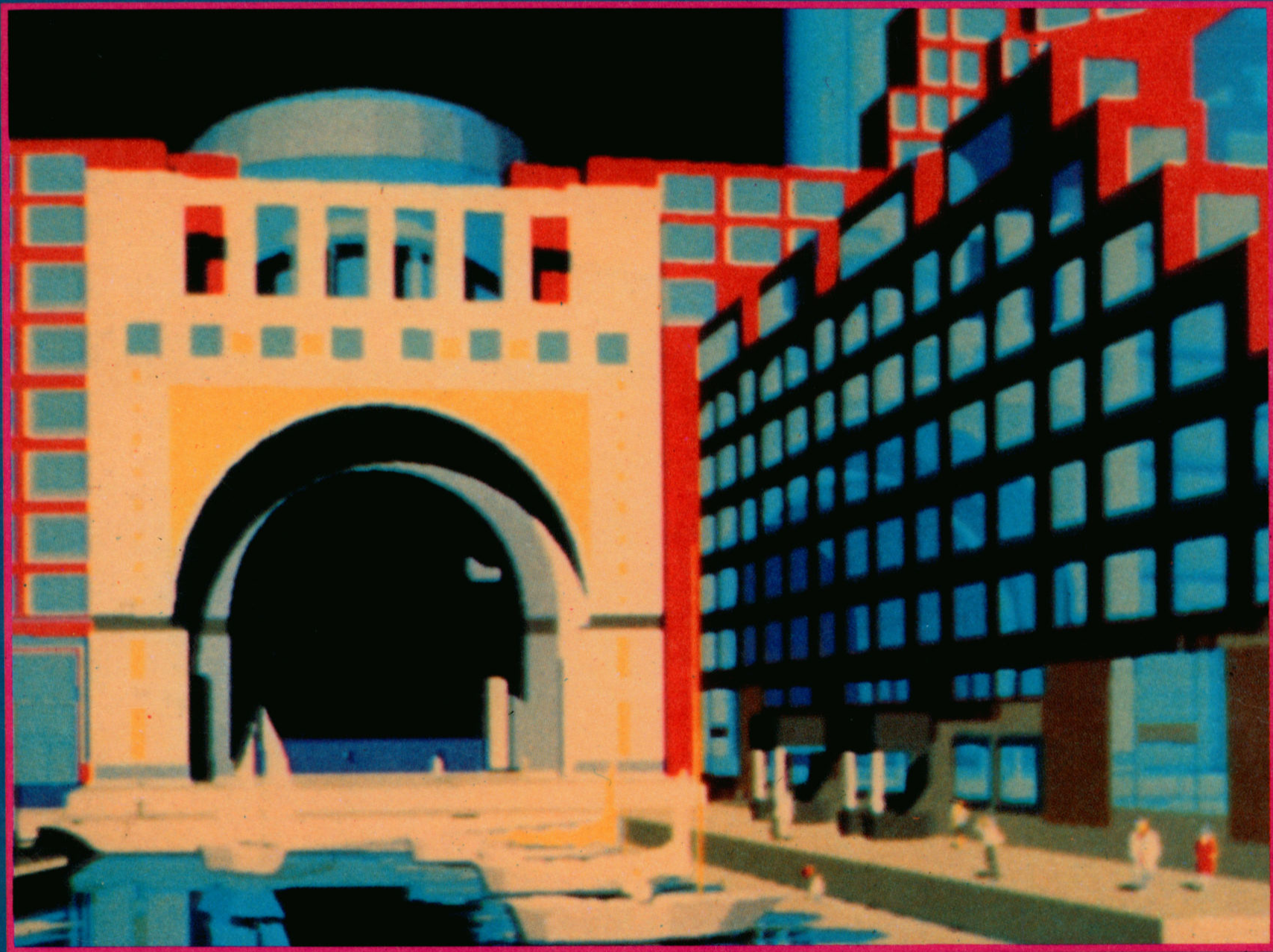


E N T E N D A O  
**COMPUTADOR**

ANIMAÇÃO, GRÁFICOS E IMAGENS



**NOVA CULTURAL**







**E N T E N D A O**

# **COMPUTADOR**

**ANIMAÇÃO, GRÁFICOS E IMAGENS**



**NOVA CULTURAL**

Authorized Portuguese Edition © 1988, Editora  
Nova Cultural S.A. Original edition © 1985  
Time-Life Books Inc. All rights reserved.

Nenhuma parte desta publicação pode ser reproduzida  
por qualquer meio, seja eletrônico ou mecânico,  
inclusive por equipamentos ou sistemas de classificação  
de informações e pesquisa, sem a prévia autorização da  
editora, exceto curtos trechos para resenhas, desde que  
com o devido crédito.

Time-Life is a trademark of Time Inc., U.S.A.

Edição organizada pela Editora Nova Cultural Ltda.  
Av. Brigadeiro Faria Lima, 2000 — 3º andar  
CEP 01452 — São Paulo — SP — Brasil  
(Artigo 15 da lei 5988, de 14/12/1973)

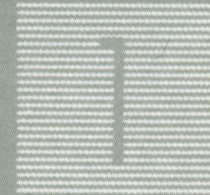
Esta obra foi composta na AM Produções Gráficas Ltda.  
e impressa na Divisão Gráfica da Editora Abril S.A.

**ISBN 05-13-00088-4**

---

**5**

A ciência e a tela de prata  
Aliviando a carga do arquiteto



---

**31**

Exploração das realidades artificiais  
Visões gráficas num meio eletrônico



---

**55**

Índice

---

**56**

Créditos das fotos

---



# A ciência e a tela de prata

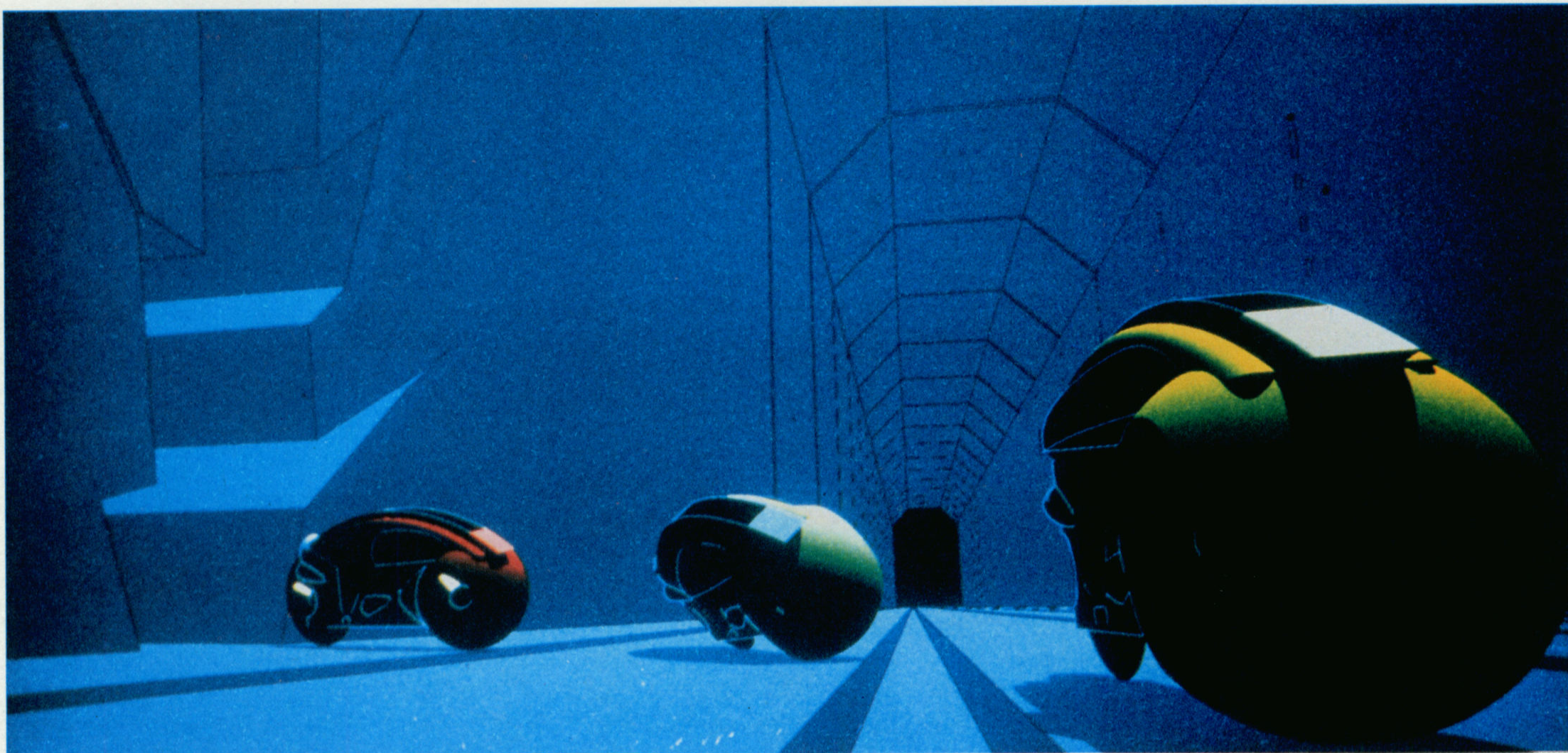
No estúdio de animação situado na esquina da avenida Mickey com Dopey Drive, Richard Taylor constatou que tinha um problema. Ele já trabalhara criando shows de luzes para bandas de rock, e adquirira renome fazendo animações para comerciais de tevê. Agora, nos estúdios Disney, em Burbank, Califórnia, co-supervisionava o mais instigante projeto de efeitos especiais dessa indústria em 1981: o filme *TRON*, baseado em computador.

Enquanto Taylor e sua equipe gráfica, sentados, no escuro, na sala de projeção do estúdio, assistiam a cenas não-editadas do trabalho feito no dia anterior, um projetor lançou à tela a figura de aparência extraterrena de um ator, ajoelhado às margens de um lago de cristal. Trajando um uniforme luminoso, brilhante, acentuado por listras de cores claras, a figura reclinou-se para beber água do lago — e seu estômago desapareceu. A sala caiu na gargalhada. Richard Taylor resmungou e a cena foi repetida várias vezes, enquanto Taylor tentava descobrir o que saíra errado. Finalmente, ele decidiu que a seqüência seria refeita, e a projeção na tela continuou. Alguns minutos mais tarde, a pequena platéia riu novamente quando os atores em outra cena, ao descerem por uma escadaria, ora ficavam com os pés flutuando no ar, ora afundavam dentro dos degraus.

Em ambos os casos, uma técnica comum em filmes convencionais — a de superpor ação ao vivo sobre um fundo artificial — falhara. Os personagens vivos haviam sido fotografados descendo escadas reais ou deitando-se em solo real: as escadas e o chão foram então substituídos por escadas e chão criados em computador. No entanto, quando as imagens reais e as do computador foram combinadas, o ajuste ficou ligeiramente deslocado.

Apesar do caráter inovador e ambicioso das imagens que o computador gerara para *TRON*, Taylor e seus colegas não eram os primeiros a utilizar computadores na realização de filmes. A mais antiga dessas aplicações fazia uso de um computador para controlar os movimentos das câmeras de filmagem. Um dos pioneiros nesse campo foi o inventor John Whitney Sr., cujo estúdio ficava na garagem de sua casa, em Pacific Palisades, um município cerca de 30 quilômetros a oeste de Hollywood. Durante a década de 50, Whitney fizera experiências com mecanismos diretores de canhões da Segunda Guerra Mundial, e computadores analógi-

Esta vívida fotografia de bolas de bilhar em movimento não é, na realidade, o que aparenta: as bolas e o fundo de feltro verde foram produzidos numa tela de computador com um software gráfico especializado. As técnicas necessárias para se obter tal realismo foram, em grande parte, desenvolvidas para responder às exigências de realizadores de filmes, que procuram uma integração sem discontinuidades entre efeitos especiais e fotografia de ação viva.



cos, para inventar o que ele denominou “tecnologia de fundo de quintal”.

Uma das técnicas de Whitney consistia em criar a ilusão do movimento fotografando uma pintura estática com uma câmera que ele deslocava ligeiramente a cada fotograma. Posteriormente, essa técnica foi aplicada a modelos. Por exemplo, a parte frontal de uma aeronave que se aproximava parecia inclinar-se lateralmente e voar no sentido oposto quando a câmera era recuada ao mesmo tempo que o modelo ia sendo girado em torno de seu eixo horizontal. O controle da câmera com um computador tornava possível a repetição precisa de tais movimentos, de modo que uma imagem de fundo ou um segundo modelo, fotografados num diferente segmento do filme, poderiam integrar-se numa mesma composição sem risco de invadirem a imagem do modelo original.

No entanto, a idéia de criar um efeito especial construindo e manipulando um modelo exclusivamente dentro do computador — as chamadas imagens geradas por computador, ou CGI (em inglês, *computer-generated imagery*) — surgiu apenas no início da década de 70, quando os softwares gráficos adquiriram a versatilidade necessária para se adequarem às produções cinematográficas e televisivas. Pouco depois, em meados da década de 70, *Westworld* e *Futureworld*, dois filmes sobre andróides que escapam ao controle de seus mestres, flertaram com as imagens de computador, para simular a aparência do mundo tal como o veriam os olhos de um robô.

Para *Guerra nas Estrelas*, lançado em 1977, o diretor George Lucas manteve um dos homens de sua equipe de efeitos especiais ocupado durante três meses para criar uma seqüência de apenas 90 segundos — uma breve cena antes da batalha final; os espectadores vêem algo que parece um diagrama computadorizado das camadas interiores da Estrela da Morte, o maléfico quartel-general do planeta do Império. Foi esse, de fato, o único emprego autêntico de computação gráfica no filme: os visores computadorizados das cabinas, que ajudaram os pilotos a atirar nas espaçonaves inimigas, foram produzidos com técnicas de animação convencionais. Dois anos mais tarde, o filme *O Buraco Negro*, produzido pelos estúdios Disney, inclui 75 segundos de CGI: uma grade em forma de redemoinho que ameaçava sugar, sem escapatória, a espaçonave dos heróis.

Neste fotograma do filme *TRON*, um trio de veículos futuristas chamados *lightcycles* atravessa uma paisagem de grades. Cada *lightcycle* compõe-se de 57 formas geométricas, que foram combinadas por um programa de modelagem de sólidos. O fato de conterem menos elementos básicos tornava os *lightcycles* mais fáceis de animar que os modelos criados com polígonos.

Essas modestas realizações iniciais são garatujas infantis comparadas à computação gráfica envolvida em *TRON*. Infelizmente para seus criadores, o filme não correspondeu às expectativas de bilheteria, nem recebeu da crítica a aclamação que se esperava. Estabeleceu, no entanto, um padrão para o uso da computação gráfica no cinema, que filmes posteriores, bem como efeitos especiais para televisão, utilizariam como medida. Mais que isso, enquanto *TRON* ainda estava sendo montado, os programadores já trabalhavam no desenvolvimento de sofisticados softwares gráficos que abririam novos caminhos para a criação de cenas tanto imaginárias como realistas, praticamente indistinguíveis de fotografias. Os desenvolvimentos no hardware, por sua vez, caminhariam no mesmo ritmo: em poucos anos, poderosos supercomputadores seriam capazes de dar conta dos milhões de bits de informações digitais que entram na produção de uma imagem, e as técnicas de impressão em filme seriam capazes de ajustar automaticamente escadarias a atores.

#### UMA DUPLA DECIDIDA

Os dois homens que estavam por trás de *TRON* eram Steven Lisberger, técnico em animação, e Donald Kushner, um advogado que se tornou produtor teatral e distribuidor de filmes. Em 1978, depois de fecharem o estúdio de animação de Lisberger, em Boston, foram para o sul da Califórnia completar *Animalympics*, desenho animado satírico sobre os Jogos Olímpicos que seriam realizados em Moscou em 1980. Quando os Estados Unidos decidiram boicotar os Jogos, caiu por terra o acordo entre Kushner e a National Broadcasting Company para levar o filme ao ar.

Enquanto isso, Lisberger descobriu alguns *video games* e teve uma idéia para um novo filme — uma fantasia em que as personagens eram atores vivos movendo-se num mundo eletrônico, e onde a animação era feita com computadores. A idéia de Lisberger se concretizaria em *TRON*, história a respeito de um programador brilhante mas dispersivo, que é sugado para dentro de um computador. Lá, ele luta duramente para sobreviver num mundo hostil habitado por tanques mortíferos, policiais-robôs e personagens com aspecto humano, muito parecidos com pessoas que ele conheceu do lado de fora.

Convictos de que poderiam obter o financiamento para *TRON* junto a uma das grandes companhias cinematográficas, Kushner e Lisberger prepararam uma apresentação detalhada, que completaram com descrições das personagens, um script e planos para a realização do filme. O projeto exigia uma fé extraordinária. “Quando estávamos juntando as partes do projeto”, disse Kushner mais tarde, “ainda não existia a base tecnológica para fazer a arte por computador de que precisávamos. Mas contávamos com o fato de que a tecnologia do computador progredia tão depressa que, quando estivéssemos prontos para fazer o filme, ela existiria.”

Quando o documento de apresentação ficou pronto, ele preenchia trezentas páginas amontoadas numa pasta de folhas soltas, que os sócios arrastaram por Los Angeles à procura de um patrocinador. Os estúdios Disney estavam em segundo plano na sua lista de financiadores possíveis. Devido à tradição das produções Disney, de desenhos animados feitos à mão, os dois realizadores achavam que o estúdio seria um dos menos propensos a adotar o conceito. Acontece que a companhia tinha, recentemente, nomeado Tom Wilhite, de 29 anos, como chefe de produção, e a proposta o instigou. “Foi a idéia mais interessante que já tinha visto, uma mito-

# Simplificação da arte de animação

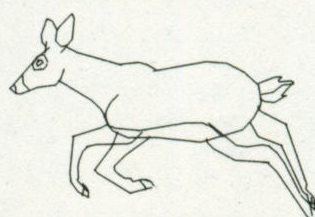
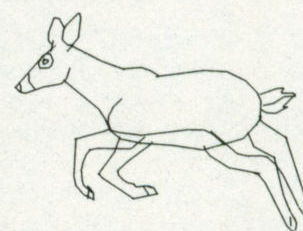
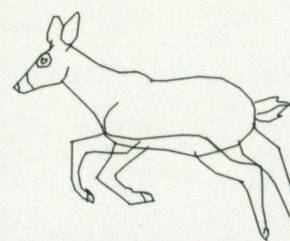
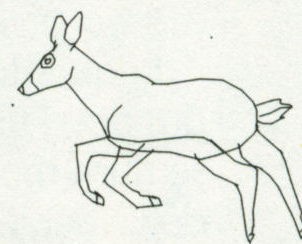
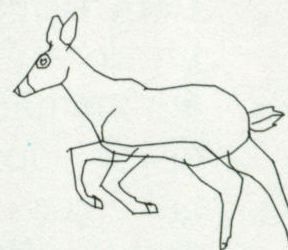
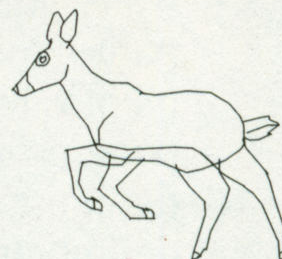
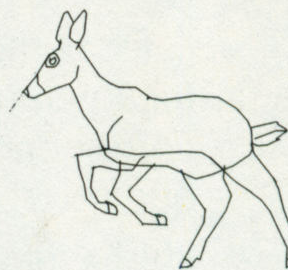
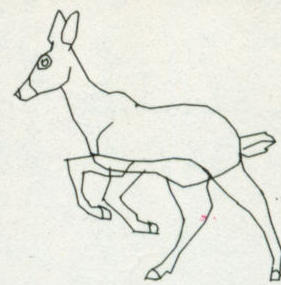
Os desenhos animados podem constituir um trabalho entediante para os adultos que os criaram. Cada breve minuto em que Mickey Mouse corre pela tela do cinema exige 1 440 meticulosos desenhos para que se obtenha a ilusão de um movimento fluente. Cada desenho deve ser pintado à mão sobre uma folha de plástico transparente chamada "cel", de modo que possa depois ser aplicada em sanduíche ao cenário de fundo. Um desenho animado de quinze minutos pode conter 30 000 desenhos e utilizar, durante um mês ou mais, uma equipe de vinte habilidosos animadores, artistas e editores.

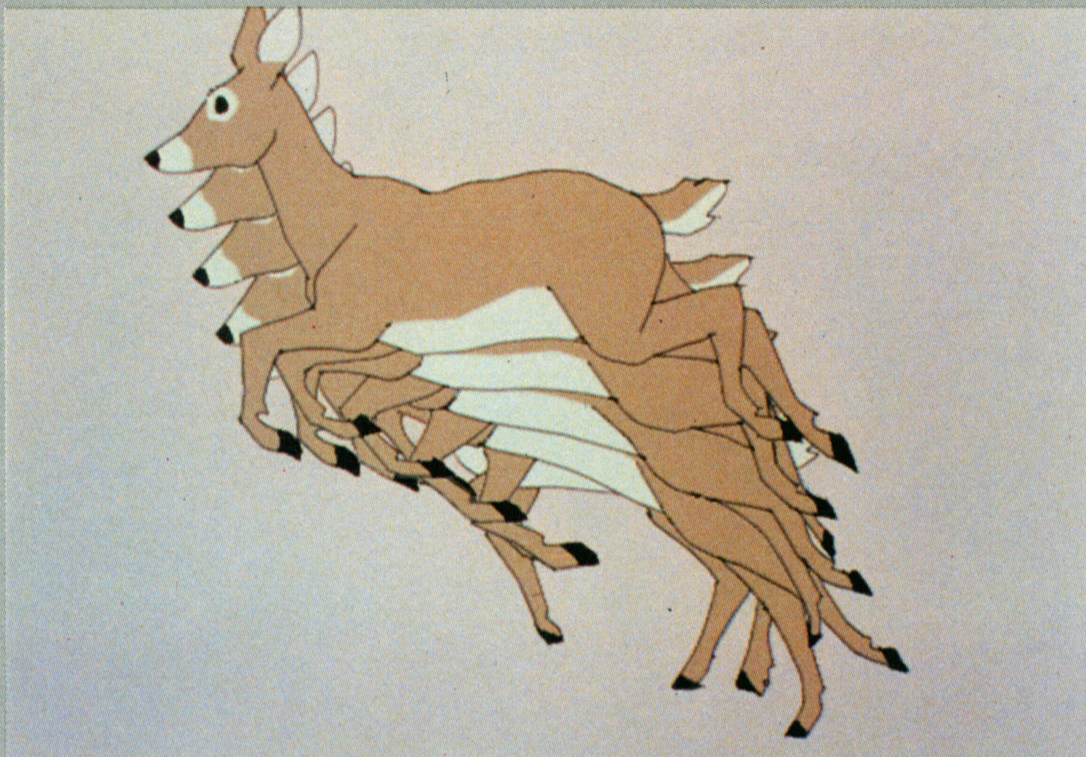
Os computadores podem simplificar o processo de animação e acelerá-lo dramaticamente. Atuando a partir de instruções de um operador humano, podem desenhar e ajudar a colorir 80% das ilustrações que entram num desenho animado. Por exemplo, com a assistência de um computador, um artista pode colorir cerca de quinhentos cels por dia em vez dos 35 a quarenta que podia colorir à mão.

A animação por computador poupa de várias maneiras o tempo do artista. Assim que um desenho entra no computador, ele pode ser aumentado, reduzido ou repetido à vontade. Num processo chamado interpolação linear, o computador permite ao animador desenhar apenas os fotogramas-chave de um movimento, como o que representa um veado saltando (*à direita*). Ao fazer isso, o artista fornece ao computador informações suficientes para que ele complete a ação, desenhando as demais figuras.

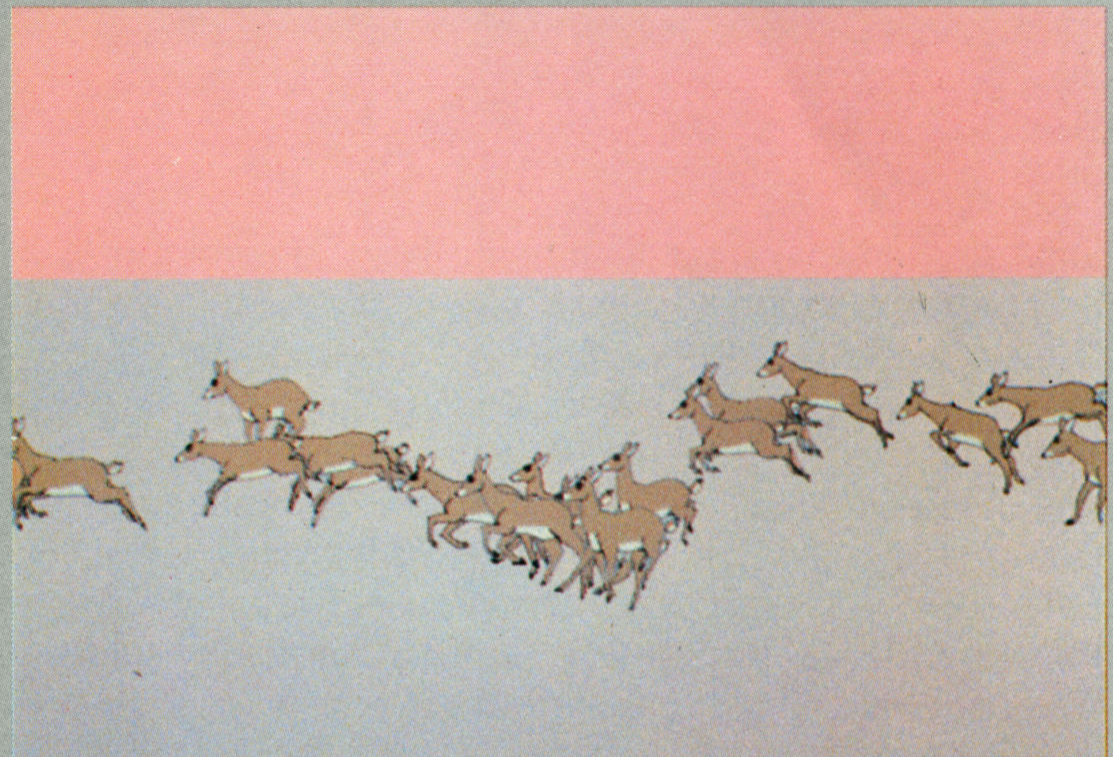
Colorir os desenhos também é uma tarefa que o computador executa com maior eficiência. Pressionando teclas, um artista pode instantaneamente preencher uma área com uma certa cor. Se não gostar do resultado, o artista só precisa pressionar algumas teclas para substituí-la por outra; na animação convencional, o artista teria que raspar a cor antiga e pintar o desenho novamente.

Estes oito desenhos fazem parte de uma série de 45 fotogramas que mostram um veado saltando. Um artista desenhou à mão as figuras do alto e do pé da página — chamadas fotogramas-chave — e depois as introduziu no computador, que criou os seis fotogramas intermediários por meio de um processo chamado interpolação linear. Em essência, o computador calculava até onde a cabeça, o corpo, as pernas e as patas do veado se moveriam em cada uma das seis divisões iguais entre os fotogramas-chave, e depois redesenhava o veado em cada estágio da ação.





Um animador superpôs cinco fotogramas-chave de um veado em várias posições de salto para confirmar que a ação não apresentará descontinuidade e que as cores permanecerão idênticas. O artista colore apenas os fotogramas-chave; o computador pinta as imagens intermediárias.



O que parece um bando de veados é, na verdade, o salto de um único veado duplicado várias vezes. Para evitar que o bando pareça se mover em sincronia perfeita, o artista instrui o computador para reproduzir o veado e seu ciclo de corrida em vários tamanhos e posições diferentes, e também para dar-lhes uma aparência cambaleante.



Auxiliado pelo computador, o artista combina cores vibrantes com um suave efeito de tinta pulverizada, criando assim um cenário mágico para o bando de veados.

logia de personagens inteiramente nova”, lembrou Wilhite. “Além disso”, continuou, “nós, em Disney, queríamos voltar aos empreendimentos arriscados, e *TRON* parecia o projeto perfeito para isso.” Em abril de 1981, Kushner e Lisberger obtiveram da Disney sinal verde para começar o trabalho.

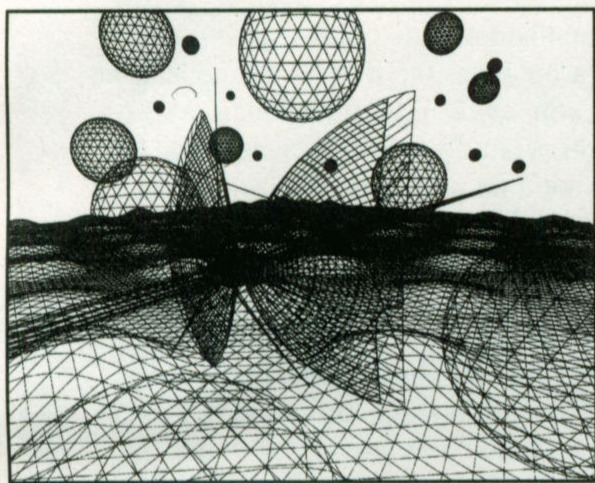
A computação gráfica para o filme de demonstração fora criada por três grupos: uma companhia de Elmsford, Nova York, chamada Mathematical Applications Group Inc., ou MAGI; a Information International Inc., ou Triple I, de Culver City, Califórnia; e um grupo do Instituto de Tecnologia de Nova York. Richard Taylor foi recrutado na Triple I, e incumbido de supervisionar os efeitos especiais para o filme. Originalmente, a Triple I deveria fazer todo o trabalho de computação gráfica para *TRON*. Mas o potencial de computação da companhia era insuficiente para dar conta das exigências do projeto e ela não tinha dinheiro para adquirir mais recursos. Por isso, contratou-se também a MAGI para dividir a carga, e duas outras firmas — a Digital Effects Inc., de Nova York, e a Robert Abel & Associates, firma de Los Angeles destacada por seus premiados trabalhos gráficos para a televisão. As duas últimas ficaram encarregadas dos letreiros e de algumas cenas.

#### **DINAMISTAS E IMAGISTAS**

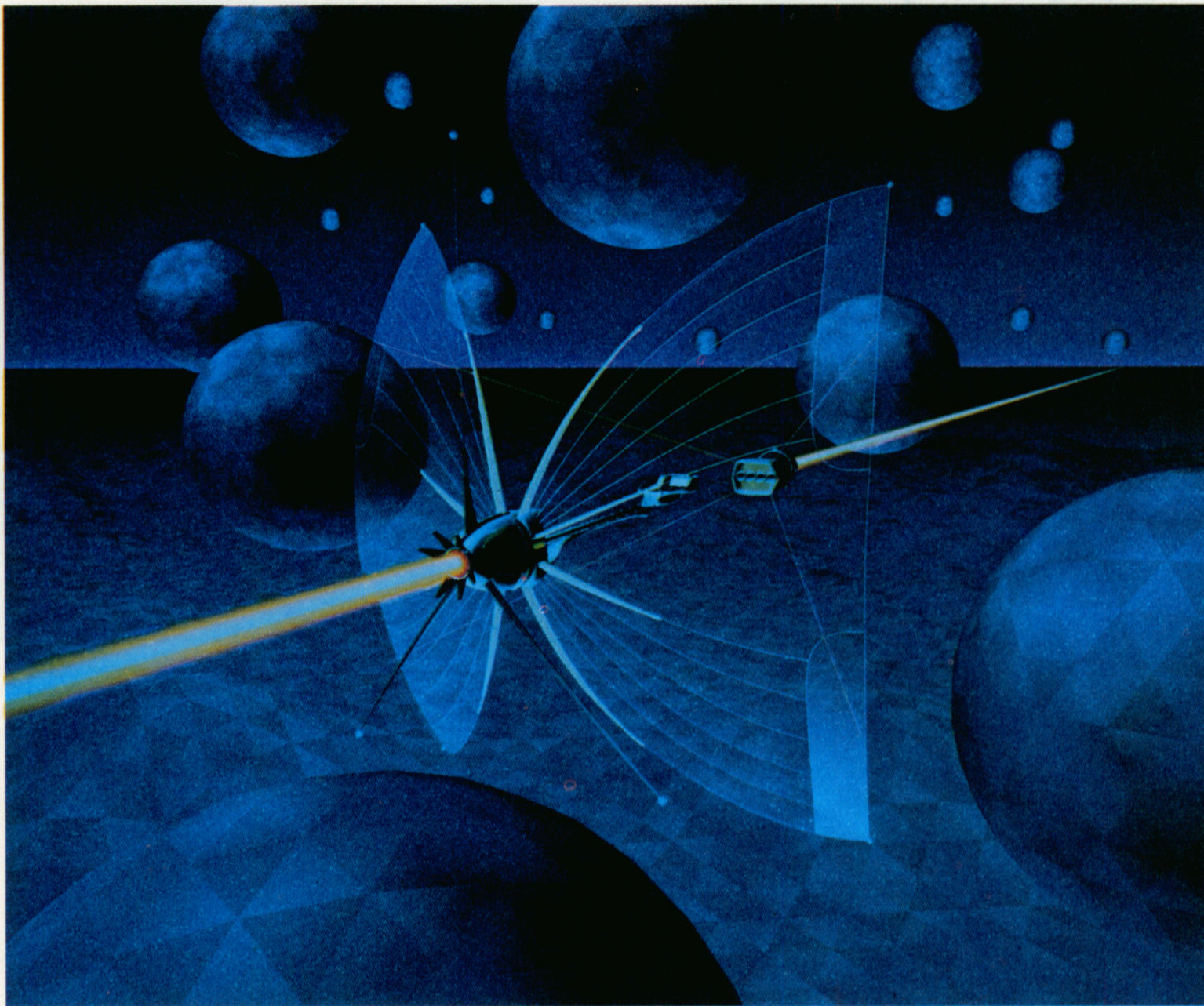
Se a Triple I tivesse feito todo o trabalho gráfico para *TRON*, o filme seria muito diferente do que é. De fato, a MAGI e a Triple I abordavam de maneiras radicalmente distintas as imagens geradas por computador, e essas abordagens produziram duas escolas de pensamento. Os dinamistas, representados pela MAGI, valorizavam o movimento em detrimento do detalhe, pois é nisso que os sistemas da MAGI se sobressaíam. Os imagistas, representados pela Triple I, enfatizavam a textura e a regularidade da imagem em detrimento do movimento.

A MAGI desenvolveu um sistema de formação de imagens chamado SynthaVision, que continha uma biblioteca de 25 formas sólidas, entre as quais cilindros, esferas, cones e toróides. O software da SynthaVision permitia a um artista conectar esses objetos, chamados primitivos geométricos, em construções elaboradas e então esculpi-las eletronicamente, dando-lhes qualquer forma que se fizesse necessária. Larry Elin, chefe da equipe de produção da MAGI, comparava o sistema com “uma caixa cheia de pequenas formas de madeira que podem ser soldadas umas às outras para criar formas mais complexas, com o atrativo adicional de se poder também subtrair formas ou partes de uma forma”.

O sistema SynthaVision, de usar blocos de construção para gerar imagens de computador, produzia objetos lisos, de aparência mecânica; com exceção dos recursos de sombreamento, havia poucos detalhes para indicar a curvatura das superfícies. No entanto, outra característica compensava essa carência de realismo. A SynthaVision só precisava de uma base de dados relativamente pequena para descrever até mesmo um objeto bastante complexo. Assim, tornava-se possível computar rapidamente as imagens, e uma vez computadas, podia-se exibí-las na tela à velocidade do filme — isto é, a uma rapidez suficiente para prever o uso da animação, e ajustá-la de modo preciso com a ação, à medida que sua presença fosse exigida no filme. Empregando uma “linguagem de diretor”, residente no próprio sistema SynthaVision, um animador podia descrever a trajetória que um objeto deveria seguir, avaliar os resultados na tela do computador, e então corrigir essa trajetória, se necessário. Essa capacidade para coreografar os movimentos dos objetos na tela tornou o sistema da MAGI adequado para as seqüências de *TRON*



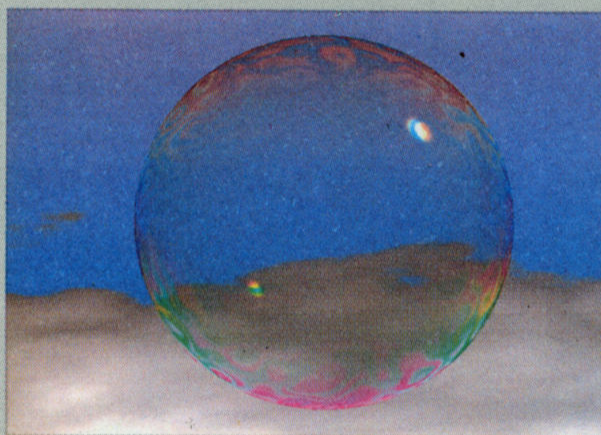
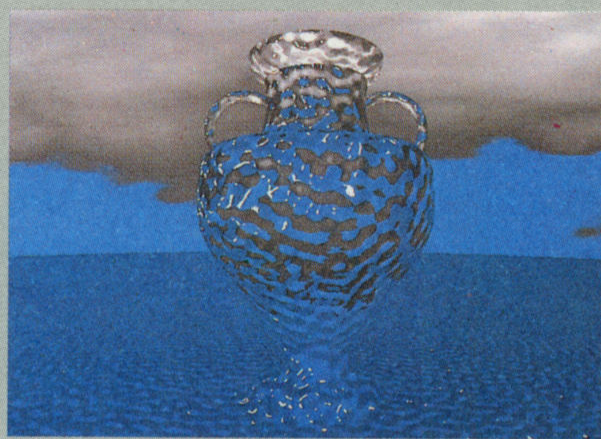
Diferentemente das *lightcycles* de *TRON* (página 6), feitas de formas sólidas simples chamadas primitivos geométricos, o Veleiro Solar (*Solar Sailer*), do mesmo filme, e o cenário à sua volta, foram modelados com uma malha de polígonos. Os desenhistas primeiramente esboçaram o veleiro em papel, dividindo-o em triângulos: depois, traçaram a imagem numa prancheta de digitalização para inseri-la no computador (acima). Os programas de interpretação acrescentaram cor e sombreamento à figura pronta (à direita). Essa técnica proporciona maiores detalhes que a modelagem de sólidos, mas requer muito mais memória do computador.



que dependiam da execução perfeita de movimentos complexos. Podia-se fazer as *lightcycles* — veículos rápidos, semelhantes a motos, propensos à mútua aniquilação — correrem emparelhadas numa das “arenas de *video game*” do filme; ou fazer com que os sinistros robôs de policiamento — os *recognizers*, arcos voadores de vôo anguloso, cujo papel era manter a ordem — se precipitassem em formação através da paisagem computadorizada de *TRON*, como se fossem aves de rapina mecânicas.

No entanto, a maneira como a Triple I abordava a geração de imagens por computador dificultava tal coreografia. Em vez de utilizar um pequeno número de primitivos geométricos para criar formas complexas, os artistas da Triple I construíram suas imagens com base em elaboradas articulações de polígonos, unidos como telhas de um fino mosaico tridimensional. Uma vez inserido no computador, o mosaico podia ser uniformizado, modelado, colorido, recoberto de textura e iluminado quase de qualquer maneira que o artista desejasse.

O forte dessa técnica era sua capacidade para modelar de maneira convincente detalhes como traços faciais distintivos ou as partes de uma espaçonave imaginária. Porém, diferentemente dos primitivos geométricos da MAGI, cada polígono era único e tinha de ser introduzido no computador pelas coordenadas que definiam cada um de seus vértices. Além disso, para dar ao computador uma apreciação tridimensional da imagem, era preciso fazer o registro de três conjuntos separados de coordenadas, que representavam as vistas frontais, laterais e do topo do objeto.



## Procedimentos para criar efeitos etéreos

Elementos cambiantes, e de bordas suaves, tais como fumaça ou água, são difíceis de modelar no computador, com as técnicas tradicionais. Mas os programadores estão descobrindo como gerar tais imagens por meio de procedimentos simples, executados repetidas vezes, freqüentemente com a ajuda de alguma variação aleatória. A fumaça à extrema esquerda foi produzida por um programa que criou formas senoidais e depois quebrou, distorceu e determinou alguns pontos por onde seria possível ver o fundo. O vaso no alto, à esquerda, e seu fundo adquiriram a textura aquosa por meio de um programa que atribuiu um padrão regular de reflexos e sombras aos modelos que, sem esse recurso, pareceriam lisos. E a bolha à esquerda foi criada por um programa que modelou o efeito de cores e transparência, produzido quando a luz é difratada através de uma superfície ensaboada.

Em suma, um único objeto num fotograma podia exigir a criação de 15 000 polígonos — tarefa hercúlea que um artista da Triple I levaria semanas para completar.

O rastreamento de milhares de polígonos quase arrasou o computador da Triple I: as imagens mais elaboradas, que exigiam sombreamento e outros detalhes, podiam levar mais de um minuto para aparecer na tela. Essa marcha lenta e penosa tornava impraticável a previsão de movimentos com esse sistema.

### O ALTO PREÇO DAS IMAGENS DESLUMBRANTES

Em julho de 1982, *TRON* finalmente estreou. A duração do filme era de 105 minutos, dos quais cerca de quinze foram gerados inteiramente por computador, e outros quinze combinando-se computação gráfica com ação viva. Os atores e atrizes, vestindo trajes pretos e brancos, foram fotografados contra cenários de fundo neutro, que deixavam em branco a maior parte de cada fotograma. Posteriormente, essas áreas foram preenchidas com cores e imagens de computador — um processo entediante e difícil, que às vezes exigia, para cada fotograma, dúzias de máscaras feitas a mão, para eliminar as cores em algumas áreas e introduzi-las em outras. Numa tentativa de economizar dinheiro, os estúdios Disney executaram parte do trabalho em Formosa. Mesmo assim, o filme estourou o orçamento, e o custo da produção ficou em torno de 20 milhões de dólares.

Essa despesa foi uma das principais causas da fama negra que o filme adquiriu em Hollywood. *TRON*, embora deslumbrante na tela, tinha um enredo fraco e personagens sem brilho. “A história e a arte de *TRON* desenvolveram-se juntas”, disse Lisberger mais tarde. “Em minha mente, isso foi sempre algo crucial para o filme. Desde que começamos a forjar este mundo de fantasia nos rascunhos, confiávamos no aspecto visual para nos contar a história. Talvez tenha sido esse predomínio da tecnologia sobre a história, ou da forma sobre a substância, o defeito fatal de *TRON* como cinema.

Quando ficou claro que o filme havia fracassado em bilheteria, Hollywood adotou uma atitude do tipo esperar-para-ver em relação às técnicas de computação gráfica — um retrocesso desapontador para a pequena mas apaixonada comuni-

dade dos peritos em computação gráfica, que contavam com o filme para abrir as portas dos estúdios às técnicas de formação de imagens por computador. Ao invés disso as portas quase se fecharam de vez. A Triple I vendeu suas técnicas de computação gráfica, e outros equipamentos gráficos voltaram para a televisão, onde era fácil encontrar anunciantes fascinados pela CGI e estações de portas abertas para os reluzentes logotipos gerados por computador.

### **EQUIPANDO UMA SUPERMÁQUINA**

*TRON*, porém, tinha “rachado o muro”, como Richard Taylor observou mais tarde. Tratava-se do “começo de um renascimento técnico na indústria cinematográfica”. Dois homens que descobriram a rachadura e a atravessaram foram John Whitney Jr., filho do pioneiro em efeitos especiais, e o programador Gary Demos. Os dois haviam trabalhado para a Triple I, mas saíram antes que tivesse início a produção de *TRON*, para fundar sua própria companhia, a Digital Productions. Membro da escola imagista da CGI, a Digital Productions iria aparelhar as mais rápidas máquinas calculadoras do mundo — primeiro um supercomputador Cray = 1/S e depois seu sucessor, o Cray X-MP — para criar imagens até setecentas vezes mais complexas que o mais ambicioso dos objetos gerados em *TRON*.

Whitney vinha discutindo sobre um filme desse tipo desde 1981, com seu amigo Miguel Tejeda-Flores, vice-presidente do setor de desenvolvimento e aquisição de filmes da Lorimar Inc., estúdio de produção cinematográfica e de televisão. Mas nenhum dos scripts que circulavam por Hollywood na época conseguia a combinação certa de enredo, ambientação e apelo para o grande público, que, segundo eles, tornaria o filme adequado aos efeitos especiais que Whitney tinha em mente.

A Digital Productions mal acabara de se estabelecer quando Tejeda-Flores chamou Whitney para lhe dizer que um leitor de scripts da Lorimar encontrara algo que parecia feito sob encomenda. Chamado *O Último Guerreiro das Estrelas* (*The Last Starfighter*), contava a história de um jovem ás de *video games* que era recrutado por alienígenas para salvar a Liga das Estrelas, envolvida numa batalha, de uma destruição iminente. Whitney e Demos iniciaram negociações com o estúdio antes mesmo que seu primeiro computador fosse instalado.

Embora as imagens de computador constituíssem uma importante razão para fazer o filme, Whitney estava determinado a não cair no mesmo erro a que Lisberger sucumbira com *TRON*. Em *O Último Guerreiro das Estrelas*, a história veio em primeiro lugar: “Os efeitos especiais aparecem no filme para servir ao propósito de levar a história mais adiante”, disse Whitney algum tempo depois. “Eles não se destinavam a permanecer isolados como efeitos especiais, mas sim a apresentar o espaço exterior de uma maneira tão convincente e cômoda quanto o fazem as fotografias de locação.”

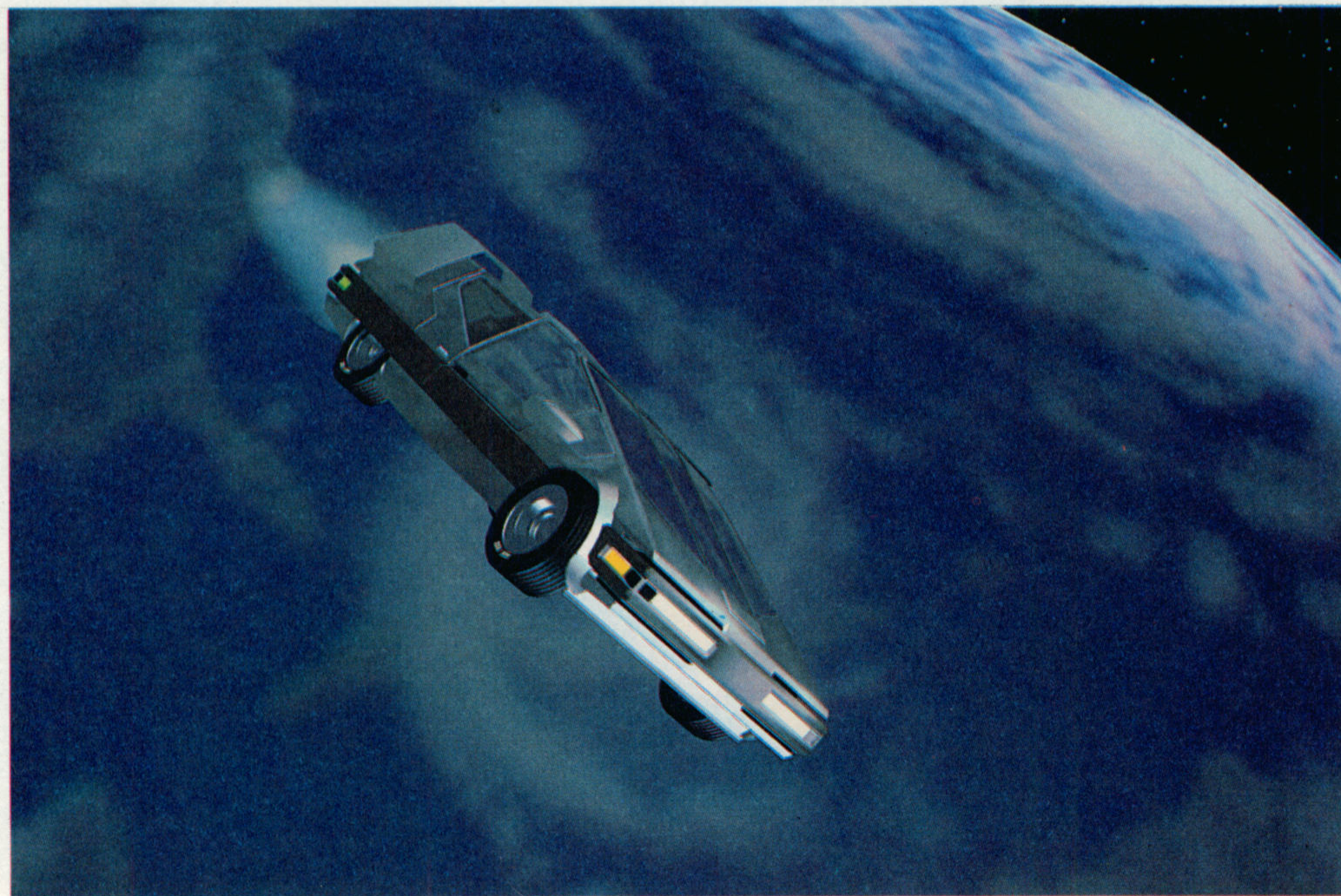
A peça central era uma astronave de combate chamada *Gunstar*. O primeiro passo na criação da nave foi desenhá-la detalhadamente em papel quadriculado. Isso facilitou sua codificação para o VAX 11/782, computador de grande porte usado nas fases iniciais de produção. “Nos primeiros estágios”, disse Ron Cobb, desenhista da Digital Productions, “estávamos em desvantagem pelo fato de ter que utilizar, em certa medida, primitivos geométricos.” Pouco a pouco, no entanto, Cobb e a equipe de codificadores do computador ganhavam mais habilidade em seu trabalho. À medida que o projeto avançava, Demos aperfeiçoou o software gráfico que sua equipe criara sob a liderança de sua notável inteligência, e a *Gunstar*

tornou-se progressivamente mais detalhada. A versão final da nave, que tivera início como uma amostragem do trabalho da Digital Productions para ser submetido à aprovação da Lorimar, compreendia 750 000 polígonos, que a equipe de codificadores da Digital, composta às vezes por até trinta pessoas, demorou cerca de três meses para inserir no computador.

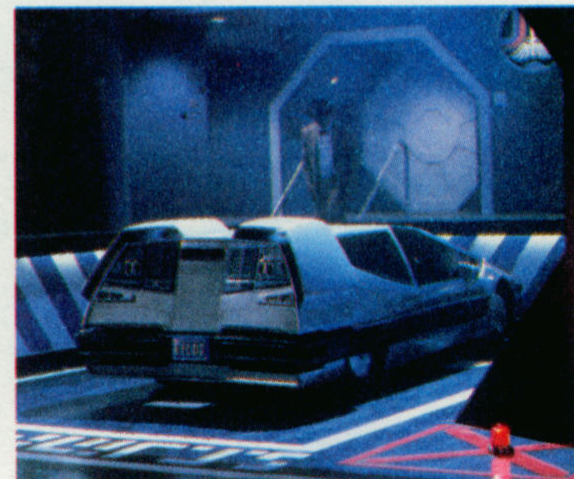
“Quando temos as imagens codificadas”, explicou Whitney mais tarde, “o próximo passo é colocá-las em cena.” Primeiro, um modelo da nave gerado em computador era exibido num monitor de varredura eletrostática como uma “armação em arame” de polígonos que podia ser movimentada por toda a tela com grande facilidade. Isso permitia a Cobb prever o movimento na tela quase da mesma maneira que a MAGI podia fazê-lo em *TRON*. “A tecnologia intervém ou interfere muito pouco”, disse Cobb. “É possível acrescentar ação porque se tem pleno controle sobre o movimento do objeto.”

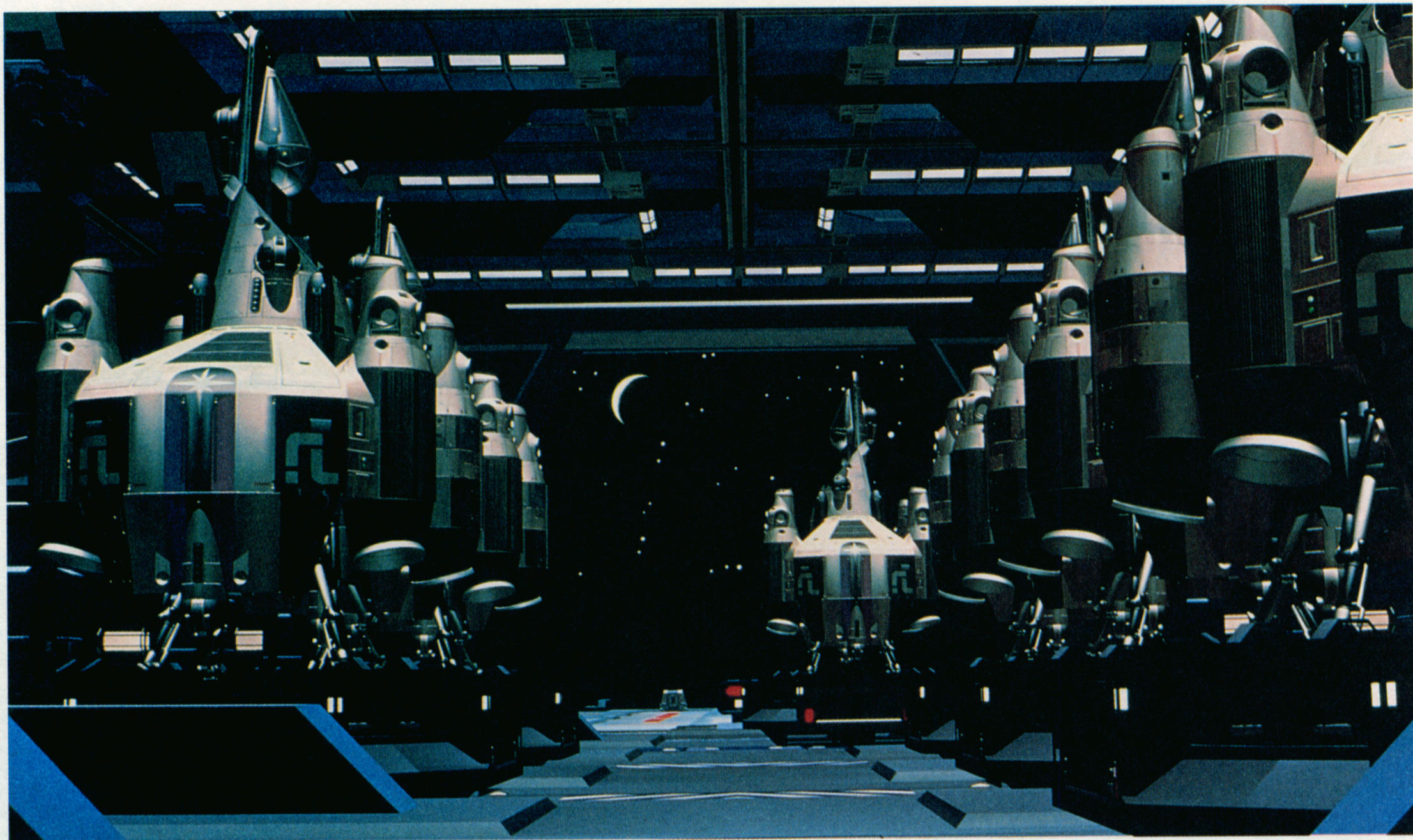
Podia-se aumentar ou reduzir à vontade o tamanho da nave, e — o que é mais significativo — podia-se facilmente duplicá-la. A criação da *Gunstar* original talvez tenha exigido, no total, cerca de seis meses, mas uma cena do hangar, com catorze dessas naves — 10,5 milhões de polígonos ao todo —, levou apenas alguns minutos para surgir na tela. Mesmo assim, havia problemas. As imagens eram contornos transparentes do tipo “armação em arame”, e por isso nem sempre se podia distinguir o primeiro plano do cenário de fundo ou, no caso de um veículo visto à distância, nem mesmo a direção que ele seguia.

Mas todos esses detalhes foram resolvidos na fase seguinte de desenvolvimento, quando a Digital passou a usar seu maior sucesso: o Cray X-MP. Com ele, a equipe de Cobb podia colorir as superfícies das versões tipo “armação em arame” da *Gunstar* em postos de trabalho equipados com monitores de varredura eletromagnética de resolução altíssima. Isso tornava possível, por exemplo, introduzir entalhes e ou-



Um teste crucial de simulação realista por computador aparece nesta cena do filme *O Último Guerreiro das Estrelas*, quando o *Starcar* decola da Terra. Os programadores tinham de criar uma imagem de resolução tão alta e com tantos detalhes que os espectadores não pudessem notar a diferença quando se defrontassem, no filme, com o carro real (embaixo).





Cheio de exóticas espaçonaves, este hangar gerado por computador, do filme *O Último Guerreiro das Estrelas*, demonstra vividamente as vantagens de uma base de dados gráficos. Usando efeitos especiais convencionais, diferentes naves teriam de ser construídas como modelos separados, e o preço disso seria muito elevado. Com um computador, um desenhista constrói somente uma imagem de cada tipo de nave e a repete na tela tantas vezes quantas forem necessárias.

tras marcas nas espaçonaves, para evitar que parecessem clones do original. O software da Digital permitia a um editor técnico escolher entre cerca de 70 bilhões de cores. Embora o olho humano não possa distinguir tantos matizes, sem essa gama as mudanças nos tons da superfície — por exemplo, a gradação sutil que vai desde a luz do Sol até a sombra — poderiam originar listras que despojariam o objeto de seu realismo. Para aprofundar a ilusão, o editor técnico selecionou um determinado tipo de superfície para cada grupo de polígonos, criando o brilho do metal ou a opacidade da pintura de parede. Finalmente, quase da mesma maneira como um palco pode ser iluminado com um refletor, podia-se colocar a *Gunstar* num contexto físico, dizendo ao computador onde posicionar fontes de luz, quantas usar e qual o brilho de cada uma.

Naturalmente, as próprias luzes não podiam ser vistas, mas os efeitos davam vida à espaçonave. Uma vez estabelecidos esses detalhes para o primeiro fotograma de uma cena, o diretor confiava no computador para aplicá-los aos fotogramas restantes. Cada movimento da *Gunstar* era acompanhado por modificações em sua aparência, como se a nave fosse um objeto real, iluminado pelo clarão de explosões, como se estivesse, de fato, travando batalhas no espaço.

O custo de tal realismo não era baixo. A atribuição de uma cor e de uma superfície a cada polígono numa imagem e o ajuste da iluminação exigiam que o computador executasse entre 24 e 72 bilhões de cálculos para cada fotograma da cena. Em média, um computador VAX precisaria de mais de dezesseis horas para construir cada fotograma do filme — um processo impossível de controlar num filme que poderia chegar a cerca de 36 000 fotogramas de imagens geradas por computador. O Cray X-MP executou a mesma tarefa em dois minutos e meio.

A *Gunstar* era tão convincente que o diretor técnico não teve receio de que deixasse de parecer real na tela. Um teste ainda mais severo de realismo fotográfico

# A complexidade do movimento humano

A produção de modelos realistas do corpo humano em movimento é uma das tarefas mais árduas que os animadores de computador enfrentam atualmente. Uma atividade humana típica — andar, por exemplo — é uma síntese de centenas de movimentos sutilmente coordenados que incluem complexas rotações das articulações, flexionamentos dos músculos da cabeça aos dos pés e reações ao ambiente. A suavidade e flexibilidade da forma humana também são obstáculos aos softwares gráficos devido à dificuldade de descrever matematicamente tais irregularidades.

No entanto, muitos aspectos do movimento humano foram minuciosamente estudados em campos como a biomecânica

(a)

1. PML de postura na direita/PML de balanço para a esquerda
2. PML de postura na direita/PML de postura na esquerda
3. PML de balanço para a direita/PML de postura na esquerda
4. PML de postura na direita/PML de postura na esquerda

(b)

1. Flexão do quadril, flexão do joelho, flexão do tornozelo
2. Flexão do quadril, extensão do joelho, flexão do tornozelo
3. Extensão do quadril, extensão do joelho, extensão do tornozelo

(c)

1. Rotação coronal pélvica para baixo ao redor do suporte do quadril, extensão do quadril, flexão do joelho, flexão do tornozelo
2. Rotação coronal pélvica para cima ao redor do suporte do quadril, rotação transversal para a frente ao redor do suporte do quadril, extensão do quadril, flexão do joelho, flexão do tornozelo
3. Rotação coronal pélvica para cima ao redor do suporte do quadril, rotação transversal pélvica para frente ao redor do suporte do quadril, extensão do quadril, extensão do joelho, flexão do tornozelo
4. Rotação transversal pélvica para a frente ao redor do suporte do quadril, extensão do quadril, flexão do joelho, extensão do tornozelo, rotação com suporte do quadril ao redor da bola do pé
5. Flexão do quadril, flexão do joelho, extensão do tornozelo

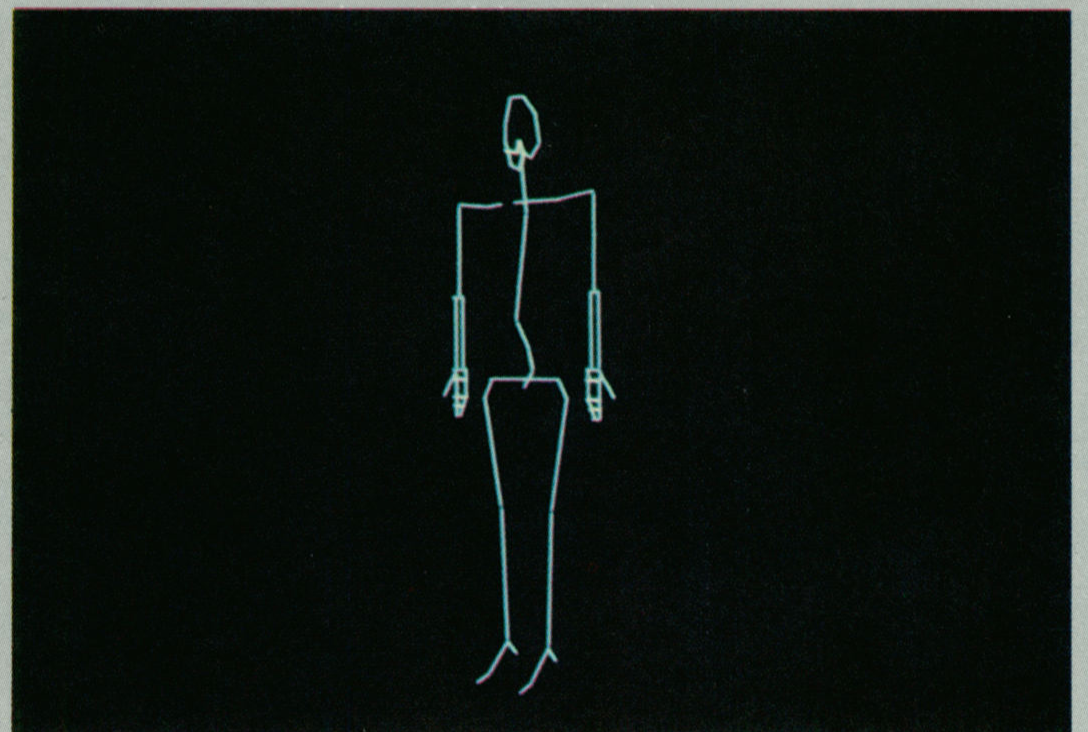
(d)

1. Flexão do cotovelo, flexão do ombro

(e)

1. Extensão do cotovelo, extensão do ombro

Alguns dos complexos elementos envolvidos no caminhar aparecem na lista acima, que descreve alguns movimentos do ciclo de animação do esqueleto. A seção (a) detalha os programas motores locais, ou PML, que entram no programa global de controle do andar. As seções seguintes descrevem os PML para alguns movimentos específicos: o balanço de uma perna em (b); a postura da parte inferior do corpo em (c); o balanço do braço para trás em (e).



Para refinar o controle do movimento numa seqüência animada, antes de obter a figura, o programador chama à tela uma versão em traços esquemáticos, num monitor de varredura eletrostática, fazendo-a passar por vários testes.

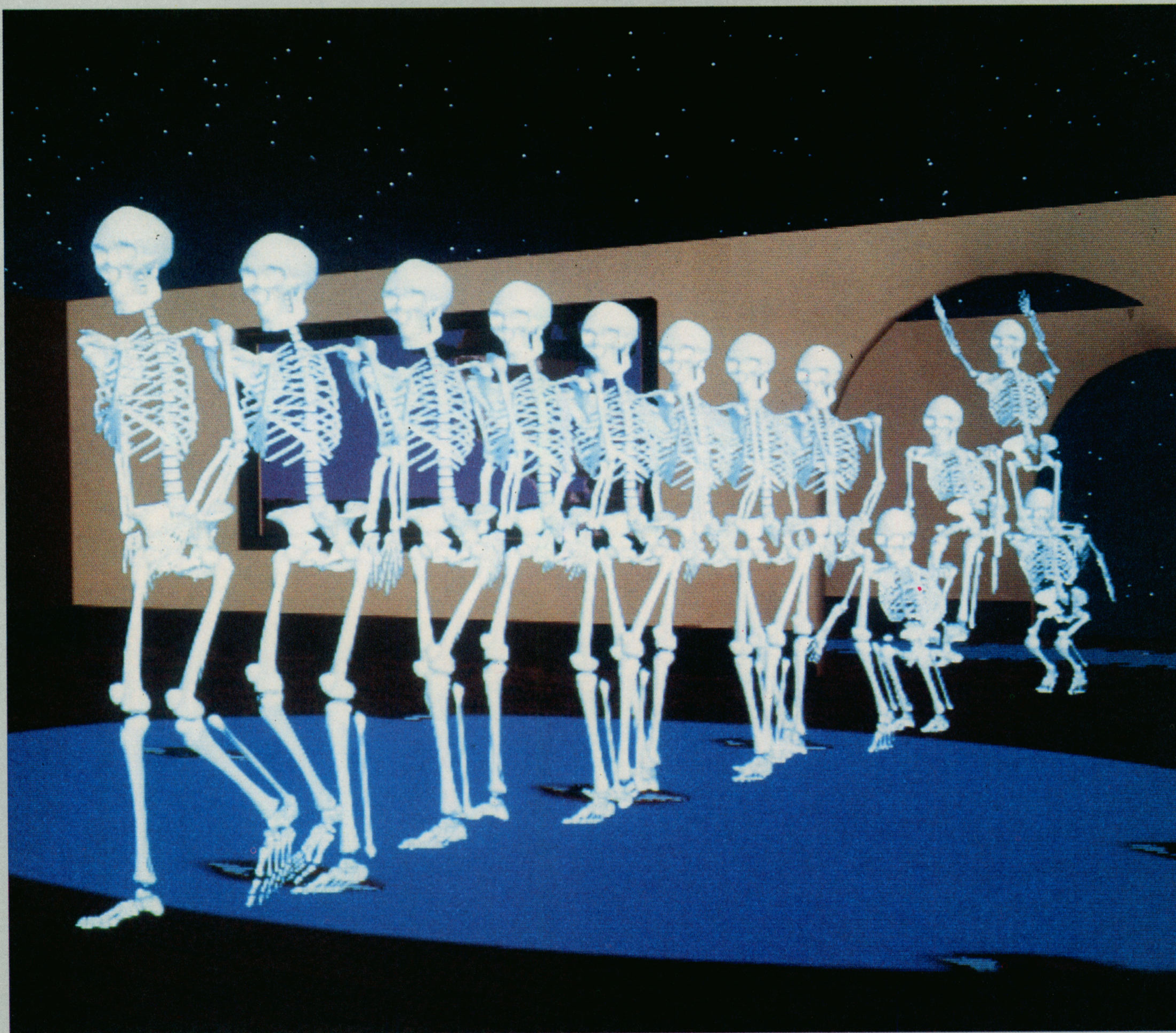


Depois que a seqüência passa pelos testes da figura em traços esquemáticos, ela é representada em cores num monitor de varredura eletromagnética. A imagem acima ilustra a maneira como o esqueleto responde a um terreno acidentado.

e a robótica. No software que gerou as figuras abaixo, os problemas de coordenar uma multiplicidade de movimentos foram enfrentados organizando-se os programas em três níveis. O nível do topo consiste no controle da tarefa; depois de receber uma descrição da tarefa a ser executada — digamos, “abaixe, salte e caminhe para a frente” —, esse controle divide a ação numa seqüência de habilidades. O segundo nível controla os programas para cada habilidade — por exemplo, os movimentos envolvidos no abaixar. O terceiro nível consiste em programas motores locais; cada um deles controla um conjunto de articulações para um movimento, tal como o de dobrar o joelho ou o tornozelo durante o abaixar. À medida que vão

sendo executados, os programas atualizam o banco de dados para o esqueleto, de modo que cada novo movimento parta da posição correta.

A capacidade de produzir modelos precisos de corpos em ação é bastante promissora, não somente para realizadores de filmes mas também para médicos, atletas, dançarinos e outros, cujas atividades se relacionem ao movimento da forma humana. No entanto, mesmo com o equipamento mais sofisticado, é tão complexo programar uma figura humana realista, mesmo para executar um simples passo de dança, que a modelagem de uma batalha de espaçonaves torna-se, comparativamente, tarefa simples.



Esta imagem composta mostra os fotogramas 1, 4, 8, 12 etc. de uma seqüência que ilustra um salto e uma caminhada em passos largos.



As personalidades do esnobe Snoot (à direita) e do brincalhão Muttly (à esquerda), personagens de um filme animado por computador, são expressas pela maneira como os dois pássaros se movem. Programas complexos governam as articulações e movimentos característicos dos olhos, cabeça, pescoço, corpo, juntas da perna e cauda de cada figura.

para uma imagem de computador era o *Starcar*, um automóvel que se transformava em espaçonave. De acordo com Demos, depois que o carro foi desenhado, sua "construção" efetiva foi realizada primeiro no computador. Depois o carro verdadeiro, uma réplica dirigível, foi construído a partir da mesma planta por um fabricante de Modesto, Califórnia, usando o chassi de uma perua Volkswagen com 14 polegadas a mais de comprimento.

Demos lembrou a preocupação generalizada com o fato de que o modelo físico e o modelo computadorizado poderiam contrastar desfavoravelmente quando o filme passasse, por corte, de um para outro — e o alívio quando deu tudo certo: "Mostramos muitas fotos do modelo simulado e do modelo real para Ron Cobb, que desenhara o carro: ele não conseguiu distinguir qual era qual. Para ser totalmente sincero, eu mesmo não sabia dizê-lo, e olhe que estávamos em muito boa forma quando coisas assim começaram a acontecer".

A última etapa na realização do filme consistia em filmar as imagens de computador. Cada fotograma era fotografado com uma gravadora de microfilme de alta resolução, processo cuja execução levava de dois minutos e meio a cinco minutos por fotograma. O Cray podia efetuar essa tarefa quase sem intervenção humana: por isso, a máquina era utilizada para várias outras operações durante o dia, e a filmagem era feita à noite, com apenas uma pessoa presente. Essa fase durou de seis a oito meses e mantinha, de início, o computador ocupado durante oito horas por noite nos dias úteis e 24 horas por dia nos sábados e domingos; no final dessa fase, ficava ocupado 24 horas por dia, todos os dias.

O *Último Guerreiro das Estrelas* não foi um sucesso estrondoso, segundo os padrões de Hollywood — custou 14 milhões de dólares para ser feito e rendeu somente 21 milhões em seus primeiros 31 dias —, mas obteve retorno suficiente para ser considerado um sucesso. E talvez, o mais importante: demonstrou que as imagens de computador sustentavam-se por si mesmas num filme que faz transições freqüentes entre cenas reais e simuladas. “No mínimo, um terço dos efeitos no filme conseguiu fotorrealismo”, disse Cobb. “São quase perfeitos. O espectador médio de cinema provavelmente irá supor que essas imagens dinâmicas e interessantes são modelos — o que é extraordinário.”

### LUTANDO CONTRA OS CÉTICOS DE HOLLYWOOD

O sucesso desse filme, embora bem-recebido, não transformou a CGI de uma hora para outra na nova sensação da indústria cinematográfica. Tanto o custo do realismo fotográfico quanto o ceticismo dos estúdios cinematográficos permaneceram altos. Na televisão, porém, a situação era outra. Primeiro porque os títulos dos programas especiais para as redes de televisão e outras produções do tipo duram somente poucos segundos, e a maioria dos comerciais não excede os 30 segundos. E o que é ainda mais significativo: a tela de televisão, de baixa resolução, requer muito menos cálculos que a tela cinematográfica. Assim, mesmo que o objetivo seja uma imagem tão convincente como uma fotografia, essa imagem pode ser produzida para a televisão numa fração do tempo — e por uma pequena porcentagem do custo — necessário à criação da mesma imagem para um filme.

Uma pessoa que se recusou a abandonar as aplicações da CGI em filmes foi George Lucas, chefe da Lucasfilm Ltd. e criador da estrondosamente bem-sucedida série de filmes *Guerra nas Estrelas* (*Star Wars*). Em 1979, Lucas formou um departamento de computação dentro da Lucasfilm, com uma palavra de ordem: “Trazer



Esta realista paisagem de uma floresta é cenário de fundo para um filme animado por computador, *The Adventures of André & Wally B.*, interpretado por um andróide e uma abelha. Árvores, grama e flores foram todas geradas com sistemas de partículas, que empregam variáveis aleatórias; estes introduzem irregularidades que dão uma aparência natural à cena. Um programa de sombreamento aplicou nas árvores um pouco de luz solar e estendeu sombras sobre a grama.

alta tecnologia para a indústria cinematográfica". Tomando de assalto o laboratório de computação gráfica do prestigioso Instituto de Tecnologia de Nova York, ele recrutou os quatro homens que haviam instalado, em 1974, o laboratório de computação gráfica da escola: Edwin Catmull, Alvy Ray Smith, Malcolm Blanchard e David DiFrancesco. Os resultados foram impressionantes.

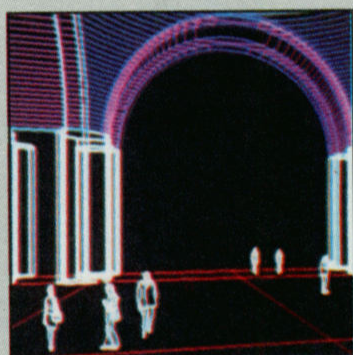
Entre outras realizações, o grupo criou por computador um desenho animado de curta duração para ser exibido, em 1984, no International Animation Festival, em Toronto, Canadá. O filme, intitulado *As Aventuras de André & Wally B.* (*The Adventures of André & Wally B.*), narrava as aventuras do andróide André e da abelha Wally B., que habitavam as profundezas de uma floresta estilo Disney, criada com tantos detalhes que os espectadores podiam distinguir folhas individuais nas árvores. O volume dos cálculos gráficos que geraram a floresta e as ações das duas personagens era tão grande que a realização do filme exigiu a potência de seis unidades centrais de processamento Cray, bem como quinze máquinas menores. Depois de pronto, o filme ficou com apenas um minuto e meio de duração.

Na primavera de 1985 os peritos da Lucasfilm apresentaram um computador gráfico que eles próprios haviam desenvolvido e que prometia reduzir drasticamente o custo exigido para produzir imagens de computador de altíssimo índice de realismo. Chamada Pixar, a máquina consistia em quatro processadores para a tela, três deles destinados ao controle do vermelho, do verde e do azul, e o quarto ao controle do texto. Cada processador era capaz de manipular 10 milhões de instruções por segundo.

As habilidades gráficas do Pixar, e seu custo relativamente baixo — em torno de 100 000 dólares, contra 10 a 15 milhões de dólares do Cray X-MP —, tornaram-no atraente até mesmo fora do âmbito da indústria cinematográfica. Os hospitais vêem nele a possibilidade de aumentar substancialmente a qualidade das imagens produzidas pelos exploradores CT e PET. Companhias de exploração de petróleo e de gás, que se beneficiariam com imagens mais nítidas das informações fornecidas por sondagens sísmicas da crosta da Terra, também se interessaram pela máquina.

No entanto, por melhor que fosse o Pixar, ele não podia manter-se por muito tempo como o *nec plus ultra* em matéria de computação gráfica. De fato, assim que a organização Lucas completou o trabalho no Pixar, anunciou uma máquina ainda mais poderosa para 1986, o Reyes. Trata-se de uma máquina gráfica para fins especiais, equipada com algoritmos complexos residentes em seu hardware, o que a torna mil vezes mais rápida que o Pixar ou o Cray X-MP. O que justifica a sigla que a equipe da Lucas afetuosamente criou para a máquina: Reproduz Tudo o que Você Já Viu (*Renders Everything You Ever Saw*). Com o tempo, à medida que os especialistas em computação gráfica adaptem à CGI os desenvolvimentos no hardware dos computadores, é razoável esperar que a velocidade aumente e os preços caiam. O trabalho que, antes, requeria o auxílio de um Cray será realizado com igual rapidez por um pequeno computador de uso pessoal.

# Aliviando a carga do arquiteto



Assim como o desenhista de efeitos especiais para a televisão e cinema leva horas montando uma cena, elemento por elemento, os arquitetos também precisam prestar rigorosa atenção às miríades de detalhes que entram na criação de qualquer estrutura, desde um edifício de escritórios de três andares até um arranha-céu de muitos milhões de dólares. O mais simples dos desenhos requer vários tipos de contribuições especializadas, desde os esboços arquitetônicos iniciais até considerações técnicas de engenheiros de várias especialidades (engenharia estrutural, mecânica, elétrica, civil) e preocupações estéticas de profissionais encarregados do planejamento de interiores. Os desenhos estão sujeitos a numerosas revisões e, com frequência, uma mudança numa das plantas repercute numa série de outras a ela relacionadas.

O advento do desenho técnico auxiliado por computador simplificou muito esse processo. Tirando vantagem da capacidade de memória de um computador, de sua velocidade e também de sua capacidade de organizar massas de informações, uma firma de arquitetura pode reduzir drasticamente o tempo que gasta num projeto. Uma pioneira no novíssimo campo da arquitetura auxiliada por computador é a firma Skidmore, Owings & Merrill, que produziu os desenhos gerados por computador apresentados nas páginas seguintes. O sistema da empresa inclui vários minicomputadores de alta velocidade, conectados a mais de duzentos terminais independentes. Meta-de desse número é constituído por postos de trabalho gráficos, com seus próprios teclados, monitores, pranchetas de digitalização e outros dispositivos de entrada. O software planejado pela empresa controla centenas de programas aplicativos, envolvendo desde traçados tridimensionais até análise de energia. As informações para os projetos em andamento ficam armazenadas num arquivo central do computador, ao qual todos os terminais têm acesso.

As firmas de arquitetura que não dispõem de recursos para encomendar seus próprios sistemas costumam usar pacotes de hardware e software integrados, que adquirem de fornecedores de equipamento para computação gráfica. Empresas menores, que desejam automatizar a tarefa entediante, mas indispensável, do desenho simples utilizam microcomputadores de uso pessoal ligados ao equipamento de digitalização.

## Modelos do tipo "armação em arame"

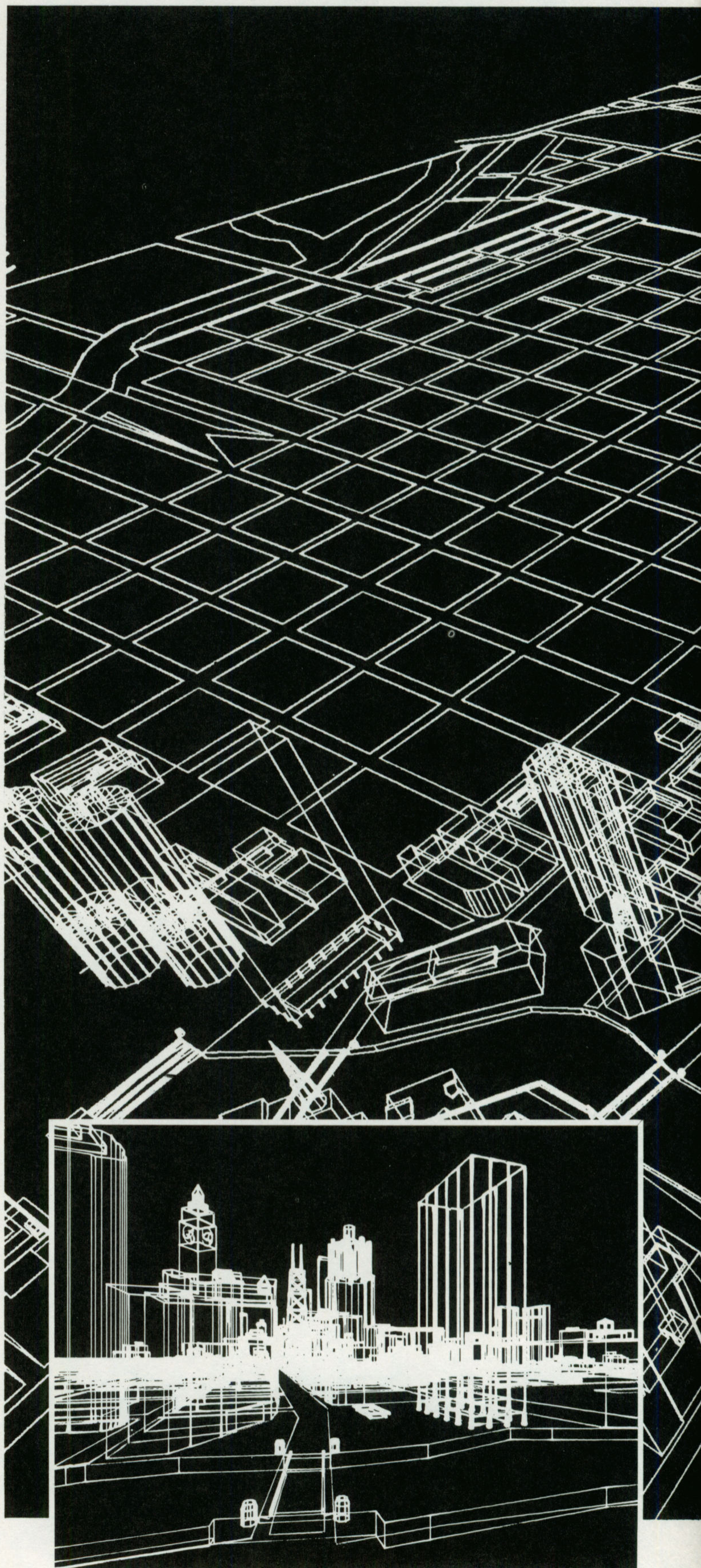
Num escritório de arquitetura não-computadorizado, a criação de um modelo de uma determinada estrutura significa esculpi-lo em materiais como o plástico ou aço, pintá-lo, montá-lo num suporte e talvez fotografá-lo sob vários ângulos para mostrá-lo ao cliente. A revisão ou correção do modelo significa, às vezes, refazer todo esse trabalho. Usando um computador, o arquiteto pode, primeiro, construir eletronicamente o modelo, armazenando informações relevantes na memória da máquina. Para exibir o modelo sob qualquer ângulo ou demonstrar os resultados de testes de engenharia, o arquiteto só precisa enviar alguns comandos e a imagem apropriada aparecerá na tela. Para fazer mudanças no desenho, o arquiteto introduz novas informações na máquina; o computador, então, trata de integrá-las gerando um modelo revisado.

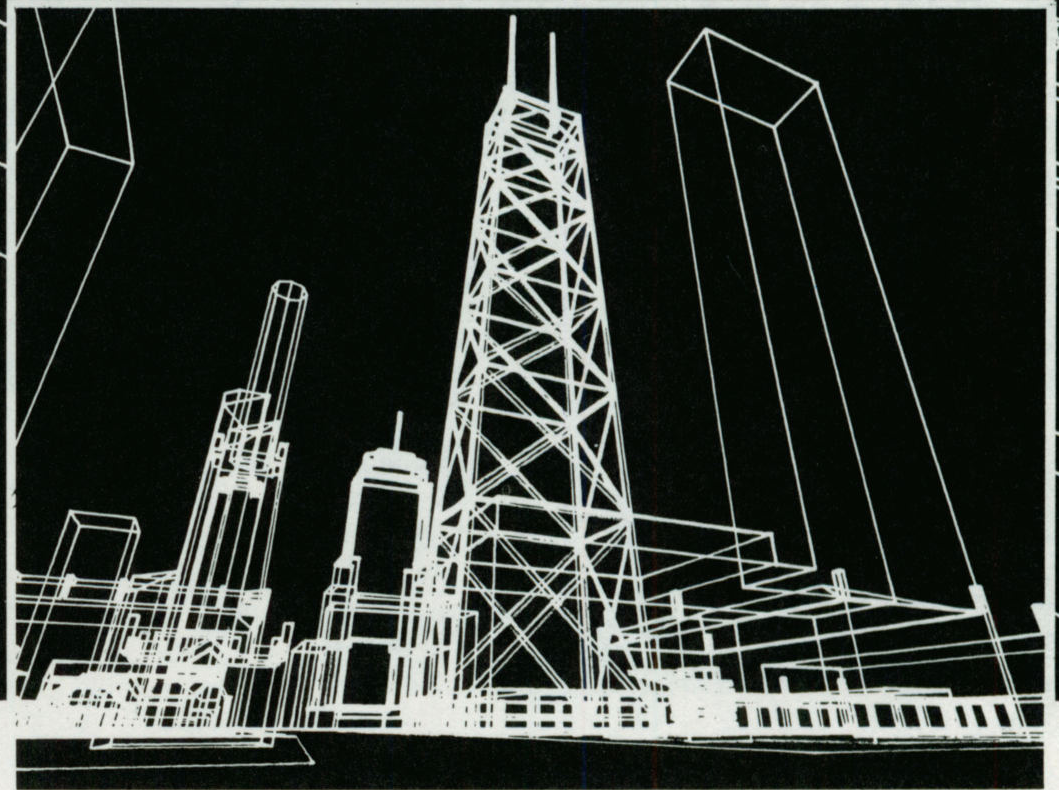
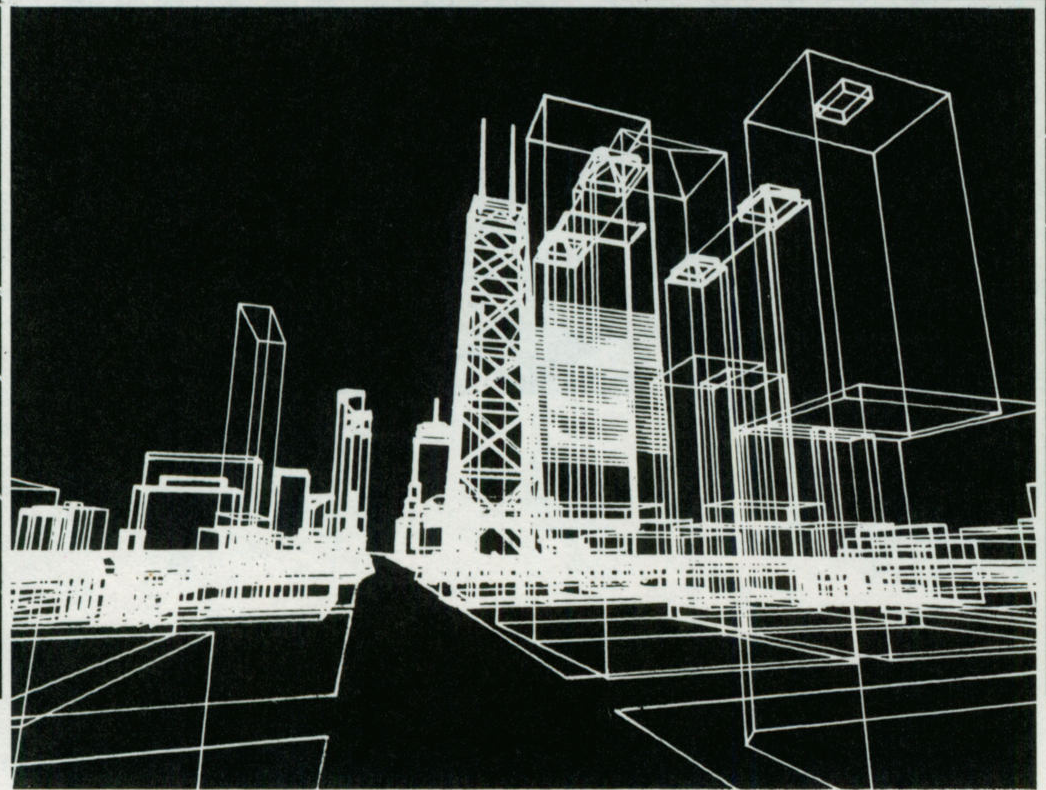
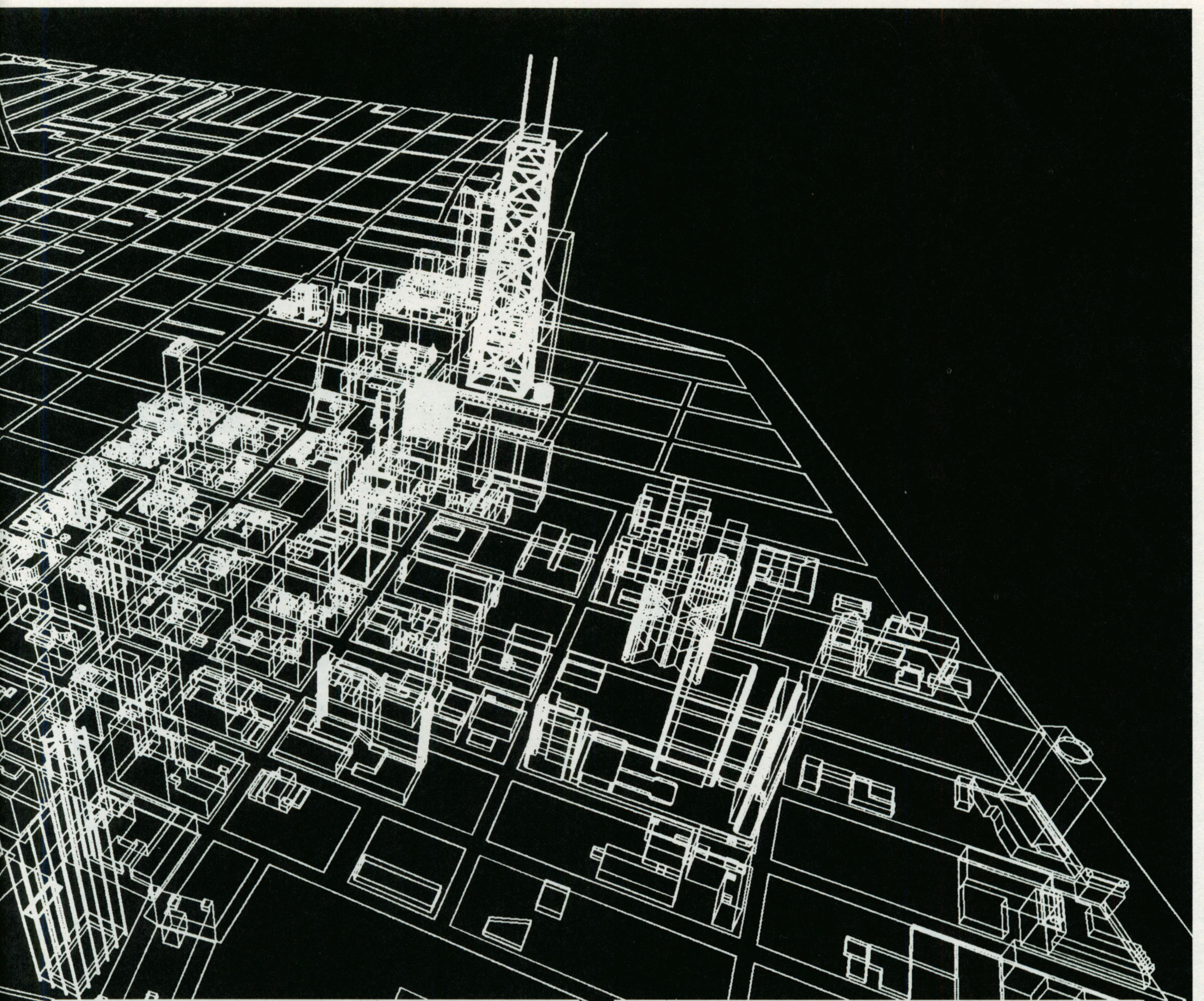
O número de coisas que o computador pode fazer com o modelo depende do software e do hardware do arquiteto. Programas gráficos simples produzem imagens bidimensionais, úteis às plantas planas que constituem 95% do trabalho do desenhista técnico. Programas mais sofisticados permitem ao computador gerar imagens tridimensionais, projetando a altura, a largura e a profundidade de uma construção.

Desenhos do tipo "armação em arame" constituem o meio mais elementar de representação de uma estrutura tridimensional. Exibidos com frequência em monitores de varredura eletrostática, os desenhos do tipo "armação em arame" revelam todos os contornos de um edifício simultaneamente. Outros programas de software possibilitam definir um edifício mais por suas superfícies do que por seus contornos. Pode-se, então, pedir ao computador que aplique cores nas superfícies voltadas para o espectador e elimine aquelas que estariam escondidas.

Desde que se introduzam as várias dimensões de um edifício na memória do computador, este é capaz de mostrar o edifício praticamente sob qualquer perspectiva. Isso permite aos arquitetos explorarem questões ambientais, como, por exemplo, a do aspecto do edifício quando contraposto ao horizonte existente, ou a questão da sombra que irá projetar às 5 horas da tarde.

Com auxílio da computação gráfica, os arquitetos da Skidmore, Owings & Merrill podem percorrer a avenida Michigan de Chicago sem sair do escritório. Seus computadores geraram um modelo tridimensional do centro de Chicago, desenhado com base num extenso banco de dados, que inclui as dimensões externas de cada estrutura. Exibido num monitor de varredura eletrostática, o modelo pode ser visto de qualquer ponto e sob qualquer perspectiva, bastando para isso girar um dial.

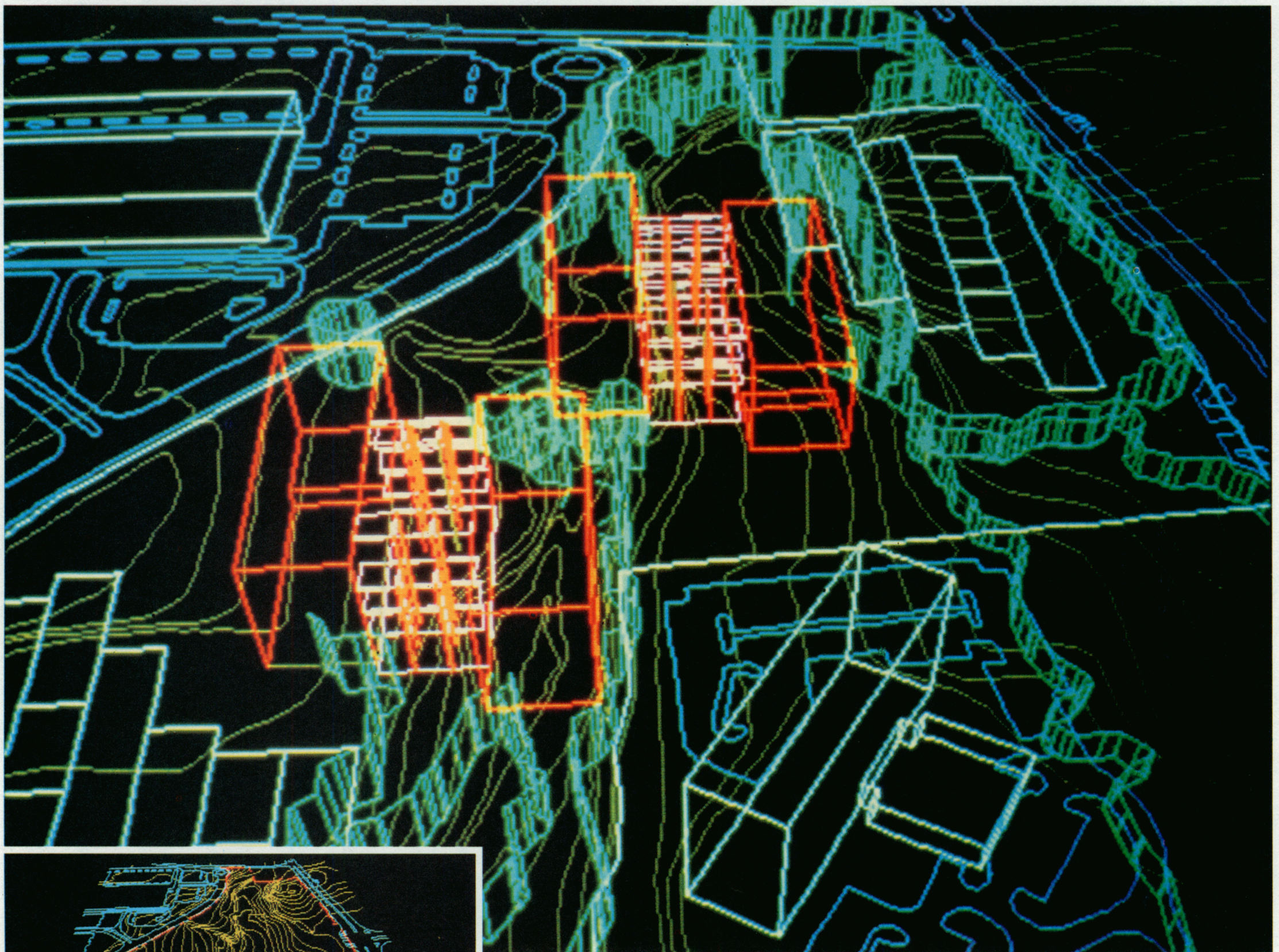




## Construção de um banco de dados

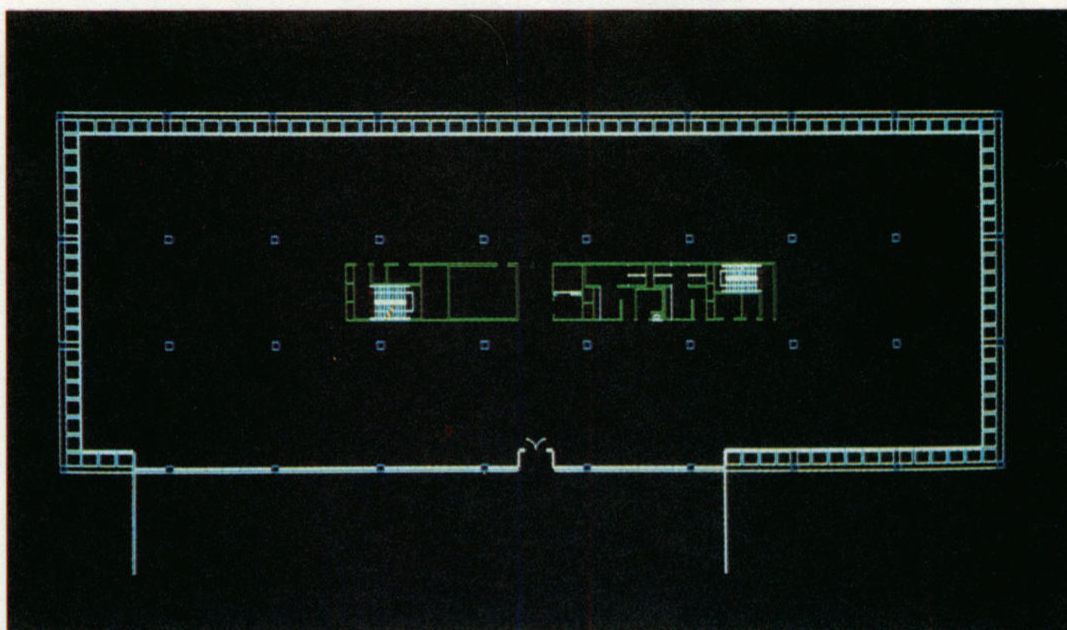
Uma das maiores vantagens de se usar um computador na arquitetura é que a máquina pode manter um arquivo gráfico central, ou banco de dados, à disposição de quem trabalha num projeto. O elemento central desse arquivo é a planta onde arquitetos e engenheiros demarcam o que eventualmente se tornará um modelo detalhado. O arquivo conterá informações sobre divisões internas, encanamentos e dutos de ventila-

ção. A qualquer hora, os membros da equipe do projeto podem checar seus desenhos, confrontando-os com outros, e averiguar possíveis discrepâncias. Os supervisores podem também chamar uma planta à memória e sobrepô-la a várias outras, de modo a gerar uma imagem composta (*página ao lado, embaixo*) que esclarecerá as relações entre as várias partes do projeto.

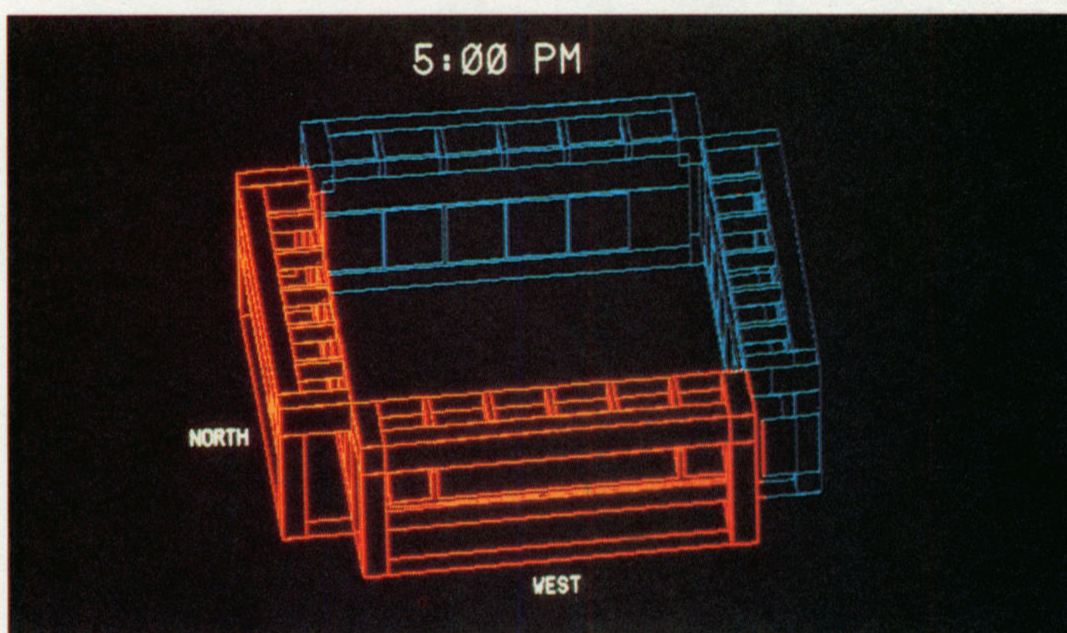


Neste projeto de um escritório em Atlanta, uma das primeiras plantas a entrar no banco de dados do computador foi um mapa dos edifícios e estradas da área (*detalhe*). Novos edifícios foram mais tarde acrescentados (*acima, laranja*) bem como locais de estacionamento (*branco*) e árvores (*verde*).

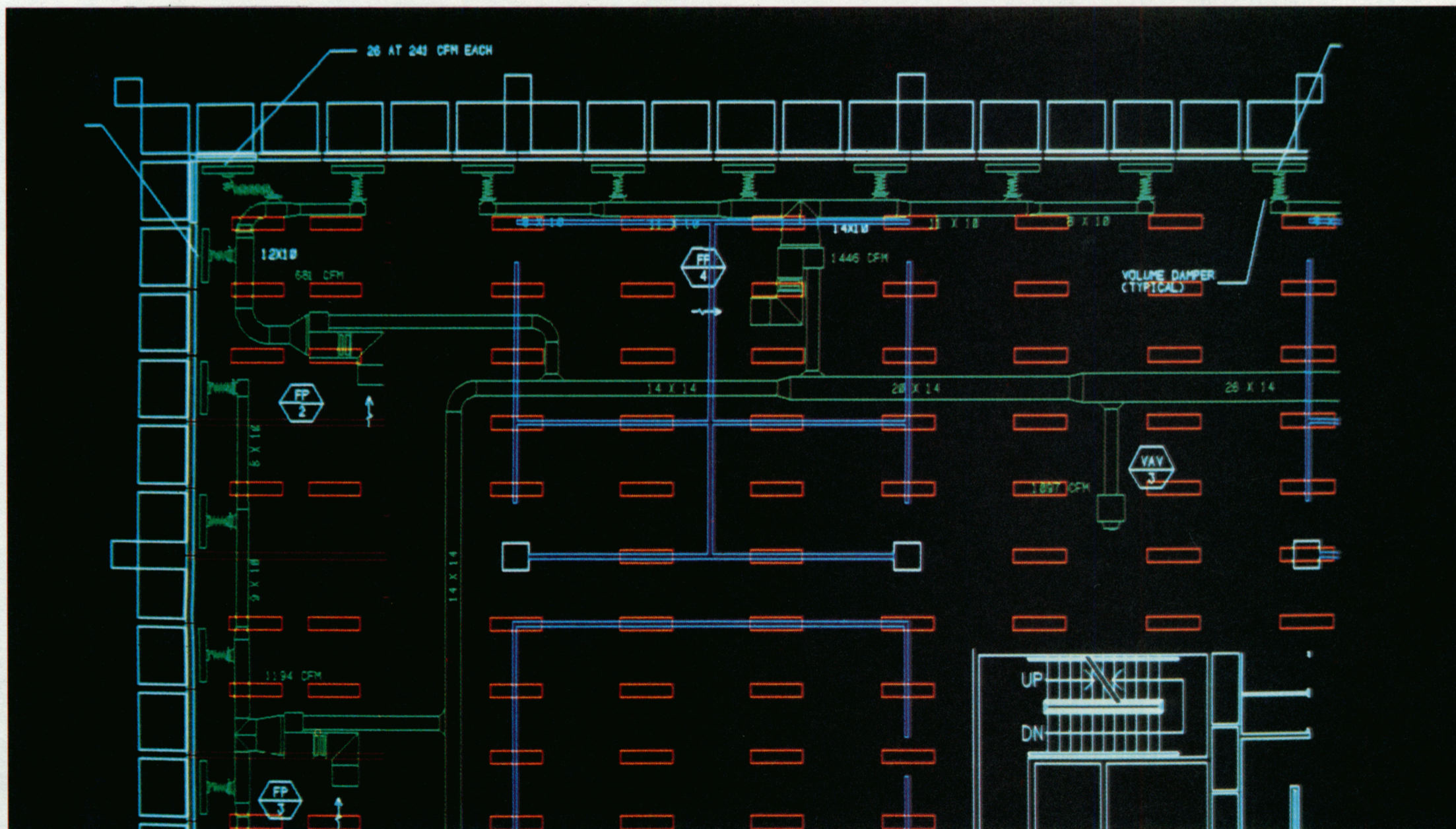
Numa das primeiras plantas baixas de um dos edifícios, os elementos centrais (escadas e elevadores), as posições das colunas e o perímetro eram os únicos detalhes assinalados.



Para testar o isolamento térmico que protege um edifício do tempo quente, o arquiteto especificou uma hora do dia e aplicou um programa térmico de engenharia a plantas trazidas do arquivo central. O teste revelou alguma penetração de calor (laranja) pelo lado oeste.



Um detalhe de um dos cantos do edifício mostra várias plantas exibidas simultaneamente. Dispositivos para iluminação (laranja), divisórias (azul) e encanamentos foram sobrepostos na planta original do chão (branco).

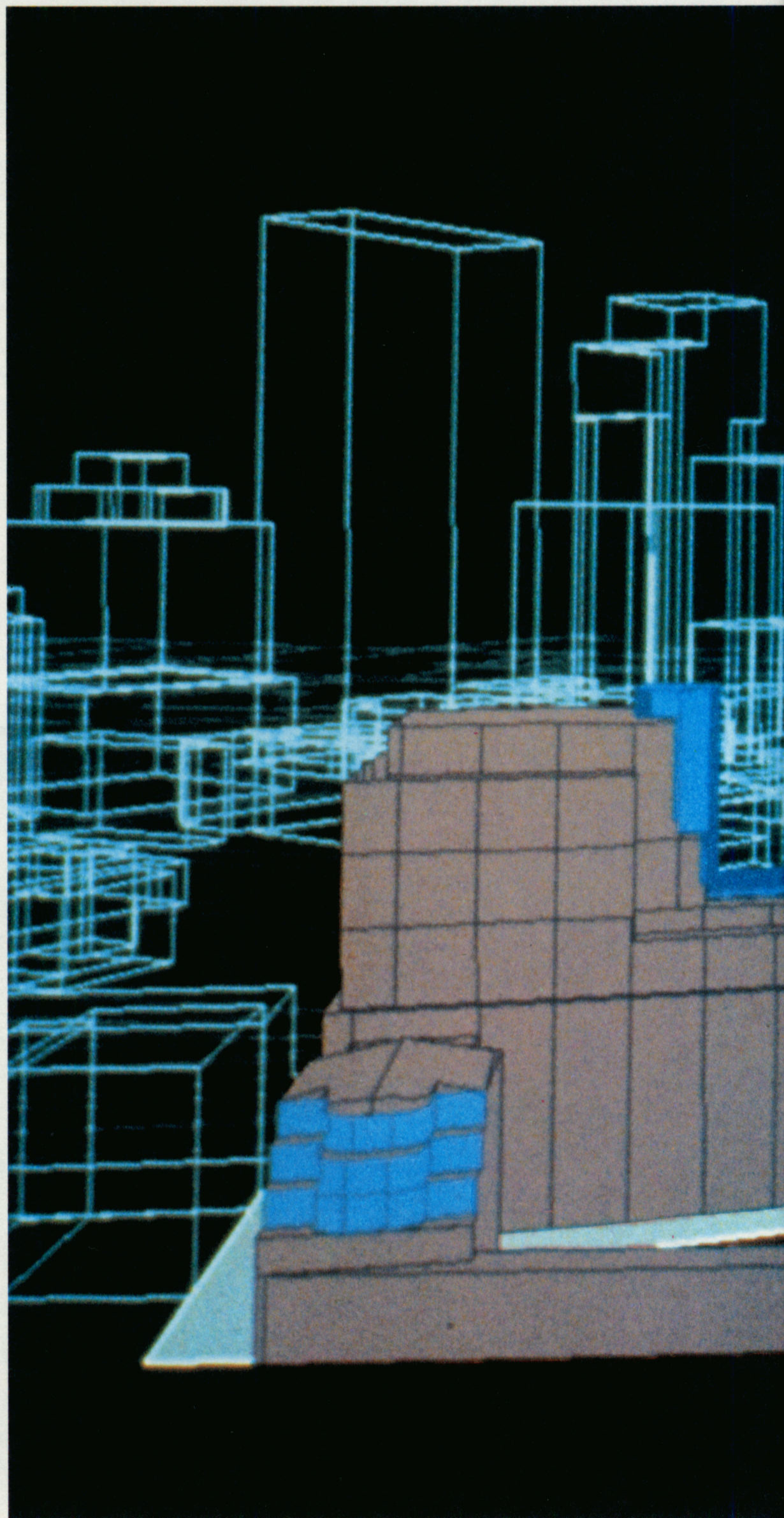


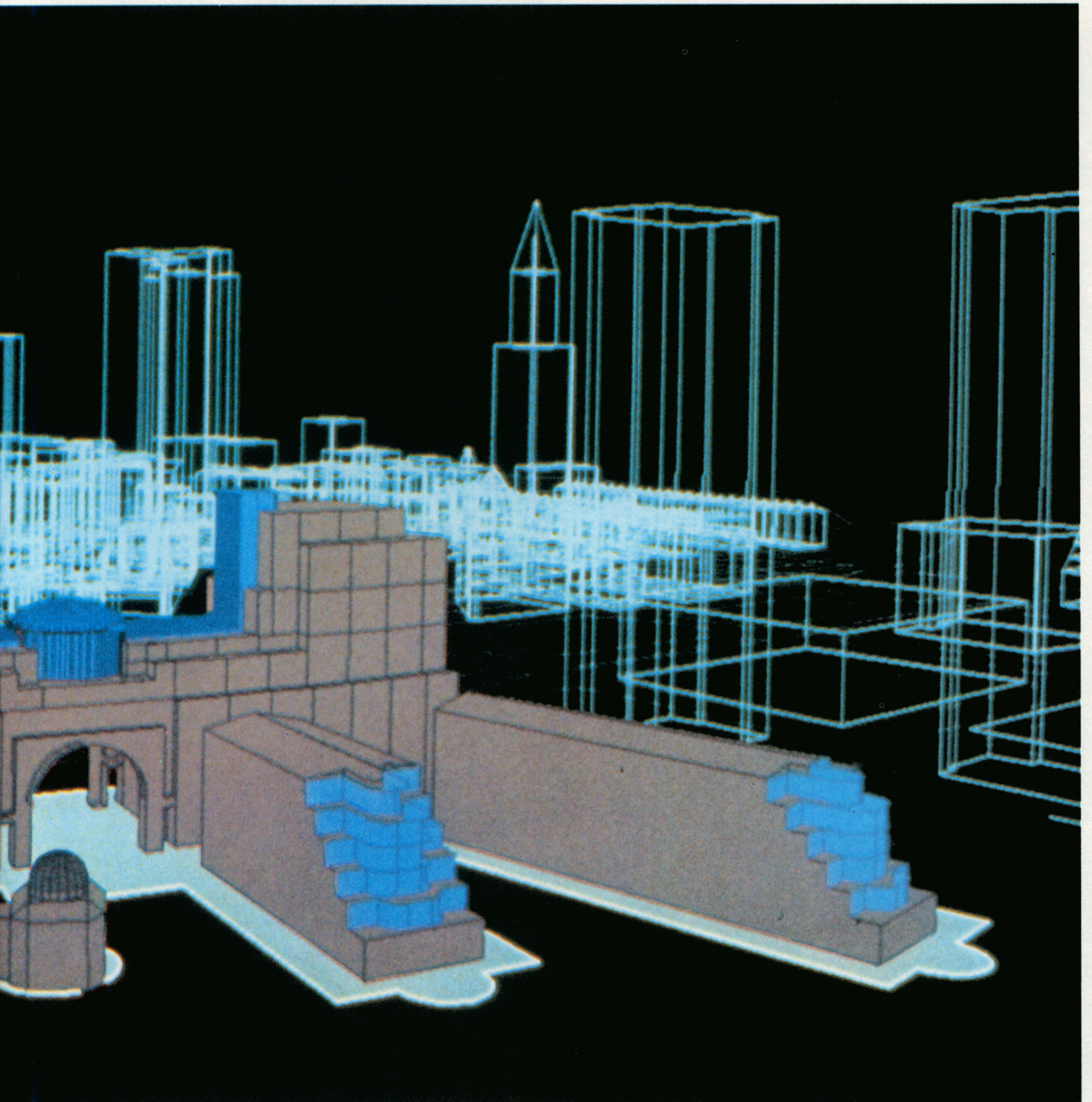
## Um poderoso instrumento para inovação

Depois que as informações sobre plantas baixas, especificações de engenharia e desenhos de interiores são armazenados no banco de dados central do projeto, os arquitetos e engenheiros podem criar vários modelos altamente elaborados. Os engenheiros podem usar, por exemplo, programas que traduzem informações sobre materiais de construção e capacidades de carga em imagens sobrepostas, que demonstram o efeito de um tremor de terra sobre a integridade estrutural do edifício. Se um cliente deseja selecionar alguns dentre vários materiais para a fachada de um edifício, o computador gerará, em madeira, tijolo, pedra ou mármore, um modelo da estrutura terminada. Por outro lado, se um arquiteto quer focalizar o perfil de um projeto, um poderoso software pode construir um modelo da estrutura em cores, mantendo imagens do tipo "armação em arame" para cenário ao fundo (à direita).

Sem um computador capaz de gerar uma sucessão de imagens a partir de um modelo mestre, uma equipe de arquitetura gastará um tempo enorme recalculando e redesenhando o projeto. Na verdade, introduzir no computador os dados necessários para criar o modelo original pode levar tanto tempo quanto simplesmente desenhar a estrutura à mão. O computador, no entanto, permite gerar plantas terminadas, e quaisquer testes e modelos intermediários, muito mais rapidamente, liberando o desenhista técnico para tarefas que envolvam pensamento criativo e soluções inovadoras.

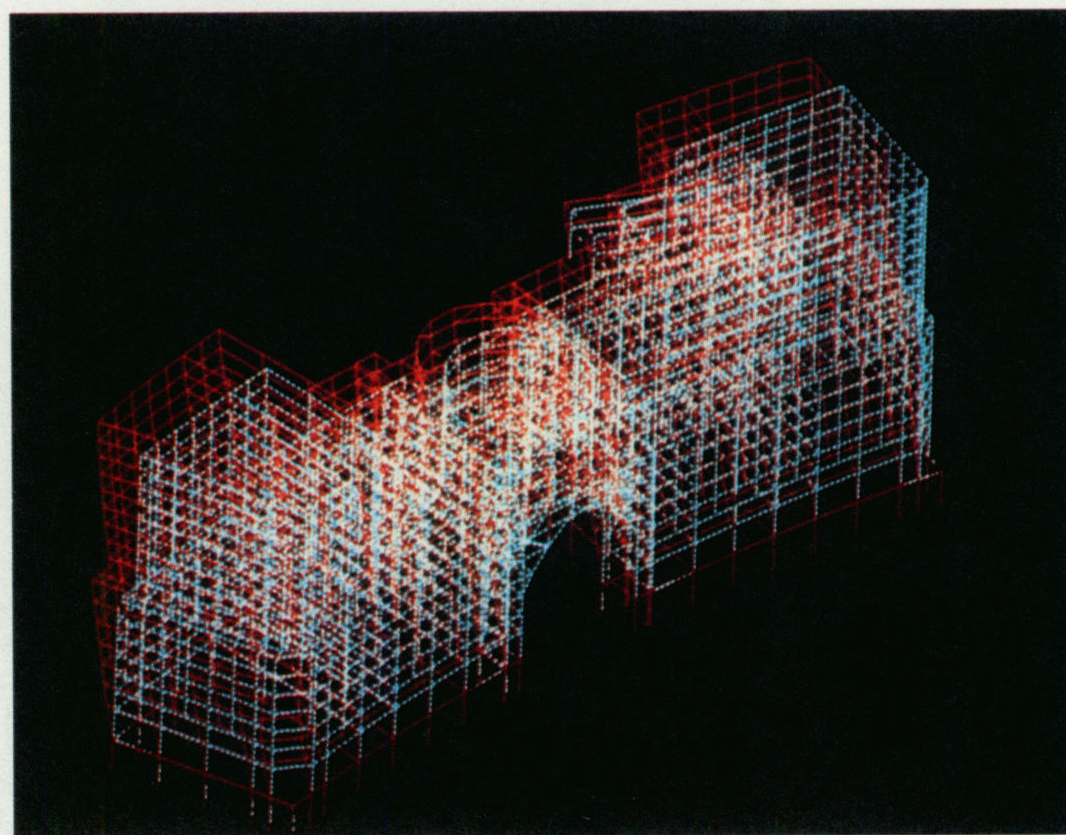
O principal desafio apresentado pelo Rowes Wharf, um edifício comercial planejado para a zona portuária de Boston, foi o de planejar uma estrutura que se harmonizasse esteticamente com a cidade. Por isso, os arquitetos empregaram grande parte de seu tempo no computador criando modelos como este — uma vista do cais com suas superfícies preenchidas, integrado com um panorama, em "armação em arame", do horizonte de Boston.



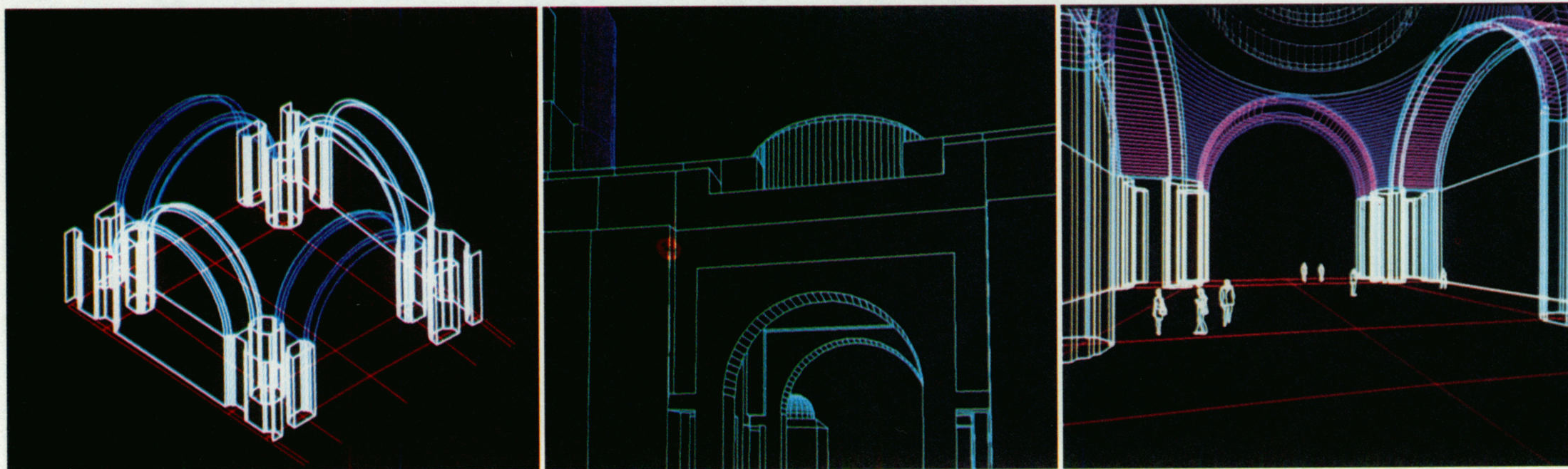
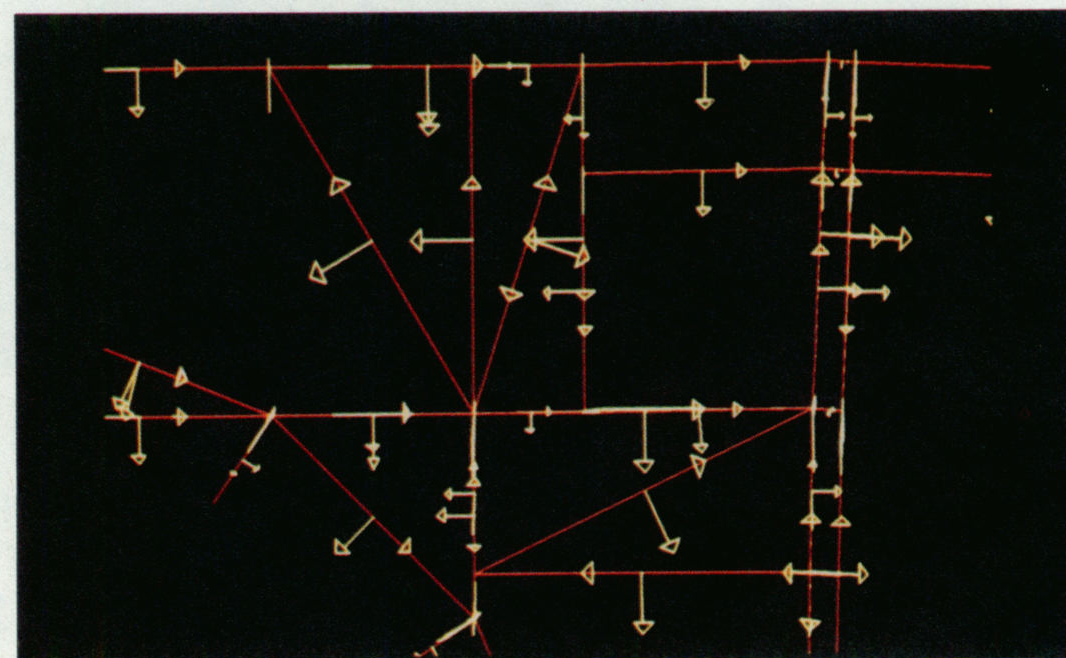


## Aliviando a carga do arquiteto

Utilizando informações do banco central de dados, o computador pode gerar uma imagem tridimensional do tipo "armação em arame" que revela, de modo bem enfático (*vermelho*), os efeitos de tensão do vento.

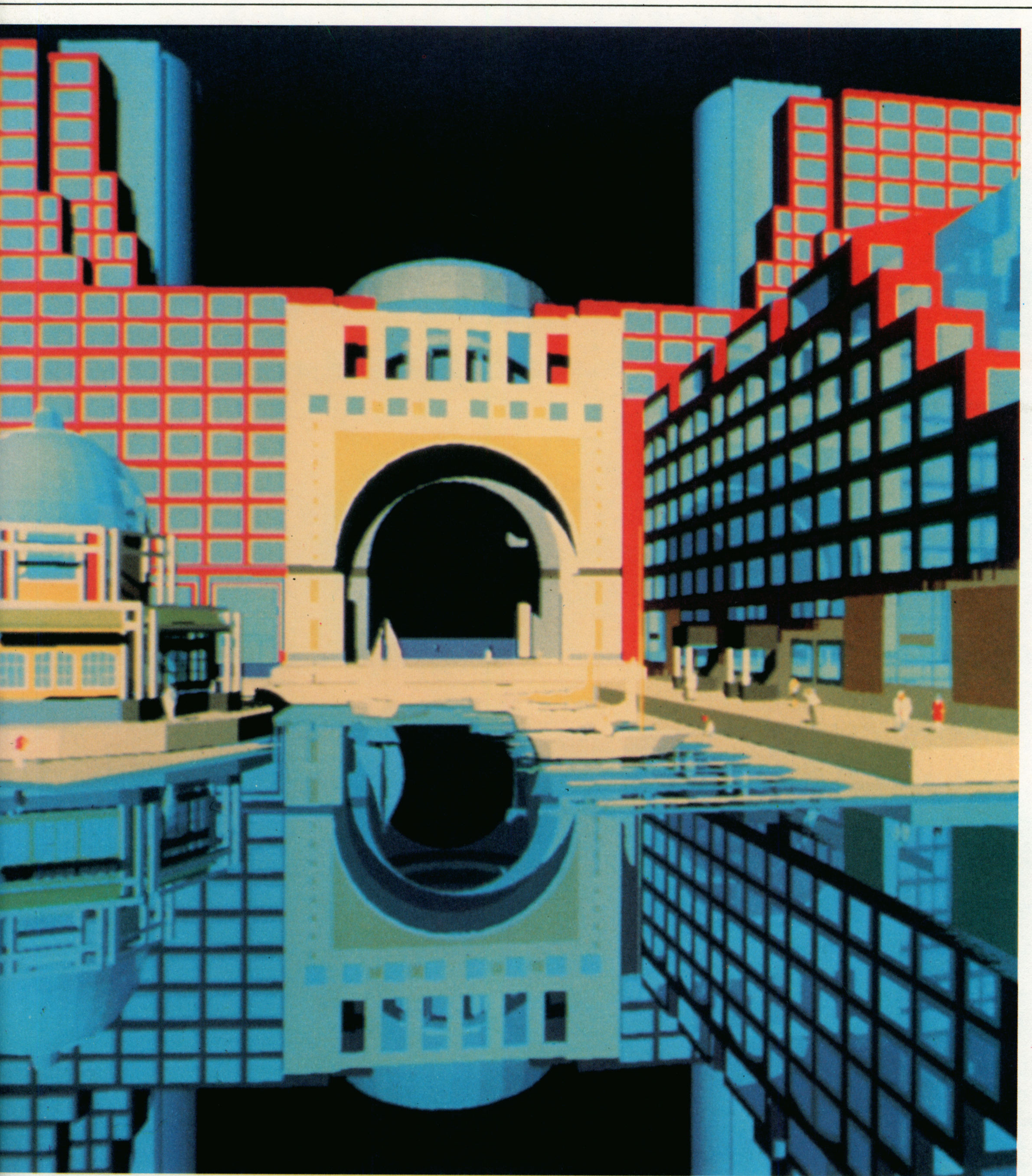


Dados fundamentais de engenharia no arquivo-mestre do computador podem criar uma imagem como esta, que descreve elementos estruturais de um dos cantos do edifício Rowes, com setas indicando as orientações de colunas e vigas.



Combinando de novas maneiras as informações do banco de dados original, um arquiteto pode obter resultados que permitem avaliações estéticas e estruturais. Estas vistas da cúpula do edifício Rowes Wharf incluem um estudo em "armação em arame" dos suportes dos arcos (*acima*), um detalhe da aparência exterior (*centro*) e um contorno do espaço interno (*direita*).

Para gerar esta versão realista da obra terminada, um artista evocou um modelo e determinou superfícies, cores, ângulo de luz e ponto de vista.







# Exploração das realidades artificiais

2

O paciente era bem real — um adolescente que mancava de forma acentuada — mas a presença de uma câmera de vídeo e de um terminal de computador criava um cenário bastante improvável para uma cirurgia ortopédica. À medida que o menino mancava, oscilando para trás e para a frente diante da câmera, sua imagem aparecia no monitor. Um professor de engenharia mecânica da Universidade de Wisconsin, Ali Seireg, controlava o terminal. Tocava a tela com uma caneta óptica, fazendo marcas sobre a imagem móvel do menino. Minutos depois, uma figura de esqueleto apareceu no monitor. Era um modelo, gerado por computador, dos movimentos da criança, e coxeava exatamente como ela.

Então a “cirurgia” começou. Seireg digitou um comando para exibir uma imagem ampliada de uma das pernas da figura. Usando a caneta óptica como bisturi, passou a encurtar a perna, simulando a remoção de pequenas seções do osso. Periodicamente, Seireg parava e digitava alguns comandos para fazer a figura caminhar. Quando esta deixou de mancar, digitou novos comandos e a figura passou a correr normalmente, de um lado para o outro da tela.

Seireg enviou ao cirurgião ortopédico do menino os dados sobre a porção de osso que “extirpara” da perna simulada. As informações guiaram o cirurgião durante a operação real, e isso contribuiu, é claro, para uma melhor aplicação de sua perícia e experiência. Poucos meses depois, pela primeira vez na vida o menino podia andar sem manqueira visível. “Eu teria condições de alcançar os mesmos resultados sem esses dados”, disse mais tarde o cirurgião, “mas é tranquilizador poder ‘ensaiar’ a operação antes, várias vezes, no computador.”

A cirurgia simulada é uma das muitas novas aplicações que a moderna computação gráfica tornou possível. Tais aplicações ajudam a resolver problemas praticamente em todos os campos do esforço humano — desde ciência e medicina até negócios e indústria, da guerra ao esporte. Todas elas têm origem no poder sem paralelo da computação gráfica para explorar aquilo que um pesquisador chamou de “realidades artificiais”. Com hardware e software gráficos apropriados, os

Esta visão interna do ensolarado átrio de Raffles City — um edifício planejado, com escritório, hotel e centro de convenções em Cingapura — é apenas um fotograma de um filme gerado por computador, que leva quem o assiste a uma viagem pelo edifício. Combinando em seus desenhos arquitetura, decoração de interiores e iluminação, o artista Darcy Gerbarg usou os desenhos técnicos do edifício real para realizar sua própria versão do interior graças ao CAD.

---

usuários podem criar e exibir na tela modelos eletrônicos tão simples como um desenho comercial de duas dimensões ou tão complicados como uma molécula tridimensional de proteína, constituída, às vezes, por milhares de átomos.

Pode-se, além disso, não somente girar, aumentar e alterar uma imagem, mas também fazer com que diferentes modelos interajam. Por exemplo, pode-se submeter o desenho de um novo amortecedor de automóvel, gerado por computador, ao impacto causado por uma grande fenda simulada no solo. Ou então, como na cirurgia simulada de Ali Seireg, comparar um modo de andar alterado com o modelo de um andar normal, armazenado em computador.

Embora muitas aplicações ainda empreguem desenhos pelo método da "armação em arame", mais rápido e barato, as técnicas de modelagem de sólidos vêm se difundindo cada vez mais. Diferentemente dos desenhos do tipo "armação em arame", incompletos e, às vezes, de leitura difícil, os modelos sólidos descrevem uma profusão de detalhes, como os de sombreamento, que podem torná-los virtualmente indistinguíveis da realidade. Esse realismo — possível graças ao método empregado no monitor de varredura eletromagnética — é vital em certas aplicações, como na indústria de precisão e no treinamento de pilotos em simuladores de vôo.

### **UMA DÁDIVA INDUSTRIAL**

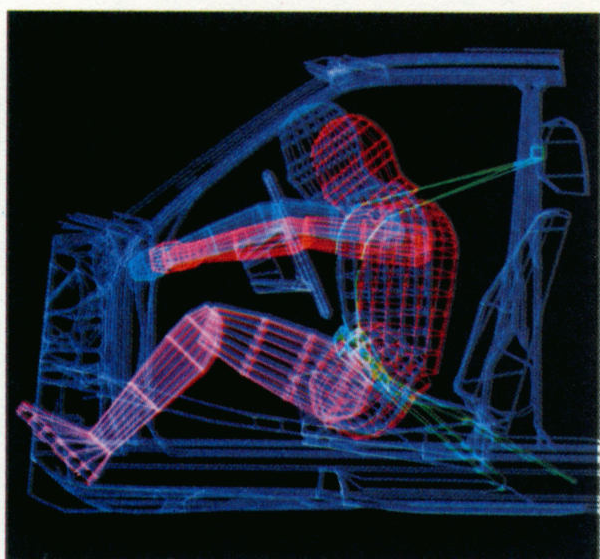
O impacto econômico da computação gráfica é ainda maior na indústria. Em suas aplicações mais prosaicas, as imagens por computador tornaram o desenho sobre pranchas quase obsoleto, pois são capazes de produzir, num só dia, desenhos mecânicos precisos, que exigiriam uma semana de entediantes esforços manuais.

Atualmente, os gráficos penetram nas três fases da fabricação computadorizada, da idealização do produto à sua fabricação efetiva. O desenho auxiliado por computador (CAD) encurta o ciclo de desenho, pois permite aos fabricantes a modelagem de novos produtos num monitor, eliminando a necessidade de construir protótipos físicos dispendiosos. A engenharia auxiliada por computador (CAE) submete o desenho a extensos testes e análises, cujo custo poderia ser muito elevado, ou mesmo impraticável, se fossem efetuados em condições reais. Por fim, a fabricação auxiliada por computador (CAM) utiliza imagens de computador na automatização de máquinas que fabricam as mercadorias prontas.

### **ATALHOS AUTOMOTIVOS**

O setor industrial onde mais se procura obter tais ganhos é justamente o maior deles, a indústria de automóveis. Com enormes investimentos em hardware e software — da ordem de centenas de milhões de dólares, marcos e ienes —, os fabricantes de carros estão apostando na computação gráfica para ajudá-los a permanecer competitivos na corrida da produtividade em escala mundial. Nos centros norte-americanos, alemães e japoneses dessa indústria, engenheiros e desenhistas permanecem ativos em milhares de estações de trabalho (cada uma delas com custo de 100 000 dólares ou mais), empenhados em estilizar e testar os modelos para o ano seguinte e preparar os instrumentos que irão fabricá-los.

A criação de um novo carro ainda começa da maneira típica e consagrada pelo tempo. Os estilistas criam uma réplica, em tamanho real, do carro proposto, a partir de grandes blocos de argila. Até recentemente, esse primeiro passo desencadearia uma laboriosa seqüência destinada a transformar a réplica num molde em ges-



Arremessada para a frente devido a um impacto frontal numa velocidade de cerca de 50 quilômetros por hora, a figura humana, nesta simulação gerada por computador, testa o comportamento de um cinto de segurança sob esforço. Técnicas como esta, de engenharia auxiliada por computador, são amplamente usadas na indústria automobilística para desenvolver novos desenhos e conceitos de engenharia.

so; tradicionalmente, as matrizes formadas a partir do molde eram usadas para imprimir seções metálicas do carro. Na Ford, os desenhistas precisavam copiar a configuração do modelo de argila aplicando gabaritos de papelão de apenas 5 polegadas quadradas em cada um de seus remendos. A seguir, faziam desenhos a partir do papelão, transferindo-os a gabaritos de alumínio até chegar à réplica de madeira, que era a base para o molde em gesso. A cada novo modelo de carro, milhares de gabaritos apinhavam-se nos depósitos.

Hoje, porém, na Ford e em qualquer outra fábrica, o uso da computação gráfica elimina a necessidade de gabaritos: um dispositivo eletrônico varre o modelo em argila e traduz cada superfície curva em valores digitais. Essa representação matemática é então inserida num computador, onde programas especiais a convertem em imagens, que retratam, sob todos os ângulos, o modelo proposto. Enquanto isso, os desenhistas e engenheiros, por um processo similar, incorporam dados de outras fontes, para criar modelos eletrônicos da maioria dos componentes do carro — do eixo de transmissão aos amortecedores. Embora os desenhos do tipo “armação em arame” sejam adequados para a configuração total do veículo, as técnicas de modelagem de sólidos são essenciais ao planejamento de muitos componentes, pois fornecem uma imagem mais precisa das partes — internas e externas. Um modelo sólido também possibilita calcular características como peso, volume e centro de gravidade.

Completados os desenhos preliminares, têm início as tarefas de funilaria — e o CAD entra plenamente em ação. Os desenhistas podem alterar uma forma, quase instantaneamente, sem precisar construir uma nova réplica em argila para visualizar os resultados. Para adicionar uma moldura a um pára-lama, um desenhista chama à tela um menu de opções, seleciona com uma caneta óptica a “abertura da roda” e instrui o computador para ampliar, num zoom, essa seção do carro. Usando a caneta, desenha uma secção transversal da moldura proposta e pede ao computador para encaixá-la no pára-lama.

Enquanto isso, os engenheiros iniciam a segunda fase, a da engenharia auxiliada por computador (CAE), submetendo os desenhos a todo tipo de simulações por computador. Essas simulações testam se um determinado plano funciona como se pretende e se é capaz de ajudar na avaliação de versões alternativas. Algumas simulações envolvem testes de configuração do veículo — para descobrir, por exemplo, como uma determinada forma reagirá a um vento de 80 quilômetros por hora. Programas baseados em dados obtidos a partir dos tradicionais testes com túneis de vento podem simular as linhas de pressão do ar fluindo pelo carro, e revelar, assim, as áreas de resistência máxima.

A configuração do espaço interior também é avaliada. Engenheiros da General Motors costumavam construir um modelo em tamanho natural de um bagageiro de automóvel, carregando-o com malas reais. Hoje um engenheiro alimenta o computador com uma simulação do bagageiro, selecionando no menu opções tais como “sacola de golfe” e “frasqueira para pequenas viagens”. Se qualquer coisa não se encaixa, o bagageiro é redesenhado. Também são feitos testes semelhantes para avaliar o conforto e a segurança de motoristas e passageiros. Na Chrysler, os assim chamados engenheiros de fatores humanos contam com a ajuda de um “boneco” eletrônico apelidado Cyberman. Inicialmente desenhado em “armação em arame”, mas agora em modelo sólido mais realista, o Cyberman senta-se numa réplica computadorizada do banco do motorista e move suas articulações flexíveis

para testar as características do desenho interno do carro, tais como o espaço para as pernas e o posicionamento dos apoios para os braços. Pode-se graduar o Cyberman para várias proporções humanas, inclusive as de uma mulher — que recebeu o apelido de Cyberwoman. O “boneco” pode ainda ser duplicado, ocupando os bancos dos passageiros.

### PILOTANDO ÁREAS DE TENSÃO

Outros testes submetem os componentes individuais do automóvel a versões computadorizadas das tensões do mundo real, para checar o desenho ou determinar a necessidade de modificações. “Fixamos as partes antes de o carro ser construído”, diz Thomas Roberts do departamento de planejamento avançado das divisões Buick, Oldsmobile e Cadillac da GM. Um método-chave para tais testes, conhecido como método do elemento finito (FEM, do inglês *finite element method*), pode avaliar cada área da estrutura de qualquer parte do carro em termos de resistência, vibração e outras características. Por exemplo, para executar um FEM no suporte que conecta uma barra estabilizadora à estrutura de um veículo, um engenheiro chama à tela uma imagem do suporte. Essa peça, essencial para o manejo suave de um automóvel, aparece na tela sob a forma de uma teia de aranha com linhas e curvas. Os pontos de intersecção, chamados nodos, representam áreas que serão submetidas a simulações das cargas que a braçadeira experimentaria numa operação real. Um gráfico das tensões, colorido, pode apontar com precisão as áreas que mais necessitam de fortalecimento, bem como as isentas de tensão, onde o reforço poderia ser reduzido sem sacrificar a integridade estrutural. Retirando o metal de partes que apresentam maior resistência que o necessário, os engenheiros não somente reduzem o peso total — o que baixa o consumo de combustível do veículo — como também contribuem para diminuir os custos de produção. A Ford, por exemplo, conseguiu tirar 180 quilos de peso de um de seus modelos de 1986, usando o FEM para avaliar plásticos, grafite e outros materiais de peso leve.

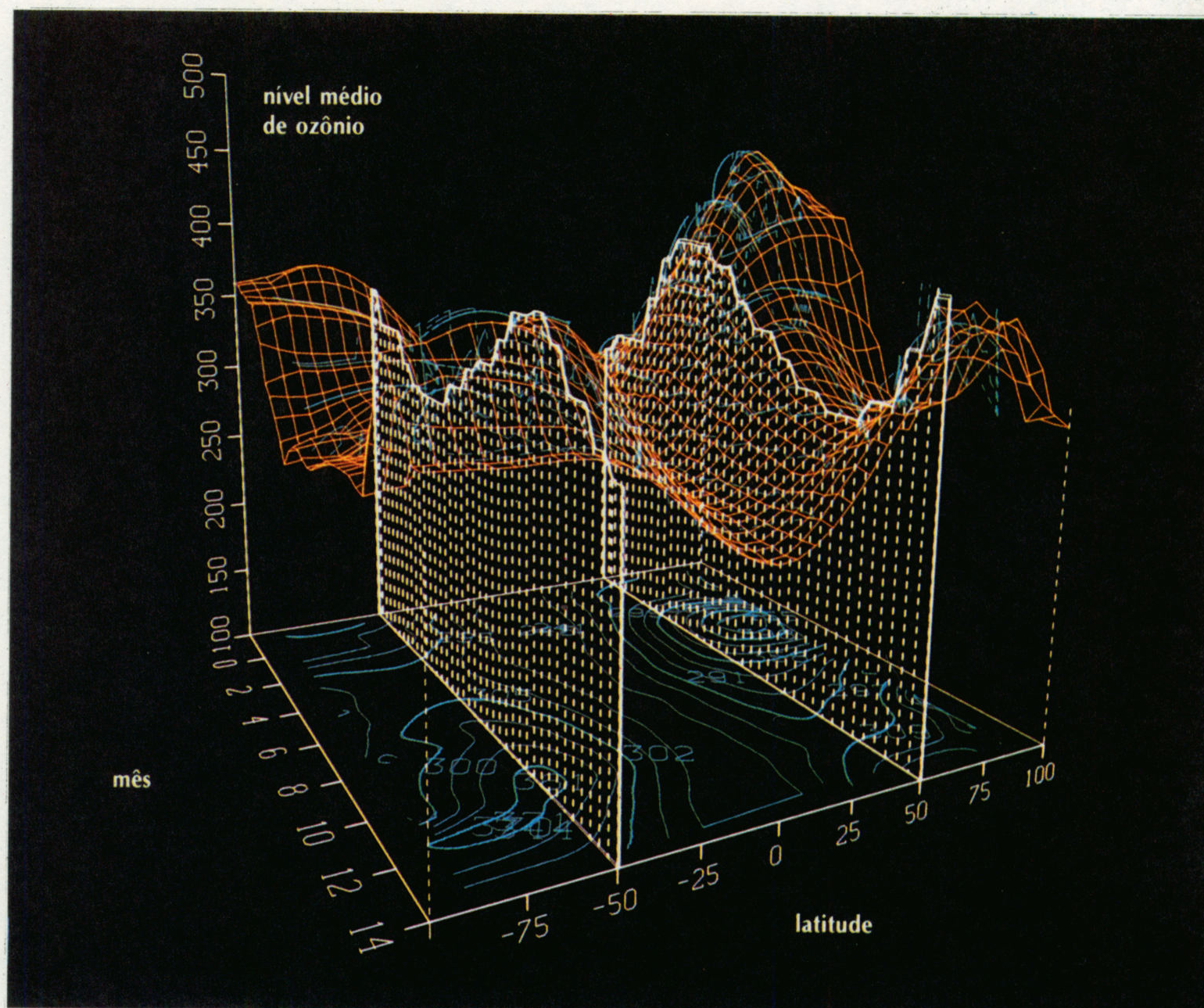
O FEM e outros métodos também permitem aos engenheiros testar o desempenho de sistemas completos. Numa avaliação do sistema de suspensão de um veículo, na General Motors, um modelo em malha de fios segue aos solavancos por uma estrada imaginária, cheia de buracos e obstáculos. As vibrações do veículo são deliberadamente exageradas na tela em áreas específicas de interesse.

Os engenheiros podem também visualizar como um veículo se comporta num acidente simulado. Na Ford, um teste típico de acidente de carro costumava envolver um choque, com projeção de um protótipo feito a mão contra uma barreira de concreto e metal, a 50 quilômetros por hora. Esses protótipos custavam 300 000 dólares cada — um investimento que se esfacelava em menos de 1/10 de segundo. Os engenheiros da Ford podem agora encenar o mesmo acidente numa tela de vídeo, com gráficos coloridos. Usando o FEM e dados baseados em testes de acidentes efetivos, registram o comportamento de partes sucessivas da extremidade traseira do carro, à medida que se deformam durante a simulação. “Os gráficos coloridos permitem ao engenheiro ‘descascar’ a cobertura metálica externa e ver o carro a partir de qualquer ângulo, observando o que acontece na estrutura interna”, disse um porta-voz da Ford. “Isto é algo que não se pode fazer com um protótipo.”

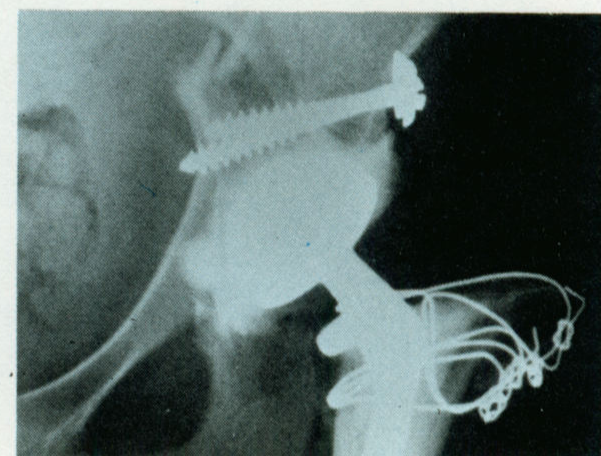
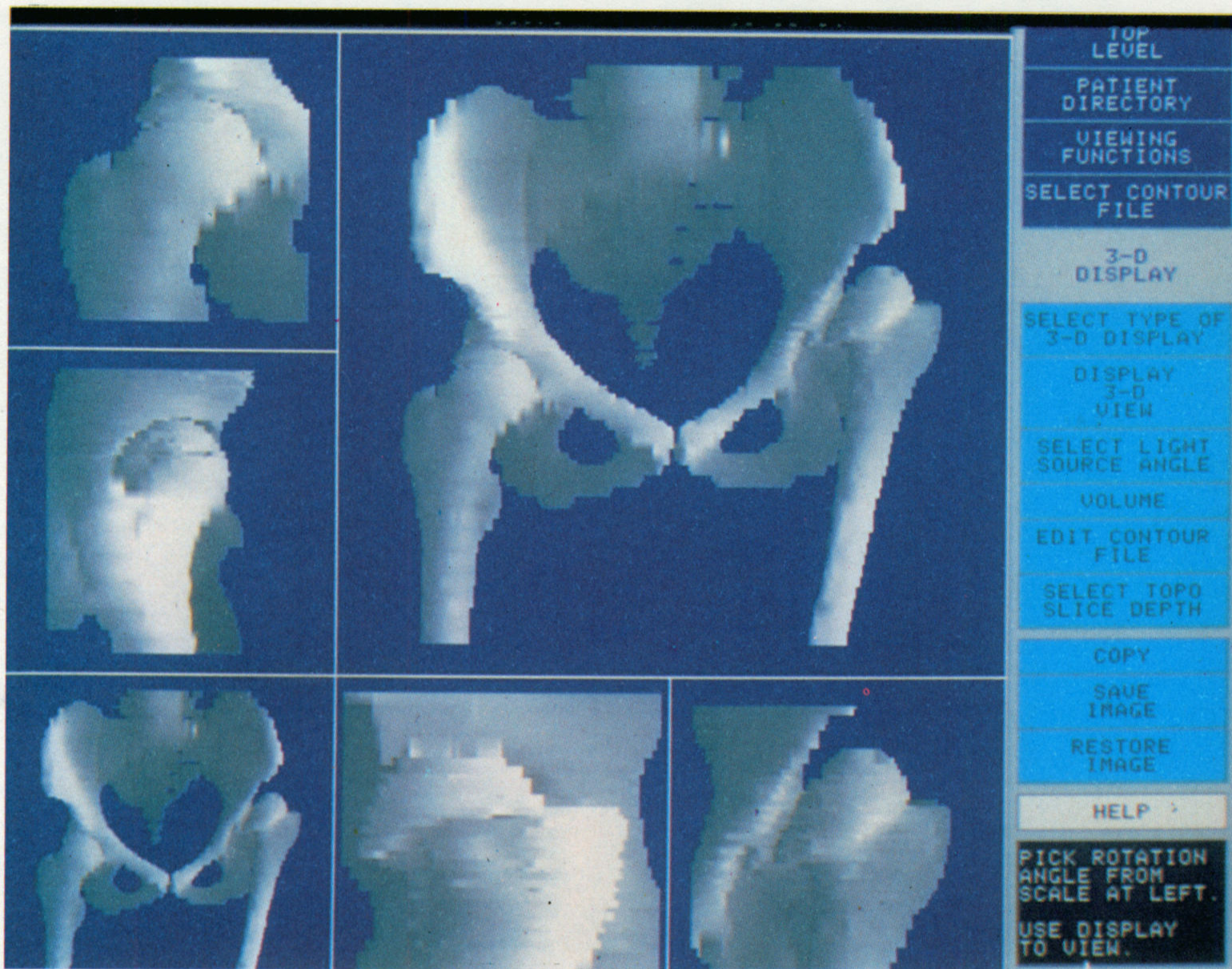
Mesmo após o término das fases de desenho e de engenharia — CAD e CAE — o papel da computação gráfica continua. Vários aspectos do estágio final, o

da fabricação, têm um débito para com as imagens do *design*, armazenadas no computador em forma digital. Essas informações constituem um valioso banco de dados sobre o que se deve desenhar — novamente, com o auxílio do CAD —, isto é, sobre os instrumentos, matrizes ou moldes que, efetivamente, fabricarão a parte do automóvel. Além disso, os dados do desenho de um certo componente podem controlar as máquinas-ferramentas necessárias à sua fabricação. Para isso, tais dados são transferidos para o papel ou para a fita magnética, que programam a máquina automatizada. Os fabricantes de carros também usam sistemas que empregam robôs, equipados com microcomputadores como cérebros, para soldar, perfurar e executar outras tarefas, guiados por informações tiradas do processo original de desenho dos componentes.

Além de contribuir para um aumento da produtividade, a computação gráfica no estágio de fabricação pode ajudar os engenheiros a economizar matéria-prima. Na Ford, eles usam o modelo computadorizado de um elemento da carcaça do carro para determinar a maneira de maximizar a relação custo/rendimento na sua moldagem a partir de uma grande lâmina de metal. Resultado: uma economia de 187 000 dólares em metal que, normalmente, acabaria no ferro-velho. A meta dos fabricantes de carros e de outros líderes industriais é combinar desenho, engenharia e fabricação num sistema contínuo computadorizado. Dão o nome de CIM (*computer-integrated manufacturing*), fabricação integrada por computador, a essa integração, e prevêm fábricas onde tudo, desde desenho e programação até pro-



A relação complexa entre a quantidade de ozônio na atmosfera, a latitude e a época do ano está claramente resumida neste gráfico tridimensional. As vantagens de apresentar tais informações numa forma visual de imediata compreensão fizeram dos gráficos e diagramas um dos setores de crescimento mais rápido da indústria de computação gráfica.



#### Projeto para um novo corpo

Janelas múltiplas, num programa gráfico de medicina, ajudam um cirurgião a planejar uma operação no quadril esquerdo, deslocado, de uma mulher jovem. Depois de chamar à tela uma imagem tridimensional da área pélvica, construída a partir de explorações CI bidimensionais, o cirurgião examina a articulação do quadril sadio (*janela do alto, à esquerda*) e a do quadril deslocado (*esquerda, fileira de baixo*) antes de planejar uma prótese da articulação do quadril (*acima, no alto*). Aumentada com os necessários enxertos ósseos durante a cirurgia, a prótese encaixa-se perfeitamente (*acima*).

dução e embarque, será computadorizado num único e imenso banco de dados. Segundo previsão de um relatório feito por uma agência do Governo dos Estados Unidos, a CIM "tem mais potencial para aumentar radicalmente a produtividade do que qualquer desenvolvimento ocorrido desde a descoberta da eletricidade".

A indústria aeroespacial tem sido um regulador de marcha para o crescimento da computação gráfica. A partir da década de 1960, as verbas do Governo para espaçonaves e aviões militares proporcionaram os enormes fundos necessários ao desenvolvimento inicial tanto do hardware como do software. Foram tais avanços que ajudaram a introduzir as imagens por computador na indústria e também no campo das aplicações médicas, como a cirurgia plástica. Esse salto para fora do domínio dos gráficos aeroespaciais beneficiou centenas de pessoas com deformidades faciais e cranianas causadas por traumas, defeitos de nascimento ou tumores. Em Saint Louis, uma equipe do Centro Médico da Universidade de Washington, liderada pelo cirurgião plástico Jeffrey Marsh, usa técnicas desenvolvidas pela McDonnell Douglas (que as utilizara no desenho técnico de aviões de caça) para obter uma espécie de cópia pré-operativa: um modelo estrutural do crânio do paciente.

Essa inusitada aplicação foi concebida por Michael Vannier, engenheiro especial do Governo, que se tornou radiologista. Com a ajuda de engenheiros da McDonnell Douglas, Vannier adaptou o software do CAD para que representasse osso e carne, em vez dos suportes de aço e da "pele" de alumínio da fuselagem de um F-15. Como matéria-prima, o sistema dispõe das imagens de raios X de secções transversais, obtidas por intermédio de um método muito difundido — a tomografia computadorizada, ou exploração CT. Nas explorações CT, a cabeça de um paciente é radiografada, do topo ao pescoço, a intervalos de dois milímetros; uma cabeça de adulto pode exigir 120 a 130 radiografias, e a de uma criança menos da metade desse número. As imagens resultantes proporcionam aos médicos valiosas informações, mas são bidimensionais e de leitura difícil. O software que Vannier

desenvolveu para a equipe de Jeffrey Marsh converte as informações da exploração CT numa imagem tridimensional de computador, que é então trabalhada, a fim de adquirir uma aparência mais viva, graças a uma parte do software que acrescenta pele e músculos ao crânio descoberto.

### **ESTRATÉGIAS PARA RECONSTRUÇÃO**

Marsh, pôde, então, estudar a imagem na tela de um computador para planejar os passos cirúrgicos necessários à reconstrução do rosto ou do crânio. Pôde perscrutar o interior do modelo ou compará-lo com imagens de crânios normais. Pôde ainda tentar a aplicação, através do monitor, de várias estratégias cirúrgicas alternativas e visualizar os resultados sem pôr os pés na sala de operação. Além disso, testou vários procedimentos em modelos físicos tridimensionais, feitos a partir das mesmas informações obtidas pela exploração CT. "Você pode, efetivamente, sintetizar a cirurgia", diz ele a respeito do procedimento.

Enquanto o projeto de Saint Louis utiliza gráficos que fornecem tanto o CAD como a CAE, uma nova tecnologia médica desenvolvida em Nova York faz o processo gráfico dar um passo além, acrescentando-lhe os recursos da CAM. É o que ocorre no Hospital for Special Surgery, que planeja e produz quadris, joelhos e outras articulações artificiais, feitas sob encomenda, com o auxílio de seu próprio sistema CAD/CAM. Antes, o processo de desenhar e modelar uma articulação artificial exigia um prazo médio de seis semanas. Primeiro, um desenhista do hospital estudava radiografias convencionais da articulação doente ou danificada do paciente e desenhava à mão um substituto artificial. A seguir, um técnico, trabalhando com tornos e fresadoras, tentava moldar um bloco de metal ou plástico para obter uma réplica do desenho. Com freqüência, a prótese não se adaptava adequadamente, e, na sala da operação, o médico era obrigado a executar uma cirurgia mais radical no paciente a fim de forçar o ajuste.

Com a nova tecnologia, um computador executa a tarefa com precisão — num terço do tempo e a um terço do custo. Para desenhar a prótese, um cirurgião introduz no computador dados das explorações CT e outras radiografias da articulação lesada. Variáveis que possam afetar o desenho, tais como o peso do paciente e o nível de atividade, são igualmente inseridas. Então, o computador seleciona uma forma apropriada, dentre os trezentos desenhos armazenados em sua memória, e exhibe-a em três dimensões. "Se o sistema não tem, em sua memória, um modelo que funcione, ele produzirá outro, adequado", afirma o diretor executivo do hospital, Donald Broas.

Trabalhando com caneta óptica e tela, um cirurgião e um engenheiro projetista ajustam com precisão a imagem, visando assegurar o melhor encaixe possível com a estrutura óssea do paciente. O computador perfura então uma fita com as coordenadas exatas do desenho para a articulação artificial. Essa fita controla tornos e fresadoras, que cortam e modelam automaticamente o implante.

O hospital prevê a instalação de uma rede CAD/CAM em âmbito nacional. Recorrendo a ela, os cirurgiões ortopédicos poderão planejar implantes em terminais hospitalares praticamente em qualquer lugar dos Estados Unidos, e receber de Nova York, pelo correio, o produto acabado cerca de duas semanas mais tarde.

Os gráficos por computador também são muitos utilizados na biomecânica, o ramo da pesquisa médica que aplica princípios de engenharia ao estudo do movimento humano — considerando, para isso, o corpo como uma máquina de efi-

ciência energética. Ali Seireg é uma das autoridades nesse campo: o trabalho que realiza baseia-se em seu notável modelo computadorizado do movimento humano, que abrange todo o sistema muscular-esquelético do corpo.

O modelo, desenvolvido por Seireg e seus alunos durante mais de uma década, contém cerca de 1200 equações referentes ao movimento humano normal, e inclui desde caminhar até mascar chiclete. Algumas dessas equações foram determinadas estatisticamente; outras basearam-se em experimentos nos quais sensores eletrônicos eram conectados a seres humanos para registrar as forças que determinados músculos exerciam sobre os ossos, à medida que as pessoas se moviam diante de uma câmera de vídeo.

Além de seu uso na previsão de procedimentos cirúrgicos, o modelo de Seireg também encontra aplicação em terapia física. Analisando um *videotape* dos movimentos de um paciente, o terapeuta pode ver como uma determinada incapacidade afeta o corpo inteiro e determina quais músculos necessitam de reabilitação. Certa vez, depois que o computador recebeu informações sobre o tamanho do paciente, seu peso e ferimento, o modelo mostrou a ele a melhor maneira de usar uma bengala para reduzir a tensão sobre seu quadril machucado.

#### **INSTRUINDO POR COMPUTADOR**

Enquanto o modelo de movimento de Seireg auxilia as pessoas com incapacidades físicas, outros pesquisadores em biomecânica aplicam a computação gráfica para ajudar aqueles que são os mais robustos de todos — os atletas profissionais. Analisando as imagens computadorizadas do desempenho do atleta, as instruções contribuem para melhorar a tacada de um jogador de golfe, o saque de um tenista ou o passo largo de um competidor de maratona.

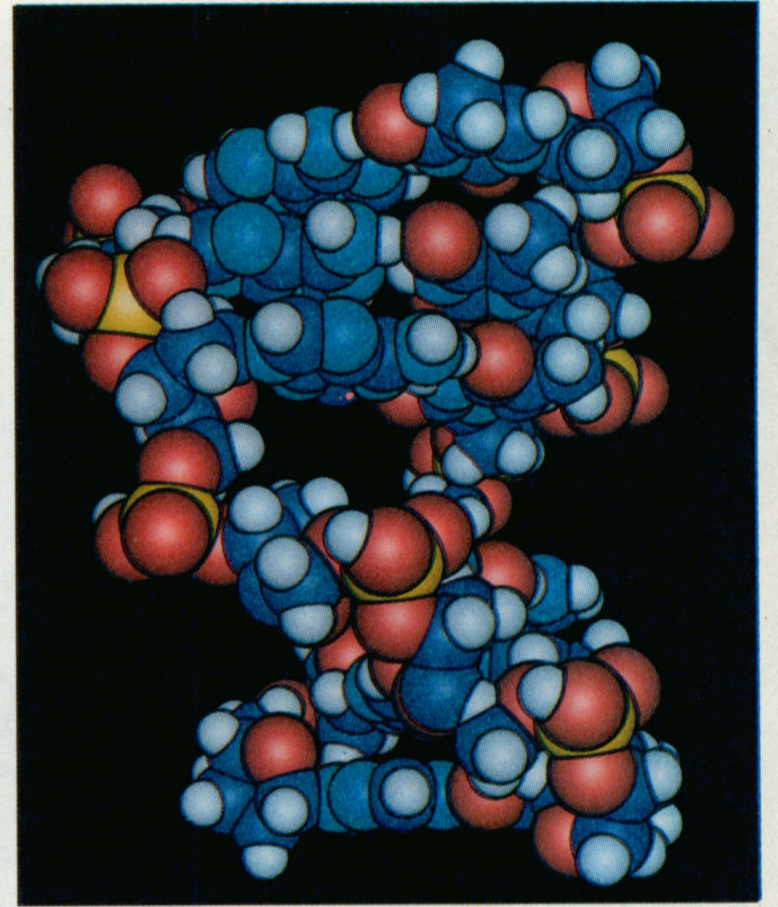
O processo tem início com filmes de alta velocidade do atleta em ação. A partir dos fotogramas individuais do filme, o analista e o treinador selecionam os movimentos das partes específicas do corpo que ilustram a técnica do atleta — por exemplo, as posições relativas da cabeça, braços e ombros de um golfista. Essas imagens são convertidas em coordenadas digitais no computador, que gera, então, uma série de figuras, a serem cuidadosamente estudadas pelo treinador.

Alguns programas possibilitam a análise minuciosa da técnica. Eles exibem gráficos que mostram a velocidade e a aceleração, comparam os desempenhos de dois atletas diferentes ou calculam características tais como o centro de gravidade da pessoa e o ângulo preciso do cotovelo.

Tais programas ganharam credibilidade por ajudarem alguns atletas dos Jogos Olímpicos de 1984 a melhorar seu desempenho. Membros da equipe de voleibol feminino dos Estados Unidos não somente puderam estudar seu próprio desempenho como também o da competição. Filmes dos adversários em potencial foram digitalizados e depois analisados de modo a evidenciar seus pontos fracos e fortes. Assim preparadas, as norte-americanas conseguiram ganhar uma medalha de prata, o mais alto resultado olímpico conseguido até então por uma equipe feminina de voleibol dos Estados Unidos.

A despeito de tais sucessos, os pesquisadores em biomecânica apressam-se em apontar as limitações de se comparar o corpo humano com máquinas de eficiência energética. "Tentamos aplicar nosso modelo a um dos mais notáveis ginastas de nosso país", diz Ali Seireg, "e descobrimos que essa pessoa era de uma ineficiência energética extrema. Mas seus movimentos eram bonitos. Isso mostra preci-

Neste modelo gerado por computador, uma secção de uma cadeia de DNA (à direita) abre-se para receber uma única molécula de etídio (destacada pelo contorno à extrema direita), substância química usada para marcar o DNA. Cada átomo é identificado por uma cor padronizada: branco para o hidrogênio, azul-médio para o nitrogênio, vermelho-cobre para o oxigênio, amarelo para o fósforo e azul-escuro para o carbono. Ao desenhar modelos moleculares como estes dois — extraídos de uma seqüência animada — os químicos primeiro os manipulam sob forma de “armações em arame”, numa tela, depois completam a imagem com cor e pontos mais luminosos.



samente que não somos modelos de computador, não somos máquinas perfeitas. Somos seres humanos, belos mas imperfeitos.”

Se, por um lado, os sistemas de computação gráfica são usados para estudar a mecânica do movimento humano, por outro, pesquisadores em outro campo empregam as imagens de computador para entrar no domínio submicroscópico e retratar a beleza de uma molécula. Em laboratórios de pesquisa bioquímica espalhados pelo mundo, os monitores de computador podem exibir modelos multicoloridos de moléculas. São aglomerados de centenas de pequenas bolas, cada uma delas codificada por uma cor, para representar um tipo de átomo. Para o pesquisador, que às vezes usa lentes estereoscópicas para realçar a ilusão de profundidade tridimensional, os modelos parecem flutuar no espaço. Empunhando joysticks, ele pode manipular dois modelos na tela, manobrando-os um em direção ao outro. Quando estão exatamente justapostos, de modo que uma protuberância na superfície de um encaixe “como uma luva” numa cavidade do outro, os modelos passam a se mover conjuntamente, acoplados como um par de espaçonaves. Esse pequeno drama simula uma ação-chave que ocorre no comportamento bioquímico real: moléculas de diferentes substâncias acoplam-se, conectando-se umas às outras em locais receptores específicos — uma interação que ajuda a explicar como um vírus penetra numa célula.

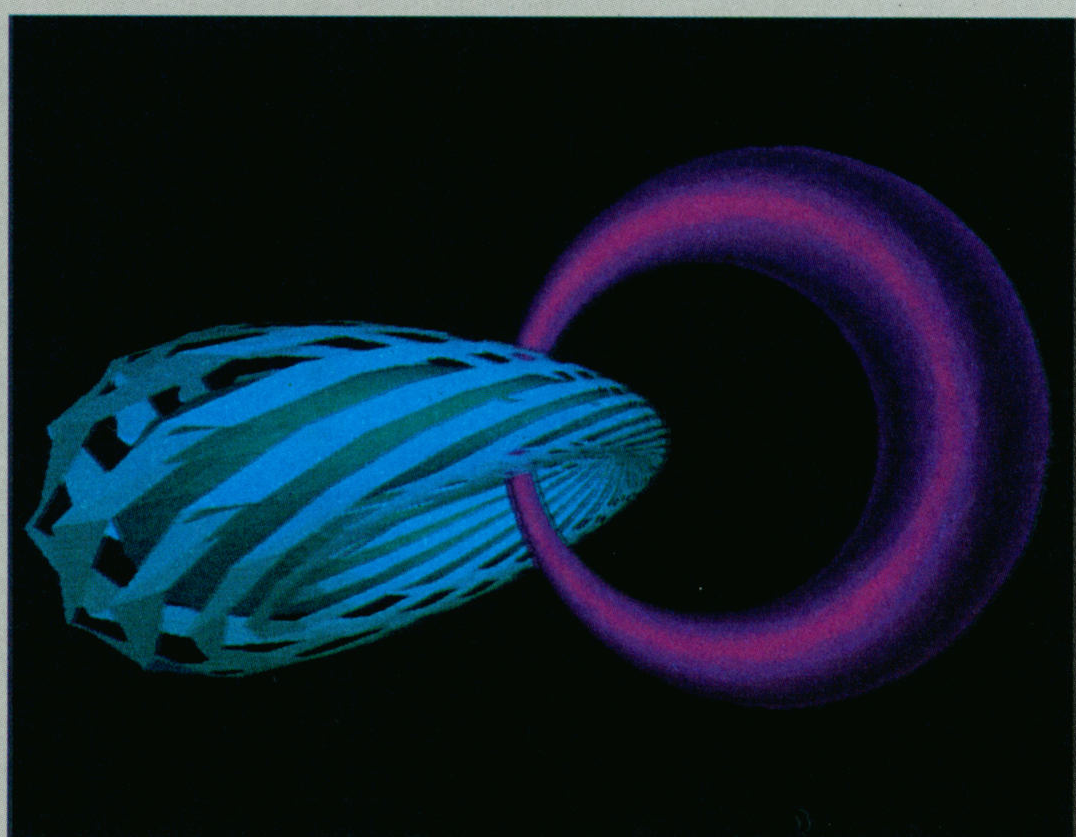
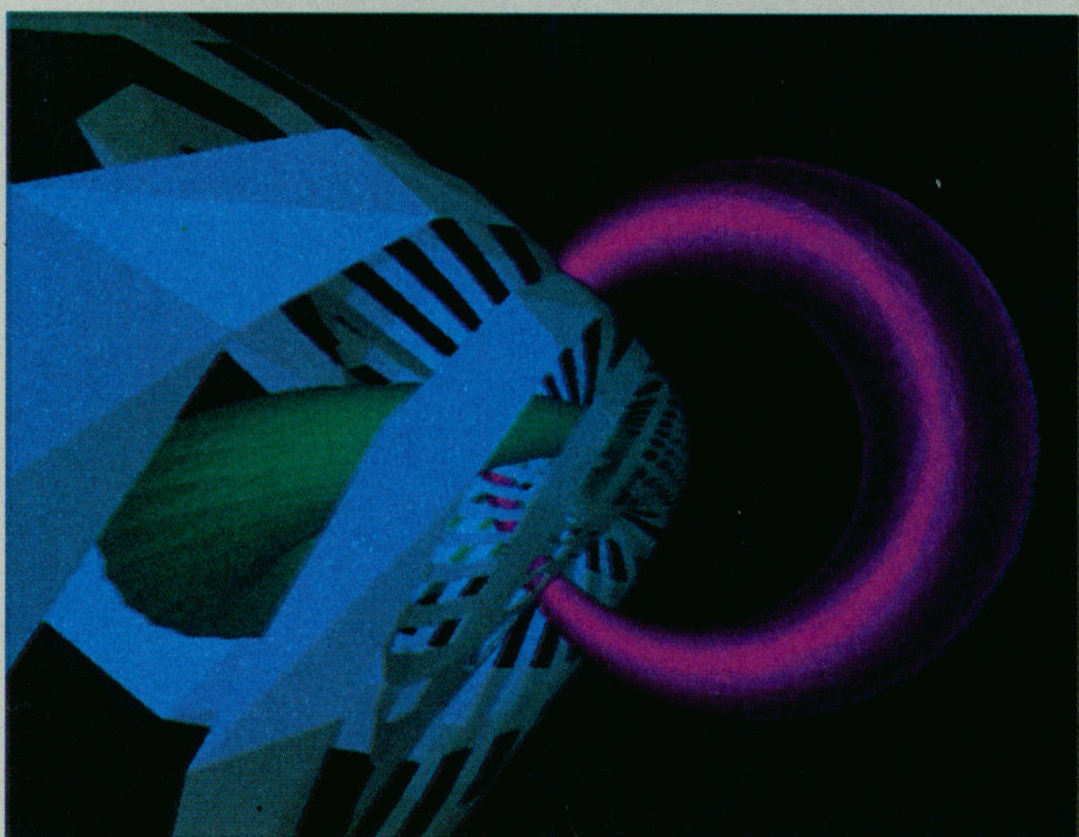
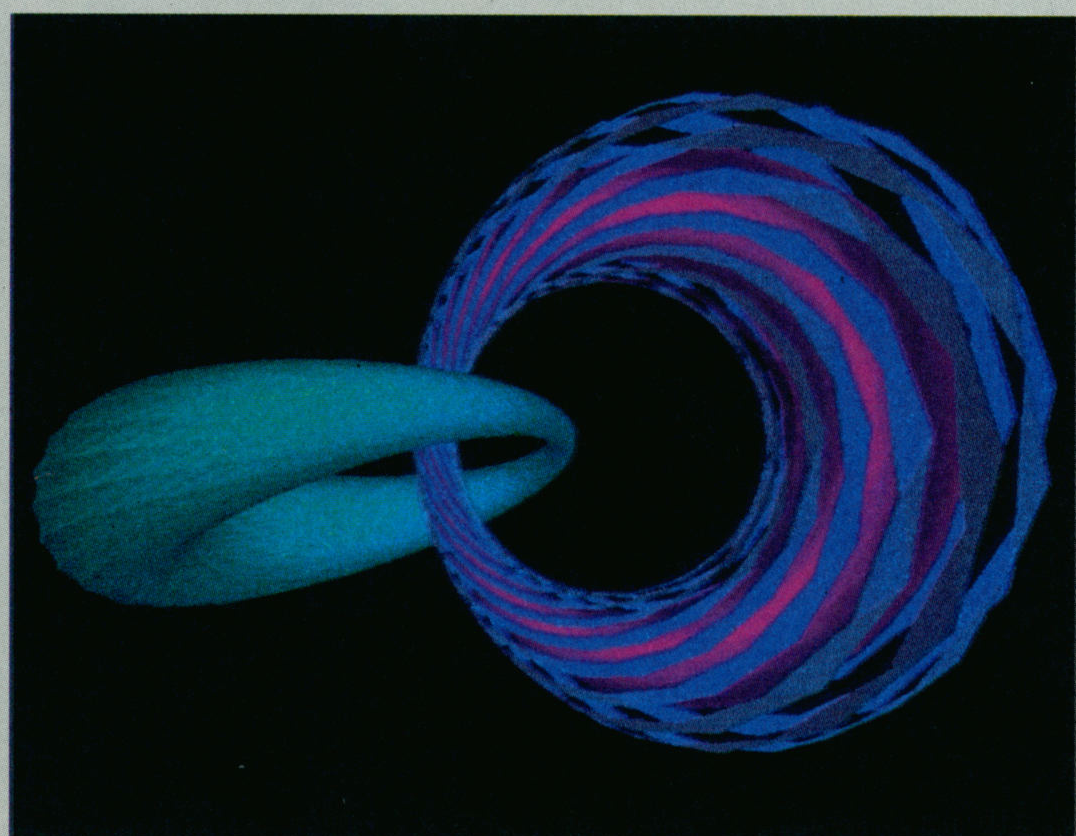
Tais simulações estariam fora de cogitação antes do advento de sofisticados programas gráficos. Embora o método de análise eletrônica conhecido como cristalografia de raios X possa revelar aos pesquisadores as posições relativas dos átomos numa molécula, até recentemente os cientistas só podiam visualizar a molécula se construíssem modelos físicos de difícil manejo, com arame e bolas de plástico. Esses modelos de proteínas altamente complexas, semelhantes a brinquedos com peças articuladas para montar, com seus rosários espiralados de aminoácidos, costumam preencher todo o espaço de uma sala.

Hoje, as coordenadas atômicas fornecidas pela cristalografia de raios X podem

# Explorações da quarta dimensão

Assim como os biólogos e químicos empregam a computação gráfica para simular o comportamento invisível de moléculas e átomos, pesquisadores em outros campos utilizam os computadores para estudar idéias abstratas, que desafiam a descrição verbal. Um exemplo é o da assim chamada quarta dimensão (4D), um conceito de interesse constante para os físicos e matemáticos. Em sua teoria da relatividade, Albert Einstein considerou o tempo como uma quarta dimensão. Isso faz com que um objeto seja definido por sua altura, largura e espessura, com o tempo atuando como uma quarta medida. Recentemente, alguns teóricos especularam a respeito de uma quarta dimensão especial, que não diferia, em natureza, das outras três.

Os matemáticos podem definir objetos hipotéticos em dimensões mais altas graças a complexas equações, mas é difícil aos habitantes de um mundo tridimensional (3D) visualizá-los. Em

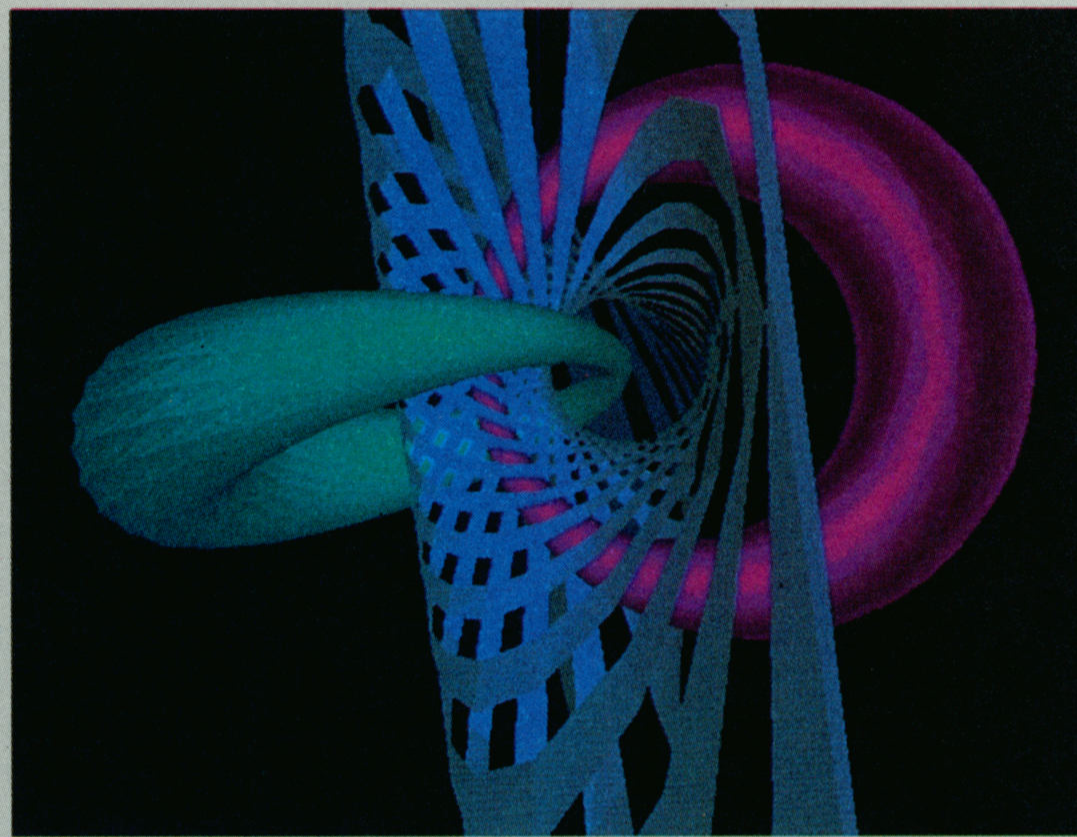
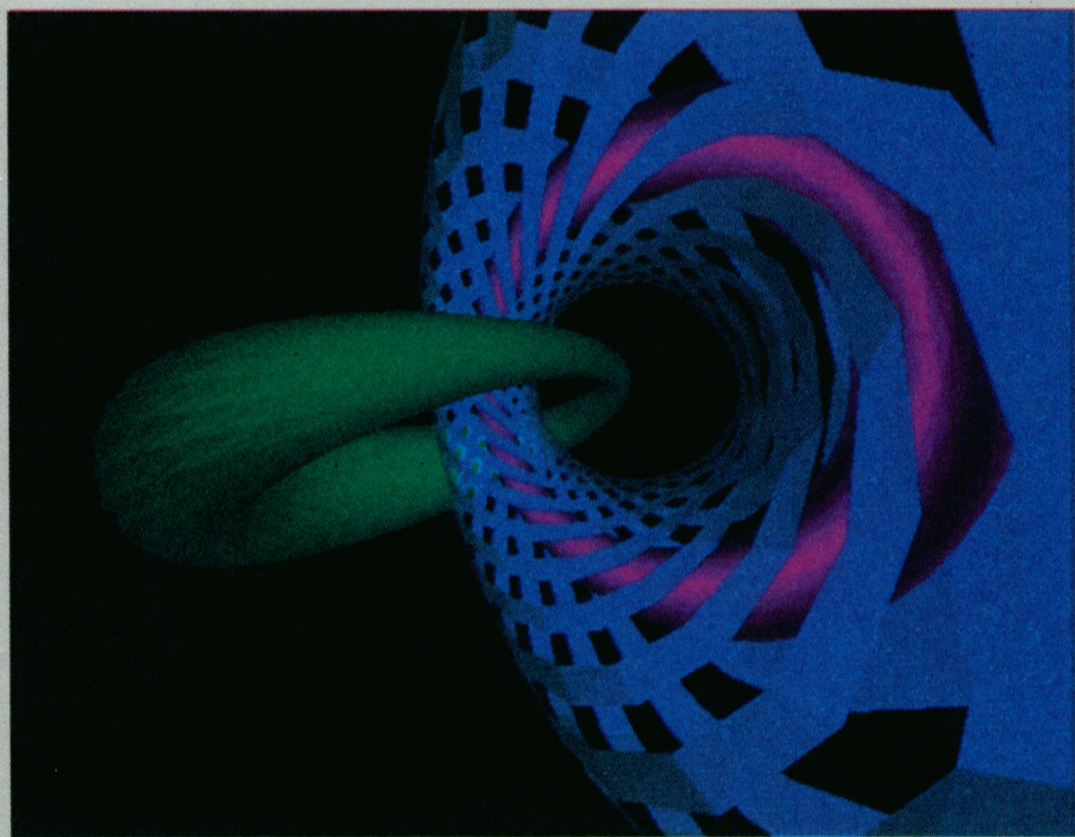


teoria, por exemplo, uma esfera quadridimensional, movendo-se no espaço tridimensional, poderia assemelhar-se a um ponto que repentinamente aparece, vindo de lugar nenhum, torna-se uma minúscula esfera que aumenta de tamanho, depois diminui — e a seguir desaparece subitamente. Embora essa possa ser uma representação razoável, não fornece muitas informações úteis a respeito da aparência que tal esfera — chamada hiperesfera — teria na própria quarta dimensão.

Um computador, no entanto, não tem nenhum dos preconceitos humanos usuais; dados os números corretos a um programa sofisticado, ele pode facilmente ilustrar análogos quadridimensionais de objetos tridimensionais. As imagens mostradas aqui, representando visões em perspectiva de objetos sobre uma hiperesfera, foram extraídas de um filme animado por computador, criado por uma equipe da Universidade Brown, liderada pelos matemáticos Thomas Banchoff e Huse-

yin Kocak. “O que nós, essencialmente, fazemos”, diz Banchoff, “é tirar um instantâneo em 3D de um objeto de 4D, depois caminhar ao seu redor e acumular enfoques suficientes para compreendê-lo.”

Embora tais imagens pareçam viver no limiar da fantasia, os cientistas estão colocando a quarta dimensão em uso prático, graças a complexas equações gráficas que têm quatro variáveis. Por exemplo, plotando salinidade, temperatura, matéria viva e intensidade de corrente em determinados pontos do oceano, o Departamento Norte-americano de Pesquisas Navais espera melhorar a monitoração de sinais acústicos que viajam através da água. Enquanto isso, os físicos exploram a possível existência de sistemas que necessitam não apenas de quatro, mas de onze dimensões, para que possam ser definidos.



Numa seqüência de imagens extraídas de um filme animado por computador, duas superfícies toroidais, ou em forma de rosca, interligadas representam projeções tridimensionais em perspectiva de objetos sobre uma esfera no espaço quadridimensional. Um terceiro toróide, cortado em tiras para revelar sua conexão com os outros dois, parece mover-se de dentro para fora à medida que se afasta da superfície magenta para envolver a verde.

ser introduzidas em poderosos programas de computador. Além de exibir modelos tridimensionais em qualquer um dos dois modos — “armação em arame” ou modelagem de sólidos —, esses programas fornecem dados sobre características como a solubilidade da molécula ou a ligação entre átomos. Um bioquímico pode planejar uma nova molécula ou mudar a estrutura de outra já existente, sem sujar um único tubo de ensaio.

Esse tipo de trabalho já promoveu aquilo que um pesquisador descreve como uma “revolução total na química”. O impacto disso é evidente em grau máximo no planejamento de vacinas e remédios. Por exemplo, em estudos efetuados pelo Instituto de Pesquisas da Califórnia, na Clínica Scripps, em colaboração com o Lawrence Livermore National Laboratory, empregam-se técnicas de modelagem de sólidos para criar uma visão realista da estrutura molecular de um vírus que ataca as plantações de tomate. Com base nessa imagem, bioquímicos identificaram as partes do vírus que podiam ser imitadas na estrutura de uma vacina em potencial, e que, por sua vez, estimulariam as plantações de tomate a produzir anticorpos.

As companhias farmacêuticas consideram os gráficos moleculares como meios indispensáveis ao planejamento de remédios e à simulação de seus efeitos. Testes que levavam cinco semanas ou mais até isolar os compostos mais promissores, para investigações intensivas em laboratório, podem agora ser executados por computador em questão de horas.

Outros tipos de companhias que dependem da síntese química também se voltaram para os gráficos moleculares para poder planejar melhor seus produtos — de herbicidas e filmes fotográficos até sabonetes e adoçantes. Um dos mais avançados sistemas de modelagem molecular existentes pertence ao gigante industrial Du Pont, que em meados da década de 1980 possuía terminais gráficos em seu departamento central de pesquisas para quem quisesse utilizá-los. Muitos pesquisadores da Du Pont possuem terminais até mesmo em suas casas. Um deles é David A. Pensak, chefe dos programas de inteligência artificial e modelagem molecular da companhia. Seu entusiasmo levou-o a encomendar um simulador de vôo especialmente confeccionado para ajudar outros pesquisadores da Du Pont a se tornarem igualmente atraídos pelos gráficos moleculares. “Conceitualmente falando, pousar um 747 numa pista de aterragem de um aeródromo não é diferente de pousar uma molécula sobre o local receptor de uma enzima no corpo”, diz ele.

### **UM MUNDO DE DETALHES DINÂMICOS**

De fato, é na simulação de vôo que a computação gráfica atinge seu mais alto nível de realismo e complexidade técnica. Embora os simuladores de vôo sejam utilizados no treinamento de pilotos civis, as versões mais elaboradas pertencem ao Exército dos Estados Unidos. Um piloto senta-se numa cabina, réplica exata da cabina da aeronave, e experimenta todas as visões e sons — e até mesmo movimentos físicos como a aceleração e a turbulência do ar — envolvidos numa missão.

Nas janelas frontais da cabina é projetado um panorama semelhante a uma imagem de TV, gerado por computador, onde aparece o que o piloto realmente veria naquela missão. Cada detalhe é elaborado com o maior grau de realismo possível — a intensidade das luzes da pista de aterragem piscando a distância ou a fumaça espiralada que sobe do tanque que o piloto acaba de destruir após arremessar contra ele foguetes fictícios. E, o que é mais importante, a visão é dinâmica: à medida que o piloto manobra o avião com o joystick e outros controles, o panora-

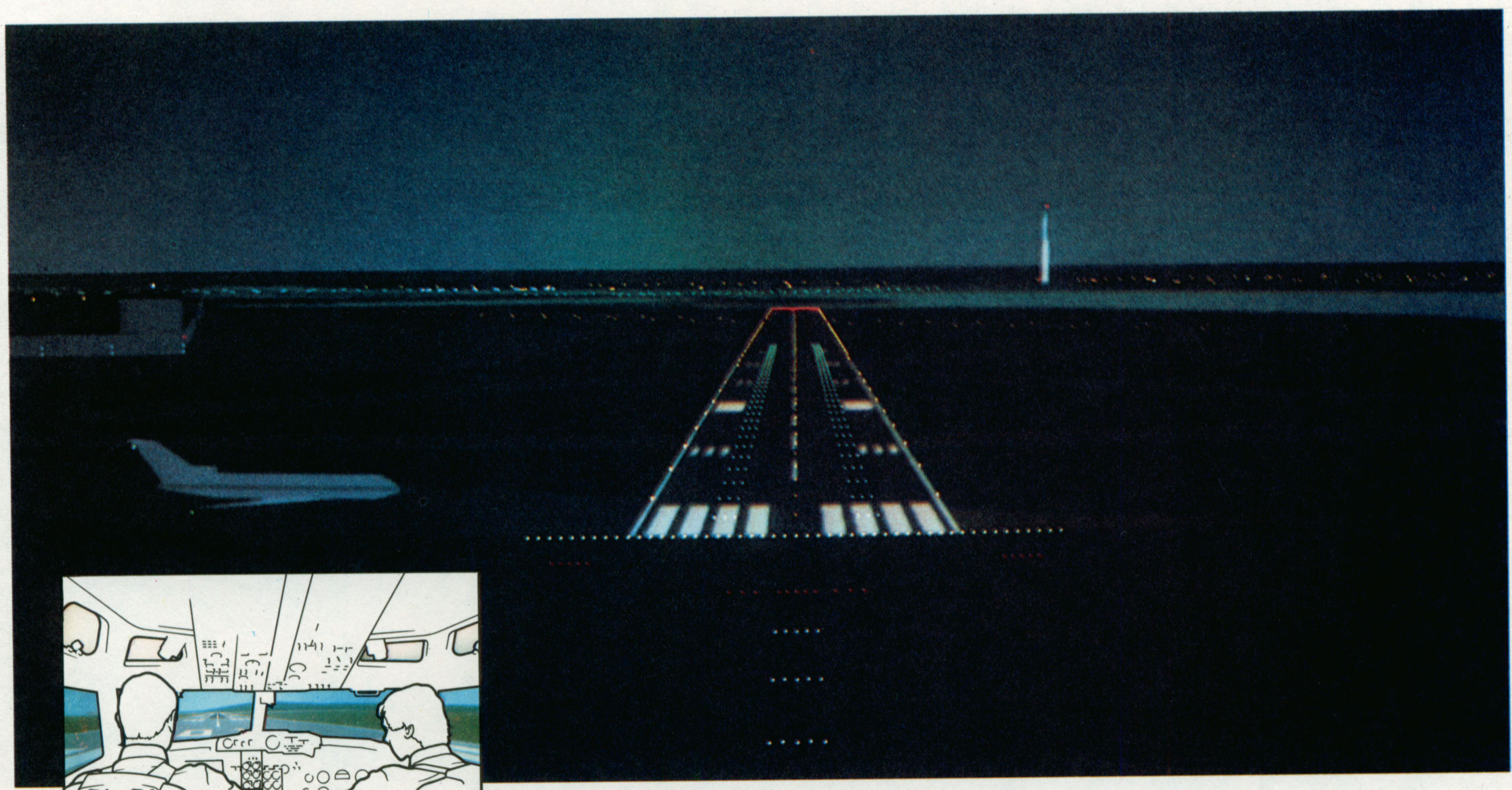
ma se altera em resposta às mudanças de altitude, velocidade e posição do avião. A visão também muda em resposta aos comandos do instrutor, que sentado diante de um painel de controle, longe do piloto, pode introduzir elementos-surpresa, tais como uma inesperada cortina de nevoeiro ou uma falha de funcionamento da aeronave.

Tal realismo torna-se possível graças a um software que desenha imagens baseadas num enorme banco de dados, com milhões de linhas de informações. Em meados da década de 1980, o maior banco de dados visuais do mundo, contidos no simulador da missão de transporte C-130, da General Electric, podia reproduzir panoramas que cobriam nada menos que 33 000 milhas marítimas quadradas ao redor da base da Força Aérea de Little Rock, em Arkansas.

A maior parte das imagens incluídas no banco de dados é digitalizada a partir de modelos em escala ou de fotografias de objetos tais como tanques e aviões, e também a partir de mapas topológicos da paisagem, que foram convertidos numa grade triaxial de coordenadas abrigando contornos do terreno. Novos programas, no entanto, também trazem, residentes, outras instruções, que incorporam características genéricas do terreno, como florestas e campos, igualmente passíveis de serem embelezadas com estradas, casas e outros elementos típicos.

Imagens armazenadas devem ser produzidas e mostradas a uma taxa de trinta a sessenta fotogramas por segundo a fim de impedir a cintilação e preservar a ilusão do movimento real. Desse modo, um único fotograma num simulador a tempo real tem de ser criado *on-line* — isto é, enquanto o simulador está funcionando —, em menos de 1/60 de segundo. Comparativamente, um fotograma usado para efeitos especiais em cinema é computado *off-line* e pode exigir horas de cálculos.

Pousos noturnos em aeroportos com difíceis padrões de aproximação podem desafiar até mesmo pilotos experientes. É por isso que os novatos praticam antes num simulador de voo. A última palavra em velocidade e potência gráfica, os simuladores de voo usam uma cabina realista (*detalhe*), bem como hardware e software para todos os fins, destinados a simular a experiência em pilotagem. A realimentação a partir dos controles da cabina faz com que as janelas do simulador mostrem um cenário em contínua mutação, exigindo que o computador calcule e exiba pelo menos trinta novas imagens tridimensionais sombreadas por segundo.



---

A chave para essa espantosa velocidade de simulação gráfica é o hardware, aperfeiçoado especialmente para a geração de imagens. Ele consiste numa série de processadores, organizados conforme uma disposição conhecida como arquitetura por "tubulações" (*pipeline*), que classifica os dados e os interpreta como imagens. As tubulações operam em paralelo, cada uma delas gerando um diferente segmento do panorama mostrado nas janelas da cabina.

Essa combinação de hardware e software mais avançados contribui poderosamente para o nocauteante custo dos simuladores de vôo militares. Um novo simulador para o Harrier AV8-B da Marinha custava 50 milhões de dólares; só o sistema visual equivalia à metade desse valor. Mas o uso de simuladores sai bem mais barato que o vôo real — isso sem levar em conta o fato de serem infinitamente mais seguros. Uma hora no simulador corresponde a cerca de um décimo do custo de uma hora no avião real. Quanto aos astronautas do Ônibus Espacial, cada um dos quais gasta mais de 8 000 horas num simulador, o vôo de treinamento numa missão real seria extremamente arriscado e dispendioso.

À medida que os custos tanto de hardware como de software se nivelam, os gráficos começam a descer do orgulhoso reinado dos computadores de grande porte e minicomputadores para o domínio cotidiano do microcomputador. Dentre as intrigantes possibilidades podem-se antecipar: simuladores pessoais, que ensinarão a dirigir um automóvel sem sair de casa; postos de trabalho de baixo custo, que possibilitarão aos entusiastas de filmes de realização caseira gerar seus próprios efeitos especiais; e manuais de consertos eletrônicos domésticos, nos quais o espectador simulará o conserto de seu carro antes de levá-lo a uma oficina real. Olhando ainda mais à frente, os líderes em pesquisas gráficas prevêem substituição da tela do computador por hologramas, tridimensionais, gerados a laser e tão realistas que o espectador pode passear através deles.

# Visões gráficas num meio eletrônico



Os avanços na computação gráfica sempre tiveram objetivos práticos — acelerar o projeto de automóveis eficientes em termos de consumo de combustível, manipular estruturas moleculares de medicamentos em fase experimental, fornecer aos médicos uma visão mais clara do cérebro humano. Porém, à medida que as técnicas gráficas ganham sofisticação, muitos programadores não resistem à tentação de usá-las para criar arte por conta própria. Mesmo trabalhando cotidianamente em poderosos computadores para produzir imagens de moléculas ou asteróides, alguns cientistas também passam suas noites e fins de semana nas mesmas máquinas, compondo imaginativas paisagens mentais.

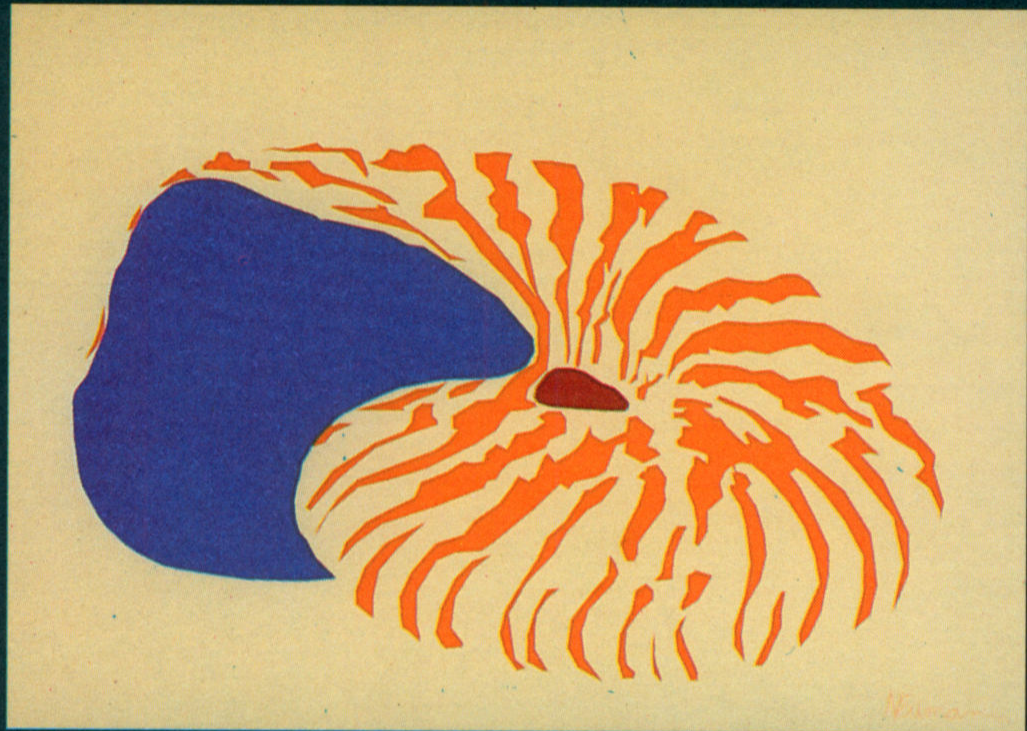
O mesmo caminho é seguido também por artistas de formação tradicional, mas que aprenderam a usar o computador, da mesma maneira que poderiam usar qualquer outro meio. Amostras representativas de suas criações aparecem nas páginas seguintes. Alguns artistas, como David Em (*páginas 50 e 51*) ou Mike Newman (*páginas 48 e 49*), produzem trabalhos artísticos para organizações científicas ou fabricantes de computadores e têm, por isso, a vantagem do fácil acesso a máquinas e software de alta potência. Nesta época pioneira em arte por computador, o software, memória e resolução disponíveis ao artista determinam em grande medida a natureza da imagem final. Por exemplo, a arte produzida por um programa de traçado de raios inclui muitos elementos típicos, como superfícies brilhantes e refletoras; mas, se a peça for executada num monitor de baixa resolução, tais superfícies terão bordas grossas e uma aparência granulada.

Muitos artistas de computador usam técnicas programáticas, não-interativas; isto é, criam figuras por intermédio de procedimentos matemáticos que só produzirão uma imagem final ao cabo de várias horas, ou até mesmo dias. Esses artistas consideram liberador o processo não-interativo, pelo fato de que muitas vezes produz, acidentalmente, imagens que são verdadeiros "achados". Outros artistas, no entanto, valorizam o computador como um instrumento artístico principalmente devido à sua interatividade — sua capacidade de mudar, apagar, armazenar e repetir figuras instantaneamente.





Imagens por Melvin Prueitt

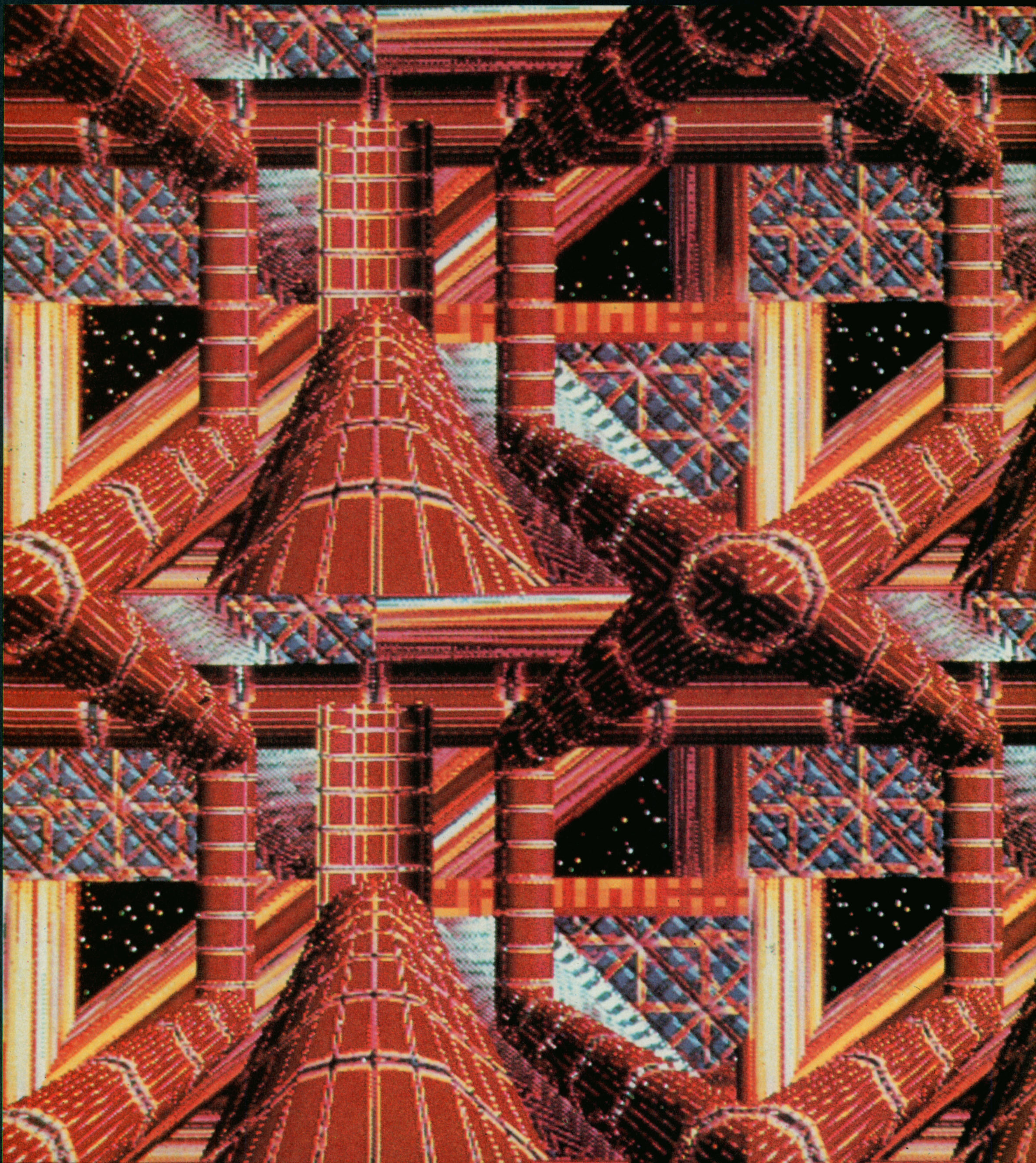


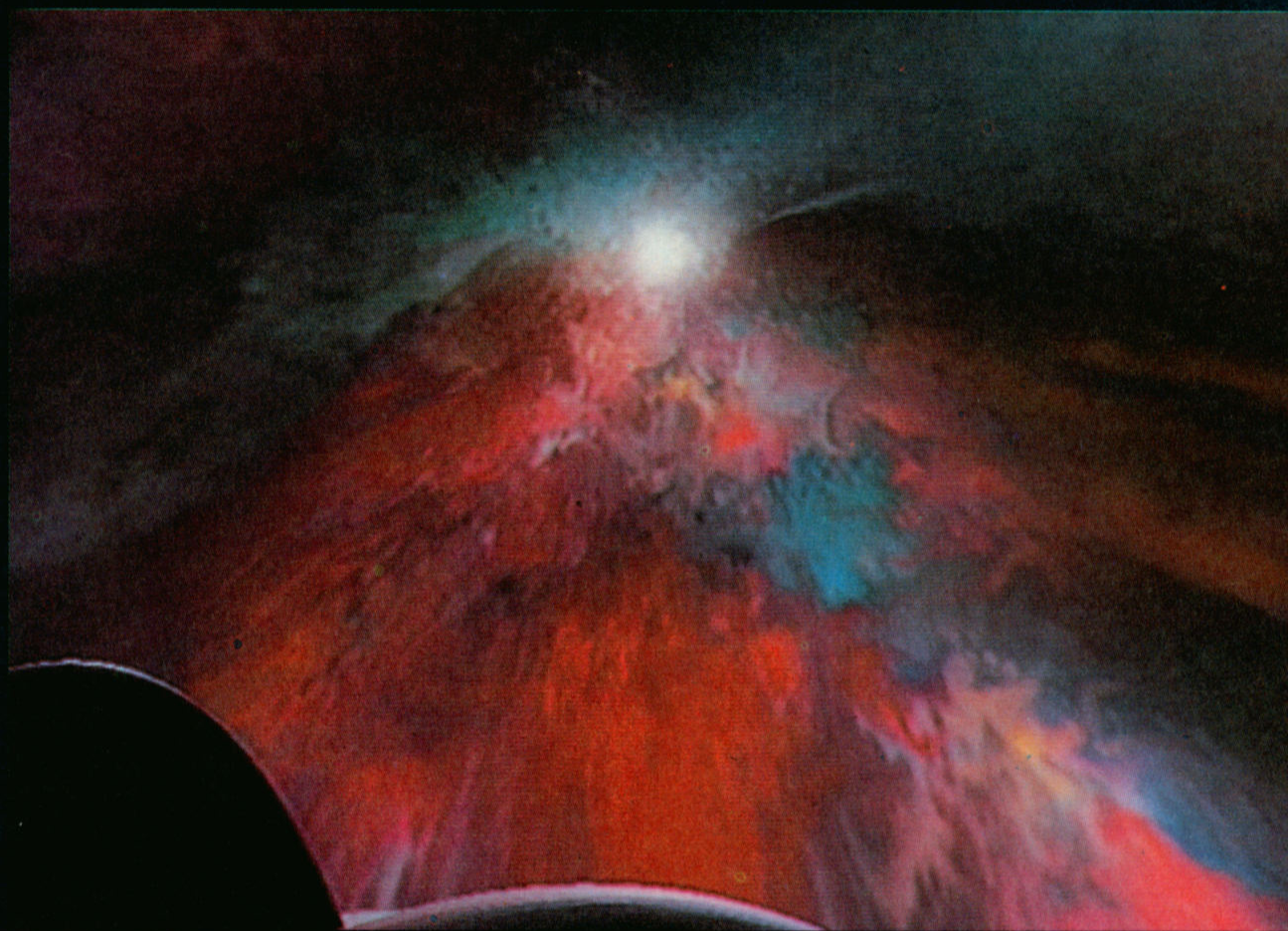
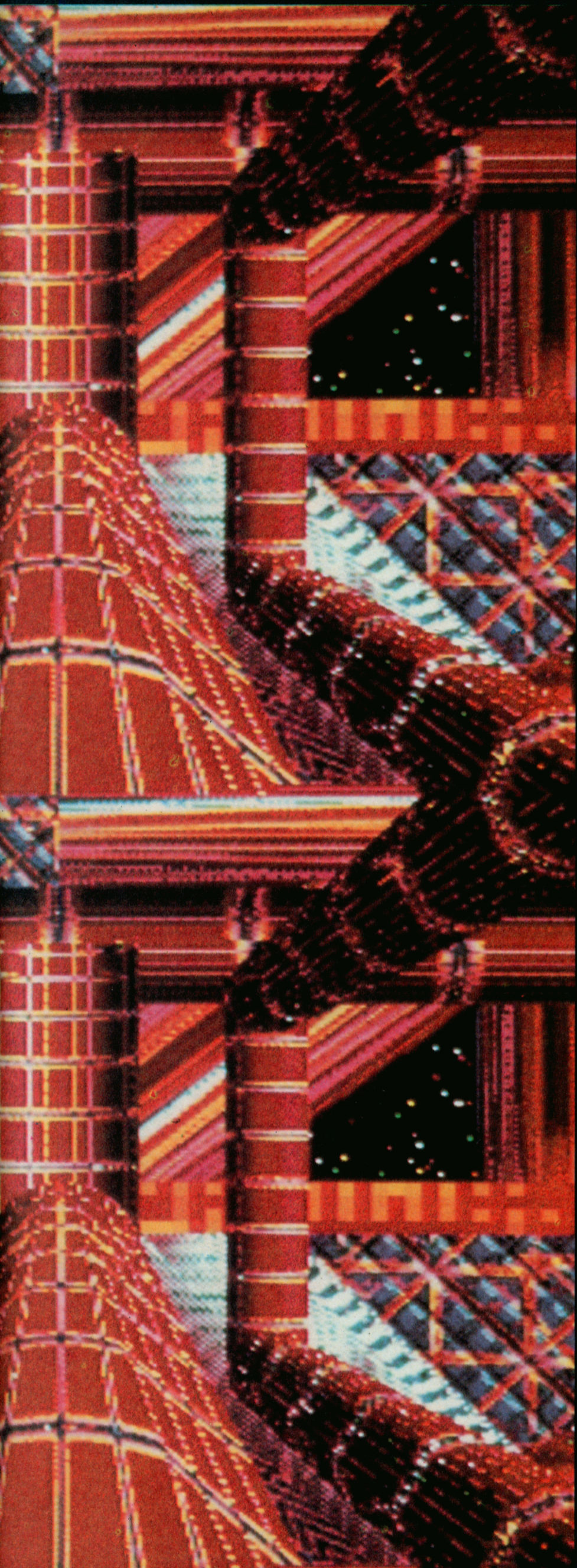
Imagens por Mike Newman





Neuman 83

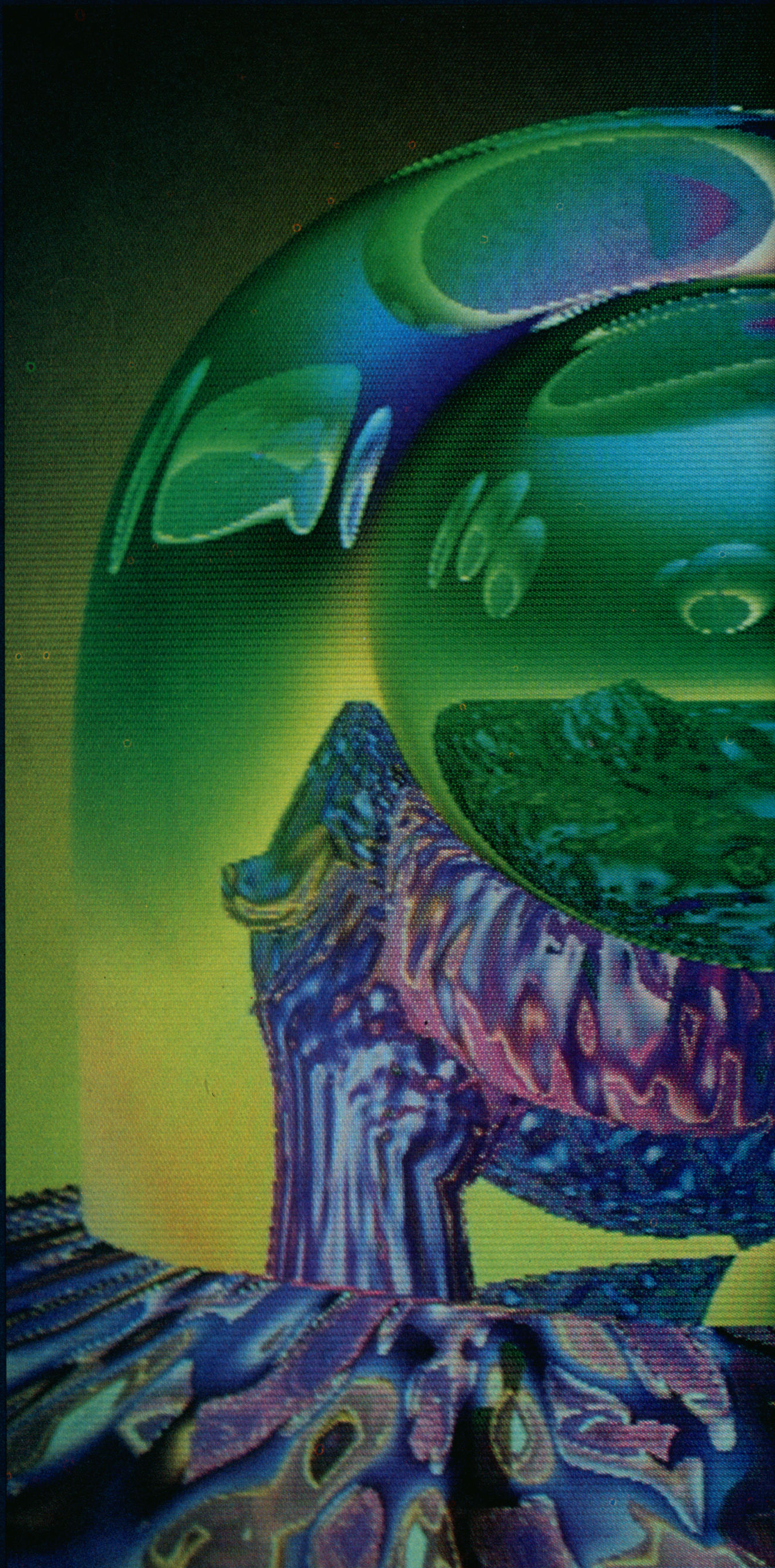


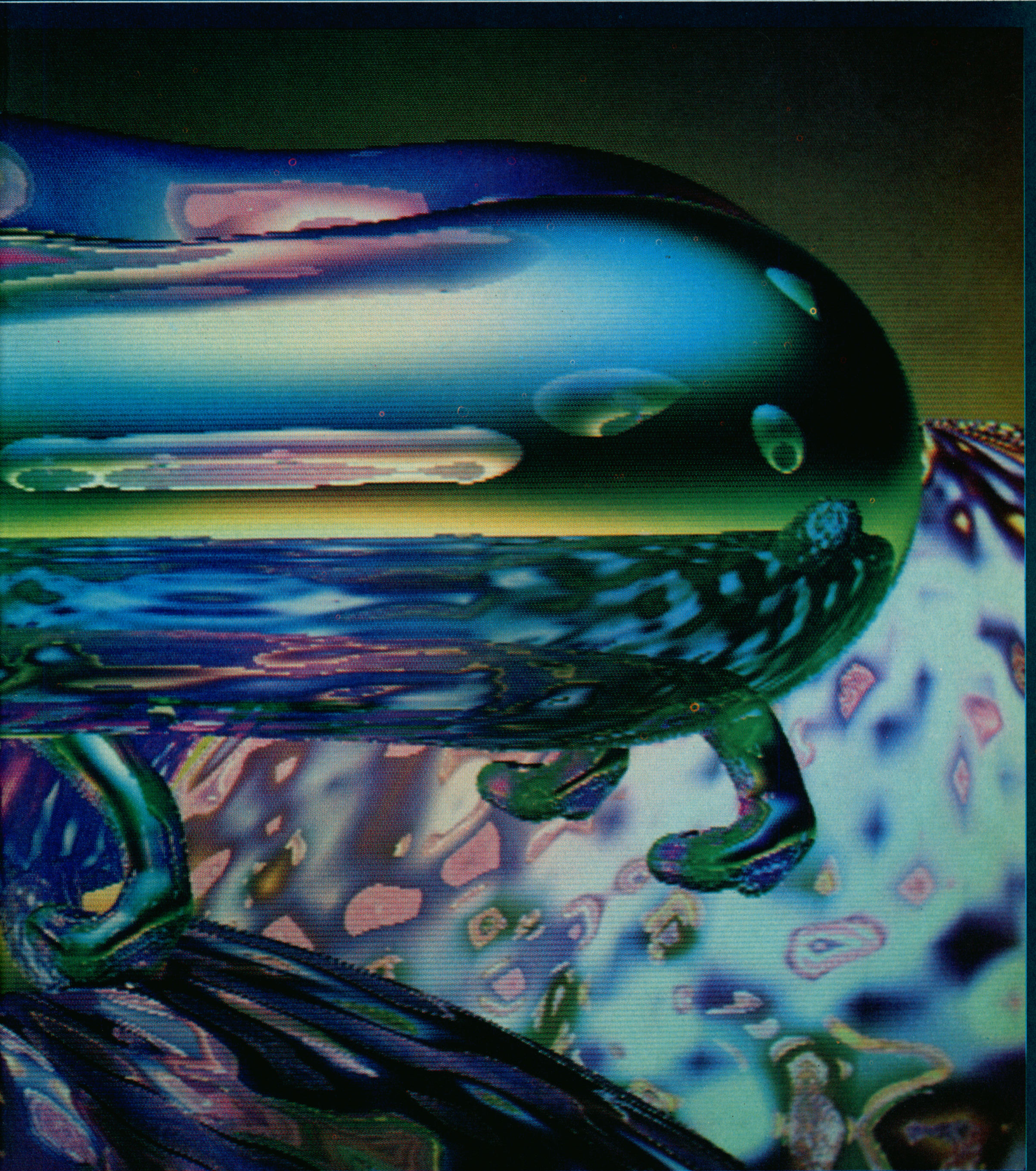


Imagens por David Em



Imagens por Yoichiro Kawaguchi







# Índice

Os números em *itálico* indicam uma ilustração do assunto mencionado.

## A

Aeroespacial, indústria: CIM 35-36; gráficos 36  
Animação auxiliada por computador 8-9, 18-19;  
humana 16-17. *Veja também* Filmes,  
Computação gráfica  
"Armação em arame", gráficos do tipo 14,  
22-24, 28, 32-33, 42  
Arquitetônicos, gráficos 21, 22, 28-29; plantas  
baixas 24-25; simulação de engenharia 25,  
26, 28  
Arquitetura por tubulações 44  
Arte por computador 45, 46-53;  
e interatividade 45  
Automobilística, indústria: CAD 33-35; CAE  
33-34; CAM 32, 37  
Aventuras de André & Wally B., As 19, 20

## B

Banchoff, Thomas 41  
Bioquímica 39, 42  
Biomecânica 31, 37-38  
Blanchard, Malcolm 20  
*Buraco Negro, O* 6, 7

## C

CAD/CAM 37. *Veja também* Desenho auxiliado  
por computador; Fabricação auxiliada por  
computador; Fabricação integrada por  
computador  
Catmull, Edwin 20  
Centro Médico da Universidade de  
Washington 36  
Chrysler 33  
Cobb, Ron 13-15, 18-19  
Cray, computadores 13-15, 18-20

## D

Demos, Gary 13-14  
Desenho auxiliado por computador (CAD) 21,  
30-31, 32-33; na indústria  
automobilística 32, 33, 34-35;  
na medicina 37. *Veja também*  
Arquitetônicos, gráficos  
Difrancesco, David 20  
Digital Effects Inc. 10  
Digital Productions 13-15  
Disney, Estúdios 6, 10, 12  
Du Pont 42

## E

Elin, Larry 10  
Em, David 45; imagens por 50-51  
Engenharia auxiliada por computador (CAE) 32;  
método do elemento finito (FEM) 34; na  
indústria automobilística 33-35; na medicina 37  
Exploradores CT 20, 36-37

## F

Fabricação auxiliada por computador (CAM) 32,  
35-36; na medicina 37. *Veja também*  
Fabricação integrada por computador  
Fabricação integrada por computador (CIM) 36  
Filmes, computação gráfica em 5, 6, 7, 10,  
11-12, 13, 14-15, 18-19, 20; animação  
auxiliada por computação 8-9  
Filmes e controle por computador 5-6  
Ford 33-35  
*Futureworld* 6

## G

General Electric 43  
Gerbag, Darcy 31  
Gráficos, banco de dados 15, 22, 24  
G. e diagramas 35  
*Guerra nas Estrelas* 6, 20

## H

Hospital for special Surgery 37

## I

Imagem gerada por computador (CGI) 6. *Veja  
também* Filmes, Computação gráfica  
Instituto de Tecnologia de Nova York 10, 20

## K

Kawaguchi, Yoichiro, imagens por 52-53  
Kocak, Huseyin 41  
Kushner, Donald 7, 10

## L

Lawrence Livermore National Laboratory 42  
Lisberger, Steven 7, 10, 12  
Lorimar Inc. 13-14  
Lucasfilm 20  
Lucas, George 20

## M

MAGI (Mathematical Applications Group Inc.)  
10-11  
Marsh, Jeffrey 36-37  
Matemática, pesquisa 40-41  
McDonnell Douglas 36  
Medicina, computação gráfica na 20, 36, 37;  
cirurgia simulada 31, 37; e biomecânica  
37-38; e bioquímica 39, 42; e próteses 36, 37  
Método do elemento finito (FEM) 34  
Microcomputadores 44; e gráficos 44  
Modelagem 6, 10-11, 14-15; de sólidos 6; geometria  
sólida construtiva 10; procedimentos de 19  
Molecular, modelagem 39, 42  
Monitores eletrostáticos 22

## N

Newman, Mike 45; imagens por 48-49

## P

Pensak, David A. 42  
PET (tomografia e emissão de pósitros),  
explorações 20  
Pixar 20  
Prótese e computadores 36, 37  
Prueitt, Melvin, imagens por 46-47

## R

Reyes 20  
Robert Abel & Associates 10  
Roberts, Thomas 34

## S

Scripps, Clínica 42  
Seireg, Ali 31, 37-38  
Simuladores de voo 42, 43, 44  
Sísmicos, gráficos 20  
Skidmore, Owings & Merrill, desenho auxiliado  
por computador pela 21, 22-29  
Smith, Alvy 20  
SynthaVision 10-11

## T

Taylor, Richard 5, 10, 13  
Televisão, computação gráfica na 13, 19  
Triple I (Information International Inc.) 10-13  
TRON 5, 6, 7, 10-11, 12-13  
Tejeda-Flores, Miguel 13

## U

*Último guerreiro das estrelas, O* 13, 14-15, 19

## V

Vannier, Michael 36-37

## W

*Westworld* 6  
Whitney Jr., John 13-14  
Whitney Sr., John 6  
Wilhite, Tom 7, 10

**EDITOR**  
RICHARD CIVITA



**NOVA CULTURAL**

*Presidente:* Flávio Barros Pinto

*Diretoria:* Anselmo Pecci,  
Pierluigi Bracco, Plácido  
Nicoletto, Walter Thomé

**REDAÇÃO**

*Diretor:* Carmo Chagas  
*Editora Executiva:* Stefania Crema

**COMERCIAL**

*Diretor:* Plácido Nicoletto  
*Gerente Comercial:* Joaquim Celestino da Silva  
*Gerente de Circulação:* Denise Mozol  
*Gerente de Propaganda e Promoções:* José Carlos Mádio  
*Gerente de Pesquisa e Análise de Mercado:* Wagner M.  
P. Nabuco de Araújo

**PRODUÇÃO EDITORIAL**

Pedro Paulo Poppovic Consultores Editoriais S/C Ltda.

*Diretor:* Pedro Paulo Poppovic

*Editora-chefe:* Elzira Arantes

*Editora:* Elisabeth Justino Carastan

*Arte:* Massumi Guibu (chefe), Sônia Regina Aversa (diagramadora)

*Projeto gráfico (capa):* OZ Desenho e Associados

*Coordenação de produção:* Sônia Maria Pimentel

*Colaboradores:* Mathias Mendes Wolff (consultoria), Newton Roberval Eichenberg (tradução), Paula Siqueira (preparação)

A Editora Nova Cultural Ltda. é uma empresa do Grupo CLC — Comunicações, Lazer e Cultura.

**Presidente:** Richard Civita

**Diretoria:** Flávio Barros Pinto, João Gomez, Menahem M. Politi, Renê C. X. Santos, Stélio Alves Campos

**TIME-LIFE BOOKS INC.**

**DIRETOR DA SÉRIE:** Roberta Conlan

*Programador visual:* Ellen Robling

*Editor associado (ilustrações):* Robert G. Mason

*Coordenador da série:* Caroline A. Boubin

*Pesquisadores:* Ellise Ritter Gibson, Sara Mark, Barbara Moir, Marta A. Sanchez, Judith W. Shanks

*Editores de texto:* Russell B. Adams Jr., Donald Davison Cantlay

*Assistente de programação visual:* Robert K. Herndon

*Coordenador de revisão:* Anthony K. Pordes

*Coordenador iconográfico:* Renée DeSandies

*Colaboradores especiais (texto):* Ronald H. Bailey, Sarah Brash, Michael Kurland, Charles C. Smith, Marlene Zimmerman

**CONSULTORES**

ISABEL LIDA NIRENBERG trabalha no Computer Center da Universidade Estadual de Nova York.

UTA C. MERZBACH, matemático especializado na história da ciência; Curador do Smithsonian Institution's National Museum, desde 1963.

RICHARD MURRAY, professor assistente de Ciência da Computação no Union College, em Schenectady, Nova York.

**Créditos das fotos**

Os créditos das fotos e ilustrações estão separados da esquerda para a direita por ponto-e-vírgula, e de cima para baixo por travessões.

Capa: Skidmore, Owings & Merrill, desenvolvido por Beacon Companies. 4, 5: Lucasfilm Computer Graphics Division. 6: © 1982 Walt Disney Productions. 8, 9: Lance Williams/New York Institute of Technology. 11: © 1982 Walt Disney Productions. 12: MAGI SynthaVision, Inc. 14: Digital Scene Simulation (sm) by Digital Productions, Los Angeles, © Copyright 1984. All rights reserved; © 1984 Universal/Lorimar joint venture. All rights reserved. Cortesia de MCA Publishing Rights, uma divisão da MCA Inc. 15: Digital Scene Simulation (sm) by Digital Productions, Los Angeles, © Copyright 1984. All right reserved. 16, 17: David Zelter, "Motor Control Techniques for Figure Animation", *IEEE Computer Graphics and Applications*, © 1982 IEEE; David Zelter/MIT. 18: Susan Van Baerle e Doug Kingsbury, Computer Graphics Research Group, Ohio State, University. 19: Lucasfilm Computer Graphics Division. 21: Skidmore, Owings & Merrill, desenvolvido por Beacon Companies. 22, 23: Skidmore, Owings & Merrill. 24, 25: Skidmore, Owings & Merrill, desenvolvido por Paylor e Mathis. 26-29: Skidmore, Owings & Merrill, desenvolvido por Beacon Companies. 30, 31: © 1985 Darcy Gerberg/MAGI SynthaVision, Inc. 33: Daimler-Benz, Stuttgart. 35: Stanley L. Grotch/Lawrence Livermore National Laboratory. 36: Contour Medical Systems. 39: Nelson L. Max, © 1983 by the Regents of the University of California. 40, 41: David Margolis, fotógrafo/criação de Huseyin Kocak, Frederic Bisshopp, Thomas Banchoff e David Laidlaw/Brown University. 43: Evans & Sutherland, detalhe Rediffusion Simulation, Inc., overlay by Walter Hilmers Jr., HJ Commercial Art. 45: Yoichiro Kawaguchi, Tóquio. 46, 47: © 1985 Melvin L. Prueitt Motion Picture Group/Los Alamos National Laboratory; © 1983 Melvin L. Prueitt Motion Picture Group/Los Alamos National Laboratory. 48, 49: Mike Newman/DICOMED Corporation. 50, 51: © David Em. 52, 53: Yoichiro Kawaguchi, Tóquio.







