumento do interesse dos estudantes pelo tema, refletindo-se no aumento do número de trabalhos de conclusão de curso (TCCs) e de iniciações científicas (ICs) que empregam simulação e na demanda dos próprios estudantes para que fosse criada uma disciplina eletiva, na última série, para aprofundar sua capacidade de análise numérica de fenômenos.

2 METODOLOGIA

Neste trabalho, será apresentado o caminho empregado pelos professores para ser seguido pelos estudantes para o aprendizado de simulação computacional. Para a montagem desse caminho, levou-se em conta uma série de fatores que serão apresentados a seguir. Dentre esses fatores, estão as competências estabelecidas nas novas Diretrizes Curriculares Nacionais (DCNs) de Engenharia (MEC, 2019). Assim, o ponto de partida da montagem desse caminho foi analisar quais competências que serão desenvolvidas nos(as) estudantes. Dentre as competências constantes nas DCNs, as que serão desenvolvidas pelos estudantes nesse caminho são:

II - analisar e compreender os fenômenos físicos e químicos por meio de modelos simbólicos, físicos e outros, verificados e validados por experimentação:

- a) ser capaz de modelar os fenômenos, os sistemas físicos e químicos, utilizando as ferramentas matemáticas, estatísticas, computacionais e de simulação, entre outras.*
- b) prever os resultados dos sistemas por meio dos modelos;*
- c) conceber experimentos que gerem resultados reais para o comportamento dos fenômenos e sistemas em estudo.*
- d) verificar e validar os modelos por meio de técnicas adequadas;*

III - conceber, projetar e analisar sistemas, produtos (bens e serviços), componentes ou processos:

- a) ser capaz de conceber e projetar soluções criativas, desejáveis e viáveis, técnica e economicamente, nos contextos em que serão aplicadas;*
- b) projetar e determinar os parâmetros construtivos e operacionais para as soluções de Engenharia;*

Após esta primeira etapa, é necessário definir quais disciplinas sediarão esse caminho. Dentro da grade curricular do curso de Engenharia Mecânica do Instituto Mauá de Tecnologia, no terceiro e quarto anos do Curso as disciplinas são específicas da área de Engenharia Mecânica. Dentre aquelas cujos fenômenos podem ser estudados por meio de simulações, a maioria consiste em disciplinas de ciência fundamental de engenharia como, por exemplo, Termodinâmica, Mecânica dos Fluidos, Transferência de Calor, Resistência dos Materiais, Mecânica das Estruturas e Mecânica Vibratória. Desse modo, optou-se por implementar a trilha de aprendizagem a partir do quarto ano, uma vez que os estudantes dessa série já terão cursado todas as disciplinas fundamentais o que possibilitará um correto uso de softwares de simulação. A seguir serão apresentadas as disciplinas envolvidas e a sequência da montagem da estratégia de aprendizagem.

2.1 Disciplinas Envolvidas

As disciplinas do quarto ano (penúltima série) envolvidas nessa trilha são as seguintes:

- Transferência de Calor II
- Mecânica dos Fluidos II
- Máquinas de Fluxo
- Método dos Elementos Finitos
- Mecânica Vibratória

Essas disciplinas foram escolhidas pois nelas são tratados fenômenos que comumente são abordados na indústria por meio de simulações. Uma vez que o software utilizado é o pacote ANSYS ® e as ferramentas de análise contidas neste pacote são para problemas que envolvem análise estrutural estática e dinâmica, fluidodinâmica e eletromagnetismo, foram escolhidas as disciplinas da grade curricular que contemplam os dois primeiros assuntos.

2.2 Escolha dos Temas

Para a escolha dos temas, levou-se em consideração as etapas que os estudantes devem passar para a realização de uma simulação. São elas:

- Modelagem do problema: nesta etapa, prévia ao uso do software, devem ser definidos quais os fenômenos de interesse, as condições de contorno do problema e as variáveis de entrada e de saída.
- Geração da geometria: nesta etapa, na qual é iniciado o uso do software, a geometria é gerada em um software CAD (*Computer Aided Design*) e tratada de modo a se tornar adequada para a geração subsequente de uma malha computacional, que é uma discretização da geometria.
- Geração da malha: aqui a malha é gerada a partir da geometria desenvolvida na etapa anterior e sua qualidade é controlada para ser coerente com a física a ser modelada e os resultados que se pretende obter.
- Setup: esta é a etapa de modelagem física do processo, onde as equações pertinentes aos fenômenos são acionadas, as propriedades são definidas e as equações necessárias para o fechamento matemático do problema são estabelecidas (e.g. modelagem de turbulência, tipo de interação entre as fases em escoamentos multifásicos, etc.). Aqui também são selecionados os parâmetros matemáticos para os métodos de discretização das equações e o seu eventual acoplamento durante a solução.
- Solução: esta é a etapa em que o algoritmo de solução selecionado (*solver*) irá realizar as iterações necessárias das variáveis de cálculo, até a convergência do problema, com base no critério estabelecido pelo usuário. Como a convergência nem sempre é obtida, a solução é frequentemente iterada até a estabilização de algum parâmetro físico de controle.
- Pós processamento: aqui os resultados são analisados e podem ser gerados arquivos, tabelas, gráficos, imagens e animações que são utilizados para se compreender em maior profundidade o fenômeno, identificar pontos críticos, propor melhorias e compartilhar resultados.

Um bom processo de análise numérica sempre envolve também uma etapa posterior de verificação e validação dos resultados apresentados (OBERKAMPF, 2012).

Para que o aprendizado dos estudantes em cada uma das etapas fosse eficaz, os professores elencaram quais os tópicos, das suas respectivas disciplinas, eram passíveis de ter algum estudo de caso com simulação. Em seguida, analisou-se a complexidade de cada um dos tópicos para ver qual seria a sequência de casos para os estudantes realizarem em aula e/ou fora dela. A intenção, com isso, era fazer cada estudante enxergar a tecnologia de simulação da forma que ela é, uma ferramenta transdisciplinar, ou seja, não restrita a uma única disciplina e com interfaces em diferentes áreas da engenharia mecânica. Considerando as etapas apresentadas, os professores identificaram os seguintes tópicos nas suas disciplinas como passíveis de serem tratados, também, via simulação.

- Transferência de Calor II
 - Condução unidimensional
 - Convecção forçada interna
 - Condução e convecção associadas – trocador de calor de fluxo paralelo

- **Mecânica dos Fluidos II**
 - Visualização de Escoamentos.
 - Conservação da Massa ("sala limpa" ou "misturador em T").
 - Conservação da Quantidade de Movimento, com introdução à turbulência (RANS).
 - Simulação ao redor de aerofólios.
 - Interação Fluido Estrutura (esteira de vórtices de Von Kármán e transformada rápida de Fourier - FFT).
 - Escoamento compressível.
- **Máquinas de Fluxo**
 - Simulação do escoamento em bomba hidráulica de fluxo
 - Simulação do escoamento em ventilador axial
 - Simulação do escoamento em compressor centrífugo
- **Método dos Elementos Finitos**
 - Análise estática e de flambagem em treliças sujeitas a esforços de tração e compressão (Elemento 1D)
 - Análise estática de estrutura de membrana com concentrador de tensões sujeita a esforços trativos (Elemento 2D)
 - Análise de contatos mecânicos não lineares em mancal de deslizamento sujeito a esforços de flexo-torção (Elemento 3D)
 - Análise de geração de calor por atrito mecânico e dilatação térmica em componentes de máquinas (Elemento 3D)
 - Análise de tensões principais e concentradores de tensões em vasos de pressão segundo a ASME VIII
 - Análise de fadiga de alto ciclo.
- **Mecânica Vibratória**
 - Análise modal em viga simples engastada
 - Análise modal de pórtico espacial
 - Vibração forçada com e sem base oscilante em estrutura espacial

3 RESULTADOS

3.1 Montagem do Caminho

Com a relação de tópicos elaborada, o próximo passo consistiu em definir a melhor sequência para que essas simulações fossem apresentadas aos alunos de forma lógica, sem se preocupar com qual disciplina iria realizar cada simulação posto que a ideia central era elaborar um caminho sem as tradicionais barreiras de disciplinas. Após a elaboração do caminho, que está apresentado na Tabela 1, abaixo, cada professor pôde elaborar o cronograma de aulas de cada uma das disciplinas já levando em consideração a sequência proposta.

Tabela 1- Estrutura do caminho proposto

Simulações Realizadas								
Disciplina	Mês 1	Mês 2	Mês 3	Mês 4	Mês 5	Mês 6	Mês 7	Mês 8
Transferência de Calor II	Condução de Calor	Convecção Interna Condução e Convecção Associadas		Convecção Natural			Simulação de um Trocador de Calor	
Mecânica dos Fluidos II		Simulação de Conservação de Massa		Simulação da Quantidade de Movimento em Regime Permanente com Modelagem de Turbulência (RANS)	Simulação ao Redor de Aerofólios		Simulação do Escoamento ao Redor de um Cilindro	Simulação de Escoamento Compressível em Bocais
Método dos Elementos Finitos			Análise estática e de flambagem em treliças sujeitas a esforços de tração e compressão (Elemento 1D) Análise estática de estrutura de membrana com concentrador de tensões sujeita a esforços trativos (Elemento 2D)	Análise de contatos mecânicos não lineares em mancal de deslizamento sujeito a esforços de flexo-torção (Elemento 3D)	Análise de geração de calor por atrito mecânico e dilatação térmica em componentes de máquinas (Elemento 3D)	Análise de tensões principais e concentradores de tensões em vasos de pressão segundo a ASME VIII	Análise de fadiga de alto ciclo	
Mecânica Vibratória					Análise modal em viga simples engastada		Análise modal de pórtico espacial	Vibração forçada com e sem base oscilante em estrutura espacial
Máquinas de Fluxo							Simulação de uma Bomba Hidráulica Simulação de um Ventilador Axial	Simulação de um Compressor Centrífugo

Fonte: elaborada pelos autores

A primeira simulação escolhida foi a de condução de calor unidimensional uma vez que os alunos já haviam aprendido este conteúdo teórico anteriormente e pelo fato de, antes de realizarem a simulação foi feito um ensaio experimental do fenômeno. Assim, logo na primeira simulação do caminho os estudantes aprenderam um conceito importante relacionado à simulação computacional que é o de validação do modelo numérico, quando os resultados de uma análise computacional são confrontados com dados experimentais para verificar a aderência da simulação ao fenômeno físico. Além disso, este caso é o mais simples que pôde ser simulado, dentre os problemas de fluidodinâmica, uma vez que ele resolve apenas uma equação, a da energia, pois não há escoamento de fluido nesse caso.

Após a primeira simulação, onde os estudantes têm contato com as etapas descritas na seção 2.2, as demais simulações realizadas aumentam, gradativamente o grau de complexidade. Entretanto, a cada nova simulação os estudantes repassam todas as etapas o que torna esse caminho, também, um método estruturado de treinamento de simulação computacional.

3.2 Ferramenta adotada

A ferramenta adotada no IMT foi o conjunto de softwares da ANSYS®, com capacidade de análise nas áreas de Mecânica dos Sólidos, Mecânica dos Fluidos e Transferência de Calor. A ferramenta apresenta solvers baseados em volumes finitos (*Fluent®*), elementos finitos (*Mechanical*) e híbridos (*CFX®*). Após ter passado alguns anos com um número limitado de licenças desse conjunto, a implantação do projeto na Engenharia Mecânica foi amparada por um investimento da Instituição que permitiu fazer um upgrade para o *ANSYS Campus Solution®*, que inclui 100 licenças estudantis e todos os softwares de simulação da ANSYS, incluindo as áreas de material, eletricidade e eletromagnetismo. Além disso, a Instituição também adquiriu 10 licenças plenas de pesquisa e licença para uso de computação paralela, permitindo também o

desenvolvimento de pesquisa mais avançadas e a formação de colaborações com outras Instituições de Pesquisa.

3.4 Impactos no Curso

Inicialmente, analisando sobre a ótica das DCNs, através da implantação coordenada das ferramentas de simulação e seleção apropriada dos tópicos de estudo inseridos em diversas disciplinas da área de Energia e Fluidos e de Mecânica dos Sólidos, foi possível oferecer aos estudantes oportunidades reais de análise e compreensão de fenômenos por meio de modelagem, na aprendizagem de tópicos como condução de calor, conservação da massa, conservação da quantidade de movimento, interação fluido-estrutura, cálculo de deslocamentos, deflexões e deformações, etc.

Uma vez que os estudantes são orientados a realizar as práticas de verificação e de validação dos modelos iniciais realizados, eles podem também prever novos resultados em torno da região de solução validada. O processo de validação também leva ao desenvolvimento de modelos mais sofisticados. Um processo apropriado de análise das soluções numéricas obtidas, por sua vez, permite o refinamento de componentes ou sistemas completos.

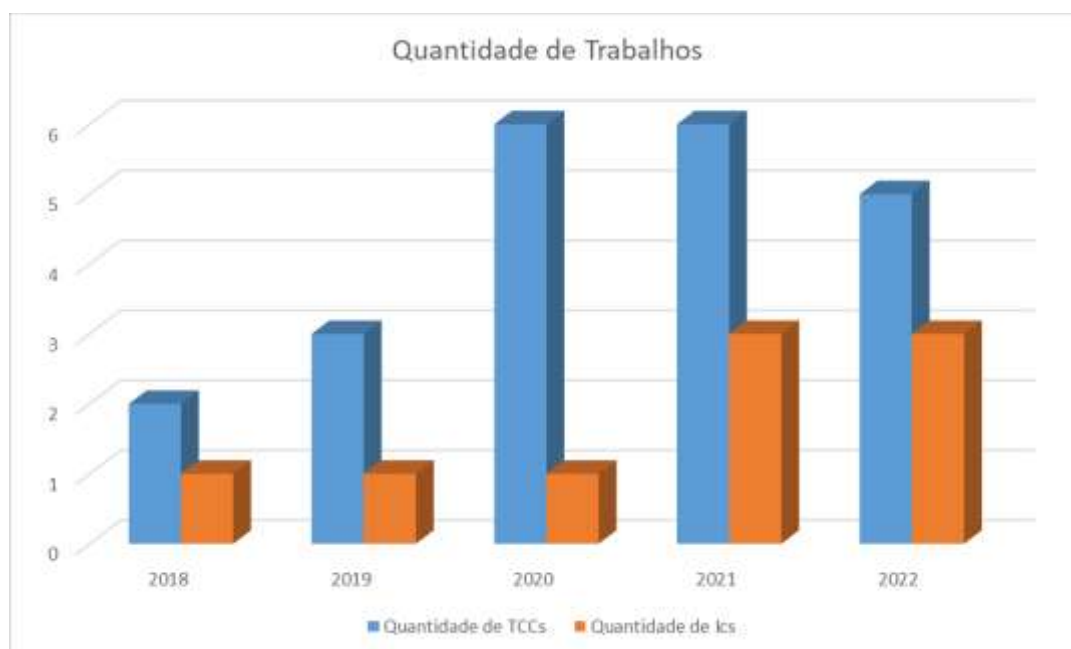
Após a implantação do caminho proposto, o interesse dos estudantes pela área de simulação tem aumentado, bem como o desejo de explorar mais as ferramentas. Assim, atendendo a pedidos de estudantes foi criada uma disciplina eletiva para a última série intitulada "Simulação Computacional em Engenharia Mecânica" que é uma continuidade do caminho proposto para quem desejar se aprofundar na área. Nesta disciplina eletiva, no primeiro semestre são tratados temas de dinâmica dos fluidos computacional enquanto no segundo semestre são tratados temas de mecânica dos sólidos computacional. A disciplina passou ainda a apresentar caráter extensionista a partir do envolvimento de uma importante indústria de misturadores/agitadores para processos químicos, que fornece pré-requisitos reais para o desenvolvimento de equipamentos e acompanha e estimula a competição entre equipes de estudantes, que realizam completamente o projeto do equipamento proposto e submetem os resultados (indicadores provenientes das simulações) ao departamento de engenharia da empresa.

Outras duas disciplinas eletivas do Curso oferecidas na última série, também empregam simulações de CFD (*Computational Fluid Dynamics*) e de Mecânica dos Sólidos. Na primeira disciplina, intitulada Projeto Básico de Aeronaves, simulações são utilizadas no projeto de aeronaves, que também contam com o acompanhamento de uma indústria aeronáutica. Já na segunda, denominada Tópicos em Bioengenharia, as simulações de CFD são utilizadas para análise de escoamento de sangue em estruturas biológicas enquanto as simulações de mecânica dos sólidos são empregadas para análise do comportamento mecânico de próteses e dispositivos de reabilitação.

Outra medida do efeito positivo da implantação deste caminho foi o crescimento de trabalhos de conclusão de curso (TCCs) e iniciações científicas relacionados à simulação computacional, com o consequente aumento do número de publicações em eventos científicos, por parte dos estudantes, relacionadas aos TCCs e iniciações científicas, como mostrado na

Figura 1:

Figura 1 – Evolução do Número de Trabalhos de Conclusão de Curso e Iniciação Científica ao Longo dos Anos



Fonte: elaborado pelos autores

Outra importante consequência foi notar os primeiros estudantes estagiando na área de simulação e os formandos sendo procurados pela indústria para atuar nessa área específica, como era esperado.

4. Considerações Finais

Com o aumento do interesse dos alunos pelo uso da ferramenta, conclui-se que a inserção de simulação computacional no curso de Engenharia Mecânica do Instituto Mauá de Tecnologia tem sido bem-sucedida, uma vez que o aumento do interesse dos estudantes faz com que eles se tornem usuários frequentes de softwares de simulação. Esse aumento do interesse foi visto no crescimento da quantidade de trabalhos de conclusão de curso e iniciações científicas e na escolha de disciplinas eletivas, na última série, que empreguem simulação computacional. Além disso, o aumento da empregabilidade dos estudantes tornou-se evidente nas indústrias/empresas que empregam essa tecnologia. Desse modo, conclui-se que a ação apresentada neste artigo torna, nesse quesito, o curso de Engenharia Mecânica do IMT ainda mais alinhado com as demandas de mercado posto que cada vez mais indústrias utilizam simulação no dia a dia.

AGRADECIMENTOS

Os autores agradecem ao Instituto Mauá de Tecnologia pelo suporte às atividades de ensino e pelo suporte, incentivo e capacitação para realizar ações didáticas inovadoras nas disciplinas.

REFERÊNCIAS

BARBOSA, Eduardo, F.; MOURA, Dácio, G.: Metodologias Ativas de Aprendizagem no Ensino de Engenharia. In: XIII International Conference on Engineering and Technology Education, 2014, Guimarães, Portugal. **Anais**. Guimarães. Disponível em: <http://copec.eu/intertech2014/proc/works/25.pdf> . Acesso em 15 abr. 2022



MEC – Ministério da Educação e Cultura. Conselho Nacional de Educação. (2019) Câmara de Educação Superior. Diretrizes Curriculares para os cursos de engenharia. Resolução CNE/CES nº 2.

OBERKAMPF, William L.; Roy, Christopher J.: Verification and Validation in Scientific Computing. Cambridge University Press, 2012.

INTEGRATION OF CAE TOOLS IN A MECHANICAL ENGINEERING UNDERGRADUATE COURSE

Abstract: *The increased accessibility to high-performance computing hardware has resulted in a higher rate of adoption and deployment of CAE tools in the industry. As a result, undergraduate students should be adequately trained to perform simulation tasks and yield consistent results from such tools. The text summarizes a project undertaken at the Mechanical Engineering Department at Maua Institute of Technology (IMT), which restructured the curricular base of the program by integrating the courses of Structures, Vibrations and Energy and Fluids with the use of simulation tools. The learning sequence displays increasing complexity and was coordinated by all involved faculty. The first results yielded by the project are a significant increase in the number of undergraduate research projects and capstone projects involving simulation, a greater understanding of the underlying phenomena involved and an increased attractiveness of senior year and graduate students for Industry.*

Keywords: CAE, Numerical Simulation, Mechanical Engineering Learning.

