

## SIMULAÇÃO NUMÉRICA

*Philippe R. B. Devloo<sup>(A)</sup>*

### INTRODUÇÃO

Escrever um texto sobre simulação numérica para um público não especializado na área é um grande desafio. Na composição do texto fui obrigado a refletir sobre o tema que estou pesquisando de forma diferente da que tenho costume. Tentei escrever de forma que o conteúdo seja interessante para o público técnico e não técnico. O texto é uma reflexão sobre a área baseado em minha experiência profissional.

Na primeira seção faço uma reflexão sobre o conceito de simulação. A simulação como conceito existe desde a existência do homem civilizado. A simulação executada por computador existe desde o advento do próprio computador. Na segunda seção enfatizo a importância da simulação numérica para a competitividade industrial. Caso o país não desenvolva sua competência em simulação numérica, ele estará fadado a ser um pólo produtor de projetos importados. Na terceira seção tento elencar vários tipos de simulação numérica. Destaco a área de mecânica computacional pela sua sistemática de desenvolvimento e pela sua abrangência de aplicações. Demonstro como a área de mecânica computacional é multidisciplinar e quais áreas ela envolve. Delineio o perfil do profissional da área.

Comenta-se a presença da área de mecânica computacional na UNICAMP e a atuação do LabMeC (Laboratório de Mecânica Computacional) da Faculdade de Engenharia Civil. Finalmente, destaco as dificuldades enfrentadas pelos profissionais da área, tanto a nível institucional quanto ao seu relacionamento com os órgãos de fomento à pesquisa.

### SIMULAÇÃO NUMÉRICA

A simulação faz parte da capacidade humana de imaginação. O nosso cérebro cria constantemente imagens da realidade à sua volta. Platão até questiona a validade da sua

visão do mundo: será que o que nós vemos é real ou será que nós vemos apenas uma sombra da realidade projetada numa parede. Imaginação e simulação são conceitos correlatos: na imaginação criamos um sistema no qual a relação causa-efeito é imaginada e comparada com a realidade. Uma das nossas capacidades mais refinadas de simulação é a intuição: nela, um modelo refinado da realidade é criado na mente, na qual a relação causa-efeito é prevista, sem por isso ter um modelo racional do fenômeno e nem uma visão clara da causa.

Uma das áreas mais desenvolvidas de simulação por computador é a criação de ambientes virtuais. Exemplo dessa área de simulação são os jogos de computador: neles, é criado um mundo virtual no qual o jogador interage. À medida que a potência dos computadores aumenta, o realismo desses ambientes torna-se cada vez mais convincente. O impacto desses simuladores sobre o mundo da computação é tamanho que o jogo de computador é considerado o maior motivo econômico para o desenvolvimento de computadores pessoais mais potentes. Esta área não é a área de atuação do autor.

Outra área é a simulação por computador de padrões de tomadas de decisão encontrados na natureza. Esses incluem a simulação de mecanismos de seleção e/ou padrões de raciocínio praticados pelo cérebro. A área de algoritmos genéticos ganhou impulso pelo trabalho de John Nash, cuja biografia foi representada no filme "Uma Mente Brilhante". Esta área tem sido de pesquisa muito ativa. As suas áreas de aplicação incluem otimização multiobjetivo, *data mining*, etc. As redes neurais são uma representação em estruturas de computador das ligações entre neurônios. Redes neurais conseguem prever respostas em função de um conjunto de parâmetros de entrada, mediante um treinamento de um conjunto de valores entrada/saída.

Finalmente, a área de mecânica computacional procura simular diversos fenômenos físicos utilizando uma sistemática que envolve engenharia, matemática e ciência da computação. O fenômeno físico em estudo é representado por um sistema de equações parciais diferenciais (tradução do problema de engenharia para a matemática). O sistema de equações é aproximado pelo método de elementos finitos (problema de matemática para

problema de matemática aplicada e de ciência da computação). Finalmente os resultados da simulação são comparados com o fenômeno físico em estudo (engenharia).

Os fenômenos físicos podem ser os mais variados, indo da simulação estrutural à simulação de fluídos e gases, ou até mesmo circuitos elétricos.<sup>(4)(5)</sup> Em certas áreas a simulação por elementos finitos é consagrada; em outras, as técnicas ainda estão em fase de desenvolvimento.

A área de mecânica computacional tem ganho impulso pela disponibilidade de computadores potentes a preços acessíveis. Qualquer computador de mesa hoje tem o poder computacional de um supercomputador de 20 anos atrás.<sup>(B)</sup> A simulação numérica está ao alcance de qualquer empresa, desde que tenha o software e os recursos humanos adequados.

Os recursos humanos necessários para o desenvolvimento da área de mecânica computacional são diversos: precisa-se de pesquisadores para o desenvolvimento de modelos matemáticos para fenômenos físicos, de pesquisadores para aproximar esses modelos com algoritmos de elementos finitos, de pesquisadores para o desenvolvimento de softwares e de engenheiros para utilizar esses softwares e tirar conclusões adequadas. Trata-se, por motivos óbvios, de uma área multidisciplinar de pesquisa, na qual engenheiros de todas as áreas de atuação, matemáticos e cientistas de computação colaboram em uma área comum.

## **O SIGNIFICADO DA SIMULAÇÃO NUMÉRICA PARA A COMPETITIVIDADE INDUSTRIAL**

O modelo de produção industrial atual favorece uma produção em massa quase totalmente automatizada. Nela o produto é realizado através de uma série de manipulações por maquinários. A origem deste processo produtivo é freqüentemente uma evolução de um processo fragmentado que foi gradualmente automatizado. Isto é, chegou-se a automatização da produção passo a passo, num demorado processo de aferições e ajustes.

Vimos por outro lado uma grande pressão pelo público consumidor, para o oferecimento de produtos customizados que aparentemente não são produzidos em massa (mas com preço somente alcançável em produção automática). Um exemplo desse tipo de customização é a opção oferecida pela empresa Nike para a compra de tênis totalmente customizados pela internet, a serem entregues em casa pelo correio.

Este argumento demonstra a origem da demanda sobre o processo produtivo ser não somente por preço competitivo (i.e. automatizado) mas também pela necessidade de saber adaptar/customizar a produção em tempo menor que o praticado atualmente.

A simulação numérica do processo produtivo tem um impacto muito grande sobre o mesmo:

- Para realizar a simulação deve-se conhecer o processo de produção profundamente. Este estudo e/ou questionamento do processo normalmente já resulta em melhorias imediatas.
- Tendo a simulação da produção, é possível modificá-la virtualmente (sem interferir no processo funcional) e otimizá-la de acordo com um dado objetivo (e.g. aumento de produção e/ou redução de custos).
- Novos produtos podem ser desenvolvidos em ambiente virtual, diminuindo o seu tempo de desenvolvimento. O produto que entra em produção requer menos aferição. Um exemplo clássico deste impacto é a indústria automobilística. O tempo entre concepção de um carro e sua produção foi reduzido de aproximadamente três anos para um ano e meio.<sup>(C)</sup> A montadora consegue trazer inovações tecnológicas mais rapidamente ao mercado.

Pode parecer simples e que apresentemos a cura milagrosa para automação: basta simular para melhorar. De fato, desenvolver uma simulação é um processo custoso que requer pessoas especializadas e qualificadas. Esta publicação quer demonstrar os benefícios

da implantação do processo de simulação. O custo da sua implantação deve ser avaliado caso a caso.

## **A ÁREA DE MECÂNICA COMPUTACIONAL**

A área de mecânica computacional apresenta uma forma sistemática para desenvolver processos de simulação numérica. Este processo está sendo praticado em todas as áreas de engenharia, na matemática aplicada e na ciência da computação. Muitos processos podem ser simulados com softwares comerciais disponíveis, mas mesmo nas áreas na qual a simulação numérica é amplamente utilizada, existem tópicos de pesquisa ativos, tais como otimização, controle de qualidade de aproximação, otimização de tempo de execução, etc.

## **SISTEMÁTICA DE SIMULAÇÃO**

A maioria dos fenômenos físicos respeita uma ou mais leis de conservação. Para a engenharia estrutural, a conservação de movimento linear é fundamental. Para a mecânica dos fluidos acrescenta-se a conservação de massa e energia. Em outras áreas de engenharia, outras quantidades são conservadas.

Em um segundo passo a cinemática do fenômeno é estudada: a cinemática de sólidos para a engenharia estrutural e/ou a cinemática de partículas de fluido para a mecânica dos fluidos.

Finalmente a lei constitutiva relaciona a cinemática e a quantidade conservada. Chega-se, desta maneira, a um sistema de equações diferenciais que aproximam o fenômeno estudado.

Quase todos os modelos envolvem uma simplificação do objeto físico: o modelo adequado é aquele que pode ser aproximado por técnica numérica em tempo hábil e que consegue capturar a essência do fenômeno em estudo. O aprimoramento da simulação é um tema ativo de pesquisa.

## ÁREAS ENVOLVIDAS

A prática da mecânica computacional é uma atividade multidisciplinar.

- A área de engenharia apresenta o problema a ser estudado. A mecânica computacional está presente em todas as áreas de engenharia. Neste sentido ela transcende a diferença que atualmente existe entre as várias especialidades de engenharia. Na faculdade de Engenharia Civil da UNICAMP encontram-se professores dedicados à simulação numérica de algum fenômeno em todos os departamentos.
- A matemática tem tido um impacto decisivo sobre a mecânica computacional. A análise funcional é a ferramenta fundamental para provar a consistência e convergência do método de elementos finitos.<sup>(D)</sup> Sem a garantia de convergência e qualidade da aproximação numérica, os engenheiros não poderiam confiar nos resultados obtidos pelos métodos de aproximação. O estudo de métodos eficientes para resolução de grandes sistemas de equações tem permitido simular problemas com um realismo cada vez maior. Finalmente, a teoria de otimização aplicada à aproximação numérica, juntamente com uma função objetiva, permite otimizar o objeto em estudo.
- Qualquer simulação numérica passa pelo desenvolvimento de um programa de computador. Esses programas precisam ser eficientes e adaptados à arquitetura do computador. Grandes avanços têm sido feitos na última década em desenvolvimento de linguagens de programação de alto nível de abstração, porém eficientes. A implementação dos programas em computadores paralelos é ainda um desafio.

## PERFIL DO PROFISSIONAL

Na aplicação da simulação numérica existem basicamente dois perfis de profissionais: os versados na utilização de programas comerciais de simulação para analisar projetos e os desenvolvedores de programas de simulação numérica.

O profissional com formação em simulação numérica deve focar o objeto a ser estudado, com ênfase à análise do modelo desenvolvido e à interpretação dos resultados. O profissional com foco no desenvolvimento de algoritmos tem uma visão mais teórica do processo de simulação.

Formar um aluno de pós-graduação na área de mecânica computacional é um desafio. Qualquer que seja a sua formação na graduação, o aluno deve receber uma formação complementar nas áreas que não cursou. Isto entra em conflito com a pressão da pós-graduação em formar alunos num prazo cada vez menor.

No departamento de estruturas da Faculdade de Engenharia Civil, o aluno ingressante cursa uma disciplina na área de mecânica dos sólidos, na qual aprende os fundamentos da mecânica dos meios contínuos. Ele cursa também uma disciplina introdutória de análise estrutural, na qual é exigido o desenvolvimento de um programa de análise estrutural. No desenvolvimento do seu tema de pesquisa, o aluno ainda irá aprofundar-se num tópico especializado da mecânica computacional.

## **A MECÂNICA COMPUTACIONAL NA UNICAMP**

A mecânica computacional está presente em todas as áreas tecnológicas da UNICAMP. É comum dizer que hoje quase tudo se faz por computador. Certamente a engenharia sente esse impacto da área de simulação numérica cada vez mais fortemente. Todo ano abrem-se novas áreas de aplicação para a simulação numérica:

- Na medicina desenvolveu-se a área de simulação de escoamento de sangue nas veias (hemodinâmica). Este estudo é significativo no projeto das cirurgias de ponte de safena. Com simulação numérica é possível estudar a eficiência do escoamento sanguíneo após a cirurgia.
- Na área de odontologia estuda-se a concentração de tensões provocada por implantes dentários. A simulação numérica pode nos ajudar a escolher os materiais mais apropriados para cada implante.

- O comportamento estrutural de barragens, edifícios, pontes e outras construções civis sempre é analisado com softwares de simulação, antes da construção.
- O campo eletromagnético provocado por antenas pode ser simulado em três dimensões. O possível aquecimento das células cerebrais pelo uso freqüente do telefone celular tem sido um tópico muito comentado.

Em todas as áreas mencionadas existem profissionais na UNICAMP dedicados à simulação numérica. Todos enfrentam os mesmos problemas de formação dos alunos e da combinação de engenharia, matemática e ciência da computação. Se fosse possível criar uma entidade dedicada à mecânica computacional, esta mesma poderia prestar serviços de formação de alunos. Esta organização irá diminuir a sobreposição existente e melhorar a qualidade do ensino.

## **O LABORATÓRIO LABMEC**

O objetivo do Laboratório de Mecânica Computacional é agregar os professores pesquisadores do Departamento de Estruturas da Faculdade de Engenharia Civil que atuam na área de mecânica computacional. Como tal, ele deve atuar como pólo multidisciplinar para o desenvolvimento de simulação numérica. O LabMeC possui um parque de computadores de última geração, interligados em rede de alta velocidade e configurados com o sistema Linux (<http://labmec.fec.unicamp.br>).

Diversos projetos de pesquisa já foram desenvolvidos no LabMeC com apoio de órgãos de fomento como a Fapesp, CNPq e projetos de cooperação com a indústria. Dois projetos no LabMeC dizem respeito ao desenvolvimento de softwares de domínio público, e por isso merecem destaque particular

**PZ**



O ambiente PZ é um ambiente escrito em linguagem de computador, orientada para objetos, para o desenvolvimento de algoritmos de elementos finitos.<sup>(1)</sup>

O desenvolvimento de algoritmos sofisticados para o método de elementos finitos requer um investimento muito grande da parte do pesquisador. Isto inviabiliza o envolvimento de pesquisadores em diversas áreas, porque durante o desenvolvimento deste software eles não têm material para publicação.

Por exemplo, demoramos no LabMeC três anos para implementar o refinamento hp adaptativo tridimensional<sup>(E)</sup> para o método de elementos finitos. Isto considerando que o autor desenvolveu sua tese de doutorado no tema. Qual outro pesquisador poderá investir este tempo no desenvolvimento de uma técnica que já foi implementada? O ambiente incorpora diversas técnicas que, por serem implementadas em linguagem orientada por objetos, podem ser reaproveitadas.

## **OOPar**

O limite dos problemas que podem ser simulados sempre será a potência do computador do qual dispomos (e a eficiência dos simuladores). Recentemente os construtores de processadores admitirem que encontrarem uma barreira de frequência de relógio dos mesmos (não haverá pentium de 5 GHz). A solução encontrada é dotar os computadores de várias processadores que podem dividir as tarefas da máquina. Este tipo de computador é chamado de computador multiprocessado.

Um dos maiores desafios em desenvolvimento de softwares é a adaptação de programas para computadores multiprocessados. O projeto OOPar oferece um ambiente de programação para o desenvolvimento de programas paralelos.<sup>(F)</sup>

O OOPar apresenta uma abordagem de desenvolvimento de programas paralelos inovadora, introduzindo o conceito de dados distribuídos e tarefas que atuam sobre os dados. O OOPar não introduz uma linguagem de computador estendida. Ele define um

abordagem para computação paralela e implementa uma biblioteca com interface simplificada.<sup>(3)(2)</sup> O código é aberto e disponível para qualquer um.

Seguindo a filosofia do projeto PZ, o OOPar proporciona ao pesquisador uma ferramenta que simplifica a criação de programas paralelos sem restrições ao seu uso.

## O DESENVOLVIMENTO DA ÁREA

**(UNICAMP)** Como mencionado anteriormente, a área de mecânica computacional está presente na maioria das unidades da UNICAMP. Por outro lado, não há nenhuma política institucional para o desenvolvimento da área. Neste ponto, cada unidade desenvolve e oferece seus cursos de elementos finitos, programação e álgebra linear. Naturalmente, é possível cursar disciplinas de pós-graduação em outras unidades, mas o canal de comunicação não está estabelecido.

Utilizamos este canal de comunicação para pleitear a formação de um centro ou núcleo dedicado à área de simulação numérica/mecânica computacional. A missão de tal centro poderia estar nas áreas de:

- Formação de alunos
  - Oferecimento de cursos de pós-graduação dedicados à simulação numérica. Estes cursos seriam das áreas de engenharia, matemática aplicada e ciência da computação.
  - Oferecimento de cursos optativos para alunos de graduação e coordenação de projetos de iniciação científica.
- Centro multidisciplinar para professores
  - O centro poderá ser o canal de comunicação para os docentes que atuam na área. A troca de idéias entre profissionais de diferentes áreas, mas que se dedicam ao mesmo tema, será muito enriquecedor.
- Prestador de serviços

- O centro poderá agrupar a capacitação existente em simulação numérica e apresentar a UNICAMP como centro de excelência em simulação numérica.

**(Brasil)** A área de mecânica computacional não aparece na classificação das áreas de fomento à pesquisa. As áreas seguem as organizações tradicionais das universidades e não contemplam áreas multidisciplinares. Sendo assim, pesquisadores atuando em simulação numérica submetem projetos nas áreas mais variadas.

Criando uma área específica para simulação numérica pode-se alcançar os seguintes benefícios:

- Avaliação de projetos por pesquisadores dedicados à área. Na situação atual, um projeto submetido por um pesquisador que atua na área de elementos finitos não tem garantia de que seu projeto será julgado por alguém da sua área.
- Não existe orçamento para a área de mecânica computacional. O investimento para a área de análise está espalhado em todas as áreas de fomento. Não há visão clara de quanto esta área absorve de investimento em pesquisa e/ou quantos pesquisadores estão sendo formados na mesma.
- Considerando que a área não existe na classificação CAPES, não existem projetos temáticos dirigidos para a mesma.

## CONCLUSÕES

Tentamos elencar a área de simulação numérica com ênfase na área de mecânica computacional. Com a disponibilidade de computadores potentes a preços acessíveis, a simulação numérica está ao alcance de todos. O impacto da área sobre o desenvolvimento industrial do país é muito grande. A competitividade em produção industrial depende da capacidade de simular os processos existentes e dos processos futuros.

Muitos pesquisadores dedicam-se à área de simulação numérica nas instituições de ensino e pesquisa, mas eles estão espalhados nas diversas repartições das mesmas. As estruturas das mesmas favorece a especialização em detrimento da multidisciplinaridade.

O autor é pesquisador na área de elementos finitos na Faculdade de Engenharia Civil da UNICAMP. Sua pesquisa inclui dois projetos cujos objetivos são disponibilizar ambientes de desenvolvimento de softwares de elementos finitos e computação paralela para a comunidade acadêmica. Caso esses softwares sejam adotados por diferentes equipes, abrir-se-á um caminho para o diálogo multidisciplinar em torno da mecânica computacional.

As instituições de pesquisa não estão respondendo adequadamente às necessidades de uma área multidisciplinar tal como a área de mecânica computacional. A qualidade de pesquisa e o desenvolvimento da área de mecânica computacional seriam beneficiados com a atuação explícita das instituições. Na situação atual há uma sobreposição grande de temas pesquisados. Há também uma sobreposição desnecessária de cursos básicos na área.

## **AGRADECIMENTOS**

Agradeço os alunos do LabMeC pelo ambiente estimulante de trabalho nestes últimos anos. Agradeço em particular o Eng. Edimar Cesar Rylo pela revisão do texto. Agradeço minha esposa pela revisão e pelas discussões sobre o mesmo.

## **NOTAS**

- (A) Faculdade de Engenharia Civil – UNICAMP; [phil@fed.unicamp.br](mailto:phil@fed.unicamp.br) (abril de 2005).
- (B) Nestes computadores foram simulados os projetos do Boeing 747 e do Space Shuttle.
- (C) Este tempo foi reduzido devido à simulação mas também devido à tecnologia da informação em geral.
- (D) O método de elementos finitos é o método mais utilizado para aproximar sistemas de equações parciais diferenciais.
- (E) Adaptividade tridimensional hp diz respeito a técnicas de controle de erro de aproximação.

(F) Um programa paralelo é um programa adaptado para um computador multiprocessado.

#### **REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS:**

- (1) P. R. B. Devloo. PZ: An object oriented environment for scientific programming. *Computer Methods in Applied Mechanics and Engineering*, 150:133--153, 1997.
- (2) P. R. B. Devloo. Object oriented programming applied to the development of scientific software. In E.Dvorkin S.Idelsohn, E.Oñate, editor, *Computational Mechanics, New Trends and Applications*, Edificio C-1 Campus Nord UPC, Gran Capità, s/n, 08034 Barcelona, Spain, June 1998. Fourth World Congress on Computational Mechanics (IV WCCM), CIMNE.
- (3) P. R. B. Devloo, F. A. M. Menezes, and E. C. Silva. OOPAR: The development of an environment for parallel computing using the object oriented programming philosophy. In B.H.V. Topping, editor, *Advances in Computational Structures Technology*, pages 151-156, 10 Saxe-Coburg Place, Edinburgh, EH3 5BR, UK, 1996. CIVIL-COMP Press.
- (4) Hayrettin Kardestunder and Douglas H. Norrie. *FINITE ELEMENT HANDBOOK*. McGraw-Hill, 1987.
- (5) O. C. Zienkiewicz. *The Finite Element Method in Engineering Science*. McGraw-Hill Publishing Company Limited, Maidenhead, 1971.