



SELEÇÃO DE MATERIAL E SIMULAÇÃO DO DIAFRAGMA DE CÉLULA DE CARGA

PAULO FRANCISCO DO CARMO

Instituto Federal de Educação Ciência e Tecnologia Catarinense - Campus Blumenau
Rua Bernardino José Oliveira, 81 - Badenfurt
CEP: 89070-270 - Blumenau - Santa Catarina - Brasil

(Recibido 28 de diciembre de 2011, para publicación 14 de abril de 2012)

Resumen – A seleção de materiais e a simulação gráfica de superfícies estão presentes em todas as áreas. Na seleção de materiais estão desde os projetos mais simples como um simples equipamento de fixação até modernos de equipamentos para viagens espaciais. No caso da simulação gráfica podemos encontrá-la nos jogos eletrônicos de um celular e na medicina, onde a criação de imagens de órgãos internos ao corpo humano possibilita o diagnóstico de males que em outros tempos, somente seria possível com intervenções cirúrgicas complicadas e comprometedoras. Assim, a seleção de materiais e a simulação gráfica de superfícies dão suporte a experimentações e as possibilidades como movimento, interatividade e comutação. Este trabalho tem como objetivo selecionar material e a simulação do diafragma de célula de carga usando o software MatLab. É fornecida uma visão geral das técnicas de modelação de superfícies aplicadas na representação gráfica, bem como seus conceitos básicos e processo de seleção de materiais. O trabalho está estruturado em estudo específico possibilitando a análise do proposto. Pode-se concluir com este trabalho que a seleção de material e a simulação gráfica de superfícies digitais apresentam uma forte interação com cálculo, desenho geométrico, simulação computacional auxiliando e contribuindo com os profissionais projetistas.

Palavras-chaves – Seleção de material, célula de carga, simulação computacional, diafragma circular.

1. INTRODUÇÃO

No contexto atual da indústria mundial, como efeito da globalização, a utilização de diversas técnicas e métodos computacionais para a solução dos mais variados problemas de engenharia tem sido uma constante. Dentre estas técnicas computacionais, merece destaque a utilização da computação gráfica.

A computação gráfica possibilita a visualização em 2D e 3D de inúmeros problemas como de engenharia, por exemplo, de forma rápida, prática e eficiente. Outro importantíssimo campo dentro da computação gráfica é a visualização de dados através de gráficos. Ela consiste, basicamente, na geração de imagens a partir de um conjunto de dados. Estes dados podem ser gerados ou de forma interativa, ou por modelos que simulam um fenômeno real como, por exemplo, o comportamento de partículas durante uma reação química.

Segundo a International Standards Organization – ISO – a computação gráfica pode ser definida como o conjunto de métodos e técnicas utilizados para converter dados em um dispositivo gráfico, via computador.

Se tomarmos como base a definição da ISO, duas áreas têm uma estreita relação com a computação gráfica. São elas [1]:

- Processamento de Imagens: envolve técnicas de transformação de imagens. As transformações visam, em geral, melhorar características visuais da imagem como, por exemplo, aumentar o contraste, melhorar o foco ou ainda reduzir o ruído e eventuais distorções.

- Reconhecimento de Padrões: também conhecida como análise de imagens, busca isolar e identificar os componentes de uma imagem a partir de sua representação visual.

O diagrama da Fig. 1 ilustra o relacionamento entre a computação gráfica, o processamento de imagens, o reconhecimento de padrões e o processamento de dados convencional, segundo a visão da ISO, [1].

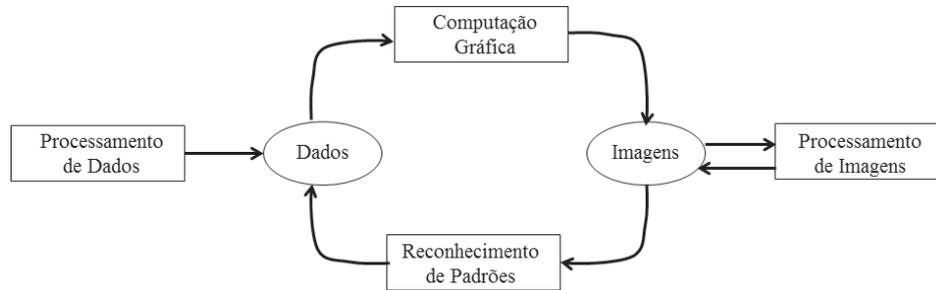


Fig. 1. Relacionamento da computação gráfica com outras áreas [1].

A computação gráfica é uma área cuja importância vem crescendo com o passar do tempo, graças às imagens e representações gráficas que pode produzir. Estas imagens e representações estão se tornando cada vez mais importantes dentro dos contextos de análise de problemas, buscas de soluções e transmissão de informação [2].

Um dos problemas passíveis de solução com o emprego de técnicas de computação gráfica é referente à representação gráfica de superfície usando a modelagem digital.

A representação gráfica de uma superfície no computador é indispensável à elaboração e criação da sua modelagem digital. A superfície pode estar representada por equações analíticas ou uma rede (grade) de pontos, de modo a transmitir ao usuário suas características espaciais [3].

Para a modelagem digital pode ser representada por uma rede de pontos (malha quadrada, retangular, triangular) a qual pode estar distribuída de forma aleatória ou ordenada. A elaboração e criação da modelagem digital são fundamentais para a representação gráfica da superfície, podendo ser realizada através de equações matemáticas [4].

Dentre as aplicações de interface com o usuário e entre a representação gráfica e a modelagem digital, têm-se [1]: Traçado interativo de gráficos e visualização; editoração eletrônica; CAD; simulação computacional; animação; arte e comércio; controle/visualização de processos; cartografia.

Dentro desse contexto, o MatLab é um programa que vem sendo largamente empregado, por se tratar de uma poderosa ferramenta de simulação computacional o qual pode ser utilizado em inúmeras disciplinas.

Com base nesses pressupostos, busca-se neste trabalho apresentar, por simulação computacional, a representação gráfica de superfícies utilizando-se equações matemáticas.

O problema de apresentar a simulação computacional de superfícies está na expectativa do profissional de engenharia em manipular os conhecimentos técnicos e específicos da área de interesse e na diversidade de softwares disponíveis para a modelagem digital.

Desta forma, o objetivo deste trabalho é apresentar o modelo, o tipo de classe e a representação gráfica digital da superfície circular do diafragma da célula de carga, por simulação computacional, usando o software MatLab.

O desenvolvimento deste trabalho é fundamentado em [5] para procedimento sistemático de coleta e análise dos dados, e apoio em [6,7,8], caracterizando-se em investigação científica do tipo descritivo-analítica, de natureza qualitativa, e tendo como método de procedimento o estudo de caso.

Neste estudo, são abordados aspectos teóricos relacionados à simulação computacional, representação gráfica e modelagem digital.

A coleta e análise das informações para a realização desta investigação tiveram como base livros, artigos científicos e trabalhos acadêmicos.

A reflexão e o estudo a partir dos conteúdos analisados permitiram estabelecer a problemática de estudo, configurando o planejamento e toda a operacionalização das atividades de estudo, resultando em estudo de caso.

Salienta-se que o procedimento usado neste trabalho foi o estudo de caso, o que se prenderá a uma simulação computacional. O estudo de caso se preocupa com algo singular, que tenha valor em si mesmo,

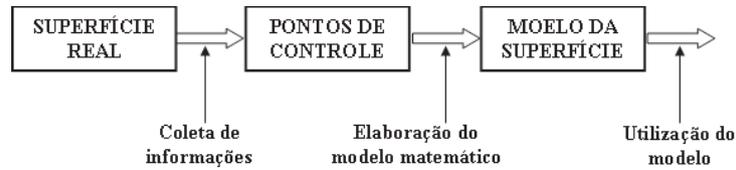


Fig. 2. O processo de modelação de uma superfície [2].

sendo que um caso, mesmo similar a outro, é distinto, tendo em vista que o interesse do estudo recairá, exatamente, sobre o aspecto único, particular, que ele apresenta.

2. ESTADO DA ARTE DA MODELAGEM DIGITAL

A modelagem digital é uma representação matemática da distribuição espacial da característica de um fenômeno, vinculada a uma superfície real. A superfície é, em geral, contínua e o fenômeno que representa pode ser variado. Para a representação de uma superfície real no computador, é indispensável à criação de um modelo digital, podendo ser: por equações matemáticas analíticas, ou por uma rede de pontos na forma de uma grade de pontos regulares e/ou irregulares. A partir dos modelos podem-se calcular volumes, áreas, desenhar perfis e seções transversais, gerar imagens e perspectivas tridimensionais [9].

Em praticamente todas as ciências e campos de atuação da engenharia, existe a necessidade de se apresentar superfícies por modelagem digital de interesse; analítica, por meio de equações, ou numericamente, por um conjunto de valores amostrados, sendo necessária a sua representação gráfica expressando seu comportamento sob forma de curvas ou mesmo perspectivas [3].

Qualquer que seja a superfície, o processo de estudo se dá a partir de observações físicas para determinar o modelo para que seja tratada analiticamente, reproduzindo da melhor forma possível a superfície. Conforme o rigor com que for conduzida a operação de modelação, se obterão modelos com diferentes graus de exatidão, necessitando assim a utilização de computadores, devido ao volume e complexidade dos cálculos. Pode-se, até, se tornar impossível a construção de modelos com as qualidades necessárias [2].

O estudo do comportamento das superfícies normalmente é efetuado por modelos matemáticos, pois estes são representações idealizadas a fidelidade com que reproduzem o comportamento da superfície que se deseja modelar, como uma função direta do esforço dispendido em sua construção.

O processo de modelação de uma superfície Fig. 2, utilizando computadores envolve três etapas: coleta de informação que caracteriza o comportamento da superfície, elaboração de um modelo matemático composto por estruturas de dados e função de interpolação que simule o comportamento da superfície e utilização do modelo em substituição à superfície original [2].

A coleta de informação consiste na amostragem de um dado número de pontos sobre a superfície em estudo. Estes pontos devem possuir conteúdo informativo que representem o comportamento da superfície original, chamados de pontos de controle.

A distribuição dos pontos pode ser regular ou não regular. Na distribuição de pontos regulares, reina a distribuição em forma de matriz, onde os pontos estão dispostos em linha e coluna perpendiculares entre si. Para a distribuição não regular não há nenhuma lei de formação dos mesmos, sendo que um observador menos atento consideraria esta distribuição como aleatória [2].

Para a distribuição de pontos regulares é apenas no processo de amostragem, sendo completamente aleatória do ponto de vista das características estruturais da superfície [10, 11].

A elaboração do modelo matemático da superfície consiste no agrupamento dos pontos de controle em unidades lógicas, denominadas estruturas de dados, e na determinação de funções de interpolação, de forma que todo este conjunto simule, de modo idealizado, o comportamento da superfície original no uso de computador. Os pontos de controle são interligados, formando polígonos, e estes formam um poliedro, e assim, a superfície é aproximada por um modelo que é um poliedro, cujos vértices são os pontos de controle previamente amostrados [2].



Fig. 3. Diferentes classes de modelos [12].



Fig. 4. Representação gráfica com curvas isovalor e perspectivas [12, 2].

De acordo com a distribuição dos pontos de controle, podem-se ter diferentes classes de poliedros. Caso a amostragem seja efetuada de modo não regular, os pontos serão unidos formando triângulos, e se a amostragem for regular os pontos serão então unidos formando um retângulo [12] Fig. 3.

Na Fig. 3(a), tem-se a primeira classe de modelos, denominado de grade triangular ou triangulação e a segunda Fig. 3(b), grade retangular.

A utilização do modelo compreende a manipulação de seu conteúdo, visando obter os mais diversos tipos de informação. O que se pode fazer diretamente com a superfície original podem ser feito com seu modelo. Operações de cálculo como de volume e representação gráfica podem ser realizadas sem muitos esforços e com elevado grau de precisão [2].

Dois tipos das mais usuais representações gráficas de curvas isovalor e perspectivas são apresentados na Fig. 4 [12, 2].

As curvas isovalor são linhas que conectam pontos de mesma altura da superfície. As perspectivas são obtidas por meio do desenho, em perspectiva e do poliedro que compõe o modelo da superfície. No entanto, é possível representar em perspectiva tanto modelos compostos por poliedro de faces triangulares quanto retangulares.

2.1. Construção de modelos

A modelagem propriamente dita envolve a criação de estruturas de dados e a definição de superfícies de ajuste para os elementos dessas estruturas. O objetivo é a obtenção de uma função definida em toda a região de estudo. Essa função nem sempre é contínua e diferenciável para todos os pontos de seu domínio espacial. Os modelos podem ser globais ou locais. Os modelos globais são representados por uma função definida utilizando-se todos os elementos do conjunto de amostras. Os modelos locais utilizam funções, cujos coeficientes são definidos por elementos amostrais escolhidos dentro de uma região local de interesse. Essas regiões locais podem ser definidas por raios de influência ou por quantidade de amostras vizinhas. O processo de modelagem utiliza estruturas de grades para representar a informação de elevação sobre a superfície do fenômeno. A Fig. 5 apresenta um exemplo de superfície no espaço tridimensional XYZ [12].

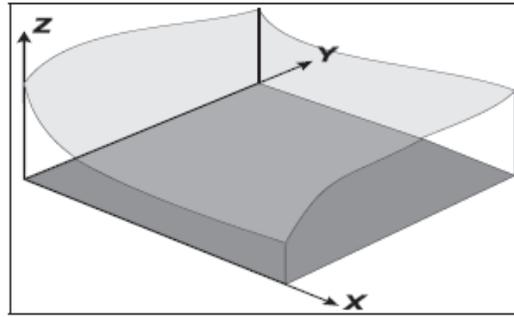


Fig. 5. Superfície representada no espaço tridimensional XYZ [12].

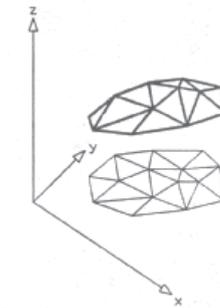


Fig. 6. Triangulação plana e sua projeção no plano XY [2].



Fig. 7. Pontos interiores e pontos exteriores [2].

Na construção de modelos digitais de superfície, é preciso iniciar o processo de amostragem de pontos de controle por sobre a superfície de estudo. Considerando que a distribuição dos pontos de controle é irregular, parte-se, então, para a construção de modelo de triangulação e grade retangular, diretamente a partir dos pontos de controle.

2.1.1. Triangulação

A triangulação é um modelo digital que aproxima superfícies por meio de um poliedro de faces triangulares, sendo que os vértices destes triângulos são os pontos de controle previamente amostrados. Embora o modelo digital seja tridimensional, é usual trabalhar com triangulação utilizando apenas sua projeção no plano horizontal, que é uma simplificação onde o modelo não sofre alterações, reduzindo de modo significativo a complexidade dos algoritmos envolvidos. A Fig. 6 apresenta a triangulação e sua projeção no plano XY [2].

Os pontos de controle pertencentes à triangulação dividem-se em pontos interiores que são totalmente rodeados por triângulos e os exteriores, rodeados apenas parcialmente. Os exteriores estão sempre unidos dois a dois formando uma linha poligonal fechada que contém em seu interior a região da superfície em que a modelagem digital será efetuada. Esta região fechada recebe o nome de região de interesse [12].

A Fig. 7 apresenta os pontos interiores, exteriores e a fronteira da região de interesse [2].

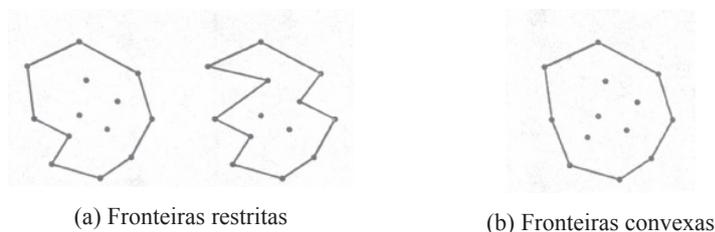


Fig. 8. Diferentes regiões de interesse [2].

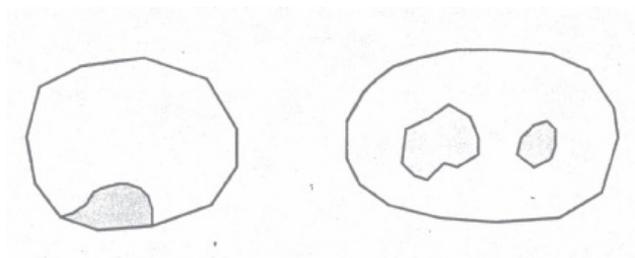


Fig. 9. Áreas sem amostragens e a fronteira convexa [2].

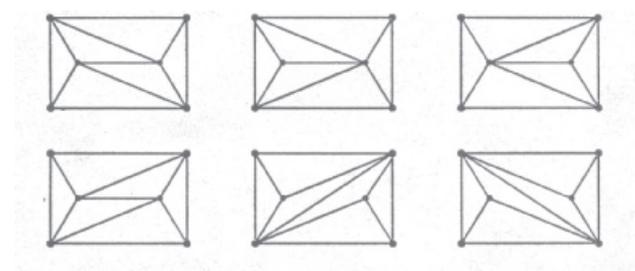


Fig. 10 Diferentes triangulações para os mesmos pontos [2].

Primeiramente se delimita a região de interesse para a construção de triangulação. Como mostra a Fig. 8, pela própria natureza do problema, verifica-se que não existe uma única região de fronteira, mas um número elevado de diferentes regiões de interesse [2].

De todas as diferentes regiões, apenas uma é um polígono convexo. Este polígono único recebe o nome de fronteira convexa e os demais polígonos recebem o nome de fronteira restrita. Como mostra a Fig. 9 apesar de incluir em seu interior áreas sem qualquer amostragem, a fronteira convexa é a única utilizada para delimitar a região de interesse e a própria triangulação [2].

O primeiro algoritmo para construção convexa foi proposto por [13], que determinou um conjunto de n pontos no plano em um tempo máximo. Com o novo algoritmo desenvolvido por [15], estendeu o resultado para três dimensões, estabelecendo a máxima complexidade computacional para este problema. A demonstração de que é possível determinar a fronteira convexa de um conjunto de n pontos em um espaço bi ou tri dimensional em um tempo médio linear é dado por [16].

Assim que se delimita a região de interesse, é preciso unir os pontos de controle dois a dois formando triângulos componentes da triangulação. Tal fato parece ser simples, mas tem certa complexidade na realidade.

A Fig. 10 apresenta diferentes triangulações de um conjunto de pontos não únicos dependendo da quantidade de pontos interiores e exteriores.

Certamente, nem todas estas diferentes triangulações prestam-se igualmente bem para a tarefa de modelação de uma superfície. O comportamento de uma superfície em um determinado ponto depende do comportamento dos pontos vizinhos, devendo-se, então, escolher uma triangulação em que os segmentos unindo os diversos pontos de controle não sejam excessivamente longos.

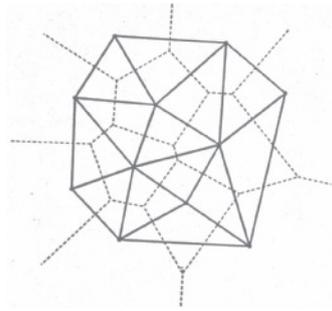


Fig. 11. Triangulação de Delaunay [2].

A triangulação de Delaunay é o conjunto de todos os segmentos de reta unindo pontos contíguos, formando um agrupamento de triângulos – triangulação – que cobre toda a região do plano interna à fronteira convexa dos pontos de controle como mostra a Fig. 11 [2].

A construção da triangulação de Delaunay pode ser efetuada por duas classes distintas de algoritmos: construção direta e construção por otimização. A descrição das duas construções da triangulação de Delaunay pode ser pesquisada em [12].

2.1.2. Grade retangular

A grade retangular é um modelo que aproxima superfícies por meio de um poliedro de faces retangulares. Os vértices destes retângulos tanto podem ser os pontos de controle, caso estes tenham sido amostrados de modo regular, quanto ser obtidos por meio de procedimento de interpolação, caso os pontos tenham sido amostrados de modo não regular [2, 12].

Um dos aspectos mais importantes da grade retangular é o cuidado necessário para determinar o espaçamento horizontal e vertical de seus elementos. Um valor de espaçamento excessivamente pequeno pode proporcionar um aumento na fidelidade da modelação apenas em regiões de comportamento irregular, nada tendo a oferecer nas de comportamento regular. Quando um valor for exageradamente grande pode haver diminuição significativa do tempo de processamento, à custa de perda de fidelidade em todas as regiões de comportamento irregular. Apesar da sua restrição, este fato é amplamente utilizado [17, 18, 19].

Existem diversas razões para justificar a preferência da grade retangular sobre a triangulação. A principal razão do uso da grade retangular é que é o método mais antigo e que, conseqüentemente, foi implementado há mais tempo. No entanto, sua evolução não pode vir acompanhada por uma incompatibilidade de versões anteriores. Não é tarefa simples gerar a triangulação de Delaunay. A quantidade e a complexidade das estruturas de dados necessárias criam barreiras iniciais a sua implementação. O mais frequente é utilizar a grade retangular, quanto aos aspectos de produção de representações gráficas, em função da melhor qualidade estética que proporciona aos desenhos [2].

Dependendo do tipo de representação gráfica, pode-se utilizar o modelo que melhor se adapta a situação.

2.1.3. Métodos globais e locais de interpolação

A modelação de superfície não termina após a construção de um modelo poliédrico. A triangulação e a grade retangular devem vir acompanhadas de funções de interpolação – interpolantes – adequadas.

As grades retangulares e triangulares são obtidas por interpolação espacial a partir de uma amostra de dados. Interpolação espacial é um procedimento que tem por finalidade estimar valores de pontos desconhecidos a partir de pontos conhecidos, dentro de uma área previamente delimitada. Entenda-se “ponto” como uma feição geométrica identificada por suas coordenadas, num sistema cartesiano perfeitamente definido [20].

Os interpoladores globais envolvem toda a amostra para a estimativa. São normalmente empregados para análise exploratória, citando-se como exemplo os modelos de regressão e as superfícies de tendência.

Os interpoladores devem ser utilizados para a construção do modelo retangular, somente quando os pontos de controle forem amostrados de forma regular. Os interpoladores utilizados para refinamento do modelo são aplicados tanto à triangulação quanto a grade regular [2].

O comportamento de uma superfície contínua pode ser derivado do comportamento conhecido em posições próximas, qualquer que seja a categoria do interpolador. Este consiste na determinação a partir de certas condições de contorno. A idéia de posições próximas necessita ser mais bem quantificada, convencionando-se de globais os processos de interpolação que utilizam vizinhanças limitadas, e os demais processos são chamados de locais.

No método global, o interpolador é dependente de todos os pontos de controle, sendo que a inclusão, a retirada ou a alteração das coordenadas de qualquer ponto propagam-se por toda a região de interesse. Os métodos globais utilizam fatores multiplicativos que normalizam a influência ou o peso de todos os pontos envolvidos [2,12,20].

No método local, geralmente, assume-se que os efeitos de alteração em qualquer dos pontos de controle só fará efeito dentro de uma vizinhança restrita ao local de interpolação. O ponto crucial deste método reside na determinação adequada dos limites desta vizinhança [2,12,20].

A comparação entre métodos globais e locais de interpolação não é simples. Suas características e escopo de aplicação nem sempre coincidem, e não existe unanimidade quanto aos critérios de aplicação. Desta forma, são usados os seguintes critérios: precisão, aspecto visual, sensibilidade, tempo de processamento, memória alocada, facilidade de implementação [2].

Como dito anteriormente, não existe um consenso na aplicação do método melhor e mais adequado para todos os casos, sendo que as referências consultadas defendem cada qual o seu método e propõem variações.

Definições, conceituações e aplicações dos critérios podem ser consultadas com mais detalhes em [2,12,20].

2.2. Traçado e representações gráficas

O traçado de representações gráficas é efetuado através do desenho dos elementos constituintes do modelo digital de uma superfície ou de outros elementos dele derivados.

As representações gráficas são agrupadas em duas classes distintas: as de caráter quantitativo, que permitem efetuar medições diretamente sobre o desenho (curvas isovalor) e as de caráter qualitativo, que fornecem uma indicação do comportamento da superfície (perspectivas).

2.2.1. Curvas de isovalor

As curvas isovalor são curvas que unem entre si todos os pontos de uma superfície que tenham a mesma altura. Estas curvas, também denominadas de curvas de nível, podem ser visualizadas como sendo a projeção do plano XY das interseções entre a superfície e uma família de planos horizontais equidistantes. A Fig. 12 apresenta o modelo de curvas isovalor [2].

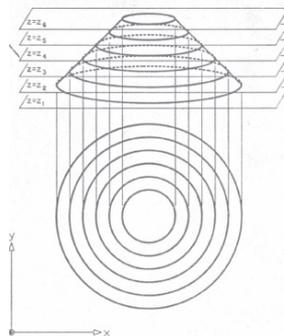


Fig. 12. Modelo de curvas isovalor [2].

Todas as curvas isovalor são fechadas, menos as curvas que interceptam a fronteira da região de interesse. Uma propriedade interessante dessas curvas isovalor é o fato destas jamais se cruzarem, devido ao método de interpolação que aproxima as superfícies [12].

É fácil verificar que um desenho contendo curvas isovalor fornece informações de caráter quantitativo. Medidas de inclinação ou até mesmo cálculo de área e volume podem ser efetuados diretamente de modo rápido e suficientemente preciso através dessas curvas [2,4,12,20].

O traçado do conjunto de curvas isovalor de uma superfície pode ser feito de modo automático, partindo tanto de uma triangulação, quanto de uma grade retangular. São usados basicamente dois métodos [2,12]:

- **método de rastreamento**: este método efetua uma busca seqüencial em todas as células, triângulos ou retângulos do modelo digital para determinar o início de uma curva isovalor. Após esta determinação inicial, a curva é rastreada célula após célula, até se encontrar a fronteira da região de interesse ou do contrário, voltar ao ponto de partida. Somente após a finalização do processamento de uma dada curva é que se vai buscar a próxima.

- **método das células**: este método procura determinar e desenhar os trechos de todas as curvas isovalor compreendidos dentro de uma única célula do modelo digital. Após o processamento desta célula, parte-se para o processamento seqüencial das demais células do modelo.

Comparações dos métodos, visualizações das interseções, comportamentos das curvas isovalor, subdivisão das células de um modelo digital e efeitos da estética da curva isovalor, consultar [2].

2.2.2. Perspectivas

As representações em perspectiva consistem na projeção em perspectiva do poliedro constituinte do modelo digital de uma superfície. As perspectivas contêm apenas informações de natureza qualitativa. Embora não permitam medidas de cálculos diretos, as perspectivas produzem uma representação mais fidedigna da superfície.

Os desenhos em perspectivas são criados por meio da representação gráfica das arestas componentes das faces do retângulo de um modelo digital, tal como mostra a Fig. 13, [2].

Para a representação em perspectiva, produzida pelo modelo de uma superfície, é necessário mapear cada ponto de cada aresta do modelo para um plano de desenho. O mapeamento é efetuado por funções de projeção plana, determinando a interseção entre o conjunto de linhas denominado projetor, passando por cada ponto do modelo e um plano de projeção [12].

As linhas projetoras emanam de um único ponto conhecido como centro de projeção, coincidente com o observador que esteja olhando para a superfície a projetar. Quando o centro de projeção está a uma distância finita da superfície, as linhas projetoras não são paralelas e a projeção obtida é denominada projeção perspectiva ou cônica. Quando o centro de projeção estiver no infinito, as linhas projetoras são paralelas e a projeção obtida é denominada projeção paralela ou cilíndrica [2].

A solução do problema implica em como determinar quais arestas são visíveis e quais são invisíveis. O problema da invisibilidade é resolvido pela classe de métodos conhecidos como algoritmos das linhas invisíveis. Estudos desta aplicação podem ser encontrados em [2,12].

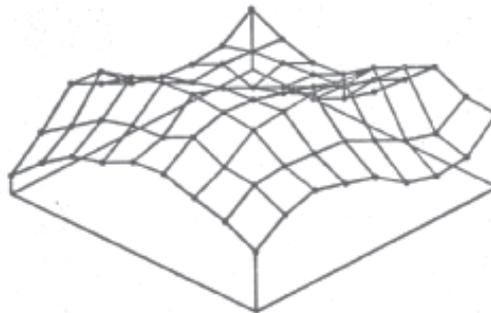


Fig. 13. Representação em perspectiva de um modelo [12].

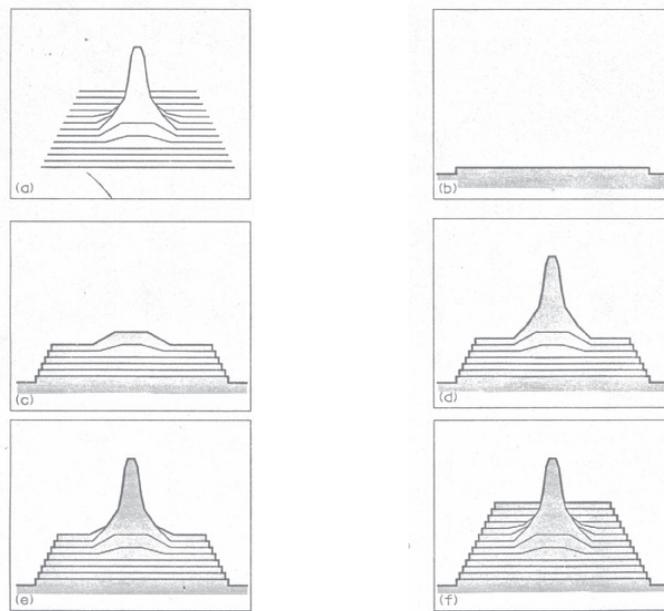


Fig. 14. Métodos de construção de um desenho em perspectiva [2].

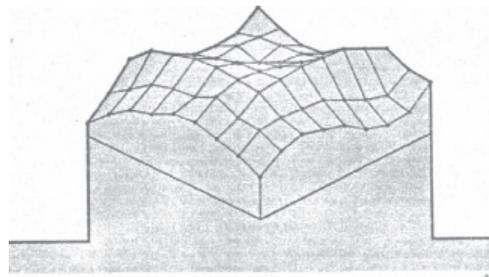


Fig. 15. Desenho em perspectiva genérico [2].

A Fig. 14 ilustra como pode ser resolvido o problema da invisibilidade, através de uma superfície que deve ser aproximada por uma família de linhas cuja projeção sobre o plano XY seja paralela ao eixo X , Fig. 14(a). A linha mais próxima do observador é completamente visível e pode ser imediatamente desenhada. Esta linha define uma fronteira de visibilidade que obscurece todas as porções das linhas em posições inferiores, Fig. 14(b). As linhas restantes podem ser processadas, uma a uma, em ordem de distância crescente ao observador, desenhando trechos que estiverem acima da fronteira de visibilidade. Simultaneamente com o traçado, é feita a atualização da fronteira de visibilidade, Fig. 14(c) a 14(f), [2].

O mesmo raciocínio pode ser aplicado na Fig. 13 para representação em que todas as linhas sejam inclinadas, ou seja, que haja múltiplas famílias de linhas como mostra a Fig. 15.

O método exposto para eliminação de linhas invisíveis é simples e genérico e pode ser aplicado com sucesso a praticamente todas as classes de superfícies imagináveis. Os eventuais problemas que possam surgir na determinação da visibilidade e invisibilidade ocorrem quando há descontinuidade na superfície ou quando o ponto de observação estiver situado a pouca distância do modelo [20].

3. SIMULAÇÃO COMPUTACIONAL DE SUPERFÍCIES

A simulação computacional de superfícies com base em modelos matemáticos está hoje presente em todas as ciências e áreas do conhecimento e a sua importância tende a aumentar. É um meio de confrontar teorias com experimentação, de antecipar resultados experimentais ou de realizar experiências de caráter inacessível.

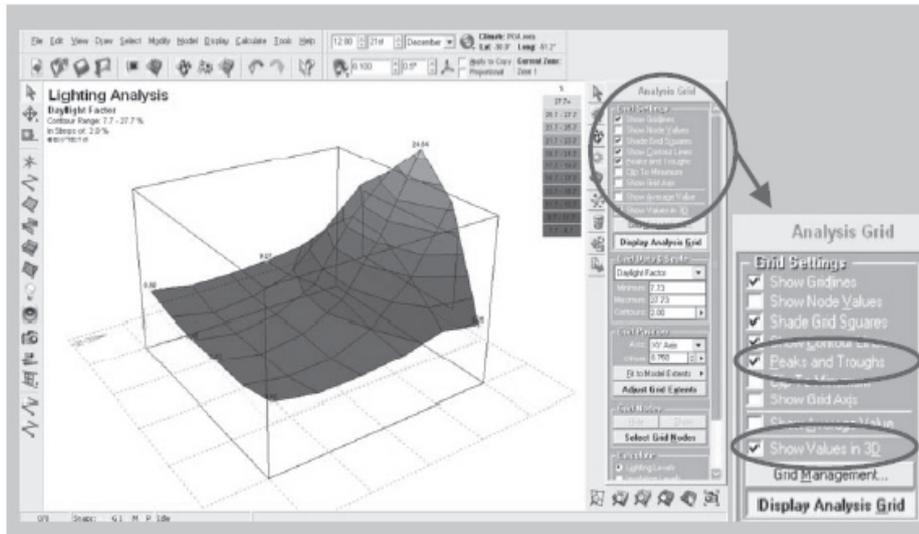


Fig. 16. Iluminâncias máximas e mínimas e curvas isolux em 3D no ECOTECT [23].

A simulação computacional vem assumindo uma importância cada vez maior como ferramenta de aquisição de conhecimento, ao mesmo tempo em que as complexidades dos problemas crescem. Desta forma, há necessidade de se utilizar uma abordagem mais sistêmica e generalista para a resolução dos problemas [22].

Os softwares, por não serem ferramentas perfeitas e terem suas limitações, auxiliam na visualização e previsão do comportamento das superfícies em estudo. No entanto, eles não podem gerar respostas precisas e confiáveis sem que o profissional conheça a ferramenta e compreenda os resultados por ele gerados.

A simulação computacional de superfícies viabiliza estudos quantitativos e qualitativos, sendo que estes estudos só são possíveis porque, além dos resultados gerados pelos cálculos numéricos, as ferramentas permitem a produção e representação de superfícies que podem ser visualizadas de forma realista [23].

A expressão “simulação computacional” pode ser definida como algoritmo que mimetiza um processo físico [24].

A definição de algoritmo como um procedimento computacional que torna um valor, ou um conjunto de valores, como entradas e produz algum valor, ou conjunto de valores, como saída. Portanto, um algoritmo é uma seqüência de passos computacionais que transforma dados de entrada (parâmetros estabelecidos) em dados de saídas (resposta do software: resultado numérico, representação gráfica de superfícies ou curvas) e dado por [25].

Na simulação computacional apresentada no trabalho de [23] usou-se o software ECOTECT v.5 para medir iluminâncias máximas e mínimas.

Observa-se que as superfícies geradas por este software tem a classe de modelo grade retangular e representação em perspectiva, conforme a Fig. 16.

Atualmente, o alto custo de materiais usados na confecção de órteses para testes torna inviável o uso indiscriminado para grande parcela da população e que cada peça tem a sua particularidade. Para minimizar este problema, está sendo pesquisada a confecção de órteses alternativas, utilizando um compósito polímero termofixo/fibra de vidro. Os modelos de posicionamento ventral e dorso-ventral foram submetidos à simulação computacional, utilizando o software SAP 2000 com o objetivo de caracterizar a distribuição de tensões, possibilitando remover material de áreas pouco solicitadas mecanicamente [26]. Desta maneira, obteve-se órteses mais leves, discretas e confortáveis, como mostra a Fig. 17.

Como pode ser visto nas superfícies geradas pelo software SAP 2000, na Fig. 17, usado por [26], tem-se a classe de modelo grade retangular e representação em perspectiva.

A simulação computacional na área médica é de grande utilidade. Os autores realizaram a simulação da bifurcação carotídea pelo programa ANSYS acoplado ao módulo FLOTRAN para detectar a formação de placas ateroscleróticas. Os resultados mostraram que o atual grau de desenvolvimento alcançado pelas

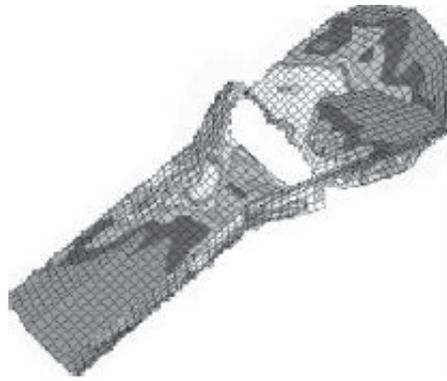


Fig. 17. Resultado da simulação das órteses no programa SAP 2000 modelo de posicionamento dorso-ventral [26].

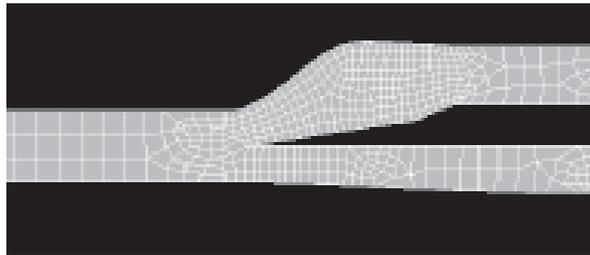


Fig. 18. Região em estudo, visualizada pelo ANSYS após a geração da malha [27].

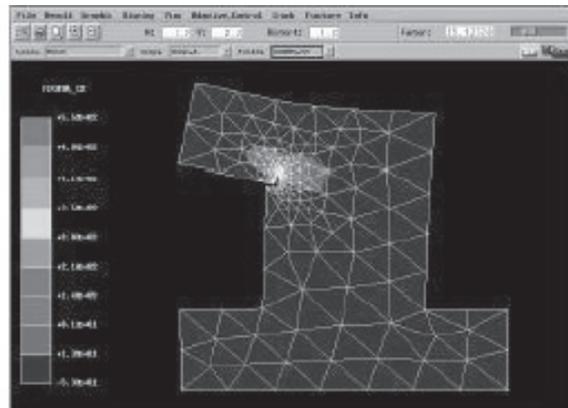


Fig. 19. Tela de pós-processamento do QUEBRA2D [28].

técnicas de modelagem computacional, juntamente com o rápido crescimento da performance de cálculo dos computadores, permitiu o estudo e desenvolvimento e solução de modelos mecânicos-biológicos. Assim, podem-se antecipar resultados de importantes procedimentos médicos, com mostra a Fig. 18, [27].

Na superfície gerada pelo software ANSYS, na Fig. 18, usado por [27] tem-se as classes de modelo grade triangular e grade retangular, com representação plana e sua projeção no plano XY.

O estudo dos aspectos relativos à modelagem de estruturas de concreto por meio da mecânica do dano. A simulação computacional foi realizada com o software QUEBRA2D-FEMOOP. O QUEBRA2D é um programa gráfico responsável pelo pré e pós-processamento, enquanto o FEMOOP é um pacote de elementos finitos, incumbido da análise tensão-deformação. Com a simulação, as evidências experimentais revelaram uma degradação das propriedades do concreto quando submetido a carregamentos monofônicos crescentes, como mostra a Fig. 19, [28].

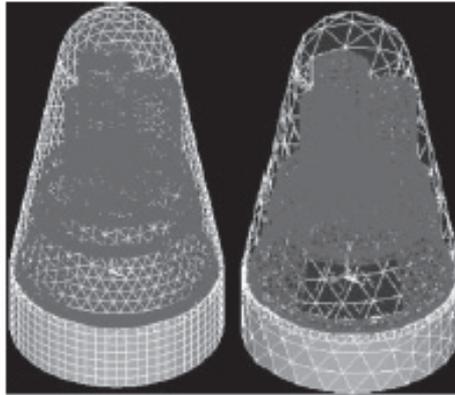


Fig. 20. Condições de contorno de convecção do ar interno [29].

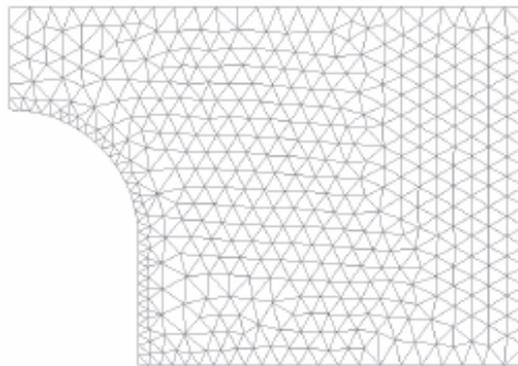


Fig. 21. Modelo geométrico discretizado [30].

Na superfície gerada pelo QUEBRA2D apresentada pelos autores, há a classe de modelo grade triangular e representação plana e sua projeção no plano XY.

A simulação da distribuição de temperaturas no invólucro e ambiente térmico interno da plataforma sub-orbital SARA (Satélite de Reentrada Atmosférica) durante o período de vôo, utilizando o software ANSYS. A Fig. 20 mostra as condições de contorno de convecção do ar interno, implementadas no modelo do SARA [29].

Na Fig. 20 é possível observar as classes de modelos grade triangular e retangular com representação em perspectiva.

O dispositivo para testes reais, utilizando o método dos elementos finitos para simulação computacional no domínio do tempo modificado a fim de observar os efeitos eletromagnéticos das descargas elétricas. Determinando-se a geometria do dispositivo, com as condições de excitação e medição de tensão, foi obtida uma discretização espacial como mostra a Fig. 21, [30].

O software utilizado por [30] durante o estudo foi o GID – GEOMETRY AND DATA, para modelagem das geometrias e pré-processamento do modelo, obtendo-se a classe de modelo grade triangular com representação plana e sua projeção no plano XY, como pode ser visto na Fig. 21.

3.1. Simulação de superfície utilizando o MatLab

O MatLab foi desenvolvido no início da década de 80 por Cleve Moler, do Departamento de Ciência da Computação da Universidade do Novo México, EUA [31].

O MatLab é utilizado normalmente para a resolução de problemas numéricos. Entretanto, ele pode ser usado também para simulação de superfícies. Consiste de um sistema gráfico que integra a capacidade de fazer cálculos, programação e visualização gráfica em um ambiente interativo bastante agradável, onde os problemas e suas soluções são expressos em uma linguagem matemática familiar.

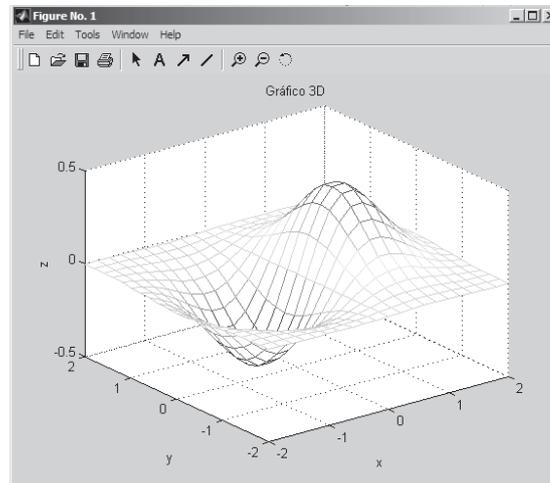


Fig. 22. Simulação de uma malha usando a função `meshgrid` plotada no MatLab [35].

O MatLab possui ferramentas bastante poderosas para vários tipos de aplicações, tanto na engenharia como em outras áreas. Para isso, basta que o MatLab seja adaptado através de comandos específicos [32, 33].

A grande vantagem que o MatLab possui em relação a outras linguagens como, por exemplo, o C e o Fortran, consiste no fato de que no MatLab, as informações são facilmente armazenáveis em matrizes. Isso proporciona uma fácil e rápida manipulação de uma grande quantidade de informações e a familiarização com a interface do programa [34].

Quando o Matlab é acionado, surge na tela do computador uma janela (janela de comando/*command window*) com um pequeno texto introdutório na parte superior. Logo abaixo, à esquerda, aparece o símbolo (`>>`), com o cursor piscando ao lado. Essa linha é chamada linha de comando (*command line*). É através da janela de comando que o usuário se comunica com o software, introduzindo as instruções através da linha de comando, com o acionamento da tecla ENTER. O símbolo (`>>`) indica que o software está pronto para receber as instruções do usuário.

A criação de gráficos de superfícies é realizada através de um conjunto de etapas, sendo que, primeiramente, deve-se definir os vetores das variáveis independentes [35].

Definições, conceitos, aplicações, e tutoriais de uso para geração de superfícies usando o MatLab podem ser consultados com mais detalhes em [31-33,35].

A criação de gráficos de superfícies no MatLab é dada da seguinte forma [33]:

- é possível desenhar superfícies em malhas 3D com a função `mesh`.
- o comando `mesh(z)` cria um desenho 3D em perspectiva dos elementos da matriz `z`.
- a superfície da grade é definida pelas coordenadas `z` dos pontos, acima de uma grade retangular no plano `x-y`.

Ao desenhar o gráfico de uma função $z = f(x, y)$, utiliza-se o comando `meshgrid`.

Dados dois vetores `k` e `w`, contendo as coordenadas dos eixos `x-y`, a função `meshgrid` retorna duas matrizes `x` e `y` contendo uma “malha” de coordenadas necessárias para a geração de superfícies, como mostra a Fig. 22.

A plotagem da Fig. 22 é dada pelo algoritmo:

```
[x,y] = meshgrid(-2:0.2:2,-2:0.2:2);
z= x.*exp(-x.^2-y.^2);
mesh(x,y,z);
xlabel('x');
ylabel('y');
zlabel('z');
title('Gráfico 3D')
```

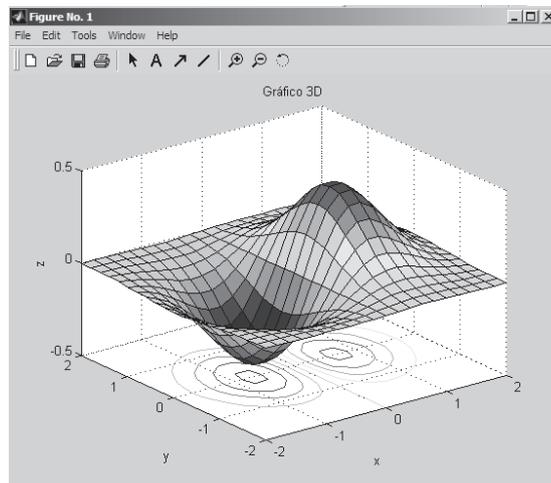


Fig. 23. Simulação de superfícies plotada no MatLab [35].

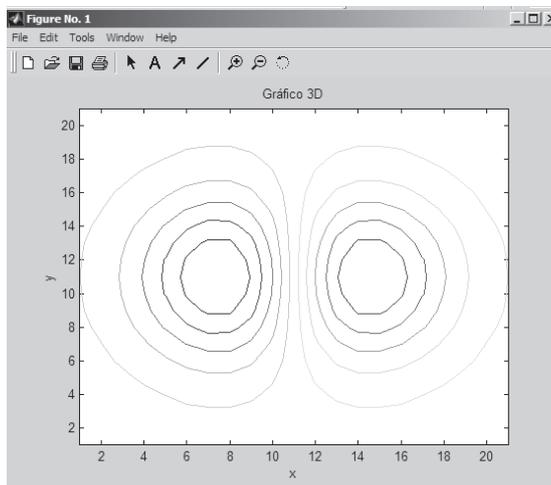


Fig. 24. Simulação de curvas isovalor plotada no MatLab [35].

A Fig. 23 apresenta a simulação de superfícies plotadas no MatLab com o comando *surf*. Na representação gráfica da superfície, identifica-se que o MatLab utiliza curvas isovalor e perspectivas. A construção do modelo da superfície é de grade retangular no plano XYZ.

A plotagem da Fig. 24 é dada pelo algoritmo:

```
[x,y] = meshgrid(-2:0.2:2,-2:0.2:2);
z= x.*exp(-x.^2-y.^2);
contour(z,10);
xlabel('x');
ylabel('y');
zlabel('z');
title('Gráfico 3D')
```

Para se obter uma superfície de revolução, a partir de uma função, os comandos necessários são:

```
x=[0:0.1:1]; pontos de discretização do eixo "ox"
rad=f(x);
n=length(rad);
cylinder(rad,n)
xlabel('eixo x')
ylabel('eixo y')
```

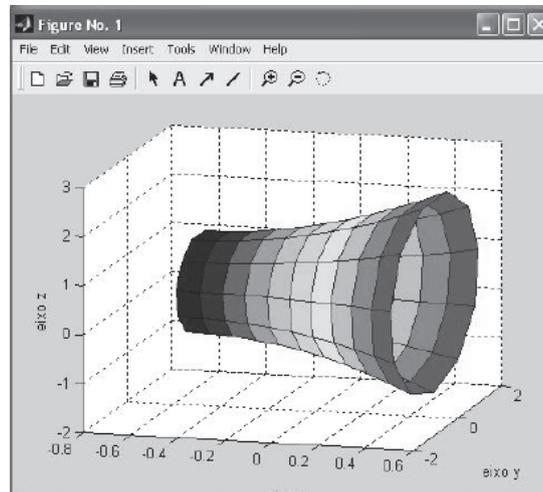


Fig. 25. Superfície de revolução plotada no MatLab [35].

```

xlabel('eixo z')
[X,Y,Z]=cylinder(rad,n);
h=surf(X,Y,Z);
rotate(h,[0,1,0],90)
xlabel('eixo x')
ylabel('eixo y')
zlabel('eixo z')
view(15,15)

```

Na Fig. 25 tem-se uma superfície de revolução ao girar a curva $y = x^2 + 1$:

A plotagem da Fig. 25 é dada pelo algoritmo:

```

x=[0:0.1:1]; pontos de discretização do eixo "ox"
rad=x.^2+1;
n=length(rad);
cylinder(rad,n)
xlabel('eixo x')
ylabel('eixo y')
zlabel('eixo z')
[X,Y,Z]=cylinder(rad,n);
h=surf(X,Y,Z);
rotate(h,[0,1,0],90)
xlabel('eixo x')
ylabel('eixo y')
zlabel('eixo z')
view(15,15)

```

Na representação gráfica da superfície da Fig. 25 identifica-se que o MatLab utiliza curvas perspectivas e a construção do modelo da superfície é de grade retangular no plano XYZ.

4. SELEÇÃO DE MATERIAL E SIMULAÇÃO DA SUPERFÍCIE CIRCULAR

Realizada a revisão bibliográfica apresentada nas seções dois e três, passa-se, então, a seleção do material e a simulação computacional da superfície de um diafragma circular de uma célula de carga usando o software MatLab, observando o modelo de classe usado na representação gráfica da mesma.

Para realizar o estudo, tornou-se necessário pesquisar sobre diafragmas circulares de transdutores de pressão. Transdutores de pressão são compostos de um diafragma o qual se deforma na presença de um

gradiente de pressão. Essa deformação é então medida pelos sensores de tensão (*strain gage*) que são colados ao diafragma. Os materiais usados normalmente na fabricação de diafragmas para sensores de pressão são os de tipo ferrosos, ligas metálicas, látex, polímeros, entre outros.

Atualmente, podem-se usar os transdutores de pressão em uma ampla variedade de aplicações tais como, em uso comercial, em automatização e controle de processos industriais e na área da saúde. Desta forma, os transdutores de pressão são estruturas mecânicas, que foram planejados para receber esforços e deformarem-se dentro do regime elástico a que foram desenhados.

4.1. Processo de seleção de materiais para diafragmas

Normalmente, o modelo de diafragma para célula de carga é similar com uma placa circular com bordas engastadas. A deflexão do diafragma de sensor de pressão é dada pela equação (1) [36]:

$$St = \frac{C_1 p R^4 (1 - \nu^2)}{Et^3} \quad (1)$$

Onde:

- St = deflexão do diafragma;
- p = pressão exercida sobre o diafragma;
- t = espessura do diafragma;
- ν = coeficiente de Poisson;
- E = módulo de elasticidade;
- R = raio do diafragma da célula de carga.

Assim, para a borda ou extremidade do diafragma engastada tem-se: $C_1 = \frac{3}{16}$,

e para bordas ou extremidades livres têm-se: $C_1 \approx \frac{9}{8}$.

A Fig. 26 apresenta a deflexão à tração do diafragma de sensores de pressão com bordas engastadas. A deformação máxima de tração do diafragma da célula de carga é dada pela equação (2).

$$\sigma_{\max} = C_2 p \frac{R^2}{t^2} \quad (2)$$

Para a borda ou extremidade do diafragma engastada tem-se: $C_2 \approx 1/2$,

Para a borda ou extremidade livre utiliza-se: $C_2 \approx 3/2$.

O raio do diafragma do sensor de pressão é definido no projeto e sua espessura pode variar conforme o *strain gage* que será usado no projeto. Assim, a deformação máxima de tração não pode exceder o limite de escoamento do material relacionado com a espessura do diafragma, ou seja, a tensão máxima à restri-

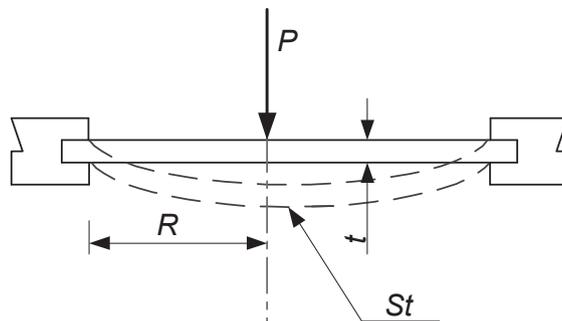


Fig. 26. Deflexão de tração do diafragma [36].

ção do diafragma da célula de carga fica restrita a equação (3):

$$\sigma_{\max} = \sigma_f = C_2 p \frac{R^2}{t^2} \quad (3)$$

Para a proposta de um diafragma com borda engastada, a deflexão e a tensão máxima equação (4) e equação (5):

$$St = \frac{0,1875 p R^4 (1 - \nu^2)}{Et^3} \quad (4)$$

$$\sigma_f = 0,5 p \frac{R^2}{t^2} \quad (5)$$

Substituindo a variável t da equação (5) na equação (4), tem-se a deflexão para o diafragma da célula de carga equação (6), [36]:

$$St = \frac{0,5304 R (1 - \nu^2) \sigma_f^{\frac{3}{2}}}{Ep^{\frac{1}{2}}} \quad (6)$$

De posse das equações (1 a 6) e as proposições fornecidas por [36], são empregados os procedimentos de seleção de material, sugerido por [37]. Como ferramenta auxiliar, será utilizado os métodos de índice de desempenho e multi-critérios.

1ª Etapa – Analisar os requisitos de seleção dos materiais.

Determinar as condições de serviço e ambiente a qual a célula de carga será submetida. Como mostra a Fig. 28, o diafragma, ao ser submetido por uma força p , sofrerá uma deflexão de tração. Conhecendo as características e o entendimento de funcionamento do diafragma do sensor de pressão, identificam-se os requisitos associados ao desempenho esperado:

- material deverá ser leve;
- resistência à força de tração, compressão e corrosão;
- flexibilidade para captação das faixas de variação da força aplicada;
- base do sensor de pressão não poderá sofrer deformação ou flexão à força que será aplicada.

2ª Etapa – Determinação das propriedades críticas do material.

De acordo com os requisitos da primeira etapa, é possível identificar algumas propriedades que irão determinar o tipo de material a ser usado para a fabricação da célula de carga, tais como:

- a deflexão do material do diafragma deverá ser capaz de captar as variações de forças.
- a deformação máxima de tração não deverá exceder o limite de escoamento do material.

Usando o método de índice de desempenho apresentado por [37], tem-se:

1º Passo: Identificar o atributo ou critério a ser maximizado ou minimizado.

Para o caso da célula de carga, a resistência está relacionada com a deflexão máxima do diafragma. A força máxima que atuará no diafragma não poderá ultrapassar o limite de escoamento do material. Neste caso a deflexão (St).

2º Passo: Desenvolver a função critério ou função objetivo, em termos de requisitos funcionais, da geometria e propriedade do material.

Conforme a Fig. 27, o diafragma da célula de carga terá uma deflexão (St), um raio (R) e uma espessura (t) com as bordas engastadas e será submetido a uma força (p). Desta forma, a deflexão máxima para o diafragma é dada pela equação (4) sendo a função critério.

$$St_{\max} = \frac{0,1875 p R^4 (1 - \nu^2)}{Et^3}$$

3º Passo: Identificar as variáveis livres de projeto, ou seja, aquelas que podem variar livremente.

Para este passo, a variável é a espessura (t) do diafragma, já que esta variável depende do material a ser usado na fabricação da célula de carga. A sensibilidade do *strain gage* que será usado e o diâmetro são definidos na proposta do projeto.

4º Passo: Identificar as restrições e a ordem de importância.

Como já descrito na segunda etapa, a deformação máxima de tração não deverá exceder o limite de escoamento do material.

5º Passo: Desenvolver as equações de restrição.

A equação de restrição será a equação (5), pois a deformação máxima de tração não pode exceder o limite de escoamento do material.

6º Passo: Substituir as variáveis livres das equações de restrição na função critério.

Como a variável livre (t) do quinto passo deverá ser substituída na função critério do segundo passo, tem-se a equação (6).

$$St = \frac{0,5304R(1-\nu^2)\sigma_f^{\frac{3}{2}}}{Ep^{\frac{1}{2}}}$$

7º Passo: Agrupar as variáveis em três grupos: funcionais (F); geometria (G) e propriedades dos materiais (M), na seguinte forma:

$$p = f(F, G, M) = f_1(F) \cdot f_2(G) \cdot f_3(M)$$

Assim, a equação (6) fica:
$$St = \left(\frac{0,5304}{p^{\frac{1}{2}}} \right) (R) \left(\frac{\sigma_f^{\frac{3}{2}}(1-\nu^2)}{E} \right)$$

Onde,

$$\left(\frac{0,5304}{p^{\frac{1}{2}}} \right) = \text{parâmetros funcionais (F)}$$

$$(R) = \text{parâmetros geométricos (G)}$$

$$\left(\frac{\sigma_f^{\frac{3}{2}}(1-\nu^2)}{E} \right) = \text{parâmetros da propriedade dos materiais (M)}$$

8º Passo: Identificar o índice de desempenho, expresso com a quantidade M, a ser otimizado. As propriedades dos materiais estão agrupadas no termo:

$$\frac{\sigma_f^{\frac{3}{2}}(1-\nu^2)}{E},$$

onde a quantidade $(1-\nu^2)$ para todos sólidos assume o valor 1. O melhor material para a membrana da célula de carga será o que apresenta o maior valor de M, segundo a equação (7) que apresenta o índice de desempenho, e será maximizada onde haverá uma boa deflexão do diafragma da célula de carga sem comprometer a resistência mecânica do material [36].

$$M = \frac{\sigma_f^{\frac{3}{2}}}{E} \quad (7)$$

3ª Etapa – Triagem dos materiais candidatos.

Comparar as propriedades críticas do passo anterior, com as respectivas propriedades de materiais de um banco de dados, para identificar aqueles que têm potencial para atender as exigências. Neste caso específico, identificam-se quais os materiais de maior limite de escoamento ao fixado pela deformação máxima de tração. Conforme dito anteriormente, a força que será exercida no diafragma da célula de car-

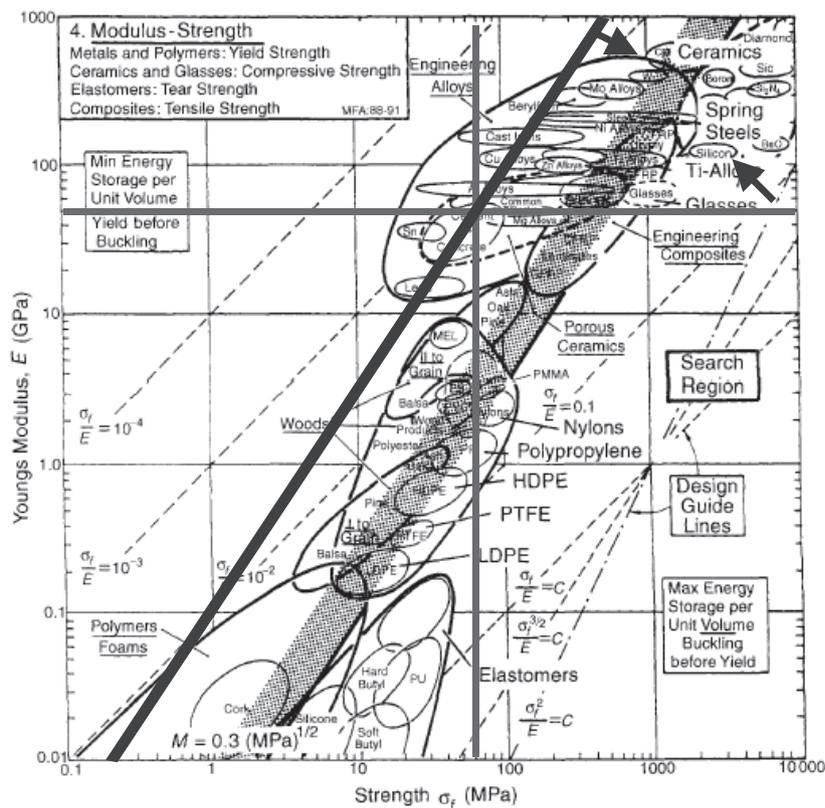


Fig. 27. Materiais para diafragma elástico [36].

ga pode variar e dependendo da sensibilidade do *strain gage* e o tipo de material empregado na construção, a espessura do diafragma também sofrerá variações.

Nesta etapa, já é possível visualizar os materiais que satisfazem a equação (7) sugestão de alguns materiais, bem como suas vantagens e desvantagens conforme Fig. 27 e tabela 1 [36].

Com o cálculo do valor de M para cada material da Fig. 27, tem-se o resultado da triagem dos materiais candidatos. A tabela 1 apresenta estes resultados conforme [36].

4ª Etapa – Seleção do material candidato.

Analisar os materiais em termos de desempenho do produto, custo, fabricabilidade e disponibilidade. Para o projeto em questão serão usadas as informações citadas anteriormente, assim como o modelo da célula de carga apresentado por [38, 39]. Conhecendo os materiais sugeridos por [38,39], com a equação (7), e limitando os valores da mínima de tensão de tração (σ_f de 60Mpa) e o módulo de elasticidade (E de 50GPa), chega-se a outros materiais candidatos para a fabricação da célula de carga. Para esta nova situação, os materiais se encontram nas ligas de engenharia. O resultado desta nova triagem está listado na tabela 2.

Conclusão sobre os materiais candidatos: Existem ótimos materiais para a construção de células de carga na área das ligas de engenharia, e alguns materiais apresentam boa resistência à corrosão e a tração, sendo leves, de fácil aquisição, de baixo custo e fáceis de serem trabalhado (usinados). Dentro das ligas de engenharia, o alumínio se destaca como o material candidato para a construção da célula de carga.

Usando o método multi-critérios de seleção de materiais conforme [37], procura-se uma função valor, equação (8):

$$V_j = \sum \omega_i \beta_{ij} \quad (8)$$

onde:

Tabela 1. Materiais candidatos para diafragmas [36].

Material	$M = \left(\sigma_f^3 / E\right) (MPa)^{1/2}$	Coefficiente de perda (η)	Comentários
Cerâmicos	0,3 - 3	$< 10^{-4}$	Ótimo valor de M, mas não suportam esforços de tração.
Vidros	0,5	$\approx 10^{-4}$	Possível, se protegidos dos perigos.
Aços mola	0,3	$\approx 10^{-4}$	Representam a escolha padrão, têm baixo coeficiente de atrito, resposta rápida, mas são difíceis de serem usinados.
Ligas de titânio	0,3	$\approx 3 \times 10^{-4}$	São ligas tão boas quanto os aços, apresentam resistência à corrosão, porém são muito caros.
Polímeros: Nylon Polipropileno HDPE* Teflon	0,3 0,3 0,3 0,3	$\approx 2 \times 10^{-2}$ $\approx 5 \times 10^{-2}$ $\approx 10^{-1}$ $\approx 10^{-1}$	Apresentam problemas com o escoamento e alto coeficiente de atrito, originando sensores com reduzida reprodutividade.
Elastômeros	0,5 - 10	$\approx 10^{-1} - 1$	Excelente valor de M, elevada deflexão elástica e grande perda do coeficiente limitando o tempo de resposta.

*Polietileno de alta densidade

Tabela 2. Materiais Candidatos para a fabricação do diafragma.

Material	$M = \left(\sigma_f^3 / E\right) (MPa)^{1/2}$
Ligas de Engenharia	$\approx 1 \times 10^{-3}$
Ligas de Titânio	$\approx 1 \times 10^{-3}$
Materiais Cerâmicos	$\approx 1 \times 10^{-3}$
Aços molas	$\approx 1 \times 10^{-3}$

Tabela 3. Determinação do índice de importância das propriedades.

Propriedades	Relações										Σ	ω
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10		
1- Rest. Tração	1-2	1-3	1-4	1-5	2-3	2-4	2-5	3-4	3-5	4-5		
2- Rest. Corrosão	1	1	1	0							3	0,3
3- Baixa Densid.	0				1	1	0				2	0,2
4- Coeficiente de Dilat. térmica		0			0			0	1		1	0,1
5- Baixo Custo				1			1		0	1	3	0,3

$\Sigma \omega_i = 1$; V_j é a valoração alcançada pelo material j ; ω_i é a importância de uma dada propriedade i do material e; β_{ij} é a valoração da propriedade i do material j .

A definição dos índices de importância (ω_i) será realizada através das possíveis combinações, duas a duas, das propriedades, definindo a importância relativa das mesmas conforme tabela 3. As relações foram estabelecidas na forma de tabela, registrando o valor 1 (um) para célula da propriedade de maior importância, e 0 (zero) na de menor. Na coluna Σ tem-se a soma de vezes do registro 1 na coluna ω , sendo que se divide a soma, pelo número de combinações de propriedade.

Tabela 4. Propriedades dos materiais.

	Aço Baixo Carbono	Zinco	Cobre	Alumínio	maior / menor
1- Rest. Tração (MPa)	120	90	21	42	120
2- Rest. Corrosão	1	4	3	2	4
3- Baixa Densid. (Kg/dm ³)	7,9	7,1	8,9	2,7	2,7
4- Coeficiente de Dilat. térmica (10 ⁻⁶ / °C)	11,7	26,28	16,7	23,9	11,7
5- Baixo Custo (\$ / Kilograma/m (+/-))	1,40	12,30	9,00	6,00	1,4

Tabela 5. Valoração dos materiais.

β_{ij}	Aço	Zinco	Cobre	Alumínio	ω
1- Rest. Tração (MPa)	100	75	17,5	35	0,3
2- Rest. Corrosão	25	100	75	50	0,2
3- Baixa Densid. (Kg/dm ³)	34,17	38,02	30,33	100	0,1
4- Coeficiente de Dilat. térmica (10 ⁻⁶ / °C)	100	44,5	70,05	48,9	0,1
5- Baixo Custo (\$ / Kilograma/m (+/-))	100	11,38	15,5	23,33	0,3
$V_j = \sum \omega_i \beta_{ij}$	78,417	33,166	34,938	42,389	

Calculo de β_{ij} :

As propriedades dos materiais estão relacionadas na tabela 4.

A valoração das propriedades dos materiais pode ser feita pela tabela 5, ou pela determinação dos valores de β pela relação:

- Para propriedades que quanto maior é melhor:

$\beta_{ij} = [(\text{valor numérico da propriedade } i \text{ do material } j) / (\text{maior valor da propriedade } i \text{ levada em consideração})] \times 100.$

- Para propriedades que quanto menor é melhor:

$\beta_{ij} = [(\text{menor valor da propriedade } i \text{ do material } j) / (\text{valor numérico da propriedade } i \text{ do material } j)] \times 100.$

De acordo com os resultados da tabela 5, tem-se que o aço é o material mais apropriado por ser o que atingiu o maior valor V_j . Como consequência, é um material de alta densidade. Considerando que o material para a construção da célula de carga neste estudo, deve ser de baixa densidade. Por conseguinte, o alumínio está mais próximo da valoração da tabela, sendo, neste caso, o material a ser escolhido para a célula de carga.

5ª Etapa – Desenvolvimento de dados de projeto.

O material escolhido para a fabricação da célula de carga foi o alumínio, conforme o método de índice de desempenho e o índice multi-critérios. Abaixo são listadas algumas características do alumínio para a fabricação da célula de carga.

Liga de Alumínio:

- Módulo de Elasticidade = 70 GPa;
- Coeficiente de Poisson = 0,33
- Máxima Tensão de Deformação = 1000 MPa.

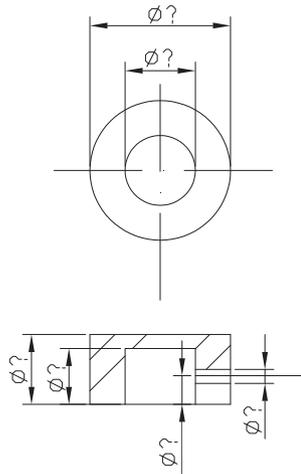


Fig. 28. Forma geométrica da célula de carga [40].

4.2. Proposta do projeto da célula de carga

O modelo da célula de carga a ser apresentado, assim como suas dimensões, foi baseado nos dados de [38, 39], conforme é apresentado na Fig. 28. A Fig. 28 ilustra a forma geométrica da célula de carga, onde é possível identificar o diafragma da mesma. De posse da Fig. 28 é possível determinar as equações de deformação do diafragma.

A determinação da espessura máxima do diafragma precisa da sua tensão máxima de deformação. A espessura pode ser encontrada a partir da equação (5) [36]:

$$t = \sqrt{\frac{0,5 \times p \times R^2}{\sigma_f}} = \sqrt{\frac{0,5 \times 89 \times 10^6 \times (10 \times 10^{-3})}{1000 \times 10^6}} \cong 2 \times 10^{-3} \text{ m}$$

Onde:

p – pressão de 70 Kgf [≈ 89 MPa];

t – espessura do diafragma em [mm];

R – raio [mm];

σ_f – tensão máxima de deformação [MPa];

Com o material já selecionado e algumas dimensões sugeridas por [38, 39], o que importa a partir desta escolha é a espessura do diafragma.

A espessura do diafragma é determinada a partir da sensibilidade do *strain gage*, do coeficiente de Poisson e do módulo de elasticidade do material a ser usado na fabricação da célula de carga. Nos casos de diafragmas de espessura homogênea, quando submetidos a uma pressão constante, os mesmos ficam sujeito a dois tipos de tensões: uma tensão tangencial de tração, igual nas duas faces do diafragma, e outra, tensão radial, com sinal contrário nas duas faces Fig. 29 [39].

Para pequenas deformações, os valores das tensões tangenciais e radiais apresentados na Fig. 29 podem ser obtidos pelas equações (9) e (10).

$$\varepsilon_t = \frac{3(1-\nu^2)(R^2 - r^2)}{8Et^2} p \tag{9}$$

$$\varepsilon_r = \frac{3(1-\nu^2)(R^2 - 3r^2)}{8Et^2} p \tag{10}$$

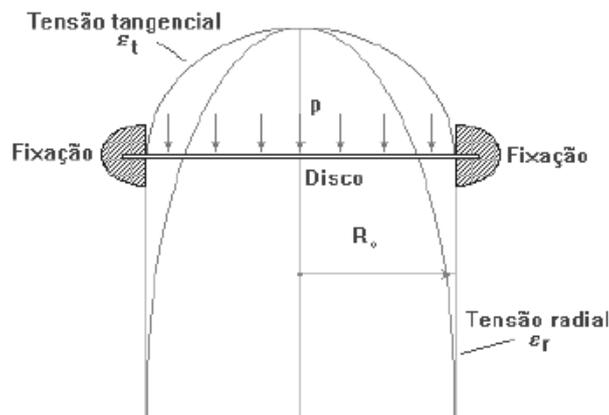


Fig. 29. Distribuição das tensões no diafragma [39].

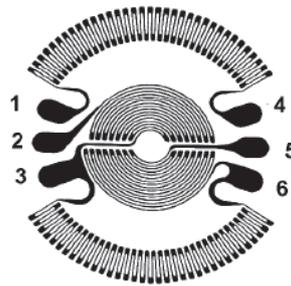


Fig. 30. Extensômetros utilizados em diafragmas [39].

Onde:

- p – pressão que se exerce sobre o diafragma [MPa];
- t – espessura do diafragma [mm];
- r – raio corrente, onde se verificam as tensões ξ_t e ξ_r [mm];
- R – raio exterior (fixação) [mm];
- ν – coeficiente de Poisson do material do diafragma [adimensional];
- E – módulo de elasticidade [GPa].

O diagrama de tensões mostra que a tensão tangencial é sempre positiva e que a tensão radial tem uma zona onde é positiva e outra onde é negativa e que, portanto, se anula para um determinado valor do raio do diafragma. O cálculo da espessura do diafragma por [38, 39] e dado por:

$$t = \sqrt{\frac{820 \times 89 \times 10^6 \times (10 \times 10^{-3})^2 \times (1 - (0,33)^2)}{70 \times 10^9 \times 0,60 \times 10^3}} \cong 2 \times 10^{-3} \text{ m}$$

Onde:

- p – pressão de 70 Kgf [≈ 89 MPa];
- t – espessura do diafragma em [mm];
- R – raio [mm];
- ν – coeficiente de Poisson [adimensional];
- E – módulo de elasticidade [GPa];
- y_c – sensibilidade do sensor (*strain gage*) [mV/V].

A Fig. 30 mostra um extensômetro de quatro elementos, utilizado na medida de deformação tangencial e radial do diafragma.

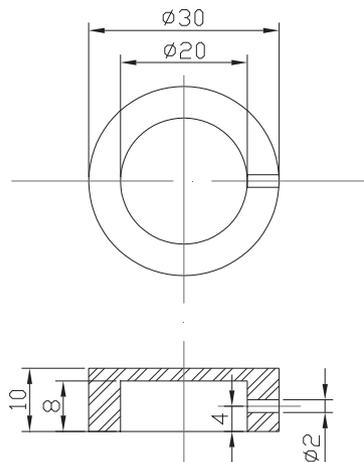


Fig. 31. Protótipo da célula de carga [40].

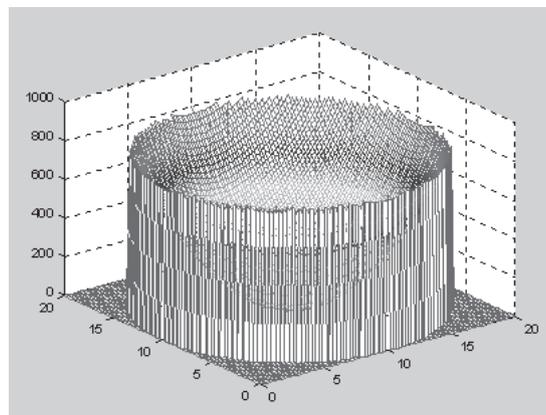


Fig. 32. Deformação máxima do diafragma [40].

Os extensômetros da zona exterior destinam-se à medida de tensão radial, enquanto que os interiores destinam-se à medida da tensão tangencial. Os extensômetros são ligados em ponte de Wheatstone, sendo os exteriores dos ramos R1 e R3 e os interiores dos ramos R2 e R4. Com esta montagem, de quatro extensômetros ativos, aumenta-se a sensibilidade da ponte de Wheatstone e cancela-se o efeito da temperatura sobre os extensômetros. A relação entre a tensão de saída e a pressão é linear, com erro inferior a 0,3%, contanto que a deformação do diafragma na zona central seja inferior a 1/4 da espessura. Os diafragmas são dimensionados para obedecer a este critério. A frequência máxima é passível de ser medida com este equipamento, dependendo da dimensão dos elementos mecânicos, e havendo sensores capazes de funcionar de 0 a 10 kHz [39].

A proposta do protótipo da célula de carga suas dimensões e a espessura do diafragma são dadas pela Fig. 31.

4.3. Simulação da superfície circular do diafragma da célula de carga

A simulação da superfície circular do diafragma da célula de carga apresentado na Fig. 32 foi feita usando-se uma força de 70 Kgf e uma espessura de 2,0 mm com a função *meshgrid*.

Com uma força de 70 Kgf aplicada sobre a superfície circular, esta sofrerá uma deformação máxima. O modelo da superfície gerada é de grade retangular no plano XYZ.

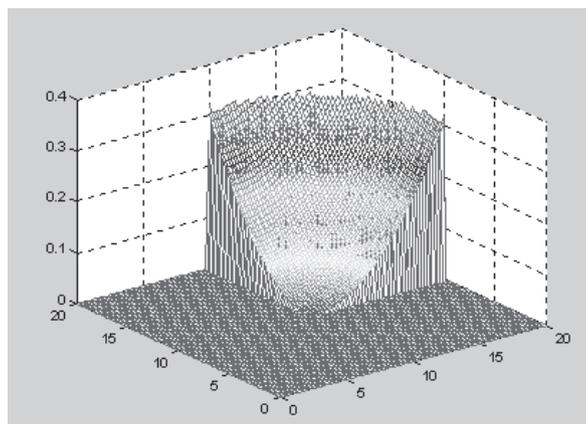


Fig. 33. Deformação máxima do diafragma nos pontos $x = 50$ e $y = 50$ [40].

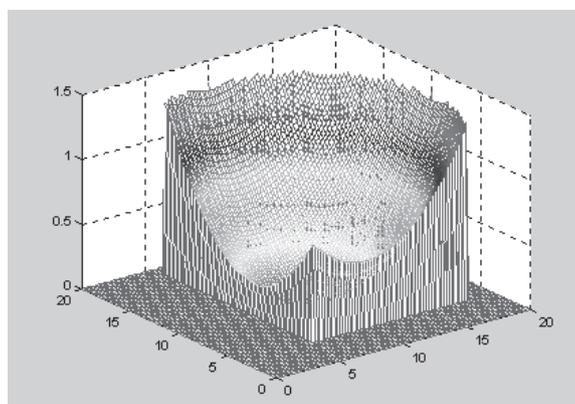


Fig. 34. Deformação máxima do diafragma nos pontos $x = 20$ e $y = 30$ [40].

Na Fig. 33 foi aplicada a mesma força de 70 Kgf na superfície circular, e a simulação com a função *meshgrid*. A simulação foi realizada nos pontos $x = 50$ e $y = 50$, a fim de verificar o modelo da superfície gerada. Como pode ser observado, o modelo é retangular.

Na Fig. 34, foi aplicada a mesma força de 70 Kgf na superfície circular. Para a simulação, foi realizado um corte nos pontos $x = 20$ e $y = 30$ com a função *meshgrid* a fim de verificar o modelo da superfície gerada. O modelo da superfície gerada foi o retangular.

5. CONCLUSÃO

O trabalho apresenta a interação entre cálculos, desenho geométrico e simulação computacional por meio do software MatLab na solução do estudo proposto.

A relevância dos temas envolvidos é ampliada, uma vez que o tipo e o traçado da representação gráfica do modelo das curvas envolvem modelos matemáticos que fazem a interpolação dos dados no software, gerando, assim, a superfície desejada.

O traço marcante das representações das superfícies apresentada pelo software é em sua maioria do tipo grade retangular, já que este tipo de representação proporciona melhor qualidade estética aos desenhos digitais. Por sua vez, as superfícies de grades triangulares são usadas para simulações onde se deseja obter estudo estrutural.

O software MatLab proporciona um ambiente interativo e bastante agradável para o usuário. As superfícies geradas são do tipo retangular e em perspectiva. O programa citado também faz cálculos e resolução de problemas numéricos, cujos resultados são expressos em uma linguagem matemática familiar.

As representações gráficas da superfície circular da célula de carga, geradas durante a simulação computacional, apresentaram-se como do tipo de grade retangular e em perspectiva. Desta maneira, este resultado melhorou a percepção das características das superfícies modelada.

REFERÊNCIAS

- [1] Pinho, M.S., “Origens da Computação Gráfica”, Disponível em < <http://www.inf.pucrs.br/~pinho/CG/Aulas/Intro/intro.htm> > Acesso em: 22 de Julho de 2009 (2009)
- [2] Petinaiti, F., “Modelamento Digital e Representação Gráfica de Superfícies”, São Paulo, Dissertação: (Mestrado em Engenharia) – Programa de Pós-Graduação em Engenharia da Escola Politécnica da USP (1983)
- [3] Araujo, W.T., “A Modelagem Digital de Elevação como Instrumento de Análise da Ocupação do Sítio Urbano”, XXI Congresso Brasileiro de Cartografia, 2003, Belo Horizonte. XXI - CBC (2003)
- [4] Itame, O.Y., “Controle de Qualidade Aplicado na Modelagem Digital de Terreno”, Presidente Prudente, Dissertação: (Mestrado em Ciências e Tecnologia) – Programa de Pós-Graduação em Ciências cartográficas. Faculdade de Ciência e Tecnologia da Universidade Estadual Paulista, São Paulo (2001)
- [5] Marconi, M.A., Lakatos, E.M., *Fundamentos de Metodologia Científica*, 7. ed. São Paulo, Atlas (2010)
- [6] Yin, R.K., *Estudo de Caso: Planejamento e Métodos*, Porto Alegre, Bookman (2001)
- [7] Bruyne, P., Herman, J., Schoutheete, M., “Dinâmica da Pesquisa em Ciências Sociais: Os Pólos da Prática Metodológica”, Rio de Janeiro, Ed. Francisco Alves (1977)
- [8] Vergara, S.C., “Projetos e Relatórios de Pesquisa em Administração”, São Paulo, Atlas (2003)
- [9] Felgueiras, C.A., “Modelagem Numérica de Terreno”, Introdução ao SIG, São José dos Campos: Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais – INPE (1998)
- [10] Peucker, T.K., Douglas, G.H., “Detection of Surface-specific Points by Local Parallel Processing of Discrete Terrain Elevation Data Computer Graphics and Image Processing”, *Computer Graphics Image Process*, 375–387, University of Maryland, Computer Science (1975)
- [11] Toriaki, J.I., Fukumura, T., “Extractions of Structural Information From Gray Pictures”, *Computer Graphics Image Process*, 30–51, University of Maryland, Computer Science (1978)
- [12] Namikawa, L.M., Felgueiras, C.A., Mura, J.C., Rosim, S., Lopes, E.S.S., “Modelagem Numérica de Terreno e Aplicações”, INPE-9900-PUD/129, São José dos Campos (2003)
- [13] Petinaiti, F., “Modelamento Digital de Superfície”, Simpósio sobre Aplicações Gráficas por Computador e Sistemas Gráficos Interativos - SUCESU, 1980, São Paulo, *Anais do II Simpósio sobre Aplicações Gráficas por Computador e Sistemas Gráficos Interativos*, 2, 47- 63 (1980)
- [14] Graham, R.L., “An Efficient Algorithm for Determining the Convex Hull of a Finite Planar Set”, *Information Processing Letters*, 1, 132 -133 (1972)
- [15] Preparata, F.P., Hong, S.J., “Convex Hulls of Finite Sets of Points in Two and Three Dimensions”, *Commun, ACM*, 20(2), 87–93 (1977)
- [16] Bentley, J.L., Shamos, M.I., “Divide-and-conquer for Linear Expected Time”, *Journal Inform, Process, Lett.*, 7, 87-91 (1978)
- [17] Calcomp, “GPCP – II User Manual”, 2411, West La Palma, Anaheim, Canadá (1972)
- [18] Dynamic Graphics, “User Manual for Surface Gridding Library”, 2855, Telegraph Ave, Berkeley, Canadá, (1978)
- [19] Radian Corporation, “CPS-1 User Manual”, 8501, Mo-Pac Blvd, Austin, Texas, USA (1979)
- [20] Coelho, G.B., “Análise e Simulação do Processo de Transformação de Chuva em Vazão com Suporte de Sistema de Informação Geográficas (SIG)”, Recife, Dissertação: (Mestrado em ciências geodésicas e tecnologias da geoinformação) – Programa de pós-graduação em ciências geodésicas e tecnologias da geoinformação, Universidade Federal de Pernambuco, UFPE (2006)
- [21] Anderson, D.P., “Hidden Line Elimination in Projected Grid Surfaces”, *ACM Transactions on Graphics (TOG)*, 1, 274-288 (1982)
- [22] Cavira, M.O., “Simulação Computacional Como uma Ferramenta de Aquisição de Conhecimento”, São Carlos, Dissertação: (Mestrado em engenharia de produção) – Programa de pós-graduação em engenharia de produção, Escola de engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, USP (2003)

- [23] Tavares, S.G., “Simulação Computacional para Projeto de Iluminação em Arquitetura”, Porto Alegre, Dissertação: (Mestrado em arquitetura) – Programa de Pós-Graduação arquitetura, Programa de pós-graduação em arquitetura da Universidade do Rio Grande do Sul, UFRGS (2007)
- [24] Hitchcock, R.J., “Advancing Lighting and a Daylighting Simulation: The Transition From Analysis to Design Aid Tool”, *Building Simulation – Seventh International IBPSA Conference*, Madison, USA, 308 – 315 (1995)
- [25] Cormen, T.H., Leiserson, C.E., Rivest, R.L., Stein, C., “Algoritmos: Teoria e Prática”, Rio de Janeiro, Campus (2002)
- [26] Thomazini, D., Gelfuso, M.V., Nascimento, T.A.C., Fonteles, E.F., “A Utilização da Simulação Computacional na Confeção de Órteses Alternativas para Membros Superiores”, *Revista Tecnologia* (UNIFOR), Fortaleza, **25**(1), 74-79 (2004)
- [27] Giuliatti, S., Santo, M., Faria Junior, M., Quintale Junior, C., “A Simulação Computacional Aplicada na Área Médica”, In: 3 CONIC - Congresso de Iniciação Científica de Ribeirão Preto, 2002, Ribeirão Preto, Anais de Pesquisa da Universidade de Ribeirão Preto, **1**, 122-122 (2002)
- [28] Guello, G.A., Bitencourt, T., Proença, S.P.B., “Simulação Computacional de Estruturas de Concreto por Meio da Mecânica do Dano”, South-American Congress on Computational, Mechanics, Santa Fé, *Mecânica Computacional*, **21**, 957-967 (2002)
- [29] Dórea, F.T., Miranda, R.F., Machado, H.A., “Simulação Computacional do Ambiente Térmico e Estrutural de Veículos Espaciais”, VIII Encontro Interno e XII Seminário de Iniciação Científica da UFU, Uberlândia – MG, *Anais do VIII Encontro Interno e XII Seminário de Iniciação Científica da UFU*, Uberlândia - MG, EDUFU, **1** (2008)
- [30] Costa, A.A., “Aperfeiçoamento do Método FETD para Simulação de Descargas Elétricas Não-lineares”, Curitiba, Dissertação: (Mestrado em Engenharia Elétrica). Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica - Universidade Federal do Paraná, UFPR (2007)
- [31] Tonon, T.R., Tutorial MATLAB 6.5. Disponível em: <www.ime.unicamp.br/~marcio/tut2005/matlab/046655Thais.pdf> Acesso em 20 de julho de 2009, (2009)
- [32] Santos, R.J., Introdução ao MatLab, Departamento de Matemática – ICEX, Universidade Federal de Minas Gerais (2005)
- [33] Silva, J.G.S., Lima, L.R.O., Ferreira, A.R., Moura da Silva, Mattos, A.R., “Uma Experiência Didática com Base no Emprego do Matlab nos Cursos de Graduação da Faculdade de Engenharia da UERJ”, World Congress on Engineering and Technology Education - WCETE 2004, Georgia - EUA: Education Society Publications - IEEE, **1**, 1-5 (2004)
- [34] Miranda, A.T., Albuquerque, M.P., “Introdução ao MatLab”, Centro Brasileiro de Pesquisas Físicas, CBPF-N.T-002/2007 (2007)
- [35] The Mathworks, “Symbolic Math Toolbox for Use With MatLab, MatLab User's Guide, version 6”, (1999)
- [36] Ashby, M.F., *Materials Selection in Mechanical Design*, Pergamon Press (1992)
- [37] Forcellini, F.A., “Projeto para Manufatura”, Apostila de aula (não publicado). Departamento de Engenharia Mecânica, UFSC – Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis (2003)
- [38] Timoshenko, S., *Resistência dos Materiais*, vol. 2, Ed. LTC S. A., Rio de Janeiro (1975)
- [39] Doebelin, E.O., “Measurement Systems. Application and Design”, 4th ed. Editora MacGraw-Hill, Inc. EUA, (1990)
- [40] Carmo, P.F., “Simulação Computacional e Representação Gráfica Digital da Superfície do Diagrama Circular da Célula de Carga Usando o Software MatLab”, X Congresso Ibero-americano em Engenharia Mecânica - CIBEM10, Porto, Portugal (2011)

MATERIAL SELECTION AND LOAD CELL DIAPHRAGM SIMULATION

Abstract – The material selection and the graphic simulation of surfaces are present in all areas. At material selection it is possible to find from the simplest projects such as a simple fixation equipment to modern equipments for space traveling. In the case of graphic simulation we can find it in electronic games in a cell phone and in medicine as well, where the creation of images of internal organs makes possible diagnosing diseases that, in other times, would be possible only through complex and aggressive surgical procedures. Thus, material

selection and graphic simulation of surfaces provide support to experiments and possibilities like movement, interactivity and commutation. The objective of this paper is to select the material and the simulation of the load cell diaphragm by using the MatLab software. A general view of modeling techniques of surfaces applied on the graphic representation is provided, as well as its basic concepts and material selection process. The paper is structured in a specific study which enables the analysis of its proposal. It is possible to conclude through this paper that the material selection and the graphic simulation of digital surfaces present a strong interaction with calculus, geometric design, and computational simulation, helping and contributing with design professionals.

Keywords – Material Selection, Load cell, Computational simulation, Circular diaphragm.