

O USO DE MODELADORES TRIDIMENSIONAIS PARAMÉTRICOS NA FORMAÇÃO DE COMPETÊNCIAS DE REPRESENTAÇÃO GRÁFICA E RACIOCÍNIO ESPACIAL NO PROCESSO DE PROJETO

The use of parametric tridimensional modelers in the formation of engineering design graphics and spatial reasoning competencies in design process

Marcos Martins Borges¹

RESUMO Este trabalho apresenta reflexões acerca dos atuais paradigmas de representação e desenvolvimento de projeto de produtos vinculados aos processos de ensino e aprendizagem da expressão gráfica. Tais reflexões estão relacionadas a experiências pedagógicas em andamento em cursos de graduação em Engenharia Mecânica e Engenharia de Produção. Um dos principais argumentos apresentados é a indissociabilidade entre conteúdos de representação gráfica e a prática de projeto. Essa vinculação entre áreas intrinsecamente relacionadas nem sempre foi a prática corrente nas estruturas curriculares dos cursos de engenharia, arquitetura e design. Historicamente, a área de representação gráfica frequentemente se posicionou de forma independente e não integrada com conteúdos de engenharia e, em última análise, com o próprio processo de projeto. Nessa direção, são apresentadas algumas reflexões acerca dos aspectos recentes relacionados ao ensino da representação gráfica, considerando uma perspectiva histórica da evolução dos sistemas digitais de representação do projeto. A partir dessas reflexões, são explicitadas as experiências em andamento com a utilização de modeladores tridimensionais paramétricos.

PALAVRAS-CHAVE: Representação gráfica, Processo de projeto, Modeladores paramétricos.

ABSTRACT This paper reports some reflections on the engineering design graphics (EDG) and product development current paradigms in the context of their teaching and learning processes. Such reflections are related to ongoing pedagogic experiments in industrial and mechanical engineering undergraduate courses. One of the main arguments is the inseparability of graphic representation and design process. This link between intrinsically related areas was not very frequent in the curriculum frame among architecture, design and engineering courses. Historically, the EDG area is positioned in an independent way and not integrated to the engineering contents and the design process itself. In this sense, this paper presents some reflections linked to recent aspects of the EDG learning process from a historic perspective of the Computer Aided Design tools. From those discussions, some teaching and learning experiments are reported with the use of three-dimensional parametric solid modelers.

KEYWORDS: Engineering design graphics, Design process, Parametric modelers.

¹ Universidade Federal de Juiz de Fora - UFJF

How to cite this article:

BORGES, M. M. O uso de modeladores tridimensionais paramétricos na formação de competências de representação gráfica e raciocínio espacial no processo de projeto. *Gestão e Tecnologia de Projetos*, São Carlos, v. 11, n. 1, p. 21-37, jan./jun. 2016.
<http://dx.doi.org/10.11606/gtp.v11i1.99615>

Fonte de financiamento:
Programa de bolsas de Iniciação Científica (BIC) da Universidade Federal de Juiz de Fora (UFJF).
Conflito de interesse:
Declaro não haver
Submetido em: 25 jun. 2015
Aceito em: 17 out. 2015



INTRODUÇÃO

Este trabalho se divide em duas partes principais. A primeira conceitua e apresenta reflexões acerca dos atuais paradigmas de representação e desenvolvimento de projetos de produtos, vinculados aos processos de ensino e aprendizagem da expressão gráfica. Uma argumentação importante se verifica no aspecto de indissociabilidade entre conteúdos de representação gráfica e a prática do processo de projeto e conteúdos específicos de engenharia e tecnologia. Essa vinculação entre áreas intrinsecamente relacionadas nem sempre é identificada como a prática corrente nas estruturas curriculares dos cursos de engenharia, arquitetura e *design*.

Tais reflexões estão relacionadas às experiências pedagógicas em andamento no curso de graduação em engenharia mecânica da Universidade Federal de Juiz de Fora (UFJF). Essa argumentação se baseia na percepção de que em muitos casos os processos de ensino e aprendizagem do desenho se justificam por si mesmos, apresentando uma significativa falta de contextualização de seus conteúdos (OLIVEIRA; BORGES, 2001).

Também são apresentadas algumas reflexões acerca de aspectos recentes relacionados ao ensino da representação gráfica, considerando uma perspectiva histórica da evolução dos sistemas digitais de representação do projeto, principalmente os atuais modeladores tridimensionais paramétricos.

Na segunda parte do artigo são descritos e exemplificados os experimentos em andamento que objetivam identificar aspectos relevantes relacionados ao ensino da expressão gráfica e sua interação com o processo de projeto. Tais experimentos pedagógicos se dão em torno de objetos tecnológicos relacionados de forma mais direta com a engenharia mecânica. Entretanto, é possível vislumbrar a possibilidade de fácil adequação às áreas de arquitetura e *design*.

A descrição dos experimentos faz uma breve retrospectiva da evolução ocorrida nesse caso específico, estabelece os parâmetros utilizados para sua realização com base na literatura estudada e apresenta alguns resultados parciais decorrentes da observação sistemática dos trabalhos realizados e da aplicação de questionários entre os alunos.

Deve-se ressaltar que não é abordado neste trabalho todo o espectro de possibilidades existentes com os atuais modeladores tridimensionais paramétricos. São exemplos dessas exclusões a interface com os processos de manufatura por meio de comando numérico computadorizado em centros de usinagem ou ainda outros meios de materialização do modelo 3D, como a prototipagem rápida e os sistemas de corte a laser, entre outros.

FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

No campo da expressão gráfica é senso comum entre pesquisadores e educadores o fato de que o desenho técnico, a representação gráfica, a geometria descritiva, entre outros conteúdos, se constitui numa das mais importantes linguagens de projeto de engenharia e inovação de produtos (FERGUSON, 1993; BARR, 2012; SUZUKI, 2014). A utilização de meios de representação técnica de forma não ambígua, proporcionada pelos fundamentos teóricos e pela normatização das representações, é imprescindível no processo de investigação e na geração de inovações em diversas áreas da tecnologia.

Apesar da relevância que se pode considerar para esses conteúdos na formação de competências para os estudantes de engenharia, arquitetura e *design*, verifica-se um número cada vez mais reduzido de horas-aula de conteúdos de representação gráfica. Tal redução verifica-se principalmente nas estruturas curriculares de engenharia, tanto no cenário nacional quanto

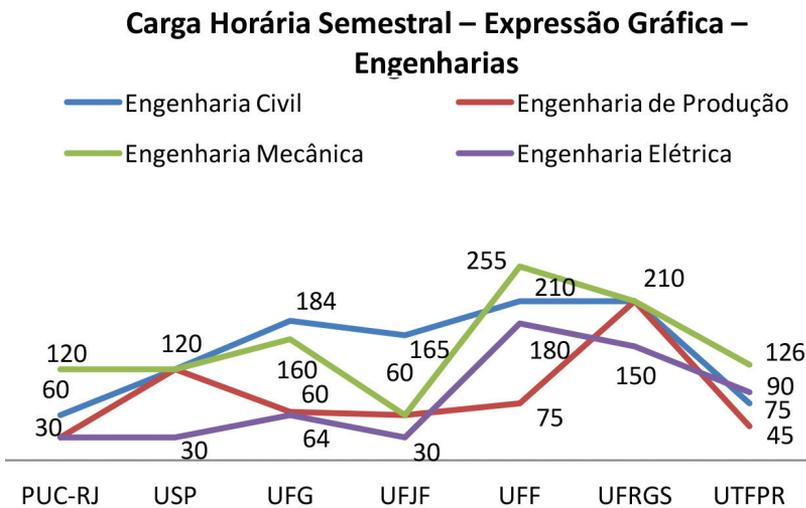
em um contexto global (LEAKE; BORGESON, 2008). Apesar dessa redução de carga horária nos conteúdos de representação gráfica ser mais evidente nos cursos de engenharia, podem-se verificar também distorções nos cursos de arquitetura e urbanismo e em cursos de design. Nesses cursos, a evolução das ferramentas computacionais ainda não se encontram sintonizadas com as respectivas grades curriculares e conteúdos de disciplinas (NASCIMENTO; CARDOSO; BORGES, 2014).

Em uma pesquisa em andamento conduzida pelos autores, foram levantados dados de carga horária semestral em cursos de Engenharia no país. Alguns resultados parciais são apresentados no Gráfico 1. Uma carga semestral de 30, por exemplo, significa uma disciplina com 30 aulas por semestre correspondendo a uma carga semanal de dois tempos de 50 minutos. A pesquisa ainda precisa levantar os dados de carga horária em uma faixa temporal mais extensa, recuperando dados históricos, além de ampliar o universo de instituições pesquisadas.

Entretanto, verifica-se em uma análise preliminar a confirmação de carga horária reduzida em alguns dos cursos nas universidades pesquisadas até o momento. Existe uma tendência para cargas maiores nos cursos de Engenharia Mecânica e Civil e cargas menores nos cursos de Engenharia de Produção e Elétrica. Deve-se enfatizar que entre os diversos parâmetros que levam a esse cenário estão a história de criação, evolução e consolidação dos cursos.

No caso dos dados apresentados no Gráfico 1, a carga de 255 horas semestrais do curso de Engenharia Mecânica da Universidade Federal Fluminense (UFF) parece refletir a evolução histórica do curso e necessita de adequações, principalmente quando se verifica que as disciplinas relativas aos conteúdos de desenho digital estão cadastradas como eletivas. Uma investigação mais profunda é necessária para identificar a prática atual neste caso. Por outro lado, no extremo oposto verifica-se uma carga horária bastante reduzida para o mesmo curso na UFJF. As duas situações necessitam de ajustes e adequações para se compatibilizarem com os atuais paradigmas de processos de ensino e aprendizagem da representação gráfica.

Gráfico 1. Carga horária semestral em cursos de engenharia.



Fonte: Elaboração do autor.

Apesar desse cenário de aparente incompatibilidade entre redução de carga horária e aumento de conteúdos relacionados aos meios digitais de representação e desenvolvimento do projeto, verifica-se em alguns casos uma articulação cada vez maior entre representação gráfica e práticas

de projeto associadas ao uso de ferramentas computacionais (LEAKE; BORGERSON, 2008). Essa associação nem sempre foi o padrão de ensino e aprendizagem nos cursos de engenharia, aonde os conteúdos de geometria descritiva, desenho técnico, entre outros, sempre careceram de uma maior contextualização e de maior aderência com conteúdos de engenharia, principalmente no que se refere à atividade projetual.

Pesquisadores da área de expressão gráfica têm procurado, ao longo do tempo, estabelecer parâmetros que permitam avaliar a capacidade de raciocínio espacial e conseqüentemente propor diretrizes para as práticas de ensino e aprendizagem na área da representação gráfica. Essas pesquisas resultaram em algumas constatações que são convergentes em diversos autores. Sorby (1999) indica a importância dos estudantes trabalharem a partir de material de impresso, modelos físicos tridimensionais e com a utilização de peças e elementos de máquinas reais, prática denominada de dissecação mecânica, para a elaboração de representações em vistas ortográficas e perspectivas isométricas elaboradas exclusivamente a mão livre.

Barr (2012) ressalta que dentre quatorze itens resultantes de levantamento realizado entre professores da área como sendo habilidades esperadas na formação de engenheiros no que se refere ao campo da expressão gráfica, três itens aparecem com as maiores pontuações em levantamentos realizados tanto em 2004 quanto em 2012. São estes:

- 1) habilidade para criar modelos sólidos tridimensionais no computador;
- 2) habilidade de elaborar representações gráficas técnicas a mão livre;
- 3) habilidade para visualizar e interpretar modelos sólidos tridimensionais no computador.

Esse período de tempo apresentando resultados semelhantes nos levantamentos realizados pelo autor sugere que existe uma tendência para a estabilização e consenso em torno das habilidades esperadas na formação de engenheiros no que se relaciona à representação gráfica e à modelagem tridimensional.

Danos et al. (2014), utilizam o termo *graphicacy* na língua inglesa para se referir à habilidade de comunicação por imagens como mapas, diagramas, gráficos, símbolos e desenhos técnicos definidos pelos autores como representações bidimensionais de construções tridimensionais. A tradução para a língua portuguesa desse termo não é direta. Entretanto, podemos entender o termo *graphicacy* como a habilidade de raciocínio visual e espacial que estão acoplados a processos cognitivos como a elaboração mental de modelos tridimensionais e o pensamento crítico sobre essas elaborações (DANOS et al., 2014).

A linguagem visual, e de forma mais abrangente o uso de meios visuais como auxílio ao raciocínio e à geração de ideias, deve ser considerada como indissociável do processo de desenvolvimento de produtos e artefatos. Diversos autores se referem a termos como *visual thinking* e *graphic thinking* de forma a expressarem a importância do uso dos diversos meios de expressão visual e gráfica como instrumentos fundamentais nos processos cognitivos da atividade projetual. Esses termos são frequentes em autores com Ferguson (1993) e Laseau (1989). Sua tradução para o português deve ser entendida como o uso de meios visuais e gráficos para o auxílio ao pensamento e às formas de raciocínio usualmente utilizadas por projetistas nas fases de concepção e desenvolvimento do projeto de artefatos. Além desses termos, Ferguson (1993) ainda utiliza *thinking sketch* e *talking sketch*, que podem ser traduzidos como “esboços pensantes” e “esboços falantes” e se relacionam respectivamente aos processos cognitivos da atividade projetual e aos processos de comunicação de ideias nessa atividade.

A Figura 1 apresenta três grandes áreas relacionadas tanto às competências vinculadas aos fundamentos da expressão gráfica quanto no que se refere às ferramentas computacionais de apoio ao projeto (BARR, 2012). Verifica-se que as aplicações do modelo tridimensional, incorporam competências e habilidades referentes a processos de projeto e manufatura em engenharia e estão fortemente vinculadas e dependentes das áreas relacionadas à representação e modelagem tridimensional. As análises possíveis por meio de protótipos virtuais se concretizam a partir do modelo geométrico gerado.

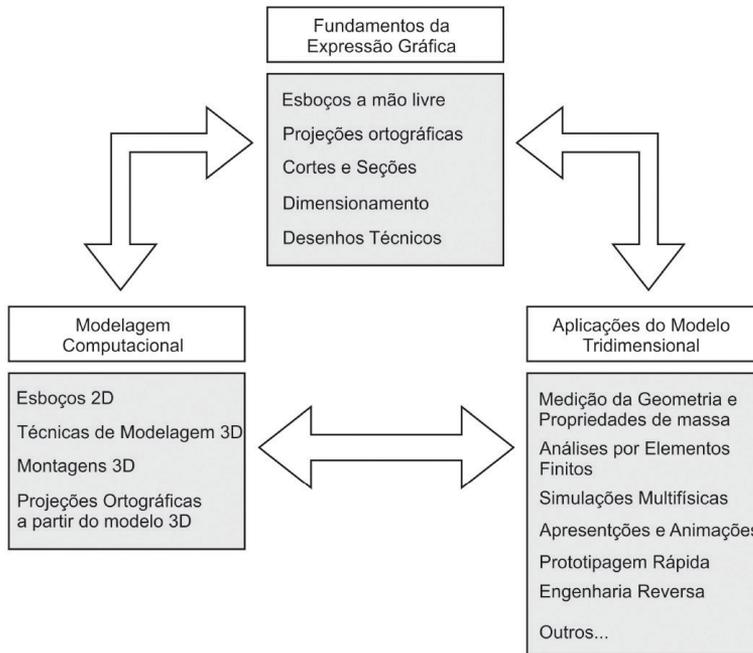


Figura 1. Áreas relacionadas à Expressão Gráfica. Fonte: Adaptado de Barr (2012).

A partir da identificação dessas três áreas e da sua inter-relação, o autor indica a necessidade de desenvolvimento de taxinomias para cada uma (BARR, 2012). Tal aspecto é objeto de pesquisa em andamento pelo autor deste trabalho, no qual se procura estabelecer uma estrutura taxonômica para a área de expressão gráfica que incorpore as ferramentas computacionais de auxílio ao projeto e objetiva subsidiar a elaboração de uma estrutura curricular atualizada.

EVOLUÇÃO DO CAD

A partir da segunda metade do século XX, verifica-se o surgimento de uma nova forma de trabalho com a linguagem gráfica. O desenho digital se estabelece como o instrumento predominante para a representação de projetos.

Esse fato revela profundas transformações que ainda se encontram em curso, tanto nos aspectos relacionados à prática profissional de engenheiros arquitetos e designers quanto no que se relaciona aos processos de ensino e aprendizagem da expressão gráfica.

Diversos autores relatam o surgimento do primeiro sistema de computação gráfica como sendo o Sketchpad, desenvolvido no Massachusetts Institute of Technology (MIT) em 1963 (PORTER, 1997).

Porter (1997) ainda argumenta que no início dos anos 1960, os computadores estavam mais apropriados para o processamento de

informações em vez da representação dessas informações. Os primeiros programas de CAD exigiam uma grande capacidade de processamento, o que, associado a outros fatores como o custo do equipamento e a necessidade de capacitação em uma nova ferramenta, colocou muitos arquitetos e projetistas em posição oposta a sua utilização.

O diagrama da Figura 2 procura sintetizar essa evolução mostrando dois grandes marcos na história do desenvolvimento das ferramentas digitais de apoio ao projeto. O primeiro é justamente a transição dos meios tradicionais para o ambiente digital. Tal transição provocou profundas modificações na estrutura e em aspectos da gestão do processo de projeto que ainda se percebem até hoje. A progressiva evolução das ferramentas e da capacidade de processamento dos computadores leva ao estágio atual no qual o desenho em duas dimensões e os modelos estáticos tridimensionais estão solidamente estabelecidos na prática profissional de projetistas.

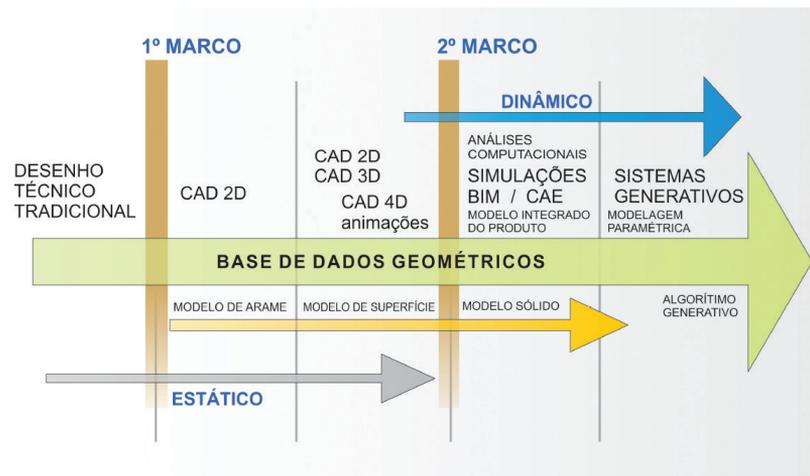


Figura 2. Evolução dos sistemas CAD. Fonte: Elaboração do autor.

O segundo marco se caracteriza pelo caráter dinâmico das ferramentas no sentido de que sua interação com o processo de projeto se aprofunda. Essa relação incorpora, por um lado, a possibilidade de análises prévias do comportamento do produto e, por outro lado, a geração de uma quantidade exponencialmente maior de alternativas de produto em um curto espaço de tempo e a partir de uma base geométrica parametrizada.

Essa fase reflete de certa forma o momento atual, mesmo considerando que alguns dos conceitos indicados têm sua origem em meados do século passado. Tal argumentação para a evolução dos meios digitais com esse caráter estático para a primeira fase, apesar do conceito de 4D que coloca a geometria tridimensional na dimensão temporal pelo uso de animações. O caráter dinâmico proposto para a segunda fase se justifica pela possibilidade de maior interação entre a base de dados geométricas e as diversas áreas envolvidas no processo de projeto. Dessa forma, verifica-se a interação e evolução das informações associadas à geometria, na medida em que as decisões de projeto são tomadas e o processo evolui até o seu final.

MODELO INTEGRADO DO PRODUTO

A ideia da indissociabilidade entre meios de representação e processo de projeto leva ao conceito de modelo integrado do produto. Esse aspecto de simultaneidade no processo de projeto considera a integração de áreas de conhecimento diversas nos estágios iniciais do desenvolvimento do produto. Dessa forma, é possível que haja a eliminação ou a previsão de erros e a otimização e a integração de funções do produto nos estágios iniciais,

momento em que decisões de grande impacto em diversas características do produto são tomadas (FABRICIO, 2002; BORGES, 2004; NAVEIRO, 2001).

A estrutura desse modelo permite entender a associação entre os conteúdos de representação gráfica e o processo de projeto. Proposto pelo grupo liderado por Barr e Juricic (1994) na Universidade do Texas, essa estrutura foi denominada modelo único do produto ou modelo integrado do produto (Figura 3). O conceito está estruturado a partir de um núcleo central que se configura como base de dados geométrica do artefato que evolui ao longo do processo de projeto, recebendo e fornecendo informações às diversas etapas do desenvolvimento do produto.

Verifica-se que diversos aspectos relacionados ao ciclo de vida do produto estão vinculados à base geométrica, que por sua vez incorpora informações e conhecimento a medida que se avança desde a concepção do produto até o seu descarte.

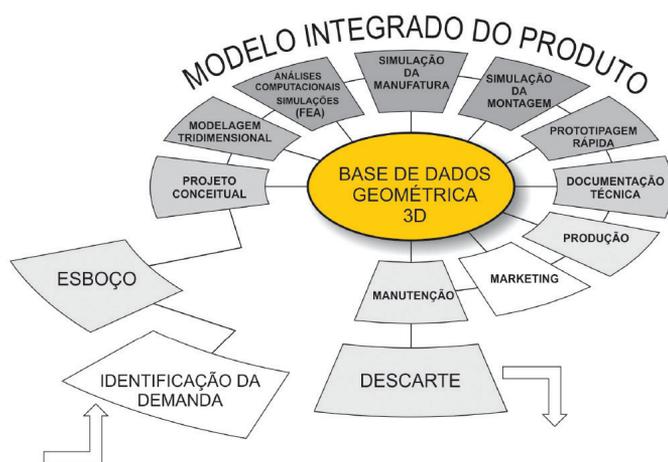


Figura 3. Modelo integrado do produto. Fonte: Adaptado de Barr (2012).

A geometria do artefato como núcleo central do modelo coloca as habilidades de modelagem e manipulação tridimensional no computador como de fundamental importância na formação de engenheiros, arquitetos e designers. Dessa forma, tais habilidades que se relacionam intrinsecamente com os fundamentos da representação gráfica e as suas aplicações de engenharia colocam esse conjunto de conhecimentos em uma posição estratégica na estrutura curricular dos cursos.

Também é possível verificar que o modelo proposto se equipara a conceitos já consolidados no setor de AEC. Em uma análise comparativa, verifica-se que o conceito de Building Information Modelling (BIM) apresenta uma estrutura semelhante ao modelo apresentado. De acordo com Andrade e Ruschel (2013), os princípios de coordenação, colaboração e interoperabilidade se apresentam como base para o conceito. Ainda segundo os autores, a definição de BIM pelo National Institute of Building Sciences¹ classifica o conceito enquanto produto, processo e ferramenta de gerenciamento. Nesse aspecto, o BIM como produto é traduzido como uma “representação digital inteligente de dados”. Como processo, se relaciona com as diferentes áreas de conhecimento ao longo do processo de projeto, permitindo a troca de dados e informações. Por fim, como ferramenta de gerenciamento, se configura como uma plataforma de gestão do conhecimento (ANDRADE; RUSCHEL, 2013).

A primeira grande mudança de paradigma na atualidade no que se refere aos meios de representação do projeto se deu com o desenvolvimento e introdução do conceito de Computer Aided Design (CAD), ou Computer Aided Design and Drafting (CADD), no segundo quarto do século XX. Tal

¹ Disponível em: <<http://www.nibs.org/>>. Acesso em: 20 jun. 2015.

mudança, representada pelo primeiro marco da Figura 2, estabeleceu as bases para a evolução na direção dos sistemas dinâmicos e paramétricos atuais.

Dessa forma, desde sua origem, a base de dados geométrica inicialmente bidimensional e depois tridimensional se caracteriza por sistemas computacionais que trabalham de acordo com a estrutura apresentada na Figura 3. Na evolução do processo de desenvolvimento do produto, essa base geométrica também evoluiu em termos de informação agregada ao conjunto de dados alfanuméricos.

A evolução dessa tecnologia e a capacidade de processamento estão diretamente vinculadas à tipologia dos modelos tridimensionais. Pode-se considerar a existência de três tipos básicos de modelos tridimensionais: o *modelo de arame*, que representa apenas vértices e arestas; o *modelo de superfície*, que acrescenta as faces de um objeto tridimensional ao modelo de arame; e o *modelo sólido*, que possibilita a associação com as propriedades físicas, elétricas e químicas do material que se pretende utilizar no componente real.

MODELAGEM TRIDIMENSIONAL PARAMÉTRICA

A modelagem tridimensional paramétrica pressupõe que o artefato será representado como um modelo sólido que traduz uma contrapartida virtual do seu correspondente físico. Assim, as estratégias para a modelagem devem considerar esse aspecto importante, no qual cada peça individual de um equipamento é reproduzida virtualmente em um modelo sólido não só com suas características geométricas, mas também com suas propriedades específicas relativas ao material associado ao modelo. Em um modelador tridimensional paramétrico, ao contrário dos modeladores com características estáticas, é possível a edição de dimensões de forma bidirecional (valor interagindo na geometria e vice-versa), as informações sobre processos de fabricação são incorporadas, as características de um material específico podem ser atribuídas ao modelo sólido, o histórico do processo de modelagem é registrado e disponível, existe um ambiente completo de modelagem de peças e montagem do conjunto (LEAKE; BORGERSON, 2008).

Dessa forma, neste trabalho é considerado o conceito de parametrização de acordo com essa abordagem mais técnica e vinculada aos processos atuais de desenvolvimento de produtos em grandes empresas. Tal abordagem considera na modelagem os processos de fabricação que irão gerar as peças em desenvolvimento, incorporando assim conceitos de engenharia simultânea e gerenciamento do ciclo de vida dos produtos.

Essa abordagem precisa considerar a dimensão dos fundamentos de representação gráfica e de modelagem do produto e, especialmente nos processos de ensino e aprendizagem nessas áreas, estratégias e recomendações que levem em conta esse cenário mais vinculado ao uso profissional das ferramentas.

Alguns autores apresentam estudos nesse sentido (FOGGIATTO; VOLPATO; BONTORIN, 2007), propondo recomendações para orientar a modelagem 3D, permitindo, assim, que os modelos sejam facilmente utilizados por todos os envolvidos no desenvolvimento do produto. Dessa forma, **é possível** tornar os modelos gerados mais flexíveis e reutilizáveis de forma eficiente. Com isto, seria possível programar modificações nas peças de forma rápida e sem a necessidade de remodelagem.

A título de ilustração, podemos considerar a parametrização no nível de componentes independentes de um produto representados como entidades geométricas únicas que possuem geometria específica e material específico. De forma mais detalhada, existe a parametrização no nível de cada entidade geométrica, como os furos de uma peça, que podem ser modelados como

entidades geométricas independentes e editados e replicados em padrões lineares e circulares. A possibilidade de atualização da geometria quando um parâmetro é modificado oferece ao projetista uma liberdade considerável para avaliar soluções alternativas (LEAKE; BORGERSON, 2008).

Além disso, um parâmetro relativo a uma entidade geométrica também pode ser expresso por uma equação ou uma relação de valores. Um exemplo simples seria uma relação dimensional do tipo $d_0 = 2 \times d_1$. Assim, se $d_1 = 5$, $d_0 = 10$. Se o valor de d_1 é alterado para 10, o valor de d_0 passa a ser 20. Essa relação poderia ser estabelecida entre a espessura e o comprimento de uma peça.

A Figura 4 apresenta outro exemplo com uma comparação entre duas alternativas de furação em uma peça didática modelada parametricamente. A conversão do modelo de três furos para quatro é extremamente rápida e pode ser revertida da mesma forma. Essa capacidade de experimentar alternativas de projeto de maneira rápida é bastante eficaz e se configura como uma das principais vantagens da parametrização. É possível, em um tempo reduzido, se experimentar diversas possibilidades com a utilização de recursos de análise estática, por exemplo.

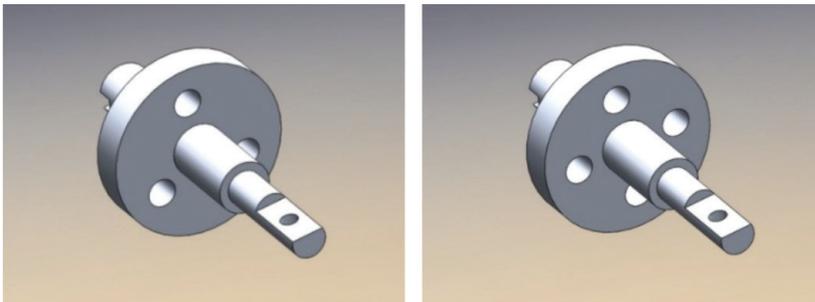


Figura 4. Exemplo de parametrização. Fonte: Elaboração do autor.

O ambiente de montagem nos modeladores paramétricos expande a característica de vinculação com o processo de projeto e transforma o modelo final em um protótipo virtual. Nesse protótipo podem ser avaliadas diversas características e comportamentos do produto final para o auxílio ao processo de tomada de decisão de projeto, sem a necessidade de manufatura de um protótipo físico. Dentre as diversas possibilidades oferecidas pela montagem virtual do produto, destacam-se algumas como a possibilidade de obter a estrutura por meio de uma lista de componentes e materiais associados; a possibilidade de detecção de interferências entre peças; a execução de análises de movimentos entre os componentes do produto, incluindo posição, velocidade e aceleração.

Nos experimentos realizados e descritos aqui, foi utilizado o software SolidWorks na versão 2013. De forma semelhante a outros sistemas disponíveis no mercado, o SolidWorks possui três ambientes principais de trabalho: peças, montagem e desenho. Essa estrutura permite o desenvolvimento do produto de forma paramétrica e com base no conceito de protótipo virtual. Além das possibilidades de análise descritas, existe nessa versão o módulo para análise por elementos finitos, entre outros relacionados aos custos da peça individual ou acerca dos aspectos de sustentabilidade do produto.

DESCRIÇÃO DOS EXPERIMENTOS E ABORDAGENS PEDAGÓGICAS

O interesse em experimentar abordagens pedagógicas mais dinâmicas que possibilitassem estimular os alunos pela experiência mais próxima da realidade profissional surgiu no início do curso de Engenharia de Produção, criado na UFJF em 2010. A equipe de professores que trabalhou na proposta

de criação do curso era oriunda de um departamento de desenho técnico que atendia aos cursos de engenharia e arquitetura da universidade. Ao longo da evolução do curso, a área de representação gráfica havia ficado a cargo do departamento de arquitetura e urbanismo. Apesar do esforço dele em atender de forma satisfatória às demandas do curso de engenharia de produção, a alocação de professores temporários e as abordagens tradicionais para o ensino do desenho a instrumentos e do desenho auxiliado por computador deixava lacunas na formação que se pretendia para os egressos.

A partir desse cenário, o departamento de Engenharia de Produção assumiu a responsabilidade pelas disciplinas e iniciou um processo de reformulação das práticas pedagógicas que estabeleçam as bases para os experimentos descritos aqui. A evolução de tal reformulação coincide com a própria evolução de competências em modelagem paramétrica dos professores responsáveis. Um exemplo dessa evolução está na própria escolha do software utilizado na disciplina. Inicialmente foi utilizado o AutoCAD desde a versão 2004, até a mudança para o modelador SolidWorks, momento em que foi possível introduzir e experimentar na prática o conceito de parametrização.

O objetivo principal da pesquisa a qual os experimentos estão vinculados é a identificação de práticas pedagógicas que possibilitem uma sólida formação de competências de representação gráfica e fundamentos de projeto. Especificamente, pretende-se identificar as possibilidades oferecidas pelos modeladores tridimensionais na formação dessas competências e avaliar de que forma a utilização de esboços a mão livre contribuem para a construção de habilidades de modelagem tridimensional.

A abordagem metodológica principal dos experimentos se baseia no conceito de dissecação mecânica, definido como o uso de um produto acabado para ensinar conceitos de engenharia e princípios de elaboração de projetos (LEAKE; BORGERSON, 2008). O processo de dissecação do produto permite aos alunos verificar de que forma problemas específicos de projeto foram resolvidos pelos engenheiros em situações reais no mercado. Além disso, permite a abordagem de modelagem tridimensional paramétrica dos componentes do produto.

Na prática, o processo de dissecação mecânica consiste em quatro etapas principais:

- Identificação das partes individuais que compõe o equipamento. Essa identificação parte do princípio que uma peça individual tem duas características fundamentais, ou seja, se caracterizam por possuir uma geometria específica e um material específico.
- Desmontagem do equipamento em suas peças individuais com a utilização de ferramentas manuais.
- Medição das peças com o uso de instrumentos de precisão como o paquímetro e o micrômetro.
- Elaboração de esboços técnicos a mão livre para registro dos parâmetros dimensionais e orientação na construção dos modelos tridimensionais no computador.

Essa abordagem baseada na dissecação mecânica permite uma ligação natural com os ambientes de modelagem disponíveis no software, descritos abaixo.

Além disso, o nível de complexidade progressivo que se estabelece nas tarefas de modelagem tridimensional, também se relaciona com a própria estrutura do software. A maioria dos modeladores paramétricos tridimensionais disponíveis atualmente está estruturada em três ambientes principais:

- Peças – ambiente de modelagem das partes individuais do equipamento.
- Montagem – ambiente de organização e posicionamento e montagem dos produtos e equipamentos. Nesse ambiente são inseridas as peças modeladas anteriormente.
- Desenho – ambiente de geração das vistas ortográficas e perspectivas com a finalidade de impressão ou geração de desenhos bidimensionais que compõem a documentação técnica do produto.

Essa abordagem possibilita aos alunos uma aproximação bem mais contextualizada dos componentes que estão sendo modelados e estabelece uma forte ligação entre os modelos e os processos de fabricação e princípios de projeto vinculados a ele. Nesse processo, os alunos analisam o equipamento como um todo e identificam os componentes individuais que são caracterizados por possuírem geometria e material específico.

Adicionalmente, a pesquisa procura identificar, com o uso de questionários, de que forma se dá a construção de habilidades de raciocínio espacial a partir da elaboração de representações com o uso de esboços a mão livre e da dissecação mecânica. Os resultados parciais desses questionários já foram publicados em trabalhos anteriores (BORGES, 2014). Esses resultados confirmam a importância da elaboração de esboços como forma de aproximação e conhecimento da peça a ser modelada, entretanto é necessária uma abordagem metodológica mais robusta para confirmação das observações e avanço nas conclusões da pesquisa.

Dessa forma, com base nas conceituações teóricas apresentadas, descrevem-se aqui os experimentos pedagógicos em curso. Ressalta-se que tais experimentos estão em andamento e o que se apresenta neste trabalho é a descrição de resultados parciais.

Os experimentos estão sendo realizados com o foco na disciplina Representação Gráfica I B e C para o curso de Engenharia Mecânica, uma vez que se configura como o caso mais crítico, principalmente no que se refere à carga horária. A proposta da disciplina é a abordagem dos conteúdos de Representação Gráfica desde os conceitos básicos da Geometria Descritiva nas primeiras aulas até a modelagem tridimensional paramétrica de uma máquina complexa no final do período como um trabalho desenvolvido em equipe, como se descreve a seguir.

O conteúdo é dividido em três partes principais. A primeira se inicia de uma forma tradicional, com os alunos frequentando aulas expositivas e práticas, com a elaboração de exercícios utilizando técnicas de esboços a mão livre. Os conteúdos abordados estão relacionados desde os conceitos básicos de Geometria Descritiva até as projeções ortográficas, perspectivas isométricas, cortes, dimensionamento e construções geométricas. Os alunos desenvolvem as tarefas a partir de material impresso (perspectivas isométricas de peças mecânicas simples), elaborando sempre esboços a mão livre.

Na segunda parte, os exercícios são elaborados a partir de modelos físicos tridimensionais, tanto para a construção de projeções ortográficas quanto para o desenho de perspectivas isométricas. Nessa etapa também se solicita que os desenhos sejam feitos a mão livre. Os objetos tridimensionais são trabalhados a partir de modelos de peças didáticas em madeira até peças mais complexas que são parte das máquinas existentes no laboratório de fabricação.

Na terceira parte os alunos vão para o laboratório de informática para começar a trabalhar com ferramentas computacionais de modelagem sólida paramétrica (SolidWorks). Nessa etapa da disciplina a intenção é a aproximação ao ambiente do software a partir de exercícios que vão desde algumas peças simples, passando por componentes de complexidade média, até partes que apresentam maior dificuldade de modelamento. Além disso,

são realizados exercícios de montagem com a utilização das peças básicas já modeladas.

Nessa etapa final, os alunos começam a fazer medições e modelagem de peças de equipamentos mecânicos do laboratório de fabricação. O objetivo é apresentar as tarefas mais complexas de modelagem 3D e fazer a ligação com os conhecimentos adquiridos nos exercícios anteriores. Nessa fase, as peças a ser modeladas já fazem parte do equipamento que vai ser objeto do trabalho final da disciplina, atribuído a grupos de quatro a cinco alunos, aplicando o conceito de dissecação mecânica.

Os resultados esperados no trabalho final são a modelagem de cada parte individual da máquina, a realização da montagem no ambiente virtual correspondente do modelador tridimensional e a geração e edição dos desenhos técnicos correspondentes a cinco componentes do equipamento, além de um desenho de conjunto com a identificação das peças.

A análise dessas atividades revelam pontos interessantes que devem ser trabalhados com os alunos. O primeiro é a necessidade de uma boa estratégia de organização na tarefa de planejar a execução do trabalho, incluindo o levantamento das dimensões de cada peça. Uma vez que os alunos têm que se organizar e dividir as tarefas entre os membros da equipe, é necessária uma boa coordenação para permitir a modelagem de peças e a montagem com precisão, ou seja, partes esboçadas e modeladas por pessoas diferentes devem se encaixar perfeitamente na montagem final. Dessa forma, verifica-se a necessidade de elaboração de esboços precisos das partes para minimizar as ambiguidades e a falta de informações que podem surgir na montagem final. Assim, a capacidade de gestão das informações é também trabalhada pelos alunos de forma a superar esse tipo de problema.

A seguir é apresentado o resultado dessa abordagem com um exemplo prático de uma máquina de média complexidade modelada por um grupo de alunos do curso de Engenharia Mecânica.

EXEMPLO DE APLICAÇÃO: MÁQUINA POLICORTE

O objeto de estudo é um equipamento denominado Máquina Policorte, disponível no laboratório de fabricação. Trata-se de um equipamento montado a partir de 34 partes individuais. Dessas partes individuais, apenas o motor de corrente alternada foi incorporado a partir de pesquisa realizada em bancos de modelos tridimensionais na internet. Tal prática é permitida às equipes durante o desenvolvimento do trabalho por se considerar parte do processo de projeto real de um equipamento desse tipo. A Figura 5 apresenta uma fotografia da máquina real na bancada do laboratório ao lado da imagem realista elaborada a partir do modelo geométrico criado, além de um fragmento do desenho do conjunto por uma perspectiva isométrica associada à lista de componentes do produto.

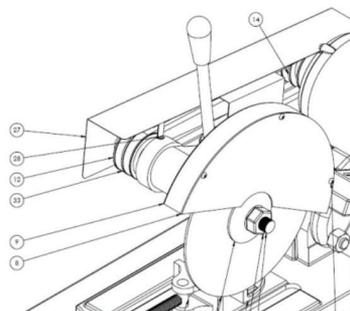


Figura 5. Máquina policorte.
Fonte: Elaboração do autor.

A progressão da modelagem do equipamento pode ser feita peça a peça e com a elaboração de submontagens parciais até se chegar à montagem final. Um aspecto importante é a nomeação de cada peça ao longo do processo, além da atribuição de um material específico para cada elemento. Essa tarefa em particular também contribui para a contextualização dos conteúdos da disciplina, já que é necessária uma pequena pesquisa para o estabelecimento de uma nomenclatura e associação de material de forma correta.

A representação em desenho isométrico é gerada no ambiente de desenho que permite a inserção de vistas ortográficas e em perspectiva com a possibilidade de geração automática de cotas e balões de identificação, entre outros recursos de desenho.

A proposta da disciplina, de acordo com a ementa atual, teria alcançado os principais objetivos com a descrição do trabalho realizado pelos alunos no caso específico dessa equipe. Entretanto, pelo interesse despertado e pelas potencialidades do programa, o projeto avançou um pouco além do exigido para a obtenção dos créditos. Nesse sentido, os alunos se propuseram a aperfeiçoar o modelo para fazer testes de interferência entre as peças e simular o movimento de componentes dinâmicos. Tais testes se mostraram bem sucedidos e auxiliaram na correção de parâmetros específicos dos componentes. Em complementação a esse tipo de estudo, a equipe se propôs a pesquisar os conceitos básicos de simulação por elementos finitos e realizar um teste de carga em um dos componentes do equipamento.

A Análise por Elementos Finitos (Finite Element Analysis – FEA) é um método de análise numérica utilizado em diversas áreas da engenharia para a solução de problemas e previsão do comportamento de produtos. Em termos matemáticos, trata-se de uma técnica numérica descrita por um conjunto parcial de equações diferenciais (KUROWSKI, 2014). Do ponto de vista do processo de projeto, verifica-se que os modelos paramétricos discutidos aqui são a base para descrição geométrica a ser utilizada em uma análise por elementos finitos. Também deve ser ressaltado que as ferramentas disponíveis atualmente apresentam limitações e devem ser utilizadas com critério e de forma simultânea ao processo de projeto. Existe vasta literatura disponível sobre o tema. Sugere-se uma introdução a partir do ponto de vista da modelagem tridimensional (FIALHO, 2012).

Dessa forma, no caso da máquina policorte, foi selecionado um componente para a realização de uma análise estática de carga. O componente é a alavanca que move o conjunto de polias e disco de corte. Os passos seguidos para a realização da análise são descritos a seguir:

- 1 – A partir das peças modeladas e da montagem realizada, foi identificada e selecionada a parte principal a ser analisada. No caso, foi identificada a alavanca de acionamento do conjunto do disco de corte. Também foi definido o tipo de simulação a ser realizada. Nesse caso, uma análise estática de carga.
- 2 – O segundo passo é a vinculação de materiais a cada parte. Tal tarefa já havia sido realizada no processo de modelagem das peças individuais. No caso da alavanca foi associado o aço AISI 1020.
- 3 – O terceiro passo é o estabelecimento das condições de fixação do componente. No caso em tela, o componente foi fixado pela parte extrema do eixo roscado, onde é fixado no conjunto de polias e disco de corte.
- 4 – O quarto passo é o estabelecimento das cargas a ser aplicadas na simulação. Foi estimada uma carga de 5 N. Ao final dessa etapa pode-se considerar que o modelo matemático para a análise está definido.
- 5 – O quinto passo é a geração da malha ou discretização do modelo. Neste caso específico foi gerada uma malha com qualidade alta contendo 7001 elementos e 11417 nós.
- 6 – Por fim, o sexto e último passo é a execução do estudo de análise de carga estática. Alguns aspectos dos resultados são apresentados a seguir.

Apesar dos resultados serem plotados em escala de cores que permitem uma avaliação visual e identificação das áreas em que ocorrem as maiores concentrações de tensão, deve-se primeiramente analisar os resultados

numéricos. No caso da alavanca que foi associada ao aço AISI 1020, tem-se que o limite de escoamento é da ordem de $3.51571e + 008 \text{ N/m}^2$. O valor máximo de carga verificado na análise foi de $2.2416e + 006 \text{ N/m}^2$ (**área em vermelho intenso na imagem da Figura 6**), valor bem inferior ao limite de escoamento levando a conclusão de que a carga aplicada de 5 N não interfere no comportamento do produto em condições normais de uso.

Vale ressaltar que uma vez realizada a análise, pode-se variar diversos parâmetros geométricos e físicos com o objetivo de encontrar uma solução ótima para a configuração final do componente. Essa possibilidade associada a outros recursos da plataforma aumentam de forma significativa o potencial de contribuição da ferramenta ao processo de projeto como um todo.

A imagem da Figura 6 apresenta alguns aspectos interessantes do ponto de vista didático também. Pelas características das condições de contorno e carga atribuídas ao modelo, verifica-se visualmente o comportamento da peça em regime de trabalho. Destaca-se a linha neutra em azul na parte mediana da haste e as partes em tons de laranja e vermelho intenso onde se concentram cargas de compressão na parte inferior (e onde foi verificado o maior valor) e tração na parte superior. Existem outros tipos de resultado que podem ser plotados, como os valores de deslocamento elástico. Esse valor é apresentado com uma escala exagerada para permitir a sua visualização. Entretanto, os valores obtidos são mínimos e compatíveis com o material e carga aplicadas. Na simulação realizada o deslocamento máximo foi da ordem de $8.14012e-006 \text{ mm}$ na ponta da alavanca.

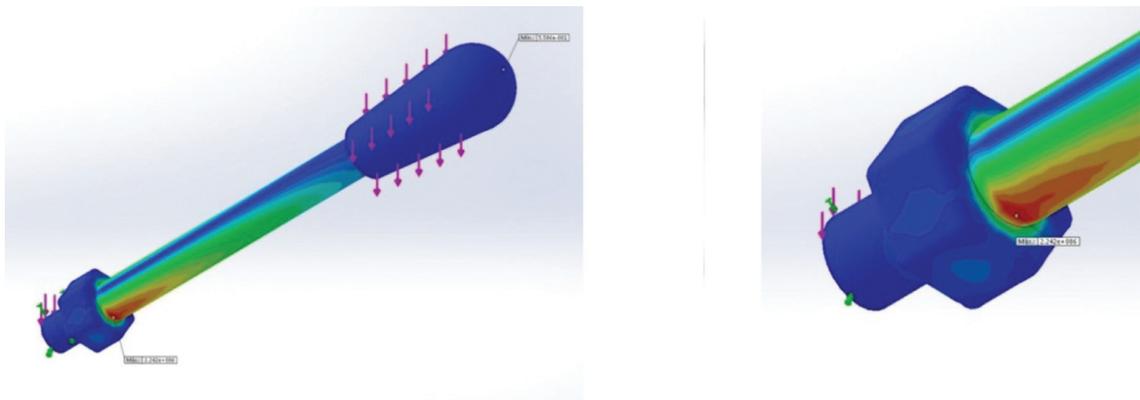


Figura 6. Simulação de carga estática. Fonte: Elaboração do autor.

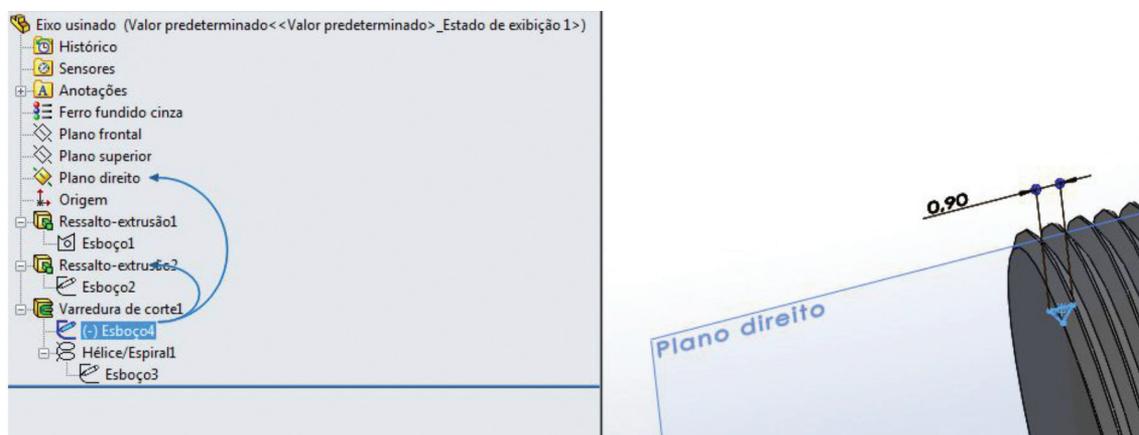
A análise mostrada aqui é somente uma amostra das possibilidades da plataforma. Nesse sentido, deve-se levar em conta tanto as outras possibilidades de análise e simulação incorporadas na plataforma do SolidWorks quanto também as suas limitações.

Adicionalmente, uma direção nova que está sendo explorada atualmente na pesquisa é a investigação do processo de modelagem de uma peça por meio da análise da árvore de recursos que registra todas as operações realizadas. Essa funcionalidade da estrutura do software possibilita a execução de diversas tarefas, sendo uma delas a edição de esboços e operações de modelagem tridimensional. Dessa forma pode-se editar a geometria ou os valores de dimensão atribuídos a ela desde o início do processo de modelagem, resultando em uma atualização da peça, da montagem e dos desenhos gerados.

A partir dessa estrutura que registra todos os passos executados na modelagem de uma peça, verificou-se a possibilidade de analisar o trabalho executado sob a ótica dos processos de ensino e aprendizagem. O principal objetivo é identificar a sequência de etapas de forma a orientar o aluno na execução das tarefas, de forma que seja possível um aproveitamento mais eficaz dos recursos do software.

A Figura 7 apresenta um recorte da mesma peça exemplificada na Figura 6. Uma possibilidade de análise que se pode fazer é, por exemplo, identificar de que forma foi gerada a geometria básica da alavanca. Nesse caso identificou-se que foi executada uma extrusão a partir do esboço de um círculo (esboço1 e ressalto-extrusão1 na Figura 7). Neste caso específico, teria sido melhor a execução da mesma peça a partir da revolução de um retângulo em torno do eixo longitudinal. Tal argumento é justificado pelo fato de permitir que o software identifique no módulo de estimativa de custos o possível processo de fabricação que irá gerar a peça, nesse caso o torneamento.

Na mesma direção, identifica-se na Figura 7 o pequeno triângulo com 0,90 mm de lado (esboço 4), desenhado no plano direito. Essa geometria foi utilizada para gerar a rosca na ponta do eixo. A geração desse recurso foi executada pela revolução do triângulo ao longo da hélice gerada a partir de um círculo na base do eixo (esboço 3). Nesse trabalho, especificamente, todos os elementos da árvore poderiam estar nomeados de forma a facilitar a identificação e o processo de edição posterior, além da própria análise do processo como se argumenta aqui.



Por fim, a partir das possibilidades verificadas nas análises iniciais realizadas, vislumbra-se um potencial significativo para o aprofundamento das pesquisas, já que existe uma base de dados de equipamentos modelados desde o início desse tipo de abordagem, compreendendo um período de pelo menos cinco anos.

Figura 7. Árvore de recursos.
Fonte: Elaboração do autor.

CONSIDERAÇÕES FINAIS

Esse artigo procurou articular o conceito fundamental de representação gráfica, sua relação com o processo de projeto de produtos e a utilização das atuais plataformas de modelagem paramétrica tridimensional no contexto dos processos de ensino e aprendizagem da expressão gráfica em cursos de engenharia. Nessa articulação, o modelo integrado do produto em torno de uma base de dados geométrica única se mostra como o elemento de união entre os fundamentos da expressão gráfica, as ferramentas de modelagem computacional e as aplicações e análises de engenharia, possíveis a partir dessa base.

Nesse sentido, observando as estruturas curriculares e os métodos de ensino e aprendizagem da expressão gráfica, verifica-se a necessidade de incorporação e ampliação dos conhecimentos, habilidades e competências à formação de engenheiros, arquitetos e designers. Entretanto essa necessidade se dá em um cenário que apresenta a tendência para a redução de carga horária nos conteúdos de desenho e ainda traz na sua cultura uma

desvinculação com o ensino do projeto de forma geral. Soma-se a isso a multiplicidade de ferramentas computacionais disponíveis atualmente.

As tecnologias apresentadas não se configuram como novidades no contexto das ferramentas de apoio ao processo de projeto. Entretanto, a maneira de utilizá-las no âmbito de disciplinas de representação gráfica apresenta ainda um campo aberto para explorações e experimentos pedagógicos.

Dessa forma, são apresentadas algumas conclusões ainda de caráter parcial, a partir das experiências realizadas:

- O uso de esboços a mão livre a partir das medições realizadas parece contribuir para a formação da capacidade de raciocínio espacial, necessitando de aprofundamento da pesquisa para sua confirmação.
- A utilização de equipamentos reais possibilita a contextualização de conteúdos teóricos, atuando como estímulo ao processo de ensino e aprendizagem.
- O uso desses equipamentos também abre espaço para que o professor articule outras áreas do conhecimento técnico com a representação gráfica, envolvendo processo de projeto, processos de fabricação, materiais, entre outros.
- Verifica-se a necessidade de aprofundar a investigação da capacidade de raciocínio espacial a partir de experimentos mais robustos como a aplicação de testes de aptidão e análise de protocolos.
- A partir dessas conclusões, são propostas algumas diretrizes para orientar ações efetivas nos processos de ensino e aprendizagem da representação gráfica no contexto do curso estudado, como também para a continuidade da pesquisa.
- Aumento da carga horária de representação gráfica de dois para quatro créditos. Esse aumento permitiria um melhor aprofundamento nos conteúdos tanto no que se refere ao desenho técnico quanto em relação à contextualização desses conteúdos incorporando conceitos de processo de projeto e processos de fabricação.
- Utilização de forma mais eficiente da carga horária ainda dedicada a métodos ultrapassados de representação, como o desenho de precisão com a utilização de instrumentos tradicionais. Essa carga poderia ser utilizada para uma abordagem mais produtiva, na qual as habilidades e competências do desenho a mão livre sejam trabalhadas na formação de conceitos sólidos de projetividade e raciocínio espacial.
- Estabelecer protocolos de pesquisa mais robustos com o objetivo de investigar como ocorre o processo de raciocínio espacial e a sua construção por parte dos alunos. Nesse sentido, pretende-se a continuidade da pesquisa com aplicação de testes como o Mental Cutting Test (MCT) e o Mental Rotating Test (MRT) (MARESCH, 2013).
- Estabelecer protocolos de pesquisa com o objetivo de analisar as estratégias de modelagem a partir da própria estrutura do software, como exemplificado na análise da árvore de recursos.

Apesar das experiências terem sido realizadas no contexto do curso de Engenharia Mecânica, é possível vislumbrar sua aplicação em disciplinas básicas de representação em cursos de Arquitetura e Design com as devidas adaptações. A relação com cursos de design de produto se mostra ainda mais forte pela natureza dos artefatos a ser projetados.

Percebe-se entre os alunos do curso que a estratégia de dissecação mecânica utilizada associada à modelagem tridimensional e às simulações realizadas cumpre o papel de forte elemento incentivador. Nesse sentido, um dos resultados dos experimentos realizados foi a proposição de uma disciplina eletiva denominada Prototipagem Virtual, que objetiva a complementação da formação básica em representação gráfica com as diversas possibilidades de aplicação a partir do uso de plataformas paramétricas, fazendo a ligação com os conteúdos de processos de projeto.

O autor agradece ao programa de bolsas de iniciação científica da UFJF pela possibilidade de uma bolsa BIC que auxiliou de forma significativa o desenvolvimento da pesquisa.

REFERÊNCIAS

- ANDRADE, M. L. V. X.; RUSCHEL, R. C. **Building Information Modelling (BIM)**. In: Processo de projeto em arquitetura: da teoria à prática. São Paulo: Oficina de Textos, 2007. p. 421-442.
- BARR, R. E. Engineering graphics educational outcomes for the global engineer: an update. **Engineering Design Graphics Journal**, v. 76, n. 3, p. 8-12, 2012.
- BARR, R. E., JURICIC, D. From drafting to modern design representation: The evolution of engineering design graphics. **Journal of Engineering Education**, v. 83, n. 3, p. 263-170, 1994.
- BORGES, M. M.; OLIVEIRA, V. F. A geometria descritiva nas disciplinas do curso de Engenharia: um contexto para aprendizagem. **Revista da Escola de Minas**, v. 54, n. 1, p. 69-73, 2001.
- BORGES, M. M. **Proposta de um ambiente colaborativo de apoio aos processos de ensino/aprendizagem do projeto**. 2004. Tese (Doutorado em Engenharia de Produção) – Universidade Federal do Rio de Janeiro, 2004.
- BORGES, M. M. Engineering design graphics experiences in the context of Brazilian engineering curricula. In: AUNG, W.; DOYLE, T.; SANDNES, F. E.; ZAITSEVA, L. (Org.). **Innovations 2014: World Innovations in Engineering Education and Research**, v. I. 1. ed. Potomac: iNEER, 2014. p. 51-62.
- DANOS, X.; BARR, R. E.; GÓRSKA, R.; NORMAN, E. Curriculum planning for the development of graphicacy capability: three case studies from Europe and the USA. **European Journal of Engineering Education**, v. 39, n. 6, p. 666-684, 2014. DOI: 10.1080/03043797.2014.899324
- FABRICIO, M. M. Projeto simultâneo na construção de edifícios. 2002. 329 p. Tese (Doutorado em Engenharia) – Escola Politécnica, Universidade de São Paulo, 2002.
- FERGUSON, E. S. **Engineering and the mind's eye**. Massachusetts: The MIT Press, 1993.
- FIALHO, A. B. **SolidWorks Premium 2012: teoria e prática no desenvolvimento de produtos industriais – plataforma para projetos CAD/CAE/CAM**. São Paulo: Érica, 2012.
- FOGGIATTO, J. A.; VOLPATO, N.; BONTORIN, A. C. B. Recomendações para modelagem em sistemas CAD-3D. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE ENGENHARIA DE FABRICAÇÃO, 4., 2007. **Anais...** Estância de São Pedro: COBEF, 2007.
- NASCIMENTO, V. H. G.; CARDOSO, C.; BORGES, M. M. BIM: conhecimentos necessários e desafios iniciais de adaptação. In: **ENCONTRO NACIONAL DE TECNOLOGIA DO AMBIENTE CONSTRUÍDO**, 15., 2014, Maceió. **Anais...** Maceió: ENTAC, 2014. DOI: <http://dx.doi.org/10.17012/entac2014.673>
- KUROWSKI, P. M. **Engineering analysis with SolidWorks Simulation 2014**. Mission: SDC Publications, 2014.
- LASEAU, P. **Graphic thinking for architects and designers**. Nova York: Van Nostrand Reinhold, 1989.
- LEAKE, J. M.; BORGERSON, J. L. Engineering design graphics: sketching, modelling and visualization. Nova York: John Wiley & Sons, 2008.
- MARESCH, G. Spatial ability: the phases of spatial ability research. **Journal for Geometry and Graphics**, v. 17, n. 2, p. 237-250, 2013.
- NAVEIRO, R. M. **Conceitos e metodologias de projeto**. In: NAVEIRO, R. M.; OLIVEIRA, V. F. Projeto de Engenharia, Arquitetura e Desenho Industrial. Juiz de Fora: UFJF, 2001.
- OLIVEIRA, V. F.; BORGES, M. M. **A geometria descritiva nas disciplinas do curso de Engenharia: um contexto para aprendizagem**. **Revista da Escola de Minas**, v. 54, n. 1, p. 69-73, 2001. DOI: <http://dx.doi.org/10.1590/S0370-44672001000100012>.
- PORTER, T. **The architect's eye: visualization and depiction of space in architecture**. Londres: Chapman & Hall, 1997.
- SORBY, S. A. **Developing 3-D spatial visualization skills**. **Engineering Design Graphics Journal**, v. 63, n. 2, p. 21-32, 1999.
- SUZUKI, K. Traditional Descriptive Geometry Education in the 3D CAD/CG Era. **Journal for Geometry and Graphics**, v. 18, n. 2, p. 249-258, 2014.