

APRENDIZAGEM EM ENGENHARIA UTILIZANDO MÉTODOS ANALÍTICOS E NUMÉRICOS

Jovani Castelan,¹ Alexandre Milanez,² Daniel Fritzen³

RESUMO

Este artigo relata a abordagem de conceitos básicos da Engenharia Mecânica e a simulação computacional de problemas baseados nesses conceitos. Os conteúdos estão relacionados com: a) modelagem de objetos em três dimensões, utilizando sistema CAD – sigla em inglês para Projeto Auxiliado por Computador; b) análise e validação de peças e produtos via Engenharia Auxiliada por Computador (CAE); e c) conceitos fundamentais de estática e de resistência dos materiais. O desenvolvimento do componente curricular de Desenho e Manufatura Auxiliado por Computador acontece no 7º semestre do curso de Engenharia Mecânica da Faculdade SATC, de Criciúma/SC, Brasil. A disciplina aborda a confecção 3D de estruturas e a verificação de seu comportamento quando da aplicação de forças externas estáticas, bem como a sua validação analítica e numérica. No desenvolvimento das aulas, nota-se que os alunos apresentam dificuldade nos processos analíticos, os quais se caracterizam por processos manuais de cálculo. Por esse motivo, a tendência é que os educandos transponham tais processos manuais e passem diretamente à simulação numérica realizada por *software* específico. O desafio, nesse caso, é demonstrar que a utilização de simuladores é benéfica, a partir do momento em que se tenha apreendida uma base científica fundamentada em processos analíticos, para que se realize os procedimentos adequados, se insiram dados válidos, seja feita a interpretação correta dos resultados apresentados pelo *software* e, ainda, que se tenha a possibilidade de uma contra-prova, para autenticar esses resultados.

Palavras-chave: CAD; CAE; analítico; simulação; aprendizagem; ensino.

ABSTRACT

LEARNING IN ENGINEERING USING ANALYTICAL AND NUMERICAL METHODS

This paper report the basic concepts of Mechanical Engineering and the computational simulation of problems based on this concepts. The contents are related with the following topics: a) 3D object modeling using CAD system; analysis and validation of pieces and products via Computer Aided Engineering (CAE) and c) fundamentals concepts of static and materials resistance. The development of curricular component related to Computer Aided Design and Manufacture occurs in the seventh semester of Mechanical Engineering Course, offered by Faculdade SATC, from Criciúma, Santa Catarina State, Brazil. Addresses the 3D structures modeling and behavior proofing them when are applied external static powers, making analytics and numerical validation. As from classes' development, we can observe that students bring forward difficulties in the analytics processes, which are characterized by manual methods. Thence, there are a trend which the students skip this ones to go straight to numerical simulation, on specific software. The challenge, in this case, it's to evidence that use of simulators is beneficial from the moment in which the student already has a scientific basis learned, based on analytics process, to making the proper procedures, correct data insertion and results interpretation, shown by software and withal that exist the possibility of a retest, to authenticate this results.

Keyword: CAD; CAE; analytics; simulation, learning, teaching.

1 Coordenador de Ensino da Faculdade SATC, pós-doutor em Engenharia pelo PPGE3M/UFRGS; jovani.castelan@satc.edu.br

2 Professor do curso de Engenharia Mecânica da Faculdade SATC. Doutor pelo PPGE3M/UFRGS; alexandre.milanez@satc.edu.br

3 Professor dos cursos de Engenharia Mecânica e Manutenção Industrial da Faculdade SATC, Doutorando do PPGE3M/UFRGS; daniel.fritzen@satc.edu.br

INTRODUÇÃO

No início dos anos de 1960, o estudante de doutorado do MIT, Ivan Sutherland, desenvolveu o primeiro *software* interativo de CAD 2D, nomeado “Sketchpad”. A partir desse marco, muitas pesquisas acadêmicas e o uso comercial da ferramenta foram ampliados na área, permitindo a engenheiros e *designers* evoluírem para métodos digitais de representação gráfica. Essa evolução resultou em uma grande variedade de ferramentas digitais que impactam diretamente nas atividades profissionais e na prática de desenvolvimento de produtos (EVANS *et al.*, 2015).

Nos anos de 1980, foram desenvolvidos os sistemas de CAD (*Computer Aided Design*) comerciais, tais como o Autodesk AutoCAD, para desenho 2D, e o PTC Pro-Engineer, para modelagem 3D. Atualmente, esses e muitos outros sistemas CAD estão sendo largamente utilizados na engenharia, no *design* e na manufatura, incluindo modelagem geométrica, análise estrutural e de movimentos, usinagem CNC e prototipagem rápida (XUE, 2005).

Relacionando CAD e educação, existe um considerável interesse na aprendizagem dessa tecnologia dentro das universidades, assim como na indústria (FIELD, 2004). O interesse comum é que essa educação deva desenvolver conhecimentos de *expertise* para a vida profissional e, para isso, são listados quatro requisitos: habilidade para formular problemas de engenharia, habilidade para usar um computador na solução de problemas de engenharia, um bom entendimento do processo de *design* e manufatura e, o mais importante, a prática (KAUR; KIVILUOMA; KUOSMANEN, 2015).

Nos dias atuais, frequentemente os professores que lecionam modelagem sólida utilizando *software* CAD 3D nas universidades se deparam com um problema: a heterogeneidade da turma, relacionada ao conhecimento dos recursos e a aplicações dos *softwares*. É comum ter na turma alunos com conhecimentos sólidos e experiência na área, pois trabalham diariamente com elaboração de projetos em CAD. Por outro lado, a maior parte dos alunos não tem ou não teve nenhum contato com tais recursos. Além disso, na moderna conjuntura atual, não há mais sentido em basear as aulas em tutoriais e uti-

lização sequencial de recursos, pois inúmeros *sites*, *blogs*, fóruns virtuais e redes sociais podem fazer esse serviço, sem a necessidade do professor.

O fato é que o ensino-aprendizagem em CAD não é tarefa fácil, pois não se trata somente de habilidades computacionais, mas também de capacidade mental, visão espacial e coordenação motora. Esses esforços significam que muitos usuários sintam verdadeiro pânico sobre o assunto, devido à dificuldade inicial, à falta de embasamento científico, à necessidade de aperfeiçoamento contínuo e à rápida obsolescência do conhecimento adquirido (GARCIA, 2007). Em ambos os casos – alunos com e sem experiência em CAD –, há necessidade de maior fundamentação teórica e assertividade na utilização das ferramentas de simulação. A revisão de conceitos fundamentais de geometria espacial, de estática e resistência dos materiais é uma estratégia importante para que a disciplina atinja seus objetivos.

PLANEJAMENTO DAS AULAS

Baseado nesse contexto, foi desenvolvido um planejamento de aulas que considerasse um embasamento científico relacionado com as ferramentas CAD e de simulação (CAE) e que os resultados dos estudos fossem obtidos de duas formas: primeiro o analítico e depois o numérico.

O plano de ensino da disciplina foi estruturado em vinte semanas letivas (vinte encontros semanais). Os encontros acontecem em um laboratório de informática, dedicado às atividades de modelagem 3D, simulação de manufatura e simulação estrutural (Figura 1). Os quatro primeiros encontros destinam-se à apresentação e ao desenvolvimento de atividades relacionados às transformações de visualização, as quais são responsáveis pela geração e manipulação das imagens tridimensionais geradas na tela do computador.

Figura 1: Laboratório com laptops dedicados às tarefas de modelagem em CAD e simulação.



O 5º e o 6º encontros destinam-se à apresentação e habilitação dos recursos de modelagem do *software*. Nessa etapa, não há utilização de tutoriais e a aprendizagem se dá via utilização intuitiva dos recursos básicos, de fácil assimilação.

Os próximos oito encontros destinam-se à modelagem e validação estrutural de modelos sólidos (peças e produtos), por meio de processos analíticos (cálculos manuais) e numéricos (simulação computacional). Os procedimentos de geração de moldes e simulação de fabricação (usinagem) são aprendidos em dois encontros. O ciclo de aulas se encerra com a elaboração de um projeto colaborativo (em equipe), para o qual são utilizados os quatro encontros restantes. Esse projeto aborda todo o conteúdo da disciplina, incluindo a modelagem, seleção e aplicação de materiais, validação estrutural, relatório de simulação, criação de ferramental (molde/matriz), simulação de usinagem e geração de documentação técnica (folhas de desenho). A quantidade de conteúdos em relação à carga horária (60 horas) é bem extensa e se fazem necessários a colaboração da turma e o empenho do professor para o atingimento das metas apresentadas no plano de ensino.

MÉTODOS ANALÍTICOS VERSUS MÉTODOS NUMÉRICOS

Com a tecnologia atual à disposição, é tentador para professores e alunos transpor os cálculos manuais, lentos, trabalhosos e suscetíveis a erros, e ir direto para o simulador computacional, que processa dados numéricos em uma velocidade muito maior. Entretanto, essa conduta é desaconselhável, pois a entrada de dados e a correta configuração dos parâmetros do simulador é de fundamental impor-

tância para que seja gerado um resultado confiável. Além disso, métodos analíticos fazem com que o aluno tenha uma compreensão nítida do fenômeno físico, tornando-o mais competente tanto no que se refere à entrada e configuração de dados, quanto na interpretação dos resultados. O simulador, por outro lado, é uma máquina que responde a impulsos e gera respostas de acordo com entradas definidas pelo utilizador. Não pode ser, portanto, responsabilizado por um erro de projeto. A responsabilidade sempre será do projetista, *designer* ou engenheiro que estiver fazendo uso dessa ferramenta.

Simuladores trabalham com leis da física e, dependendo do desenvolvedor, modelo, pacote de recursos ou configurações, podem realizar simplificações que “escondem” problemas estruturais, falhas e riscos no produto ou sistema que está sendo simulado. Não há como deixar de mencionar que, mesmo considerando a confiabilidade dos sistemas computacionais atuais (quando configurados corretamente), a experiência profissional do utilizador nas questões pertinentes ao problema simulado é um recurso importante a ser considerado. Simuladores trabalham com materiais cujas propriedades físicas são as padronizadas por norma, e que nem sempre correspondem às amostras reais. Fenômenos como oxidação, desgaste, atrito, fadiga têm especificações complexas e nem sempre conseguem se ajustar com total similaridade à situação real. Problemas estruturais complexos, baseados na combinação de milhares ou milhões de elementos (elementos finitos) são, obviamente, inviáveis para serem resolvidos analiticamente. Mas a análise dos resultados deve ser feita considerando-se o conhecimento tácito, experimental e científico do utilizador.

Por fim, métodos analíticos desenvolvem o raciocínio, fundamentam cientificamente o resultado e servem como contraprova aos resultados da simulação numérica. Yixian *et al.* (2014) comentam que, na sala de aula, *softwares* de simulação como o ProEngineer e Ansys podem fazer com que o estudante entenda os avançados processos de *design*, simulação e manufatura, a partir de um conceito. Entretanto, o conhecimento da teoria por trás da tecnologia facilitará e tornará mais rápido esse entendimento.

EXEMPLO DE PLANO DE AULA UTILIZANDO PROCESSO ANALÍTICO-NUMÉRICO

A descrição no Quadro 1, a seguir, refere-se a uma aula da disciplina de Desenho e Manufatura Assistido por Computador, da 7ª fase do curso de Engenharia Mecânica da Faculdade SATC, sediada em Criciúma/SC. No Quadro 2, na sequência, estão discriminados os dados, solicitações e resultados da atividade.

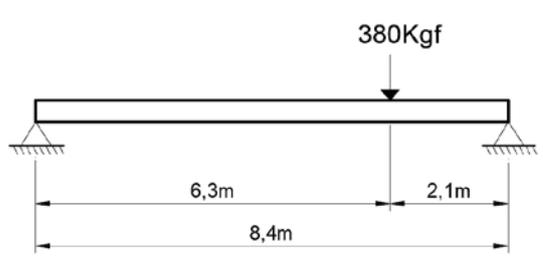
Quadro 1: Plano de aula.

Curso: Engenharia Mecânica	
Disciplina: Desenho e Manufatura Aux. por Computador	
Professor: Jovani Castelan	Carga Horária: 60h
Turma: 2015-02	
Aula nº 07	
Conteúdo	Modelagem básica, simulação e análise de carregamentos estáticos.
Pré-requisitos	Desenho Técnico, Estática, Resistência dos Materiais, habilidades básicas em CAD.
Contextualização: Peças estruturais e perfis metálicos, tais como vigas "I", "U" e cantoneiras, são relativamente fáceis de modelar, devido ao seu caráter prismático, que atribui seção constante na extrusão, e ao tipo de perfil (esboço), composto por polígonos simples e arredondamentos. Entretanto, devido à sua função estrutural, a simulação de cargas atuantes, tanto estáticas quanto dinâmicas, é fundamental para validar um modelo, determinando qual o tipo e tamanho do perfil, sua disposição na estrutura e material de fabricação ideal para cada caso, considerando os aspectos de segurança e financeiros.	
Atividade	Interpretação e análise do problema, modelagem CAD 3D e simulação de carga estática localizada.
Objetivo	Determinar se a viga tem resistência mecânica suficiente para suportar a carga solicitada.
Etapas	
1	Efetuar os cálculos para determinar as reações, diagramas, tensões, momento fletor, flecha máxima e fator de segurança.

2	Modelar peça em CAD 3D, de acordo com as configurações necessárias para simulação.
3	Realizar simulação computacional, definindo o material, elementos de fixação, resolução de malha, local, direção e intensidade da carga.
4	Comparar os valores obtidos analítica e numericamente.
5	Analisar os resultados, discuti-los e elaborar a conclusão (relatório técnico).

Quadro 2: Dados, solicitações para a realização da atividade e resultados obtidos.

Dados:



380Kgf

6,3m 2,1m

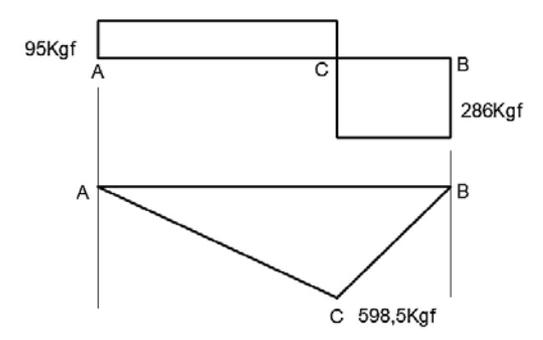
8,4m

Solicitações:

- Reações em "A" e "B"
- Momento Fletor em "C"
- Diagrama de Forças Cortantes
- Tensões máximas
- Flecha máxima
- Fator de segurança

Resultados obtidos analiticamente:

- RA = 95Kgf; RB = 286Kgf
- Momento Fletor em "C" = 598,5 Kgf/m
- Diagrama de Forças Cortantes e momento fletor máximo
- Tensão máxima: 179,5Kgf/cm²
- Flecha máxima: 0,86cm
- Fator de segurança: 20



95Kgf 286Kgf

A C B

A B

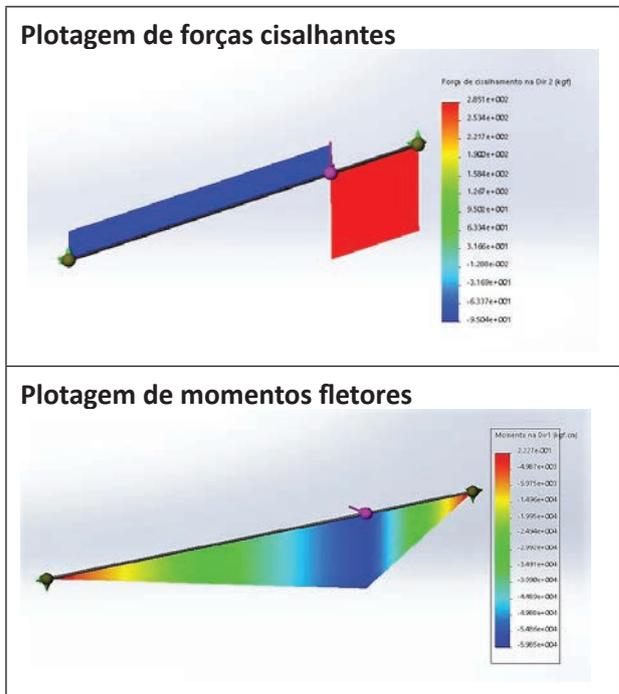
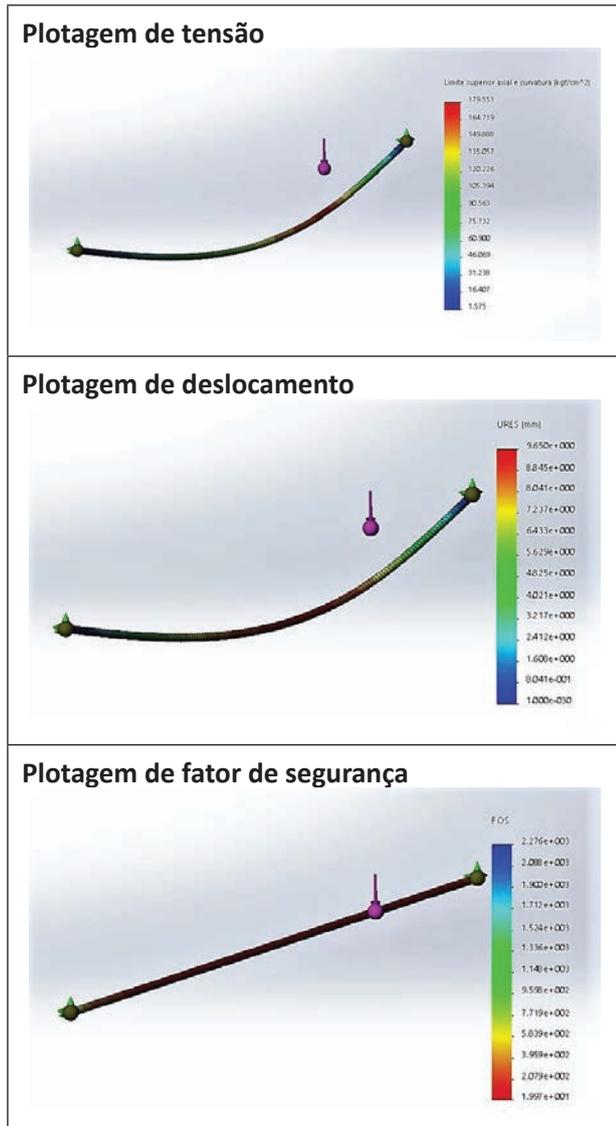
C 598,5Kgf

Processamento numérico

Após obter os valores analiticamente, a próxima etapa é gerar um modelo CAD 3D do produto ou peça a ser validada. No caso, como se trata de uma geometria simples (barra de seção retangular), os alunos não apresentam dificuldades para realizar essa etapa.

A modelagem em CAD 3D permite o início do processo de simulação, no qual são definidos os parâmetros da peça: material, pontos e tipo de fixação, local, direção e intensidade da força, resolução de malha. Além disso, é necessário configurar os dados de saída (plotagens) da simulação: tensões, deslocamentos, deformações, diagramas de momentos fletores e cortantes, fator de segurança. Os resultados da simulação estão mostrados no Quadro 3:

Quadro 3: Resultados obtidos via simulação numérica.



Após a simulação computacional, os estudantes são instruídos a comparar os valores entre os métodos de cálculo, para averiguar se houve semelhança ou discrepância de resultados. Ocorrendo esta última, tanto os cálculos manuais quanto a simulação são refeitos, a fim de encontrar o erro e solucionar o problema da forma correta. No exemplo apresentado entre os Quadros 2 e 3, os valores encontrados foram semelhantes, o que comprova a assertividade de ambos os procedimentos.

RESULTADOS

A obtenção de resultados similares utilizando dois métodos diferentes dá maior assertividade e rigor científico a estes. Os estudantes demonstram maior segurança na interpretação dos resultados, pois têm a compreensão do fenômeno físico, descrito na etapa 2.

A interdisciplinaridade ocorre de forma espontânea. Os alunos precisam buscar, em outros componentes curriculares, conhecimentos prévios necessários para a execução da tarefa, ao passo que atividades realizadas nesses componentes curriculares, de forma manual, podem ser complementadas por análises computacionais realizadas nessa disciplina.

A participação ativa do aluno ocupa a maior parte da aula, com a execução da tarefa em duas eta-

pas. O trabalho em duplas ou equipes maiores, dependendo da complexidade e tempo de execução da atividade, fomenta a aprendizagem colaborativa e o engajamento dos membros.

A síntese da aula é feita comparando-se os resultados das duas análises: quando são coerentes, conclui-se que os procedimentos adotados, tanto em um processo quanto em outro, estão corretos, validando os resultados da atividade. Quando há inconsistência, se faz necessária uma revisão em ambos para averiguar onde estão as falhas (erros de unidades de medida, de material, cálculos matemáticos, inversão ou alteração dos valores na simulação, resolução de malha, falhas de *software*, etc.).

CONCLUSÃO

A utilização de diferentes formas de resolução de um problema possibilita ao professor e aos estudantes terem mais ferramentas à disposição e aumenta a eficiência do processo cognitivo, no qual os conhecimentos adquiridos se tornam perenes. *Softwares* de simulação têm configurações e formas de utilização específicas. Porém, o embasamento científico, construído nos processos analíticos, é o mesmo, possibilitando ao estudante, futuro profissional, uma adaptação mais rápida e segura.

Nota-se, em um primeiro momento, uma aversão dos estudantes à realização de cálculos manuais e um desejo instantâneo de pular essa etapa e ir direto para a simulação computacional. Porém, quando há a comparação de resultados, os estudantes percebem a relação entre a teoria científica e o resultado prático apresentado na tela do *software*. Essa percepção resgata no estudante a percepção da importância das técnicas manuais no desenvolvimento da aprendizagem.

Tanto o processo manual quanto o computacional, mesmo quando executados dentro dos procedimentos corretos, podem não indicar uma verdade absoluta. Como já citado anteriormente, situações reais apresentam variáveis complexas e situações inusitadas que os processos de cálculo, devido às suas simplificações, não consideram. É importante que o professor deixe claro para seus alunos que, para uma análise totalmente segura, se faz necessário incluir mais uma etapa – a experimental.

REFERÊNCIAS

- EVANS, M. *et al.* Digital sketching and haptic sketch modelling during product design and development. **International Journal of Product Development**, v. 20, n. 3, p. 239-263, 2015.
- XUE, D. Teaching CAD in Mechanical and Manufacturing Engineering Programs – an experience at University of Calgary. **Proceedings of the Canadian Engineering Education Association**. Department of Mechanical and Manufacturing Engineering, University of Calgary, 2005.
- FIELD, D. Education and training for CAD in the auto industry. **Computer Aided Design**, v. 36, n. 14, p. 1.431-1.437, Dec. 2004.
- KAUR, J.; KIVILUOMA, P.; KUOSMANEN, P. **CAD and CAE in Mechanical Engineering Education at Aalto University**. Aalto University (Finland), p. 189-194, 2015.
- GARCIA, R. Teaching CAD at the university: specifically written or commercial software? **Computers & Education**, v. 49, p. 763-780, 2007.
- YIXIAN, D. *et al.* CAD/CAM courses integration of theoretical teaching and practical training. 5th World Conference on Educational Sciences – WCES 2013, **Procedia - Social and Behavioral Sciences**, v. 116, p. 4.297-4.300, 2014.

DADOS DOS AUTORES



Jovani Castelan – Licenciado em Desenho (UDESC, 1996); especialista em Automação Industrial (CTAI/UFSC, 2001); especialista em Design (UFSC, 2009); mestre em Engenharia (UFRGS, 2008); doutor em Engenharia (UFRGS, 2010); pós-doutor em Engenharia (UFRGS, 2013). Faculdade SATC. Coordenador de ensino e professor do curso de Engenharia Mecânica. Equivalência de titulação de doutorado junto à Universidade de Aveiro/Portugal. Áreas de atuação: CAD/CAM/CAE, prototipagem rápida, engenharia médica. Assuntos de interesse: biomateriais, fabricação de implantes médicos, processos de manufatura aditiva.



Alexandre Milanez – Possui graduação em Engenharia Mecânica pelo Centro Tecnológico da Universidade Federal de Santa Catarina (2000), com mestrado em Engenharia Metalúrgica pelo Programa de Pós-graduação em Minas, Metalúrgica e de Materiais, pela Universidade Federal do Rio Grande do Sul (2006), e doutorado em Engenharia Metalúrgica pelo Programa de Pós-graduação em Minas, Metalúrgica e de Materiais da Universidade Federal do Rio Grande do Sul (2012). Trabalha como professor na Faculdade SATC para o curso de Engenharia Mecânica, para o curso Técnico em Fabricação Mecânica da Escola Técnica da SATC e para a Universidade do Extremo Sul Catarinense (UNESC), para o curso de Engenharia de Materiais. Tem experiência na área de Engenharia Mecânica, com ênfase em elementos de máquinas e conformação mecânica. Na Faculdade SATC, além de professor, é coordenador do Laboratório de Conformação Mecânica.



Daniel Fritzen – Professor da Faculdade SATC. Possui graduação em Tecnologia em Automação Industrial (UNESC/SC, 2005); especialista em Psicopedagogia Institucional pela UCB/RJ (2008); mestrado em Engenharia de Minas, Metalúrgica e de Materiais (UFRGS, 2012). Tem experiência na área de educação (Ensino Técnico e Superior), ministrando disciplinas ligadas a Desenho Técnico, CAD/CAM/CNC e Computação Gráfica. Possui experiência na indústria com projetos mecânicos, PCP e custos da produção.