

Concepção e análise de sistema estrutural de membrana em 3DS Max e SAP2000 / Conception and analysis of structural system of membrane in 3DS Max and SAP2000

Juarez Moara Santos Franco. / Mestrando do Programa de Pós-graduação em Arquitetura e Urbanismo / Universidade Federal da Bahia / Brasil / juarezfranco_arquiteto@hotmail.com / **Luciana Silva Salgado** / Mestranda do Instituto de Matemática/ Universidade Federal da Bahia/ Brasil / lusalgado76@yahoo.com.br

Abstract This paper presents the limitations and the potentialities of the joint job of the programs **3DS MAX** and **SAP2000** in the conception and analysis of structural system of **membrane**. The modeling for method of the dependent surfaces of curves NURBS was compared with surfaces defined for mathematical expressions in **3DS MAX**; the creative potentialities of the clones, the stacks of modifiers and extension **MATH MAX** had been collated with the restrictions of project, as well as presented data-exchange procedures for simulation of efforts in **SAP2000**

Introdução Este artigo compara desempenho de estruturas de membrana modeladas por parametrização e por superfícies NURBS em 3DS MAX e SAP2000. Primeiro, estruturas semelhantes foram modeladas por parametrização e por superfícies NURBS; depois, o comportamento estrutural destes modelos foi analisado em SAP2000. Os resultados demonstraram metodologias produzindo membranas de desempenho equivalente, cujas diferenças se concentram no controle de entrada de dados. As superfícies NURBS mostraram avanços formais frente à modelagem paramétrica. O estudo se restringiu aos aplicativos gráficos, suas limitações e potencialidades, não sendo efetuado o balizamento empírico do comportamento estrutural de quaisquer das proposições.

Condicionantes de projeto Uma estrutura é determinada pela matéria que a constitui e pelo seu sistema estrutural, definido pela geometria e fluxo de recepção, transmissão e descarga de forças. Os sistemas estruturais são classificados em cinco famílias de acordo com estas características (Engel,2006): forma ativa, vetor ativo, seção ativa, altura ativa e superfície ativa (duas dimensões dos componentes se destacam em relação à terceira), que se subdivide em placas, placas dobradas e casca. O sistema de casca desvia as forças que atuam sobre ele em direção paralela à sua superfície, na qual ocorrem esforços meridionais, anulares e

normais. Se os esforços normais à superfície forem anulados, a sessão útil é significativamente reduzida. A este caso particular chama-se membrana, e é para sua modelagem geométrica digital e análise estrutural que desenvolvemos este artigo.

O sistema de membrana deve atender a dois requisitos: continuidade estrutural em dois eixos e projeto correto da forma (representado graficamente pelas funiculares), classicamente atendido em soluções do tipo linear, curva simples, cúpula e sela. Empiricamente, a funicular consiste em suspender um cabo por suas extremidades e submetê-lo ao carregamento análogo ao de uma seção vertical da membrana. Sem resistência à flexão, ele é solicitado somente à tração, reproduzindo tanto a funicular de forças quanto o gráfico de momento fletor para aquela solicitação. A membrana, portanto, pode ser parametrizada como um gráfico tridimensional de momento fletor e deste modo ser modelada em 3DS Max.

MathMax As membranas não estão entre as primitivas parametrizadas do pacote básico do 3DS Max. Para criar e editar estas superfícies especiais sem recorrer à programação, o usuário da ferramenta dispõe da extensão Math Max, disponível gratuitamente no site de seus autores (<http://www.cuneytozdaz.com>). Com ela controla-se a expressão matemática de membranas na forma explícita ou paramétrica, em coordenadas esférica ou cartesiana.



São sabidos os seis tipos elementares de carregamento e suas respectivas funiculares. Para modelar membranas em 3DS Max é necessário deduzir a equação do momento fletor para cada condição geral de carregamento (Margarido,2001) e transcrevê-los para Math MAX.

Tabla 1 Geometria de carregamentos e funiculares (Engel,2006).

Carregamento	Funicular
Carga concentrada	Triângulo isósceles
Carga pontual simétrica	Trapézio isósceles
Carga uniforme linear	Catenária
Carga uniforme linear e horizontal	Parábola
Carga linear crescendo lateralmente	Elipse
Cargas atuando radialmente	Círculo

A figura 01 representa o gráfico tridimensional de momento fletor: (a) e (c) foram escritas na forma explícita e descarregam esforços em quatro pontos de apoio; (b) e (d) foram expressos na forma paramétrica e descarregam esforços sobre um anel de borda horizontal. (a) e (b) expressam momento fletor para carga uniforme linear e horizontal, (c) e (d) somam este carregamento a uma carga pontual.

Tabla 2 Geometria de carregamentos e funiculares (Engel,2006).

Momento fletor para carga linear horizontal uniforme:
 $M_x = (q/2)(L^2x - x^2)$
 Math Max
 Forma explícita, um eixo:
 $(q/2)(L^2X - L^2X^2)$
 Parâmetros: L= vão livre; q= carga distribuída
 Forma explícita, dois eixos:
 $(q/2)(L^2X - L^2X^2) + (q/2)(L^2Y - L^2Y^2)$
 Parâmetros: L=vão livre; q=carga distribuída; $0 < X < 1$; $0 < Y < 1$
 Forma paramétrica
 $X = u^*(L/2)*\cos(v)$
 $Y = u^*(L/2)*\sin(v)$
 $Z = -(q^*L^2*u^2)/2 + q^*L^2/8$
 Parâmetros: L= vão livre; q= carga distribuída; $0 < v < 360$; $0 < u < 1$

Esta metodologia é útil na descrição de membranas que devem obedecer a um repertório limitado variando apenas em função da combinação de carregamentos. As funiculares de esforços combinados são encontradas pela soma de suas expressões ao longo de Z. Expressões da forma explícita permitem somar diferentes esforços ao longo de X e Y.

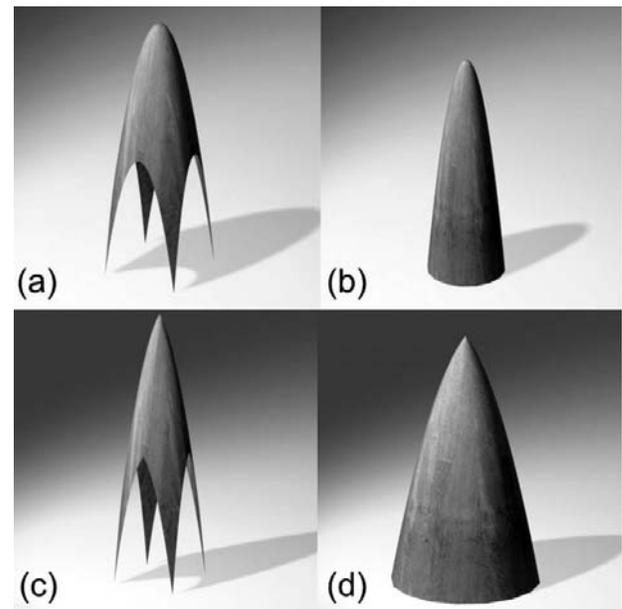


Figura 1 , "modelagem paramétrica"

Momento fletor para combinação de carga linear horizontal uniforme e carga pontual:
 $M_x = (q/2)(L^2x - x^2) + P^*x/2$ se $x < L/2$
 $M_x = (q/2)(L^2x - x^2) + P(L-x)/2$ se $x > L/2$
 Math Max
 Forma explícita, dois eixos
 $(q/2)(L^2X - L^2X^2) + (q/2)(L^2Y - L^2Y^2) + \text{if}(X < 0.5, P^*L^*X/2, P^*L^*(1-X)/2) + \text{if}(Y < 0.5, P^*L^*Y/2, P^*L^*(1-Y)/2)$
 parâmetros: L= vão livre; q= carga distribuída; P= carga pontual; $0 < X < 1$; $0 < Y < 1$
 Forma paramétrica
 $X = u^*(L/2)*\cos(v)$
 $Y = u^*(L/2)*\sin(v)$
 $Z = -(q^*L^2*u^2)/2 + q^*L^2/8 + P^*L^*(1-u)/2 - P^*L/4$
 Parâmetros: L= vão livre; q= carga distribuída; $0 < v < 360$; $0 < u < 1$



Esta metodologia de modelagem permite edição precisa, mas oferece um repertório de primitivas pouco variado. O esforço analítico necessário para soluções de casos mais específicos de projeto envolve conhecimentos avançados de geometria diferencial e mecânica, um esforço dispendioso se comparado à modelagem NURBS.

Superfícies NURBS As superfícies dependentes de curvas definidas por vértices de controle B-Splines não uniformes racionais são conhecidas como superfícies NURBS (Conci,2003). As curvas são chamadas B-Spline por derivarem das curvas Spline, com a vantagem de permitir o ajuste localizado do modelo; são ditas não uniformes por terem os vetores que controlam seus nós distribuídos a intervalos irregulares e “racionais” por serem definidas pela razão de polinômios. O procedimento de modelagem é inverso ao Math Max: enquanto na modelagem paramétrica as expressões matemáticas geram output na interface gráfica, em NURBS a criação e edição é feita diretamente sobre os vértices de controle, conhecendo-se as implicações desta interação sobre o polinômio que exprime a curva. Se o grau do polinômio de uma curva NURBS fosse determinado em função da quantidade de vértices de controle, poderíamos associar esta curva a uma equação de momento fletor de mesmo grau, o que não ocorre. O projetista deve conhecer a funicular adequada, inclusive em casos mais difíceis de esforços combinados e proceder visualmente a aproximações. Facilmente se confunde uma curva NURBS de grau indefinido com a geratriz de um parabolóide.

Na figura abaixo são propostas alternativas para uma situação onde os pontos de descarga estão localizados em cotas diferentes. Para um projetista em fase de estudo preliminar, parametrizar como função de momento fletor seria trabalhoso na solução trivial e praticamente impossível no segundo caso.

Apesar de formalmente distintas, as proposições obedecem às mesmas condicionantes de projeto: continuidade estrutural em dois eixos e anéis de borda que aproximadamente correspondem a funicular de forças para o caso de carregamento linear horizontal e uniforme. A superfície decorrente da interpolação destas curvas mantém suas propriedades e ambas correspondem ao desempenho estrutural de membrana.

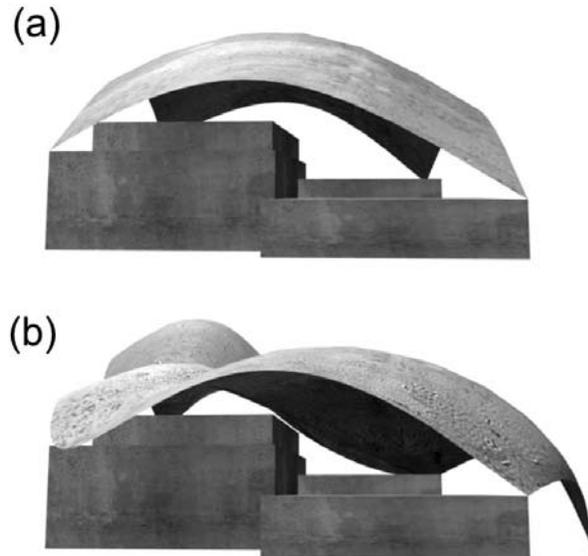


Figura 2 “modelagem NURBS”

Apesar de suas imprecisões esta abordagem é um processo mais fluido e intuitivo de trabalho, onde a concepção alcança complexidade muito maior que o método de parametrização. O objetivo destes exercícios foram superfícies em que não ocorrem esforços normais. Se a restrição fosse ignorada e o sistema fosse compreendido como estrutura de casca, as possibilidades da extensão Math Max seriam expandidas, alterando a comparação em termos de limitação do repertório formal.

Instanciamento e modificadores

As superfícies parametrizadas e as NURBS obedecem ao princípio do instanciamento, segundo o qual composições complexas são formadas pelo agrupamento de cópias do mesmo objeto, editáveis simultaneamente a partir de qualquer de suas instâncias. É um recurso fundamental na concepção de estruturas com componentes que se repetem em 3DS Max tanto pela velocidade que imprime ao trabalho quanto pela economia de memória: a translação de um único vértice de controle afeta múltiplos componentes do sistema. Infelizmente, a discretização exigida pelo método de elementos finitos do SAP 2000 não se beneficia desta economia.

Modificadores, recursos comuns a todos os sistemas de modelagem, tornam exequíveis algumas



proposições que de outro modo seriam muito difíceis de realizar. Agem sobre a estrutura geométrica do objeto, possibilitando aplicar uma quantidade ilimitada de modificadores, editar parametricamente cada aplicação e retirá-los de uma superfície de membrana na qual foram aplicados, de maneira que ela retorne a sua forma original. O emprego de pilhas de modificadores alia os recursos mais lúdicos de parametrização à flexibilidade de superfícies NURBS, resultando em produtos que expressam processos criativos dotados de maior espontaneidade. Na próxima figura é ilustrada a seqüência de modelagem em quatro passos de uma composição que demonstra as possibilidades formais do uso de NURBS, cópias instanciadas e modificadores parametrizados.

A despeito da deformação a que foram submetidas as primitivas, o conjunto permanece harmônico e os componentes ainda se comportam como membranas (as bordas foram consideradas rígidas), como revela a análise em SAP 2000.

Análise Estrutural A validação das estruturas de membrana modeladas em 3DS Max foi realizada pelo software de análise estrutural SAP 2000. A aquisição de dados pela ferramenta é feita diretamente na interface gráfica do programa, através de matrizes escritas na extensão S2K ou pela importação de arquivos DXF, procedimento pelo qual se dá o intercâmbio de dados entre os dois programas deste estudo. O SAP 2000 trabalha com um sistema de correspondência, associando um tipo de primitiva do arquivo DXF a um tipo de componente estrutural, conforme tabela a seguir.

As superfícies NURBS e as parametrizadas do 3DS Max são interpretadas como polyfaces mesh ao serem exportadas em DXF, não sendo reconhecidas diretamente pelo SAP 2000. Para convertê-las em 3Dfaces, as superfícies devem ser importadas em AutoCAD, associadas a uma camada que só comporte o mesmo tipo de primitiva, submetidas a ferramenta “explode” e exportadas em DXF na versão AutoCAD R12 (a versão AutoCAD 2008 exporta neste formato). Ao serem importadas em SAP 2000, as 3Dfaces são interpretadas como “Shell”, mas ao simular os esforços o usuário pode escolher entre o comportamento de casca ou membrana.

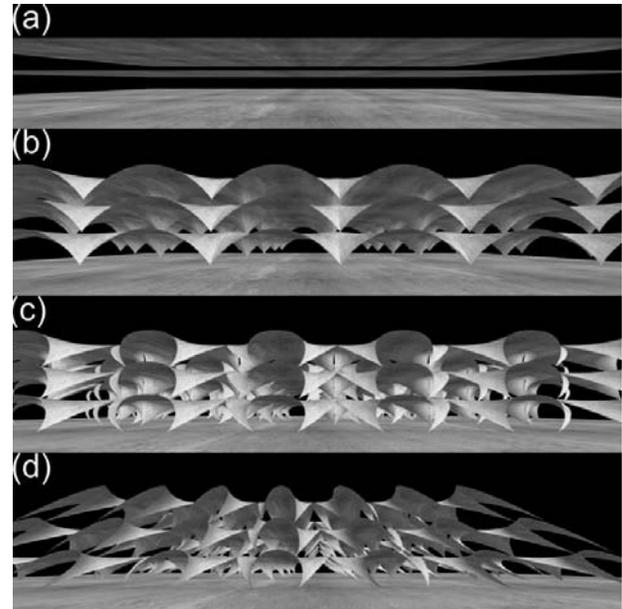


Figura 3 “instanciamento e modificadores”

A figura 04-(a) apresenta a simulação de esforços na abóbada sobre arcos ogivais. A forma decorre de modelagem paramétrica, e ainda assim ocorrem esforços normais devido à descontinuidade entre os momentos de distribuição e descarga dos esforços meridionais. A ausência de variações tonais em 04-(e) indica que o sistema foi estabilizado e funciona como membrana. O auxílio da parametrização por equação de momento fletor não se mostrou condição suficiente neste exemplo para garantir o desempenho como membrana. A mesma

Tabla 3 correspondência entre DXF e SAP 2000 (Tutorial SAP2000)

Elementos do SAP2000	Elementos do DXF
Grid	Lines
Special Joints	Points
Frames	Lines
NL Links 1	Noded Points
NL Links 2	Noded Lines
Shells	3Dfaces
Elementos planos	Polyline de 3 a 8 lados
Asolids	Polyline de 3 a 8 lados
Solids	Sólidos que não sejam 3Dsolids e Meshes de polylines



superfície que isoladamente funcionou como casca em 04-(a), como componente do sistema em 04-(e) trabalhou como membrana porque nas “naves transversais” não ocorrem esforços anulares e a transmissão dos esforços meridionais até o solo não é interrompida pelas aberturas laterais, de forma que os esforços normais se anulam quando cada abóbada ogival estabiliza os anéis de borda da superfície central.

As superfícies NURBS e as parametrizadas se mostraram adequadas para o projeto de membranas, obedecidas as devidas restrições. As figuras 04-(b) e 04-(f) mostram proposições triviais do tipo sela em modelos equivalentes de superfícies parametrizadas e NURBS. As propostas de superfícies que descarregam seus esforços sobre pontos em cotas diferentes demonstram que mesmo soluções mais audazes como 04-(c)-(g) e 04-(d)-(h) podem ser concebidas e analisadas como membrana. Nestes exemplos, as bordas formam informadas como estáveis para o SAP 2000.

Conclusões e desdobramentos

Mesmo superfícies com propriedades supostamente pre-

visíveis podem surpreender o projetista, que deve se valer de ferramentas CAE nos primeiros momentos de criação para validar suas proposições. As superfícies NURBS são capazes de modelar estruturas de membrana para condições mais específicas de projeto do que as superfícies parametrizadas devido à edição localizada de vértices de controle, e a análise de estruturas em SAP 2000 mostrou-se um recurso valioso nesta metodologia.

O projetista pode, graças ao uso conjunto destas ferramentas, estabelecer um diálogo direto entre a arquitetura e o comportamento estrutural de suas concepções, reduzindo o custo decorrente de uma decisão ao adotar soluções com seções estruturais menores, o que se consegue por ajustes na geometria de um sistema de casca ou por sua associação como componente de um sistema maior para que trabalhe como membrana. A modelagem se beneficia amplamente das curvas NURBS, do instanciamento e dos modeladores.

Esta experiência descreveu procedimentos relativos a um tipo particular de sistema estrutural de casca, na qual não ocorre esforço normal à superfície. Seus

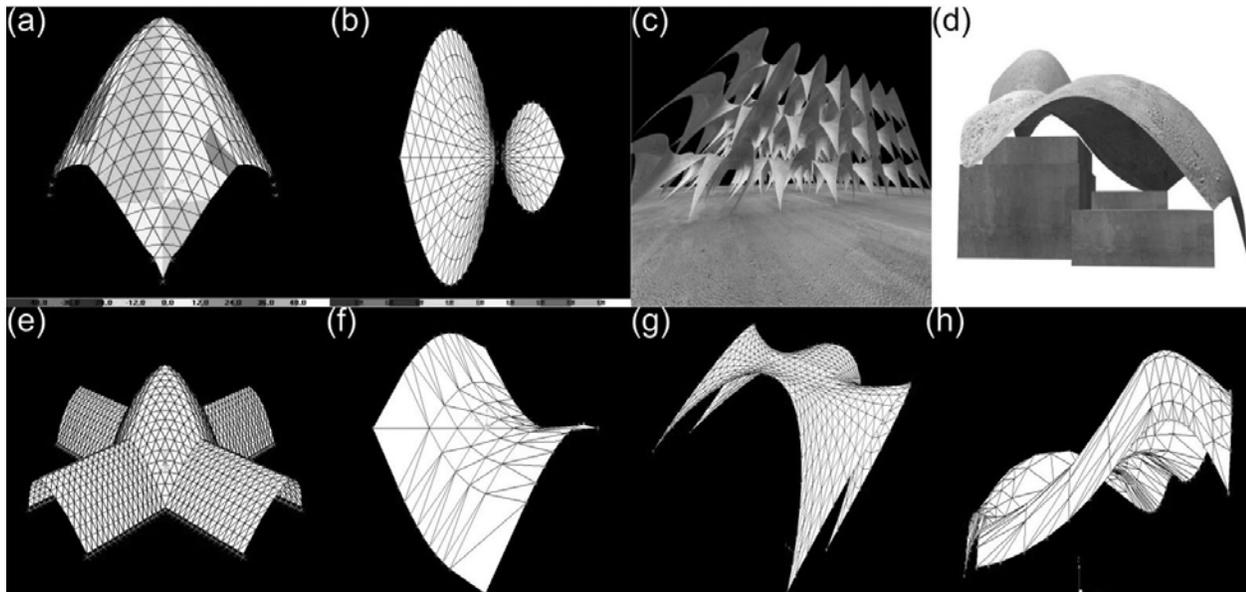


Figura 4 “simulação de esforços”



desdobramentos devem abarcar outros sistemas de estrutura, a experimentação com materiais distintos do concreto especificado como default no SAP2000, bem como aspectos construtivos, verificação empírica e as implicações destas propostas sobre o ciclo de vida das edificações.

Referencias Conci, A.:2003, **Computação Gráfica**, editora **Campus**, Rio de Janeiro. Engel, Heino. : 2006, **Sistemas Estruturais**, editorial Gustavo Gili, Barcelona. Margarido, A. F.: 2001, **Fundamentos de Estruturas**, editora Zigurate, São Paulo. Tutorial do SAP2000 versão 7.12

Keywords CAE, Membrane, 3DS Max, Math Max, SAP 2000.

